ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA EMNİYETLİ VE GÜVENLİ ÇALIŞMAYA İLİŞKİN ESASLAR VE UYGULAMALAR

Fundamentals and Practices for Safe Operation of Industrial Robots

YAZARLAR

Dr. Öğr. Üyesi Rüştü UÇAN
Ali Orhan KARACIĞAN
Erhan ESKİCUMALI

TRANSLATORS

Ceren UÇAN
Dr. Nafiseh FARAJIRAD

2026

ÜSKÜDAR ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI - 126
İSG SERİSİ - 10

ÜSKÜDAR
ÜNİVERSİTESİ
YAYINLARI

www.uuyayinlari.com

ÜSKÜDAR ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI - 126
İSG SERİSİ - 10

ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA EMNİYETLİ VE GÜVENLİ ÇALIŞMAYA İLİŞKİN ESASLAR VE UYGULAMALAR

Editörler
Dr. Öğr. Üyesi Rüştü UÇAN
Ali Orhan KARACIĞAN
Erhan ESKİCUMALI

Kapak ve Grafik Tasarım
Esra ULUTAŞ

ISBN
978-625-91976-4-7

Yayıncılık Sertifika No
69591

Baskı Tarihi
2026

Baskı Sayısı
1. Baskı (Şubat 2021) Efe Akademi
2. Baskı (Mart 2022) İKSAD Yayınevi
3. Baskı (Ağustos 2026) ÜÜ Yayınları

İletişim Bilgileri
www.uskudar.edu.tr – yayin@uskudar.edu.tr
Tel: 0216 400 22 22 / Faks: 0216 4741256
Altunizade Mah. Üniversite Sk. No: 14
Pk: 34662 Üsküdar / İstanbul / Türkiye

Copyright © 2026

Fikir ve Sanat Eserleri Yasası gereğince bu eserin yayın hakkı anlaşmalı olarak T.C. Üsküdar Üniversitesine aittir. Her hakkı saklıdır. Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir. Bu kitabın hiçbir kısmı yayıncısının yazılı izni olmaksızın elektronik veya mekanik, fotokopi, kayıt ya da herhangi bir bilgi saklama, erişim sistemi de dahil olmak üzere herhangi bir şekilde çoğaltılamaz, Kitapta yer alan içeriğin sorumluluğu yazara aittir.

ENDÜSTRİYEL ROBOTLARDA EMNİYETLİ VE GÜVENLİ ÇALIŞMAYA İLİŞKİN ESASLAR VE UYGULAMALAR

YAZARLAR

Dr. Öğr. Üyesi Rüştü UÇAN

Ali Orhan KARACIĞAN

Erhan ESKİCUMALI

Önsöz

1960'lı yıllarda başlayan ve günümüze kadar süren endüstriyel robotlarda güvenli çalışmaya ilişkin esaslar ve uygulamalar, artan bir ivmeyle süren dijitalleşme süreci pandeminin başlamasıyla birlikte çok daha büyük bir önem kazanmıştır. Endüstri 4.0'ın en önemli parçalarından olan rutin ve sıkıcı işlerde kullanılan işbirlikçi robotlar; klasik endüstriyel robotlarla birlikte pandemi döneminde sağlıktan gıdaya, otomobilden metal endüstrisine kadar yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu robotların başlangıç veya uygulama süreci bu iş birliği içerisinde güvenle kullanılabilir hale gelmeleri robotların kullanımı özellikle robotlarla birlikte çalışma güvenliği açısından daha fazla bilgi sahibi olunmasını gerektirmiştir. Bu nedenle gelen talepler üzerine daha önce *"İş Birlikçi Endüstriyel Robotlarda İş Güvenliği Yaklaşımı"* ismini verdiğimiz kitabımızı tekrar gözden geçirerek uygulama ve güvenliği ilişkin ayrıntılı bilgilerle donatarak yeniden kaleme almak zorunda kaldık. İlk iki baskıyı; 1. Baskı (Şubat 2021) Efe Akademi (Türkçe) ve 2. Baskı (Mart 2022) İKSAD Yayınevi (Türkçe) olarak gerçekleştirdik.

Bu kitabın ilk baskısının yayımlandığı 2021 yılından bu yana, endüstriyel robot emniyeti alanında önemli gelişmeler yaşandı.

Özellikle ISO 10218-1 ve ISO 10218-2 standartları, 2025 yılında yayımlanan yeni versiyonlarıyla birlikte önemli güncellemeler içermektedir. Bir konuyu derinlemesine kavrayabilmek için, öncelikle onun geçmişini ve bugüne kadar geçirdiği evrimsel süreci doğru anlamak gerekir.

Konfüçyüs'ün de dediği gibi:

"Study the past if you would define the future."

(Geçmişi incele ki, geleceği tanımlayabilesin.)

Bu bakış açısıyla, yeni gelişmeleri anlamlandırmak ve doğru konumlandırmak için geçmişin sağlam bir şekilde kavranması büyük önem taşımaktadır.

Bu nedenle, yeni bir bölüm eklenerek; ISO 10218 robot emniyet standart serisinin 2025 revizyonlarının başlıca konuları hakkında genel bir bilgilendirme olarak sunduk.

Kitabımızın, endüstriyel robot güvenliği alanında çalışan profesyoneller, mühendisler ve araştırmacılar için güncel, sahaya uygulanabilir ve yol gösterici bir kaynak olmasını diliyorum. Bu baskıda ilk kez İngilizce çeviriye yer verilmiştir. Bu çeviriyi büyük bir özveriyle gerçekleştiren Ceren Uçan ve Dr.Nafiseh Farajirad'a çok teşekkür ederiz.

Kitabın faydalı olması dileğiyle…

10.08.2026

Dr. Öğr. Üyesi Rüştü Uçan
Ali Orhan Karacığan
Erhan Eskicumalı

Teşekkür

Kitabımızın hazırlanması sürecinde yardımlarını esirgemeyen ve bizlere destek olan, Sn. Nurdoğan İnci, Doç. Dr. Müge Ensari Özay, İrem Karacığan ve Necmi Türer'e teşekkürü bir borç biliriz.

Yeni baskının hazırlanmasındaki özverili emekleri için Bülent Tellan, Fatma Özten ve Esra Ulutaş'a teşekkürlerimizi sunarız.

Ağustos 2026

Dr. Öğr. Üyesi Rüştü Uçan
Ali Orhan Karacığan ve
Erhan Eskicumalı

İÇİNDEKİLER

Önsöz **3**
Teşekkür **5**
İçindekiler **7**
Simgeler Ve Kısaltmalar Dizini **9**

1. Endüstriyel Robot 11
1.1. İnsan Robot İş Birliği 11
1.2. İşletmede Robotla Yapılacak İlk Otomasyon Girişiminde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar 12
1.3. Otomasyon Zorlukları Yaratan Yedi Faktör 14
1.4. Bir Kobot Dağıtım Ekibi Oluşturma 15
1.5. Kobotların Yararları 15
1.6. Yönetim ve İşgücünün Bir araya Getirilmesi 16

2. Kobot ve Unsurlar 17
2.1. Kobot Tasarımında Üzerinde Durulan Temel Özellikler 19
2.2. Doğru Sensörlerin Seçilmesi 21

3. Geleneksel Robotlardan Kolaboratif Robotlara Geçiş Süreci 23
3.1. Kolaboratif Robot Tasarımı için 15066'nın önerileri 23

4. Kobot ve Risk Değerlendirmesi 28
4.1. Kobotlarda Güvenlik İçin Tasarımın Temel İlkeleri 28
4.2. Kobot Risklerini Anlamak için Kaynaklar 28
4.3. Riskin Değerlendirilmesi 29
4.4. Kolaboratif Robot Risk Değerlendirmesi 30

5. İSG Açısından Kolaboratif Robotlar ve Uygulamalar 32
5.1. Robot Seçimi Sırasında İş Güvenliği Açısından Alınması Gereken Önlemler 32
5.2. Kolaboratif Robotlarda Kazaya Neden Olabilecek Beklenmedik Hareketler 34

6. İnsan ve Robot İş Birliğinde Güvenlik ve Ergonomi 35
6.1. Endüstriyel Robot Güvenliğine Giriş 36
6.2. Endüstriyel İnsan-Robot Etkileşiminde İş Güvenliğinin Temelleri 36
6.3. Endüstriyel İşbirlikçi Robotik için Ana Güvenlik Standartları 37
6.4. Teknik Şartname ISO TS 15066 (2016) ve İşbirliğine Dayalı İşlemler 37
6.5. İnsan Merkezli Tasarım (HCD/Human Centered Design) ve Ergonomi 38
6.6. İnsan-Robot İşbirliğinde Ergonomi 39
6.7. Risk Değerlendirmesi İçin Yeni Metodolojilerin Geliştirilmesi 40

7. Robot Bilimde Siber Güvenlik Riskleri 42
7.1. Robotikte Siber Güvenliğinin Önemi 43
7.2. Robotikte Mevcut Güvenlik Durumu 43
7.3. Robotlar Arasında Siber Güvenlik Risklerinden Kaçınmak İçin Bazı Azaltma Stratejileri 45

8. Robotikte Uyulması Gereken Bazı Etik Kurallar 47
8.1. Siber Güvenliği Sağlamak İçin Gerekli Robotik Yasalar 47

9. Kolaboratif Robotlarda Risk Azaltma ve Risk Değerlendirme 48
9.1. Quebec'ten Örnek Olay İncelemesi 55
9.2. İşbirlikçi Robotik Uygulamalar için Risk Değerlendirme Süreci 57
9.3. İşbirlikçi Robotlarda Risk Değerlendirmesi 60
9.4. İnsan-Robot İşbirliğinde Resmi Doğrulama Yoluyla Güvenlik Analizi 60
9.5. Safer-Hrc Metodolojisine Genel Bakış 62
9.6. İşbirlikçi Robotlar ve Risk Analizi 62
9.7. İşbirlikçi Robotlarla Çalışırken Çarpışma ve Yaralanma Kriterleri 72
9.8. ISO Teknik Şartname Taslağına İlişkin Gelişmeler 73
9.9. İşbirlikçi Robotların Güvenliği 74

10. Kolaboratif Robotlarda Standartlar, Teknik Şartnameler ve Mevzuat 76
10.1. Makine Emniyeti Çalışmaları 77
10.2. Kolaboratif Robot Sistemlerinde Emniyet Kuralları 78
10.3. Robot Donanımı ve Çevresi ile İlgili Emniyet Gereklilikleri 79
10.4. Robotun Entegre Edildiği Sistemle İlgili Olarak Alınması Gereken Diğer Önlemler 80

11. Sistem Güvenliği ve Risk Değerlendirmesine İlişkin Metodoloji ve Yaklaşımlar 80
11.1. Daha Güvenli Bir İnsan Robot Etkileşiminin Tanımına Sistemik Yaklaşım 80
11.2. Kolaboratif Çalışma Tesisi İçin Risk Değerlendirmesi ve İş Güvenliği Analiz Yaklaşımı 84
11.3. Üretim Ortamları İçin İşbirlikçi Robotik Siber Fiziksel Sistemlerin Geliştirilmesi Metodolojisi 86
11.4. İşbirlikçi Bir Çalışma alanında Güvenli İnsan- Robot İşbirliği İçin Siber Fiziksel (CPS / Cyber Physical System) Yaklaşımı 92

12. Risk Analiz Yaklaşımları 98
13. Ekler 102
14. Uygulamalar 115
15. Sonuç Ve Öneriler 144
16. 2025 Yılındaki Yenilikler: Robotik Emniyet Standartlarında Yeni Dönem 147
17. Kaynakça 151

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	
DOF	Altı Serbestlik Derecesi (Six Degrees Of Freedom)
ANSI	Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (The American National Standards Institute)
BLANKING	Işık Perdesi ile Korunan İş Birlikçi Alanının Parçalarının İçine Opak Bir Malzemenin Sokulmasına Makinenin Durmasına Neden Olmadan İzin Verilen Güvenlik Isı Perdelerinin Yardımcı Fonksiyonu
CC	Hesaplama Bileşeni (Computational Component)
CE	Eşzamanlı Mühendislik (Concurrent Engineering)
CEN	Avrupa Standardizasyon Komitesi (Committee Of European Norms)
CEN	Avrupa Standardizasyon Komitesi (European Committee For Standardization)
CENELEC	Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (European Committee for Electrotechnical Standardization)
CERA	Kompozit Ergonomi Risk Değerlendirmesi (Composite Ergonomics Risk Assessment)
COBOT	İşbirlikçi Robotlar/Kolaboratif Robotlar/Kobot (Collaborative Robots)
CPPS	Siber-Fiziksel Üretim Sistemleri (Cyber-Physical Production Systems)
CPS	Siber Fiziksel Sistem (Cyber Physical System)
CRCPS	İşbirlikçi Robotik Siber Fiziksel Sistem (Collaborative Robotic Cyber Physical System)
CSA	The Canadian Standards Association
CTL	Hesaplama Ağacı Mantığında (Computation Tree Logic)
CWS	İş Birlikçi Çalışma Alanı (Collaborative Work Space)
DFCA	İşbirlikçi Montaj İçin Tasarım (Design For Collaborative Assembly)
DR	Veri Gecikme Oranı (Delay Rate)
DOE	Deneysel Tasarım (Design of Experimental)
DPU	Kullanıcı Data program Protokolü (UDP/User Dataprogram Protocol)
EAWS	Ergonomik Değerlendirme Çalışma Sayfası (Ergonomic Assessment WorkSheet)
ETSI	Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (European Telecommunications Standards Institute)
FMEA	Hata Türü ve Etkileri Analizi (Failure Mode And Effect Analysis)
FTA	Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis)
HC	İnsan Bileşeni (Human Component)
HCD	İnsan Merkezli Tasarım (Human Centered Design)
HMI	İnsan-Makine Etkileşim Sistemleri (Human Machine Interaction System)
HRC	İnsan Robot İş Birliği (Human Robot Collaboration)
IFR	Uluslararası Robotik Federasyonu (International Robotic Federation)
IMU	Atalet Ölçüm Birimleri (Inertial Measurement Units)
IoT	Nesnelerin İnterneti (Internet Of Things)
ISO	The International Organization for Standardization
JSA	İş Güvenliği Analizi (Job Safety Analysis)
JSI	İş Gerilme Endeksi (Job Strain Index)
KPI	Anahtar Performans Göstergeleri (Key Performance Indicators)
KPIS	Eşit Ağırlıklı Anahtar Performans Göstergesi (Key Performance Indicators)
LLDN	Düşük Gecikmede Belirleyici Ağ (Low Latency Deterministic Network)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	
MAC	Manuel Kullanım Değerlendirme Tablosu (Manual Handling Assessment Chart)
MAC	Orta Erişim Kontrolü (Medium Access Control)
MSD	Kas-İskelet Sistemi Bozuklukları (Musculoskeletal Disorders)
MTTFD	Tehlikeli Arızaya Kadar Geçen Ortalama Süre (Mean Time to Dangerous Failure)
MUTING	Geçici Olarak Devre Dışı Bırakma
NCS	Ağa Bağlı Kontrol Sistemi (Networked Control System)
NIST	Ulusal Bilim ve Teknoloji Enstitüsü National Institute of Science and Technology
OCRA	Mesleki Tekrarlayan Eylemleri (Occupational Repetitive Actions)
OSHA	The Occupational Safety And Health Administration
OWAS	Ovako Çalışma Duruş Analizi (Ovako Working Posture Analysis System)
PC	Fiziksel/ Fiziki Bileşen (Physical Component)
PCB	Baskılı Devre Kartı (Printed Circuit Board)
PFHD	Saatteki Tehlikeli Arıza Olasılığını (Probability Of Dangerous Failures Per Hour)
PHRI	Fiziksel İnsan-Robot EtkileŞimi (Physical Human Robot Interactions)
REBA	Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (Rapid Entire Body Assessment)
RFID	Radyo Frekansı Tanımlama Teknolojisi (Radio- Frequency Identification Technology)
RF-PECVD	Radyo Frekansı-Plazma Geliştirilmiş Kimyasal Buhar Biriktirme (Radio Frequency-Plasma
RIA	Robotik Endüstriler Birliği (Robotic Industries Association)
ROS	Robot İşletim Sistemi (Robot Operating System) **RPN** Risk Öncelik Numarası (Risk Priority Number) **RSS** Alınan Sinyal Gücü (Received Signal Strength) **RT** Reaksiyon Süresi (Reaction Time)
RT	Yankı Zamanı (Reverbation Time)
RULA	Hızlı Üst Ekstremite Değerlendirmesi (Rapid Upper Limb Assessment)
SAFER-HRC	Resmi Doğrulama Yoluyla Güvenlik Değerlendirmesi (Safety Assessment Through Formal Verification In HRC Applications)
SD	Emniyet Mesafesi (Safety Distance)
SEA	Seri Elastik Aktüatör (Series Elastic Actuator)
SIL	Güvenlik Bütünlüğü Seviyesini (Safety Integrity Level)
SMF	Akıllı Mini Fabrika (Smart Mini-Factory)
SRP/CS	Kontrol Sisteminin Güvenlikle İlgili Kısmı (The Safety Related Part Of A Control System)
STAMP	Sistem Teorik Kaza Modeli ve Süreci (Systems Theoretic Accident Model and Process)
STPA	Sistem Teorik Süreç Analizi (System Theoretic Process Analysis)
UC	Güvenli Olmayan Bileşen (Unsafe Components)
UML	Birleşik Modelleme Dili (United Modelling Language)
VC	Sanal Devreye Alma (Virtual Commissioning)
VSA	Değişken Sertlik Aktüatörü (Variable Stiffness Actuator)
WPAN	Kablosuz Kişisel Alan Ağı (Wireless Personal Area Network)
WSN	Kablosuz Sensör Ağı (Wireless Sensor Networks)

1. ENDÜSTRİYEL ROBOT

Çin ‘in üretim imkanlarının bütün dünya ile birlikte Avrupa ve ABD’yi de etkilemesi üzerine Almanya 2011’de Hannover Fuarı’nda Endüstri 4.0’ı gündeme getirmiş, 2012‘de de Alman Robert Bosch GmbH ile Henning Kagermann çalışma gruplarının hazırladıkları dosyaları Alman Hükümetine iletmeleri üzerine 4. Sanayi Devrimi / Endüstri 4.0 resmen başlamış, ABD, Japonya ve Avrupa ülkeleri bir araya gelerek Çin’e karşı 4. Sanayi Devriminin ilk adımlarını atmışlardır.

Akıllı fabrikalar, nesnelerin interneti (IoT), 3D printer, haberleşen- birbirleriyle konuşan makineler ve kolaboratif robotlar gibi çeşitli sloganlarla yola çıkan Endüstri 4.0‘ın en önemli yeniliklerinden biri de kafesler içerisinde, çitlerin arkasında yalnız başına çalışmaya zorlanan robotların kafeslerinden çıkmalarına izin verilmesiydi. Kalifiye programcılar tarafından programlanabilen bu çok pahalı akıllı makineler artık insanlarla birlikte çalışabileceklerdi.

Bu çok pahalı akıllı makineler, aradan geçen yaklaşık 10 yıl içerisinde herkes tarafından kolaylıkla programlanabilen, isteyen KOBİ’ler tarafından bile rahatlıkla satın alınabilecek, esnek ve rutin işleri başarıyla yapabilecek hale gelmişlerdir. Kendilerine ayrılan güvenli çalışma alanında insanlarla birlikte çalışmalarına da izin verilen bu akıllı makinelerin iş birlikçi görevleri sırasında, operatörlerle yakın ilişkileri nedeniyle her iki tarafın olası istemsiz hareketleri, ezilme, sıkışma, yaralanma veya kemik kırılmasına neden olduğu gündeme gelince, daha önce mevcut geleneksel robotlar için hazırlanan standartların yetersiz kaldığı ve yeni teknik düzenlemeler yapılması gerekmiştir.

Geleneksel robotlar kendi başlarına çalışıyor ve izin verilmediği takdirde çalışma alanlarına da girilemiyordu. Kolaboratif robotlar ise birlikte çalıştıkları insanlara destek veriyor bazı proseslerde de onlarla iş birliği yaparak süreci sürdürüyorlardı. Bu iş birliği nedeniyle kendilerine Kolaboratif Robot / Kobot veya İşbirlikçi robot adı verilen bu akıllı makinelerin, insanlarla olan iş birliğinin daha güvenli bir hale getirilmesi için çeşitli sınırlamalar (sınır değerler) belirlenmiş, gerek tasarım sırasında ve gerekse kobotların kullanılacakları sistemlere entegrasyonu sonrasında olası riskler ve tehlikeler için yapılması önerilen risk değerlendirmelerde kullanılacak öneriler ve sınır değerler, özellikle iş birlikçi robotlar için hazırlanan ISO/TS 15066‘da yer almıştır. Bu teknik şartname taslağında ayrıca, makine ve emniyeti ve güvenliği açısından referans alınması gereken ilgili standartlar da tavsiye edilmiştir.

1.1. İnsan Robot İş Birliği

Endüstri 4.0‘ın başlamasıyla beraber yaklaşık 50 yıldır birçok uygulama kullanılan geleneksel endüstriyel robotlar yerlerini iş birlikçi robotlara devretmeye başlamışlardır. Aslında endüstriyel robotların bir devamı niteliğinde olan iş birlikçi robotlar, insanlarla birlikte hem onlara destek olacak hem de onlarla iş birliği içerisinde birlikte çalışabilir olma özelliklerinden dolayı çok daha fazla tercih edilir olmuşlardır. Kobotların, geleneksel robotlar gibi kendileri için ayrılmış özel alanlar yerine, insanlara birlikte çalışabilir olmaları, yapacakları işi kolay öğrenmeleri ve programlamalarının endüstriyel robotlarda olduğu gibi, kalifiye programcılar yerine, bu konuda kısa bir eğitim almış kalifiye olmayan insanlar tarafından da yapılabilir olması onları birçok uygulamada daha çekici bir duruma getirmiş ve birçok uygulamada yaygın olarak kullanılabilir hale getirmiştir.

Kobotlar nispeten yeni bir teknoloji olmasına rağmen, bu onların kullanımı zor olduğu anlamına gelmez. Aslında, kobotlar geleneksel endüstriyel robotlardan daha kolay çalışacak şekilde tasarlanmışlardır. Yakın zamana kadar, robotlar ile bir süreç otomatikleştirilmek istendiğinde, tek seçenek endüstriyel robotlardı. Kobotların kullanımına başlayana kadar, çoğu insanın robotlar hakkında düşündüğü onların büyük, ağır ve pahalı yardımcı elemanlar olduğu idi.

Endüstriyel robotlar, otomotiv, havacılık ve tüketim malları endüstrilerinde olduğu gibi yüksek hacimli üretimin ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirilmişti. Kobotlar, aksine, çoğu küçük ve orta ölçekli işletmelerde bulunan yüksek miktardaki değişik parçaların üretimi için tasarlandı. Aslında, endüstriyel robotlar ve kobotların birçok benzerliği mevcuttur. Kobotların sadece küçük ve orta ölçekli işletmeler için değil, birçok işletme için mükemmel bir uyum sağlayabilecek çeşitli avantajları vardır. (Tablo 1).

Kobotların en yaygın kullanım alanları aşağıda belirtilmiştir:

Makine desteği (yükleme), proses gereği kobot, işlenecek parçayı, makineye yükler ve işleme sonrası makineden alır, bu arada operatör kendisine verilen diğer görevleri yapmaya devam eder,

Kap ve yerleştir, robot parçayı prosese dahil herhangi bir makineden veya banttan alıp, bir sonraki işlem yapılmak üzere sistemdeki başka bir makineye koyar veya ambalaj prosesinde parçaları veya ürünleri kutulara yerleştirir,

Montaj, robot, düşük el becerisi gerektiren basit parça montaj görevlerini yerine getirir, robot basit montaj işlerini tamamladıktan sonra, montajı tamamlanacak olan parça robot tarafından başka bir alana alınır, operatör bu alanda montaj işlemini tamamlar,

Kalite kontrol, robot kalite kontrolü yapılacak parçayı test konsolu üzerine koyar, işlem tamamlandıktan sonra parçayı oradan alınarak kendisine verilen görev doğrultusunda başka bir yere koyar,

Diğer hafif yüklü uygulamalar, robot, temel paketleme, bitirme, yapıştırma ve diğer benzer görevleri yerine getirir. Kobotlar, büyük bir el becerisine ihtiyaç duyulmadığı sürece, insanların yaptığı görevlerin birçok kolay, sıkıcı, tekrarlayan ve katma değeri düşük işleri yapabilir.

Tablo 1: Endüstriyel robot ve kobotların faydalarının karşılaştırılması (Getting Started With Collaborative Robots, t.y.)

	Endüstriyel Robotlar	Kobotlar
Parçaların hareket etmesi	✓	✓
Rota takibi	✓	✓
Uzun süreli otonom şekilde çalışma	✓	✓
Üretkenliğin ve ürün kalitesinin arttırılması	✓	✓
İşçilerde kas/iskelet yaralanmalarının azalması	✓	✓
Güvenlik için sensör ve/veya kafes gereksinimi	✓	
Entegrasyon için kapsamlı robotik bilgisi gereksinimi	✓	
Çok yer kaplar	✓	
Pahalıdır	✓	
Programlana kolaylığı / uzmanlık gerektirmeme		✓
Mevcut çalışma alanına yerleşim kolaylığı		✓
Yeni görev için yapılandırma kolaylığı		✓
Bir görevden diğerine geçiş kolaylığı		✓
Hızlı kurulum		✓

Hangi işlemlerin kobotlar tarafından yapılacağına karar vermek: Robot ve buna ilişkin çalışma hücresi çalışmalarına başlamadan önce, daha önce insanlar tarafından yapılan hangi işlerin ne amaçla otomatik hale getireceği konusunda karar vermek gereklidir. Otomatik hale getirilmek istenen iş robot için uygun olamayabilir veya süreç özellikleri nedeniyle robot istenen verimden çok uzakta kalabilir.

1.2. İşletmede Robotla Yapılacak İlk Otomasyon Girişiminde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

Yapılacak İşin Fizibilitesi: Belirli bir görev otomasyon için iyi bir aday gibi görünse de (belki de sıkıcı ve tekrarlayan olduğu için), kobot için en uygun olmayabilir. Bunun da nedeni, kobot ve insanların farklı yeteneklere sahip olmalarıdır, bazı işler insanlar için çok kolay olmasına karşın, o işler robotlar için oldukça zor olabilir, bu savın tam tersi de geçerlidir, bazı durumlarda insanların yaptıkları işlerde çeşitli nedenlerle tam bir verim alınamaz iken aynı işi robot/kobotların yapması durumunda son derece farklı sonuçlar alınabilir.

Herhangi bir işletmede başarıyla kullanılabilecek kobotun, iki ana özelliğinin olması gerekir:

- Yüksek düzeyde öngörülebilir,
- Tekrarlanabilir,

Yapılacak birçok işte bu iki özellikten biri mutlaka vardır, örneğin pizzacıdaki iş yüksek düzeyde tekrarlanabilir bir iştir, proses sonunda üretilen ürün pizza olmasına karşın, pizzada kullanılan malzeme ve soslar değişkenlik gösterebilir. Ancak bir legonun parçalarının birleştirilmesinden söz ettiğimiz zaman, yapılan işin sonunda elde edilecek ürün öngördüğümüzden farklı olmayacaktır. Bu nedenle kobota yaptırmayı düşündüğümüz işin yüksek düzeyde öngörülebilirlik ve tekrarlanabilirdik özelliklerine sahip olması gerekir.

Görevin Öngörülebilirliği: Manipüle edilecek nesneler her zaman aynı olduğunda ve her zaman aynı yere geldiğinde görevler rahatlıkla tahmin edilebilir.

Öngörülebilir görevlerin bazı özellikleri:

- Sıralı nesneler, her zaman aynı sırada işlem gören bir dizi malzeme, kobot bu işi sürekli tekrarlayabilir,
- Benzer nesneler, aynı veya çok benzer boyutlara, ağırlık aralığına, fiziksel forma sahip nesneler. Bu, takım veya tutucuları değiştirmeye gerek kalmadan ürünler arasında hızlı değişiklikler yapılabilmesini sağlar.
- Düzenli nesneler, küçük değişikliklere sahip nesneleri. Doğru tutucu seçimi ile bazı düzensizlikleri kobot halledebilir, ancak normal nesnelerle çalışmak çok daha kolay olacaktır.
- Düzenli parça sunumu, nesneler bilinçli olarak, tutarlı bir şekilde düzenlenmiştir. Matrisler ve işlem görecek parçaların içinde bulunduğu tepsiler genellikle parça sunumu için kullanılır, sabit matrisleri içeren işlemler otomatikleştirmenin en kolay yoludur, tepsilerde olduğu gibi kobot boş tepsiyi çıkarmak ve parçaların tekrar seçilmesi için aynı noktaya yeni bir tepsi getirmek için programlanabilir.

Görevin Tekrarlanabilirliği: Görevin adımları her seferinde aynı olduğundan ve defalarca tekrarlanabilir.

- Tutarlı Çalışma: Görev, işlem görecek parti içerisindeki nesneler ile nesneleri içeren partiler arasında büyük farklılıklar göstermez,
- Uzun Süreli Çalışma: Operasyon birçok kez tekrar edeceğinden, tek bir seferlik sorun çıkaran işlemi otomatikleştirmek mümkün değildir,
- Yüksek talepli operasyon: Otomasyona en uygun operasyonlar, sürekli olarak büyük miktarda aynı işler yapılır.

Uygulaması Kolay Üç Kobot Görevi aşağıda belirtilmiştir:

Makine Desteği/ Yükleme: Makine yükleme veya makineye destek, en yaygın kullanılan kobot görevlerinden bir tanesidir. Bu görev için robota karmaşık bir programlama yapmaya ihtiyaç yoktur, diğer ekipmanlarla da iletişim kurmaya gerek olmayan bu yöntemde, sistem fazla sensör içermez. Daha çok CNC makinelere, kalite test cihazlarına veya üç boyutlu makinelere parça yüklemesi veya işlenen parçanın makineden alınması işlerinde tercih edilirler. Klasik yöntemlerde bu işleri operatör yaparken yükleme ve boşaltma işlemleri arasında makine başında işin bitmesini bekler, bu işin kobot tarafından yapılması durumunda, katma değeri olmayan bir iş ortadan kaldırılmaktadır.

Seç/Kap ve Yerleştir: Kobotların kullanıldığı en yaygın ikinci kullanım alanlarıdır, ek bir sensöre gerek kalmaksızın, daha çok benzer geometrik Şekilli nesnelerin belirli bir yerden alınarak istenen form veya adetlerde başka bir konumda dizilmesi veya paketlenmesi işlerinde kullanılır.

Dağıtım İşi: Herhangi bir ambalaj malzemesi üzerine etiket yapıştırma veya etiket yazma işleri, rutin işlerin kaldırılması, hızlandırılması ve de hep aynı formatta yapılması açısından kobotlar tarafından başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Robot efektörüne verilecek bir komutla, istenen bir yol üzerinde belirli zamanda aynı hareketlerin yinelenmesi şeklinde gerçekleştirilir. Bu yöntemde de ek bir sensöre gerek yoktur.

Ekstra Sensör Gerektiren İşler:

Bitirme İşlemleri (Kuvvet Sensörleriyle): Son işlem, bir son işlem aracını (cilalama ucu gibi) bir ürünün yüzeyi üzerinde/ parlatmak üzere hareket ettirmek için robotun kullanılmasını içerir. Bu işlem genellikle bir kuvvet sensörü gerektirir, çünkü parlatıcı takım yüzeye sabit bir basınçla uygulanmalıdır. Bir kuvvet sensörü kullanılması gerekiyorsa, kuvvet sensörü robota dakikalar içinde bağlanabilir, bu da entegrasyonu geçmişte olduğundan çok daha kolay hale getirir.

Montaj (Kuvvet Sensörleriyle): Montaj işleri çok çeşitli şekillerde yapılabilir, ancak çoğu zaman montaj sırasında parçaların birleştirilmesi sırasında kontrollü bir kuvvet uygulanması gerekir, bunun için de robota eklenecek bir kuvvet sensörü bu konuda yardımcı olacaktır.

Al/Kap ve Yerleştir (Görüş Sensörleriyle): Alma ve yerleştirme uygulamaları, nesnelerin konumunu ve yönünü algılamak için bir görüntü sensörü ekleyerek daha esnek hale getirilebilir.

1.3. Otomasyon Zorlukları Yaratan Yedi Faktör

Robotların herhangi bir uygulamada kullanılabilmesi için yedi faktörün incelenmesi gereklidir, aksi takdirde bu robotların istenen koşullara getirilmesi daha çok enerji, emek, zaman ve finans maliyetine neden olacaktır. Bu faktörler ilk başta basit görünse de üzerlerinde detaylı çalışılmadığı takdirde, hızla çeşitli risk, tehlike ve sorunlara neden olabilirler. En iyi strateji, küçükten başlayarak ve zaman içinde daha karmaşık projelere doğru yol almaktır.

1) **Yapılandırılmamış Parça Sunumu:** İnsanlar için, gelişigüzel bir arada olan nesneleri yerinden almak, onları kovaya atmak ve attığımız yerden tekrar almak çok kolay olabilir, ancak robotların her ne kadar gelişmiş bir algılamaları mevcutsa da nesneleri doğru ve risksiz bir şekilde alabilmelerini sağlamak için düzgün bir yapılandırmaya ihtiyaçları vardır.

2) **Yaygın Olarak Farklı Nesneler:** Robotlar, birden fazla nesneyi fark edip, buna göre bir yerden alıp başka bir konuma aktarabilirler, farklı geometrik şekilli malzemelerde bu daha kolaydır, ancak benzer şekilli malzemelerde bu sorunun çok iyi incelenmesi gerekir.

3) **Konveyörler:** Fabrika otomasyonunda yaygın olarak kullanılan konveyörler, prosese girecek ürünleri robotun hizmetine sunmak için çok tercih edilen ekipmanlar içerisinde yer alırlar. Hareketli nesneleri tespit etmek için genellikle bir görme sistemi veya parça algılama sensörleri eklenmesi gerekir, robotun doğru konuma taşınması ve hareketli nesneleri kavraması için gelişmiş bir programlamaya ihtiyaç vardır.

4) **Kompleks/Karmaşık Algılama:** Her zaman, her konumda ve her sensörle nesneleri algılamak kolay değildir, sensörün mutlaka proses koşullarını inceleyerek seçilmesi gereklidir. Örneğin, nesnelerin 3D modellerini ve robotun ortamını oluşturan yeni sabit lazer ışık kamera sistemleri ile hem bir nesneyi 3D olarak tespit etmek hem de en iyi kavrama konfigürasyonunu hesaplamak mümkündür. Gerçek çalışma koşullarında, mümkünse minimal düzeyde sensör kullanılmaya çalışılmalıdır.

5) **Diğer Makinelerle Entegrasyon:** Bazı durumlarda, prosesi yürütmek için robotu birden fazla makine ile entegre etmek gerekebilir. Geleneksel endüstriyel robotlarda oldukça karmaşık ve emek isteyen bu işlem yeni nesil iş birlikçi robotlarda oldukça basite indirgenmiş bir işlemle rahatlıkla çözülebilmektedir. Bir makineye yükleme veya boşaltma yapmak için görevlendirilecek bir robot, aynı ara yüzü kullanmaları koşuluyla, uzaktan kumandayla veya kablolu olarak çok kısa bir zamanda diğer makinelerle akuple edilebilir.

6) **Mantık:** İnsanlar doğal problem çözücülerdir. Bir şişeyi yana yatmış durumda görürsek, hemen onu düzeltiriz. İnsanlar mantıklarını kullanarak, cisimleri tutarken veya kavrarken çeşitli tepkiler gösterirler. Ancak robotlar, programlarında kendilerine neler öğretilmişse o kadarını yapabilirler, robota daha fazla yetenekler öğretmeye çalışmak onun programını daha da karmaşık hale getirir. Robotlara verilen komutlar mutlaka kesin olmalı ve tereddütte imkân vermemelidir.

7) **Gelişmiş Kuvvet Kontrolü:** Robotun düz bir çizgi üzerinde hareket etmesini sağlamak çok kolaydır, ancak robotun hareketi boyunca bir kuvvet uygulamasını istemek çok daha zor ve karmaşık bir program gerektirir. Uygulama sırasında robota daha gelişmiş kuvvet kontrolü türleri karmaşık bir program olduğundan, risk değerlendirme sırasında bu noktaların çok ayrıntılı irdelenmesi gerekecektir.

1.4. Bir Kobot Dağıtım Ekibi Oluşturma

Robotları bir işyerine sokmanın en büyük zorluklarından biri, çalışan ekibin robotun işleri ellerinden alacağı korkusunun yenilmesidir. Halbuki robot kullanmanın amacı, insanları işsiz bırakmak değil, monoton ve tekrarlayan işleri ortadan kaldırmak, üretimi artırmak tehlikeli işlerden insanları korumak ve çalışanları katma değeri daha yüksek işlere yönlendirmektir. Bu da üretkenliği, kaliteyi, refahı ve işçinin moralini daha çok artıracaktır. Çalışanlara, bu robotlarla beraber iş birliği yapması gerektiği, bu iş birliği sonucunda ortaya çıkan sonuçların daha dakik, hatasız ve tekrar eden işler için hepsinde aynı kaliteyi sağlayacak şekilde çıktıların oluşacağı ve sağlıkları için riskli olan ortamlarda sağlıklarını dahi koruyabilecekleri bilgisi verilmelidir. Robot veya kobotların ilk kez kullanılacağı işyerlerinde küçük timler kurarak çalışanlara robotları sevdirecek eğitimler verdirilmelidir. Aksi takdirde robotların işlerini ellerinden alacağını düşünen çalışanlar hem onlarla beraber çalışma konusunda çekimser davranacak hem de kötü niyetli olanlar robotların çalışmasını engelleyici, belki de kazalara neden olabilecek girişimlerde bulunacaklardır.

Ekip Üyelerinin Oluşturulması:

Başarılı bir kobot ekibi aşağıdaki alanlarda uzmanlaşmış ekiplerden oluşmalıdır;

1. Robotiks (Robotbilim),
2. Proje Yönetimi,
3. Üretim Prosesi,

Kurulacak ekip, Tablo 2'de belirtilen on görevi yerine getirebilecek nitelikteki üyelerden oluşmalıdır. Projenin büyüklüğüne göre ekipteki üyeler bu görevlerden birkaç tanesini üstlenebilir.

Tablo 2: Kobot ekibinin rolleri (Getting Started With Collaborative Robots, t.y.)

Üretim Müdürü	Programlayıcı
Proje Lideri	Operasyon ve Bakım İşçisi
Proje Koordinatörü	Süreç Danışmanı
Mühendis	Satın Alma Uzmanı
Kurucu	Sürekli Gelişim Uzmanı

1.5. Kobotların Yararları

İşletmede, özellikle bir robotun ilk olarak devreye girmesi aşamasında, çalışanların, iş kaybı, teknolojik belirsizlikler ve projenin başarısız olacağı konusunda çeşitli endişeleri olabilir. Bu endişelerin projenin başlangıcı sırasında ele alınması, daha ilerdeki aşamalarda gündeme gelebilecek bazı önemli sorunların çözümünde yardımcı olacaktır, çalışanları da ikna etmek kolaylaşacaktır.

Kobotların üç önemli yararını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz;

1. Daha Fazla İş Güvenliği:

Birçok fabrikada insanlar robot gelince işlerini kaybedeceklerden endişelenmişlerdir. Halbuki kobotların devreye alındığı birçok tesiste işçiler işten çıkarılmadıkları gibi, daha fazla el becerisi ve insan zekâsı gerektiren, katma değeri daha yüksek işlerde görevlendirilmişlerdir. Uygulama başlatılan bazı tesislerde üretimin arttığı ve yeni işçi ihtiyacı ortaya çıktığı görülmüştür.

2. Daha Az İş Kazası ve Yaralanma:

İşbirliğine dayalı robotların en pratik avantajlarından biri, işyerindeki ergonomik sorunları iyileştirebilmeleridir. Robotların en başarılı oldukları uygulamalardan biri, işçilerin en çok yaralandıkları, tekrarlayan işlerdir. Tekrarlayan hareketler kas-iskelet sistemi bozukluklarına neden olabilir ve bazı endüstrilerde yaralanmalar nedeniyle birçok iş günü kaybedilir. 2007'de Avrupa Birliği'nde yapılan bir çalışmada, kayıp iş günlerinin %35'inin tekrarlayan hareketlerin neden olduğu kas iskelet rahatsızlıklarına neden olduğu saptanmıştır. Ergo-Plus'tan Matt Middlesworth tarafından kaleme alınan bir makalede ise ABD'de, 400,000 kişi, tekrarlayan hareketlerin neden olduğu kas iskelet hastalıkları nedeniyle tedavi görmüş, bunun da maliyetinin 20 milyar USD'den fazla olduğunu belirtmiştir.

3. Daha İlginç İşler:

Robotlar çoklu delik delme gibi sıkıcı işlerde çok iyidirler. Sürekli bir CNC makinesine parça yüklemek veya işlenmiş parçayı almak da sıkıcıdır, buna karşılık, kurulumlar, kalite denetimleri ve robot programlama, çalışanlar için çok daha teşvik edici görevlerdir.

Kimse sıkıcı görevleri yapmak istemez. Bununla birlikte, her görevin birisinin yapması gereken bazı sıkıcı ama gerekli işleri vardır. Bu işleri, süreç incelenerek tasarlanmış bir kobot rahatlıkla gerçekleştirebilir. Sıkıcı bu işleri robota verip çalışanlara da bu ayrıntılar anlatıldığı takdirde, işlerin motivasyonu da olumlu yönde artacaktır. Çoğu zaman, ilk uygulamadan önce çalışanlardaki robot korkusu, ilk robot çalışmaya başladıktan sonra hızla unutulur. İnsanlar, robotun işlerinde onlara ne kadar yardımcı olabileceğini çabucak fark ederler. (Getting Started With Collaborative Robots, t.y.)

1.6. Yönetim ve İşgücünün Bir Araya Getirilmesi

Uygulama seçilip, ekipte yer alacaklar belirlendikten sonra, kobotun tasarım aşamasına geçilebilir. Ekip, tasarıma geçmeden önce, seçilen uygulamanın eksiksiz olarak doğru bir seçenek olduğu konusunda hemfikir olmalıdır, zira ileri zamanlarda çalışanlara da bu konuda açıklamalar yapmak gerekecektir. Tasarımın ilk aşamalarında, kobota ilişkin metrik değerler belirlenecek gerek yönetim ve gerekse çalışanların ikna edilmelerini kolaylaştıracak kilit bilgiler saptanarak bu bilgiler detaylandırılacaktır. Örneğin, yönetimin ikna edilebilmesi, kullanılacak robot üretimi coşturacak gibi belirsizlik belirten cümleler yerine, üretimi %20 artıracak, kalite standartlarımızı geliştirecek fire oranlarımızı %7'den %2'ye indirecek veya bedelini bir sene sonunda ödeyecek gibi sayısal ancak kanıtlanabilir teklifler sunulmalıdır. Bunun için genelde sunulabilecek beş parametre Şunlardır;

Kalite: İnsanlarda, genelde robotların en önemli özelliğinin hız olduğu düşünülür, halbuki robot veya kobaltların en belirgin tarafı, her seferinde kendilerine verilen görevi eksiksiz, aynı zamanda ve aynı şekilde yapıyor olmalarıdır. Bu nedenle kobotların üretim yaptıkları sistemde, her bir ürün bir önceki üretilenle aynı kaliteye sahip olup, onunla aynı süre içerisinde üretilmiştir.

Verimlilik: Kobotların aynı üretim sisteminde kullanıldıkları zaman mutlaka üretimi artırma özellikleri vardır. Bu doğal olarak robotun insana göre daha hızlı çalışıyor olmasından kaynaklanabilir, ancak robotlar 7/24 hiç mola vermeden çalışabilme özelliğine sahiptirler. Bunun için de sayısal bir karşılaştırma yapabilmek için, manuel çalışmadaki net üretim süreçleri ile aynı işi kobotun yapması durumundaki süreçleri çok iyi hesaplamak gereklidir.

Yatırımın Getirisi: Kobotlarda genellikle yatırımın geri dönüşü geleneksel endüstriyel robotlara göre daha çabuktur. Bu sürecin otomatikleştirilmesiyle ilgili maliyetler ile üretimin artması, gelişmiş kalite, 7/24 kullanılabilirlik ve işçilik ücretinin kalkmasının karşılaştırması yapıldığında çıkan sayısal sonuçların ne kadar tatmin edici olduğu mutlaka hesaplanmalıdır. Bazı işletmelerde bu hesaplara, geleneksel anlamda yapılan işin sık iş kazası yaşanan bir bölüm olması ve ciddi iş kayıplarına neden olması durumunda, bu maliyetin de hesaplarda mutlaka yer alması gereklidir.

Zaman: Kobotlar, çalışanlarını üretken zamanını artırabilir. Yapılacak işin kobota devredilmesiyle birlikte, o bölümde çalışan operatör katma değeri daha yüksek bir iş yaparak üretkenliği artırabilecektir, diğer taraftan kobot hiç mola vermeden ve işi yavaşlatmadan çalışacağı için üretim de doğal olarak artacaktır.

Bu aşamada sistemde daha az katma değeri olan işin daha iyi tespit edilmesi ve kobota yeni bir iş verileceği zaman yeni ise başlayana kadar geçecek hazırlık sürelerinin de doru hesaplanması gerekir.

Değer: İşletmelerde değer, müşterinin ödemek istediği her şeyi ifade eder. Bu, katma değer içermeyen tüm işlemlerin gereksiz olduğu anlamına gelmez. Ambalajlama gibi bazı işler yapılmalıdır. Bu görevleri kobotlara atayarak, bu işi yapanlar değer yaratan başka işlemlere odaklanmalıdırlar. Üretim yönetiminde, üretim sürecinde üretim yapan her bir istasyon bir önceki istasyonun müşterisi olduğundan, sisteme kobot ilave edildiği durumda bu kobotun bir sonraki istasyon ile nihai müşteri için yaratılan katma değerin hesaplanması karar verme ve ikna süreçlerini de mutlaka etkileyecektir.

(Kaynak: Getting started with collaborative robots series, t.y.)

2. KOBOT VE UNSURLAR

Gerek çalışanların ve gerekse yönetimin kobota geçilmesi konusunda bütün soruları cevaplanıp, endişeleri giderildikten sonra tasarım sürecine geçilebilir. Tasarım ilk aşamasında öncelikle, projenin kapsamı, roller ve sorumluluklar tanımlanmalı, zaman çizelgesi belirlenmelidir. Yapılacak görevin tanımı, robotun görevleri, robotun yerleşim planı ve hareket alanı tanımlandıktan sonra görevler ve yapılacak işler eşleştirilip kobotun çalışma hücresi detaylandırılır.

1) Kobot tasarımına geçmeden önce, otomasyona geçilmesi ve kobot kullanılmak istenen prosesin süreç analizi yapılmalı, mevcut yerleşim incelenerek, mevcut girdiler, çıktılar ve süreç detayları belirlenmelidir,

2) Kobota devredilmesi düşünülen görevler belirlenmeli, çalışma hücresinde çalışacak robota ilişkin gir-di-çıktı detayları çıkarılmalı,

3) Mevcut durumdaki çalışma alanı ile kobotun çalışacağı iş birlikçi alanlar karşılaştırılmalı,

4) Kobota verilecek görevler netleşip çalışacağı, yerleşim alanı belirlendikten sonra robot/sistem yatırımına ilişkin tüm yatırım harcamaları ve yatırımın geri dönüş süresi belirlenip tasarım işlemi başlatılır.

5) Girdi: Robotun prosesi gerçekleştireceği nesneler neler ve bunlar robota nasıl sunulacak,

- Çıktı: Robotun çalışacağı alandan çıkacak ürün,
- Proses: Robotik hücrenin gerçekleştireceği veya destekleyeceği katma değerli görevler,

Tablo 3: Kobot, Efektör ve Sensörlerin Seçimi Sırasındaki Girdi Özelliklerinin Etkileri (Getting Started With Collaborative Robots, t.y.)

Girdi Özelliklerinin Kobot, Efektör ve Sensör Seçimine Etkisi		
Özellik	**Etkiler**	**Varsayıma Dayanan Uygulama**
Parça Düzenlemesi	• Programlama Seçenekleri • Sensörler	Nesneler rasgele yerleştirildiğinden, onları izlemek için ek sensörler ve gelişmiş programlama gerekir.
Nesne Aralığı	• Nihai Efektör Boyutu	Nesneler, kısa ve kalın bir kavrayıcının erişemeyeceği kadar yakın bir Şekilde paketlenmiştir, bunun yerine dar uçlu kavrayıcı bir kıskaç kullanılmalıdır.
Teslimat Yönetimi	• Programlama Seçenekleri • Sensörler • Nihai Efektör Tipi • Kobot Tipi	Nesneler bir taşıyıcı konveyör üzerinde kobota taşınır, kobotun hareketli nesneyi alabilmesi için karmaşık programlama gerekir.
Paketleme Yöntemi	• Nihai Efektör Tipi	Nesneler kapalı kutularda paketlenmiştir, bu nedenle nihai efektör hem kutu kapağını hem de nesneleri kavramalıdır.

Tablo 4: Kobot ve Nihai Efektör Seçimleri Sırasında Çıktı Özelliklerinin Etkileri (Getting Started With Collaborative Robots, T.Y.)

Kobot ve Nihai Efektör Seçimleri Sırasında Çıktı Özelliklerinin Etkileri		
Özellik	**Etkiler**	**Varsayıma Dayanan Uygulama**
Nesne Boyutları	• Kobot Boyutu • Nihai Efektör Stroku	200 mm bir küp 1 metre hareket etmesi için kavrayıcının stroku en az 200 mm ve kobotun erişim mesafesi 1 m olmalıdır.
Nesne Malzemesi	• Nihai Efektör Tipi	Nesne bir köpük bloksa, nihai efektör bir vakum kabı olmamalıdır. (Aksi durumda kobot bloğu kaldıramaz.)
Nesne Ağırlığı	• Kobot Yükü • Nihai Efektör Yükü	Nesne ağırlığı 5 kg ise kavrayıcının en az 5 kg taşıma kapasitesi olması gerekir- bu da kobotun gerekli yük kapasitesini etkiler.

Tablo 5: Kobot ve Nihai Efektör Seçimleri Sırasında Çıktı Özelliklerinin Etkileri Devamı

Nesne Tipi/Tipleri	• Nihai Efektör Tipi	Kobot çıktıları çeşitli şekil ve boyutlarda parçalar olabilir bu nedenle uyarlanabilir bir tutucu gerekmektedir.
Gerekli Hız	• Kobot hızı • Nihai Efektör Hızı	Hücrenin her saat 150 parça üretmesi gerekiyorsa, kobot ve efektörün buna uyum sağlaması gerekir.

İşbirlikçi çalışma hücresi çıktısı, kobot ve efektör ucu seçimini etkiler.

Proses: Hücre süreci kobot, efektör ve programlama seçenekleri seçimini etkiler. Proses, aynı zamanda robotun boyutunu ve çalışma hücresi boyutlarını da etkiler, çünkü kobotun ihtiyaç duyduğu her şeye sahip olması gerekir.

Tablo 6: Kobot ve Efektör Seçimlerindeki Hücre Süreçlerinin Etkileri ve Programlama Yöntemleri (Getting Started With Collaborative Robots, T.Y.)

Kobot ve Efektör Seçimlerindeki Hücre Süreçlerinin Etkileri ve Programlama Yöntemleri		
Özellik	**Etkileri**	**Örnek**
Görev Tipi	• Nihai Efektör Tipi	Görev kaynak yapmaktır, bu nedenle kobotun nihai efektörü özel bir işlem takımı olmalıdır
Bileşenler arasındaki mesafe	• Kobot Erişimi • Hücre Boyutları	Görev kobotun kendisinden 1 metre uzaklıktaki bir düğmeye basmasını gerektirdiğinde, kobot'un en az 1 metre erişim mesafesi olması veya düğmeye yaklaştırılması gerekir
Görev karmaşıklığı	• Programlama Seçenekleri	Robotik beceriler gibi kolay programlama seçenekleri, karmaşık görevlerin zorluğunu azaltabilir
Arayüz gereksinimleri	• Programlama Seçenekleri	Görev, robotun diğer makinelerle arayüz oluşturmasını gerektirmesi durumunda programlama daha karmaşık olacaktır.

Not: Tablo 6'de kobotun görev haritasını hazırlamak için gerekli ana hatlar mevcuttur.

2.1. Kobot Tasarımında Üzerinde Durulan Temel Özellikler

Yük: Yük, bir kobot'un güvenli bir şekilde işleyebileceği/taşıyabileceği ağırlık miktarını ifade eder. Yakın zamana kadar, kobotlar sadece nispeten hafif nesneler için kullanılıyorlardı. Son yıllarda daha ağır malzemeler için kullanılabilen robotlar üretilmeye başlandı. Robot tasarımında, kaldırma gücü hesaplanırken, mutlaka robot kolu ucundaki tutucu ağırlığının da hesaba katılması gerekir.

Kolun Uzanma Mesafesi: Reach, robotun uç efektörünün tabanından uzaklaşabileceği maksimum yatay mesafeyi ifade eder. Genellikle robotlar büyüdükçe uzanım mesafesi de artar. Ancak, kobotun uzanma mesafesi arttıkça üretim sahasında işgal ettiği alan da daha fazla olacaktır. Robotik haritanın oluşturulması sırasında, robotun çalışacağı alandaki mesafelerin de hesaplanması gerekir.

Tekrarlanabilirlik: Tekrarlanabilirlik genellikle doğruluk veya hassasiyet ile karıştırılır. Geleneksel endüstriyel robotlarda hem tekrarlanabilirlik hem de doğruluk önemlidir, ancak kobotlarda kalitenin de sürekliliğini sağlamak ve her seferinde aynı üretim verilerini almak açısından tekrarlanabilirlik son derece önemlidir. Tekrarlanabilirlik, robotun her seferinde aynı konuma geri dönme yeteneğini ifade ederken, doğruluk, robotun belirli bir programlanmış konuma geçme yeteneğini ifade eder.

Doğruluk o kadar önemli değil çünkü kesin koordinatları yazmak yerine, uç efektörü fiziksel olarak istenen konuma (örneğin elle yönlendirerek) taşıyarak kobotları rahatlıkla programlayabiliriz. Ancak burada önemli olan, kobotu elle hareket ederek bir konuma getirdiğimizde, bu hareketi sürekli olarak tekrar edebilme yeteneği olmalıdır. Bir kobotun tekrarlanabilirliğini mekanik duruşlar veya kuvvet algılama yoluyla geliştirmek mümkündür.

Programlama Kolaylığı: Kobotların en önemli avantajlarından birisi de kolay programlanabilir olmalarıdır. Programlaması kolay olan bu robotlar daha kolay yaygınlaşacak ve programlama konusundaki eğitimler çok kısa sürede tamamlanabilecektir. Ayrıca programlamayı yapabilen operatör sayısının fazla olması, programlamada gündeme gelebilecek riskleri de minimal düzeye indirecektir.

Güvenlik: Kobotlar, insanlarla birlikte güvenli bir Şekilde çalışmak üzere tasarlanmışlardır, ancak her üreticinin ürettiği kobot için güvenlik tanımı aynı olamayabilir. Ancak herhangi bir kobotun, güvenlikle ilgili olarak aşağıdaki asgari kriterleri içeriyor olması gerekir.

- Hangi güvenlik standartlarına uymaktadır (örneğin, ISO / TS 15066, TÜV sertifikası),
- Hangi güvenlik özelliklerini içerir (örneğin, darbe algılama, sınırlı motor gücü, yumuşak dış yüzey),

Kobot güvenliğinin en açık göstergesi, güvenli iş birlikçi robot uygulamaları için önerileri özetleyen ilk teknik şartname olan ISO/TS15066'ya uymaktır. Bir robotun belirli sertifikalara veya güvenlik özelliklerine sahip olması, uygulamanın her zaman güvenli olduğu anlamına gelemeyebilir. Sonradan seçimi yapılacak, son efektörler, aksesuarlar ve doğal olarak güvenliği etkileyecektir, bu nedenle her zaman bireysel ve nihai risk değerlendirmeleri yapılmasında yarar vardır.

Diğer Yararlı Özellikler: Her ne kadar, kobot tasarımında yukarıda belirtilen beş özellik çok önemli ise de bazı uygulamalarda kullanılacak kobotların tasarımında aşağıdaki kriterlerin de üzerinde durmak gerekir. (Owen, 2016)

Ağırlık: Kobotun ağırlığı yerleşimi açısından önemlidir. Örneğin, hafif bir robot işletme içerisindeki bir masaya veya makinenin üzerine monte edilebilir, robota zarar vermeden robot bir operatör tarafından rahatlıkla başka bir konuma taşınabilir. Ancak ağır bir robot, üretim sırasında herhangi bir sarsıntı, titreşim ve yıkılma olmayacak şekilde zemine veya kaideye sağlam bir şekilde sabitlenmelidir, bu durumda da işletmenin farklı bir bölümüne taşınması ve orada çalışır duruma getirilmesi çok kolay değildir.

Hız: Bütün robot üreticileri, hızlarını mesafe olarak metre/sn veya dönüş olarak derece/sn olarak projelerine koyarlar. Geleneksel endüstriyel robotlar için hız ön planda gelirken, kobot üreticileri, kobotun diğer özellikleri hızdan daha önemli olduğundan, Şartnameye hız değerlerini koymaya bile gerek görmezler. Aslında kobotlar insanlarla birlikte çalıştıkları için güvenlik açısından hızın düşük olması çok daha iyi olabilir ancak, kobotun döngü süresinin kısa olması hız değerlerinden daha önemlidir.

İvme/Hız Değiştirme Yeteneği: İvme, bir robotun tam hıza ne kadar hızlı ulaşabileceğini belirler. (Genellikle hem hız hem de hızlanma ayarlanabilir). Yüksek hızda olduğu gibi, çabuk hızlanma da tehlikelidir, bu nedenle bu özellik geleneksel endüstriyel robotlar için kobotlardan daha önemlidir. Kobot ivmesi yavaş, yumuşak ve sabit olmalıdır—asla keskin olmamalıdır— ve yakındaki insanlara robotun hareket ettiğini fark etmek için yeterli zaman vermelidir.

Serbestlik Dereceleri (DoF/Degrees of Freedom): Serbestlik dereceleri veya DoF, robotun temel bir özelliğidir. Bir robotun uç efektörünü konumlandırmak için ne kadar esnek olduğunu gösterir. SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) robotları gibi bazı göreve özgü kobotlar, son efektörün yönünü sınırlayan 5 veya daha az Dof'ye sahiptir. Diğerleri 7 veya daha fazla Dof'ye sahiptir, bu da daha fazla konumlandırma esnekliği sağlar, ancak aynı zamanda daha karmaşık programlama gerektirir. Ancak, çoğu kobotun, son efektörün herhangi bir oryantasyona ulaşması için gereken minimum 6 DoF'si vardır. Bu nedenle, DoF genellikle bir kobot seçerken belirleyici bir faktör değildir.

Çevresel Özellikler: Robotunuz sıvı sıçraması, tozla kaplanması veya diğer çevresel koşullardan etkilenme riski altındaysa, giriş Koruması (IP) derecesi önemli bir özelliktir. IP derecelendirmesi, robotun çevresel tehlikelere dayanma yeteneği ve ekstra koruma gereği hakkında bir fikir verir.

Robot Ömrü: Üreticiler, değişen çalışma koşulları çerçevesinde bir kobot ömrünün 30.000 ile 35.000 saat civarında olduğunu kabul ederler, bu da yaklaşık 4 ile 4,5 yıla karşı gelmektedir. Ancak, CNC makinelerin yükleme işinde görevlendirilen robotlardan 10 yılı aşkın süredir servis verilenlerin sayısı azımsanamayacak kadar çoktur. Kobotların diğer önemli bir avantajı da kolay programlanabilir olmalıdır.

En İyi Son Efektör Nasıl Seçilir: Çoğu kobot kendi son efektörleriyle satılmaz. Nihai efektörlerin kobotların kullanılacakları uygulamalara göre seçilmesi gerekir.

Nihai Efektör Tipleri: Aslında kullanılacak uygulamalara göre birçok çeşit nihai efektör mevcuttur, en yaygın kullanılanları;

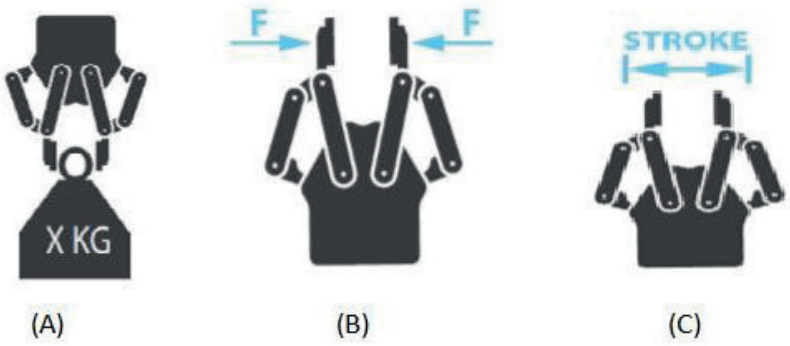
- Tutucu, çok amaçlı uç efektörler çoğu uygulama için uygundur (toplama ve yerleştirme, makine bakımı ve montaj dahil),
- Proses Takımları; boya tabancaları, kaynak ataşmanları ve freze uçları gibi. Bunlar doğrudan iş parçası üzerinde çalışmak için kullanılır,
- Sensör ve kameralar; teknik olarak bunlar aslında —son efektörler olmasa da robotun kolunun ucuna bağlanırlar ve robota gelişmiş algılama yeteneği kazandırırlar,
- Özel Uçlar; müşteri isteği üzerine belli görevi yerine getirmek için üretilmiş uçlar,

Tutucular İçin Beş Önemli Özellik:

1. **Yük:** Kobotun tutabileceği/ kaldırabileceği maksimum yük ağırlığını ifade eder. Proses gereği tutucu ya malzemeyi tamamen kavrar ya da parmak uçlarıyla sürtünme kuvvetinden de faydalanarak, prosese devam eder. Robot kolunun kaldırma gücü 100 kg olsa bile eğer uç elemanın yani tutucu kollarının kavrama/ tutma gücü 5 kg ise bu çalışma hücresinin kaldırma gücü 5 kg ile sınırlandırılmış demektir. **(Resim 1 (A))**
2. **Kuvvet:** Kavrama kuvveti, tutucunun bir nesneye uygulayabileceği sıkma kuvvetini belirtir. Nesneyi parmaklarının arasında tutan tek kuvvet budur. Ağır ve dayanıklı malzemeler için kuvvetin yüksek olmasında bir sakınca yoktur, ancak ağır olmayan veya kırılgan malzemelerde kavrama kuvvetinin düşük olmasına dikkat edilmelidir. Maksimum kavrama gücü tutucu parmaklarının uzunlukları ile de ilgilidir, bazı durumlarda uzun veya geniş parçaların kavranması istendiği durumlarda, özel parmak tasarımlarıyla, uygulanan kuvvet azaltılır. Ayarlanabilir kuvvet tutucular ile daha az kuvvet uygulanarak daha büyük kavrama değerleri elde edilebilir. Örneğin, bazı firmaların ürettiği ayarlanabilir tutucular ile daha küçük kuvvetler uygulayarak 0,92 N'dan 235 N'a (İnformatiq firmasının 2F-85 tutucuları gibi) kadar değerler elde edilebilir. Ancak her firmanın ürettiği tutucularda bu özellik bulunamayabilir. **(Resim 1 (B))**
3. **Strok:** Tutucu ucundaki parmaklar arasındaki tamamen açık ile tamamen sıkıştırılmış durumlar arasındaki mesafeyi gösterir. Tutucu seçilirken, proses gereği kavranacak parçaların genişliğine göre seçim yapılır. 50 mm'lik bir strok, tutucunun 0 ile 50 mm arasındaki parçaları kavrayabildiğini belirtir. **(Resim 1 (C))**

4) **Ağırlık:** Robotun kapasitesi 5 kg ve tutucu ağırlığı 0,8 kg ise, robot tutucu kombinasyonu ancak 4,2 kg'lık parçaların prosesinde kullanılabilir demektir.

5) **Enerji Kaynağı:** Tutucunun enerji kaynağı, kullanabilecek kobotun türünü etkileyebilir. Robot, elektrik, pnömatik, manyetik, vakum veya hidrolik gibi bir tutucunun belirli enerji kaynağı ile uyumlu değilse, bunları birlikte kullanılabilmesi mümkün değildir. Bazı kobotlar önceden bağlı elektrikli veya pnömatik konektörler le birlikte gelir. Bu, bu tip tutuculara daha uygun olacağı anlamına gelir. Genel olarak, elektrikli tutucular pnömatik olanlardan daha esnektir, çünkü ayrı bir basınçlı hava kaynağı gerektirmezler. (Owen, 2016)



Şekil 1: Tutucu (Kıskaç) Çeşitleri ve Özellikleri

2.2. Doğru Sensörlerin Seçilmesi

Günümüzde kullanılan birçok kobot, parçaları daha doğru tespit edebilmek için görme algılamasına ihtiyaç duyar. Robotik sisteme karmaşıklık eklemeden aynı etkiyi elde etmenin daha kolay yolu yoksa mutlaka görme algılaması olan sensörler kullanılmalıdır. Basit uygulamalarda belki hiçbir sensöre gerek olmayabilir ancak operasyon karmaşıklığına göre çeşitli özelliklerde sensör kullanmak gerekecektir. Sensör ilavesi bazı durumlarda sistem sadeleşmesini sağlarken, yanlış sensör seçimi sistemi daha karmaşık hale getirebilir. Ancak doğru seçilmiş her sensör uygulamayı daha sağlam ve güvenilir hale getirecektir. Sağlamlık bir esneklik biçimidir, planlanan değişikliklere uyum sağlama yeteneğini ifade eder. Örneğin, bir robota bir görüş sensörü eklediğinizde, kobotun rastgele yönlendirmelerde sunulan nesneleri algılama ve yakalama yeteneği artar.

Sistem tasarımı sırasında, yeni bir sensör eklemek daha güvenilir bir çalışma ortamı oluşturabilir, ancak sistem biraz daha karmaşık hale geleceğinden, robotun entegrasyonu, programlaması ve bakımı zorlaşacaktır. Ayrıca, sensörlerin eklenmesi bazen sistemin çevikliğini (planlanmamış değişikliklere uyum sağlama yeteneği) azaltır, bu da kobotun bir görevden diğerine geçmesini zorlaştırır. Bu nedenlerden dolayı, genellikle yeni başlayanlar için kobot kullanıcılarının ek sensörler eklemelerini engellenir. Başlangıçta sistemi basit tutmaları ve fazla sensör kullanmamaları önerilir.

Robotlarla entegre edilebilen sensör türleri arasında barkod okuyucular, 3D Lazer tarayıcılar, ışık perdeleri, güvenlik paspasları ve fotoelektrik parça algılama sensörleri sayılabilir. Sisteme yeni sensörler eklemek için aşağıdaki sorulara yanıt aramak yerinde olacaktır;

- Robotun hangi işlevleri önemli ise bu işleri önem sırasına göre sıralanmalı?
- Yeni eklenecek sensör, bu işlevlerin her birinin esnekliğini nasıl geliştirebilir?
- Yeni sensör, robotun genel çevikliğini hangi yollarla azaltabilir?
- Bu, sensörün farklı bir sürümü (örneğin farklı bir kamera sistemi) kullanılarak çözülebilir mi?
- Operasyonun başka bir bölümünün esnekliğini artırmak için sensörden başka hangi görev lerde yararlanılır?
- Esnekliğin bir işletmeye verebileceği en büyük avantajlar nelerdir?

- Robotun çevikliği üzerindeki etkisi işi nasıl etkileyebilir?
- Eklenecek sensör karmaşıklığı artıracağından güvenlik açısından herhangi bir sorun oluştu racak mıdır?

Ek sensörlerden yararlanabilecek uygulamalar; paletleme, makine destek, al ve yerleştir, dağıtım, parlatma/cilalama, montaj, kalite kontrol, kaynak, malzeme test olarak belirtilmektedir.

İş birlikçi Robotlar İçin En Çok Kullanılan 4 Sensör Tipi:

- Görme Sensörü,
- Kuvvet Sensörü,
- Parça Algılama Sensörleri,

Her bir kobot üreticisi firma çeşitli uygulamalara için kendileri veya yan sanayileri aracılığıyla çeşitli sensörler geliştirmişlerdir, sensörlerin birbirlerine göre çeşitli avantajlı ve dezavantajlı yönleri mevcuttur. Görme sensörlerinin 2 ve 3 boyutlu olanları da kullanılacak uygulamalara göre seçilirler, bazı uygulamalarda sadece 2 boyutlu görüş sensörleri yeterli olurken, bazılarında ise güvenlik açısından mutlaka 3 boyutlu sensörlerin seçilmesi uygun olacaktır. 2 ve 3 boyutlu görüş sensörlerinin üstün yanları aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Görme sensörü, kuvvet sensörü ve parça algılama sensörleri, güvenli bir iş birlikçi ortamın oluşturulmasına yardımcı olsalar da daha çok üretimin sağlıklı yürümesi, üretimde duruşların olmaması, bu duruşlardan dolayı üretimin aksamaması ve üretim kaybı olmaması için kullanılan sensörlerdir. İşbirlikçi ortamdaki güvenliğin sağlanması ve iş kazalarına neden olabilecek risklerin minimize edilmesi görevi daha çok güvenlik sensörlerinin iyi seçilmiş ve doğru çalışabiliyor olmalarına bağlıdır.

Parça algılama sensör tipleri; fotoelektrik sensörler, ultrasonik sensörler, lazer sensörler, endüktif sensörler, kapasitif sensörler, manyetik sensörler, mekanik sensörler ve güvenlik sensörleri olarak sınıflandırılmaktadır.

Görme, kuvvet ve parça algılama sensörlerinin aksine, güvenlik sensörleri robota fazla bir yetenek eklemezler. Bunun yerine, bir robotun insan işçileri için tehlike oluşturmamasını sağlamaya yardımcı olurlar. İşbirlikçi, robotlar insanlarla birlikte çalışmak üzere tasarlandıklarından, güvenlik sensörlerinin gerekli olmadığı düşünülebilir. Aslında güvenlik sensörleri, geleneksel endüstriyel robotlarda olduğu kadar hayati olmayabilir, ancak özellikle iş birlikçi çalışma alanında insan varlığının ve robota yakınlığının tespiti açısından oldukça önemli önemlidirler. Güvenlik paspasları, kızılötesi ışık perdeleri, lazer görme teknolojileri, ultrasonik ve fotoelektrik sensörler robotun veya başka bir şeyin sınırlandırılmış çalışma alanına girişleri hakkında sürekli bilgi vererek güvenlik açısından gündeme gelebilecek riskleri engellemeye çalışırlar. (Owen, 2016)

Güvenlik Sensörü Tipleri:

- **Işık Perdeleri** geleneksel güvenlik kafeslerinin sensör eşdeğeridir. Işık perdeleri iki veya daha fazla fotoselin olduğu uzman fotoelektrik cihazlardır. Bu sensörler reflektörlü veya karşılıklı olarak kullanılır. Işık perdesi sensörü, bir veya daha fazla ışın kırıldığında sınırlı bir alana girişi algılar.
- **Güvenlik Paspasları** basınca duyarlı paspaslar, kısıtlı bir bölgenin zeminine serilir ve birisinin üzerinde durduğunu tespit eder. Bir çarpışmanın ne zaman gerçekleştiğini tespit ederler.Çevre ve Kenar Korumaları genellikle hareketli mobil robotlara bağlanan basınç sensörlü şeritlerdir,
- **Tek Işınlı Lazer** aralarında bir lazer ışını bulunan tek bir çift verici ve alıcı modülü içerir. Işının ne zaman kırıldığını tespit ederler.
- **Lazer Tarayıcılar** çalışma alanının 3 boyutlu görüntüsünü oluşturan bir tarama lazeri kullanır. Temel olarak 3 boyutlu vizyonda kullanılan teknolojiyle aynıdır, ancak nesneleri tespit etmek yerine, yalnızca çalışma alanına giren yabancı cisimleri tespit ederler,
- **Koruyucu Robot Kaplaması** bazı iş birlikçi robotlar, bir güvenlik sensörü görevi gören sensörlü bir dış kaplamaya sahiptir. Koruyucu kaplama bir Şeyle çarpıştığında robot durur.
- **Kamera Bazlı Güvenlik Sensörleri** 3 boyutlu görme sistemlerinde olduğu gibi hem lazer teknolojisi hem

de kameralar güvenlik sensörü olarak kullanılabilirler, 3e boyutta iş birlikçi çalışma alanını izleyebilirler,

İşbirlikçi Robotlara Güvenlik Sensörü Eklemenin Yararları:

Güvenlik sensörlerinin faydaları sadece sistemin güvenliğini arttırmaları değildir. Bu sensörler ayrıca robotun performansını artırmaya yardımcı olabilir. Bu avantajlardan bazıları şunlardır;

- Çalışma alanında insan olmadığında robotun daha yüksek hızlarda çalışmasına izin verir,
- Sistemin çalışma alanındaki engellere tepki göstermesine izin vererek ekipmanın zarar görmesini önleyebilir,
- Kabul edilebilir genel sınırlar içinde kalmasına izin vererek, sistemin daha düşük bir risk altında olmasını sağlar,
- Geleneksel çit koruma ile karşılaştırıldığında robot için gerekli zemin alanını azaltma potansiyeline sahiptir,
- Aynı robotun hem iş birlikçi hem de iş birlikçi olmayan görevler için kullanılmasına izin verir. (Owen, 2016)

İşbirlikçi Robotlara Güvenlik Sensörleri Eklemenin Zorlukları

Görme gibi daha karmaşık sensörlerle karşılaştırıldığında, güvenlik sensörlerinin bir sisteme entegre edilmesi genellikle daha kolaydır. Bununla birlikte, güvenlik sensörlerini iş birlikçi robotlarla kullanırken hala bazı zorluklar söz konusudur; Algılama, algılanan nesnenin boyutuna bağlıdır, bu nedenle daha küçük nesneler tespit edilemeyebilir,

- İnce metal veya sac gibi bazı malzemeler, algılama teknolojilerinin bir kısmı tarafından tespit edilemezler,
- Çevredeki malzeme ve havadaki kirleticiler bazı sensörleri etkileyebilir,
- Birbirine çok yakın yerleştirilmiş yakınlık sensörleri birbirine müdahale edebilir (Owen, 2016).

3. GELENEKSEL ROBOTLARDAN KOLABORATİF ROBOTLARA GEÇİŞ SÜRECİ

Kolaboratif robotların tarihi geleneksel robotların tarihi kadar eskilere dayanmıyor, özellikle 2011'de Endüstri 4.0'ın başlamasıyla birlikte kolaboratif robotlara dönüşüm hız kazanırken yeni üretim hatlarının büyük bir kısmında kolaboratif robotlar (kobot) kullanılmaya başlanmıştır. İlk başlarda EN ISO 10218-2'de kolaboratif robotlardan detaylara girmeden bahsedilmişti, ancak kolaboratif robotlarda yeni ekipman ve bileşenlerin kullanılmasıyla beraber bu standardın yetersiz kaldığı görülmüştür. Yeni standartların oluşturulması zaman alacağından ISO/TS 15066 Robotlar ve Robotik Cihazlar-Kolaboratif Robotlar başlığı altında ilk tanımlamalar yapılarak, iş birlikçi çalışma ortamında robotla operatörün iş birlikçi alanda çarpışmalarına ilişkin çeşitli güvenlik değerleri risk değerlendirmesi yapacakların dikkatlerine sunulmuştur.

3.1. Kolaboratif Robot Tasarımı için 15066'nın önerileri

Kolaboratif (iş birlikçi) robotların standartlarıyla temel bilgiler, ISO 10218-2 standartlarında belirtilmiş olsa da asıl detaylar ISO/TS 15066'da anlatılmaktadır. Bu standartta anlatılanlar ve risk değerlendirmesi robot sisteminin yanı sıra aşağıdaki hususları da kapsar;

- Operasyon sırasında robot tarafından parçaları kavrayan tutucuların, parça fırlamasını engellemek yönetimi,
- Sanal çitlerin güvenliğin doğrulamak için bilgilerin robota gönderildiğinden emin olmak,
- Robot hücresinin ve robot üzerindeki keskin kenarların belirlenmesi,

- Robota insan veya herhangi bir cisim temasıyla ilgili güvenli mesafenin hesaplanması,

Kolaboratif robotlarda risk değerlendirme yöntemi olarak PL değerlendirme (Standart 13849-1 ve SIL (Standart) 62061 kullanılır, bunlar genelde aşağıdaki kriterlerden oluşur;

- Maruziyet sıklığı,
- Üzerine durulan riskin nasıl bir yaralanmaya neden olabileceği,
- Söz konusu riskten korunma olasılığı,
- Robot üreticisi firma, robot üzerindeki komponentleri, robotun doğasında olan ve de robotun çalışacağı uygulamada söz konusu olabilecek riskleri göz önüne alarak seçmelidir, bütün komponentler risk değerlendirmesi sonucunda ortaya çıkacak güvenlik seviyesi (SIL Standart 62061/PL Standart 13849-1) ile uyumlu olmalıdır.

EN 62061'e göre riski aşağıdaki değerlere göre tahmin ederek hesaplama yapabiliriz.

1. Maruz kalma sıklığı ve süresi **(Fr)**
2. Zararı önleme ya da azaltma olasılığı **(Av)**
3. Tehlikeli bir olayın meydana gelme olasılığı **(Pr)**
4. Yaralanma şiddeti **(Se)**

SIL (Emniyet Performans Bütünlüğü Seviyesi) ve **PL (Performans Seviyesi)** yukarıda belirtilen standartlarla IEC/EN 6149-1 standardının uygulanmasıyla standart hale getirilmiş değerler olarak risk değerlendirmesi açısından oldukça önemli kolaylık sağlarlar.

Şunlara uygun olarak uygulamalarda kullanılabilir	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
EN ISO 13849-1		PL c	PL d	PL e
EN/IEC 62061		SIL 1 ve SIL CL 1	SIL 2 ve SIL CL 2	SIL 3 ve SIL CL 3

Şekil 2: **EN ISO 13849-1 veya EN/IEC 62061 göre SIL (Matthias, 2017)**

EN ISO 13849-1 veya **EN/IEC 62061** standartlarına uygun olarak yapılacak tasarım ve uygulamalarda **SIL/PL bağlantıları** 10/5/2015 itibariyle AB'de yasal hale getirilmiştir. Bu standartlar, sektöre ait özel standartları da içerir ve tasarımdan uygulama başlangıcına kadar olan tüm detayları kapsar.

EN 62061'e göre riski aşağıdaki değerlere göre tahmin ederek hesaplama yapabiliriz.

- Maruz kalma sıklığı ve süresi **(Fr),**
- Zararı önleme ya da azaltma olasılığı **(Av),**Tehlikeli bir olayın meydana gelme olasılığı **(Pr),**
- Yaralanma şiddeti **(Se)**

Aslında robotların kullanımı oldukça eski olup, yukarıda belirtilen standartlara baktığımız zaman bunların birçoğunun temelini geleneksel endüstriyel robotlar için oluşturulan temel bilgilerden kaynaklandığını görürüz. İşbirlikçi robotlarda ise her ne kadar çalışan bir robot var ise de aslında tanımlanan bir sistemdir.

EN ISO 10218-1'de kolaboratif robotlar hakkında detaya girmeden oldukça genel bilgiler verilmiştir. Ancak sistemlerin tasarımında üretici firmaların tasarımda kullandıkları değişken sayısının çok yüksek olması nedeniyle, yeni bir standart olmasa bile üreticilere yol gösterici olmasını sağlamak amacıyla, IS/TS 15066 Robotlar ve Robotik Cihazlar rehberi hazırlandı. Bu belgede iş birlikçi robotların tasarımında kullanılacak birimlere ait temel bilgiler verilirken, insanlarla birlikte çalışması düşünülen bu robotların birlikte çalıştıkları insanlara çarpmaları sırasında kabul edilebilir koşulların neler olabileceği belirtilmiştir.

ISO/TS 15066'daki Yenilikler Nelerdir?

İşbirlikçi robotikte, insanlar ve robotlar üst üste binen bir çalışma alanını kapsayabilirler. ISO/TS 15066, riski kontrol eden ortak bir çalışma alanının tasarımı ve uygulanması için yönergeler sağlar.

ISO/TS 15066'nın arkasındaki temel fikirlerden biri ise:

Robotlar ve insanlar arasında bir temasa izin verilirse ve tesadüfi temas meydana gelirse, o zaman bu temas ağrı veya yaralanmaya neden olmaz.

Bu amaçla, ISO / TS 15066 "ağrı başlangıç seviyesi" verileri, izin verilen maksimum Robot gücü/hızı, tasarım kriterleri ve iş birliği tekniklerinin daha derin bir açıklamasını yapar. En önemlisi, ilk kez, ISO/TS 15066, işbirlikçi robot uygulamaları için risk değerlendirmeleri yapanlara, çalışmak için sabit veri ve formüller sağlar.

Ağrı Başlangıç Düzeyi Verileri:

Almanya'daki Mainz Üniversitesi›ndeki araştırmacılar, ISO Komitesi adına bir ağrı başlangıcı çalışmasında, 100 denek üzerinde çalışıldı ve kuvvet ve basınç sınırları oluşturulmak üzere, insan vücudunda 29 bölgeye çeşitli değerlerde basınç ve kuvvet uygulaması kararlaştırıldı. Mainz çalışmasının bir sonucu olarak, ISO/TS 15066, insan vücudunun her bir parçası için maksimum kuvvet ve basınç seviyelerinin bir listesi hazırlanmıştır. Bu veriler, robotun aşmaması gereken bir dizi kuvvet / basınç eşiği oluşturmak için kullanılabilir ve robot tasarımını ve entegrasyonunu yönlendirmek için tasarlanmıştır.

İzin Verilen Maksimum Robot Sistemi Gücü / Hızı:

ISO / TS 15066, güç ve güç sınırlı çalışması için tasarlanan işbirlikçi robot sistemleri için önerilen güç ve hız limitlerini özetlemektedir. Belgenin bu bölümü, robotun ayarlanmasına izin verilen maksimum hızı belirlemek için gereken kılavuzu içerir, böylece, robot teknolojisinin önemli bir unsuru olan Robot Kolu Sonu Takımlar (End of Arm Tooling/EOAT) ve parça robot sistemi için maksimum değeri aşmaz.

ISO/TS 15066'ya göre dört çeşit kolaboratif çalışma yönteminden bahsedilmektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi ilk 3 yöntem geleneksel endüstriyel robotlarda kullanılan yöntemler idi, güç ve kuvvet sınırlama yöntemi 15066 ile birlikte doğrudan iş birlikçi robotlar için tasarlanmış bir yöntemdir. Bu nedenle, endüstriyel robotlarla ilgili çalışma yöntemi ve standartlara yönelik ayrıntılar başka bölümlerde verildiğinden burada sadece güç ve kuvvet sınırlama yöntemine ilişkin ayrıntılar üzerinde durulacaktır.

- **Güç ve kuvvet sınırlama (power and force limiting) yöntemi:**

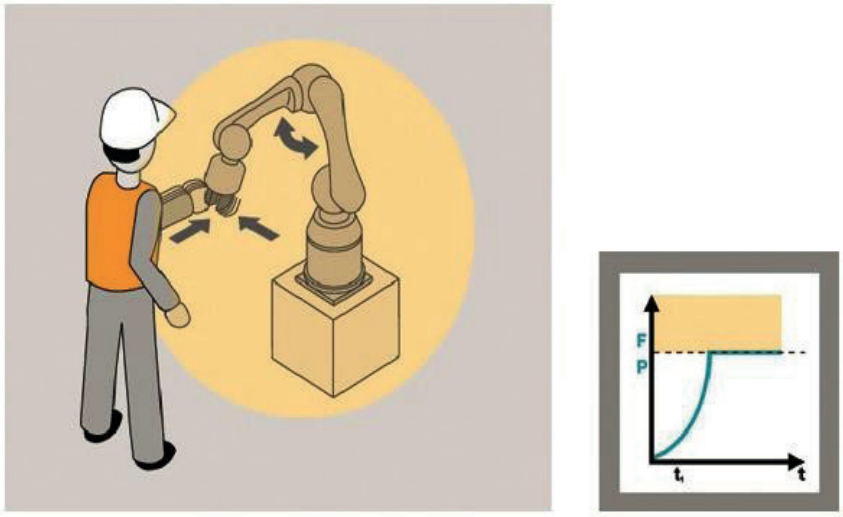
İlk üç yöntemde, operatörle kolaboratif robotun aynı anda iş birlikçi alanda hareket halinde olmasına izin verilmiyor, izleniyor, engelleniyordu, bu nedenle de robotla operatörün çalışma olasılığı da yok denecek kadar azdı. Ancak, bu yöntemde iş birlikçi alanda, proses gereği olarak, robotla operatörün iş birlikçi çalışma alanında hareket halinde olmaları gerekiyor, bu yüzden de bu yöntemde ikisi için temas veya çarpışma riskinin mutlaka değerlendirilmesi gereklidir. İlk üç robot sisteminde, izlemek ve sistemi güvenlik altında tutmak için geleneksel robotlarda kullanılan bileşenler yeterli olabilmekteydi ancak iş birlikçi robotlarda bu güvenlik düzeyi yeterli gelmemiş olup 15066'nın da hazırlanmasına neden olan güç ve hız sınırlama yöntemiyle ilgili teknik Şartname gündeme gelmiştir.

Tablo 7: İnsan – Robot Teması (Matthias, 2017)

	Geçici Temas	Yarı Statik Temas
Tanım	İletişim etkinliği kısa (50 < ms) İnsan vücudu kısmı geri tepebilir	Temas süresi "uzatıldı" İnsan vücudu geri tepemez
Limit Kriteri	Tepe kuvvetleri, basınçları, gerilmeler Enerji transferi, güç yoğunluğu	Tepe kuvvetleri, basınçları, gerilmeler
Tasarım ve Kontrol Erişimi	Etkili kütle (robot poz, yük) Hız Temas alanı, maruziyet süresi	Kuvvet (Eklem torkları, poz) Temas alanı, süresi



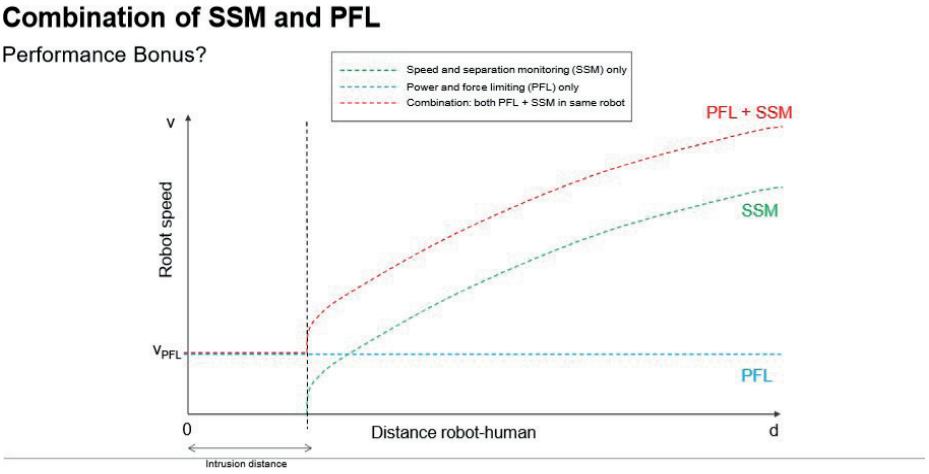
Çarpışmanın etkisini azaltmak, çarpışma sırasında robotun hızını ve uyguladığı kuvveti düşürmek için çeşitli sensörlerden faydalanmak gerekecektir. Aslında kolaboratif çalışma ortamı tanımına en uygun olan bu yöntemde, kazayı önlemekle beraber, kaza sonrasında robotun operatöre vereceği zararları en aza indirgemek için sistem tasarımının ve risk değerlendirmesinin kolaboratif / iş birlikçi çalışmaya en uygun şekilde yapılması gereklidir. Örneğin, robot üzerinde, sıkışma olasılığı olan yerlerde ezilmeyi azaltmak için kolay sökülebilir üniteler, emniyet sviçleri veya soft mafsal denilen ve sıkışma sırasında operatöre daha aza zarar verecek parçalar kullanılmalıdır. Sıkışma sırasında robotların operatörlere uygulamalarına izin verilebilecek kuvvet limitleri ve insan vücudunun maruz kalabileceği kuvvet değerleri ISO/TS 15066 dokümanlarında verilmiştir. Tasarım sırasında varsayılan bu değerler sisten devreye alınmadan yerinde ölçülenmeli ve doğrulanmalıdır.



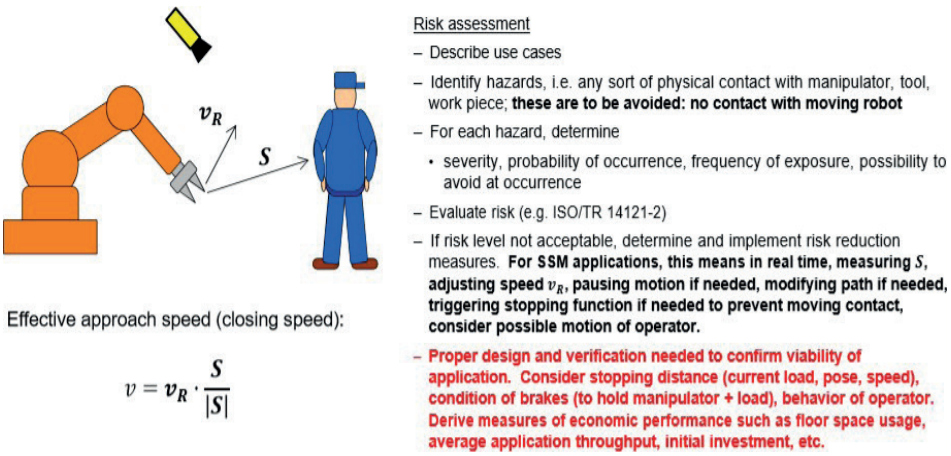
Şekil 3: Güç ve Kuvvet Sınırlama Yöntemiyle İlgili Temsili Resim (Matthias, 2017)

Bu ölçümler, tasarım sırasında kurgulanan senaryo doğrultusunda yapılmalı, ölçüm sonunda azami çalışma hızı ve bir kaza anında robotun operatöre uygulayabileceği maksimum emniyetli kuvvetler belirlendikten sonra sisteme bu bilgiler tanıtılmalıdır. Yapılan bu ölçümler her bir üretim prosesi için farklı olduğundan üretim gamı değiştikten sonra ölçümler doğrultusunda belirlenen yeni değerler yeni prosese tanıtılmalıdır. Yüksek hız istenen, ağır keskin veya sivri parçaların üretim vb. proseslerde iş birlikçi robotların kullanımı uygun

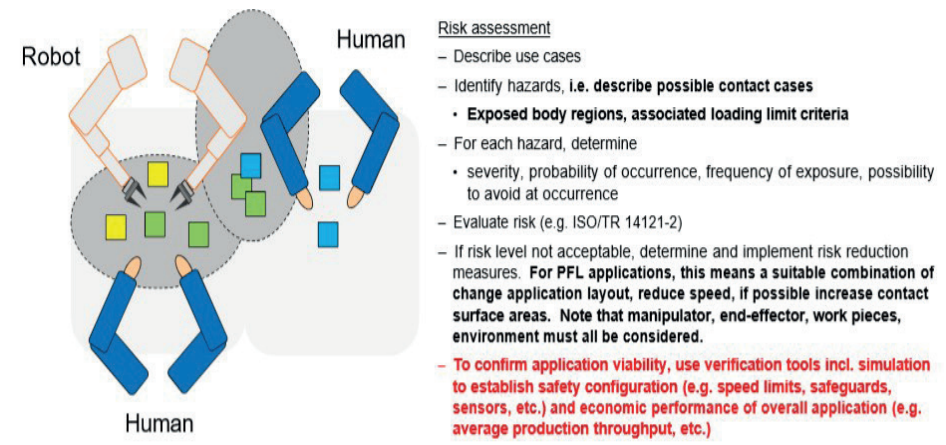
olmayabilir, o yüzden sipariş öncesi robot tasarımı yapan firmayla robota yaptırılacak işlerin detaylı bir şekilde tartışılması, prosesin iş birlikçi robot için uygunluğunu doğrulanması yararlı olacaktır. Riskli ve karmaşık proseslerde genelde bu yöntem tercih edilir ancak bazı proseslerde yukarıda belirtilen sistemlerden ikisinin bir arada kullanılması mümkündür. Örneğin, senaryo doğrultusunda, risk değerlendirmesi yapılırken, güvenlik açısından düşük hızlar uygun görülebilir, bu da düşük üretim hızı demektir, ancak proseste zorunlu olmadıkça operatörün iş birlikçi çalışma alanına girmemesi sağlanırsa, o zaman hız da artırılabilir, bazı karmaşık üretim proseslerinde kolaboratf robotlar da kullanılabilir. Ancak bütün bu tasarımda emniyet ön planda olmalıdır.



Şekil 4: Sınırlandırılmış Güvenli Duruş ile Güç ve Kuvvet Sınırlama Sistemleri Kombinasyonu (Matthias, 2017)



Şekil 5: Planlama ve Devreye Almadaki Zorluklar (Hız ve Mesafe İzleme SSM) (Matthias, 2017)



Şekil 6: Planlama ve Devreye Almadaki Zorluklar – (PFL Güç ve Kuvvet Sınırlama) (Matthias, 2017)

4. KOBOT VE RİSK DEĞERLENDİRMESİ

Risk değerlendirmesi, robotlarla birlikte çalışırken hayatın bir gerçeğidir. İşbirlikçi robotlar, insanlarla birlikte güvenli bir şekilde çalışacak şekilde tasarlanmış olsalar dahi, bunları kullanırken mutlaka bir risk değerlendirmesi yapılması gerekir. Güvenlik sensörleri, performansı düşürmeden bir robotla çalışma riskini azaltmanın iyi bir yolu olabilir. Hız ve ayırma izleme için güvenlik sensörleri kullanılarak, bazen iş birlikçi görevler için de endüstriyel robotlar kullanılabilir.

Bununla birlikte, riski azaltmak için sisteme sadece bir güvenlik sensörünün dahil edilmesi yeterli bir çözüm değildir. Robot yüksek hızlarda çalıştırıldığında, performansı artırmak için tercih edilebilir. Örneğin öngörülen çalışma hızı 250 mm/sn olan bir robota güvenlik sensörü ilavesiyle hız 750 mm/sn.ye çıkarılabilir. Çevresinde operatör olmadığı zaman robot bu hız değerinde çalışmasına devam eder.

4.1. Kobotlarda Güvenlik İçin Tasarımın Temel İlkeleri

Üretim tesislerinde daha önce çeşitli mekanik yöntemlerle, bazı makine ve aletlerin yardımıyla yapılan işler, hızla gelişen yeniliklerle birlikte otomatik makinelerle yapılmaya başlandı, teknolojinin daha çok kullanılmasıyla da birlikte evvelden insanlar tarafından yapılan birçok iş robotlarla yapılmaya başlandı. Aslında onlarca yıldır kullanılan endüstriyel robotlar, son on seneden beri de yerlerini kolaboratif robotlara terk etmeye başladı. Robotların daha hızlı, daha kaliteli ve verimli çalışmalara birçok işletme sahibine çok çekici geldi. Robotların kullanımının artmasıyla birlikte, neden olabilecekleri olası iş kazaları ve tehlikelerle ilgili standart yönetmeliklerin de aynı hızda artmamış olması, kobotların tasarımı ve üretimi sırasında bazı risk değerlendirmelerinin yapılamasını gündeme getirdi. Robot üreticileri her ne kadar tasarım sırasında olası riskler göz önüne alarak tasarım yapsalar dahi, daha sonra bir sisteme entegre olarak çalışacak robotun o işyerinde kendisine verilecek görevi yerine getirirken neden olabileceği olası risklere ilişkin değerlendirmeleri de mutlaka takip etmelidirler, ürettikleri standart kobot çok büyük bir olasılıkla entegre olduğu sistemde bir takım olumsuz tavırlar sergileyecektir.

Geleneksel endüstriyel robotlar, daha çok tehlike oluşturabilecek ağır işleri yaptıkları için mümkün olduğu kadar kendilerine çitlerle ayrılan çalışma hücreleri içerisinde çalışıyorlardı. Kobotların gündeme gelmesi ile birlikte robotların operatörlerle iş birliği içerisinde çalışmaları gerektiğinden, bu iş birlikçi çalışma sırasında her endüstriyel robotlarda gündeme gelmeyen kör noktaların ve robot/operatör temaslarının da incelenmesi gerekli oldu.

4.2. Kobot Risklerini Anlamak için Kaynaklar

Bu robotların "iş birlikçi" olarak adlandırılması ve insanlarla birlikte çalışma hücresi içinde çalışan robotlar olarak faaliyet göstermesi, kobotların güvenli olduğu anlamına gelmez. Uygulama gereği, elinde bıçak tutan bir "iş birlikçi" robotun ek güvenlik önlemleri olmadan çalışması artık hiç de güvenli değildir. İşbirlikçi bir robotik hücresi tasarlarken mühendisler, kobotun amaçlanan uygulamasını ve yerleştirilebileceği ortamı dikkate almalı, ardından her kullanım durumu için bir güvenlik planı geliştirmelidir.

ISO / TS 15066 ve RIA TR 15.606, bugün sektördeki iş birlikçi robotik hücreler için geçerli olan en yeni ve en önemli güvenlik standartlarıdır. Bunlar, dört tür iş birliği robotik hücresinin her biri için güvenlik gereksinimlerini vurgular:

- Sınırlandırılmış güvenli duruş,
- Elle yönlendirme,
- Hız ve mesafe izleme,
- Güç ve kuvvet sınırlama,
- Ek standartlar, iş birlikçi robotik hücrelerde bulunabilecek diğer tehlikeler hakkında ek bilgi sağlar.
- UL 1740 (Robotics and Robotic Equipment)

- ANSI RIA R15.06 (Industrial Robots and Robot Systems)
- CAN/CSA Z434 (Industrial Robots and Robot Systems)
- EN/ISO 10218-1
- EN/ISO 10218-2

4.3. Riskin Değerlendirilmesi

ISO / TS 15066 (RIA TR 15.606) dört farklı tipte iş birliği operasyonunu ana hatlarıyla belirtirken, bugün sektörde kullanılan temel iş birliği formu güç ve güç sınırlamasının öngörüldüğü uygulamadır. Robotla iş birlikçisi operatör arasındaki çarpışmada olası etki sınırlaması, tasarım sırasında,kendiliğinden veya robotun güvenlik dereceli bir kontrol ünitesiyle kuvvet veya hız parametrelerini ayarlama görevi robota kazandırılmıştır.

ISO / TS 15066 ve (RIA TR 15.606) tarafından gerekli görülen değerlendirmenin ilk adımı, EN / ISO 12100 uyarınca bir risk değerlendirmesi yapmaktır. Bu risk değerlendirmesi, iş birlikçi çalışma alanının tamamını, erişimi, açıklıkları ve bir operatörün robotla nasıl etkileşime gireceğini göz önünde bulundurmalıdır. Operatör ve robot arasındaki makul olarak öngörülebilir her temas durumu dikkate alınmalıdır. Değerlendirme sırasında, proseste herhangi bir sabit yapının dahil olup olmadığını ve robot ucundaki efektör ve iş parçası gibi diğer hususların dikkate almak önemlidir.

Risk değerlendirmesi, aşağıdaki iki durumdan her bir temas türünün niteliğini belirlemelidir:

Geçici Temas: Boş bir alanda robotun veya insanın ürküp geri çekileceği temas.

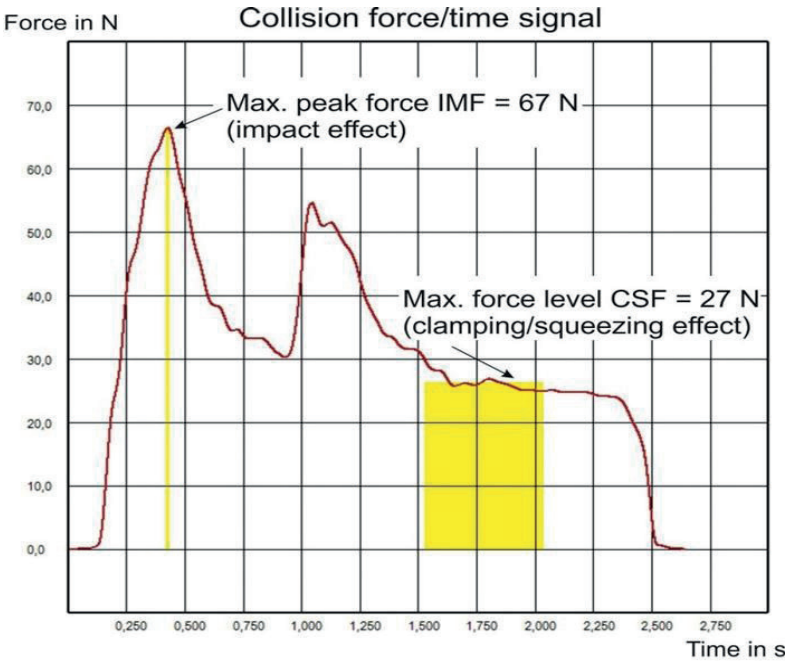
Yarı Statik Temas: Operatör ile robotun bir bölümü arasındaki temas. Bu durumda operatörün herhangi bir bölümü veya organı hareket halindeki robot kolu ile robot hücresi içerisindeki sabit veya hareketli bir makine parçası arsına sıkışabilir.

Temas türüne bağlı olarak, ISO / TS 15066 & (RIA TR 15.606) insan vücudunun her bir parçasına gelebilecek darbe veya sıkıştırmalar için bir darbe kuvveti ve basınç sınırı tavsiye eder. İnsan vücudunun çeşitli yerlerine temas sonucu uygulanan kuvvet sonrasında başlayan ağrı başlangıç seviyelerine ağrı eşiği adı verilir. Vücudun darbe alabileceği olası noktalar belirlendikten sonra bu noktalara çeşitli değerlerde kuvvet uygulanır ve ağrı başlama değerleri belirlenir, her bir temas sonrasında temas durumu belirlenir, sınıflandırılır ve insan vücudunda test edilerek doğrulanır.

Yarı statik temas durumları için, insan vücudunun her bir parçasının temel özelliklerini taklit eden uygun bir test cihazı kullanılarak bu doğrulama yapılır. Test sırasında vücutta olası darbe bölgelerinde sertlikler de farklılık göstereceğinden, test sonucunda çıkarılacak olan ve basınç/ağrı eşiğinin işleneceği haritalarda bu hususa çok dikkat etmek gerekir. Test sırasında uygulanacak en küçük değerden en büyük değere kadar olan basınç değerleri ve vücudun buna olan etkisi haritalarda işlenmeli ve doğrulanmalıdır. Her bir çarpışmadan elde edilen veriler kaydedilir ve ISO / TS 15066 ve RIA TR 15.606'da yayınlanan sınır değerlerle karşılaştırılır.

Geçici temas durumları iki ayrı şekilde değerlendirilebilir. İlk yöntemde, robot sistem kütlesi ve de vücut bölgesi kütlesinin ikisi de hesaba katılmalıdır. Bu, test cihazının serbestçe hareket etmesini sağlayan bir cihaza takılması gerektiği ve ayrıca bu test cihazının da test edilen vücut parçasının etkili kütlesi ile aynı kütle olması gerektiği anlamına gelir. Etkin kütle, ISO / TS 15066'nın (RIA TR 15.606) tablo A.3'ünde tanımlanmıştır. Daha sonra yarı statik prosedürüyle aynı test prosedürü izlenir.

İkinci değerlendirme yönteminde, fiziksel testin aksine matematiği kullanır. Her bir vücut bölgesi için izin verilen maksimum enerji transferi, ISO / TS 15066'nın (RIA TR 15.606) Tablo A.2'sinde verilen maksimum kuvvet veya maksimum basınç değerlerinin bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. Hesaplama, robotun verilen her durum için gidebileceği maksimum hızı gösterecektir.



Şekil 7: Robot Çarpışmasının Kuvvet/Zaman Sinyal Grafiği (Braman, 2019)

4.4. Kolaboratif Robot Risk Değerlendirmesi

Güvenlik standardı, kolaboratif robotu, tanımlanmış ortak çalışma alanı içinde bir insanla birlikte çalışmak üzere doğrudan etkileşim için tasarlanmış bir robot olarak tanımlar. Kolaboratif (İş birlikçi) çalışma alanı, robot sistemiyle ve bir insanın üretim prosesi sırasında iş birliği yaparak, aynı anda görevleri yerine getirmek üzere kendileri için ayrılmış çalışma boşluğudur (çalışma hücresi).

Çalışma hücresi, iş parçası, nihai efektör, fikstürler ve robot tarafından kontrol edilen herhangi bir cihazı içeren robot sistemini kapsar.

Robot ve Robot Sistemleri ve bunların güvenlik gereksinimlerine ilişkin daha fazla bilgi, ISO 10218 Bölüm 1 &2 / ANSI RIA15.06-2012. ISO 10218 bölümler 1 & 2 ve ANSI RIA15.06-2012 harmonize (Harmonize standart, Avrupa Birliği uyum mevzuatının uygulanması için Avrupa Komisyonu tarafından yapılan talebe dayanarak kabul edilen standardı ifade eder) standartlarda mevcuttur.

Gereksinimler: Tüm endüstriyel iş birlikçi robot sistemleri için mutlaka risk değerlendirmesi yapılması gereklidir. Entegratör, ilk risk değerlendirmesinin tamamlanmasından sorumludur. Robot ve operatör(ler) arasında temas olabileceği üzerinde dikkatlice durulmalıdır. Son kullanıcı tasarım sırasında yapılan ilk risk değerlendirmelerine ilişkin bilgileri korumalı ve çalışma sırasında mutlaka bu çalışmaya sadık kalınmasını sağlamalıdır. İşbirlikçi ortamda gerçekleştirilecek prosesin gerektirdiği güvenlik önlemleri ilk değerlendirmedeki bilgilerle birlikte kullanılır hale getirilecektir. Risk değerlendirmesi sırasında, üretim sürecinde yetkisiz kişilerin iş birlikçi çalışmaya ve sisteme yapabilecekleri gereksiz müdahalelere karşı alınması gereken koruyucu önlemleri de gündeme almak durumundadır. Bu değerlendirme sırasındaki kullanılacak detaylı bilgiler, ISO 10218 / ANSI RIA 15.06'da verilmiştir.

Görev Tanımı: Robot hareket etmese bile sistemdeki diğer birimler çalışma halinde olabilir, bu yüzden risk değerlendirmesi sırasında, robotun da içinde yer aldığı sistemin tümü ile birlikte dikkat edilmesi gereken hususlar Şunlardır;

- Operatör hangi sıklıkta ve ne kadar süreyle iş birlikçi çalışma ortamında bulunacaktır,
- Robotun operatöre temas etme olasılığı, frekansı ve her temasın ne kadar süreceği. Eğer temasın baş ve boyunda olma olasılığı yüksekse uygulamanın mutlaka gözden geçirilmesinde yarar vardır.

- İşbirlikçi çalışma alanına giriş veya bu alandan çıkış prosesi ne ölçüde etkilemektedir.
- Eğer çalışma alanına birden fazla operatörün girmesi söz konusu ise sistemdeki kamera, sensör veya diğer algılayıcıların bu olasılık düşünülerek tasarlanması,
- Eğer üretim sürecinde, robota ek görevler verilecek ise sistemdeki izleme ve güvenlik görevleri gözden geçirilmeli, izleme verilecek ek göreve göre yapılmalı,
- Proses sırasında olası çarpmalar sonunda operatörde oluşabilecek sıkışma veya ezilmenin tehlikeli bölgelerde olma olasılığı mevcutsa, bu durum tasarımın yeniden gözden geçirilmesine neden olabilir, ek güvenlik önlemleri alınması düşünülebilir,
- Hangi olağan dışı durumlarda robotun elle kumanda edilmesi gerekebilir,
- Sistemi farklı hızlarda çalıştırma modları, tehlike seviyelerini değiştiriyor mu?
- Her bir uygulamada proses gereği değerlendirilecek aşamalar da farklılıklar göstereceğinden, üretim prosesi ayrıntılı bir şekilde incelenip prosesin tehlikeye neden olabilecek kilit noktaları belirlenmiş mi?

Tehlike Tanımlama ve Risk Azaltma: Gerekli güvenlik önlemleri altında çalışan ve tehlike yaşanmayan geleneksel endüstriyel robotlar, iş birlikçi ortamlarda çalışmaları söz konusu olduğunda yeni tehlikeler gündeme gelebilir. Bu yüzden de endüstriyel robotların iş birlikçi ortamda kobot olarak kullanılmaları sırasında robot kolu çatal veya kıskacı, fikstürü ve parça yönlendirme için tasarımın yeni konsepte göre yeniden yapılandırılması gerekir. Bu yeniden yapılandırma sırasında gözden geçirilmesi gereken hususular Şöyledir;

- İşbirlikçi ortamdaki çalışma sırasında, robot operatöre teması sırasında operatöre zarar verebilecek aşırı bir sıcaklık söz konusu mudur? Örnek olarak robot operatörün göz seviyesinde sıcak yapıştırma işlemi yapan bir tutkal tabancası ile iş yapıyor olabilir.
- Bu durumda sıcak tutkal tabancası hareketinin operatörün göz seviyesine uzak bir konumda çalışacak bir şekilde ve operatörün gözünü koruyacak bir KKD ile koruyacak şekilde tasarlanması gerekir.
- Robot kolu ucundaki kıskaç veya fikstürdeki kuvvet yaralanmaya neden olabilecek düzeyde ise bu kuvvetin azaltılması mümkün müdür? Bu durumdaki tasarım kriterleri, üretim sürecini robot ucundaki kelepçelerin açıp kapama işlemini operatör çalışma alanı dışındayken yapabilir şekilde veya operatörle herhangi bir temas olup operatörün bir kuvvet uyguluyor olması durumunda robot kolunu hemen geri çekebilecek bir şekilde tasarlamak gerekecektir. Bu durumda, daha yumuşak malzeme kullanılarak kenarlar yuvarlatılıp daha geniş temas yüzeyleri oluşturularak gelecek darbenin etkisi azaltılabilir.
- Olası kabul edilemez temas risklerini azaltmak için robot özellikleri ve operatör konumu nasıl değiştirilebilir? Robotun beklenmedik bir şekilde devreye girmesi operatörü ürkütüyor ise, başlama sinyalleri kullanılır veya tekrar başlatma görevi operatöre bırakılır.
- Bir parçanın düşmesi gibi, beklenen ve beklenmeyen her türlü hareket için operatörün olası hareketini düşünmeliyiz. Yorgunluk, stres, refleks, yetenek ve kesintilerde her insanın tepkisi aynı olmayacaktır.
- KKD operatörün çalışmasını etkileyebilir mi? Eldivenler veya operatörün elbisesinin robota dolaşması neticesinde, robotun kurtulmak üzere yapacağı ani hareket daha tehlikeli bir durumun oluşmasına neden olabilir mi, acil bir durdurma düğmesine gerek var mı?
- Operatör, kaynak kıvılcımları veya lazer kesici gibi kalkan gerektiren bir uygulamaya yakın mıdır? Üretim yapılan iş birlikçi hacmin yerleşim planını değiştirerek veya varsa uygulamaya yönelik koruyucular kullanarak operatörün bu tehlikelere maruz kalması önlenebilir mi?
- İşbirlikçi veya iş birlikçi olmayan çalışma hacimleri olarak tanımlanan bölgeler operatör tarafından tam olarak anlaşılmış mı ve gerektiği gibi kontrol altına alınmış mıdır?

Risk azaltma önlemleri yeterli koruma sağlamayabilir. Geleneksel sistemlerde risk azatlımı güvenlik koruma yöntemleriyle yapılır. İşbirlikçi uygulamalarda robotun tasarımı sırasında risk azatlımı da mutlaka

tasarıma dahil edilir. Risk azaltımını sağlayarak operatörü yaralanmadan koruyacak başlıca önlemler, robotu durdurma, kuvvet ve hızı sınırlamadır. Örneğin, sınırlandırılmış sahaya yaklaşan operatör alanı izleyen tarayıcılar tarafından tespit edildikten sonra, robota sinyal göndermeye başlar ve robotun hızını azaltmasını sağlar. Burada geleneksel robot uygulamalarındakine göre farklı olan robotu durdurmak yerine hızını azaltmaktır. Bu işlemin eğitim ve işaret levhalarıyla desteklenmesi gerekir. Denetim grafiği hiyerarşisi tüm ortak uygulamalar için geçerli olmayabilir. Risk değerlendirmesi sırasında belirlenecek koruyucu önlemler arasında gerekli görüldüğü takdirde alan sınırlaması ve güvenlik dereceli yumuşak eksen gibi koruyucu önlemler de alınabilir.

Esas olan ezilme tehlikesine neden olabilecek etkenlerin yok edilmesi veya denetim altına alınmasıdır. ISO 10218 / ANSI RIA 15.06'da robotla operatör arasında olması gereken minimum mesafe 500 mm olması veya koruyucu önlemler kullanılması önerilse de durum endüstriyel robotlara göre farklıdır. Ek gereksinimler, TS 15066'nin önerdiği, hız ve ayırma izleme ile güç ve kuvvet sınırlayıcı bölümlerdir. İşbirlikçi operasyonlar ile güvenlik denetleyicisinin denetimi durdurmaya devam edişi arasındaki geçiş süresi sınırını belirlemek için ISO 12100'nin tavsiyelerine uymak gerekir.

5. İSG AÇISINDAN KOLABORATİF ROBOTLAR VE UYGULAMALAR

5.1. Robot Seçimi Sırasında İş Güvenliği Açısından Alınması Gereken Önlemler

İş birlikçi robotlarda da iş sağlığı ve güvenliği açısından gündeme gelebilecek risk ve tehlikeleri bertaraf etmek veya minimize etmek için bu robotların kullanılacakları proseslerin çok iyi analiz edilmeleri gerekir. Bu nedenle de seçim sırasında risk analizlerinin yapılması ve bu konudaki standartların hassasiyetle incelenmesi büyük önem taşır.

Robot tasarımına geçmeden önce, herhangi bir prosesin incelenmesi sırasında;

- Robotun çalıştırılacağı ortamdaki sıcaklık,
- Proses sırasında robotun herhangi bir makine veya ekipmanla temas etmesi gerekiyorsa temas noktasındaki sıcaklık değerleri,
- Ortam nemliliğinin robotun çalışmasını olumsuz etkileyecek değerlerde olmaması,
- Robotun çalışacağı ortamda bulunabilecek parlayıcı, patlayıcı veya yanıcı kimyasallar,
- Proses gereği, robotun üretim sırasında herhangi bir kimyasalla temas etmesi söz konusu ise tasarımın buna göre yapılması,
- Çalışma ortamındaki yüksek akım veya gerilim kaynağı özel muhafazaya alınmalı,
- Mevcut topraklamanın yeterli olup olmadığı en az yılda bir ölçtürülmeli,
- Topraklama hattı korunmalı ve mekanik darbelere maruz kalmamalı,
- Kopması halinde sistem çalışır ancak çok büyük çarpılma riski oluşturur,
- Robotun çalışacağı kodun özellikle deniz seviyesinden 1000 metreden fazla olup olmadığı,
- Robotun çalışacağı zeminin oluşabilecek titreşime reaksiyonu,
- Eğer robotta uygulama gereği olarak görme sensörleri varsa çalışma ortamının tozlanmayı önleyecek şekilde tozsuzlaştırılması, ortamda yağlı uçucuların ve buharın olmaması, ek bir havalandırma veya tozsuzlaştırmaya gerek olup olmadığı,
- Robotun çalışacağı ortamın elektrifikasyonunun ve UPS hattının robot üreticisi firma tarafından önerildiği Şekilde hazırlanması,
- UPS cihazı fazla yüklenmemesi için UPS hattı ayrı çekilmeli ve sadece kesinti istenmeyen özel makineler için kullanılması,

- Robotların çalışacakları ortamların, diğer makinelerin yüksek geriliminden etkilenmeyecek bir Şekilde belirlenmesi,
- Robotların çalışacakları ortamların zeminleri son derece önemlidir. Bugünkü robotlar 7-8 eksende çalışmak üzere programlandıkları için, robotların çalışmaları sırasında zeminde çeşitli yönlerde gerilmeler olacaktır, zemin bütün bu gerilmeleri karşılayabilecek Şekilde tasarlanmalıdır. Zeminin statik hesapları yapılırken gerekiyorsa robotun bağlantı ayaklarına kalın plakalar yerleştirilmelidir. Bağlantı detayları mutlaka üretici firma önerileri doğrultusunda hazırlanmalıdır.
- Robotun özellikleri, çalışma ortamı, taşıma koşulları ve çalışma süreleri göz önüne alınarak uygun bir bakım programı tasarlanmalıdır,

Devreye Alma ve Bakım Sırasında Yapılması Gerekenler: Endüstriyel robotlarda olduğu gibi, kolaboratif robotun montajının tamamlanıp, robota enerji verilmeden önce robotun çalışma sahasında (robot kollarının çalışma sırasında süpüreceği alanda) hiçbir çalışan bulanmaması sağlanarak robota ilk enerji verilmelidir. Bu işlem mutlaka iki kişiyle yapılmalı, bir kişi makineye yol verirken diğeri acil stop düğmesinin başında durmalıdır. Bunun yansıra robot kollarının planlanan dışında hareket etmesi durumunda montaj elemanının çalışma sahasını kolayca terk edebilmesi için koruyucu duvarların yerleştirilmemiş olması gerekir.

Robotun Kullanımı Sırasında Güvenliğin Sağlanması: Özellikle kolaboratif robotların seçiminde, mutlaka kullanacağımız uygulamada deneyimli üreticilerin seçilmesinde yarar vardır, zira hiçbir robot için %100 güvenlidir diyebilmek mümkün değildir. Bu durum özellikle, robotun ilk kurulum, devreye alınma ve operatörün deneyim kazanması sürecinde son derece önemlidir. Robotların kullanıldığı ortamlarda oluşan iş kazalarına baktığımız zaman, genellikle aşağıda belirtilen hususlar göz ardı edildiği takdirde kaza olasılığı artmaktadır.

- Robot, özellikle operatörsüz çalışmak üzere tasarlanmış ise, robot hiçbir zaman, çalışacağı alanda çalışan olmadığının onaylanmasından önce hareket etmemelidir.
- Eğer robot otomatik çalışma modunda ise, üzerindeki veya koruma çiti üzerindeki sensörler çalışma alanına birisinin girdiğini tespit edip operasyonu durdurmalıdır.
- Eğer robotun çalışma ortamı güvenlik çiti veya ışık bariyerleri tarafından denetleniyorsa, bu elemanların çalışır durumda olmaları gerekir,
- Bazı durumlarda, robotların aniden çalıştığı ve operatörlere zararlı olduğu durumlar olabilir, bu durumların olmaması için mutlaka çalışma prosedürlerinin ayrıntılı hazırlanması gerekir, bu tür kazaların ana nedeninin prosedür eksikliklerinden veya prosedürlere tam uyulmamasından kaynaklandığı bilinmektedir.

Yukarıda belirtilen iş kazalarının olmamasını sağlamak için;

- Son nesil robotlarda, birlikte çalışan operatörün kazara robota değmesi halinde bile robot duracaktır, ancak bu gerçekleşmediği takdirde çalışan bu temastan ciddi zarar görebileceği için, operatörlerin robotun çalışma sahasına girmemesi ve robota yaklaşmaması konusunda mutlaka uyarılmaları ve eğitilmeleri gerekir,
- Robot çalışmadığı durumlarda da aniden çalışması durumunda çevresine zarar verebileceği varsayılarak, mutlaka kilitlenmelidir.
- Her ne kadar, robotlar kendilerine öğretilen hareketleri hiç usanmadan günlerce, haftalarca yapabilme yeteneğine sahip olsalar da sürekli olarak hareketlerinin izlenmesi mutlaka yararlı olacaktır,
- Robotlar çeşitli eksenlerde, değişik eklemleri vasıtasıyla çalışmak üzere programlandıkları için birlikte çalışanların bu hareketler sırasında her an acil düğmesine basabilecek durumlarda olmaları gerekir. Gerekli durumlarda robot çevresinde acil durdurma düğmelerinin sayılarının da artırılması yararlı olacaktır.
- Robotlar mutlaka tasarlandıkları operasyonlar için kullanılmalıdırlar, tasarlandıklarında farklı operasyonlarda farklı aksesuarlarla kullanılmaları, yaralanmalı hatta ölümcül kazalara neden olabilecektir.
- Robotların çalışma sahalarında manyetik yoğunluk, gürültü ve titreşim robotların hafızalarını etkileyebileceğinden bu olumsuzluklar incelenerek gerekli önlemlerin alınması uygun olacaktır.

- Günümüzde robotlar 7 veya 8 eksene kadar çalışabildiklerinden çok miktarda ekleme sahiptirler, bu yüzden de robotlar üzerindeki eklemler kendilerine verilen görevleri yapabilmek için belirlenen zaman dilimi içerisinde sürekli konum değiştirirler. Özellikle süreç başlangıcında robota komutlar öğretilirken, operatörün eklemlerin çalışma alanı dışında olmaları gerekir.
- Tasarım yapılırken operatörün yüzünün robota bakar konumda olmasına dikkat edilmelidir.
- Bazı durumlarda prosesin gereği olarak robot kolları üzerinde optik gözler bulunabilir, optik gözün iyi çalışmaması robotun verilen görevi yapmasını engelleyebilir, o yüzden özellikle tozlu ortamlarda optik gözlerin temiz olmasına dikkat edilmelidir.
- Proses başlangıcında robota yapacağı işlerin öğretilmesi sırasında mutlaka hız düşük tutulmalı, çevrimin tamamen öğretilmesinden sonra gerekli hızla denemelere başlanır.
- İşbirlikçi robotların birçoğunda herhangi bir nedenle robotun durmasından sonra robot kaldığı yerden prosese devam edebilir, ancak bazı uygulamalarda, proses gereği, robot kolunun harekete başlarken başlangıç noktasına dönmesi gerekebilir. Bu durumun mutlaka iş birliği yaptığı operatör tarafından bilinmesi gerekir, robotun tekrar başlama işleminde operatör sesli ve ışıklı olarak uyarılır.
- Bazı durumlarda robot sistemindeki olası aksaklılar sesli olarak operatöre bildirilir, robottan gelecek sesli uyarıların ne anlama geldiği operatör tarafından çok iyi bilinmelidir,
- İşbirlikçi alana girerken mutlaka o alan için öngörülen KKD' lerin kullanımına dikkat edilmelidir.
- Herhangi bir otomatik çalışmaya engel olmak için, robot programlanırken mutlaka, üzerine robotun programlandığına ilişkin levha asılmalıdır,
- Birden fala operatörün bulunduğu çalışma alanında, el kumandası öğretimi yapan operatörün elinde olmalıdır, el kumandasından talimatlar sadece bir operatör tarafından verilmelidir,
- Büyük ve gürültülü bir fabrikada çeşitli operatörlerin birlikte çalışması gerekiyorsa, operatörlerin iletişimi için mutlaka sisteme entegre edilmiş kulaklıklar ve herkes tarafından bilinen el işaretleri kullanılmalıdır,
- Robotlara neler yapacağı öğretildikten sonra, robotun hareketleri veya normal dışı hareketleri ve bunlar karşısında operatörlere düşen görevler hakkında operatörler eğitilmeli ve yanlış hareketin bir kodlaması yapılmalıdır,
- Robot programlanırken veya bir müdahale sırasında, herhangi bir enerji dönüşümü durumunda, robot kolunun boşalma olasılığına karşı robot yükte bırakılmamalı, yüklü bir robot kolunun altında durulmamalıdır,
- Robotun programlaması yapıldıktan sonra, ilk deneme çalışmaları tasarlanan hızın altında yapılmalı, hiçbir sorun olmadığından emin olunduktan sonra normal hıza geçilmelidir,
- İlk deneme çalışmalarının sadece düşük hızda yapılması yeterli olmayabilir, çünkü bazı durumlarda üretim, program veya tasarımdan kaynaklana sorunlar da olabilir, bu yüzden ilk deneme çalışmasından önce bütün bu kontroller yapılıp herhangi bir eksiklik olmadığından emin olunduktan sonra deneme çalışmalarına başlanmalıdır,
- İlk deneme öncesi yapılan bütün kontrollerde hiçbir hata yapılmadığından emin olunsa dahi, ilk hızları %5-10 mertebesinde seçip, daha sonra hız kademeleri artırılarak ilk denmeler tamamlanmalıdır.

5.2. Kolaboratif Robotlarda Kazaya Neden Olabilecek Beklenmedik Hareketler

Robot manipülatörünün, yukarıda belirtilen nedenlerin herhangi biri yüzünden planlanmadığı halde harekete geçip iş kazasına neden olabilecek olumsuz hareketler, tasarım sırasında daha sonrasında da risk değerlendirmesi sırasında detaylarıyla incelenmeli, sistemi denetleyecek bileşenle bu doğrultuda seçilmelidir. Bu hareketlerden en çok rastlananları:

- Başka bir operatör tarafından haber verilmeden yapılan değişiklikler,
- Kullanım hatası,

- Gürültü ve robotun çalışma koşulları nedeniyle manipülatörün olumsuz etkilenmesi,
- Program hataları veya çevredeki makinelerle veya diğer robotlarla olan etkileşimler,
- Robot kolu üzerindeki kumanda veya izleme ünitelerinde gündeme gelebilecek ani arızalanmalar,
- Kilitlenmeyi bekleyen ancak gerekli önlem alınmadığı için robot kıskacında oluşabilecek ani boşalmalar,

Robotların Otomatik Çalışma Düzenine Geçmesinden Sonra Alınması Gereken Güvenlik Önlemleri:

- Vardiya başlarında, çalıştırma öncesi belirlenen risk kontrol listesindeki önlemler gözden geçirilmelidir,
- Güvenlik çitleri üzerine iş birlikçi bölgeye girilmesinin yasak olduğunu belirtilen levhalar asılmalı robotun çalışmaya başlaması görsel olarak çevreye duyurulmalıdır**,**
- Otomatik başlama moduna girecek olan robot mutlaka çalışma bölgesinde operatör veya başka birinin olmadığın algılayabilecek donanıma sahip olmalıdır.
- Robota otomatik moda geçme talimatı verilmeden önce, robotun işleme başlayacağı program numarasından, adım numarasından ve robotun otomatik başlatma komutuna hazır olduğundan emin olunmalıdır,
- Herhangi bir nedenle robotun çalışma alanına girilmiş olması durumunda robot kendine öğretildiği gibi duracaktır, operatör kendisi için bulunması yasak olan bu bölgeyi terketmeden önce kesinlikle robota başla komutunu vermemeli, izleme sistemi de buna göre tanımlanmalıdır,
- Kolaboratif robotlar genelde, kaldıkları veya durduruldukları yerden itibaren çalışmaya bşlarlar, bazı durumlarda durdukları konumda operatörün herhangi bir ölçüm veya arıza giderimi yapmak için robot kolu başka bir konuma çekilebilir, genelde ilk başlama komutuyla birlikte robot kolu önce durdurulduğu konuma gelecek ondan sonra sürecin geri kalan kısmını tamamlamak üzere harekete geçecektir. En tehlikeli duruşlardan biri olan bu durumlarda, operatörün bütün işini tamamladıktan sonra robot yörüngesi dışına çıkıp ondan sonra start düğmesine basması gerekir. (Sezai, 2015)

6. İNSAN VE ROBOT İŞ BİRLİĞİNDE GÜVENLİK VE ERGONOMİ

İş birlikçi robot (kobot veya hafif robot), insan-makine etkileşiminden (HMI) yeni paradigmalar sunarak, paylaşılan ve güvenlik çitleri olmayan hatasız bir çalışma alanında insanlarla fiziksel ve güvenli bir şekilde etkileşime girebilen özel bir endüstriyel robot türüdür. Uluslararası Robotik Federasyonu (IFR), iş birlikçi endüstriyel robotları, endüstriyel ortamlarda çalışanlarla iş birliği içinde görevleri yerine getirebilenler olarak tanımlamaktadır (IFR 2019). İşbirlikçi çalışma alanı kavramı, "robot sistemi (iş parçası dahil) ile bir insanın üretim operasyonu sırasında aynı anda görevleri yerine getirebileceği çalışma alanı içindeki alan" olarak özetlenebilir (ISO 2016, s. 8). Genelde, işbirlikçi robotik, Endüstri 4.0'ın ana siber-fiziksel etkinleştiren teknolojisidir ve tekrarlanabilirlik, doğruluk ve yük gibi tipik makine güçlerini esneklik, uyarlanabilirlik ve karar verme gibi insan becerileriyle eşleştirerek üretim performanslarını ve operatörlerin çalışma koşullarını iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

İş birliğine dayalı robotiği tanıtırken, en önemli kısım emniyettir. Aslında, iş birlikçi ve geleneksel endüstriyel robotlar arasındaki temel fark, kobotların, robot çalışma alanını izole etmeye gerek kalmadan hibrit ve hatasız iş hücrelerinde fiziksel olarak robot/insan iş birliğine izin verecek Şekilde tasarlanmasıdır. Geleneksel endüstriyel robotlar, ağır, güvenli olmayan ve tekrarlayan süreçleri gerçekleştirmede insan operatörlerin yerini alarak üretim verimliliğini artırmak için tasarlanmışlardı. Güvenlik gereksinimleri nedeniyle, geleneksel bir yüksek performanslı manipülatör, robot faaliyetlerini izole etmek ve dolayısıyla operatörleri beklenmedik ve istenmeyen temaslardan korumak için korumalara (fiziksel engeller veya optik cihazlar) ihtiyaç duyar. İşbirliğine dayalı uygulamalar doğrudan insan/robot iş birliğine izin verdiğinden geleneksel güvenlik çözümlerine gerek kalmamıştır. Sonuç olarak, operatörlerin iş güvenliğini ve ergonomisini sağlamak için diğer sistemlerin iş birlikçi robotun üzerine entegre edilmesi gerekli olmuştur. Bu sistemler, robot performansına ve etkileşim seviyesine bağlı olarak seçilmeli ve uygulanmalıdır, genel olarak geleneksel endüstriyel robotlardaki güvenlik çözümlerine göre daha zorlu ve karmaşıktır. Bu nedenlerden dolayı, iş birlikçi robotlarda, İSG gerekliliklerini

sağlamak daha zor olacaktır, ama mutlaka insan/robot etkileşiminde veya iş birliğinde emniyet ve ergonomi koşullarının sağlanması gereklidir.

6.1. Endüstriyel Robot Güvenliğine Giriş

Tehlikelerin doğası dikkate alındığında, ISO 2010'a göre, endüstriyel makinelerle ilgili farklı türde mesleki tehlikeler mevcuttur.

Endüstriyel makineler için tanımlanmış tehlikeler; mekanik tehlikeler, elektrikten kaynaklanan tehlikeler, termal tehlikeler, titreşimden kaynaklanan tehlikeler, gürültüden kaynaklanan tehlikeler, radyasyon tehlikesi, malzeme ve maddelerden kaynaklanan tehlikeler, çalışma ortamından kaynaklanan tehlikeler, risklerin kombinasyonu olarak sıralanmaktadır.

Endüstriyel insan/robot iş birliği tanımında, iş birlikçi robotların ana tehlike/lerin mekanik yapıdan kaynaklanabileceği bir yapıda, emniyet çitinin olmadığı bir çalışma ortamında, görevlerin insan ve robotlar arasında paylaşıldığı anlaşılmaktadır. Aslında hem insanların hem de robotların ortak bir çalışma alanında bir araya getirilmesi nedeniyle, operatör ile makinenin mobil parçaları arasında, özellikle robot kolu ve farklı tipte son efektörlerle işlevsel olmayan fiziksel etkileşimlerin oluşması olasıdır. İlgili mekanik riskler uygun şekilde tanımlanmaz, tahmin edilmez ve yönetilmezse, beklenmeyen ve istenmeyen temaslar farklı türde çarpışmalara ve ezilmelere neden olabilir. Özellikle mekanik tehlike, işçilerin doğrudan veya dolaylı olarak iş süreci ile ilgili nesnelerle temasa geçmesi durumunda ortaya çıkabilecek fiziksel bir tehlikedir. Etkiler genellikle hemen ortaya çıkar ve insanların yaralanmasına neden olabilir. Yoğunluk seviyesi, ilgili iş ekipmanının hız, kütle ve geometri gibi fiziksel özelliklerine göre değişebilir. Tipik mekanik tehlike, tezgahlar, tezgâhta işlenen/işlenmemiş iş parçaları, ekipmanlar, üretim atıkları, üretim sırasında oluşan katı veya sıvı atıklardan kaynaklanan, ezilme, yaralanma, kesilme, sıkışma, çarpma, olasılığından kaynaklanmaktadır. Diğer temel mekanik tehlikeler, yüksek basınçlı sıvı fışkırtmasının yanı sıra kayma, takılma ve düşme nedeniyle oluşabilir.

6.2. Endüstriyel İnsan-Robot Etkileşiminde İş Güvenliğinin Temelleri

ISO 2010 a'ya göre, risk değerlendirmesi, risk azaltma hedeflerine ulaşılıp ulaşılmadığını değerlendirmek için makine (limitler) spesifikasyonlarını tehlike tanımlaması ve risk tahminiyle (temel olarak risk olasılığını ve yerçekimini tanımlayan) birleştiren prosedürdür. Geleneksel ve iş birlikçi endüstriyel robotlar için risk değerlendirmesi farklıdır. Genel olarak, bileşenlerin standardizasyonu ve uygulamaların yaygınlaşması nedeniyle, geleneksel robotik hücrelerin mekanik risk açısından değerlendirilmesi daha kolaydır. Bu durumda, ortak ana risk özellikleri şunlardır:

- Robotik çalışma hücresi izole edilmiştir (doğrudan fiziksel insan/robot iş birliğine genellikle izin verilmez),
- Mekanik risk indeksleri yüksektir ve yüksek bir yerçekimi seviyesi ve düşük bir frekans seviyesi ile karakterize edilir (robot kolunun yüksek kütlesi ve hızı, yüksek kinetik enerji seviyelerini içerir),
- Güvenlik koruma sistemleri, önlemeye dayanır, bu da güvenlik önlemleri kullanılarak mekanik risk olasılığının sıfırlanması anlamına gelir,
- Spesifik robot tasarımı ve kontrolü sayesinde operatörler ve robotun mobil parçaları arasındaki beklenmedik temasları azaltma imkânı yoktur.

Bu nedenle mekanik risk yönetimi daha homojendir ve standartlaştırılmıştır, bu da belirli robotik hücre uygulamalarına daha az bağımlı olduğu anlamına gelir. Robot çalışma alanında işçi bulunmaması nedeniyle risk yönetimi basitleştirilmiştir. İşbirlikçi robotlar söz konusu olduğunda durum çok farklı ve daha karmaşık olacaktır. İşbirlikçi robotlarda ana risk özellikleri şunlardır:

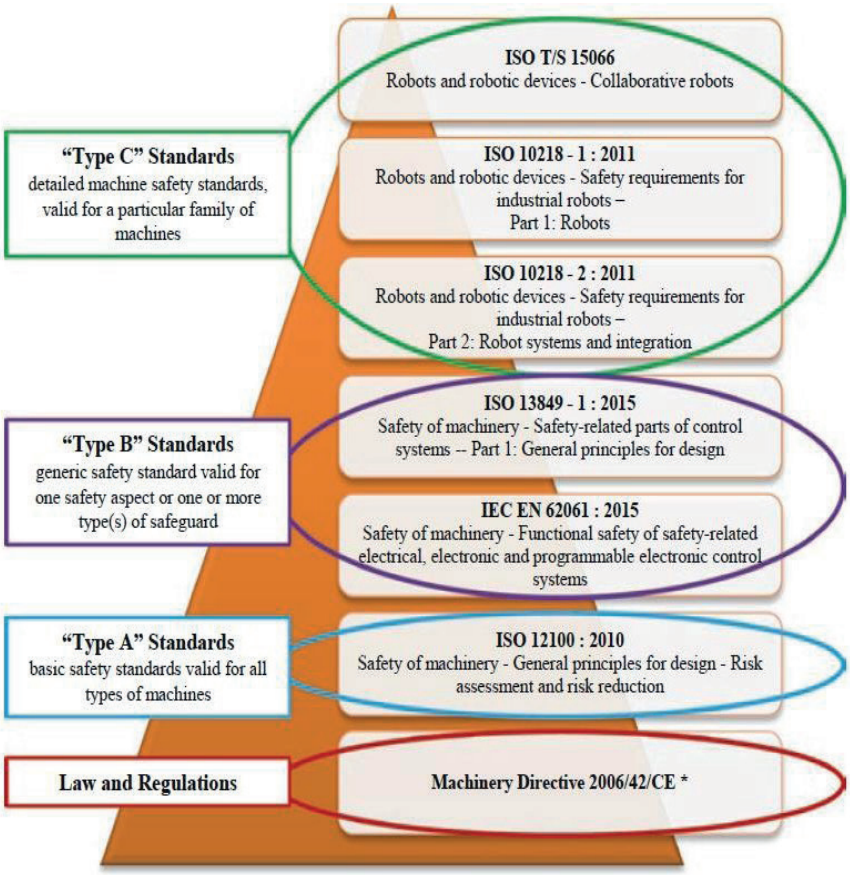
- Robotik hücre iş birliğine dayanır (fiziksel insan/robot iş birliğine izin verilir),
- Mekanik risk endeksleri, uygulamaya ve potansiyel insan/robot iş birliği formuna bağlı olarak yerçekimi ve frekans açısından değişkendir. Aslında, genel uygulama sırasında tek operatör görevlerine bağlı olarak değişebilir,

- Beklenmedik insan-robot temaslarıyla ilgili daha olası ve daha az ciddi mekanik risklere izin verilir, bu da güvenlik sistemlerinin risk önleme ve azaltmanın bir karışımına dayandığı anlamına gelir.

Bu nedenle, risk yönetimi daha uygulamaya özgüdür, bu da heterojen, karmaşık ve oldukça zor standartlaştırılmış bir yapı oluşturur. (Gualtieri ve diğerleri, 2020)

6.3. Endüstriyel İşbirlikçi Robotik için Ana Güvenlik Standartları

İstenmeyen temas sırasında ortaya çıkabilecek mekanik riskler göz önüne alındığında, insan/robot iş birliği için makine gereksinimlerinin güvenliğiyle ilgili genel uluslararası çıktıların kısa bir listesi vardır. (Şekil 6) 2016 yılında, üretim operatörleri ve güvenlik uzmanlarına için, güvenli paylaşılan çalışma alanlarının geliştirilmesinde ve risk değerlendirme sürecinde yardımcı olmak için yeni bir ISO teknik raporu olan ISO TS 15066 (ISO 2016) yayınlandı.



Şekil **8:** Endüstriyel İş Birlikçi Robotlarla İlgili Ana Standartlar Hiyerarşisi (Gualtieri ve diğerleri, 2020)

Bu rapor, ISO 10218 bölüm 1 ve 2'ye (ISO 2011a, b) dahil edilen endüstriyel robotlar için önceki güvenlik gereksinimlerini daha ayrıntılı olarak belirtir. Diğer yararlı belgeler arasında AB Makine Direktifi (Avrupa Parlamentosu 2006), risk değerlendirmesi için standartlar ISO 12100 (ISO2010a) ve fonksiyonel güvenlik gereksinimleri için ISO 13849 bölüm 1 (ISO 2015a) ve IEC EN 62061 (IEC 2015) bulunmaktadır. Ek olarak, robot sistemleri için kullanılan uç efektörlerin tasarımı ve entegrasyonu için güvenlik önlemlerine ilişkin ana yönergeleri tanımlayan bir belge yakın zamanda yayınlandı (ISO 2018).

6.4. Teknik Şartname ISO TS 15066 (2016) ve İşbirliğine Dayalı İşlemler

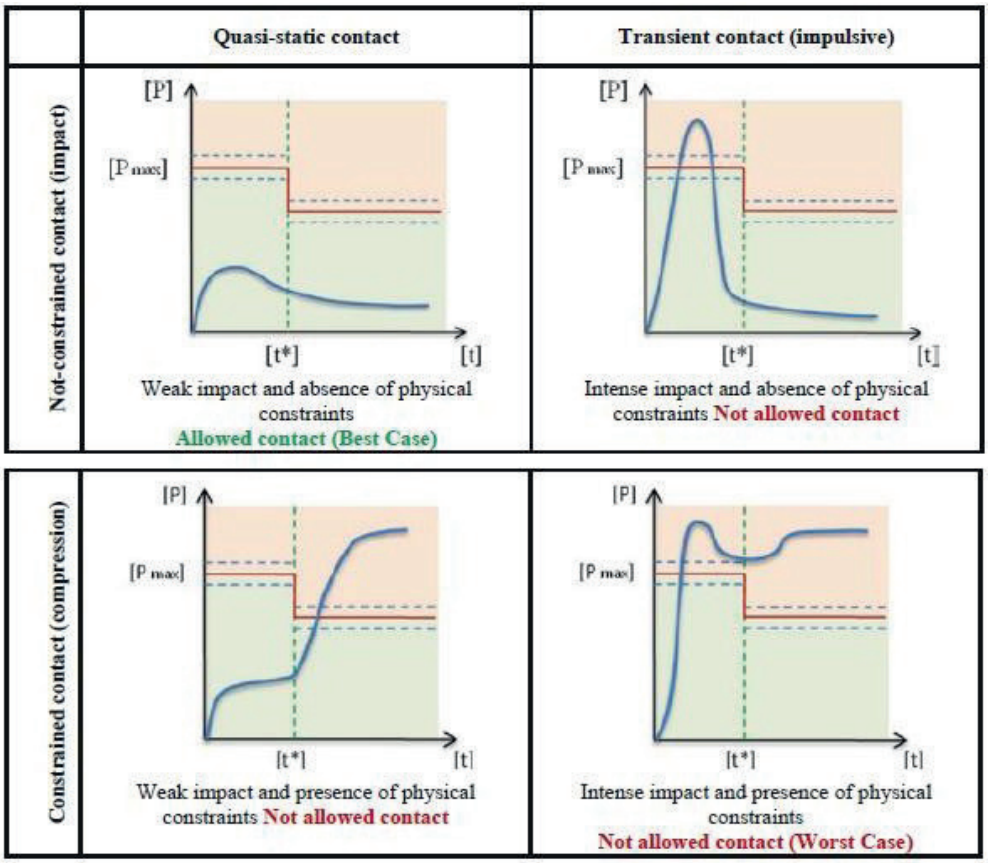
2016 yılında piyasaya sürülen ISO TS 15066 (ISO 2016) Teknik Şartnamesi, 2011'de ISO 10218-1 (ISO 2011b) ve 10218-2 (ISO 2011a) standartlarında önceden tanıtılan iş birlikçi robotlarla ilgili gereksinimleri daha ayrıntılı olarak açıklayan bir duruma getirilmiştir. Şu anda bu şartname, özellikle mekanik risk açısından,

iş birlikçi endüstriyel çalışma hücreleri için güvenlik gereksinimlerini belirten en ayrıntılı belgelerden birini temsil etmektedir. Belirli uygulamalara ve etkileşim türlerine göre, iş birlikçi robotlar farklı türden güvenlik cihazlarıyla entegre edilmelidir. Güvenli iş birliğinin temel amacı, yerçekimi ve / veya olasılık açısından beklenmedik temaslardan kaynaklanabilecek mekanik riski en aza indirmektir. Daha önce de belirttiğimiz gibi, ISO TS 15066 (ISO 2016), güvenli insan/robot iş birliği için dört yöntem belirlemiştir;

1. Sınırlandırılmış Güvenli Duruş,
2. Elle Yönlendirme,
3. Hız ve Mesafe İzleme,
4. Güç ve Kuvvet Sınırlama,
5. Sınırlandırılmış güvenli duruş modu, insan/robot iş birliğinin gerçek bir uygulamasını temsil

6.5. İnsan Merkezli Tasarım (HCD/Human Centered Design) ve Ergonomi:

Dördüncü sanayi (Endüstri 4.0) devrimi sadece yeni imalat paradigmalarını tanıtmakla kalmamış olup, aynı zamanda insanların oynadığı rolü de değiştirmiştir. İnsanlar, ileri teknolojiler tarafından bile kolayca değiştirilemeyen önemli bir rol oynamaktadır. Tersine, yeni teknolojilerin tanıtımı üretim sistemlerini karmaşıklaştırır ve yüksek vasıflı, iyi eğitimli çalışanlara olan ihtiyacı artırır. Bu nedenle, dördüncü sanayi devrimi, yeni teknolojileri tasarlamaya yönelik insan merkezli bir yaklaşımı yeniliyor, soruyu insanların nasıl değiştirileceğinden insanları nasıl daha iyi tamamlayıp onlara nasıl yardımcı olunacağına doğru değiştiriyor.



Şe**kil 9:** İnsan – Robot Temasının Sınıflandırması (Gualtieri ve diğerleri, 2020)

Üretim sistemlerini tasarlamak için insan merkezli bir yaklaşım tanıtıldı. ISO 9241-210 (ISO2010b), İnsan Merkezli Tasarımı (HCD) "***Sistemin kullanımına odaklanarak ve insan faktörleri / ergonomi ve kullanılabilirlik bilgi ve tekniklerini uygulayarak etkileşimli sistemleri daha kullanılabilir hale getirmeyi amaçlayan bir sistem tasarımı ve geliştirmesi yaklaşımı"*** olarak tanımlar. Bu nedenle, böyle bir yaklaşım, kullanımdan

kaynaklanan insan sağlığı, güvenliği ve performansı üzerindeki olası yan etkileri önlerken, kullanıcı memnuniyeti, sürdürülebilirlik ve erişilebilirlik ile birlikte insan refahını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. ISO 9241 bölüm 210, etkili ve zamanında İnsan Merkezli Tasarımı etkinliklerini belirlemek ve planlamak için süreçlerin nasıl yeniden tasarlanacağına ilişkin yönergeler sağlar ve aşağıdaki altı temel ilkeyi tanımlar;

a. Kullanıcıların, görevlerin ve ortamların net bir şekilde anlaşılmasına dayalı tasarım,

b. Tasarım ve geliştirme süresince kullanıcı katılımı,

c. Tasarımı geliştirmek/iyileştirmek için kullanıcı merkezli değerlendirme,

d. Yinelemeli süreç,

e. Tüm kullanıcı deneyimine göre,

f. Multidisipliner becerilerin ve bakış açılarının benimsenmesi,

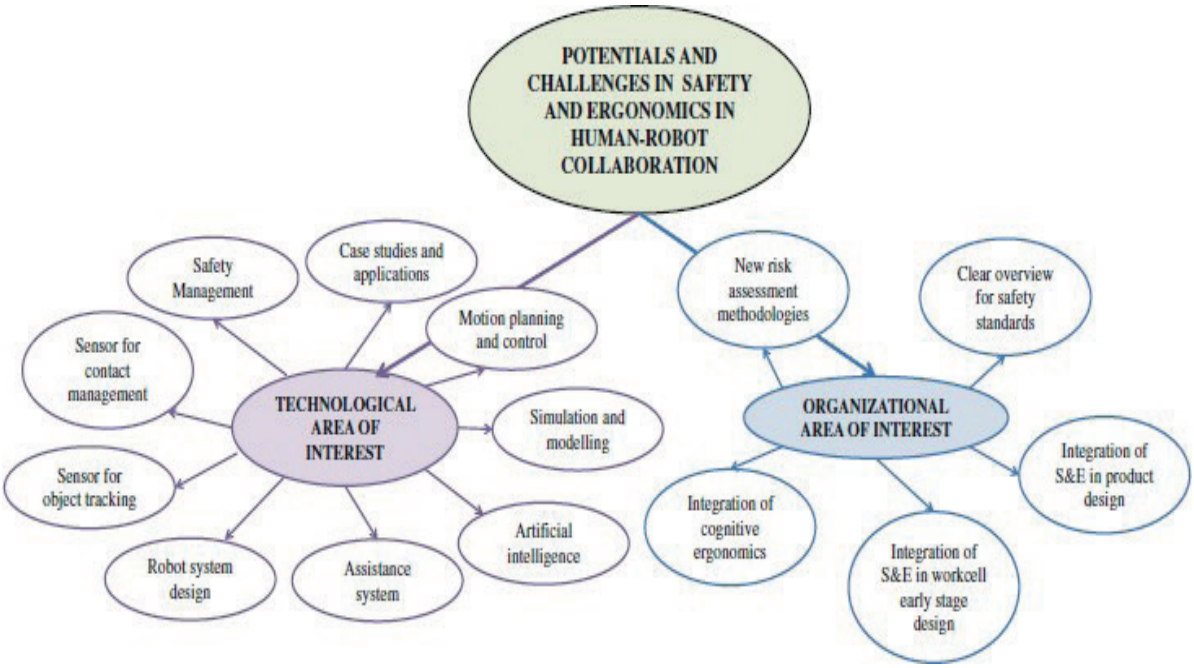
İnsan Merkezli Tasarım yaklaşımı her türlü tasarım yaklaşımına dahil edilebilir (örneğin, nesne yönelimli, hızlı uygulama geliştirme vb.). İnsan Merkezli Tasarımın doğru uygulanması için en önemli hususlardan biri ergonomik ilkelere saygıdır. ISO 26800 (ISO 2011c), ergonomiyi «***bir sistemin insan ve diğer unsurları arasındaki etkileşimlerin anlaşılması ile ilgili bilimsel bir disiplin ve insan refahını ve genel sistem performansını optimize etmek için tasarım için teori, ilke, veri ve yöntemleri uygulayan meslek***" olarak tanımlar. Böyle bir disiplin, bir işyerinin ve ilgili ekipmanın veya ürünlerin genel olarak insan kullanımı için optimize edilmesi amacıyla en iyişŞekilde nasıl tasarlanacağını inceler. Ergonomik ilkelere dayalı bir tasarım, ağırlık, boy, yaş, işitme ve görme gibi çeşitli insan özelliklerini dikkate alır. Ergonomi bu nedenle genellikle insan faktörleri mühendisliği olarak adlandırılır.

6.6. İnsan-Robot İşbirliğinde Ergonomi

İş birliğine dayalı robotik teknolojisinin altında yatan fikir, insanlara yardım edebilecek ve onları destekleyebilecek gelişmiş teknolojilere sahip olmaktır. Bu etkileşime bir örnek, kobotların bir işçi için bileşenleri kaldırmasıdır. Kobotlar işyerinin fiziksel ergonomisini iyileştirse ve dolayısıyla işçinin MSD'ye maruz kalmasını azaltabilse dahi, bilişsel ergonomi ilkeleri dikkate alınmazsa çalışanların zihinsel stresine ve psikolojik rahatsızlığına da neden olabilirler. Aslında, kobotlar operatörün beklentilerine göre davranmalıdır (Mayer ve Schlick 2012), onların varlığı insanlar için bir stres kaynağı olmamalı ve hatta bir tehlike olarak algılanmamalıdır. Kobotların insan tarafından kabul edilebilirliği, örneğin robot için antropomorfik yörüngeler uygulayarak geliştirilebilir (Kuz ve diğerleri 2014; Rojas ve diğerleri 2019). Standartlara uygun fiziksel ve bilişsel ergonomik ilkelere dayanan hibrit çalışma alanlarının endüstriyel bir uygulamasından hala uzak olsak da, bazı akademik sonuçlar mevcuttur. 2015'te Faber ve arkadaşları tarafından, geliştirilmiş ergonomi özellikleri ve esnekliği olan karma bir çalışma alanı tasarlandı. Bu tasarım, robot işletim sistemine (ROS/ Robot operating system) ve bilişsel olarak otomatikleştirilmiş bir montaj planlayıcısına dayanmaktadır. Süreç görevlerinin bilişsel karmaşıklıklarına göre sınıflandırıldığı, çalışma alanı için insan merkezli bir tasarım 2018'de D'Addona ve arkadaşları tarafından sunulmuştur. Buna ek olarak, yine aynı yıl içerisinde, bir de çok kriterli bir yaklaşım ve aynı anda insan-robot hibrit hücre düzenini ve görevleri planlayabilen görev atamasına yönelik bir algoritma olarak sunulmuştur. Müller ve arkadaşları da (2016), beceriye dayalı bir görev atama yaklaşımı önermişlerdir. Bu yaklaşım, bir montaj görevi tanımlama modeline dayanır ve insan/robot arasındaki görevleri gereksinimlerine göre becerilerini karşılaştırarak atar.

Peruzzini ve arkadaşlarına göre ise, sanal gerçeklik, insan merkezli tasarım (HCD) için montaj görevlerinin simülasyonuna izin veren ergonomik bir çalışma alanının tasarımına yardımcı olabilir. Aslında, dijital üretim araçlarındaki farklı kurulumları değerlendirerek ve dijital insan modelleri ve diğer sanal kaynak modelleri ekleyerek insan duruşunu ve stresini iyileştirmek mümkündür (Caputo ve diğerleri 2018). Böyle bir yaklaşım duruş, iş yükü ve stres gibi ergonomik yönleri hesaba katarak işyerlerinde montaj görevlerini simüle edebilse de insan memnuniyeti ve duygu gibi daha yüksek insan merkezli yönleri ihmal eder. Ergonomik bir iş istasyonunun tasarımında ilerleme kaydedilmiş olmasına rağmen, tamamen insan merkezli ve tüm fiziksel ve bilişsel ergonomik ilkeleri karşılayan bir hibrit iş istasyonu tasarlama stratejisi henüz mümkün değildir.

İnsan/robot iş birliğinde güvenlik ve ergonomideki potansiyel ve zorlukları tanımlamak için temel organizasyonel ve teknolojik gelecek araştırma alanlarını tanımamız gerekir. Şekil 8'de genel bir sınıflandırmayı özetlemektedir.



Şekil **9:** HRC Güvenlik ve Ergonomisinde Potansiyel Zorluklar İlişkin Araştırma Alanları (Gualtieri ve diğerleri, 2020)

İnsan/robot iş birliğinde güvenlik ve ergonomi için iki ana ilgi alanı vardır: teknolojik ve organizasyonel. İlki, robot performanslarını optimize ederken insan robot etkileşiminin (HRI/ Human Robot Interaction) güvenliğini artırmak için tekniklerin geliştirilmesiyle ilgilidir. İkincisi, iş birlikçi sistemlerde güvenlik ve ergonomi çözümlerinin daha iyi tasarlanması ve değerlendirilmesi için yönetim araçlarıyla ilgilidir.

Endüstriyel iş birlikçi robotikte güvenlik ve ergonomi için gelecekteki gelişmeleri, temel olasılıkları ve yenilikleri yorumlamak ve tartışmak için ana örgütsel araştırma alanları önerilmiştir. Aşağıdaki liste, Bolzano-Bozen Free Üniversitesi'nin akıllı mini fabrika (SMF/Smart Mini-Factory) laboratuvarında araştırmacılar tarafından elde edilen farklı araştırma sonuçlarına göre geliştirilmiştir (Gualtieri 2018).

6.7. Risk değerlendirmesi için Yeni Metodolojilerin Geliştirilmesi

İnsanlar ve endüstriyel robotlar arasında doğrudan fiziksel etkileşim olasılığı, İSG alanında yeni bir paradigmayı temsil etmektedir. İşbirliğine dayalı sistemlerin tanıtımı, üretim açısından yeni olasılıkların yanı sıra operatör güvenliği ve ergonomi açısından yeni zorluklara da olanak tanır. Bu nedenle insanlar ve robotlar arasındaki etkileşim olasılığını da içererek yeni ve sağlam risk değerlendirme yöntemleri geliştirilmelidir. Mesleki risklerin değerlendirilmesi için çeşitli yöntemler vardır. Şu anda, makine risk değerlendirmesi için en gelişmiş yöntemlerden biri hibrit yöntemdir (ISO 2012). Bu yöntem, renklerle üç farklı risk koşulunu tanımlar: kırmızı, güvenlik önlemlerinin gerekli olduğu anlamına gelir, sarı, güvenlik önlemlerinin önerildiği anlamına gelir, yeşil, güvenlik önlemlerinin gerekli olmadığı anlamına gelir. Bu risk koşulları, beş nitel değişken üzerinden bir risk matrisi kullanılarak hesaplanır: Önem (Se/Severity), Sıklık (Fr/Frequency), Olasılık (Pr/ Probability), kaçınma (Av/Avoidance) ve Sınıf (önceki endekslerin toplamı olan CI/Class). Bu endeksler (ISO 2012) ve (ISO 2016) ‹da bulunan yönergelere göre tahmin edilmiştir. Yalnızca mekanik riskler göz önüne alındığında, iş birliğine dayalı robotik durumunda, ana potansiyel zararlar hafif veya orta şiddettedir. Genel olarak, Olasılık ve Sıklık Endeksleri birbirleriyle daha alakalı değerlerdir. İşbirliğine dayalı uygulamalar için gerekli olan sınırlı robot hızı aralığı nedeniyle istenmeyen temaslardan kaçınmanın gerçek bir olasılığı

olduğundan, kaçınma endeksi orta olabilir. Risk değerlendirmesinin nihai amacı, kabul edilebilir bir artık risk değerine ulaşmak için tasarımcı ve kullanıcı tarafından uygulanan koruyucu önlemlerin benimsenmesi yoluyla riskin azaltılması olacaktır. Risk azaltımı, güvenlik çözümlerinin uygulanmasından önce ***(CI)*** ve sonra ***(CI *)*** farklı risk sınıfı değerleri aracılığıyla değerlendirilebilir. İşbirliğine dayalı uygulamalarla ilgili emniyet gereksinimlerinin karmaşıklığından dolayı, uygun risk değerlendirmesi için burada anlatılana benzer genişletilmiş bir yöntemin kullanılması önerilen bir seçenektir.

Bilişsel Ergonomide Entegrasyon: Çalışma alanlarının paylaşımı ve insanlar ve endüstriyel robotlar arasındaki fiziksel etkileşim, ortak çalışmanın bilişsel ergonomisini etkileyebilir. Bu kapsamda hibrit operasyonlar sırasında oluşabilecek zihinsel stres ve psikolojik rahatsızlık durumlarının en aza indirilmesi zorunlu olacaktır. Güvenlik önlemleri iyi tasarlanmış ve uygulanmış olsa bile, robotun varlığı insanlar için bir tehlike veya stres kaynağı olarak algılanmamalıdır. Tasarımcılar, insan merkezli ve insan dostu iş birlikçi iş istasyonlarını psikolojik açıdan da geliştirmek için bu tür bilişsel ergonomi sorunlarını dikkate almalıdır.

İşbirlikçi Montaj için Tasarım (DFCA/ Design for Collaborative Assembly) tarafından erken aşama ürün tasarımında iş birliğine dayalı çalışma alanlarının güvenlik ve ergonomi entegrasyonu: Ortak alanların erken aşama tasarımında güvenlik ve ergonominin entegrasyonu için eşzamanlı mühendislik (CE/Concurrent Engineering) yöntemlerinin uygulanması, iş birlikçi sistemlerin optimizasyonu için çok önemli olacaktır. Eşzamanlı Mühendislik (CE), "***karmaşık ürünlerin entegre, eşzamanlı tasarımına ve geliştirilmesine ve bunlarla ilgili süreçlere yönelik kapsamlı, sistematik bir yaklaşımdır" (yani üretim, lojistik, bertaraf, vb.)*** (Verhagen, 2015). Buradaki amaç, ürün geliştirmeyi ve pazara sunma süresini azaltarak üretkenliği artırmak ve üretim maliyetlerini düşürmektir. Bu metodoloji, ürün yaşam döngüsünün tüm erken aşama özelliklerinin, tasarımdan başlayarak bertarafı ile sonuçlanana dikkate alınmasını gerektirir (Verhagen, 2015). Potansiyel olarak endüstriyel insan/robot etkileşimi ile ilgili olan risklerin doğası gereği, iş birlikçi bir sistemin eşzamanlı tasarımı, entegre ürünler ve süreç geliştirme için İSG gereksinimlerinin erken değerlendirilmesini gerektirir. Güvenli ve verimli çözümler geliştirmek için, endüstriyel bir makinenin (ve ilgili prosesin) genel tasarımı ve erken tasarım aşamalarında güvenlik sistemlerinin işlevsel sistemlerle entegrasyonunu ve optimizasyonunun dikkate alınması gerekir. Bununla birlikte, makineyi güvenlik gereksinimlerini dikkate almadan tasarlayıp geliştirmek ve ardından bunları gerçeğe dönüştürmek yaygın bir yoldur. Bu durum, özellikle iş birlikçi sistemler için tasarım sonuçlarını kaçınılmaz olarak daha verimsiz ve zaman alıcı hale getirir.

Mühendislik tasarımı açısından ürün tasarımı, eşzamanlı mühendisliğin diğer bir temel parçasıdır. Müşteri gereksinimlerini karşılamak için mühendislik tasarımı, fikirlerin ve kavramların oluşturulmasına ve işlevsel ürünlere ve süreçlere dönüştürülmesine izin verir. Şu anda, manuel işlemlerde yer alan optimize edilmiş ürünlerin büyük parçaları, manuel üretim ve montaj için tasarlanmıştır. Bu, özellikle manuel toplama, taşıma, montaj ve / veya üretim için tasarlanmış teknik özellikler ve üretim süreçleri sunduğu anlamına gelir. Ancak, bu bileşenler robotik veya otomatik işleme için uygun özelliklere sahip değildir. Endüstriyel iş birlikçi robot pazarının sürekli olarak büyüdüğü göz önüne alındığında, iş birliğine dayalı operasyonların yakın gelecekte ilginç bir zorluk olacağını söylemek hiç de zor olmayacaktır. Bu nedenle, iş birlikçi görevler sırasında insan-robot fiziksel etkileşimi için gereksinimleri göz önünde bulunduran yeni ürün tasarım yaklaşımları oluşturmak özellikle yararlı olacaktır. Bu nedenle, ürün tasarımı için yeni bir araştırma alanı, yeni bir "İşbirliğine Dayalı Montaj İçin Tasarım" (DFCA/ Design for Collaborative Assembly) yöntemi ekleyerek yaygın olarak bilinen "X İçin Tasarım" (DFX/Design for X) tekniklerini zenginleştirmek olabilir. Fiziksel insan /robot etkileşimi sırasında ortayaçıkabilecek mekanik riskin en aza indirilmesine göre ürün özelliklerinin tasarımını bazı olasılıklar içermelidir.

7. ROBOT BİLİMDE SİBER GÜVENLİK RİSKLERİ

Siber güvenlik, bilişim sistemlerinde elektronik verilerin kriminal veya yetkisiz kullanımına karşı korunma durumu, yaşamın, entegrasyonun, maddi veya manevi varlıklarımızın hatta elektronik ortamdaki verilerimizin güvenliğinin, bütünlüğünün ve gizliliğinin korunması şeklinde tanımlanabilir. Robotbilimde ise, kontrol sistemlerini, kritik altyapıları ve teknoloji taşıma sistemlerini içerebilecek bilgisayar sistemlerine yönelik saldırıları savunmaya çalışan bir alandır. Elektronik, bilgisayar ve ağ etki alanlarının gizliliği, bütünlüğü,

kullanılabilirliği, özgünlüğü ve reddedilmemesi gibi beş güvenlik hizmeti sağlar. Resmi ve tüzel kurumların çoğu, çok miktarda gizli veri toplar, işler ve depolar ve ağlar üzerinden diğer sistemlere iletir. Siber güvenliğin en önemli nedenlerinden biri, güvenlik risklerinin sürekli gelişen doğasıdır. Geleneksel sistemlerin birçoğu önemli tehditlere karşı koruma konusunda başarılı olsa da birçok olası tehdit hala keşfedilmemiştir. Siber saldırıların hacmi ve karmaşıklığı katlanarak arttıkça, ulusal güvenlikle ilgili olduğu kadar kişisel çıkarları ve internete bağlı makinelerle ilgili bilgileri de büyük bir titizlikle korumak gerekir.

Böylece bir teknoloji, süreç ve uygulama grubu, ağların, bilgisayarların, programların ve verilerin saldırı, hasar veya yetkisiz erişimden korunması için çalışır. Ulusal Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (NIST/National Institute of Science and Technology), **siber saldırıyı, siber alanı bir bilgi işlem ortamını veya altyapısını bozmak, devre dışı bırakmak, yok etmek veya kötü amaçlı olarak kontrol etmek için kullanmak için bir araç** olarak tanımlar. Siber saldırı, verilerin bütünlüğünün yok edilmesine veya kontrollü bilgilerin çalınmasına yol açacaktır. Robot ortamında ise robotun istem dışı hareketler yapmasına neden olacaktır. Siber altyapı genellikle Elektronik Bilgi ve iletişim sistemleri, donanım ve yazılım, depolama, işleme ve iletişimden oluşur. Teknolojik operasyonların en büyük riski olan siber güvenlik, teknolojiyi neredeyse her alanda kullanabilmektedir.

İlk nesil robotlar sensörlerden yoksun sabit, programlanamayan, elektromekanik cihazlarla kontrol edilebiliyordu. Bunların yerini sensör ve kontrol cihazları ile gelen ikinci nesil robotlar aldı.

Üçüncü nesil robot, ikinci nesil robotun daha da rafine bir versiyonuydu ve birçok değişik özelliklerle doluydu, bu robotlar, sabit veya hareketli olabiliyor, konuşma, tanıma ve sentezle birlikte karmaşık programlama yeteneklerine sahip oldular. Bu gelişmelerle birlikte, robotun tanımı da sürekli olarak değişti, robot, hız ve hassasiyetin bir kaydını tutarak görevleri tekrar tekrar gerçekleştirmek için tasarlanan bir birim olarak tanımlanabilir hale geldi. Çekçe'de "zorla çalıştırmayı" anlamına gelen "robota" kelimesinden türeyen robot, günümüzde de hala bir operatörden ve bilgisayar sisteminden emir alarak çalışan iş gören durumundadırlar. Robotlar nasıl kontrol edildiklerine bağlı olarak başlıca iki grupta incelenirler;

1) Otonom Robotlar: Bunlar insan veya operatör müdahalesine ihtiyaç duymayan ve görevleri kendi başlarına gerçekleştirebilen robotlardır, Ör: Herhangi bir engelleme ile karşılaştığında yön değiştirerek çalışmasına devam eden robotlar. (Bump and Go).

2) Böcek Robotlar: Tek bir kontrolörün komutuyla çalışan bir grup robot, böcek robotları kategorisine girer. Filonun tamamının tek bir lideri takip ettiği bir böcek kolonisine benzer.

Bir robotun sahip olması gereken ana karakteristikleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

1) Hissetme: Bir robotun çevresinde olanları hissedebilir olması gerekir, bu amaçla ışık sensörleri, dokunma ve basınç sensörleri, kimyasal sensörler, sonar sensörleri ve tatma sensörleri ile donatılmıştır.

2) Hareket: Robotu etkin kılan en önemli özelliklerinden biri hareket yeteneğidir, hareket etmek için tekerleklere veya yürüme mekanizmaları ile mafsalları ile hareketlerini sağlar. Hareket, robotun pozisyonunda gerçek bir yer değiştirmeyi veya hareket etmek için robotun basit parçalarını gösterebilir.

3) Enerji: Bir robotun işlevlerini yerine getirebilmesi için gerekli miktarda enerji / güç ile donatılması gerekir. Bu enerjiyi, güneş pillerinden, pillerden veya elektrikten alabilir.

4) Zekâ: Robotlar kendileri için hazırlanan spesifik programlarla çevreye uyum sağlayacak bir zekâ düzeyine erişirler, akıllı robota dönüşürler. Akıllı robot, ortamından ve deneyiminden öğrenebilen ve bu bilgiye dayalı yeteneklerini geliştirebilen yapay bir zekâ (AI/Artificial Intelligence) sistemidir.

Böylece, robot bir görevi yerine getirmek için aynı anda çalışan sensörleri, kontrol sistemlerini, manipülatörleri, güç kaynaklarını ve
yazılımları içeren bir sistem olarak adlandırılabilir. Makine mühendisliği, fizik, elektrik ve yapı mühendisliği gibi alanlardan destek alır, matematik ve bilgisayar teknolojisi de katkıda bulunur. İnsanlarla paralellikleri nedeniyle, belirli gelişmiş robotlara Android adı verilir, böylece daha çok alanda insanlığa yardımcı olurlar. Robotların bir kısmı görevlerini kendi başlarına yaparlar. Diğer robotlar her zaman onlara ne yapacaklarını söyleyen bir kişiye sahip olmalıdır. Sonuç olarak robotik/ robot bilim, robotların tasarımı, üretimi ve işleyişi ile ilgilenen bir mühendislik dalı olarak, yapay zekâ, nanoteknoloji ve biyomühendislikten büyük destek alır.

Robotiğin 3 ana kanununa göre;

- Robotlar asla insanlara zarar vermemelidir.
- Robotlar kuralı ihlal etmeden insanlardan talimatları takip etmelidir,
- Robotlar herhangi bir kuralı ihlalinden kendilerini korumalıdır.

7.1. Robotikte Siber Güvenliğinin Önemi

Hızlı değişim geçiren bir dünyada, inovasyon ve teknoloji, son birkaç on yılda robot biliminin sürekli gelişmesine neden oldu. Başlangıçta sadece üretim dünyası ile sınırlı olan robotbilim, günümüzde üretkenliği daha kısa sürede artıran, karmaşık işler yapabilen bir yapı haline geldi. Veri, sistemler ve insanlar dijital olarak bağlandıkça siber tehdit katlanarak artmaya başladı. Önümüzdeki on yıl içerisinde robotik ve otomasyon endüstrisinin 62 milyar dolardan 1,2 trilyon dolara çıkacağı tahmin ediliyor. Tüketici robot endüstrisinin 2019 yılına kadar 1,5 milyar doların üzerinde olduğuna inanılıyor. Ayrıca robotik, Bulut Bilişim Ortamı ile de ilişkilendirilebilir. Robotike (robotbilim) olan talep arttıkça, robotiklerle ilişkili riskler de artmaya, robotlardaki artan siber güvenlik ihlalleri robotik üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmaya başladı böylece firmalar finansal ve saygınlık açısından zarar görmeye başladılar. Saldırıya uğramış bir robot insanlara zarar vermek veya kasıtlı olarak arızaları gerçekleştirmek için kullanılabilir. Bu nedenle de önümüzdeki yıllarda, bilgisayar korsanlarının endüstri korumalarını geçersiz kılabilmesi, hizmetleri bozabilmesi, ürünlere zarar verebilmesi ve önemli bilgileri çalabilmesi çok daha kolay hale gelecektir. Gerçek zamanlı kısıtlamaların çoğu robotik uygulamalarında genellikle çok önemli bir rol oynar. Yazılım hataları ve güvenlik açıkları dışında, robotik de İletişime eğilimlidir. Robotik alanında güvenlik ve gizlilik gerektiren birkaç uygulamadan bahsedecek olursak;

Savunma ve Uzay Endüstrisi: Askeri amaçlarla, gözetim ve savaşma amaçlı olarak kullanılabilen insansız hava araçları olarak da bilinen cihazların tanıtımında robotbilimden faydalanılmaktadır. Bu tür cihazların genelde Şifrelenerek kullanılması gerekir. Şifrelenmedikleri takdirde, kötü niyetli birinin kontrolü ele geçirerek, Şifrelenmemiş bir insansız hava aracını kolaylıkla istediği gibi kullanabilmesi mümkündür. İstediği takdirde, kontrolüne aldığı aracı rahatlıkla nüfusun yoğun olduğu bir bölgeye kötü amaçla yönlendirebilmesi mümkündür. Bunun dışında, bir kuruluşun hassas veri merkezlerine girerek kayıtları sabote eden bağlı robotların denetimini ele geçiren kötü niyetli saldırılar da olabilir.

Tıbbi Ameliyatlar: Robotlara komutlar vererek hastaların ameliyat edilmesinde potansiyel bir tehlike vardır. Robotun kullanıldığı bir ameliyatta, ameliyat sırasında robot cerrahla birlikte aynı iş birlikçi ortamı kullanmaktadır, sistemde herhangi bir şifreleme veya kimlik doğrulama aşaması yoksa, sistem saldırıya açıktır ve yetkisiz bir kuruluş cerrahi robotun denetimini eline geçirdiği takdirde robot her türlü riske açık hale gelir.

Ev Robotları: Bu robotlar asistan veya evde çeşitli işlerde hane halkının günlük işlerinde yardımcı olabilir. Çalışmaları sırasında, işlerinin gereği olarak, çeşitli sensör ve kameralarla donatılmış oldukça büyük bir bilgi havuzuna sahip olabilirler. Ancak bu bilgilerin çok iyi korunuyor olmaları gerekir. Bazı robotlar ev işlerine yardımcı olurken bazıları da insanların sağlıkları ile bilgileri toplayabilirler. Bu tür hassas bilgiler dikkate alınmalıdır, ihmal, yetkisiz bir kişinin ev robotunu kontrol altına almasına ve hassas verilere erişmesine neden olabilir.

Afet Robotları: Günümüzde robotbilim teknolojisi afetlerde kurtarma çalışmalarında da kullanılmaya başlandı. Afet robotlarına, zararlı sistemlere veya maddelere erişme, bunları kırma, onarma ve bozma sorumluluğu verilebilmektedir. Diğer robot uygulamalarında olduğu gibi, robotlar aşırı tehlike oluşturabildiğinden, harici bir kuruluş tarafından erişilmemeleri gerekir. Örneğin herhangi bir nükleer tesiste yetkisi olmayan birinin robota erişebilmesi vb. gibi.

7.2. Robotikte Mevcut Güvenlik Durumu

Robotik cihazın verimli bir şekilde yönetilmesi ve kontrol edilebilmesi için sensörler, kontrol sistemleri, manipülatörler ile yazılımlar kullanır.

Bileşen tabanlı yazılım mühendisliği robotikte önemli bir rol oynadığından, bileşenler protokolleri kullanarak birbirleriyle iletişim kuran bireysel bilgisayar programları gibi davranır. Robot İşletim Sistemi (ROS/ Robot Operating System) ve yine başka bir Robot Platformu (YARP/Yet Another Robot Platform), topolojiye

bağlı birçok ana bilgisayarda bir dizi program içeren robotik odaklı mimarilerdir. Bileşen tabanlı yazılım mühendisliği robotikte önemli bir rol oynadığından, bileşenler protokolleri kullanarak birbirleriyle iletişim kuran bireysel bilgisayar programları gibi davranır. Robot işletim sisteminde iletiler şifrelenerek veya şifrelenmeden çeşitli protokoller kullanılarak iletilirler. MD5, veri bütünlüğünü sağlayan ve çeşitli kimlik doğrulama mekanizmalarının tanıtıldığı bir mesaj özet algoritmasıdır. Sistem Şifrelenmediği takdirde, sistem çok kolay bir şekilde başka bir gücün kontrolüne geçebilir. YARP'ta sensörler, işlemciler ve aktüatörler yazılımlarla bağlantılıdır. Uygulama bozuk verilere açık olduğundan yüksek güvenlik riskine yol açar.

Robotik için siber güvenlik, sistemin mevcut güvenlik teknolojilerinin ötesinde esnek olmasını gerektirir. Örneğin, bir robot bir hedefe küçük bir paket teslim edecekse, birden fazla faktörü göz önünde bulundurmalıdır. Çevreyi akıllıca kontrol ederek hedefe güvenli bir şekilde yaklaşabilmelidir, hedefi belirleyip oraya doğru yönelirken kendisinin bulunduğu veri yolunun algılanmaması gerekir. Engellerden kaçınmak ve herhangi bir hasar meydana gelmesi durumunda uyarlanabilir olması için titiz olması önemlidir. Gerekirse yeniden yapılandırılması ve değiştirilmesi kolay olmalıdır. Bu özelliklere rağmen, başka güçlerinin kontrolüne girme risk yine de yüksektir. Akıllı cihazları ihlal ederek, kişisel bilgileri edinmek ve onları başka amaçlarla kullanabilmek mümkündür. Nitekim yapılan bir araştırmada son zamanlarda 69.00'den fazla akıllı cihaz kablosuz saldırıya uğramıştır. (Bolden, 2015)

Robotik etki alanında herhangi bir siber saldırı ya bir uç nokta uzlaşma sorunudur ya da bir ağ-iletişim tabanlı saldırıdır. Uç nokta uzlaşması, denetleyicinin robotu kontrol edemediğini görürken, ağ iletişimi tabanlı saldırı, bir saldırganı ağa gizlice dinlemeye veya kötü amaçlı kod enjekte etmeye teşvik eder. İki saldırı vektörünün yoğunluğunu karşılaştıran bir faktör fiziksel erişimdir.

Ağ iletişimine dayalı saldırılara fiziksel erişim daha fazla olduğundan, uç nokta uzlaşma saldırılarına kıyasla çok daha fazla gündeme gelirler. Robotik ortam birçok risk ve güvenlik açığı tarafından tehdit altındadır. Karar değişikliğinden kaynaklanan saldırılar: Bu tür saldırılar, kontrolör tarafından kumanda edilen bir robotun eylemlerini etkilemek için kasıtlı olarak gerçekleştirilir. Bu özel saldırı, paketler hala geçiş modundayken iletiyi değiştirmeyi amaçlamaktadır. Özellikle, paket üstbilgileri bir rakip tarafından paketleri başka bir hedefe yönlendirmek veya hedef makinelerde bulunan verileri değiştirmek için değiştirilir. Hizmet Reddi saldırıları, Bir Niyet Değişikliği saldırı sınıfı temsil eder. Bu tür saldırılarda, robotların ağ ara yüzü Aktarım Katmanı Protokolü trafiği TCP (Transmission Control Protocol) ile engellenmiştir. Bu saldırıların da başlıca iki sonucu vardır;

Robotu Durdurma: Robotun hizmeti aksatma saldırısıyla boğulmuş olmasının fiziksel bir göstergesidir. Aynı zamanda robotun düzensiz hareketlerine yol açabilir. Robot tekrar tekrar ve farklı süreler için durdurabilir, hız da değişebilir.

Yön Komutlarına Yanıt Vermede Gecikme: Hizmet aksatma saldırısı altındaki bir robotta, düşük hızdan yüksek hıza geçiş sırasında gecikmeler görülür. Çeşitli navigasyon komutlarına anında yanıt veremeyebilir.

Hedef Saptırma /Kasıtlı Manipülasyon Atakları: Kasıtlı manipülasyon saldırısında, saldırgan robotlardan kontrolöre iletilen mesajı yeniden yapılandırır. Bunlar denetleyici tarafından verilen girişe bir yanıt olduğu için geri bildirim mesajları olarak da bilinir. Denetleyicinin amacı gerçek olduğundan, bu saldırıları gerçekleştirmek bir miktar zordur. Ancak, doğru yürütülürse, bu tür saldırıları algılamak veya önlemek zor olabilir. Manipüle edilen geri bildirimin meşru olduğuna inanılırsa, olumsuz sonuçlara yol açabilir. Robotların çoğu iletişim ağları tarafından yönetildiği için manipülasyon saldırılarına karşı son derece savunmasızdırlar. Robottaki bileşenleri manipüle etmek ve herhangi bir insan müdahalesi olmadan ağa yaymak için bir solucan (Solucan virüsü kendisini bir bilgisayardan başka bir bilgisayara kopyalamak için tasarlanmıştır. Ancak bu işlem otomatik olarak gerçekleşir. İlk olarak bilgisayarda dosya veya bilgi ileten özelliklerin denetimini ele geçirir. Solucan bir kez sisteminize girdikten sonra kendi başına ilerleyebilir.) yazılabilir.

Bağlantıyı Ele Geçirme Saldırıları: Bu, düşmanın veya saldırganın iki uç nokta arasındaki iletişimi kontrol altına aldığı saldırı şeklidir. Eğer iki uç noktada denetleyici ve robot olduğu biliniyorsa, saldırgan denetleyiciyi devre dışı bırakarak etik olmayan bir şekilde robotun içinde olduğu sistemi ele geçirmeye çalışır. Bu el koyma işleminde, saldırgan, robotun kontrolünü geçici veya kalıcı olarak birkaç saatliğine veya geri dönülemez şekilde ele geçirebilir. Bu saldırılar iki şekilde gerçekleştirilebilir:

Ağ Gözlemcisi: Bir denetleyici ile robot arasında iletilen bilgileri dinleme veya gözetleme niyeti olan kötü niyetli biri. Bu kötü niyetli, bilgi toplama, iletişim ağına güvenilmez bilgiler sokma ve her iki tarafa da iyi niyetli görünen biri olabilir.

Ağ Aracısı: Kendini denetleyici ile robot arasında konumlandıran bir kötü niyetli, böylece uçlar arasındaki gizli iletişimi engelliyor.

7.3. Robotlar Arasında Siber Güvenlik Risklerinden Kaçınmak İçin Bazı Azaltma Stratejileri

Güvenlik ihlallerinin sınır tanımaması ve robotik alanının bu kadar güvensizliğe karşı savunmasız olması nedeniyle, bu tür saldırıların insanlara zarar vermeden önce mutlaka önlenmesi gerekir. Saldırıları tanımlamak ve bir sistemi güvence altına almak ve hafifletmek için çeşitli yöntemler ortaya konmuştur.

- **İletişimin Dayanıklılığı:** Komutların bir kumandadan robota iletilmesi ve robottan kumandaya geri bildirim için bir iletim ortamı gerekir. Saldırıların çoğuna karşı savunmasız olan bu iletim aracıdır. Aktarılan bilgiler için kanallar üzerinden bir güvenlik katmanı sağlanması kesinlikle olası güvensizlikleri azaltacaktır. İletişim adanmış olduğundan, iletilen veriler üzerinde kimlik doğrulama mekanizmalarının şifrelenmesi ve tanıtılması, değişiklik, manipülasyon ve saldırı saldırılarını kısıtlayacaktır.
- **Robot İşletim Sisteminde Veri Dağıtım Hizmeti:** Daha önce tartışıldığı gibi, Robot İşletim Sistemlerinde (ROS) mesajlar, gizli dinlemeyi teşvik eden Şifreleme olmadan iletilebilir. Ancak, veri Dağıtım Hizmeti'nin (DDS/Data Distribution System) bir aktarım katmanı olarak entegre edilmesi, kimlik doğrulama, erişim denetimi ve Şifreleme sağlayan eklentilerin yüklenmesine yol açacaktır.
- **Başka Bir Robot Platformu (YARP/Yet Another Robot Platform)'nda Kimlik Doğrulama Mekanizması:** YARP'tan yararlanıldığında tüm altyapı ortaya çıkabilir. Ancak, anahtar değişimi sağlanarak YARP'ta bir kimlik doğrulama mekanizması getirilebilir. Port izleme ve tahkim, iletilen verilerin uygun şekilde kodlanmasını ve kodunun çözülmesini sağlayabilir.
- **Bulutu Güvence Altına Alma:** Bulut robotik, bulut bilişim ortamına gömülü robotiklere sahip bir yayılan alandır. Bulut depolama ve bulut altyapısının diğer internet teknolojilerine dayanır. Robotik uygulamalar için bellek, hesaplama gücü ve ara bağlantının geliştirilmesine yol açar. Veriler, sensörler tarafından toplanır ve ilgili bilgiler ağlarla iletişim merkezine yüklenir. Bilgiler işlenir ve diğer robotlarla paylaşılabilir.
- **Bilgisayarlar ve Bilgisayar Birimleri Arasındaki İletişim:** İletişim otobanı tarafından da güvenli iletişim sağlanabilir. Geleneksel iletişimin aksine, iletişim otobanı Ethernet'e dayanır ve bu nedenle TCP/UDP/IP ile ilgili özelliklerden yararlanabilir.

1) Güvenli Uygulamalar Olarak Robotlar:

Robotik platformunun yapısı geleneksel bilgisayar sistemleri platformuna dayanmaktadır ve bu nedenle güvenlik sorunları her ikisi için de benzerdir. Robotik platformlar ağırlıklı olarak donanım ve yazılım bileşenlerinden oluşur. Genel amaçlı robotların popülerliğinin artmasıyla birlikte, robotlardan istediğimiz görevler de artmakta ve bununla ilgili olarak birçok uygulama ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle de robotların mutlaka güvenli hale getirilmesi gerekir. Gizlilik belirli erişim kontrol mekanizmaları tarafından elde edilebilir başka bir önemli endişe ise yüksek düzeyde soyutlamalar sistemi güvence altına almak için kullanılabilir. Kullanıcılar güvenli bir şekilde tanımlandıkça ve ayrıcalık düzeyleri verildiğinden, gizlilik sağlanır, bunun için de robotikte güvenliği sağlamak için özel yazılım mimarileri önerilmiştir. Üst düzey soyutlamalar robotlar için politikaları tanımlar. Çerçevenin ana bileşenlerini ayırmak ve bunlar arasında katı bir arabirim tanımlamak, sistemin kolayca güvence altına alınmasına olanak sağlayabilir. Bu durumda bileşenler arası iletişim, kolayca denetlenebilecek ortak bir mesaj geçirme ara yüzünden geçecektir. Verilen şekil, farklı iletilerin iletilmesinden sorumlu ince bir yazılım katmanında yaşayan bir mikrokernele (mikro çekirdek) benzeyen önerilen bir mimaridir. Yukarıdaki katmanlar, donanıma özgü özellikler, robot soyutlamaları ve uygulamalar için soyutlamalar uygular. Üstte çalışan uygulamalar, daha düşük seviyelerin taşıdığı soyutlamaları kullanır.

Robotlarda çok fazla güvenlik uygulaması vardır, bunlardan dört tanesini inceleyecek olursak;

- **Uzaktan gözetim için robotlar:** RoboSentry gibi otonom mobil platforma güvenen robotlar sadece tekerlekler yardımıyla hareket etmekle kalmıyor, aynı zamanda video, ses ve diğer hassas verileri de kaydedebilme özelliklerine sahiptirler. Özerk ve yüksek çözünürlüklü kameralara sahip olup uzaktan kumanda edilebilirler. Tehlikeli gazları tespit etme yeteneğine sahiptirler ve güvenlik ve Kapalı Devre Televizyon (CCTV/ Closed Circuit Television) sistemlerini entegre edebilirler.

- **Alarm Doğrulama Robotları:** Herhangi bir güvenlik kurulumu için yanlış alarm istenmeyen bir durumdur. Birçok robot alarm durumunu doğrulayabilme yeteneğine sahiptir. Robotlar mevcut güvenlik, erişim kontrolü ve CCTV sistemlerine entegre edilebilirler. Alarm koşulları tespit edilirse, robotlar mümkün olan en kısa sürede uyarılabilirler. Uyarıyla birlikte, dahili sensörler ısı, duman ve alevlerin varlığını onaylayabilir ve aynı zamanda canlı ses ve görüntü mesajları gönderebilir. Merkezi istasyona gönderilen bir onay sinyali herhangi bir aksiliği önlenmesinde yardımcı olacaktır.

- **İzleme Robotları:** Otonom bir mobil platforma sahip belirli bir aralık göz önüne alındığında, bir robot Radyo Frekansı Tanımlama (RFID/Radio Frequency Identification) etiketli öğeleri izleyebilir ve bulabilir. Yerleşimdeki belirli bir öğenin geçerli konumu bir robot tarafından oluşturulabilir ve korunabilir. Ayrıca zaten var olan bir güvenlik sistemine entegre edilebilir.

- **Tesis Yönetimi için Robotlar:** Otonom bir mobil robot, bir tesisin son derece doğru, dinamik olarak korunan yerleşimini oluşturma ve koruma yeteneğine sahiptir. Bu harita bilgi toplamak için kullanılabilir. Örneğin, herhangi bir yerleşimdeki koridorlar, tıkanmış koridorlar, sıcaklık, wi-fi kapsama alanı, güvenlik aydınlatmasındaki arızalar ve cep telefonu kapsama alanı gibi parametreler bu robotlar tarafından saptanabilir. Robot tarafından tespit edilen ses ve video kayıtları ile anlık görüntüler tesis yönetimi için kullanılabilir.

- **Robotikte (Robotbilim) Etik:** Son gelişmelerle birlikte, robotik, araba sürme, tıbbi kayıtlar ve günlük faaliyetlerde günlük yaşantımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Ancak, bu işlemlerin çoğu internet ortamında yapıldığından, gizlilik ve güvenlik sorunu gündeme gelmiştir. Akıllı robotlar ve sürücüsüz arabalar etkilidir ama etik sorunları da beraberinde getirirler. Siber teknoloji, robot bilimin yaygın bir şekilde kullanılabileceği el aletleri, kişisel bilgisayarlar, ana bilgisayarlar vb. birçok cihazın üretiminde kullanılır. Siber etik,bilgisayar uzmanları tarafından gerçekleştirilen bilgi işlem makinelerinde etik konuların temelini oluşturur. Robotikte siber güvenlik etiği hem siberetik hem de teknolojik etikten oluşur. Siberetik, bilgisayarlara ilişkin etik ile ilgilenip, bilgisayar sistemlerinin davranış ve etkilerini göz önünde bulundurabilirken, teknolojik etik daha çok yeni teknolojinin geliştirilmesiyle ilgilenir. Robotik hem siber hem de teknolojiyi desteklediğinden, robot bilimindeki etik her iki alana da uygun olmalıdır.

Robotbilimde etik, insan davranışları, insanların nasıl tasarım yaptıkları, tasarımlarını nasıl inşa ettikleri ve onlara nasıl davrandıkları ile ilgilenir. Teknoloji ve siber uzay açısından robotik açıdan bazı etik zorluklar aşağıdaki gibi belirtebiliriz;

Telif Hakları: Etik kurallar sanatçıları yapımcıları etkilediği gibi robotun, bir parçası olduğu ülkelerdeki endüstrileri, ulusal hükümeti ve uluslararası ilişkileri etkileyebilir. Bu yüzden, yeni inovasyon yaratmak için telif hakkıyla korunan malzemelerin kullanımı kısıtlanmıştır.

Siber Suç: Teknoloji sosyal, kültürel ve ekonomik alanları etkiler. Çoğu zaman işletmeler telif hakkı ile ilgili hususları istismar etmek isterler. Siber suçlar hızla arttıkça, suçlular insanların özgürlüğünü tehdit etmek için dijital araçlar kullanabilirler.

Gizlilik ve Güvenlik (Havaalanlarında Tam Vücut Tarayıcıları Olgusu): Tam vücut X ışını tarayıcıları tanıtıldığından itibaren birçok kişi insanların gizliliğini sorgulamaya başladı. Güvenliği artırmak için, insanların dikdörtgen bir elektronik çerçevenin içerisinde durması istenip, insan üzerinde metal tespit etmek amacıyla, kişisel mahremiyet ve tevazu kötüye kullanılarak, istenirse alternatif dalga boyu kullanılarak insan vücudunu çıplak görüntüleyebilmek mümkün olabilmektedir.

Gizlilik ve Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS/Privacy and Global Positioning Systems) Teknolojileri: GPS cihazları Robotik evriminde önemli bir rol oynamıştır. Cep telefonu taşıyan kişilerin konumu, gizliliğe meydan okuyan GPS teknolojisi ile anında izlenebilir. Bu sadece vatandaşların devletleriyle olan etkileşimini değil, aynı zamanda işyerlerindeki çalışanların da etkileşimini etkiler. Ancak, birçok araç ve ekipman GPS'i destekleyerek sivil özgürlüklerle çelişmektedir. Bu tür teknolojik etkiler nedeniyle uygun gizlilik seviyeleri sorgulanmaktadır.

Kendi Hedeflerini Seçme İçin Otonom Robotlar: Otonom sistemler popüler hale gelmesiyle birlikte insanların özel alanlarına tecavüz etmeye başladılar, bu nedenle bunların kontrol edilme ihtiyacı gündeme geldi. Örneğin, otonom sisteme sahip bir araba insanların beklediği bir otoparkta park yerini almak için bekleyen araba kuyruğunu ihlal edebilir veya insanlar beklerken bir mağazadan sınırsız mal tedariki yapan sistemler olabilir. Otonom bir robotun kendi hedeflerini seçmesine izin verilmemelidir. Buradaki hedef etik kuralların dışına çıkmayacak ve çıkmasına izin verilmeyecek robotlar tasarlamaktır.

8. ROBOTİKTE UYULMASI GEREKEN BAZI ETİK KURALLAR

Robotlar topluma birbirinden değişik çok fazla konuda hizmet ve yardım eder. Robotik teknolojisi ilerledikçe, bazı etik sorunlar ortaya çıkar. Siberetik ve teknolojik etik ile ilgili robotik etki alanı için, etiği tanımlamak üzere kesin ilkeler belirlenmelidir.

1) **İnsan Onuruna İlişkin Hususlar:**
   - İnsanların duygusal ihtiyaçlarına her zaman saygı duyulacak,
   - İnsanların mahremiyet hakkına her zaman saygı duyulacak,
   - İnsanın kırılganlığına her zaman, fiziksel ve psikolojik olarak saygı gösterilecek,
2) **Tasarım Sırasında Dikkat Edilmesi Gerekenler:**
   - Robotik sistemlerin programlamasında azami şeffaflık sağlanacak,
   - Robotik davranışta öngörülebilirlik arzu edilir,
   - Güvenilir sistem tasarım ilkeleri bir robotun çalışmasının tüm yönleri için gereklidir,
   - Makul tasarım hedeflenerek, kullanıcılara gerçek zamanlı durum göstergeleri sağlanmalıdır,
   - Bariz devre dışı bırakma mekanizmaları, makul tasarım hedefleri ile büyük ölçüde tutarlı olmalıdır.
3) **Yasal Hususlar:**
   - Bireylerin hakları ve korumaları ile ilgili tüm ilgili yasa ve yönetmeliklere uyulması gerekir,
   - Bir robotun karar yolları dava ve uyuşmazlık çözümü amacıyla yeniden inşa edilmelidir,
4) **Sosyal Hususlar:**
   - Robot tasarımı sırasında, ırkçı, cinsiyetçi, güçlü morfolojileri veya davranışlardan uzak durulmalıdır,
   - İnsanların robotlara bağlanma eğilimi tasarım sırasında düşünülmelidir.

8.1. Siber Güvenliği Sağlamak İçin Gerekli Robotik Yasalar

Bir robotun tüm işlevlerini etik sınırları içinde yerine getirebilmesi için bazı yasalar getirilmiştir.

1) Otonom bir insansız hava aracının çarpması veya yanlış gitmesi veya otomatik bir aracın kazaya neden olması durumunda tasarımcının, programcının, üreticinin veya operatörün hatalı olup olmadığının belirlenmesi zorunludur. Sorumlulukları tahsis etmek için, otonom sistemlerde zamanı belirten kayıtlar bulunmalıdır, bu bilgiler gerektiğinde referans olarak gösterilmelidir.

2) Etik sistemler robotlara gömülmüşse, alınan kararların çoğu insan için haklı görülmesi gerekir. Bunun için deneysel felsefe de kullanılabilir.

3) Mühendisler, avukatlar ve etik politikalarını oluşturanlar arasında iş birliği, doğru bir sistemin tasarlanmasına yardımcı olacaktır, (Kaynak: Priyadarshini, 2017)

9. KOLABORATİF ROBOTLARDA RİSK AZALTMA VE RİSK DEĞERLENDİRME

Daha önceki tanımlamalarımıza ek olarak, endüstride kullanılan robotlar için, endüstriyel otomasyon uygulamalarında kullanım için sabit veya hareketli olabilecek 3 veya daha fazla eksende programlanabilen, otomatik olarak kontrol edilen, yeniden programlanabilir çok amaçlı bir manipülatör ifadesini kullanabiliriz. Gerek endüstriyel robotlar ve gerekse iş birlikçi olanları endüstrinin çeşitli sektörlerinde vidalama, monte etme, yerleştirme, kaynak, yükleme, boşaltma, yükleme ve boyamaya ek olarak tıpta ameliyatlarda bile kullanılır hale gelmişlerdir. Bunun yanı sıra, tehlikeli ve tekrarlayan görevlerde de rahatlıkla kullanılabilirler. Her gün daha fazla uygulamada yer alan robotlar, uygulamalar gerektiği gibi incelenmediği ve irdelenmediği durumlarda, ciddi ve ölümcül iş kazalarına neden olabilirler. Çalışmada, yatay enjeksiyon kalıplama makinesine yardımcı ekipman olarak kullanılan endüstriyel bir robotun güvenliğini içeren bir vaka çalışması, risk analizi veya buna ilişkin risk azaltma önlemleri üzerinde durulmakta, ana tehlikeler ve riskleri azaltmak için kullanılan genel yöntemler sunulmaktadır.

Endüstriyel Robotların Karıştığı Kazaların Nedenleri:

32 kazanın analizine dayanan bir çalışmada, robot operatörlerinin (%72), bakım işçilerinin (%19) ve programcıların da (%9) çeşitli yaralanmalara uğradığı görüldü. Bu yaralanmalarda, operatörün robotla bir nesne arasına sıkıştığı yaralanmalar %56, robotla işçinin çarpıştığı kazalar ise %44'ü oluşturuyordu. Yaralanmaların nedenleri beklenmedik robot davranışı, insan hataları (örneğin, bir işçi robota yakınken robotu harekete geçiren ikinci bir işçi) ve beklenmedik yazılım sorunlarını içeriyordu. Hasar, kayıpsız hafif yaralanmalardan ölümcül yaralanmalara kadar değişmektedir. Fransa'da Charpentier ve arkadaşları. (Charpentier P, Sghaier A (2012) Industrial robotic: Accident analysis and human-robot coactivity. SIAS Conference.) 1997 ile 2010 döneminde robot operasyonları ile ilgili 31 kazayı analiz etti, bunların 20 tanesinin operasyonlar 11 tanesinin de bakım faaliyetlerinden kaynaklandığını tespit etti. Bu kazalardan, 8 tanesi ölümcül 21 tanesi ise ciddi yaralanma idi. Yaralanma nedenleri arasında, amaçlanan göreve uygun olmadıkları için güvenlik önlemlerinin bulunmaması, yanlış yükleme veya görevlendirme en belirgin olanlar idi. Robotun hareket alanına ihlallerden 6 tanesi sabit emniyet çitleri 8 tanesi ise hareketli koruyucu çitler tarafından engellendi. 5 durumda ise koruyucu emniyet çitlerinin yetersiz kaldığını görüyoruz. Risk değerlendirmesi öncesi, güvenlikle ilgili sorunlar, yanlış kullanım, robotu bypas yapmaya zorlama, duruma uygun olmayan güvenlik ekipmanları kullanma, bozulmuş veya güvenlik ekipmanlarını devre dışı bırakma.

Makinelere İlişkin Risk Değerlendirmesi:

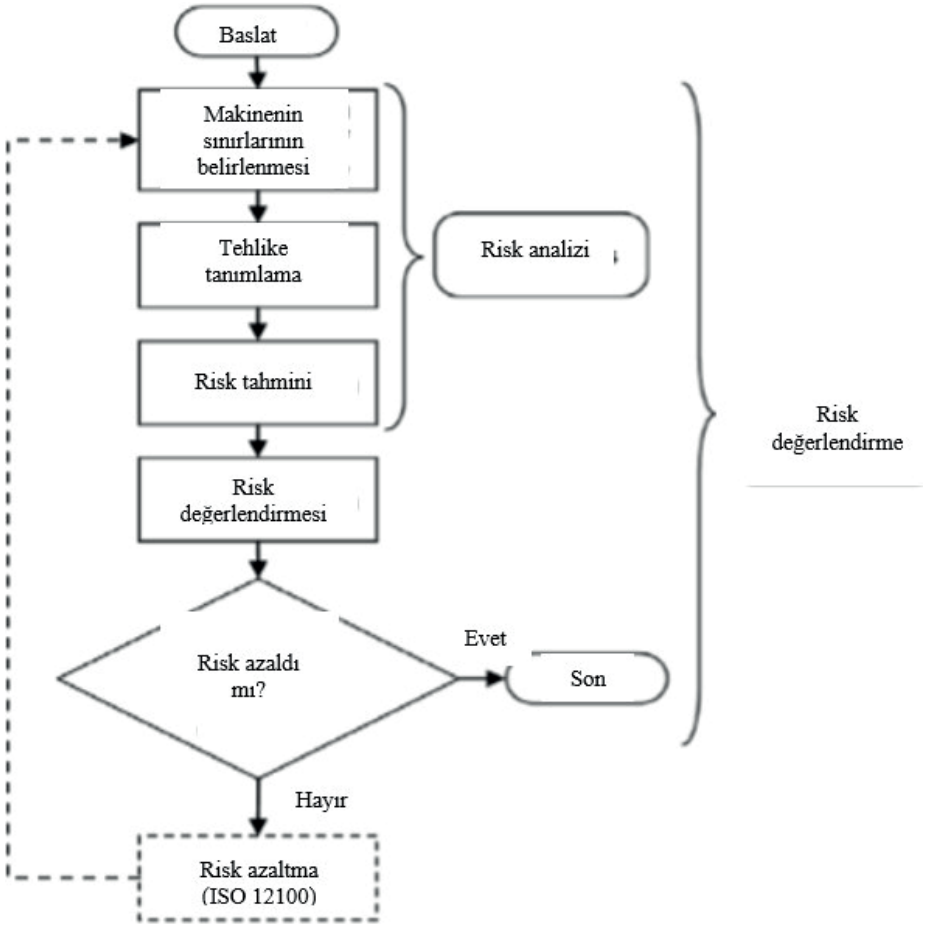
Makinelere bağlı risk ISO 12100'de, **Makine güvenliği-Tasarım-Risk değerlendirmesi ve risk azaltma için genel ilkeler, zararın Şiddeti ve bu zararın oluşma olasılığının bir kombinasyonu** olarak tanımlanır. Makine risk değerlendirmesinin avantajları çoktur;

- Tehlikeler etkin bir şekilde tanımlanır ve daha iyi risk azaltma önlemleri uygulanabilir,
- Yaralanma ve ölümler önlenebilir,
- Para cezaları ve cezai kovuşturma önlenir,
- Mevzuata uygunluk sağlanır ve verimlilik artırılır,

Tehlike, zararın kaynağıdır. Makineler mekanik ve elektriksel tehlikelerin yanı sıra ısı, gürültü, titreşim, radyasyon ve tehlikeli kimyasal ve biyolojik maddelerden kaynaklanan tehlikelere sahiptir. ISO 12100, makine risk değerlendirmesi ve azaltma ilkelerini belirtir Standart, risk değerlendirmesini Şekil 5' de gösterildiği gibi risk analizi ve risk değerlendirmesi olmak üzere iki aşama olarak tanımlar.

Risk analizi, (i) Makine sınırlarının belirlenmesi, (ii) Tehlike tanımlaması ve (iii) Riskin tahmininden oluşur. Tespit edilen her bir tehlike ve tehlikeli durum için gerçekleştirilen risk tahmini adımı, sonuçları risk değerlendirmesini ve dolayısıyla risk azaltma yöntemlerinin seçimini ve önceliklendirilmesini belirleyeceği için önemlidir.

Robotun yaşam döngüsü boyunca çeşitli tehlike kaynakları mevcuttur. Örneğin tasarım, entegrasyon, kurulum, test, doğrulama, işletme, bakım ve eğitim için risk değerlendirmesi gereklidir. En önemli adımlardan bir tanesi tehlike, tehlikeli durum, tehlikeli olay ve olası zararı belirlemektir. Makine, elektrik, termal, gürültü, titreşim, radyasyon, malzeme, ergonomik gibi makine veya robotun kullanıldığı ortamla ilişkili farklı tehlikeler vardır. Tehlikeli durum, kişinin en az bir tehlikeye maruz kalması ve genellikle makine de veya robotta bir görevi yerine getirirken ortaya çıkan durumdur. Tehlikeli olay genellikle doğada, teknik veya insan eylemleri tarafından kaynaklanabilir. ISO 10218-1'in Ek A'sında, robotlar ve robot sistemleri için önemli tehlikelerin bir listesi verilmiştir.



Şekil **10:** ISO 12100'e Dayalı Basitleştirilmiş Risk Yönetimi (Chinniah, 2016)

Risk Tahmin Araçları:

ISO 12100, riskin nasıl tahmin edileceğine ve hangi parametrelerin kullanılabileceğine ilişkin yönergeler sağlar. Bu uluslararası standart, belirli bir tehlikeli durumla ilişkili riskin aşağıdaki iki ana unsura bağlı olduğundan bahseder;

- Zararın şiddeti,
- Bu zararın oluşma olasılığı,

Zarar olasılığı aşağıdakilerin bir fonksiyonudur;

- Kişi ve kişilerin tehlikeye maruz kalması,

- Tehlikeli bir olayın meydana gelmesi,
- Zarardan kaçınmanın veya sınırlandırmanın teknik ve insani olasılıkları,

Standart ayrıca Tablo 7'de özetlenen tüm bu parametrelerin nasıl tahmin edileceklerine ilişkin rehberlik yapar. Ayrıca, risk tahmin araçlarının çeşitli örneklerinin verildiği bir ISO teknik raporu yayınlanmıştır. ISO raporu, makineler için risk değerlendirmesinin yürütülmesi konusunda pratik rehberlik olanağı sağlar.

Tablo 7: ISO 12100'de Tanımlanan Risk Tahmin Parametrelerinin Özeti (Chinniah, 2016)

Parametreler	ISO 12100 Referans	ISO 12100 tarafından verilen parametre tahmin edilirken dikkate alınacak faktörler
Zararın Şiddeti	5.5.2.2	Yaralanma veya sağlığa verilen zararın ciddiyeti (örn. görme yeteneği, ölüm vb.) ve zararın boyutu (örn. bir veya daha çok kişi (vb.)
Zarar görme olasılığı	5.5.2.1	Kişilerin tehlikeye maruz kalması, tehlikeli bir olayın meydana gelmesi ve zararı önlemek veya sınırlandırmak için teknik ve diğer olasılıklar
Tehlikeye maruz kalma sıklığı	5.5.2.3.1	Tehlike bölgesine erişim ihtiyacı, tehlike bölgesinde geçirilen zaman ve erişim gerektiren kişi sayısı ve erişim sıklığı
Tehlikeye maruz kalma süresi	5.5.2.3.1	
Tehlikeye maruz kalma olasılığı	5.5.2.3.2	Güvenilirlik ve diğer istatistiksel veriler; kaza geçmişi; sağlığa zararın geçmişi ve risk karşılaştırması
Zararı önleme ve sınırlandırma olasılığı	5.5.2.3.3	Tehlikelere maruz kalabilecek farklı kişiler (örn. Vasıflı veya vasıfsız); tehlikeli durumun ne kadar çabuk zarara yol açabileceği (örneğin aniden, hızlı veya yavaş); herhangi bir risk farkındalığı (örn. genel bilgi, kullanım bilgisi, doğrudan gözlem yoluyla veya makine üzerindeki uyarı işaretleri ve gösterge cihazları yoluyla, insanın zararı önleme veya sınırlama yeteneği (örn. refleks, çeviklik, kaçma olasılığı) ve pratik deneyim ve bilgi (örneğin, makine, benzer makine veya deneyim eksikliği)

Riskin Azaltılması:

Tasarımcılar, koruyucu önlemleri sağlamak için risk azaltma çalışmalarının yanı sıra risk değerlendirmesi de yapmalıdırlar. ISO 12100, ANSI B11-TR3 gibi standartlar risk azaltma için 3 adım yaklaşımını sunar,

- Doğal güvenli tasarım önlemleri (tehlike giderme),
- Koruma ve tamamlayıcı koruyucu önlemler (sabit korumalar, kilitli hareketli korumalar, güvenlik cihazları),
- Kullanım için bilgiler (makinelerin kullanımı için güvenli çalışma uygulamaları, artık risklerin uyarısı, tavsiye edilen kişisel koruyucu ekipman).

Artık risk, tasarımcı tarafından sağlanan kullanım bilgilerine dayalı olarak kullanıcı tarafından yönetilir.

Kullanıcı tarafından uygulanan koruyucu önlemler aşağıdakilerini kapsar;

- Güvenli çalışma organizasyonu lokavt, denetim, çalışma izni gibi prosedürler,
- Makinenin kullanım amacında tasarımcı tarafından öngörülmeyen belirli bir işlem nedeniyle gerekli ek önlemlerin sağlanması ve kullanılması,
- Kişisel koruyucu ekipman kullanımı,
- Eğitim,

Robot güvenliğini sağlamak için, üreticiler ve kullanıcılar ISO 12100'de ayrıntılı olarak kullanılan 3 adım yöntemini uygularlar. ISO 10218-1'de spesifik risk azaltma stratejileri verilmektedir.

ISO 10218-1'in F ekinde, robot üreticileri için güvenlik gerekliliklerinin ve önlemlerin doğrulanması için gerekli araçlar listelenmiştir. Listelenen yöntemler;

- Görsel muayene,
- Pratik testler,
- Ölçüm,
- Operasyon sırasında gözlem,
- Uygulamaya özel şemaların, devre diyagramlarının ve tasarım malzemesinin gözden geçirilmesi,
- Görev bazlı risk değerlendirmesinin gözden geçirilmesi,
- Kullanım özelliklerinin ve bilgilerin gözden geçirilmesi,

ISO 10218-1'in Ek F'sinde güvenlik gereklilikleri aşağıdakileri kapsar;

- Genel gereksinimler (örn. sabit ve taşınabilir koruma malzemeleri),
- Kumandalar (ör. Durum ve gösterge ışığı),
- Güvenlikle ilgili kontrol (donanım ve yazılım),
- Robot durdurma fonksiyonları (örn. Koruyucu durdurma fonksiyonları),
- Acil durdurma fonksiyonları,
- Azaltılmış hız kontrolü,
- Çalışma modları,
- Programlama cihazı kontrolü,

- Eşzamanlı hareketlerin kontrolü,
- İşbirlikçi çalışma gereksinimleri,
- Tekillik koruması,
- Eksen sınırlaması,
- Tahrik gücü olmadan hareket,
- Kaldırma ve elektrik konektörleri için hükümler,

ISO 13849 ve IEC 62061, makineler için güvenlik kontrol sistemlerinin tasarım ilkelerini belirler. Robotlar için kontrol sistemlerinin güvenlikle ilgili parçalarının güvenilir olması gerekir. Güvenilir güvenlik kontrol sistemleri yedek mimarileri içerir, denenmiş güvenlik bileşenleri kullanır, hata izleme ilkelerini içerir ve temel güvenlik ilkelerini kullanır. Kontrol sistemleri rasgele ve sistematik arızalara karşı dayanıklıdır. Genellikle, güvenilir güvenlik kontrollerini bypas yapmak veya değiştirmek zordur. Denenmiş güvenlik bileşenlerine ve temel güvenlik ilkelerine örnek olarak;

- Hareketli korumaların konumunu izlemek için sıradan emniyet anahtarlar yerine zorla açılıp kapanan tiplerin kullanılması,
- Güvenlik fonksiyonlarını kontrol etmek için elektronik programlanabilir sistemler kullanıldığı takdirde programda modifikasyon yapılmasına engel olunması.
- Güvenlik PLC'leri bu değişiklikleri kısıtlar ve ayrıca fazladan bir iç mimariye sahiptir.
- Sıradan röleler yerine, mekanik olarak bağlı emniyet rölelerinin kullanılması,
- Optik sensörler yerine güvenlik ışık perdelerinin kullanılması,

Güvenlik kontrolü ve operasyon kontrolünün ayrılması ve böylece mekanikçi, elektrikçi ve programcılar tarafından güvenlik kontrol sistemine yaptıkları istenmeyen değişikliklerin oluşturabileceği sıkıntıların azaltılması,

- Güvenlik konum anahtarlarını ve güvenlik cihazlarını, onları bozabilecek ve erken aşınmaya ve hasara yol açabilecek zorlu ortamlardan korumak,

ISO 10218, performans gereksinimlerini yapı kategorisi 3 ile bir performans düzeyi d olarak belirler. ISO 10218 ayrıca donanımda tek bir hata toleransı ile SIL 2 ile uyumdan bahseder.

Robot uç efektörünün hızı seçilebilir hızlarda ve düşük hız kontrolü altında kontrol edilebilir olmalıdır, bu 250 mm/s'den daha düşük veya buna eşit bir hız anlamına gelir. Etkinleştirme/öğretme cihazları 3 konuma sahiptir. Operatör sürekli olarak merkez etkin pozisyonda kaldığında, cihaz robot hareketine kontrollü olarak ancak düşük hızda izin verir. Kumandanın kablosuz olması durumunda olası iletişim kaybında robotun kontrollü olarak durmasını sağlar.

İş Birlikçi Robotlar:

Kolaboratif (İş birlikçi) robotlar, tanımlanmış bir çalışma alanı içinde bir insanla doğrudan iş birliği içinde çalışmak üzere tasarlanmış özel amaçlı robotlardır. Operatör, üretim operasyonu sırasında eşzamanlı olarak görevleri yerine getirebilir. Tablo 8, bu tür robotlar için dört çalışma modunu göstermektedir. İşbirlikçi robotlar, üreticileri tarafından tesislerdeki operatörleri güçlendirici araçlar olarak sunulmaktadır. Operatörler robotların eğitimi ve denetiminden sorumludur.

Tablo 8: İş Birlikçi Robotların Çalışma Modları (Chinniah, 2016)

İş Birlikçi Robotların Çalışma Modları	Tanım	Güvenlik Hususları Üzerine Yorumlar
Durdurulmuş Durum İzleme veya Sınırlandırılmış Güvenli Duruş	Çalışanın ortak çalışma alanına girmesi durumunda robot durmaktadır. Bu alan taranan bir alan olabilir. Çalışan ortamdan ayrılana kadar izleme devam eder. İşçi iş birlikçi alandan çıktığında robot otomatik çalışmaya devam eder.	İş birlikçi çalışma alanı olarak adlandırılsa da işçi kafese girdiğinde duran robot korumalı bir robotu andırır. Tek farkı işçi ortamdan ayrıldığında robotun çalışmaya devam etmesidir. Yardımlaşmadan çok iş birliği gibidir. (Örn. Manuel yükleme istasyonu)
Hız ve Mesafe İzleme	Çalışan robotun yanına yaklaşması durumunda robot yavaşlar. Çalışan robotun yakınına gelirse robot durabilir. Robot hareketine yalnızca çalışanla aradaki mesafe minimum mesafe üzerinde olduğunda izin verilir. Operatörün robota göre konumunu tespit etmek için farklı teknolojiler kullanılabilir. (Lazer tarayıcılar, güvenlik paspasları, görüş tabanlı sistemler)	Robot, kendisi ile işçi arasında belirli bir hız ve ayırma bariyeri sağlar. İşçinin ve robotun göreceli hızı, minimum mesafe gereksinimleri karşılar. (Örn. İşçinin parçaları yenilemesi) Güvenlik kontrol sistemlerinin güvenilir olması gerekmektedir.
Elle Yönlendirme	İşçi robotla doğrudan temas halindedir. İşçi robotu yönlendirir ve eğitir. Robot, işçiye değil, robot tarafından bir kuvvet uygulandığı görevlerde işe yardımcı olur. Robotun hareketine yalnızca operatörün doğrudan girişi ile izin verilir.	El yönlendirici kısım, uç efektörüne yakındır ve etkinleştirme cihazı ile bir acil durdurmadan oluşur. Hız ve mesafe güvenliği uygulanır. Bu durum, robot ve çalışanın iş birliğidir.
Güç ve Kuvvet Sınırlama	Robotun güç ve kuvveti sınırlıdır. Robot, insanla veya belirli bir kuvvet değerine sahip herhangi bir cisimle temas ettiğinde anında durur.	Robotun doğal bir tasarımı ve kontrolüdür. Robot, bir yükü kaldırmak ve hareket ettirmek için gereken miktarda gücü bilir. Bir çarpışmada olduğu gibi hareket için gerekli olan tork veya kuvvette bir artış salgıladığında, robot kolu güvenli bir Şekilde durur. Dişlinin mafsal ve çıkış tarafındaki sensörler kullanılmıştır. Kontrol sistemi güvenlik derecelidir (hataya dayanıklı). Robotlar hafif malzemeden yapılmıştır, düşük ataletlidir ve keskin veya kör kenarları yoktur. Bununla birlikte, robotla iş birliği yapan işçi, teması (çok az temas gücü olmasına rağmen) tekrar tekrar kabul etmeyebilir.

Robotların kullanılmasıyla beraber, ürünlerin kalitesinde ve genel verimlilikte bir artış gündeme gelmiştir. Uzun vadede, iş birlikçi robotların tekrarlayan görevlerle uğraşan operatörlerin yerini alması beklenmektedir, bu yüzden de bazı üreticiler kullanımıyla çok ilgilenmeyen küçük ve orta ölçekli işletmeleri hedeflemektedir. Bazı üreticiler özellikle geleneksel olarak robotların kullanımıyla çok ilgili olmayan küçük ve orta ölçekli işletmeleri (KOBİ) hedeflemektedir. Bazı robot üreticileri, teknik personelin programlanmasına ihtiyaç duyan nispeten ucuz robotlar üreterek, işletmelerde otomasyonu ve düşük ücretli üretimle rekabet etmeyi hedeflemektedirler. Genel olarak, iş birlikçi robotlar, kendilerine görevlerinin kolayca öğretilmesine olanak sağlayan kullanıcı dostu özelliklere sahiptir, böylece gelişmiş programlama ihtiyacını da ortadan kaldırırlar, operatör robotun kolunu tutarak ve kullanılacak nesneye yönlendirerek ona gereken işlemi gösterir ve öğretebilir. Görme sistemleriyle nesneyi tanırlar ve operatör robota hangi görevleri yerine getirmesi gerektiğini söylemek için basit bir menü seti kullanır.

Tablo 9'te piyasadaki, benzer görevleri yapan çeşitli firmalara ait bazı robotlar yer almaktadır. İşbirlikçi robotların kullanımı, robotun neden olduğu stres, uzmanlık ve beceri kaybı, görevleri yerine getirmek için teknolojiye bağımlılık, iş kaybı korkusu ve azaltılmış özerklik nedeniyle kas-iskelet bozukluklarına yol açabilir. İşbirlikçi robotların kullanımı sırasında, koruma çitlerinin veya fiziksel engellerin olmaması, kapsamlı risk değerlendirmesi ve güvenlik kontrol sistemlerinin detaylı tasarım ihtiyacını artırır. Robotlarla ilgili risklerin yanı sıra, robotların dahil olduğu ürünler veya proses de göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 9: İş **Birlikçi Robotlar Arasında Karşılaştırma (Chinniah, 2016)**

Robot Adı (Kullanılmaya başlandığı yıl ve ulaşılabilir olduğundaki maliyeti)	Tek Kol veya Çift Kol	Eksen Sayısı	Robotun Ağırlığı (kg)	Yükleme Kapasitesi (kg/arm)	Hızı (m/s)	Tasarım Özelliği ve Uygulamaları
Baxter (2012, 22.000 to 40.000 USD)	Tek veya çift kol	Her kolda 6 veya 7 eksen mevcuttur	75	2.3	0.6	Esnek bağlantılar sağlayan seri elastik aktüatörler, insana benzer tekrarlayan görev, insan algılama için kamera sensörleri
Dexter dot (2013, over 100.000 USD)	Çift Kol	2 adet her bir kolda 7 eksenli döner gövde üzerine monte edilmiş	N/A	5- 20	Yüksek hız	Süreç ve montaj için geleneksel robotların hassasiyeti; yüksek tekrarlanabilirlik
Kuka (2013)	Tek kol	7 Eksen kol	23	N/A	N/A	Güç ve kuvvet algılama: Kılavuzu montajı zorlama
Universal Robot (UR) (2009, 34.000 USD)	Tek kol	6 Eksen	UR5 için 18	5 veya 10	1.0	Güç ve kuvvet limitleme: Tekrarlayan görev, kurulum ve kullanım kolaylığı
ABB	Çift kol	14 ksen	N/A	N/A	N/A	Elektronik sektöründe küçük parça montaj işlemi, parça konumu için kamera sensörleri

9.1. Quebec'ten Örnek Olay İncelemesi

OSHA web sitesinde, bir robot ve plastik enjeksiyon makinesinin karıştığı ölümcül bir iş kazasından bahsedilir. 13 Mayıs 2007'de, Kanada'da, plastik sektöründe çalışan bir çalışan, plastik kılıfları enjeksiyon kalıplama makinesinden çıkarmak için kullanılan robotik bir koldaki sorunu giderirken, başına ve kaburgalarına bir darbe aldı. Acilen, iki hafta sonunda, hayatını kaybettiği hastaneye nakledildi. Bu örnekte görüldüğü gibi, robotlar genellikle diğer makinelerle de etkileşime girebilirler bu yüzden de risk değerlendirmesi robotu ve yakın çevreyi içermelidir. Vaka çalışması, Quebec'teki büyük bir otomatik yatay plastik enjeksiyon kalıplama makinesinde ürünleri boşaltmak için kullanılan bir 6 eksenli robot için yapıldı. Şirket aynı zamanda bazı plastik parçalar içeren elektrik bileşenleri üretiminde uzmanlaşmış bir kuruluştu, her enjeksiyon döngüsünün sonunda, plastik enjeksiyon makinesinin kalıp alanı açılır, robotun kolu daha sonra kalıp alanına ulaşır ve özel uç efektörleri ile hassas bir şekilde doğrudan kalıptan küçük plastik parçaları alır. Robotun kolu, kalıp alanına operatör yönünden girer, enjeksiyondan çıkan parçaları alır döndürür ve plastik parçaları, kalite kontrolü için robotu çevreleyen korumadaki (örn. bir kafes) açıklıktan geçirerek parçaları yan tarafında bulunan bir konveyöre yerleştirir. Kalıp alanında kalan kullanılmayan plastik parçaları toplayan ikinci bir konveyör bulunur.

Enjeksiyon kalıplama presinin kalıplama alanı hem kapanış kalıbı hem de hareketli robot nedeniyle tehlikeli bir bölgedir. Enjeksiyon kalıplama makinesinin operatör tarafını koruyan orijinal hareketli koruyucu, robot prese entegre edildiğinde, robotun kalıp alanına girmesini engellediği için Şirket tarafından kaldırılması gerekiyordu. Tablo 10'da robot ve presle bağlantılı tehlikeler yer almaktadır. İşçiler kalıp alanı içinde veya çevresinde kurulum, ayarlamalar, gevşeme ve bakım faaliyetlerini gerçekleştirirlerken çeşitli tehlikelere maruz kalırlar.

Tablo 10: Mevcut Risk Azaltma Yöntemlerini Dikkate Almadan Pres v Robot Sistemi İçin Tehlike Tanımlaması (Chinniah, 2016)

Tehlike	Tehlikeli Durum	Tehlikeli Olay	Olası Zarar
Robot kolunun işçinin yönündeki hareketi	Kola yakın işçi	Kolun vurması Mekanik parçalara sıkışmak	Kırıklar, ölüm
Kavrayıcının ve bunun gibi tutma işini yapan aletlerin işçinin yönündeki hareketi	Kavrayıcının ve bunun gibi tutma işini yapan aletlere yakın bulunan çalışan	Tutucu veya diğer tutma cihazı tarafından darbe veya sıkışmaya maruz kalma. Mekanik bir parçaya sıkışma	Kırıklar, yarılma, ezilme, ölüm
Nihai efektör depolanan enerji – yüksek basınç	Robotun bakımını yapan çalışan	Depolanan enerjinin serbest bırakılması ve hareketli park tarafından vurulması Yüksek basınçlı jetler	Kırıklar, ciltte kesilme, ezici yaralanmalar
Elektrik (baskı)	Çalışan parçaların yakınında çalışan- paneldeki sorunu gidermeye müdahale eden çalışan	Kısa devre veya yalıtım sorunu nedeniyle canlı parçalarla veya yanlışlıkla elektrik veren parçalarla temas	Elektriğe maruz kalma, elektrik çarpması
Robottan öngörülen nesne	Planlanan nesnenin yolu üzerinde bulunan çalışan	Fikstür veya tutucuların arızalanması, kırılması	Kırıklar, morarmalar, ölüm
Pres kalıbının kapanma hareketi	Kalıba yakın veya kalıplama alanı içinde bulunan çalışan	Kalıbın çarpması, Kalıplama alanında sıkışma ve ezilme	Kırıklar, ölümcül yaralanma,
Eriyen plastiğin yüksek sıcaklığı	Enjeksiyon ünitesinin nozulu ve kalıplama alanının içinde bulunan çalışan	Teknik bir problem veya insan hatası sonrasında sıcak erimiş plastiğin sıçraması	Ciddi yanıklar
Kalıp kapama sisteminde ve/veya kalıbın içinde depolanan enerji ve yüksek basınç (hidrolik veya pnömatik)	Pres ve/veya robotta bakım işini yapmakta olan çalışan	Depolanan enerjinin serbest bırakılması ve hareketli parçanın çarpması	Kırıklar, delinme yaraları, kangren, ezici yaralanmalar

Bir operatör, bir sıkışma veya pres ve/veya robotun sorun giderme veya ayarlamaları için bir mekanik aşağıdaki kalıplama alanına girebilir. Bazı durumlarda, işçilerin sırtlarının robota dönük olduğu gözlendi (yani, kalıp alanının içinde kollarıyla çalışıyorlardı ve robotu göremiyorlardı).

Operatör, herhangi bir sıkışma, arıza bulma, presi veya robotun ayarı için kalıplama bölümüne girmek durumundadır. Bazı durumlarda, bu bölgelerde sadece kollarıyla çalışan operatörler, sırtlarını robota dönmüş olup, robotun olası hareketlerini fark edemiyorlardı. Bazı durumlarda, işçilerin sırtlarının robota dönük olduğu gözlendi (yani, kalıp alanının içinde kollarıyla çalışıyorlardı ve robotu göremiyorlardı). Tablo 9'da tespit edilen her bir tehlike için ilgili tehlikeli durumlar, tehlikeli olaylar ve olası zarar verilmiştir. ISO 12100'de açıklandığı gibi, tehlike tanımlama aşaması, risk azaltma önlemleri dikkate alınmadan gerçekleştirilir. Bu yaklaşım, mevcut risk azaltma yöntemlerini daha iyi değerlendirmeyi ve gerekirse mevcut risk azaltma yöntemlerini geliştirmeyi veya değiştirmeyi sağlar.

Tablo 10'da açıklanan tehlike tanımlamasından sonra, her tehlike için risk tahmini gereklidir. Risk grafiği veya risk matrisi gibi bir tahmin aracı kullanmak gerekir. Zararın ciddiyetine ve olasılığına bağlı olarak, her tehlike için bir risk endeksi elde edilir ve bunu risk değerlendirmesi takip eder. Daha sonra risk azaltma stratejileri uygulanır ve kabul edilebilir riske ulaşıldığından ve yeni bir tehlikenin ortaya çıkmadığından emin olmak için risk azaltma önlemlerinin değerlendirilmesi gerekir (örn. Koruyucuda keskin bir kenar).

Kısaca, burada vaka çalışması için sadece ana risk azaltma önlemleri açıklanmaktadır. Koruyucu emniyet çitlerinin güvenli yükseklikte ve ölçülerde olması gerekir. Koruyucuları boyutlarını hesaplamak için standartlar vardır. Robot ve kalıp alanını çevreleyen koruyucuların kapıları (Örn. kafes) birbirine kenetlenmişti, kapılar açıldığında robotun ve presin hareketine izin verilmezdi ve bir işçi tehlikeli bölgeye girdi.

Güvenilir kontrol sistemleri yedekli mimarileri içerir, iyi denenmiş güvenlik bileşenleri kullanır ve arıza izleme ilkelerini içerir. Rastgele ve sistematik arızalara karşı dayanıklıdırlar. Genellikle, güvenilir güvenlik kontrollerini bypas etmek veya değiştirmek zor olacaktır. Emniyet kontrol sisteminin temel emniyet prensiplerine ve denenmiş emniyet bileşenlerine göre tasarlanması gerekir. ISO 13849 ve IEC 62061, makineler için emniyet kontrol sistemlerinin tasarım prensiplerini sağlar.

Pres-robot sisteminde kullanılan test edilmiş güvenlik bileşeni ve temel güvenlik ilkeleri, temaslarının zorunlu olarak açılması ve olumlu monte edilmiş güvenlik konumu anahtarları idi. Bu emniyet anahtarları kafesin kapıları olan hareket ettirilebilir koruyucuların konumunu izliyordu. Ayrıca, güvenlik konumu anahtarları, onları bozabilecek ve erken aşınma ve hasara yol açabilecek zorlu ortamlardan korunmuştur. Ancak, basın-robot sisteminde çeşitli güvenlik ilkeleri uygulanmamıştır. Örneğin, güvenlik ilkesi güvenlik fonksiyonlarını veya kontrolleri ve operasyon kontrollerini ayırmaktır. Güvenlik kontrolü ve operasyon kontrolünün ayrılması, mekanik, elektrikçiler ve programcılar tarafından istenmeyen değişikliklerin güvenlik kontrol sistemine yapılması olasılığını azaltır. Bizim durumumuzda, böyle bir ayrılık yoktu. Güvenlik fonksiyonları, pres için aynı programlanabilir lojik kontrolörler (PLC'ler) ve operasyonel kontrol için kullanılan robotun işlevleri kullanılarak elde edildi. Hiçbir güvenlik PLC'si kullanılmadı. Güvenlik PLC'leri, güvenlik fonksiyonlarını kontrol etmek için elektronik programlanabilir sistemler kullanıldığında programda değişiklik yapılmasını önler. Güvenlik PLC'leri ayrıca gereksiz ve hataya dayanıklı dahili mimarilere (örneğin, farklı derleyiciler) sahiptir. Yazılım ayrıca katı kurallar kullanılarak programlanır ve test edilir. Aslında, pres-robot sistemi için güvenlik kontrol sistemi, performans seviyeleri veya PL (yani saat başına tehlikeli arıza olasılığı) açısından tasarlanmamıştır. İzleme ve güvenilirlik ilkeleri PL'leri hesaplamak için kullanılır. PL hesaplamaları devrenin giriş, mantık ve çıkış elemanlarını içerir. Örnekte, girişler emniyet şalterleri, mantık standart PLC'ler ve çıkışlar hidrolik valfler ve elektrik yüklenicileriydi. Pres-robot sisteminde PL hesaplamaları yapılmadı.

Makinelerdeki önemli bir tasarım özelliği, güvenlik önlemleri bypas edildiğinde, yani işçinin tehlikeli bölgede olması durumunda, bakım, kurulum gibi müdahaleler için kontrol modunu içerir. ISO 12100 ve makine direktifi, operatörün güvenliğinin aynı anda 4 koşulu karşılayan belirli bir kontrol modu kullanılarak sağlandığını belirtmektedir. İlk koşul, belirli kontrol modunun, başka bir çalışanın ekipmanı yeniden başlatmamasını sağlamak için makinedeki diğer tüm kontrol modlarını devre dışı bırakmasıdır. İkinci koşul, spesifik kontrol modunun, tehlikeli elemanların sadece bir etkinleştirme cihazının, iki elle kontrol cihazının veya bir çalıştır-çalıştır cihazının sürekli çalıştırılmasıyla sağlanmasına izin vermesidir. Bu özellik, çalışanın tehlikeyi tam olarak kontrol etmesini sağlar. Üçüncü koşul, spesifik kontrol modunun tehlikeli elemanların sadece düşük riskli koşullarda (örn. Düşük hız, düşük güç/kuvvet, sınırlı hareket kontrol cihazı kullanarak adım adım)

çalıştırılmasına izin vermesidir. Bu durumun asıl amaç, zararın ciddiyetini sınırlamak, zarar görmesini önleyerek ve buna göre tepki vermek için yeterli zamana sahip olmaktır. Belirli kontrol modunun dördüncü şartı, makinenin sensörlerinde gönüllü veya istemsiz eylemle tehlikeli işlevlerin herhangi bir şekilde çalışmasını engellemesidir. Pres-robot sisteminde, bir işçi çalışma kafesinin içindeyken kablosuz bir kumanda kullanarak robotu kurabilir ve robotun yanındayken robotun 250 mm/sn. hızla hareket etmesini sağlayabilir.

9.2. İşbirlikçi Robotik Uygulamalar için Risk Değerlendirme Süreci

Sadece robot sisteminin kendisini için değil, yerleştirildiği ortamı, yani işyerini değerlendirmek için kapsamlı bir risk değerlendirmesi gereklidir.

Tehlike tanımlama ve risk değerlendirme

- Robottan kaynaklanan tehlikeleri,
- Robot sistemi ile ilgili tehlikeler,
- Uygulama ile ilgili tehlikeleri kapsamalıdır.

Tehlikenin Tanımı:

- Robotun tehlikeli hareketi,
- Robot kıskacının tehlikeli hareketi,
- Çalışma hücresi içerisindeki makineler,
- Hareket halindeki bir robotun hareketine maruz kalma (isteyerek veya kazara)

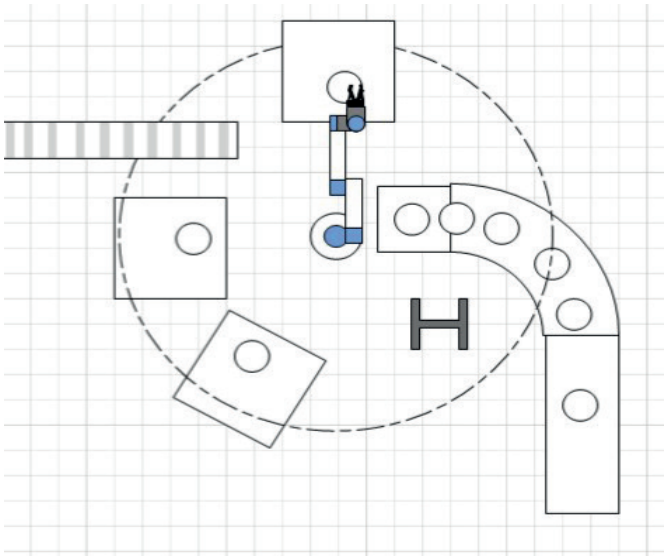


Şekil 10: Risk Kaynakları ve Çarpma Tehlikeleri (Dominguez, t. y.)

Diğer Tehlikeli Olasılıklar:

- Robotun beklenmeyen program dışı hareketi,
- Hız sınırlama hatası,
- Robotun programlanan kuvvet limitleri dışında çalışması,
- Proses ekipmanı üzerindeki kelepçe, hareketli kısımlar ve sıcak yüzeylerle temas,

Örnek Bir Kolaboratif Çalışma Hücresi:



Şekil 10: Kolaboratif Çalışma Hücresi(Dominguez, t.y.)

Limitlerin Tanımlanması:

Kullanım Limitleri:

- Öngörülen kullanım-İşbirlikçi çalışma hücresi, sınırlandırılmış kuvvet,
- Personel: Operatör, bakım ekibi, kalite,
- Çalışma sırasında uygulayabileceği kuvvet sınırlandırılmış iş birlikçi robot, 6 eksende öngörülen taşıma gücü 10 kg,
- Üretilen makine parçalarının taşınması ve transferi işi,

Çalışma Boşluğu Limitleri:

- Çalışma ortamı temiz ve kuru, işin gereği olarak da çalışma alanı 3 X 3 X 2m.,

Zaman Limitleri:

- Oran 1/90 s, Görevin ömrü 20 yıl, Kullanım Oranı 5 gün/hafta, günde 2 vardiya, yılda yaklaşık 250 gün,

Normal Operasyon:

- Robot bağımsız olarak çalışır ancak,
- Operatör belirlenen çalışma alanı içerisinde robota çok yakın ve işin gereği periyodik olarak robota doğru hamleler yapıyor,
- Robotun çalışma alanında periyodik olarak kalite kontrol işlemleri yapılıyor,

Setup/Ayar:

Vardiya başına bir kez palet değişimi yeni parçaya göre ayarlanır,

Temizlik:

- Her vardiya başlangıcında 2 dakika boyunca çalışma alanında temizlik yapılır,

Çalışma Hücresindeki Robota İlişkin Genel Bilgiler:

- UR 10 tip kolaboratif robot,
- Kullanılacak yük 100- 250 N,
- Momentum denetimi mevcut,
- Hız sınırlayıcı,
- Eksen sınırlayıcı,
- Alan sınırlayıcı,

Ayarlanabilen Robotik Yakalayıcı/Kıskaç:

- İki tırnağı ayarlanabilen elektrikli R 85 tip kıskaç,
- Ağırlık 5 kg,
- Uygulayabileceği kuvvet 5 – 220 N,

İş Parçasına İlişkin Bilgiler:

- Ağırlık 4 kg
- Alüminyum,
- 30 mm X 80 mm X 80 mm, kenar ve köşelerde radiyüs 0,5 MM

Fikstür:

- Parçayı montaj yerine oturtan basit cep tipi,
- Ölçü 500 mm X 300 mm X 40mm
- Bütün kenarlarda radiyüs 0,50 mm
- Parçalar yumuşak bir Şekilde fikstüre oturur,

Tablo 12: Sürece İlişkin Yapılan İş ve Riskler (Dominguez , t.y.)

İŞ	RİSK
Kapma sırasında sıkışma	Boş kıskaç ve parça arasında ezilme
Kapma sırasında sıkışma	Robot dirseği ve fikstür, konveyör, tezgâh arasında ezilme
Kapma sırasında sıkışma	Robot dirseği ve parça arasında ezilme
Robot turuna/yoluna yaklaşma	Robot koluyla çarpışma
Robot turuna/yoluna yaklaşma	Robot dirseği/mafsalıyla çarpışma
Robot turuna/yoluna yaklaşma	Kıskaçla çarpışma
Robot turuna/yoluna yaklaşma	Kıskaçtaki iş parçasıyla çarpışma
Robotun hareket yoluna yaklaşma	Kıskaç, fikstür, konveyör, iş parçası arasında ezilme
Kıskaç çenesinin gevşemesi	Kıskaç, fikstür, konveyör, robot kolu arasında ezilme
Kıskaç çenesinin gevşemesi	Kıskaç, robot mafsalı, fikstür ve tezgâh arasında ezilme
Kıskaç çenesinin gevşemesi	Robot mafsalı, fikstür, konveyör ve tezgâh arasında ezilme
Sürece ilişkin kalite denetimi	Kıskaç, fikstür, konveyör, robot kolu arasında ezilme
Sürece ilişkin kalite denetimi	Kıskaç, robot mafsalı, fikstür ve tezgâh arasında ezilme
Sürece ilişkin kalite denetimi	Robot mafsalı, fikstür, konveyör ve tezgâh arasında ezilme
Doğru parça yönü	Kıskaç, fikstür, konveyör, robot kolu arasında ezilme
Doğru parça yönü	Kıskaç, robot mafsalı, fikstür ve tezgâh arasında ezilme
Doğru parça yönü	Robot mafsalı, fikstür, konveyör ve tezgâh arasında ezilme
Robota dokunma veya robotu kavrama	Robot kolu veya mafsalı ile birbirine dolanma/sarma
Robota dokunma veya robotu kavrama	Kıskaç ile parçanın birbirlerine dolanması/sarması

9.3. İş Birlikçi Robotlarda Risk Değerlendirmesi

İnsan-Robot iş birlikçi (HRC) uygulamalarında, operatörler ve robotlar ortak bir alanda çalıştıklarından, yakın etkileşimleri, operasyonların özünden veya operatörün hatalarından (talimatları yanlış anlamasından, kötü niyetinden) dolayı doğrudan fiziksel temas olasılığını artırır, bu istenmeyen fiziksel temaslar da operatör için tehlikeli durumlara yol açabilir. Bu tür durumları mümkün olduğunca tanımlamak ve önleyebilmek için, aşağıdaki insan robot iş birliği uygulamalarının güvenlik değerlendirmesi için kapsamlı bir yaklaşım tanımlamalı ve geliştirilmelidir.

- Risk analizi ve robotik güvenlik standartlarına uymak,
- Resmi doğrulama ile sistemlerin tasarımı sırasında öngörülemeyen tehlikeli durumların olmamasını sağlamak,
- Operatörlerin davranışlarından kaynaklanan tehlikelere odaklanmak,
- Tehlikeleri otomatik olarak tanımlamak yerine, iş birlikçi robotla çalışan operatörün, operasyonel bakış açısı ve deneyimlerini inceleyerek olası riskleri incelemek,
- Tanımlanan tehlikenin ciddiyetinin tüm sistemin ayrıntılı analizine (örneğin, neden olduğu yaralanmanın şiddeti) dayanarak hesaplanan risk adı verilen niceliksel bir değer olarak tahmin edilmesi,
- Riski ihmal edilebilir bir eşiğe indiren Risk Azaltma Önlemleri olarak bilinen uygun çözümleri önermek,

Yukarıda belirtilen faktörleri sağlama yaklaşım, sistem özelliklerinin spesifikasyonu ve doğrulanması için resmi yöntemleri kullanır ve aşağıdaki adımlara odaklanır.

- Robotik çevrelerle, güvenlik gereksinimleri, tehlikeler ve bunlara ilişkin çözümler hakkında ortak bir anlayış elde etmek için gerçek bir (HRC insan robot iş birliği) vaka çalışması gözlemlenir,
- Uygulamaları tanımlamak ve minimum düzeyde güvenlik sağladıklarını doğrulamak için tutarlı bir metodoloji tanımlanır,
- Üçlü metrik zamansal mantığın çözülebilir bir parçasını kullanarak vaka çalışmasının modüler bir modelini oluşturulur ve Zot (sınırlı bir doğrulama denetleyicisi) aracını kullanarak tanımlanan metodolojiye göre yinelemeli bir doğrulama uygulanır,
- Model genelleştirilir, böylece gerekli olan en az sayıda değişiklik ile farklı vaka çalışmalarına uyarlanacaktır,
- Yeni vaka çalışmaları ile modelin metodolojisini ve genelliğini değerlendirilir,
- Güvenlik mühendislerinin bir sistemi tasarlamasına yardımcı olacak bir çerçeve oluşturulur ve tasarımı güvenilir hale getirmek için mümkün olduğunca çok kez yinelemeli olarak donatılır,
- Sistemi izlemek, tehlikeleri tespit etmek ve uygun aksiyonu zamanında devreye almak için güvenlik mühendislerine yardımcı olacak Şekilde çerçevenin kullanımını çalışma süresine genişletilir,

9.4. İnsan-Robot İşbirliğinde Resmi Doğrulama Yoluyla Güvenlik Analizi

İnsan-Robot iş birliği (HRC) uygulamalarında, robot ve operatör arasındaki yakınlık ve doğrudan etkileşim kaçınılmaz olduğundan, operatör için güvenlik sağlamak daha fazla çaba ve daha titiz bir yaklaşım gerektirir. Bu nedenle, makine güvenliği ile ilgili otoriteler, HRC uygulamalarında önemli tehlikelerin bir listesini, operatör için potansiyel tehlike kaynaklarını, olası kökenlerini ve robotik çözümlerin tasarımına ve dağıtımına rehberlik etmek için güvenlik düzenlemelerini içeren çeşitli standartlar yayınladılar. Özellikle, ISO standardı 10218-2, insanlar ve endüstriyel robotlar arasındaki dört olası iş birliği modunu tanımlar. Bunlardan Güç ve kuvvet sınırlaması (PFL), gerçek fiziksel teması içeren ve insan vücudu üzerindeki etkileri sınırlamak için basınç ve kuvvet eşikleri açısından sıkı güvenlik gereklilikleri ile ilişkilidir.

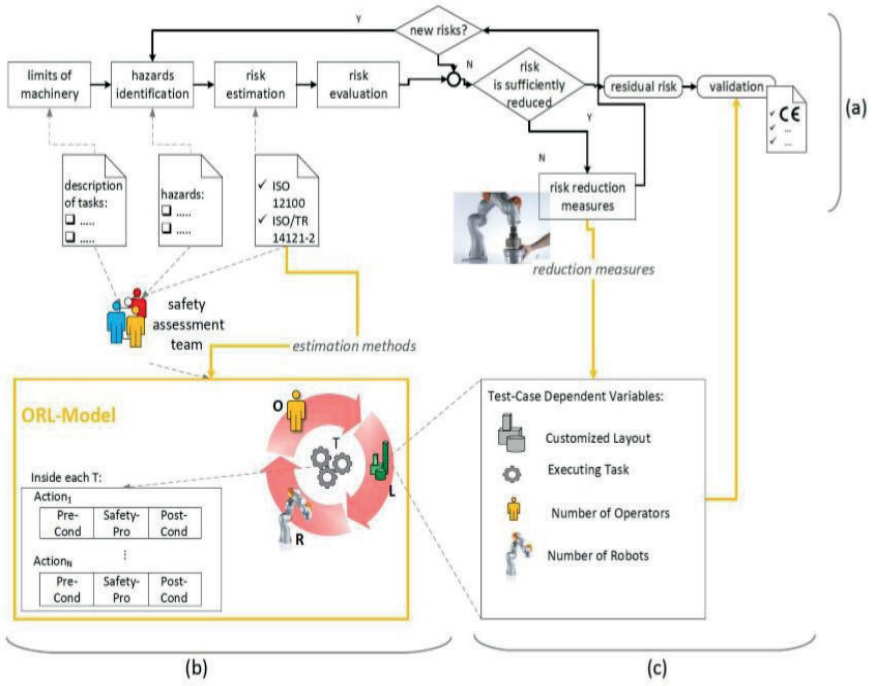
HRC uygulamaları, operatörün kasıtlı veya bilinçsiz hataları nedeniyle mevcut tehlikeleri ve istenmeyen durumlarını tanımlamak ve niceliksel risk değerleri açısından ölçülen sonuçlarını önlemek için ISO standardı 12100'de belirtilen analiz yoluyla değerlendirilmelidir.

Şekil 7, standart yinelemeli risk analizinin aşamalarını göstermektedir (Avrupa direktifleri durumunda CE işaretine yol açmaktadır).

- Makinenin Sınırları: Robotun istenen görevleri ve makine düzenlemeleri ve kısıtlamaları belirlenir.
- Tehlikelerin Tanımlanması: ISO 10218-2 gibi ürüne özgü standartlarda listelenen tehlikelerin (ve bunların kombinasyonlarının) varlığı belirlenmiştir,
- Risk Tahmini: Önceki adımda tanımlanan tehlikelerle ilişkili risk değerleri ölçülür. Belirlenen puanlama yöntemine göre, bunların tümü zararın ciddiyetiyle olasılığını birleştirir.
- Risk Değerlendirme: Her tehlikenin önemi değerlendirilir. (ISO14121-2:2007, Safety of machinery- Risk assessment- Part 2)'de bildirilen yöntemler, risk skorları için kabul edilebilirlik aralığını belirlemeye yardımcı olur.
- Riskin Azaltılması: Risk değeri ihmal edilebilir değilse, uygun güvenilirlik ve kullanılabilirlik gereksinimlerine göre doğrulanması gereken, ya tehlikeyi ortadan kaldırmak için sistemi yeniden tasarlayarak ya da bir güvenlik fonksiyonunun tanıtılması yoluyla örneğin, bir koruma sensöründen gelen bir sinyal durumunda tam durdurma), her riski azaltmak için uygun önlemler (yinelemeli olarak) uygulanır.

Süreç, yeni bir risk tanımlanana ve artık risk değeri kabul edilene kadar yinelemeli olarak devam eder. Risk azaltma önlemleriyle ilgili tehlikeler veya bu tür önlemlere tepki olarak operatör davranışları nedeniyle yeni riskler ortaya çıkabilir. Cihazlar ve koruma önlemleri eylemlerin gidişatını değiştirebilir (kullanım ve yanlış kullanım).

HRC uygulamalarında resmi doğrulama yoluyla güvenlik analizi (SAFER-HRC Safety Analysis through Formal verification in HRC applications), hedef sistemin davranışının resmi yöntemlerine dayanan kapsamlı bir araştırma yoluyla tehlikeleri, ayrıntılı ve kapsamlı bir Şekilde tanımlama olanağı veren, biçimsel yöntemlere, hedef sistemin davranışına dayanan bir metodolojidir. Farklı tehlike türleri arasında (örneğin; elektrik, ergonomik), bu çalışma, insan-robot etkileşimlerinden kaynaklananlara göre özel bir odaklanma ile operasyonel tehlikeleri ele almaktadır. SAFER-HRC bir sistemdeki tüm olası tehlikelere ulaşamasa bile, metodolojinin dayandığı kapsamlı araştırma, hiçbir önemli tehlikeli durumun dikkate almadan bırakmaz. Operatörün tüm olası davranışlarını öngörmenin imkansızlığı nedeniyle, operatörün ve sistemin tüm olası etkileşimlerinin dikkate alındığı iddia edilemez, bununla birlikte, resmi doğrulama tekniklerine dayanan yinelemeli bir metodoloji, sonuçta tüm önemli olanların kapsamlı bir analizini sağlayabilir. Her yinelemede, tasarım istenen güvenlik gereksinimlerini karşılamazsa, yeni risk azaltma önlemleri eklenerek geliştirilir. Bu metodoloji, "döngüde insan" yaklaşımına dayanır ve risk azaltma önlemlerini otomatik olarak seçmez.



Şekil 10: Güvenlik Analizin Metodolojisine Genel Bakış (A); Standart Prosedür (b) SAFER-HRC'nin Temel Modeli (c) Senaryo İyileştirme (Askarpour ve diğerleri, 2016)

Şekil 10 (b)'de gösterildiği gibi, güvenlik stratejisi, değerlendirilen uygulamanın uzmanlarından ve kullanıcılarından oluşan bir grup tarafından tasarlanır ve onaylanır (güvenlik değerlendirme ekibi). Önerilen metodolojinin temel yönü, kısıtlamaların ve bunların olası ihlallerinin uygulamanın tüm aşamalarında sistematik olarak doğrulanmasıdır. Doğrulamanın titizliği, seçilen güvenlik stratejisinin sorunsuz olmasını sağlar. SAFER-HRC, iş birlikçi görevlerin gayri resmi, hedefe yönelik açıklamalarından başlar ve bunları mantıksal formüller üzerine inşa edilmiş, güvenlik gereksinimlerinin karşılanıp karşılanmadığını kontrol etmek için resmi doğrulama teknikleri uygulandığı, resmi modellere dönüştürür. Model, operatör ve robot için ayrı formaliteler içerir; bu nedenle de doğrulama aşaması, fiziksel ortamdan nasıl etkilendiklerini dikkate alarak etkileşimlerini de kontrol eder. Ana model iyice analiz edildikten sonra, HRC uygulaması için farklı senaryoları incelemek için değiştirilebilir ve yeniden kullanılabilir (örneğin, farklı güvenlik işlevlerinin kombinasyonları, operatör tarafından olağandışı eylemler).

Yapılan çalışmada, metodolojinin temel katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Operatörün varlığı, sistem davranışının öngörülebilirliğini olumsuz yönde etkilediği, HRC uygulamalarının güvenlik değerlendirmesine biçimsel yöntemlerin uygulanması, aynı zamanda titizlikle çalışılması gereken zorlu güvenlik standartlarını da uygular.
- Güvenlik değerlendirme ekibinin farklı tasarım varsayımlarını derinlemesine keşfetmesini destekleyen esnek bir yaklaşım sağlamak, böylelikle insan anlayışını biçimsel doğrulamanın gücüyle tamamlar.

9.5. Safer-Hrc Metodolojisine Genel Bakış

SAFER-HRC, iş birlikçi robotik sistemlerin tasarımı sırasında ISO 10218'de belirtilen güvenlik gereksinimlerinin ihlalini çıkarmak için resmi doğrulama tekniklerinden yararlanan yarı otomatik bir doğrulama metodolojisi. Şekil 7 (b)'de gösterildiği gibi, SAFER-HRC'nin merkezinde bir güvenlik değerlendirme ekibi (SATeam) bulunur. Robotik ve biçimsel yöntemler uzmanlarını içeren SATeam, makinelerin sınırlamalarını ve hedef robotun görevlerini inceler ve olası insan-robot etkileşimlerini tahmin eder. Ayrıca ISO 12100'de listelenen tehlikelerden hangisinin ortaya çıkabileceğini de belirler ve ISO standardı 14121'de tanımlanan risk düzeyine dayalı teknikleri değerlendirir. SAFER-HRC'de SATeam, bu faaliyetleri desteklemek ve sistematize etmek için HRC uygulamasının resmi bir modeline dayanır. Daha doğrusu, SATeam görevlerin gayri resmi, metinsel tanımlarından başlar ve daha sonra UML diyagramlarını resmi gösterime doğru bir köprü olarak oluşturur.

9.6. İşbirlikçi Robotlar ve Risk Analizi

Geleneksel robotlar, çeşitli koruyucu çit ve elektronik önlemler altında uzunca yıllar oldukça ağır işler yapmışlar, ancak çalıştıkları alana hiçbir canlının girmesine izin verilmediğinden, kendilerine ayrılan bölgede hep yalnız başlarına çalışmışlardır. İşbirlikçi robotların devreye girmesiyle birlikte, çalışma ortamı tamamen değişmiş, robotun çalıştığı ortamı çevreleyen koruyucu çitler, ışık perdesi ve benzeri koruyucu elemanlar devre dışı kalmış, buna ek olarak ta çalışma alanlarında insanlarla iş birliği içerisinde çalışır hale gelmişlerdir.

Geleneksel robotlarda, robot yalnız çalıştığından ve de risk oluşturabilecek her objenin robotun çalışma alanına girmesi engellendiğinden, iş kazası riskleri, iş birlikçi robotlara göre çok daha azdı, zira iş birlikçi robotun iş birlikçi alanda sürekli olarak operatörle birlikte olması insanın da karışabileceği kaza riskini büyük ölçüde artırmıştır. Bu nedenle, riskleri minimize edebilmek için, çalışan için yaralanma şiddeti ve oluşma olasılığı, farklı parametrelerle belirlenmesi, robotik sistem ve çevresinin de iş birlikçi çalışma açısından güvenli kabul edilmeden önce belli güvenlik seviyelerini karşıladığının saptanması gerekir.

Potansiyel bir tehlikenin güvenlik için kabul edilebilir standartları aşıp aşmadığının belirlenebilmesi için tek yol bir risk değerlendirmesi yapmaktır. Uygun bir risk değerlendirmesi yapmak için, iş birlikçi robotun yani kobotun, çalışacağı ülkenin ilgili standartlarının ve düzenlemelerinin mutlaka doğrulanması gerekmektedir. Bunun için de en çok işletmedeki robot integrasyonu yapacak olan firmanın desteği önemlidir.

ISO / TS 15066 teknik şartnamesinin son sürümü ile birlikte, iş birlikçi robotlar için Risk Analizinin güncellenmiş bir versiyonu gerekliydi. Geleneksel robotlardaki bazı spesifikasyonlar, yeni parametrelerle ve güvenlik gereksinimleriyle harmanlanarak kobotlar için sürekli revizyonları da içeren ISO / TS 15066 oluşturulmuştur.

Günümüzde, kolaboratif robotlar, endüstrinin hemen hemen bütün dallarında yaygın bir şekilde pazarlanırken, bunlara ilişkin olası güvenlik sorunları ve endişeler hakkında da ayrıntılı bilgi vermek gerekli olmuştur. ISO/TS 15066 teknik spesifikasyonunun ortaya çıkmasıyla birlikte, iş birlikçi robot uygulamalarının insanlarla birlikte kullanım için güvenli olduğundan emin olmak için birçok veri, hesaplama ve metodoloji geliştirilmiştir. Bununla birlikte, teknik şartnamenin robotun sertifikasyonu ve uygulaması üzerinde hiçbir etkisi yoktur, bu yüzden de robot üreticileri robotlarını akredite etmek için üçüncü taraflardan destek almak zorundadırlar. Bu, belirlenmiş bazı harici güvenlik organlarına göre, belirli koşullar altında robotun bir araç olarak güvenli olduğunun teyidi ve sertifikalandırılması anlamına gelir. Bu belgenin anlamı, uygulamanın otomatik olarak güvende olacağından daha çok, uygulamanın bütünüyle bir risk analizi gerektirdiği anlamına gelir. Bu yüzden, işletmedeki herhangi bir yeni durum için yeni bir risk analizi oluşturmak için geçmiş deneyimlerin kullanabilmesini sağlamak adına güvenlik açısından bir iç bilgi oluşturulması gerekir.

Her ne kadar, her türlü makine ve ekipmanın üretimi, yönetimi ve güvenliği, o makine veya ekipmanın kullandığı norm ve yönetmelikler doğrultusunda sağlanmak durumunda olsa da bu standartlar, dünya çapında kabul gördüğü, onaylandığı, ilaçtan robot güvenliğine kadar her türlü ürünün normlarını oluşturan Uluslararası bir Standart Organizasyonu (ISO) tarafından yönetilmektedir. Bu kuruluş, tasarım, malzeme, ürün, süreç, hizmet, sistem ya da kişilerin kullanımı ve performansı hakkında yol gösterir.

Standartlar, kalite, ekoloji, güvenlik, ekonomi, güvenilirlik, uyumluluk, birlikte çalışabilirlik ve verimlilik gibi mal ve hizmetler için temel özelliklerin tutarlılığını sağlar. Dolayısıyla standartlar, temelde belirli bir ürün veya üretim süreci için güvenlik yönergeleri dahilinde şeyler üretmek için izlenmesi gereken bir kılavuzdur diyebiliriz. Bununla birlikte, bir standart yasal olarak bağlayıcı olmayıp, ancak gerçekte genellikle hukuk etkisine sahip düzenlemelerdir. Bu yüzden de standartlar yasa olmasa da yasaları tamamlamak için kullanılabilirler ve bu nedenle çoğu zaman bunlara dahil edilirler. Dolayısıyla, bir yönetim örgütü bir yasayı yayınlıyorsa, muhtemelen tamamen yeni bir standardı yeniden icat etmek yerine, dünya uzmanları tarafından halihazırda oluşturulmuş ISO veya başka bir standarda atıfta bulunmayı tercih ederler. Daha sonra farklı mevcut yasalar birleştirilebilir ve halihazırda izlenmekte olan standartlara atıfta bulunularak, yasanın karmaşıklığı azaltılabilir. ISO dışında, aynı zamanda standartları belirleyen Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC/International Electrotechnical Commission) gibi robot hücresine göre standartlar sağlayabilecek kuruluşlar da vardır.

Standartları yayınlayan bazı kuruluşlar aşağıda belirtilmiştir:

ISO (The International Organization for Standardization): Uluslararası Standardizasyon Örgütü, çeşitli ulusal standart kuruluşlarının temsilcilerinden oluşan uluslararası bir standart belirleme organıdır. Kuruluş, dünya çapında tescilli, endüstriyel ve ticari standartları teşvik etmektedir.

OSHA (The Occupational Safety and Health Administration): Mesleki Güvenlik ve Sağlık İdaresi, Amerika Birleşik Devletleri Çalışma Bakanlığı'nın bir kurumudur. Görevi, standartlar belirleyip uygulayarak, sosyal yardım, eğitim ve yardım sağlayarak çalışan erkekler ve kadınlar için güvenli ve sağlıklı çalışma koşulları sağlamaktır.

ANSI (The American National Standards Institute): Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ürünler, hizmetler, süreçler, sistemler ve personel için gönüllü konsensüs standartlarının geliştirilmesini denetleyen, kâr amacı gütmeyen özel bir kuruluştur.

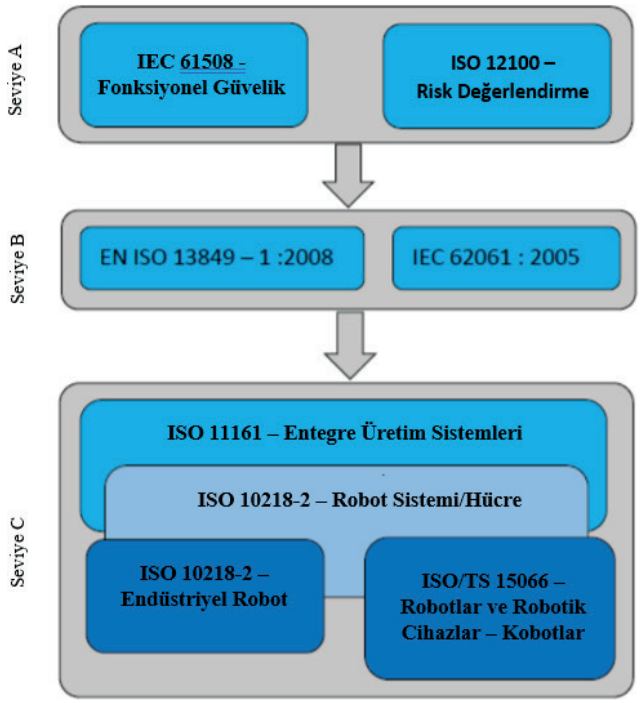
CSA (The Canadian Standards Association): CSA Group'un bir bölümü olan Kanada Standart Kurumu, 57 alanda standartlar geliştiren, kâr amacı gütmeyen bir standartlar kuruluşudur. CSA, basılı ve elektronik ortamda standartlar yayınlar ve eğitim ve danışmanlık hizmetleri sağlar ve endüstri, hükümet ile tüketici gruplarından temsilcilerden oluşur.

Bunun dışında, her ülke veya bölge kendi kanunları veya yönetmelikleri için hangi standardı kullanacağına karar verebilir. Bununla birlikte, Conformité Européenne (CE) gibi diğer kuruluşlar, tüm Avrupa Birliği için direktifler uygulamaktadır. Bu organizasyon standartlar yazmamakta, ancak Avrupa Birliği ülkelerinde üretilen veya ithal edilen ürünlere yasal yönergeler sağlamaktadır.

ISO standartları, üst seviye standardı ilk referans olacak şekilde oluşturulmuştur. Çeşitli standart seviyeleri arasında, robotlar, endüstriyel robotlar, kolaboratif robotlar için geçerli olacak en spesifik güvenlik standartları da yer almaktadır.

Aslında**, A-Seviye standartlar** en yüksek düzey standarttır. Temel güvenlik bilgisi, temel tasarım özellikleri ve genel makine yönleri için geçerlidirler. **B-Seviye** standartları, farklı makine türlerinde bulunabilen belirli cihazlara daha özeldir. Yine de genel bir standarttır, ancak belirli güvenlik özelliklerine girer. **C- seviye** standartları, belirli bir makine türü, örneğin bir robot için özel güvenlik gereksinimleridir. Tablo 1'deki diyagramda aşağıya inerken, ürünün veya süreç için daha fazla spesifik maddelere rastlarız. Örneğin, ISO 12100-Makine güvenliği, tüm makine türleri için risk değerlendirmeleri ve risk azaltma gibi farklı temel kavramları tanımlar. Ancak, ISO 10218-Robotlar ve robotik cihazlar, özellikle robotik için yazılmıştır ve endüstriyel robotlar için güvenlik gereksinimlerini detaylandırmak için robotik örnekler kullanır. Her iki standart da hemen hemen aynı işlevi, yani makine emniyetini sağlar, ancak ISO 10218 tamamen robotlara özgüdür.

2014 yılında yayınlanan ISO 13482, yakın insan robot etkileşimi ve hatta insan robot teması sağlayan Kişisel Bakım Robotlarına özeldir.



Tablo 13: Standart Seviyeleri (Bélanger, 2016)

Revize edilmiş ISO 10218 standardı Bölüm 1 ve 2 ve ISO/TS 15066 Teknik Şartnamesi, robotlar ve özellikle iş birlikçi robotlar için güvenlik gereksinimlerini tanımlar.

Robotun kendisinin yanı sıra, bu bağlamda iş birlikçi robot, son efektörünü (yani robotun görevleri yerine getirdiği robot koluna takılı araç ile onun tarafından taşınan nesneler, çevresi ve tüm potansiyel etkileşimleri içerir. İşbirlikçi robot ile operatör arasındaki yakın veya doğrudan temas, çarpışma olasılığını tanım gereği doğurur. Robot üreticisinin risk analizi bu nedenle amaçlanan endüstriyel çalışma alanını da kapsamalıdır.

- **Teknik Şartname:**

Teknik Şartname, bir teknik komite üyeleri arasındaki bir anlaşmayı temsil eder ve bu komite üyelerinin %66'sı tarafından onaylanırsa yayına kabul edilir. Teknik Şartnamenin içeriği, bir ISO komitesi içindeki teknik fikir birliğini temsil eden normatif bir belgedir. ISO/TS 15066, iş birlikçi robotlarla doğrudan ilgili çok fazla bilgiye sahip olmayan ISO 10218 için daha fazla veri ve destek sağlamak amacıyla piyasaya sürüldü. TS (Teknik Şartname) terminolojisine sahiptir, çünkü daha fazla uygulama bilgisi ve verisi standart olarak akredite edilmeden önce analiz edilmelidir, hala üzerinde yeni çalışmalar yapılmaktadır. İşbirlikçi robotlar için bir kuvvet/enerji/hız sınırı oluşturmak için gelecekteki herhangi bir standardın tasarımında kabul edilebilir ağrı düzeyleri ve vücut parçası ataleti gibi önemli veriler göz önünde bulundurulmalıdır.

Risk Analizi:

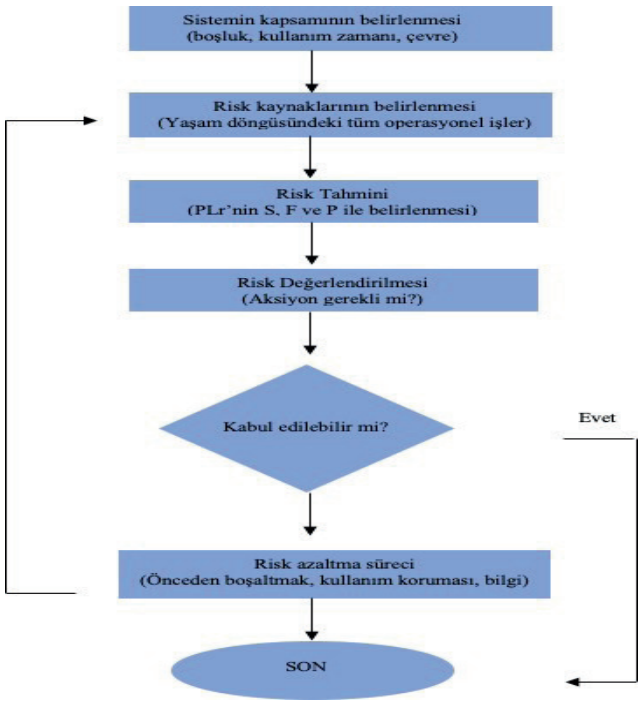
Risk değerlendirmesinin gerçek tanımını; **"Bir duruma dahil olan risk seviyelerinin belirlenmesi, değerlendirilmesi ve tahmin edilmesi, bunların, kıyaslamalar veya standartlarla karşılaştırılarak kabul edilebilir bir risk seviyesinin belirlenmesi."** olarak yapabiliriz. Robotik ortamda, potansiyel riskleri değerlendirmek ve daha sonra robotik bir sistemin çalışması sırasında bir işçiye olası zarar verme riskinin kabul edilebilir seviyelere ulaşmak amacıyla bunları azaltmak için bir risk değerlendirmesi kullanılır. ISO standardına uymak, tüm makinelerin güvenli olduğundan emin olmak için bir risk değerlendirmesinden geçmesi gerekir. Bazı cihazlar üreticileri veya üçüncü bir tarafça zaten onaylanmıştır ve bu, örneğin robot aktüatör gibi belirli parçaların güvenlik seviyesini doğrulanması gerekmediğinden risk değerlendirme sürecini basitleştirecektir. Ancak, robotun dahili bileşenleri ve yazılımı onaylanmış olsa bile bu, çevresindeki ortama göre güvenli olduğu anlamına gelmez. Özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanım o kadar çeşitlidir ki, bir parça üreticisinin herhangi bir süreci onaylaması imkansızdır. Risk değerlendirmesinin devreye girdiği yer burasıdır. Sistem/ler söz konusu olduğunda, her bir cihazı ayrı ayrı değil, her endüstriyel uygulamayı bir bütün olarak değerlendirmeniz gerektiğidir. Sertifikalı bir robot tarafından kullanılan keskin bir parça veya bıçak örneğini alırsanız, bu, her parça kendi içinde ve kendi başına güvenli olsa bile uygulamanın güvenli olduğu anlamına gelmez.

- **Risk Analizine Neden Gerek Vardır?**

Çalışanın güvenliğini sağlamak işverenin sorumluluğundadır. Risk analizi, işçi güvenliğini sağlamaya yönelik bir araçtır. Dünyanın bazı bölgelerinde, yerel yasalar ve düzenlemeler, fabrikada kurulan herhangi bir makine için bir risk değerlendirmesi yapmayı zorunlu kılar. Yönetim bölgelerinin tümü standartlara uymanızı gerektirmez, ancak çoğu güvenlik kurumunun güvenlik standartlarını içeren veya bunlara atıfta bulunan kanunları olacaktır. Bu durum, genellikle kendi güvenlik yönergelerine sahip olan büyük şirketler için de geçerlidir. Bu nedenle, robotun kullanılacağı ülkedeki yasalara uymak ve işçi güvenliğini sağlamak için robotik hücreyi entegre ederken ve tasarlarken o ülkeyle ilgili bazı standartlara, ISO veya diğerine uymak gereklidir. Risk analizi, daha sonra ya ülke ya da küresel düzeyde işyeri güvenliğini sağlamak için seçilmiş standartlar doğrultusunda gerçekleştirilir. Robotik hücrenin güvenliğinin sağlanması istenen durumlarda, seçilmiş standartların gerektirdiği tüm noktalara göre testler yapmak ve çalışma hücresini güvenli hale getirmek gerekecektir. Ayrıca hücrenin performansı da bu standarda göre belgelemelidir.

- **Risk Analizi Süreci:**

Robotik hücrelerde kullanılan çoğu cihaz zaten belirli bir performans seviyesine sahip olacağından, son kullanıcı veya entegratör için risk değerlendirmesi çoğunlukla uygulamanın kendisiyle ilgili olacaktır. Sürece ilişkin aşamalar aşağıdaki şemada belirtilmektedir.



Şekil 11: Risk Değerlendirmesi Süreci (Bélanger, 2016)

Kapsamın Belirlenmesi:

- Risk değerlendirmesinin bu bölümü, makinenin kullanım bağlamının bir açıklamasıdır.
- Robot nerede (hangi proseste) kullanılacak?
- Proses sırasında hangi takımlar kullanılacak?
- Hangi nesneler operasyonun bir parçası olacak?

Sorularına yanıtlar aranır. Ayrıca, robotun maksimum hızı, ivmesi, uzanma mesafesi, kaldırabileceği yük kapasitesi ve parça ağırlıkları da bu çalışmaya eklenmelidir. Disk değerlendirmesinin gerçekçi olabilmesi için bu değerler çok önemli olup, belki buna diğer bazı bilgileri de eklemek gerekebilecektir.

Risk/lerin Belirlenmesi:

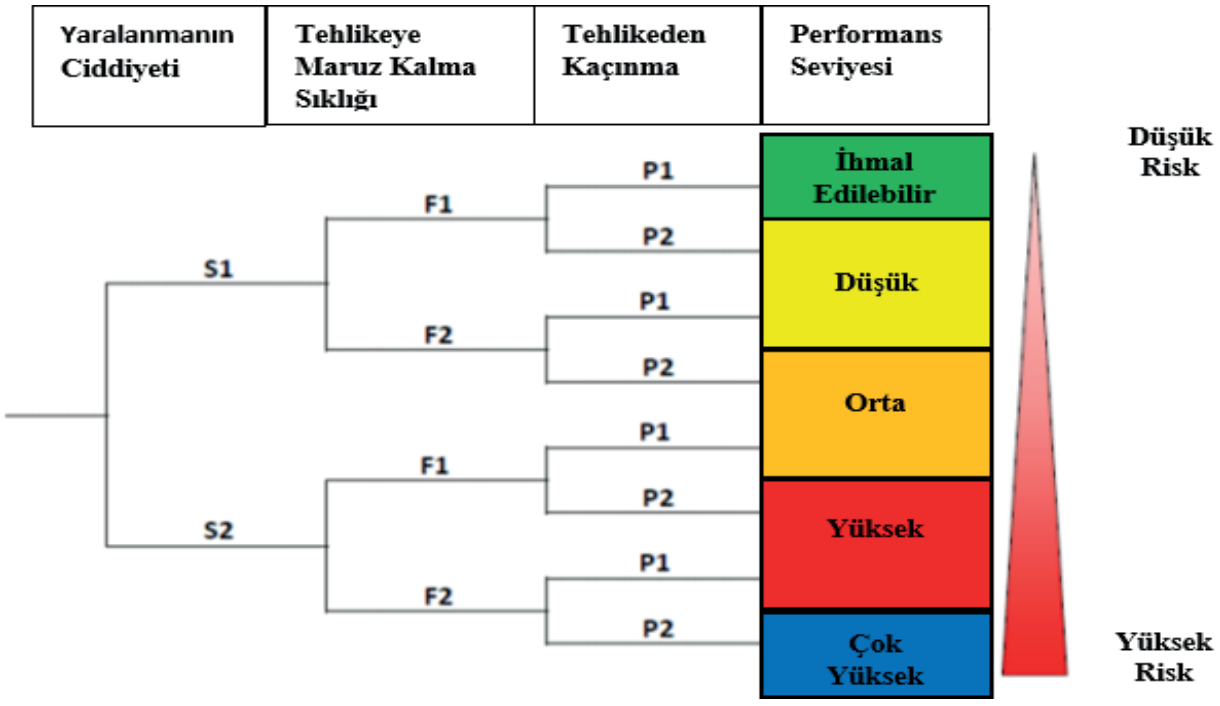
Tehlike oluşturabilecek her türlü işlemin listelenmesi gereklidir. Bu işlemler yalnızca robotun çalışmasını değil, robotun kamyondan teslim edildiği andan hizmetten çıktığı ana kadar her şeyi içerir. Analizin bu kısmı biraz abartılı görünebilir, ancak bazen küçümsenebilir. Geçtiğimiz yıllarda, bir robotun kurulum sürecinde bir işçiyi ezip öldürdüğü trajik bir vakayı hatırlarsak, bu yapılan işlerin hiç te abartılı olmadığını rahatlıkla görebiliriz. Dolayısıyla, bir risk analizi, robotun ömrü boyunca farklı hareketlerini ve eylemlerini analiz edecek ve her işlemi daha fazla analiz için basitçe bölecektir. Bu sürece göreve dayalı risk analizi adı verilir.

Risk/lerin Tahmini:

Risk tanımlama analizi sırasında yapılan gözlemlere göre, verilen hareketlerin risklerini derecelendirilmesi gerekir. Bir riski izlemenin veya derecelendirmenin çeşitli yolları vardır. Açıklamayı basitleştirmek için, ISO 13849-1: 2006'da kullanılan aynı örnek kullanılabilir.

Risk, Performans Seviyesi derecelendirmesi **(PLr)** terminolojisi kullanılarak tahmin edilir. Bu analiz, üç farklı parametre kullanır: yaralanmanın Şiddeti **(S),** bir tehlikeye maruz kalma sıklığı **(F)** ve tehlikeden kaçınma olasılığı **(P).**

Dolayısıyla, bir riski tahmin etmenin temel yolu, her bir parametreyi derecelendirmek ve risk seviyesinin ne olduğunu görmek için bir risk tahmin ağacından geçmek olacaktır. Risk değerlendirme ağacında, en üstteki durum en düşük riski ve en alttaki durum en yüksek riski temsil eder.



Şekil 12: Risk Tahmin Diyagramı (Bélanger, 2016)

PLr'yi ölçmek için aşağıdaki parametrelerin değerlendirilmesi gerekir.

S: Yaralanmanın Şiddeti,

- **S1:** Hafif (normal geri döndürülebilir yaralanma),
- **S2:** Ciddi (normalde geri döndürülemez yaralanma veya ölüm),

F: Tehlike sıklığı ve / veya maruz kalma süresi,

- **F1:** Nadiren daha az sıklıkta ve / veya kısa maruz kalma süresi,
- **F2:** Sık sık ve / veya sürekli ve / veya uzun maruz kalma süresi,

P: Tehlikeden kaçınma veya zararı sınırlama olasılığı,

- **P1:** Belirli koşullar altında mümkündür,
- **P2:** Nadiren mümkün,

Bazı tanımlamalar, parametreleri iki yerine üç veya daha fazla farklı yoğunluğa böler. Bu, riskin daha kesin bir tahminini verecektir. Her durumda amaç, robotik hücre için riskin çok yüksek olup olmadığını belirlemektir. Bu da bizi risk analizinin bir sonraki adımı olan risk değerlendirmesini gündeme getirir.

Risklerin Değerlendirilmesi:

Proseste saptanan riskleri belirledikten sonra bu riskleri azaltmak için gereken eylemlerin üzerinde çalışılmalıdır. Performans Düzeyi Derecelendirmesi (PLr) ile genel Performans Düzeyi (PL) arasındaki bağlantılar gözden geçirilmelidir. Bunu yeniden ifade etmek için, çalışma hücresinin veya uygulamanın yüksek bir riske sahip olduğunu tahmin ediliyorsa (PLr = yüksek), bu uygulamanın Performans Seviyesi de d (PL ≥ d)'ye eşit veya daha büyük olacaktır. Bu durumda d veya e. Bu, riskin mevcut tehlike seviyesini kabul edebilecek bir cihaz tarafından izlenmesini veya güvence altına alınmasını sağlar.

PLr	PL
İhmal Edilebilir	a
Düşük	b
Orta	c
Yüksek	d
Çok Yüksek	e

Şekil 13: Risk Değerlendirme (Bélanger, 2016)

Çoğu durumda, çalışanların güvende olduğundan emin olmak için düşük ya da ihmal edilebilir kategoride olmak istenir. Bu kabul edilebilir kategori dışında olunması durumunda, çeşitli kademelere başvurulmalıdır. Risk değerlendirmesi potansiyel olarak yüksek bir risk veriyorsa; bu risklere odaklanmak ve bunları azaltmak veya ortadan kaldırmak gereklidir. Riskler azaldıkça, risk analizi için risk tanımlama zincirinin yedeklenmesi ve indirilen riskin başka bir risk oluşturmadığından emin olmak için tüm süreci yeniden tamamlamak gerekir. Diyelim ki çarpışmaları önlemek için bazı korumalar entegre edilmek isteniyor, ancak bu koruma, bakım işlemleri sırasında bir çalışanın ezilme olasılığını artırıyorsa, bu durumda bu korumanın yapılandırmasını tekrar gözden geçirerek konfigürasyonun değiştirilmesi gerekir. Herhangi bir konfigürasyon değişikliğinde sistemin tamamını gözden geçirmek gerekir.

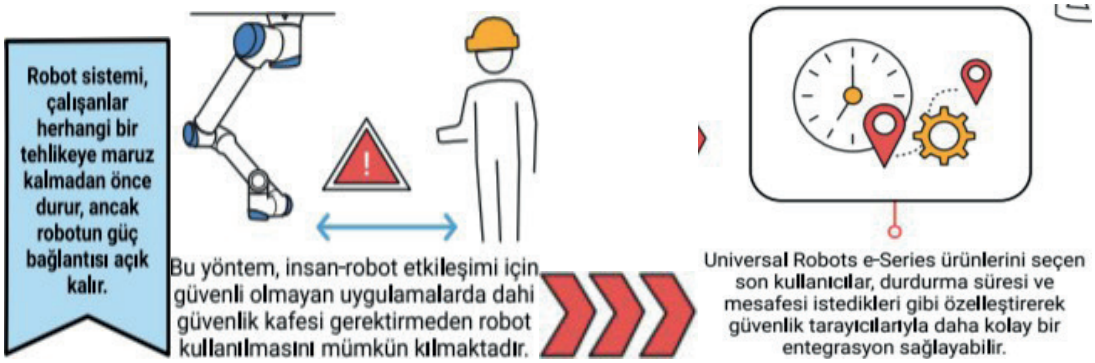
Risk Azaltma Süreci:

Bir önceki bölümde belirtildiği gibi, risk sınırlamasının, azaltmanın veya önlemenin robot hücresinin diğer yönleriyle çatışmadığından veya robot hücresi uygulamasında başka bir yerde çalışanlar için daha büyük bir risk oluşturmadığından emin olmanız gerekir. Bu süreç gerçekten yinelemelidir ve zincire geri dönerken her potansiyel riski göz önünde bulundurarak ve yeniden değerlendirerek çok dikkatli bir şekilde yapılması gerekir.

- **İşbirliğine Dayalı Uygulamalar için Risk Analizi Nedir?**

Dört tür iş birliğine dayalı (kolaboratif) uygulama vardır;

- Sınırlandırılmış güvenli duruş,
- Elle yönlendirme,
- Hız ve mesafe izleme,
- Güç ve kuvvet sınırlama,

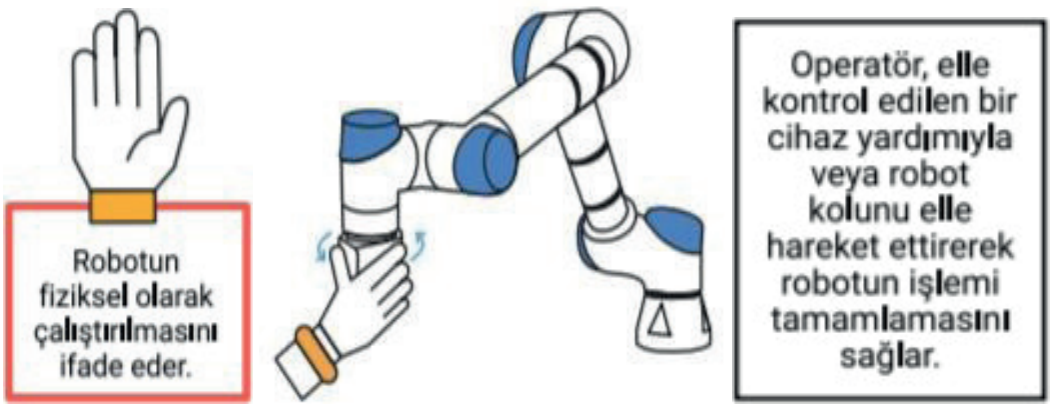


Şekil **14:** Sınıflandırılmış Güvenli Duruş Yöntemi (Kobotlarla Çalışmaya Hemen Başlayın, t.y.)

Sınırlandırılmış Güvenli Duruş:

Başka bir deyişle, operatör iş birliği alanına girdiğinde robot durur. Robot bir lazer tarayıcı, güvenlik anahtarları veya bir insanın varlığını algılayan bir görme sistemi tarafından izlenir, sistem daha sonra ihlal eden operatörün zarar görmemesini sağlamak için tüm robot hareketlerini kapatır. Robot güvenlik açısında tüm hareketlerini durdurmuş olsa dahi, tüm konumları izlemeye devam eder ve tamamen kapanmamıştır. Bir kazayı önlemek için, bir işlemci robotun olması gereken yerde olup olmadığını analiz ediyor. (Güvenlik Seviyesi 3). Bu tür bir iş birliği, robotun bir işçiye yakın çalışıyor olması gerektiği, örneğin bir robotun ağır bir şeyi kaldırması gerektiği ve operatörün parça üzerinde ikinci bir işlem yapması gerektiği durumlarda kullanılabilir. Robotun genellikle, operatör ortak çalışma alanına girmeden önce durdurulur.

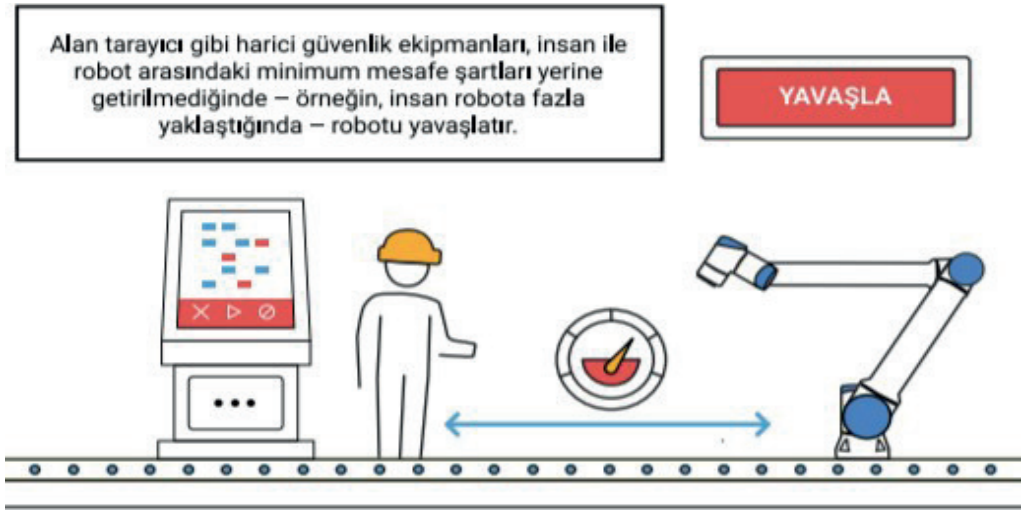
Elle Yönlendirme:



Şekil 15: Elle Yönlendirme Yöntemi (Kobotlarla Çalışmaya Hemen Başlayın, t.y.)

Bu durumda, robotun hareketleri yalnızca operatörün doğrudan aldığı komutlar kullanılarak mümkündür. Yani robota nereye gideceği ve neler yapacağı tam olarak öğretilmiştir. Bu tür iş birlikçi robotlar kendilerine uygulanan gücü algılama yetenekleri vardır. Bu uygulamaları gerçekleştirmek için robot bileğindeki veya robot aktüatördeki kuvvet tork sensörleri kullanılabilir.

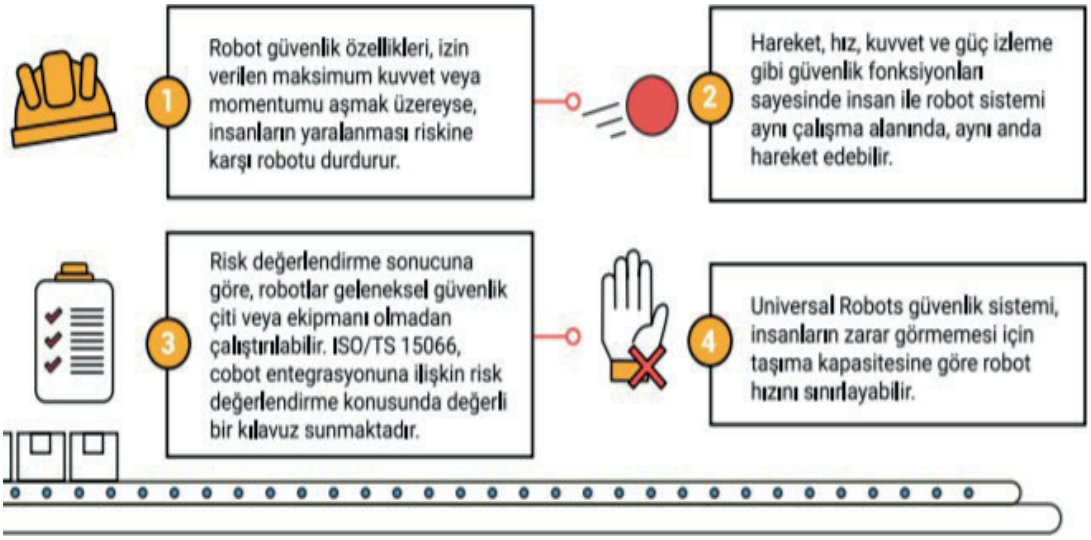
Hız ve Mesafe İzleme:



Şekil 16: Hız ve Mesafe İzleme Yöntemi (Kobotlarla Çalışmaya Hemen Başlayın, t.y.)

Bu tür bir iş birliği, robot çalışma alanında farklı güvenlik bölgeleri sınırlandırıldığında elde edilir. Bazı bölgelerde robot için maksimum hıza izin verilirken, bazı bölgelerde operatörün potansiyel yakınlığı nedeniyle daha düşük hızlar gereklidir. Diğer bölgeler, genellikle operatör robota çok yakın olduğu için robotu tamamen durdurur. Güvenlik bölgesinin izlenmesi, çoğunlukla görüş kullanan farklı izleme sistemleri tarafından yapılır. Güvenlik bölgesi herhangi bir boyutta ve geometride olabilir, kullanıcı farklı bölgeler belirleyecek ve operatörün robottan hiçbir koşulda zarar görmemesini sağlamak için bu bölgelerle farklı hızlanma ve hız ayarlarını ilişkilendirecektir. Bu, insan ve robot arasındaki iş birliğinin sabit olmadığı ve robotun çoğu zaman tek başına tam hızda çalışacağı durumlarda meydana gelebilir. Bu şekilde yapmak, süreci hızlandırabilir ve yine de operatör robot iş birliğine izin verebilir.

Güç ve Kuvvet Sınırlama:



Şekil 17: Güç ve Kuvvet Sınırlandırma Yöntemi (Kobotlarla Çalışmaya Hemen Başlayın, t.y.)

İçsel tasarım ve kontrol sayesinde robot, gövdesine uygulanan anormal bir kuvveti hissedebilir. Dolayısıyla, temas durumunda, robot yalnızca sınırlı statik ve dinamik kuvvetlerle tepkisini gösterir. Başka bir deyişle, bir şeye çarptığında, aktüatörler ve frenler, çarpma yönünde daha az enerji (atalet) sağlayacak Şekilde hareket eder. Bazı robotlar basitçe duracak ve diğerleri çarpmanın tersi yönde hareket ederek tepki verecektir. İş birliği içinde çalışmak için büyük uyum gösterirler.

Yukarıda bahsedilen çalışma yöntemlerinin uygulanması sırasında aşağıdaki durumlara yönelik risk değerlendirmelerinin yapılması gerekmektedir.

- **Tam Durmadan Önceki Mesafe:** Bu parametre, iş birlikçi çalışma ortamlarında hız ve duruş izleme operasyonu için kullanılır. Robotun insanlarla birlikte çalışması durumunda, robotun hızını sınırlamak için bu parametrenin ayarlanması ve onaylanması gerekir. Teknik Şartnamedeki, hesaplama, ilgili farklı hızları (robot ve operatör) ve bunları ayıran mesafeyi ve ayrıca uygulama için gereken durma süresini, mesafeyi ve hızı hesaplamanıza olanak tanıyan birkaç başka parametreyi içerecektir.

- **Hız Koşulları:** Teknik Şartnamenin bu kısmı genellikle emniyetle izlenen durmalar için kullanılır. Aslında, risk analizinin bu bölümünde robotun hangi hızlarda çalıştırabileceği, koşullarda ve ne zaman durması gerektiği listelenecektir. Bu nedenle, belirli koşullarda robot tam hızda çalıştırabilir ve diğer sıralanmış durumlarda, robot tamamen yavaşlamalı veya tamamen durmalıdır (yine de güçlü kalmaya devam edebilir).

- **Kuvvet:** İnsan robot iş birliği büyük olasılıkla insan robot temasını içereceğinden, bir robotun insanlara zarar vermeden ulaşabileceği sınırın ne olduğuna dair verilere sahip olmak önemlidir. Teknik özellik, insan ağrı seviyelerini analiz eden ve bu çalışmanın farklı verilerini kullanarak bir insana kalıcı zarar vermeden dayanabileceği kabul edilebilir güç eşikleri oluşturan bir çalışma kullanır. Oluşturulan grafik, tüm vücut parçalarını listeler ve ortak çalışma sırasında hiçbir zaman ihlal edilmemesi gereken kesin kuvvet eşikleri verir. Bu veriler yalnızca güç kullanımı ve sınırlı robotları zorlamak için değerlidir. Aslında endüstriyel robotlar, iş birliğine dayalı bir çalışmada kullanılsalar bile asla normal çalışma hızlarında insanlarla temas etmelerine izin verilmez.

- **Basınç:** Basınç, uygulanan kuvvetin, basıncı uygulayan parçanın yüzey alanına bölünmesiyle elde edilir. Robot, çalışan üzerinde belirli kuvvetler oluşturabildiğinden (daha çok kuvvet ve güç sınırlandırılmış uygulamalarda), robotun kabul edilebilir basınç seviyelerini aşmadığından emin olmak için basınç alanının geliştirilmesi gerekebilir. Bu, çok büyük miktarda basıncın uygulanmamasını sağlamak için yüzey alanının iyileştirilmesi ve belki de tamponlanması veya uyumlu hale getirilmesi gerekebileceği anlamına gelir.

- **Geçici ve Yarı Statik Kuvvetler:** Yeni teknik şartname, robotların kullanımında ihlal edilmemesi gereken maksimum kuvvetlerin (dolayısıyla basıncı) listesini sunar. Bununla birlikte, statik ve dinamik kuvvet arasında küçük bir fark vardır. Aslında, bir etki, her nesnenin göreceli hızıyla hesaplanır. Robotla operatör aynı yönde hareket ediyorsa, çarpma, hareketsizken veya ona doğru hareket ederken ki çarpışma kadar güçlü olmayacaktır. Her bir temas türünün kısa bir tanımını yaparsak;

- **Yarı Statik Temas:** Bu tür darbe, vücudun bir bölümünün robotun hareketli bir parçası ile robot hücresinin sabit veya hareketli bir parçası arasında sıkıştığı veya ezilme durumlarında olur. Bu durumda, operatör bedeninin, robotla hücrenin bir kısmına sıkışmış olan bölgesine, robot etkisiz hale getirilene kadar bir süre kuvvet ve basınç uygulanmaya devam edilir. Bu tür bir temas, ağrı eşiğine ulaşmak için daha küçük bir kuvvet gerektirir.

- **Geçici Temas:** Bu tür bir etki, "dinamik etki" olarak adlandırılır ve hareketli robotun, robot ile insan vücudu parçası arasında kenetlenme veya sıkışmadan geri çekilme veya geri tepme olasılığı olan bir insan vücuduna çarptığı bir durumu tanımlar. Bu tür bir etki kısa süreli olarak kabul edilir. Geçici temas, robotun ataletine, vücut kısmının ataletine ve bunlar arasındaki göreceli hıza bağlıdır.

- **Risk Analizini Kim Yapmalıdır?**

Aslında, son kullanıcılar kendi tesislerinde risk analizleri yapabilirler. Robotla sistemin entegrasyonunu yapan entegratörler bu analizleri yapmaya alışkındır ve bu da genellikle tüm süreci sıfırdan öğrenmek zorunda kalmaktan daha hızlıdır. Entegratörler prosese göre şablonlar kullanarak ve tasarım aşamasında bir riski azaltmak için ilk önce ne yapacaklarını tam olarak planlayacaklardır. Karmaşık sistemlerde, uygulamaya yönelik risk analizinin akredite kuruluş tarafından yapılması çok daha doğru olacaktır.

- **Üretici Sertifikası:** Robotik hücrenin tamamı için bir risk analizi gereklidir. Bu ortamda robot önemli bir rol oynayacak, ancak sistemdeki diğer tüm cihazlar da risk hesaplamasına dahil edilmelidir. Nihai sistemde yer alacak her bileşenin üreticisi tarafından yapılacak risk analizleri, nihai kullanıcının işini büyük ölçüde kolaylaştıracaktır. Örneğin sıradan bir elektrikli ev aletini örnek verecek olursak, üreticinin uyarıları

doğrultusunda kullanılmadığı takdirde, mutlaka bir kazaya neden olabilecektir. Bu nedenle, bu aleti üreten firmanın, nihai kullanıcının bu aletin kullanması sırasında gündeme gelebilecek tehlikelerin neler olduğunu saptamak için mutlaka bir risk analizi yapması gereklidir. Bu yüzden de aletin ekindeki kullanma talimatına risk analizinde elde etmiş olduğu bilgiler doğrultusunda bir dizi uyarılarda bulunacaktır. Eğer bu alet Avrupa ülkelerinde kullanılacak ise, üretim sırasında CE tavsiyelerine de uyulması istenecektir. Bu gereksinimler, üçüncü taraflarca değil, üreticinin kendisi tarafından onaylanmıştır. Bu standartlar, Avrupa ülkelerinde kullanılması gereken minimum standartlardır. Bununla birlikte, ürünün belirli bir standarda uyması isteniyorsa, ürünü onaylatmak için üçüncü bir tarafa başvurulabilir. Bu durumda robot piyasaya sürülmeden önce, üçüncü taraf olarak, bir sigorta şirketi veya tarafsız bir akreditasyon kuruluşunun onayı alınabilir. Bu kuruluş/lar, güvenlik açısından muhtemelen en katı standartları uyguladığını belirterek, robotu için en üst düzey ve güvenilir güvenlik sertifikasına sahip olmasını sağlayabilirler. Daha sonra bu belge farklı ülkelerde kullanılabilir, ancak yine de şüphesiz karşılayacağı yerel normlar tarafından onaylanması gerekir. Genelde, üretici piyasada en güvenilir ürünü sattığını belgelemek amacıyla, piyasada kabul görmüş güvenilir bir belgeyi ürünün evraklarını mutlaka eklemeyi de tercih edecektir.

- **Performans Gereklilikleri:**

Robotik bir çalışma hücresinde nelerin kabul edilebilir derecede güvenli olduğu konusunda daha derin ayrıntılara girersek, **ISO 10218-1: 2011'in 1.1.2. Performans gereksinimi** bölümünü referans almak uygun olacaktır.

Kontrol sistemlerinin güvenlikle ilgili parçaları, **ISO 13849-1:2006'**da açıklandığı gibi **kategori 3** (makinelerin güvenliği) **PL 'd'** ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmalıdır,

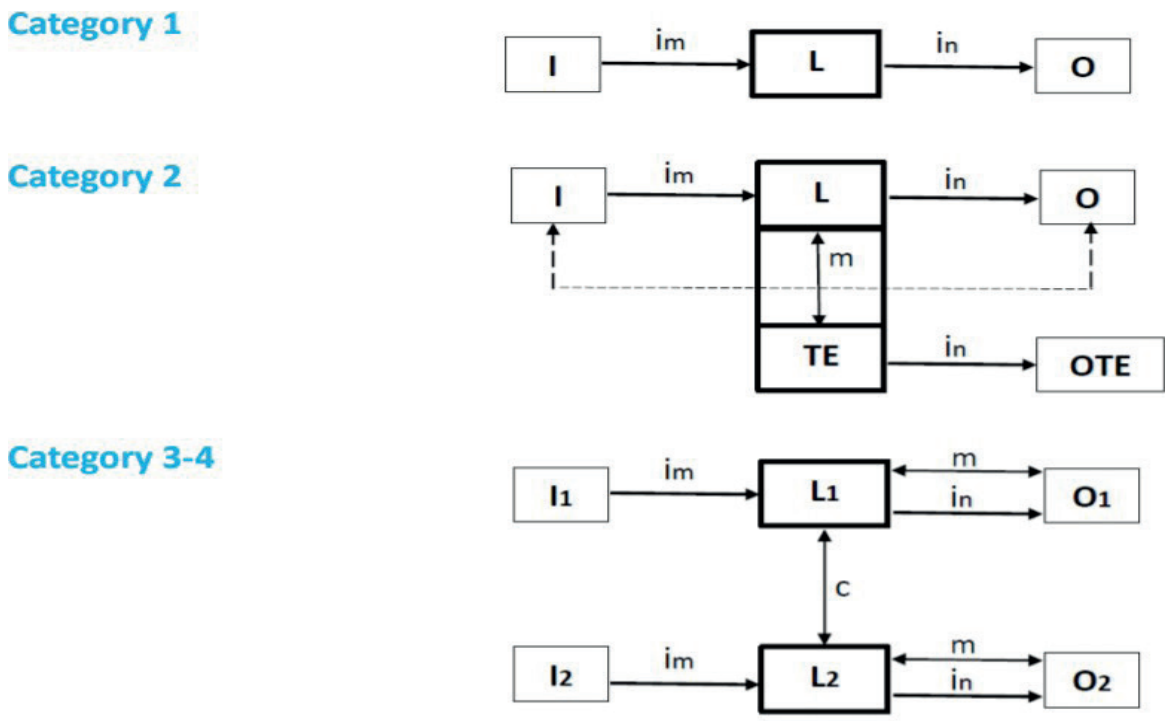
- Bu parçaların herhangi birinde tek bir arıza, güvenlik fonksiyonunun kaybına yol açmaz,
- Makul bir şekilde uygulanabilir olduğunda, tek arıza, güvenlik işlevi üzerine bir sonraki talepte veya daha önce tespit edilmelidir,
- Tek hata oluştuğunda, güvenlik işlevi her zaman gerçekleştirilir ve tespit edilen hata düzeltilene kadar güvenli bir durum sürdürülür.
- Makul olarak öngörülebilir tüm hatalar tespit edilecektir.

ISO standartlarına uymak için, tüm ekipman veya makinelerin belirli bir güvenlik düzeyine uyması gerekir. Bu seviye, Performans Seviyesi, test edilen ekipmanın arıza olasılığı ile ilgili olarak belirlenir. Tablo 14'te ISO 13849-1'de belirtilen farklı performans seviyelerini açıklanmaktadır.

Tablo 14: Performans Seviyesi (PL) (Barette, 2016)

PL	Mean Time to Dangerous Failure per hour 1/h
a	$\geq 10^{-5}$ *to* $< 10^{-4}$
b	$\geq 3x10^{-6}$ *to* $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ *to* $< 3x10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ *to* $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ *to* $< 10^{-7}$

Yapısal kategori, cihazın kullandığı yedeklilik miktarına bağlıdır. Bunu başka bir deyişle, tek bir kanal donanımı varsa (örneğin kodlayıcı) robotun konumunun olması gereken yerde olduğundan emin olmak için birbirini iki kez kontrol eden çift kodlayıcı kullanan bir sistemden daha düşük bir fazlalık düzeyine sahip olabilmek mümkündür. Aşağıdaki diyagramda farklı kategori düzeyleri gösterilmektedir.



Şekil 18: Kategori Seviyeleri (Barette, 2016)

Şemayla ilgili tam ayrıntıya girmeden, Kategori 1 basit bir tek kanallı güvenlik donanımı içerecektir. Örneğin, kapatılan bir anahtar (giriş veya I)Mantıksal cihaz (L) tarafından yönlendirilecek ve bir durdurma (çıkış veya O) ile sonuçlanacaktır.

Kategori 2 cihazı, ana sistem için her zaman giriş ve çıkışın (OTE Test Ekipmanı Çıkışı) geçerliliğini doğrulayacak ve bir arıza meydana geldiğinde tepki verecek ikinci bir cihaz (TE veya Test ekipmanı) içerecektir. Acil durdurma özelliğine sahip bir cihazı Kategori 2 güvenlik cihazı olarak düşünebiliriz.

Kategori 3 veya 4 cihazı, bağımsız olarak hareket edecek, ancak aynı sinyale sahip olduklarından emin olmak için her zaman birbirlerini iki kez kontrol edecek iki paralel cihaz içerir. Bu şekilde, tek bir arıza meydana gelebilir ve ikinci kanal hala bir arıza olduğunu görebilir. Bu, bir kanalın başarısız olması durumunda sistemin hala bir kusuru okuyabilmesini sağlar.

Dolayısıyla, başka bir yerde farklı isimlendirmeyi görmüş olabileceğimiz gibi, PL = d kategori 3; artık ne anlama geldiğini bilinmektedir, çoğu güvenlik cihazı (Güvenlik röleleri, anahtar anahtarları, estoplar, vb.) bu isimlendirmede derecelendirilecektir. Daha önce belirtildiği gibi, iş birlikçi robot hücresine dahil olacak tüm cihazlar, ISO standartlarına uymak için en az PL = d kategori 3 olarak derecelendirilmelidir.

9.7. İşbirlikçi Robotlarla Çalışırken Çarpışma ve Yaralanma Kriterleri

İnsanların robotlardan ve makinelerden maruz kaldıkları tehlikeler, geleneksel olarak çitler, kilitleme ve kordon altına alma yöntemleriyle kontrol edilmektedir. Günümüzde, çalışma alanını daha yakın mesafeden paylaşabilen, insan ve robotun birbirine daha yakın şekilde çalışmak üzere tasarlanmış daha yeni bir iş birlikçi robotlar/kobotlar geliştirilmiştir. Bu da insanlar ve robotlar arasında güvenli bir aralığın sürdürülmesi ve robotlarla çalışan insanların iş birlikçi robot sistemlerinin sağlık ve güvenliği tehdit eden risklerinden yeterince koruyabilecek standartların belirlenmesi için yeni yaklaşımlar gerektirmektedir. Bu nedenle, ISO tarafından kabul edilebilir risk seviyeleri, risk değerlendirmesi ve karşı önlemler konusunda rehberlik sağlayacak bir Teknik Şartname taslağı hazırlanması gündeme gelmiş, bu taslak kolaboratif robotlarla ilgili olarak aşağıdaki sorulara cevap bulmaya çalışmıştır;

- Taslakta tanımlanan kuvvet sınırlarının güvenli ve gerçekçi olup olmadığı,
- Kuvvet sınırlarını test etmek için önerilen yöntemlerin, iş birlikçi robot sistemlerinin gerçek risk değerlendirmesi için güvenilir, gerçekçi ve pragmatik olup olmadığı;
- Önerilen yaklaşımın insanları risklerden yeterince koruyup koruyamayacağı,

İşbirliğine dayalı robotların geliştirilmesi ve uygulanması, sağlık ve güvenlik kısıtlamaları olan veya olmayan endüstrilerde gerçekleşmektedir. Uygulamalara ilişkin yeterli güvenlik seviyeleri belirlenirken, kurallı gerekliliklerin savunmasız hatlar yaratmasından kaçınmak gerekir. İşbirliğine dayalı robotların kullanımı, endüstri tarafından beklenen önemli baskılarla birlikte olası bir büyüme alanı olarak görülmektedir. Güvenliğe ilişkin öneriler, ciddi kazaların gelişmesine engel olurken çalışma alanının gelişmesini ve olgunlaşmasını da sağlamalıdır.

9.8. ISO Teknik Şartname Taslağına İlişkin Gelişmeler:

Çalışmalar sırasında, ilk başta ISO/TS 15066 ve Kolaboratif Robotlar başlığı altında büyük oranda yenilenmiş bir taslak hazırlandı. Bu çalışmaların çok büyük bir kısmında, ISO-10218-1 ve ISO 10218-2'de tanımlanan Kolaboratif Robotların Çalışma Alanlarındaki Mekanik Tehlikelere İlişkin Risk Değerlendirmesi - Kolabortif Robotların Operasyonları Sırasında Güvenlik Gereksinimleri ilk taslakta teknik şartnameler olarak belirlenmiş ve ISO dokümantasyonunu güncellemek için gerekli çaba sarf edilmiştir.

Operatörün küçük yüzey yaralanmalarından ölümcül yaralanmalara kadar, iş birlikçi robot sistemlerinden yaşayabileceği çeşitli vücut yaralanmaları bir sınıflandırma sistemine sokulabilir. Kolaboratif ortamda vücut hasarının türü ve derecesinin tanımı için, öncelikle yaralanma kriterlerinin belirlenmesi gerekir. ISO / TS 15066 taslağında tanımlandığı Şekilde bir yaralanma kriteri, tanımlanmış bir yaralanma şiddetine karşılık gelen seçilmiş biyomekanik eşiktir. Çarpışma kriterleri, belirli bir yaralanma seviyesine yol açan bir insan-robot çarpışmasının özellikleridir. Çarpışma kriterleri genellikle, belirli bir yaralanma türüne ve derecesine yol açan bir vücut bölgesine etki eden basınç, darbe ve kesme kuvvetlerinin bir sonucudur.

Yaralanma kriteri, "deneysel gözlemle etkileşime giren bazı ölçülebilir fiziksel parametreler ile doğrudan bu etkileşimden kaynaklanan yaralanma oluşumu arasındaki resmi olarak bir ilişkiyi tanımlayan ampirik gözlemi temel alan matematiksel bir ilişkidir" olarak tanımlanmaktadır. Aynı kaynak, tolerans seviyesinin yaralanma kriteri ile ilgili tanımını; "Yaralanma toleransı, zarar verici olmayan bir olayı zarar verici bir olaydan ayırdığı bilinen bazı yaralanma kriterlerinin değeri veya belirli bir ciddiyette yaralanmaya neden olma olasılığı ile ilişkili minimum değer" olarak yapmıştır.

Robot-insan çarpışmaları için çeşitli kuvvet sınırları önerilmekte ve bunların güvenli ve gerçekçi görünüp görünmediğinin değerlendirilmesi istenmektedir. Bunun için de önerilen önlemlerin pratik olarak uygulanıp uygulanamayacağına dair bir değerlendirme de 3 amaçla gruplandırılmaktadır.

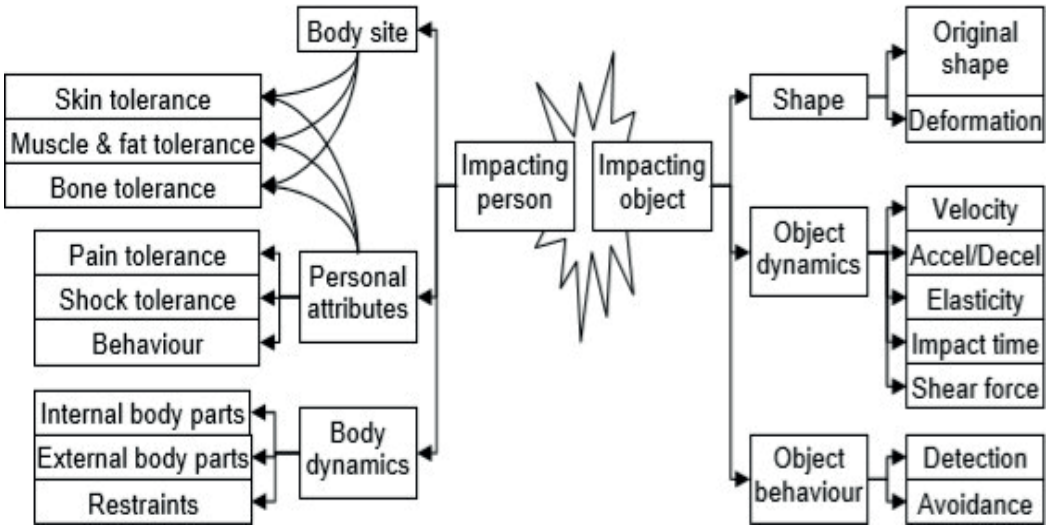
- Çeşitli vücut bölgeleri için ezilme / kıstırma / kesme kuvveti sınırları ile ilgili mevcut araştırmaları incelenerek varsa yapılan mevcut ölçümlerle karşılaştırılır. Standardın ilk taslağının birincil yaratıcılarıyla yapılan tartışmalar da dahil olmak üzere, önerilen kuvvet sınırlamalarının hangi araştırmaya dayandığını saptanır.
- Vücut bölgelerini ve kuvvet sınırlarını tanımlama yaklaşımını ile öngörülen gerçekçi senaryolar izlenir. Önerilen kuvvetlerin ve önlemlerin güvenli ve gerçekçi olup olmadığı ya da bunu oluşturmak için hangi adımların atılması gerektiğine dair görüşleriniz belirtilir.
- Kuvvet ölçüm enstrümanları ve maliyetlerinin teknolojik sınırları göz önüne alındığında, robot tasarımcılarının ve montajcılarının önerilen yaklaşımı uygulayıp uygulayamayacaklarına dair bir ön değerlendirme yapılır Mevcut ölçüm araçlarını ve gerçekçi ölçüm yöntemleri oluştururken gereken diğer adımları/ araştırmaları ile gerçekçi çarpışma senaryoları ve taslak standartta önerilen yaklaşımın pragmatik olup olmadığını göz önünde bulundurulmalıdır. (Rayne ve Patel, 2001)

9.9. İşbirlikçi Robotların Güvenliği

Şekil 19'da iş birlikçi robotların güvenliği için üzerinde durulması gereken kriterler, Şekil 17'de ise insanlar ve robotların çarpışmaları durumunda ortaya çıkabilecek olası riskler yer almaktadır.

İş Birlikçi Robotların Güvenlik Araştırması – Konu Alanları			
Çarpışma ve Yaralanma Kriterleri	**Risk Değerlendirmesi**		**Risk Kontrolü**
	Robot Çarpışmasını Ölçme	**Potansiyel Çarpışma ve Risk Senaryolarını Değerlendirme**	
Çarpışma yaralanması verileri	Biofidel test kuruluşları, sensörler & enstrümanlar	Kaza/olay datası – riskler hakkındaki dersler	Robot & Hücre dizaynı & güvenlik teknolojisi
Çarpışma yaralanması verileri (ezme / kıstırma / kesme / darbe kuvvetleri)	Pratik güvenilir ölçümler	Robot çalışma hücresi ve iş tasarımı riskleri	İnsan ve & organizasyonel faktörler
Psikolojik yönleri		Şirketteki / organizasyonel seviyedeki riskler	- Düzenleme, rehberlik ve denetim - Standartlar & kılavuzlar - Güvenlik kanunu & Düzenleme - Denetim yöntemi
KKD'lerin etkileri (koruma/ zarar verme kuvveti/ güvenilirlik)		İnsan özelliklerinden ve davranışlarından kaynaklanan riskler	
Kabul edilebilirlik (Toplumsal, ulusal, endüstri sektörü, kişisel)			

Şekil 19: İş Birlikçi Robotlarda Güvenlik Araştırması İçin Taslak Yapı (HSE, 2012)



Şekil 20: İnsan-Robot Çarpışmasına Bakış (HSE, 2012)

- **İşbirlikçi Robotlarla Yaralanma Kriterleri İçin Önerilen Kuvvet Değerleri**

ISO/TS 15066 için hazırlanan Uluslararası Standardizasyon Teknik Şartnamesi taslağındaki kuvvet sınırı değerleri, bu çalışma sırasında bulunan diğer değerlerle karşılaştırıldığında oldukça güvenilir görünmektedir, ancak bu kesin olarak değerlerin güvenli ve gerçekçi olduğu anlamına gelmemelidir, zira bu alanda iyi veri elde etme ile ilgili etik ve pratik konular nedeniyle insan vücudunun tolerans sınırları hakkında herhangi bir araştırma eksikliği olmamalıdır. Kuvvet limitlerinin geliştiricileri (Almanya'daki bir araştırma enstitüsündeki çalışmaya göre) kuvvet değerlerinin mevcut verilerin kapsamlı bir incelemesine dayandığını doğrulamıştır, ancak kuvvet değerleri, önerildiği gibi ciltte derin çizikler olmaksızın ciltteki ezilmeleri sınırlasa bile, belirli bir çarpışma sıklığı için hangi yaralanma seviyelerinin kabul edilebilir olduğuna dair verilerin belirlenmesi gerekir.

Taslak ISO / TS 15066'daki yaralanma limitleri Kısaltılmış Yaralanma Ölçeği (AIS/Abbreviated Injury Scale) seviye 1'i aşmayacak Şekilde ayarlanmıştır, bu kuvvetler iskelet hasarına neden olmamalıdır.

Bununla birlikte, AIS seviye 1 yaralanma kriterlerinin bir kırık kaburganın kabul edilebilir olduğunu belirtmektedir, bu nedenle özelleştirilmiş bir yaralanma kriterlerinin ve sınıflandırma sisteminin faydalı olup olmayacağı sorusunu gündeme getireceğinden, AIS ölçek kriterleri tamamen uygun görünmemektedir.

Vücudun bazı bölgeleri için mevcut veri eksikliğine dair kanıt verildiğinde ve tüm vücut bölgeleri için değişken kaliteden bahsedildiğinde, öngörülen kuvvetlerin olası çeşitli gerçek çarpışma koşulları altında vücudun tüm alanlarını yeterince koruyup koruyamayacağına dair bazı Şüpheler vardır.

Önerilen kuvvet değerleri çeşitli gerçek kişiler üzerinde test edilmedikçe ve olası tüm değişkenleri kapsamadıkça (çarpma bölgesi, çarpma açısı, çarpma hızı vb.) öngörülemeyen farklı riskler gündeme gelecektir. Buna ek olarak, kuvvet değerlerinin her insanda aynı derecede etki olamayacağı için insanların yaralanmaya karşı toleransları ve çarpışmalardan veya düşmelerden kaçınma gibi değişkenler (reaksiyon hızları ve aşırı dengelenmekten kaçınma yetenekleri) vardır.

- **Limitleri gerçek risk değerlendirmelerine uygulamak**

Standart enstrümantasyon ve test yöntemlerine yatırım yapılmadığı takdirde, taslakta belirtilen limitlerin güvenilir bir şekilde kullanılabilmesi mümkün değildir. Zaten, ISO / TS 15066 taslağında, robot çarpışmalarını test etmek amacıyla standart ekipmanların geliştirildiği de belirtilmektedir. Standartlaştırılmış enstrümanlar kullanıma hazır olduğunda, karmaşık insan/ robot çevrimindeki uygun test noktalarından emin olmak ve daha önceden planlanmayan hareket ve çarpışmalara neden olacak yanlış hareketlerde neler yapılacağı konularındaki olasılıkları da önceden düşünmek gerekli olacaktır.

Önerilen kuvvet sınırları, insan ve robot arasında güvenli bir mesafeyi koruması gereken sistemler herhangi bir nedenle istenmeyen bir durum (temas) ortaya çıktığında uygulanacak şekilde tasarlanmıştır. Robotik sistemler, sürekli tekrar eden programlanmış bir hareket modelini hassas bir şekilde izlemede başarılıdırlar, ancak bu görevi insanlar yerine getirdikleri zaman sistem güvenliği düşüktür. Meydana gelen kazalar göstermiştir ki öngörülemeyen insan davranışı ve hareketleri, kazalara neden olan etkenlerin başında gelmektedir.

Robotik sistemin insanla arasındaki güvenli mesafeyi koruyabilmesi için, çevresindeki insanların potansiyel değişken ve güvenilir olmayan davranışlarını ve hareketlerini hassasiyetle izleyip yönetebilmesi gerekir.

Robotik sistemler insan temasından kaynaklanacak çarpışmaları önlemek için izleme ve önleme sistemleri kullanıyorsa, bu durum robota hareket zenginliği kazandıracaktır.

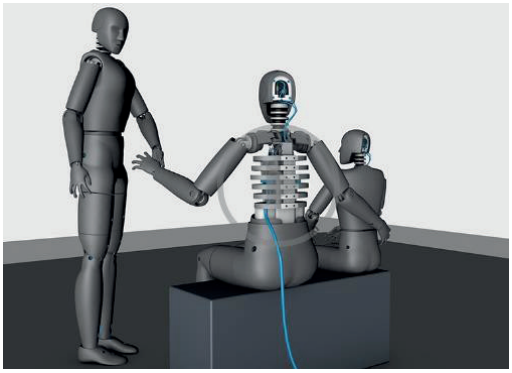
İnsan ve robotun göreceli hareketleri potansiyel olarak karmaşık ve değişken olduğundan, insan ve robotun herhangi bir çarpışmadaki temas anında koşullar da büyük bir olasılıkla karmaşık olacaktır. Bu durum da o çarpışmaya ilişkin ölçümünü ve risk değerlendirmesini bazı sistemler için karmaşık bir görev haline getirecektir. Kişi ve robot hızlarının bir arada karmaşık bir durum yarattığı durumlar için çarpışma senaryolarının tahmin edilip hazırlanması oldukça zor olacaktır.

Her ne kadar belirli robot sistemlerinin hareketi programlanmış ve normal olarak öngörülebilir olsa da farklı robot kurulumlarında meydana gelebilecek robot hareketlerinin çeşitliliği büyük ölçüde değişebilecek,

bu yüzden de bu çeşitliliği dikkate alabilecek kriterler ve ölçüm yaklaşımları bulmak zor olabilecektir. Ayrıca, bazı robot kurulumları uzun bir dizi hareket rotasıyla (örneğin bir palete istifleme) programlanmış veya değişken görevlerle geçici destek sağlayabilmeleri her alt bir proses aşamasında sık sık yeniden programlanmaları söz konusu olabilecektir. Herhangi bir kurulumda robotların hareket çeşitliliğini arttırmasının beklendiği, farklı hareketler ve görevler için, geliştirilen kolayca yeniden programlanabilen iş birlikçi robotlar, küçük ve orta ölçekli işletmelerde daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Bu yüzden de ISO'nun taslağında, mevcut ve yeni ortaya çıkan robot sistemlerinin çeşitliliğiyle başa çıkabilmek için, çeşitli sistem ve koşullarda kapsamlı denemeler yapmak gereği doğmuştur.

Özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılmak üzere, bu denemelerde yaralanma riskinin değerlendirilmesi ve gerçekçi yaralanma kriterlerini saptamak için biofidel test mankenleri geliştirilmiştir. Sonuçta ortaya çıkan test mankenleri, yalnızca otomobilin çarpma senaryolarında kullanım için geçerlidir, çünkü bunlar otomobilin çarpmalarına ilişkin ölçümleri toplamak üzere uyarlanmıştır.

Otomobil endüstrisi ile karşılaştırıldığında, iş birlikçi robot endüstrisi için pratik biyofidel test mankenleri ve yaralanma kriterleri geliştirmek, insan ve robot görevleri, hareketleri ve etkilerinin potansiyel çeşitliliği nedeniyle ek karmaşıklık gösterebilir, çünkü herhangi bir otomobil içerisinde, deney mankeni emniyet kemeri ve daha sonrasında da direksiyonda, kapılarda ve ön paneldeki hava yastıkları korunduğundan hareketleri, iş birlikçi çalışma ortamına göre, çok daha kısıtlı olacağından standartlaştırılması da kolay olacaktır.



Şekil**.21 :** Kistler, Ölçüm, Analiz, Yenilik (HSE, 2012)

Pratik bir risk değerlendirmesi yapabilmek için, robotun ve insan performansının çeşitli potansiyel arıza senaryolarının belirlenmesi ve üzerinde detaylandırılması gerekir. İşbirlikçi robotların çalışma ortamı için yapılacak risk değerlendirmesinin en zor taraflarından biri, insan/robot karmaşasında, herhangi bir çarpışma sırasında, başarısızlık senaryolarının ne olabileceğini ve başarısızlığın olasılığını, boyutlarını ve sonuçlarını nasıl belirleyeceğinizi belirlemektir.

10. KOLABORATİF ROBOTLARDA STANDARTLAR, TEKNİK ŞARTNAMELER VE MEVZUAT

İlk defa 2011 yılında gündeme gelen 4. Endüstri Devriminin, bütün dünyaya hızla yayılmasıyla beraber, geleneksel otomasyonun en belirgin temsilcilerinden olan endüstriyel robotlar da yerlerini kolaboratif robotlara bırakmaya başlamışlardır. Her ne kadar daha hızlı, seri ve kaliteli ürünlerin üretildiği tesislerde tercih edilir olmalarının yanı sıra, kolaboratif robotların, insanların çalışmasının maliyetli, yorucu, hatta tehlikeli olduğu ortamlarda kullanılan otomasyon işçileri olarak tanımlanması, kolaboratif robotları en küçük ölçekli fabrikalardan dev üretim tesislere kadar her yerde popüler hale getirmiştir. Kolaboratif robotların yalnız başlarına çalıştırılmayıp, entegre sistemin bir parçası durumuna gelmeleri, iş birlikçi ortamlarda operatörlerle birlikte çalışmaları ancak komutları tamamen otomatik ve siber ortamdan almaları, kullanımlarının optimizasyonu, fizibilitesi ve çalıştıkları iş birlikçi ortamın emniyet ve güvenlik konularının daha detaylı incelenmesini gerektirmiştir.

Şu anda, ülkemizde, kolaboratif robotlarla ilgili hazırlamış özel bir mevzuat ve standart yoktur, robotların yurt dışında üretilip getirilmesi nedeniyle, genelde bu konuda uluslararası standartlar kullanılır, ancak

robotların kendi başına bir makine değil bir üretim hattına entegre üniteler olmaları nedeniyle, Makine Emniyet Yönetmeliği'ne göre kısmen tamamlanmış makine olarak kabul edilmektedirler. Bu yüzden de bir robot kendi başına CE işareti almaya yeterli görülmemektedir, ancak robotun kullanıldığı hattın, entegrasyonu tamamlanmış bir üretim hattı haline geldikten sonra, yönetmeliklerde istenen çeşitli uyumluluk değerlerini karşılayacak durumdaysa CE işareti almaya hak kazanabilmektedir. Bunlara ek olarak bu robotların, üreticiler ve entegratörler tarafından kullanıma verilebilmeleri için, İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği ve Risk Değerlendirmesi Yönetmeliğindeki gerekliliklerı de karşılamaları gerekir.

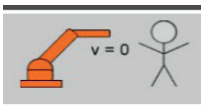
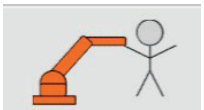
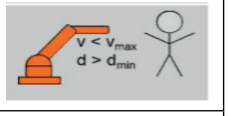
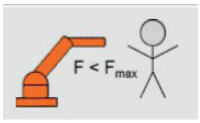
Kolaboratif robotlar, kendilerine verilen görevleri çok seri bir şekilde yapmalarının istenmesi nedeniyle ve çalışma sırasında da bazı uygulamalarda çok hızlı çalışıyor olmaları, çoğu zamanda, iş birlikçi ortamlarda operatörlerle iş birliği içerisinde olmaları yüzünden ölüme kadar varan iş kazalarına neden olabilmektedirler. Bu yüzden de hem makine tasarımında hem de makine üretime verilmeden önce, Makine Emniyet Yönetmeliği'nin de bir parçası olan, detaylı bir risk değerlendirmesi yapılması gereklidir.

10.1. Makine Emniyeti Çalışmaları:

Diğer makinelerde olduğu gibi, robotlarda da emniyet ihtiyaçlarını belirlemek için mutlaka risk değerlendirmesi yapılmalıdır. Bu risk değerlendirmesi sırasında, robotun tasarımından kullanılacağı prosese kadar tüm aşamalar teker teker ele alınır, bu aşamalar arasında olası kontrol sistemi arızalarından iş birlikçi çalışma ortamının yerlerinin varsa kaygan malzemelerden arındırılmasına kadar bütün olasılıklar ele alınır. Bu çalışmalara rehberlik sağlamak amacıyla, A tipi bir standart olan EN ISO 12100 ile başlanır. Bunun dışında, robot emniyeti ile ilgili başlıca standartlar;

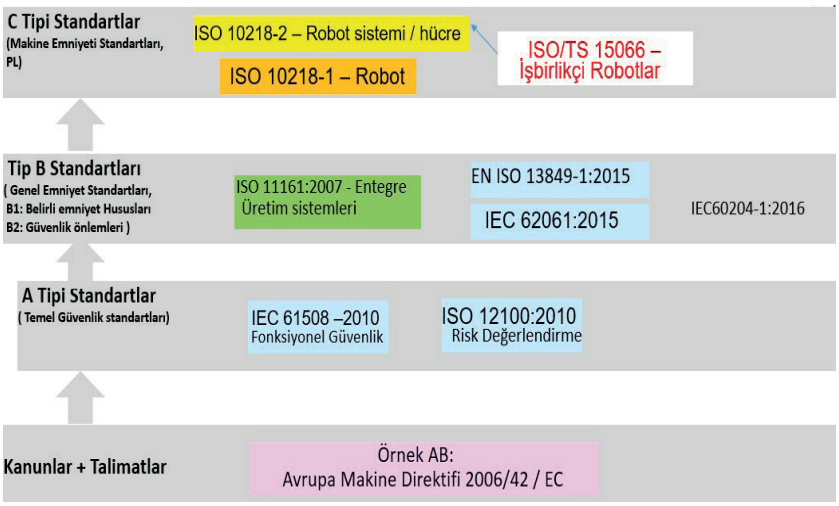
- EN ISO 10218-1 Robotlar ve Robotik Cihazlar-Endüstriyel Robotlar İçin Güvenlik Gereksinimleri-Bölüm 1: Robotlar,
- EN ISO 10218-2 Robotlar ve Robot Cihazları-Endüstriyel Ortamlar İçin Robotlar-Güvenlik Kuralları-Bölüm 1: Robot Sistemleri ve Entegrasyonu, C tipi standarttır.

Tablo 15: 10218, ISO/TS 15066 Standartlarına Göre İş Birlikçi Çalışma Türleri (Matthias, 2017)

ISO 10218-1, Fıkrası	İş Birliği Operasyon Tipleri	Risk Azaltmanın Ana Yolları	
5.10.2	Sınırlandırılmış güvenli duruş (örn. Manuel yükleme istasyonu.)	Operatör iş birlikçi çalışma alanındaysa robotun hareket etmemesi	
5.10.3	Elle yönlendirme (örn. yardımcı cihaz olarak çalıştırma.)	Robotun sadece operatörün yönlendirmesiyle hareket etmesi	
5.10.4	Hız ve mesafe izleme (örn. yedek parça konteynırları.	Robotun minimum uzaklığı sağladığında hareket etmesi	
5.10.5	Doğal tasarım veya güç ve kuvvet sınırlama	Temas olaylarında, robot yalnızca sınırlı statik ve dinamik kuvvetler vermesi	

Yukarıdaki standartlardan birincisi kendi başına çalışan endüstriyel robotlarda kullanılan standartlardır, ikincisi ise (EN ISO 10218-2) robotların entegre edildiği kolaboratif ortamlar için kullanılan dokümanlardır. Kolaboratif robotlar için genelde EN ISO 10218-2 kullanılıyor olmasına karşın, detaylar ISO/TS 15066 teknik spesifikasyonlarının bulunduğu dokümanlara başvurulur.

Tablo 16: Güvenlik ve İnsan – Robot İş Birliği: İlgili Standartlar + Direktifler (Matthias, 2017)



10.2. Kolaboratif Robot Sistemlerinde Emniyet Kuralları:

EN ISO 10218-2 standardında, her C tipi standartta olduğu gibi, B sınıfı standartlarla da ilişkilendirmeler yapılmaktadır.

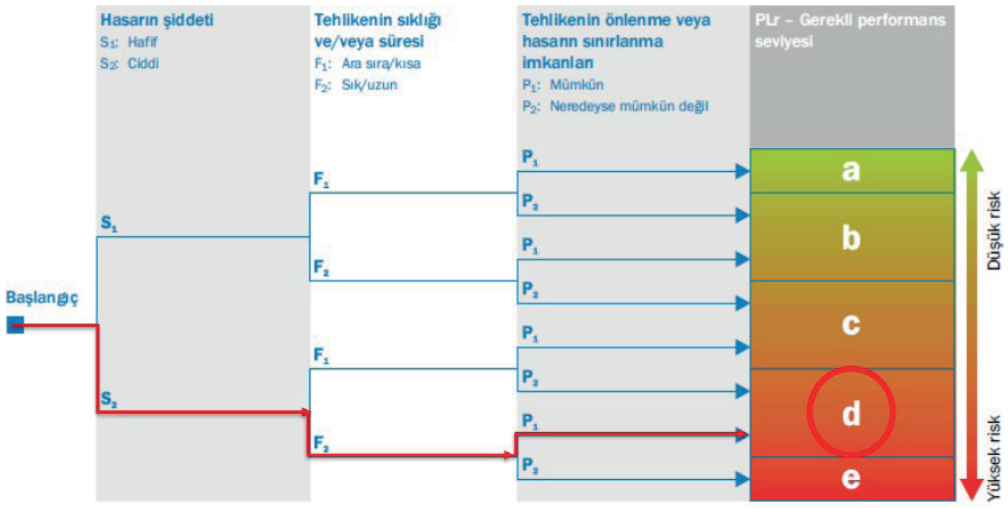
A, B veya C tipi standartlar hakkında bir bilgi vermek gerekirse;

- **A tipi standartlar**, tüm makinelere uygulanabilecek temel kavramlar, tasarım ilkeleri ve genel hususları kapsayan temel emniyet standartlarıdır,
- **B Tipi standartlar**, makinelerin geniş bir yelpazesinde kullanılabilen korumanın emniyet hususları veya bir türünü kapsayan genel emniyet standartlarıdır. Bununla birlikte, **B standardının** belirli emniyet hususları için B1 Tipi standartlar ve korumalar için B2 Tipi standartlar olmak üzere iki tipi vardır,
- **C Tipi standartlar**, belirli bir makine veya makine grubu için ayrıntılı emniyet gereksinimlerini ele alan makine emniyet standartlarıdır,

Standartlardan gelen gereklilikler 3 ana başlık altında toplanabilir;

1. Robot Sisteminin Emniyet Bileşenleriyle ve Denetim Sistemiyle İlgili Gereklilikler:

Robot sistemlerinde ve özellikle kolaboratif robotlarda, kontrol sisteminden veya yanlış seçilmiş emniyet ekipmanlarından kaynaklanan bazı tehlikeler oldukça sinsidirler, bu nedenle de bu sistemlerdeki tehlikeleri engellemek veya yok etmek için, sistemin emniyeti ile ilgili aşağıdaki ihtiyaçların optimal düzeyde saptanması gerekir,



Şekil 22: ISO 13849-1 Standardı Gerekli Performans Seviyesi (Matthias, 2017)

ISO 13849-1 Standardı: Gerekli Performans Seviyesi (PLr)

- EN ISO 13849-1 Standart'ında da belirtildiği gibi, bu gruba tanımlanmış makinelerde, a'nın en düşük e'nin ise en yüksek risk değerleri ifade ettiği Performans Seviyesi'nin (PL/ Performance Level) optimal değerlerde belirlenmesi gerekir. EN ISO 10218-2'de Kolaboratif Robotlardaki kontrol sistemlerinin PL seviyesinin d değerini karşılaması gerektiği tavsiye edilmektedir. EN ISO 10218- 2'de sistemin PL/d ve Kategori 3 gerekliliklerini karşılaması önerilmektedir. Performans seviyesinin değerlerini etkileyen faktörlerden bazıları, arıza teşhis yeteneği, sistemde bulunan bileşenlerin arızaya geçme olasılıkları ile bunların birbirleriyle olan bağlantılarını sayabiliriz. Bu faktörler, sürece ve süreci karmaşıklığına göre değişkenlik gösterebilirler, ancak değerlendirme, sürecin tehlike gamına göre en yüksek güvenilirlik amaçlanarak yapılmalıdır.
- İşyerinin durumuna göre, doğru çözünürlükte ışık perdeleri seçilmeli EN ISO 13855 Standart'ında önerildiği şekilde konumlandırılmalıdır. Konumlandırma, robotun durma süresi ve bu sürede ne kadar hareket ettiğinin belirlendiği ESPE ölçümü ile yapılır. Ancak bu ölçümler sonrasında iş birlikçi ortamın emniyetini sağlayacak ışık perdeleri yerleştirilebilir, ESPE ölçümü yapılmadan yerleştirilen ışık perdelerinden sistemin beklediği emniyet ve güveni beklemek mümkün değildir. Bu durumda çok büyük bir olasılıkla, ışık perdeleri yanlış yerlere konumlandırılacak, bunu bilmeyen ve ışık perdelerinin konumlarından emin olan operatörler de önceden kestirilemeyen iş kazalarına neden olacak ve beklemedikleri tehlikelerle karşı karşıya kalacaklardır.
- ESPE ölçümleri, ışık perdelerinde olduğu gibi, üç boyutlu emniyet kamera sistemlerinin denetlediği kolaboratif alan tarayıcılar için de yapılmalıdır,
- Işık perdelerinin tasarlanmasında ve montaj sonrasında muting (geçici olarak devre dışı bırakma) ve blanking (ışık perdesi ile korunan iş birlikçi alanının parçalarının içine opak bir malzemenin sokulmasına makinenin durmasına neden olmadan izin verilen güvenlik ışı perdelerinin yardımcı fonksiyonu) hassas bir şekilde kurgulanmalı, robot ve operatörün bulunduğu iş birlikçi ortamdaki sistemin bu alan giren çıkan malzemelerle insan uzvunu ayırt edebilecek yeteneğe sahip olduğundan emin olunmalıdır.
- İşbirlikçi ortamın izlenmesi ve denetlenmesi için seçilecek her türlü sensör veya kameranın bu alanda yapılacak işin niteliğine uygun olmasına dikkat edilmelidir. Örneğin bu alanda yapılan işte yapılan işte kıvılcım veya alev sünmesi gibi durumlar söz konusu optik izleme ve koruma bileşenlerin seçimi özenli bir şekilde yapılmalıdır.
- Kendi başlarına PL d'yi sağlayamadıkları için, izlemeli kapılarda mekanik dilli sviçler kullanılmamalıdır.
- Kontrol sistemleri, iş birlikçi alanda yapılan işin niteliğine göre seçilmekle beraber, bu seçim sırasında aynı işi yapıyor olsalar dahi işletme kültürlerindeki farklılıkların detaylı bir şekilde irdelenmesinde yarar vardır. Bazı işletmelerde, izleme kapıları ikinci bir aktüatör veya eşit/tam kodlu izleme sistemleriyle izlenirken farklı bir işletmede süreç aynı olsa dahi izleme, alan tarayıcılar, üç boyutlu emniyet kamerası veya emniyet paspasları ile gerçekleştirilmektedir.
- Robotların öğrenme sürecinde, komutlar sadece o iş işin aktifleştirilmiş el kumandaları ile yapılmalıdır ve öğrenme sırasında robotlar komutu tek bir kumandadan almalıdırlar. Eğitim sırasında denem yapmak için dahi olsa robotun hızı hiçbir zaman 250 mm/s değerini aşmamalı, herhangi bir acil durum sırasında aktif el kumandası yanı sıra, hatta acil stop düğmeleri de hazır durumda olmalıdır.

10.3. Robot Donanımı ve Çevresi ile İlgili Emniyet Gereklilikleri:

Robot donanımının sahip olması gereken minimum emniyet gerekliliklerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Robot kollarının bağlandığı ana gövde bağlantıları prosesin gerektirdiği mukavemet değerlerine sahip olmalıdır,
- Bilindiği gibi robota verilen komutlar, elektrik, vakum, hidrolik veya pnömatik yollarla yerine getirilir. Tasarım sırasında, bunların her birinin kullanım değerleri limitlere çok yakın seçilmemelidir. Robot kolunun durması sırasında operatörün yüklü robot kolunun altına girme durumu izlenmelidir.

- Proses sırasında operatörün kolaboratif çalışma alanına girmesi prosesin bir parçası ise, bu girişin mutlaka ihlal girişleri ile farklı kodlarla tanımlanmasına dikkat edilmelidir.
- Robotun çeşitli eksenlerde hareket etmesini sağlayan tahrik milleri ve aktarma ünitelerinin prosese göre seçilmesi ISO 14120 tavsiyelerine göre yapılmalıdır.
- Robot çalışırken gündeme gelebilecek, topraklama, depolanmış enerji, kablo veya panolardan kaynaklanacak istenmeyen olumsuz durumlara engel olmak için sistemde seçilen her türlü elektrikli ünite ve bileşenlerin IEC 60204-1 tavsiyelerine uygun olmasına özen gösterilmelidir,
- Robot çalışırken herhangi bir ihlal veya teknik nedenle devreye girecek olan kapamalar EN ISO 14120 Standart'ına uygun olmalıdır.

10.4. Robotun Entegre Edildiği Sistemle İlgili Olarak Alınması Gereken Diğer Önlemler:

Robotların çalışmalarına ilişkin tek bir uygulama olmadığından, risk değerlendirmesi yaparken proses detayları ile incelenmeli, çalışma ortamından da gelebilecek olası olumsuzluklar göz önüne alınarak değerlendirme tamamlanmalıdır. Bu nedenle Makine Emniyeti ile ilgili standartların bazı ek tavsiyelerini aşağıdaki gibi belirtebiliriz;

- EN ISO 14118 standartları, robot ve bulunduğu sistem üzerinde, işletme çalışanları tarafından da benimsenmiş etiketleme ve kilitleme prosedürü olması gerektiğini belirtir. Bunun için de robot ve içerisinde yer aldığı sistemin enerji noktaları ve şemaları teker teker incelenmeli, sistemin enerji değerleri açısından tehlikesiz bir durma noktasına gelen kadar nasıl bir yol izlemesi gerektiği bu prosedürlerde belirtilmelidir.
- Robotların yalnız veya iş birlikçi ortamlarda çalışması sırasında gündeme gelen en yaygın iş kazası nedenlerinden biri de operatörün veya bakım ekibinden birinin iş birlikçi alana proseste tanımlanmadığı halde kısa süreli girmesi ve emniyet kapısının da çalışanın arkasından kapanmasından kaynaklanmaktadır. Bunu önlemek için yapılacak en basit çözüm emniyet kapısının asma kilitle kontrol altına alınmasıdır. Ancak bu çözüm her uygulamada pratik olmayabilir, özellikle robotun operatörle birlikte çalışması istendiği veya giriş çıkışların proses gereği daha sık olması istenen çalışma hücrelerinde alan tarayıcıları, emniyet paspasları veya üç boyutlu güvenlik kamerası kullanmak daha uygun olacaktır.
- Sistemde teknik olarak alınan bütün önlemlere rağmen mutlaka gerekli yerlere, çalışanların rahatlıkla görebileceği şekilde, EN ISO 7010'un tavsiye ettiği, gerekirse ışıklı uyarıcı levhalar asılmalıdır,
- Çalışma ortamına her türlü uyarıcı levha asılmasına ve gerekli tüm teknolojik önlemler alınsa dahi, özellikle iş birlikçi ortama girme olasılığı olan her personelin koruyucu donanımlarını veya robota sinyal veren yeleklerini giymesi gereklidir,
- Robot veya robotların çalıştıkları ortamda, yeni değişiklikler veya iyileştirmeler yapılmasa dahi bu ortama girme olasılığı bulunanlar periyodik olarak eğitime tabi tutulmalı ve iş birlikçi alanlarda nelere dikkat etmeleri gerektiği hatırlatılmalıdır.

11. SİSTEM GÜVENLİĞİ VE RİSK DEĞERLENDİRMESİNE İLİŞKİN METODOLOJİ VE YAKLAŞIMLAR

11.1. Daha Güvenli Bir İnsan Robot Etkileşiminin Tanımına Sistemik Yaklaşım

Akıllı fabrikalar, son derece yüksek derecede esnek bir yapı kurup, üretim maliyetlerini ve üretim sürelerini kısaltarak, yeni üretim trendleriyle yüzleşmek ve başa çıkmak için süreçlerini hızlandırmalıdırlar. Bu tür sorunlar, karışık insan-robot çalışma ortamında insanlar ve robotlar arasındaki iş birliği ile ele alınabilir. Robotlar, mekânsal hassasiyet ve tekrarlanabilirliğin yanı sıra tanımlanmış kuvvetleri uygulama becerisine de sahiptirler. Öte yandan insanlar, özellikle karmaşık manipülasyon ve değişen görev gereksinimlerine uyum konusunda yeteneklidirler. Ortak paylaşılan çalışma ortamında ve sürekli insan-robot etkileşimi olan bu karmaşık senaryoda, olası yaralanmaları veya ölümcül kazaları önlemek için, güvenlik stratejileri önemli bir

gerekliliktir. Bu yaklaşım, işçiler ve robotlar arasında kontrollü ve güvenli bir ortamda etkin bir etkileşim sağlayan sürekli ve yeniden yapılandırılabilir bir ortak paylaşım senaryosunu garanti etmeyi amaçlayan birden fazla algılama kaynağını, gereksiz iletim protokollerini ve yazılım karar mekanizmalarını birleştirir ve yönetir. Ayrıca, insan-robot etkileşim senaryolarında daha güvenli bir işyeri tanımı için yeni teknolojik çözümler ve yenilikçi metodolojiler sunulmaktadır.

- **Bilimsel ve Endüstriyel Motivasyonlar:**

Karmaşık ürün ailelerinin üretimine, kısa ömürlü ve çok değişken üretim özelliklerine sahip olmaları ile karşı karşıya kalma ihtiyacı, fabrikaların hızlı bir şekilde evrilebilmesini ve yeniden yapılandırılabilmesini gerektirir. Bu yeniden yapılandırılabilir fabrikalar, içsel ve dışsal olaylara güçlü bir modülerlik ve adaptasyon sergilemelidir. Üretim dinamiklerine uygun olarak, fabrikalar içindeki işyerlerinin tasarımı mevcut sosyal ve demografik eğilimleri (örn. ortalama yaşam beklentisi ve emeklilik yaşının artması) dikkate almalıdır. Güvenlik, eğitim ve ergonomi gibi konulara dikkat etmek, fabrikanın verimliliğini ve karlılığını artırmak için de önemli bir unsur olabilir. Geleneksel olarak, fabrika tasarımı, operatörlerin ve otomatik ve/veya robotik üretim hücrelerinin rolleri ve uzmanlık alanları arasında açıkça ciddi bir ayrım yapmıştır. Bu operasyonel model tepki veremediği ve küresel pazardan kaynaklanan fırsatlara hızla uyum sağlayamadığı için günümüz koşullarına ayak uyduramamaktadır. Bu yeni senaryoda, verimli ve güvenli bir çalışma ortamı sağlayan, aynı zamanda çalışanlar için konforlu ve teşvik edici yenilikçi paradigmalar sağlamak çok önemlidir. İnsanlar ve otomatik cihazlar arasında iş birliği yapan yeni fabrikalar, kısa ömürlü ve yüksek değişkenliğe sahip ürünlerle karakterize edilen zorlu üretim senaryolarıyla baş edebilecek ve böylece üretim kapasitesinin hızlı bir şekilde uyarlanmasını ve yeni bilgilerin geliştirilmesini gerektirecektir.

Bu bölümde sunulan araştırma, özellikle insan ve robot iş birliği sistemlerini tasarlama ve uygulama konusunu ele almaktadır. Özellikle, güvenli ve verimli bir insan-robot etkileşimini garanti etmek için tasarım yöntemleri, teknolojileri ve cihazları araştırılmıştır. Bu amaçla, insan-makine etkileşimlerinin incelenmesi, dolayısıyla gelişmiş algılama sistemleri kullanılarak robotların çalışma alanlarının ve algılarının model alınması ile ilgili temaların ele alınması ve böylelikle de güvenli karma çalışma ortamları yaratılması gerekmektedir. Bir robot ile bir işçi arasında tamamen güvenli bir ortamda güçlü bir etkileşimin sağlanması, algılama teknolojisi, sistem mimarisi ve uygun bilişsel modeller dahil olmak üzere uygun bir çerçevenin geliştirilmesine dayanır. Bir sensör ağı, çevreye ilişkin olarak robota yeterli miktarda bilgi sağlamalı ve bu veriler doğru davranışları benimsemek için makine tarafından güvenilir bir şekilde iletilmeli ve yorumlanmalıdır. Ayrıca, uygun algılama teknolojisi paylaşılmalıdır ve çalışanın işyerinde rahatça çalışabilmesi için taşınabilir, hafif ve kullanımı kolay olmalıdır.

Farklı çalışma süreçleri boyunca, farklı çalışmaları değerlendirerek gerçekleştirilen sorunsuz bir montaj / sökme senaryosu yaklaşımında, özellikle demontaj işlemlerinde, yerel iş akışına göre birçok farklı görev yerine getirilmekte, genel ve yerel hareket / etkileşim planlaması için kontrol ayarları yüksek düzeyde uyarlanmaktadır. Operatör ve robotların yeteneklerini birleştirerek oluşturdukları karmaşık bir yapı içerisinde, operatörlerin kendilerine verilen değişik görevleri yaparken görevleri gereği proses alanına girip çıkmaları sırasında, robotların da güvenli davranışı, dinamik bir modifikasyon gerektirmektedir. Bu da yaralanma veya beklenmedik düzensiz robot davranışları olasılığını önler. Bu bağlamsal analiz, yüksek düzeyde uyarlanabilirlik ve proseslerin değişkenliklerini, parçaların, üretim koşullarının, spesifik mekanik parametrelerin ve daha kritik olarak insan-robot ilişkilendirme modların ve atamaların, destekli/iş birlikçi mekanik üretimini birleştirip önemli bir çalışma alanını temsil eder.

Önerilen yenilikçi yaklaşım, aynı zamanda fabrikanın uzay-zaman ortamının algılanması, temsil edilmesi ve otomatik karar ve eylem süreçlerinin uygulanması için algoritmaların ve bilişsel sistemlerin geliştirilmesiyle de karşı karşıya kalacaktır.

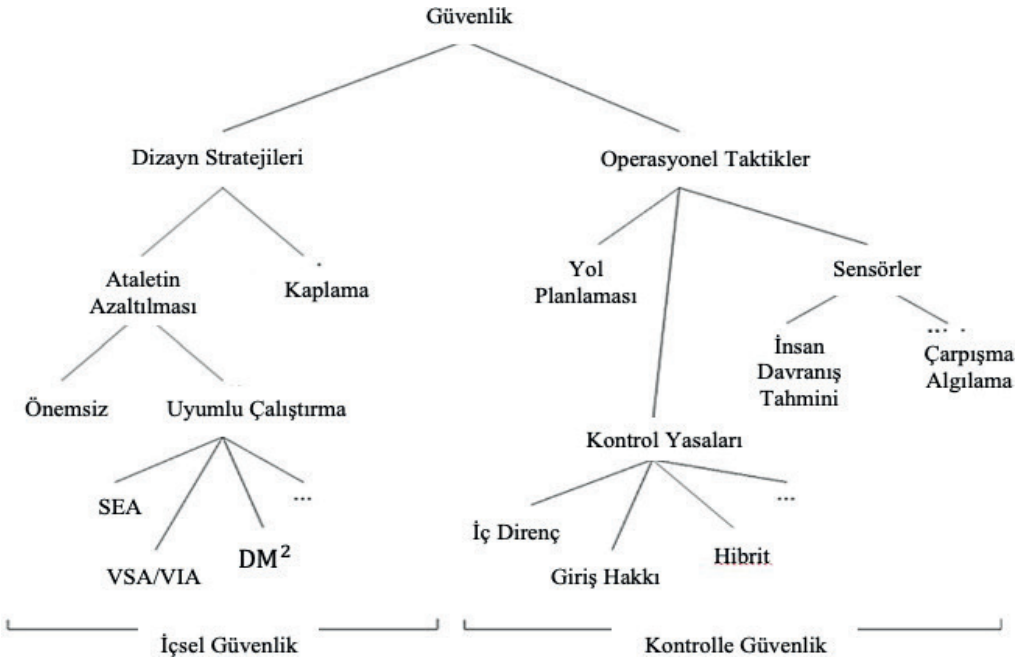
- **Güncel Teknoloji:**

Daha güvenli bir insan makine ortamının tanımlanması için sistemik bir yaklaşım oluşturmak gerekir, bu yüzden de ilk katman, konumla ilgili sürekli bir geri bildirim sağlamak amacıyla hem robot hem de çalışan üzerinde, çalışanın hareketleri ve görevi hakkında bilgi vermek amacıyla konuşlandırılan farklı sensör kaynaklarını en üst düzeye çıkarma ve çeşitlendirme olasılığına dayanır. Bununla birlikte, özellikle bir robotun çalıştırılması düşünülen bir işyerinde, iletken, yalıtım veya manyetik gibi çeşitli malzemelerin bulunması

ve bunun sonucu olarak elektromanyetik spektrumdaki anormal emilim ile ilgili sorun, robot için güvenilir bir veri kümesi oluşturulmasında hala kritik bir yönü temsil etmektedir. Aslında yıllar içinde, bu sorunların üstesinden gelmek için birçok farklı algılama çözümü önerilmiştir ve bunların çoğu çoklu kamera ve mikrofon kullanımına dayanmaktadır. Bu teknolojiler ilişkili kameranın görüş hattı ile sınırlı veya robot için yorumlanması zor sinyaller ürettiklerinden olası başka bir çözüm, işçi ile robot arasındaki özel çalışma mesafesini (kısa ve uzun menzilli) dikkate alır. Uzun menzilli algılama teknolojisi durumunda, radyo frekansı tanımlama teknolojisi (RFID/Radio-Frequency Identification Technology) son zamanlarda üretim maliyetleri, güç tüketimi, sensörlerin giyilebilirliği, tepki süresi vb. Çalışan akıllı giysilerdeki (eldiven, kıyafet, vb.) gömülü etiketler, çalışanın çalışmasını engellemeden izlenen bir hareket hakkında güvenilir bir bilgi sağlayabilir. Robotlar, RFID algılama teknolojisinden gelen sinyalleri, işçinin hareketlerini uygun şekilde yorumlamak ve sonuç olarak davranışlarını uyarlamak için kullanabilir. Bununla birlikte, RFID teknolojisinde, belirli bir açıda sinyal algılamasından ve etiket ile yerelleştirme işlemine katılan okuyucu arasındaki belirli mesafeden farklı sorunlar ortaya çıkabilir ve sinyal robot tarafından yanlış yorumlanabilir.

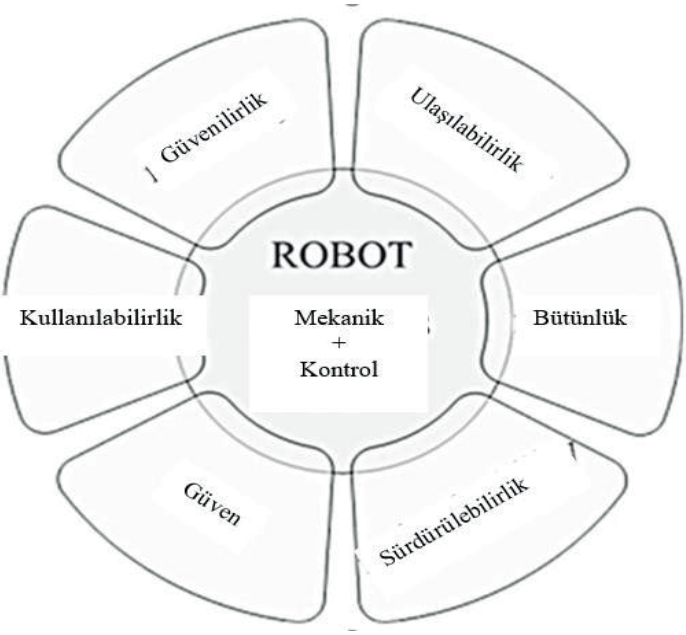
Tüm algılama ağları tarafından üretilen verileri düzgün bir şekilde yönetmek ve iletmek için sağlam bir kablosuz altyapının benimsenmesi gerekir. Bu durumda, tanımlama / tanıma sistemi, güvenli kablosuz kanalların ve güvenli olmayan düşük güçlü kablosuz iletişim protokollerinin birleşimini (The Ultra-low power Bluetooth and Zigbee) kullanarak operatörün robot alanındaki konumunu ve konumunu tanımlar. Bu süreç hem robot alanındaki erişim noktaları ile doğrudan operatör gövdesindeki birimler arasındaki iletişim bağlantısının varlığını elde ederek hem de operatör ünitesinden gelen sinyal alma gücüne dayalı olarak operatörün coğrafi referanslı konumunu içeren bir algoritma uygulayarak çalışır. İletişimin fiziksel karakteristikleri üzerinde yapılacak ayrıntılı bir analiz, robot ve birlikte çalışacağı operatör arasında güvenilir bir veri alışverişini sağlamak için, güç tüketimi, güç yönetimi, güç tanıma sistemlerinin kolaylığı, alıcı/verici entegrasyonu, kullanılabilirlik ve sağlamlık gibi hususları göz önünde bulundurmalıdır.

Özellikle manuel görevlerin robotlar tarafından desteklenebildiği esnek / yeniden düzenlenebilir üretim, yapılandırılmamış dinamik ortamlarda güvenli bir davranışı garanti edebilen iş birlikçi robotik metodolojiler tarafından dikkate değer şekilde desteklenmektedir. Bu görevler için özellikle fiziksel İnsan-Robot Etkileşimi (pHRI/ Phsical Human Robot Interactions) için tasarlanmış hafif çözümler kullanılabilir. Yıllarca gerek robot üreticileri ve gerekse akademik çevreler, robot ve birlikte çalıştığı operatörler arasında güvenilir bir iş birliği ortamı oluşturmak için büyük çaba sarf etmişlerdir. Küçükten büyük manipülatörlüye kadar (örn; antropomorfik, kartezyen, paralelm vb.) endüstriyel robotlar, hala tasarımda veya kontrol edilerek güvenlik özelliklerini geniş ölçüde göstermez (Şekil 22). Bununla birlikte, bu tür platformların mutlaka hem makine hem de tesis düzeyinde güvenli kurulumlara entegre edilmesi gerekir.



Şekil 23: Robot Sistemleri Güvenliğinde Donanım ve Tasarım Stratejileri Haritası (Pecora ve diğerleri, 2019)

Normal olarak, en son standartlar insan-robot iş birliği modlarını tanımlar ve fonksiyonel güvenlik kavramını tamamen kapsayan makine ve robotikteki konsolide standartlaştırma girişimlerinin üzerine uygulanır. Güvenlik açıkça prosedürel, mantıksal ve teknolojik yönleri donanım, algoritmalar ve ağlar arasında yayılmış entegre bir kavramdır. Cihazların güvenlik seçenekleri, konsolide düzenlemeler ve entegrasyon açısından kısıtlı ihtiyaçlar nedeniyle, her şeyden önce teknoloji tedarikçileri tarafından kendiliğinden ele alınanlar arasında, güvenlik sertifikasyon derecesini ciddi, ölçüde engelleyebilir.



Şekil 24: Güvenilirlik Tablosu (Pecora ve diğerleri, 2019a)

Robotikteki etkileşim kavramı, uzak fonksiyonel etkileşimden yakın temasa kadar farklı uzamsal koşulları kapsayabilir. Temassız etkileşim, görev iş birliğinde ve aynı çalışma alanının aynı anda ziyaret edildiği senaryolarda yer almaktadır. Temaslı etkileşim planlı veya kazara oluşabilir.

Öncelikle, uyumlu kontrollerin önemli bir ayar sınıfını temsil ettiği manipülasyon, taşıma, montaj vb. gibi düşük güçlü görevlerin çoğunda yer alır. İkincisi, emniyetin normatif gereklilikleri, çok geniş ölçekli çarpışma önleme algoritmaları vb. ile bağlantılı olarak tartışılması ve resmileştirilmesi gereken ana konu olarak kabul edilmiştir.

Tüm etkileşim seviyelerinde iş birliği yapan robotlar şeffaf olmalı, doğal olarak etkileşen bir uyum sağlamalı, tüm hantal yapılandırmaları veya erişim modlarını, düzensiz hareketler veya rotaları yok saymalıdır. Bu davranış, etkileşim sırasında kolaylık, güven ve kullanıcıya güvenme desteği olarak kabul edilen güvenilirlik kavramı ile formüle edilebilir. Bu tür geleneksel soyut bir kavram altında, güvenilirlik, robot kontrolü ve sonuçta ortaya çıkan davranış üzerinde büyük bir etkiye sahip olan, açıkça tanımlanmış bir dizi ham bilgiyi içerir. (Şekil 24)

Kullanıcı güveni, aşağıdaki etkenlere bağlıdır;

» Öğrenmenin ve/veya robot hareketini belirlemenin hissini, rahatlığını ve kolaylığının ölçebildiği kullanılabilirlik,

» Esas olarak hizmetin sürekliliğini ele alan nadiren beklenmeyen istisnaları atarak veya nadiren hatalar sunan, güvenilirlik,

» Bu tür bir hizmetin hazır olduğunu hesaba katan, kullanılabilirlik,

» Sistem değişikliğinden ve uygunsuz değişikliklerin yokluğundan kurtulabilme yeteneği olan bakım ve bütünlük,

» Daha önce de tartışılan güvenlik,

» Güvenilirlik alt özelliklerinin çoğu, tüm sistem düzeyinde bir değiş tokuş olarak yerine getirilebilir.

11.2. Kolaboratif Çalışma Tesisi İçin Risk Değerlendirmesi ve İş Güvenliği Analiz Yaklaşımı

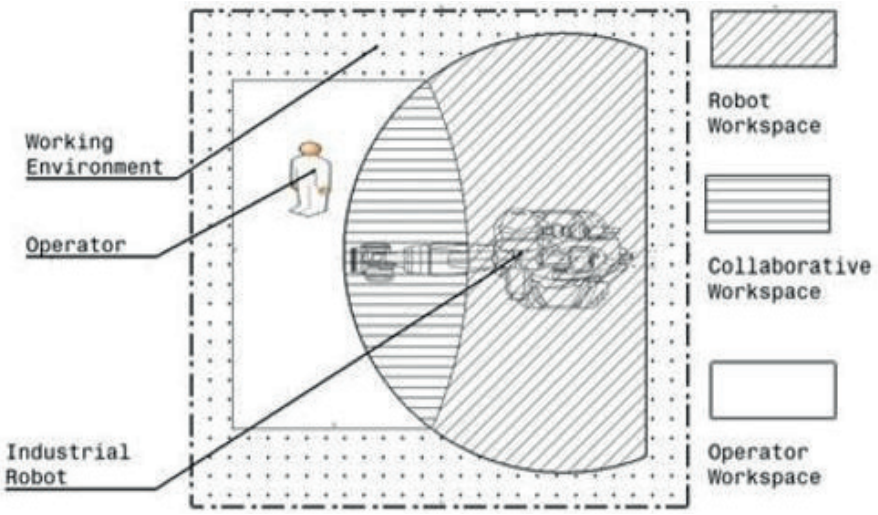
Operatör ve robotların kendilerine verilen görevleri birlikte gerçekleştirebilmek amacıyla görev süresince iş birliği yaptıkları tanımlanmış bölgenin güvenliği son derece önemlidir. Bu bölgenin güvenli olması ve çalışma verimi açısından yüksek bir performans göstermesinin üç önemi mevcuttur.

- Piyasadaki dalgalanmalara uyum sağlama yeteneği,
- Verimin artırılması,
- Ergonomik ve teknik olarak çalışma koşullarını geliştirmesi ve iş kazası risklerini azaltması,

İş birlikçi çalışma ortamlarında, robotun herhangi bir nedenle yapacağı yanlış bir hareketten dolayı, operatöre çarpması ciddi bir yaralanmaya neden olabileceği için, operatörün güvenliği önemli bir endişe kaynağı olarak karşımıza çıkar. Uluslararası güvenlik standartlarına göre, risk değerlendirmesi, tehlikeli çalışma ortamını anlama ve ortadan kaldırma anlamında atılması gereken ilk adımdır. İşbirlikçi çalışma ortamı olmayan, operatörlerle robotların aynı belirlenmiş alanlarda çalışmadığı ortamlar için birçok risk değerlendirmesi yapılmıştır. Bu alanlarda robotlar kendileri için belirlenmiş alanlarda otomatik modda çalışırlar, çalışma alanına istenmeyen giriş çıkışlar olması durumunda da robot, durumu hissederek durma yeteneğine sahiptir. Buralarda genellikle, çarpışma olasılığını ortadan kaldırarak operatörün güvenliğini sağlamak için güvenlik çitleri gibi fiziksel engeller kullanılmıştır.

İş birlikçi robot sisteminin en önemli amaçlarından biri de robotlar ve kendileri ile birlikte çalışanlar arasında daha yakın bir etkileşim sağlayabilmek için bu engelleri kaldırmaktır. Bu nedenle de risk değerlendirmesi yapılırken, çalışma alanının katılımcılarının robot ve operatör olduğunu varsayarak hem operatörün güvenliği hem de robotun verimliliği ve robotun olası kaza nedenlerini göz önüne almak gerekir. Öncelikle çalışan güvenliğine odaklanan uluslararası güvenlik standartları, tanımlanmış iş birlikçi çalışma alanının sadece robotla birlikte çalışan operatöre ait olduğunu belirtir ve risk değerlendirmesinin buna göre yapılmasını önerir. Güvenlik standartları Güvenliğin sağlanması ve robot/operatör görev paylaşımını sağlamak için robotla operatörün iş birlikçi çalışmasının sürekli olarak izlenmesini ön planda tutar, bu yüzden de çalışma alanı görüntüleme sistemi ve yakınlık sensörü (proximity switch) gibi güvenlik elemanlarıyla izlenir. Bu elemanlar seçilmeden ve kurulmadan önce, sistematik bir risk değerlendirmesi uygun cihazların seçilmesini ve ilgili prosedürlerin uygulanmasını sağlayacaktır.

Çarpışmalar önemli bir yaralanma ve hasar nedeni olduğundan, risk değerlendirmesi sırasında iş birlikçi alanda, robot ve operatörün yaptığı işler, bir metodoloji çerçevesinde ele alınır, alt görevler belirlenir ve ortaya çıkan risklerle ve bunlara ilişkin çözüm önerileri belirlenir. (Şekil 25)



Şekil **25:** İş Birlikçi Çalışma Hücresinin Üç Katılımcısı Arasındaki Etkileşimin Temsili Şeması (Gopinath ve Johansen, 2016)

Kolaboratif robot sistemlerinde risk analizi yapmak için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu analizler arasında en çok tercih edilenlerden ikisi FTA (Fault Tree Analysis- Hata Ağacı Analizi) ve FMEA (Failure Mode and Effect Analysis – Hata Türü ve Etkileri Analizi)'dir. Bazı kuruluşlar, operatör görevlerinin göz önünde bulundurulması gereken uygulama alanlarında risk değerlendirmesi yapmak için İş Güvenliği Analizinin yapılmasının daha uygun olabileceğini belirtirler. Robotların neden olduğu hatalardan kaynaklanabilecek kazaları değerlendirebilmek için, Kantitatif Hata Ağacı Analizi, bu hatalara ilişkin olası nedenler hakkındaki bilgilere ihtiyaç duyar. Kalitatif FMEA ise, olası tüm arızaları (ve etkilerini) anlamak ve belgelemek için kullanılır, böylece arıza kaynaklarını azaltmak için düzeltici eylemler önerebilir. FMEA, her arıza modunu ve etkisini, arıza olasılığı ve olası çözümleri ile birlikte belgelemeye çalışır.

Kolaboratif Çalışma (Hücresi) Alanı:

Belirlenmiş bir alanda, tanımlanmış bir görevi yapmak üzere, görevlendirilmiş katılımcıların her birinin, kendileri için tanımlanmış görevleri yerine getirdikleri bölüme Kolaboratif Çalışma Hücresi adı veriyoruz. Bu hücrenin tanımlamasının temel amacı, görevler ve bu tanımlanmış bu bölgede çalışanların etkileşimlerinin haritalanmasıdır.

- **Kolaboratif Çalışma Hücresindeki Çalışma Alanı:** Uluslararası standartlar bu hücrede üç tane çalışma alanı tanımlamaktadırlar:

» **Robotun Çalışma Alanı:** Robot çalışma alanında, endüstriyel bir robot nominal hızda otomatik modda hareket edecek şekilde programlanır bu alana izinsiz bir giriş durumunda robot durmalıdır. Geleneksel olarak, robot çalışma alanı fiziksel çitler veya güvenlik önlemleri kullanılarak dış etkileşimden kapatılır.

» **Operatörün Çalışma Alanı:** Operatöre görevini yapmak için atanan bu alan, operatör çalışma alanı olarak adlandırılır, güvenlik açısından sürekli izlenen bu bölümde, operatörün robota yaklaşması durumunda robotun hızı düşer, tanımlanan sınır yaklaşma mesafesini de geçerse robot otomatik olarak durur.

» **Kolaboratif (İş birlikçi)** Çalışma **Alanı:** Bu alan robotla operatörün birlikte çalıştıkları alandır. Bu ortak çalışma alanı, robotun ve operatörün birlikte çalışmasına izin verir, bu da robotun ve operatörün ortak bir çalışma alanını kendilerine verilen görevler doğrultusunda paylaştıkları anlamına gelir. Robot, ortak çalışma alanı içinde otomatik modda hareket ettirilebilse de robotun hızı sınırlıdır. Bu alanda robot/insan kombinasyonu öngörüldüğü için, bu ortak çalışmada, her ikisinin de yapılması gereken iş konusunda tanımlanan ortak görevlerinin olduğunu bilmeleri gerekir.

İş birlikçi bir çalışma hücresinin üç tane katılımcısı vardır;

- **Endüstriyel Robot Sistemi:** Güvenlik standartlarında tanımlanan endüstriyel robot sisteminde, uyumlu bir şekilde çalışmak üzere tasarlanmış manipülatör, uç elemanı ve harici sensör sistemi bulunur. Bu parçalar ilgili güvenlik gerekliliklerine uygun olmalı ve iş birliği modunda operatörlerle güvenli çalışacak şekilde tasarlanmalıdır.
- **Operatör**: Operatör, robot hücresini paylaşması beklenen eğitimli personeldir, ancak çalışma hücresinin yakınlarında bulunan diğer personeli de içerebilir. Acil duruşlarda, çalışma hücresinin sorumluluğunu almaları ve sistemi durdurmaları beklenir.
- **Çalışma Ortamı:** Harici müdahaleler yaralanmaya veya üretim gecikmesine neden olabileceğinden, çalışma ortamı da robotik güvenlik standartlarını karşılamalıdır. Çalışma ortamında, robot hücresinin amaçlanan işlevselliğine müdahale edebilen ekipmanlar bulunur.

Kolaboratif Çalışma Hücresi İçin İŞ Güvenliği Analizi (JSA):

Risk analizi, operatör için güvenli ve üretken bir robotik çalışma hücresinin tasarımını değerlendirmek için kullanılabilir. Bu nedenle, çalışma hücresinin temel işlevselliği sağlanıp katılımcıların görevleri tanımlandıktan sonra, sürekli yinelenen bir sürecin başlayacağı anlaşılmalıdır.

Katılımcılar (robot ve operatör/ler) ve görevleri arasındaki etkileşimleri tanımlayan çalışma süreci şu şekilde tanımlanabilir;

1. Üretim hücresinin gerçekleştireceği fonksiyonlar, ayrık ve sıralı alt görevlere dönüştürülebilir. Her bir alt görev, bunları ayrılan bir çalışma alanı içinde gerçekleştirecek katılımcılara tanımlanır. Böylece ilk adımda, robot ve operatörün görevleri alt görevlere bölünür ve her bir alt görev için katılımcı ve çalışma alanı oluşturulur.

2. (JAS) İş Güvenliği Analizi, kritik alt görevlerin tehlikeler açısından analiz edilmesini önerir. İkinci adımda amaç, katılımcıların her birine tahsis edilen alt görevleri analiz etmektir. Olası tüm tehlikeleri tahmin etmek için, her bir katılımcı ve katılımcıların birbirleriyle olan kritik ilişkileri analiz edilir. Örneğin T1, bir operatör tarafından gerçekleştirilecek bir alt görevse, analiz, T1'in robotun yanı sıra Çalışma Ortamı üzerindeki etkileşimini de saptayıp incelemelidir.

3. Bu adımda ise, her bir risk için, olası risk oluşum faktörünün neden olabileceği tehlikeler belgelenmelidir. Bu risklerin olası etkileri, riskleri ortadan kaldırma çözümlerinin hesaplanmasında kullanılacaktır. Olası çözümler, robot sisteminin tasarımında kullanılacak olan, çalışma hücresi izleme çözümleri, tasarım güvenliği ve emniyet standartlarıdır.

11.3. Üretim Ortamları İçin İşbirlikçi Robotik Siber Fiziksel Sistemlerin Geliştirilmesi Metodolojisi

Bilindiği gibi Endüstri 4.0'daki temel özellik, çok küçük lotlardaki ürünlerdeki, müşterinin gerçek zamanlı değişken talebini karşılamaktır. Bu da robotun çalışacağı üretim veya montaj hattında, kurulum, ayar ve hattın yeniden yapılandırılması için zaman kaybetmeden, müşterinin birçok talebini karşılama imkânı verecektir. Akıllı üretim uygulaması, katılan her bir bileşenin belirli bir IP adresine sahip olduğu nesnelerin interneti (IoT) kavramı ile gerçekleşebilir. IoT'de büyük verilerin mevcut olması nedeniyle, kestirimci bakım, tasarımın güvenilir olması ve uyarlamalı lojistik gibi parametreler hassas bir Şekilde tahmin edilebilir.

Endüstri 4.0 kapsamında robotlardan oluşan bir akıllı fabrikanın tasarımı, gelecekteki üretkenlik ve esneklik düşünülerek yapılır.

Bununla başa çıkmak için de robotlar gelecekteki üretimdeki iş paylaşımında işlerin büyük bir çoğunluğunu üstlenirler, insanlar ise ya denetim rolündedirler ya da şimdilik, robotların eğitilemediği görevler için çalışma alanında görevlendirilirler. Akıllı robotun çalışma alanında veya yakınında sürekli insan varlığı, güvenlik konusunda bir endişeye veya riske yol açabilir. Geleneksel yaklaşımda, operatörlerin, robotun çalışma alanını ihlali durumunda, makinedeki kontrol sistemi, makinenin tam olarak durmasını ve operatörün güvenliği sağlayarak uzun süre robotun hamlesine maruz kalmasını önler. Üretim hızını düşüren bu durum hem üretimde durmalara hem de sürecin kaldığı yerden tekrar başlatılabilmesini sağlamak için süreci yeniden tanımlama gereksinimin ortaya çıkmasına neden olur. Bu konudaki en son yaklaşım, robotun ve operatörlerin birlikte var olabileceği ve güvenli bir şekilde iş birliği yapabileceği robotik bir ortamı uygulamaya sokabilmektir. Bu uygulamalarda, robotlar aynı çalışma alanını iş birlikçi meslektaşlarıyla paylaşır ve hammadde elleçleme, montaj ve ambalajlama gibi çeşitli görevleri yerine getirirler.

Bu durum, günümüz üreticileri için de çok çekici gelmekte, maliyet, kalite ve iş kazalarının azalması gibi avantajları nedeniyle, şu anda çeşitli endüstri kollarında çalışan bir milyonu aşkın endüstriyel robot büyük bir hızla görevlerini kolaboratif (iş birlikçi) robotlara terk etmektedir. Büyük finansal yükler getireceğinden, bütün bu robotların iş birlikçi sisteme dönüşmesi yakın bir zamanda oldukça zor görünmektedir. Günümüzde geleneksel endüstriyel robotların kolaboratif robotlara çevrilmesindeki en popüler yaklaşım, robotlarla operatörlerin birlikte çalıştıkları alanlara sensörler yerleştirerek ve iş birlikçi operatörlerin hareketlerini izleyerek iş birlikçi çalışma alanını daha akıllı duruma getirmektir. Bu yöntemle birçok endüstriyel robot, iş birlikçi robot olarak operatörlerle birlikte çalışabilecek duruma gelecektir. Böylece birçok üretici büyük yatırımlar yapmadan, daha makul harcamalarla endüstriyel robotlarını daha güvenli iş birlikçi ortamlarda kullanma imkanları bulacaklardır.

Bu tür bir iş birlikçi ortam oluşturabilmek için, sistemin tüm elektronik, güvenlik, emniyet ve sensör ihtiyaçlarını karşılayabilecek bir siber fiziksel sistem (CPS/Cyber Physical System) oluşturulmalıdır.

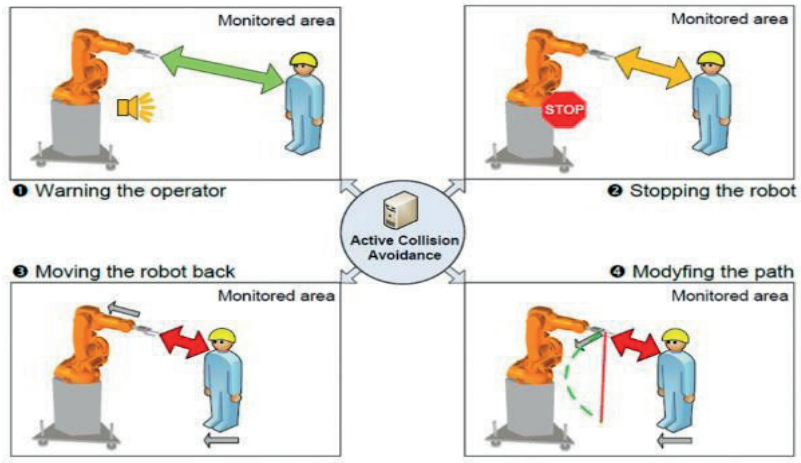
Bu yolla, iş güvenliği açısından sıkıntı yaratabilecek 15 kg ağırlığında parçaların bile iş birlikçi ortamlarda güvenli bir şekilde monte edilmesi, taşınabilmesi, ambalajlanması vb. mümkün olabilecektir. Operatör ile iş birlikçi robot arasındaki gerçek senaryoyu andıran sanal bir parça, robot ile operatör arasındaki uzaklığı hesaplamak için kullanılır. Gerçek zamanlı mesafe hesaplamasına dayanarak, harici bir modül tarafından, robot denetleyicisi sistematik olarak hızı azaltmakla görevlendirilir.

İşbirlikçi Robot Teknolojisindeki Son Gelişmeler:

İşbirlikçi robotların geliştirilmesinde, son yirmi yılda yapay zekâ, insansı robot ve dış gövdede bugüne kadar ki gelişimler kullanılmıştır. Bu tür insansı robotların temel amacı, engelli ve yaşlıların ihtiyaçlarını karşılamak için ev ve tıbbi uygulamalarda çalışmaktır. Endüstriyel iş birlikçi uygulamalarda robotların kendi başlarına çalışmaları yerine, endüstriyel bir ortamda insanlarla birlikte güvenli bir şekilde çalışmaları esas alınmıştır. Hızla gelişmekte ve yaygınlaşmakta olan iş birlikçi robot sektörünün 2020 yılı sonunda 2 milyar $'ı aşacağı belirtilmektedir. Bu büyüme daha çok, küçük ve orta ölçekli montaj ve elektronik malzeme üreticilerinde gerçekleşmektedir. Bu tür esnek üretim teknolojileri arayan endüstriler için, robot üreticileri, küçük ve orta boy ürün işleme ve diğer işlemler için uygun iş birlikçi robot tasarımları geliştirmektedirler.

Şekil 26'te değişik açılarda hareket edebilen yetenekli robotlar yer almaktadır.

Çoğu durumda, robot ucundaki efektör, en gelişmiş iş birlikçi robotlardaki yinelebilirlik yeteneğini gösterir. Tüm bu robotlar, eklemlerdeki iç kuvvet sensörleri ile geliştirildiğinden kolaboratif alanda operatörlerle hafif bir temas olması durumunda bile rahatlıkla çalışabilirler. Güvenli bir izlenebilirlik sağlamak için robot kolları ve uçları, yüksek çözünürlüklü hatta 3D kameralarla, donatılmıştır. Bazı uygulamalarda, işi tamamlamak için robotun ihtiyaç duyduğu konumlar için hızlı tanıma ve izleme için görsel sensörler kullanılır. Tüm robotlar, kendilerine verilecek yeni görev için eğitilebilecek şekilde programlanabilir uyumluluğa sahiptirler. Bu robotların taşıma kapasiteleri, yaygın olarak 0,5 ile 14 kg arasındadır. Çarpışmayı anında tespit ve çalışma alanının ihlali durumunda anında robot kolunun hızının azaltılması kolaboratif robotlarda yaygın olarak kullanılan teknoloji özellikleridir.



Şekil 26: Aktif Çarpışmadan Kaçınma (Gopinath ve Johansen, 2016)

Genel olarak incelediğimiz zaman, endüstride ve hizmet sektöründe geleneksel endüstriyel robotlar yerine çoğunlukla kolaboratif robotların tercih edildiğini kolaylıkla görülebilir. Ayrıca, bu son gelişmeler insan-robot iş birliğinde (HRC) küçük ila orta ölçekli yük taşıma proseslerinde, özellikle iş sağlığı ve güvenliğinin ön planda geldiği uygulamalarda kolaboratif robotlara çok rağbet edildiğini izleyebiliriz. Bu uygulamaları, önümüzdeki yıllarda daha ağır parçaların kolaboratif ortamlarda montajı veya ambalajlanması işlerinin bir ön hazırlığı olarak da nitelendirebiliriz. Bazı robot üreticileri, ISO 10218-1:2011 ve performans seviyesi (PL) (d) güvenlik kurallarına göre 35 kg yük taşıma kapasitesi olan iş birlikçi robotları 2021 başında kullanıma verebilecekleri belirtilmektedir (FANUC).

Bu aşamada üreticilerin iki konuya çok dikkat etmeleri gerekmektedir, bunlardan birincisi, iş birliği planlarını tanımlamak ve resmi bir derecelendirme sistemi oluşturmak; ikincisi ise, endüstriyel senaryolarda insan-robot iş birliği için bir Siber Fiziksel Sistem (CPS/Cyber Physical System) tanımlamak ve tanımlanmış bir endüstriyel senaryoda sensör seviyesine kadar en uygun çözümlere ulaşabilecek bir metodoloji geliştirmektir. CPS yöntemiyle de hem geleneksel robotlardan kolaboratif robotlara geçilmiş hem de kolaboratif robotlarla daha ağır iş parçalarının proseste yer alma imkânı olacaktır.

Böylelikle kolaboratif robotlar için donanımlı bir dış ortam için daha ayrıntılı hususlar, istenen senaryo gereksinimi ve iş birliği düzeyine göre önceden tanımlanmış güvenli CPS'den türetilebilecektir. Bu konudaki,

yaklaşım, uygulanan robot güvenlik Şemalarını inceleyerek ve sonra etkili iş birliği şemalarını geliştirerek başlatılır. İŞ birliği düzenleri sıralandığında, endüstriyel iş birliği senaryolarının seçilen birkaç sensör örneği ile resmi olarak sınıflandırılması için bazı temel göstergeler sunulur. Belirli bir endüstriyel senaryo için sensör seviyesi gereksinimlerini tanımlamak için bir iş birliği örneği varsayımı hazırlanmalıdır.

İnsan Robot İşbirliğinde CPS:

Önerilen yaklaşım güvenlik çitleri gibi pasif güvenlik mekanizmaları olmadan güvenli bir HRC (Human Robot Collaboration) iş birlikçi ortam yaratmaktır. Bunu gerçekleştirmek için iş birlikçi bir Siber Fiziksel Sistem (CPS/Cyber Physical System) veya İş birlikçi Robotik Siber Fiziksel Sistem (CRCPS/Collaborative Robotic Cyber-Physical System) için ek güvenlik ve koruma önlemlerinin uygulanması gerekir. Bu güvenlik ve emniyet (koruma) gereksinimleri, verimliliği artırmak, çalışma alanındaki insan/lar ile robot/lar arasındaki etkileşim düzeyine bağlıdır. Güvenlik ayrıca emniyetle yakından ilişkilidir, çünkü bu sistem düzeyi özelliklerinin her ikisinin de rekabetçi olarak çok iyi değerlendirilmesi gerekir. Aslında, CRCPS tasarımındaki yaklaşım, endüstriyel faaliyetlerin tasarımı, denetimi ve risk değerlendirmesi sırasındaki olası güvenlik ve emniyete ilişkin endişeleri beraber ele almaktır.

CPS, gerçek değişkenlerin değişen durumunu kontrol etmek ve algılamak için sayısal ve fiziksel sistemlerin entegre edildiği akıllı bir sistemdir.

Bu tür CPS'nin başarısı, sensör ağı ile güvenilir ve emniyetli iletişim teknolojilerine dayanır. CPS'de, tüm fonksiyonel bileşenler (komponentler) modüller halindedir ve üretim hattında veya akıllı fabrikada birbirleriyle kablosuz olarak iletişim halindedir. Hatta üretim hattındaki hammadde ve makineler bile insan-makine etkileşim sistemleri (HMI/ Human Machine Interaction System) aracılığıyla işçilerle iş birliği içinde olan ağa bağlanır. Özellikle imalat ve işleme sektöründe CPS, elektronik, bilgi işlem, iletişim, algılama, çalıştırma veya robot, gömülü sistemler ve sensör ağlarından oluşabilir. HMI teknolojileri ve diğer tipik CPS modüllerine ek olarak, montaj işlerinde CPS, üretim sisteminin esnekliği, üretim senaryosu ve değişen montaj görevlerinin uyarlanabilirliği gibi diğer kaynaklara da ihtiyaç duyar. HRC'deki uygulama için, tam ölçekli bir CPS dağıtımı insanı sistemin doğal bir parçası olarak açıklar ve hesapların ona göre yapılmasını öngörür.

- İnsan bileşeni (HC/ Human Component),
- Fiziksel bileşen (PC/ Physical Component),
- Hesaplama bileşeni (CC/ Computational Component) üç ana entegre varlığı temsil eder

Bu üç bileşen arasındaki etkileşimin kalitesi, etkinleştirici teknolojilerinin güvenlik düzeylerine bağlıdır. HC, farklı adaptasyon teknolojileri ile iyi bağlanmıştır, örneğin; doğru insan pozisyonu izleme teknolojisi CRCPS'de temel adaptördür.

CRCPS, kompozit elemanlar arasındaki sınırları ortadan kaldırdığı ve operasyonel etkileşimleri tercih ettiği için oldukça otomatik bir sistemdir.

İnsanların görme, akustik ve dokunma duyularına hitap eden çeşitli insan Makine Arayüzü (Human Machine Interface/HMI) teknolojileri mevcuttur. Önerilen CRCPS'te, çalışanların (operatörlerin) algılanması, izlenmesi ve hareketlerinin doğrulanması için görme sistemini kullanabilir. Robotlar insanlardan gelen ses kontrolü gibi akustik sinyallerle kumanda edilebildiği gibi, çeşitli sensörler ve aktüatörler aracılığı ile İnsan Bileşeni (Human Component/ HC), Siber Bileşeni (Cyber Component/ CC) ve Fiziki Bileşen (Physical Component/PC) arasındaki etkileşimi de rahatlıkla sağlayabilir. Bu role katkıda bulunan bileşenler arasında gösterilen standart etkileşimler vardır. Genelde sistemde kullanılan bağdaştırıcılar (adaptör) senaryoya göre, tak / çalıştır aygıtlar olarak görev yaparlar. Bunun dışında, senaryo gereği, standart bileşenler ve CRCPS'deki adaptörlerle isteğe bağlı etkileşimler de sağlanabilir. CRCPS, CPS'nin bir uzantısıdır ve bu nedenle bir CPS'nin sistem düzeyi özelliklerine uyumu göstermelidir. Bunun için de CRCPS kendi içinde kararlı olmalı ve bütünlük özellikleri göstermeli, komutları kesin olmalıdır. Aynı zamanda, CRCPS uyarlanabilir, otonom ve yüksek derecede otomasyon yeteneğine sahip olmalıdır. CRCPS için bütünlük, fonksiyonel bileşenlerinin öğrenme ve adaptasyon gibi kendi kendini organize eden görevleri yerine getirmek için iyi entegre olduğu anlamına gelir. Bir örnek verecek olursak, eğer iki CRCPS yakın fiziksel mesafede çalışıyorlar ise, CRCPS'lerden birinin bağlı olduğu robot, diğer CRCPS'ye bağlı operatörle güvenli bir iletişim içerisinde olacaktır. Konum, ortamın mekânsal özelliklerine bağlı olarak CPS'nin hesaplama, insani ve fiziksel yeteneklerini belirleyecektir. CPS'nin uyarlanabilir karakteristik özelliği, sistemi kendiliğinden organize eder ve geliştirir. Özerklik ise, fonksiyonel bileşenlerin rolünü ve CPS'nin kendi başına bağımsız kararlar verebildiğini ifade eder.

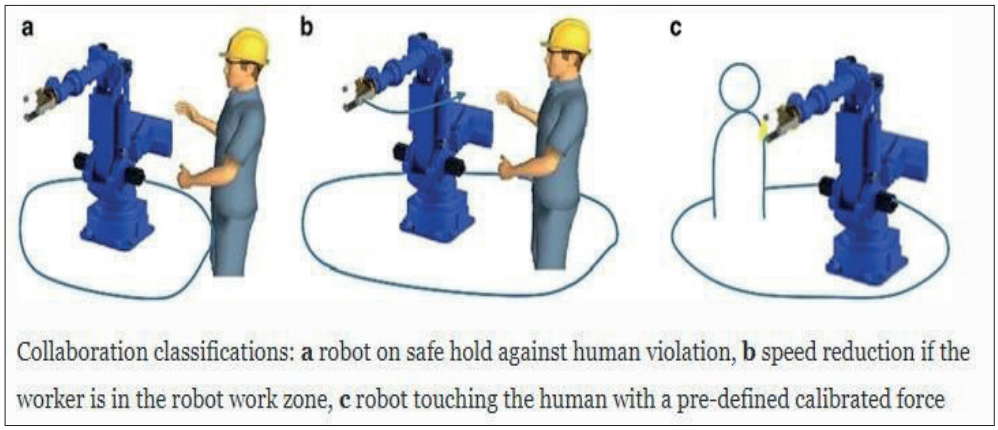
İş Birliği Sınıflandırılması:

CRCPS endüstriyel ortamında, robotların ve insanların çalışma alanı bölgelerinin sorunsuz bir şekilde örtüşmesi düşünülür. Normal olarak, insan/robot iş birliği iki taraf arasındaki etkileşim düzeyini belirler. Etkileşim düzeyi, iki varlık (insan/robot) arasındaki mesafeye ve bu iki varlık arasındaki karşılıklı görevlerin karmaşıklığına göre hesaplanabilir. Verilen görev veya aksine yapılan insan aktivitelerinin tahmini veya aynı zamanda gerçekleşen iş birlikçi insan/robot hareketleri ile artırılmış gerçeklik ortamındaki risk öngörüleri çalışma hücresi içerisinde interaktif bir ortam oluşturacaklardır.

Tüm güvenlik ve koruma protokollerinin uygulanmasına rağmen, robot kullanımının yoğun olduğu ülkelerde yine de ölümler rapor edilmektedir. Örneğin, Almanya'da, 2005 ila 2012 yılları arasında yılda 3 ila 15 arasında işçi bu yüzden hayatını kaybetmiştir, ancak bu kazaların hiçbiri iş birlikçi ortamlarda olmamıştır. Bu kazalarda robot ve insanın fiziksel etkileşiminin yanı sıra insanlar üzerindeki zihinsel baskılar oldukça etkili olmuştur. Yapılan araştırmalarda, çalışma alanına girişin ve robot hızının kısıtlanması bile operatördeki zihinsel baskıların hafiflemesi için yeterli olmuştur. Buna ek olarak, robot hareketlerine ilişkin detayların önceden bilinmesi operatör üzerindeki baskıların azalmasını sağlamıştır. HRC risk seviyesini de düşürmek için, mutlaka iş birliği seviyesini iyi ve taşıma yüklerinin gerçekçi bir şekilde sınıflandırılması gerekir.

Güvenlik şemaları, konum tahmini ve robotlar etrafında akıllı ortam koşullarına göre düzenlenmelidir. Akıllı ortam, robot ortamını konum, insan, güvenlik bölgesi ve mesafe hakkında bilgilendirmek için uygun izleme sensörleriyle donatmak anlamına gelir. Bununla birlikte, robotlarla gerçekleştirilecek iş birlikçi çalışmaya ilişkin güvenlik korumasının dört temel ilkesi detaylarıyla incelenmelidir.

Küçük boyutlu robotlar kullanılırken yaygın yaklaşım, ya manuel olarak yönlendirmek veya robot hızını gerektiği gibi azaltmaktır. Manuel yaklaşım, açık döngüdür, algılama olmadan, yüksek HRC seviyesine sahiptir, küçük boyutlu robotlarla sınırlıdır ve yetenekleri tanımlanan risk değerlendirmesine bağlıdır. Bu temel güvenlik yaklaşımı 'tam izolasyon' olarak adlandırılabilir. Bu yaklaşımda, kontrol altında tutulması gereken çalışma alanı, lazer tarayıcı veya yakınlık sensörleri ile donatılmıştır. Bu yaklaşımda robotlar çalışma alanına birisinin girmesi durumunda durmalıdır. Bu sistemler sensöre bağımlı olup kapalı döngüdür ve HRC seviyesi kazanımı yok denecek kadar azdır.



Şekil **27:** İş Birliği Sınıflandırmaları (Khalid ve diğerleri, 2016b)

Üçüncü yaklaşım, görerek veya hız izleyen sensörlerle sistemin denetlenmesidir. Bu durumda işçinin tehlikeli bölgeye girmesiyle birlikte hızın yavaşlatılması ve gerekiyorsa robotun durdurulması sağlanır. Bu güvenlik konsepti HRC için, bu teknikte hızlı ve güvenli bir eş zamanlı izlemeyi gerçekleştirebilmek için çoklu entegre ve füzyon özelliği olan bir sensör kullanılır. Bu teknikle, yüksek HRC seviyesine ulaşmak mümkündür, ancak izleme fonksiyonundaki olası bir arıza durumunda risk değerlendirmesinde zorluklar yaratır. Dinamik izleme ilkeleri doğrultusunda, iş birlikçi ortamda çalışan operatörlerin olası hatalı hareketlerini saptamak için kullanılan algoritmalar, hız ve ayırma modülleri ile entegre edilmelidirler.

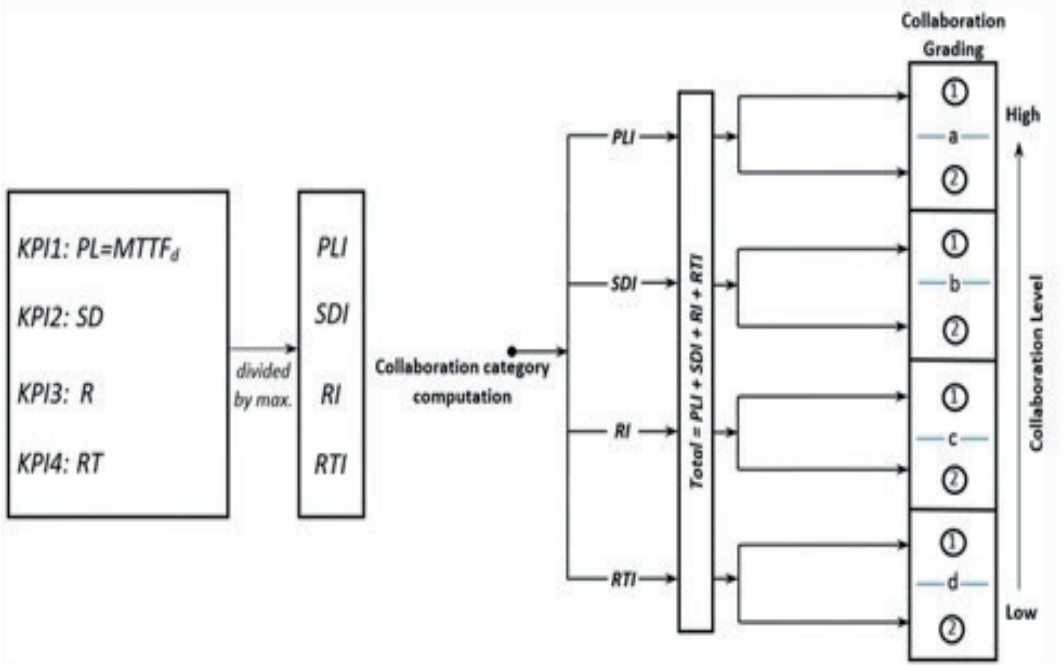
Kolaboratif alanda, operatörün bulunabileceği alan belirlenmiş olup, sürekli olarak hareketleri kontrol edilir, robot kendisine öğretildiği gibi aktif olarak bu alan içinde kalmaya zorlanır, kuvvet sensörleri ile de robotun belirlenen kuvvet değerleri çıkmaması sağlanır. Bu sistem aynı zamanda, iş birlikçi çalışma alanında insan olması durumunda robotu yönlendirecek görüş sensörleri ve kameralardan da destek alır. Buna ek olarak

iş birlikçi sahada robotun operatörün bedenine temas Şiddetine göre, robot hızı ve ivmesi azalır. Bu nedenle, izleme sistemlerinde, sensör teknolojisine ek olarak kuvvet sensörlerinin entegrasyonunu gerekir. Böylelikle en yüksek HRC kazanımı sağlanmış olur, ancak izleme sürecindeki herhangi bir hatadan dolayı risk değerlendirmesinde de birtakım zorluklar gündeme gelebilir. Genel HRC derecelendirme katkıda bulunmak için seçilen dört eşit ağırlıklı anahtar performans göstergesi (KPIs/Key Performance Indicators) vardır. Bu endeksler PL, emniyet mesafesi (SD/ Safety Distance), risk (R) ve reaksiyon süresi (RT Reaction Time)'dir. PL, "Tehlikeli Arızaya Kadar Geçen Ortalama Süre" (MTTFd/ Mean Time to Dangerous Failure) olarak alınır, EN ISO 13849-1'a göre sistem bileşenlerinin bir yıllık ortalama döngüsünün %10'u tehlikeli duruş/arıza olarak tanımlanır.

Denklem 1:

$$\mathrm{MTTF_d} = \frac{1}{10}E(x) \quad \text{for } x = \min\{P(\text{failure of part} \cdot \text{cycle/year}) = 1\} \tag{1}$$

E, bileşenlerin %10'unda tehlikeli bir arıza olana veya bileşen çalışma süresi E ile sınırlı olana kadar geçen ortalama süredir. Bu göstergenin birimleri yıl cinsinden ifade edilir, örn. Elektromekanik bileşenler için MTTFd aralığı 100-200 yıldır. Bu, bileşenin MTTFd değerinin %10'una ulaşmasından sonra değiştirilmesi gerektiği anlamına gelir. Bileşen değiştirme süresi olarak 20 yıllık bir süre standarda göre bir hedef olarak belirlenir ve bu gösterge için maksimum değer olarak alınabilir.



Şekil 28: HRC Kademelendirme Şeması (Khalid ve diğerleri, 2016a)

**Sol tarafta 4 KPI, sağ tarafta ise not hesaplaması bulunmaktadır.*

İkinci gösterge, insan (Operatör) ve çalışan bir robot arasında hesaplanan SD'dir. Endüstriyel bir robotla çalışan bir insan için SD formülü EN ISO 13855'te verilmiştir.

Denklem 2: SD= (K.T) + C

SD, riskli bölgeden minimum SD'yi hesaplar. K, robotla çarpışmak üzere olan operatörün hızıdır (mm / s). T, frenler uygulandığında robotun tamamen durması için (s) saniye cinsinden takip süresidir. C, güvenlik uyumluluğu için sensörün kapasitesine veya çözünürlüğüne bağlı olarak ek mesafedir (mm). Sistemde birden fazla sensör kullanılması durumunda, herhangi bir sensör füzyon tekniği kullanılmadığı takdirde, en düşük çözünürlüğe sahip sensör genel sistemin çözünürlüğünü belirlemektir. Çeşitli sensörlerle yapılan hesaplar göstermiştir ki, en hızlı sensörlerle dahi SD=0,5 m değerine ulaşabilmek mümkün değildir. Ancak, SD değerinin

yaklaşık 2 m'den daha yüksek olması durumunda, hiçbir kolaboratif çalışma sisteminden bahsetmek mümkün değildir. 3. gösterge, robotu üreten firmanın, spesifikasyonlarında belirtilen güvenli olmayan bileşen sayısına göre belirlenir ve R ile gösterilir.

Denklem 3: $R=\frac{U}{U+S}$

Güvenli olmayan bileşen sayısının (U/Unsafe components) toplam bileşen sayısına oranı risk olarak adlandırılır, burada (S/Safe components), sistemde kullanılan güvenli bileşenlerin sayısıdır Denklem 3. Yukarıda belirtilen PL aralığına göre, yani 100 yılın altındaki MTTFd'nin elektromekanik bileşeni güvenli değildir. Ayrıca, her sensör, kullanılan güvenli ve güvensiz bileşenlerin sayısına bağlı olarak tanımlanabilir.

CRCPS perspektifinden bakıldığında ise, kullanılan tüm sensör bileşenleri ve ekipmanı güvenli veya güvensiz olarak işaretlenebilir. Minimum risk ancak, kullanılan tüm bileşenler güvenli olduğunda belirlenebilir. Maksimum risk ise, bir karşılaştırmaya, tasarımcının önerilerine veya ISO 12100:2010'a göre yapılan risk değerlendirmeye göre kontrol edilebilir.

İş birliği etkinliğini ölçen dördüncü indeks, ise sensörlerin veri gecikme oranı (Di/delay rate)'dir. (Bkz. Denklem 4).

Tasarlanmış bir CRCPS'de kullanılan sensörlerin çeşitliliği, eş zamanlı olmayan veri iletim hızlarına neden olabilir. Herhangi bir sensör füzyon tekniğinin kullanılmadığı bir durumda, yanıt vermek için RT sistemindeki tüm sensörlerden gelen gecikme süresi, veri gecikme hızları (ms/delay rates) açısından önemlidir. Böylece, sistemin genel gecikme süresi, herhangi bir tehlikeyi önlemek için robotun güvenlik protokolünü zamanında başlatmasını sağlayan kilit göstergedir. Daha uzun gecikme süresi robotun RT'sini olumsuz etkileyebilir ve bu da etkili HRC kazanımının azalmasına neden olacaktır.

Diğer değişken, CPS sistemine takılan sensörlerin (N) sayısıdır. Sistemin, bir dizi heterojen sensörden oluştuğu durumlarda ise, bu değişken en yavaş sensörlerin sayısını temsil eder. Bu durumda k sabit olup, tamamen yalıtılmış k değeri sistemler için sıfır ve diğer tüm izlenen sistemler için birdir.

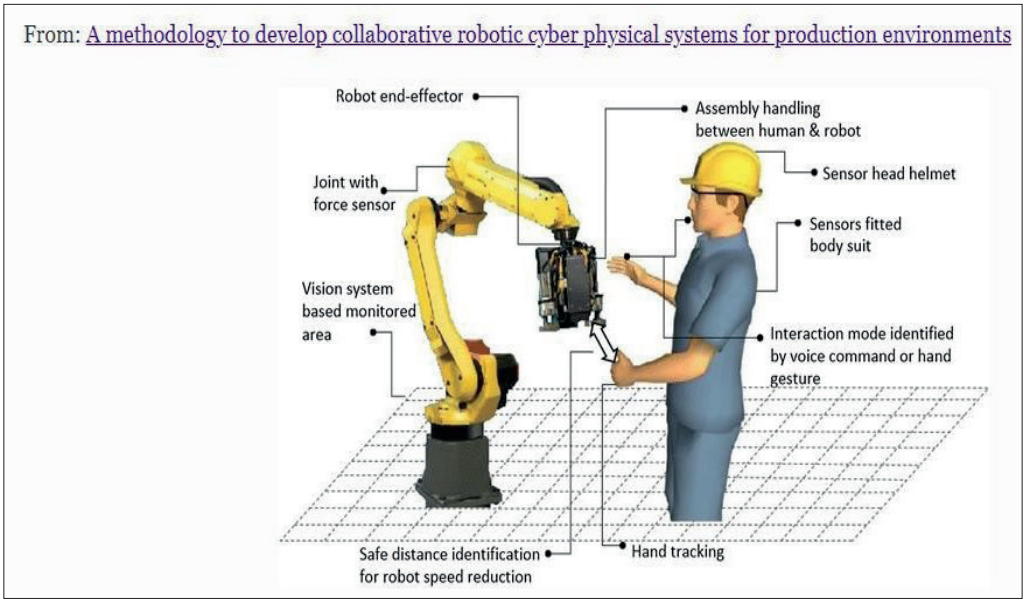
Denklem 4: $RT = k\,(D_i \,.\, N)$

Farklı iş birliği tekniklerine ve performans göstergelerine baktıktan sonra, iş birliği derecelendirme şemasını resmileştirebiliriz. Şekil 3, HRC'nin düşükten yükseğe derecelendirme modelini göstermektedir. Şekil 30, sağ tarafta ise, HRC dereceleri, burada a1 en yüksek HRC kazanım seviyesini ve d 2 en düşük seviye olarak belirtilir.

Denklem 5: $I_j = \frac{KPI_j}{(KPL_j)_b}$

Yukarıda belirtilen göstergelerin tümü, 0 -1 ölçeğinde ilgili endekslere dönüştürülür (en iyi KPI değerine bölünür).

SDI ve RTI durumunda, en iyi değerler en küçük olduğu için ters ölçek kullanılır, örneğin SD hesaplaması için 0,5 m'ye ulaşmak çok zordur. Şekil 3 sağ tarafta, iş birliği derecelendirme eşit ağırlığa sahip dört endeksin toplamına dayanarak belirlenir ve maksimum 4 puan elde edilir. Burada "a", "b", "c" ve "d", sırasıyla 3–4, 2–3, 1–2 ve 0–1 ölçeğine karşılık gelir. Bu Şekilde, iş birliği kazanımı, her kategori iki alt kategoriden oluşmak üzere dört büyük kategoriye ayrılır.



Şekil 29: CRCPS Tasarımında (Khalid ve diğerleri, 2016a)

Şekil 29'de de görüldüğü gibi gerek robot ve gerekse de operatör üzerine konumlandırılmış sensörler operatörün ne kadar yakınlaşması gerektiği konusunda güvenli mesafe limitlerini denetlerler.

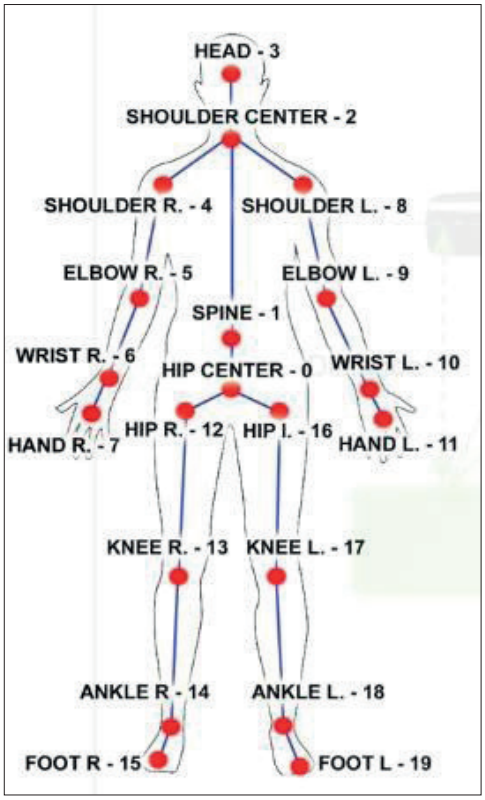
Hız veya ivme azaltma evreleri, iş birlikçi ortamda tehlikeli bir durumun tanımlanması üzerine aniden başlatılabilir ve işçi çalışma alanında güvenli mesafe sınırını terk edinceye kadar robotun tamamen durmasına neden olabilir. Tehlike geçtikten sonra, robot kaldığı yerden işine devam edecektir. Bunun dışında, sisteme ayrıca, robotu eğitmek için ellerin veya çalışan sesinin kullanılabileceği bir etkileşim modu eklenebilir. Bunun için, farklı el hareketleri kullanılarak, robotu etkileşimli ortamda eğitmek gerekecektir. Kuvvet izleme sistemi için, SD limitine ulaşıldığında kuvvet azaltma yaklaşımı aniden uygulanır. Robotun, operatöre dokunması durumunda kuvvet sensörleri, ek tepkiler verebilir. Ancak, bu tür sistemleri tasarlamak için farklı vücut organları için maruz kalabilecekleri kuvvet değerlerinin kalibrasyonun yapılması gerekir. Yeni iş birlikçi robotların eklemleri kuvvet sensörleri, tork sensörleri ve bir kuvveti elektrik sinyali haline dönüştürmek için kullanılan yük hücreleri ile donatılmıştır. Eklemlerinde kuvvet sensörü olmayan geleneksel robotlar, kuvvet azaltma ve izleme yaklaşımında kullanılamaz. İşbirlikçi robotlar, operatörle çarpıştıktan sonra bu çarpışmayı algılama ve operasyonu yavaŞlatma/durdurma kapasitesine sahiptir. Bu robotların, insan ağrı seviyesinin herhangi bir eşiğinin altındaki çarpışma kuvvetlerine göre kuvvet kalibrasyonu gereklidir. Bununla ilgili olarak, bu temas kuvvetleri ile ilgili olarak, değerlendirmelere ve tasarıma yardımcı olabilecek biyomekanik deney sonuçları mevcuttur.

Böyle bir CRCPS'de, insandan kaçınma ve çoklu duyusal verilerin akıllı kullanımı, insan izlemesi yapabilen çoklu sensör entegrasyonu kullanılabilir. Bazı durumlarda, kaynağın kapsamlı yapısı nedeniyle, yerleşik sistemlerde gerçek zamanlı ve yazılım sorunları ortaya çıkabilir. Ürünün ömrü boyunca, gömülü sistem yazılımı, karmaşıklığı tanıtan, gerçek zamanlı sistemin performansını sınırlayan ve tehlikeye atılan siber güvenlik nedeniyle ortaya çıkan sorunlarda, siber ve fiziksel katman arasındaki entegrasyonun iletişimine ve senkronizasyonuna ihtiyaç duyar. Bu tür sorunlara cevap verebilmek için sistemin, genel kontrol ve kendi kendine doğrulama yaklaşımları vardır. Bu yaklaşımlar, CPS modülleri içindeki olağandışı sistem davranışları ile başa çıkmak ve arızanın gerçek nedenini bulmak için yararlı olabilir. CPS araştırmasındaki bu sistem entegrasyonu yaklaşımları, akıllı sensör füzyon teknikleri, akıllı modüler senkronizasyon ve izin verilen ek yüke bağlı olarak farklı koruma kontrol katmanları ve doğrulama şemalarını içerir.

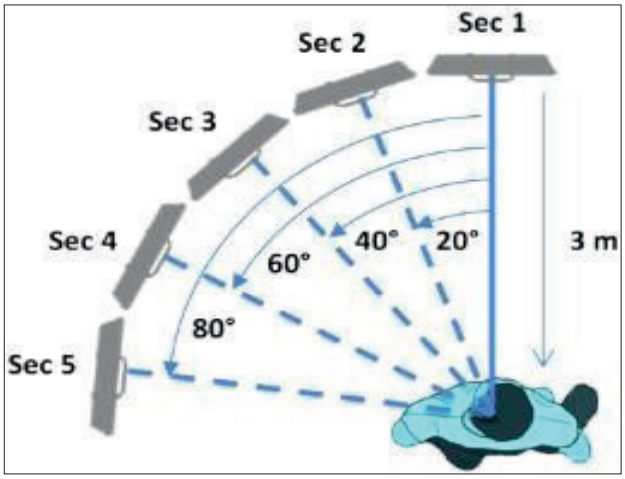
11.4. İş Birlikçi Bir Çalışma alanında Güvenli İnsan- Robot İş birliği İçin Siber Fiziksel (CPS / Cyber Physical System) Yaklaşımı

İnsan-robot etkileşiminde ön etki güvenliğini sağlamak için çok sayıda çalışma ve sınıflandırma mevcuttur. Bunların en önemlilerinden bir tanesi, tehlike indeksine dayalı insan-robot etkileşimi için gerçek zamanlı bir güvenlik sistemi üzerinde A. Sanderud, T. Thomessen, H. Osumi, M. NiitsumaA. Sanderud (A proactive

strategy for safe human-robot collaboration based on a Simplified risk analysis) tarafından yapılan bir çalışmadır. Bu çalışmada, tehlike indeksini hesaplamak için anahtar faktör robot ve insan arasındaki mesafedir. Benzer bir yaklaşımda, robot yörünge kontrolünün eşlik ettiği bir operatörün çalıştığı alana dayalı bir risk minimizasyon stratejisi yaklaşımı C. Morato, K.N. Kaipa, B. Zhao (S.K. Gupta Toward safe human robot collaboration by using multiple kinects based real-time human tracking) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, insan ve robotu temsil eden küre tabanlı geometrik modeller kullanılmıştır. Ancak, bu yaklaşımda sistemin tepki süresi saniye düzeyindeydi. A.M. Zanchettin, N.M. Ceriani, P. Rocco, H. Ding, B. Matthia ise (Safety in human-robot collaborative manufacturing environments: metrics and control) çalışmalarında, insan-robot iş birliği senaryosunda gerçek zamanlı insan takibi için birden fazla Kinect yaklaşımı üzerinde çalışmışlardır.



Şekil 30: Kinect Ortak İzleme Algoritması Tarafından Algılanan Noktalar (Nikolakis ve diğerleri, 2018)



Şekil 31: Kaydedilen Her Hareket İçin Sensörün Konumu (Nikolakis ve diğerleri, 2018)

Bu çalışmada, ayırma alanının önemi ve gerektiğinde robotun tamamen durdurulmasını içeren proaktif veya çarpma öncesi çarpışmayı önleme stratejisinin uygulanmasına yönelik değerlendirme vurgulanmaktadır.

Robot ile insan arasındaki mesafe metriğine dayalı olarak robot hızı için bir kontrol stratejisi ile ilgili yaklaşım ise K. Jackson, K. Efthymiou, J. Borton tarafından (Digital manufacturing and flexible assembly technologies for reconfigurable aerospace production systems) çalışmasında yapılmıştır. Bu çalışmada, mesafe, insan-robot iş birliği senaryosunda proaktif veya çarpışma öncesi çarpışmadan kaçınma için önemli ölçümlerden biri olsa da sunulan uygulamaların yanıt süresi gerçek zamanlı kısıtlamaları karşılamıyor gibi görünüyor savı benimsenmiştir. Halbuki, üretim mekanlarının artan karmaşıklığı ve birbirine bağlı sistemler gereksinimine bakılırsa, gerçek dünya koşullarına yaklaşan uygulamalara ve düşük yanıt sürelerine ihtiyaç vardır.

Çalışma zamanında insan güvenliğini sağlamak için, robotun davranışı, insan eylemlerine bağlı olarak uyarlanabilir hale gelmelidir, bu da operasyona yeni bir karmaşıklık getirmektedir. Bu karmaşıklığı çözmek için, çalışma zamanı işlemlerini simüle etmek, izlemek ve denetlemek için veri, sensör ve iletişim hizmetleri için yeni bir entegre çerçeve gereklidir. Bu entegre çerçeve, sürekli olarak operasyonu değerlendirerek ve gerçek dünya koşullarına göre ayarlayarak, varlıklarının etkileşimini ve iş birliğini sağlar. Bu da analitik ve fiziksel yönleri birleştiren akıllı bir sistemin oluşturulmasına neden olur. Birbirlerine bağlı bilgisayar sistemleri ve dünya arasındaki etkileşimleri gerçekleştiren bu akıllı sisteme CPS (Cyber Phsical System) adı verilir. İnsan-robot iş birliği ve birlikte yaşamayı sağlayan robotik CPS, uyarlanabilir, özerk ve yüksek otomasyonlu olmalıdır. Fiziksel sistemler, çeşitli elektronik, bilgisayar, iletişim, algılama, harekete geçirme, gömülü sistemler ve sensör ağları aracılığıyla gerçek dünyadaki değişkenlerin değişen durumunu algılar. Robotik CPS'nin tasarımı ve insan operatörler açısından güvenlik yönlerini kapsayan risk değerlendirmesi sonucu CPS üç bölümden oluşmaktadır.

- İnsan bileşeni (HC/ Human Component),
- Fiziksel bileşen (PC/ Physical Component)
- Sayısal bileşen (CC/ Computatioanl Component).

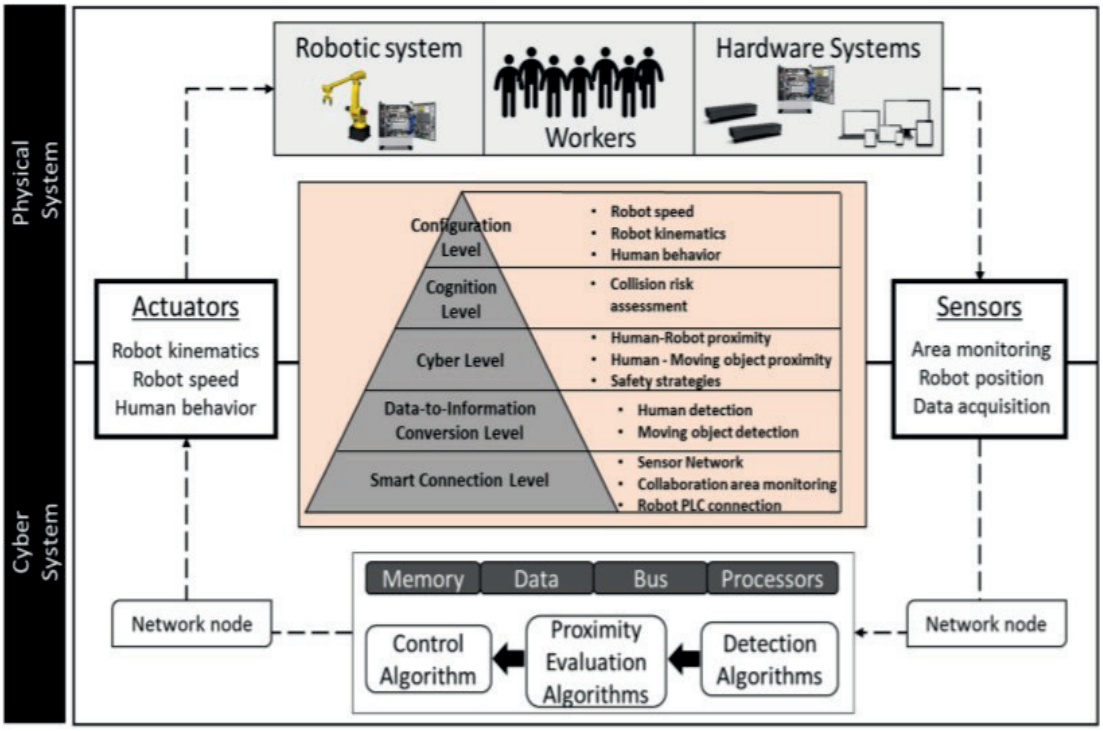
Robotik CPS'nin ana kontrol parametresi insan güvenliği mesafesidir, yüksek düzeyde bir insan-robot iş birliğinin gerçekleştirilmesi için önemli bir konu, sensör veri hızlarında üst düzey bir insan-robot iş birliğinin gerçek zamanlı kısıtlamalara ilişkin teknik sınırlamalardır. Operatörler operasyonlar sırasında, yüksek zihinsel zorlanmalar yaşar veya başka bir deyişle, robota olan mesafeleri azaldığında veya robot yüksek bir hızda kendilerine doğru hareket ettiğinde kendilerini daha az güvenli hissederler.

İnsanlarla robotların bir arada çalıştıkları iş birlikçi çalışma alanlarında çalışma alanları çakışır. Etkileşim ve iş birliği düzeyi, insan ve robot varlıkları arasındaki mesafe, iş birliğinin karmaşıklığı ve çalışma alanının paylaşım düzeyine göre biçimlendirilebilir. Yapılandırılmak istenen mimaride, tüm işletim kaynakları CPS'nin fiziksel kısmına aittir, çünkü hepsi birbirleriyle veya bağımsız olarak etkileşim kurabilir, veri alışverişinde bulunabilir ve davranışları siber bölümde bir kontrol algoritması tarafından özelleştirilebilir. İzlenen gerçek koşullara bağlı olarak, mimaride, böyle bir iş birliğinin gereklerini ve kısıtlamalarını bir çalışma alanındaki tüm işletme kaynaklarının üretim özellikleriyle birleştirerek sorunsuz bir insan-robot iş birliği sağlamayı hedeflenmektedir. İnsanın robota olan yakınlığına bağlı olarak hareket eden kapalı döngülü bir kontrol sisteminin oluşturulmasıyla insan güvenliği sağlanabilir. Bir çarpışma riski algılama modülü kullanılarak ve uygun çarpışma önleme stratejisi belirlenir. Görme ve dağıtılmış izleme sistemleri, gerçek zamanlı güvenlik değerlendirmesi ve çarpışma önleme stratejilerinin gerçekleşmesine olanak tanıyan düşük işlem ve değerlendirme süreleri sağlar.

Robotik ortamlarda çalışan operatörlerin, robotlarla iş birliği halinde veya etkileşimde olmaları durumunda kazalara karşı korunabilmeleri için aşağıdaki kombinasyonlara ihtiyaçları vardır.

- Çalışma alanına ait gerçek dünya koşullarına ilişkin bilgiler,
- Faaliyet gösteren kuruluşlardan veri toplama mekanizmaları,
- Zamanında veri alışverişi için iletişim hizmetleri,
- CPS varlıklarının durumunu kontrol etme ve yeniden yapılandırma yeteneğine sahip yazılım bileşenleri.

CPS ile ilgili varlıklar operatörler ve robot kollarıdır. Yaklaşımdaki otomasyon düzeylerine ilişkin yaklaşım her düzeyde bileşenler Şekil 31'de gösterilmiştir.



Şekil **32:** CPS Yaklaşımının İmplamantasyonu Sırasındaki Hiyerarşik Diyagram (Nikolakis ve diğerleri, 2018)

- En düşük seviye, gerçek çalışma koşullarını almak ve yeniden yapılandırmak için donanım bileşenlerini (işletim alanını izlemek için sensör sistemleri, siber parçaya bir iletişim arabirimini destekleyecek insan mobil cihazları, fiziksel robot(lar) ve denetleyicisini) içerir.
- Veri alışverişi için iletişim hizmetleri, alan verilerini siber parçanın gerektirdiği bilgiye dönüştürerek, insana yakınlığını değerlendirmeye ve böylece robota ve ikinci olarak da hareket eden herhangi bir nesneye çarpma riski kadardır.
- Üçüncü ve orta seviye, fiziksel varlıkların veri işleme, değerlendirme ve kontrolü için gerekli tüm algoritmaları içerir. Bu noktada, fiziksel kısma herhangi reaksiyon gerçekleştirmek, bu düzeyde değerlendirme ve veri işlemenin, kısa sürede yapılması gerektiği göz önünde bulundurulmalıdır.
- Biliş düzeyinde, insan (lar) ın çarpışma riski, insanın hareketli bir nesneye yakınlığı arasındaki mesafe olarak değerlendirilir.
- Üst katmanda, yapılandırma düzeyi reaksiyon stratejilerini ve fiziksel parçanın hareketlerini kontrol eden veya etkileyen algoritmalar içerir, örneğin robota acil bir durdurma tetikleme veya insan operatörünün mobil cihazına bir uyarı sinyali gönderilmesi gibi.

Referans verilen piramidin beş katmanında bulunan mekanizmalar, bağlı bir CPS, operatörler, robotik manipülatörler, Bilgi ve İletişim Teknolojisi (ICT/Information and Communication Technology) ve Yapay Zeka (AI/Artificial Intelligence) bileşenleri ile köprü kurmayı amaçlar ve sensör sistemleri ile gömülü bileşenler ham veri akışlarını (sensör verileri, zaman bilgiler, robot denetleyici verileri) siber kısma aktarırlar. Daha sonra, siber bölümde uygulanan bir kontrol stratejisi, zaman bilgileri, referansları ve bunların kaynağına göre verileri toplar ve ilişkilendirir. Daha sonra, verilerin işlenmesi gerçek çalışma koşullarını değerlendirmek için gerçekleşir. Denetleyiciler, sabit kablolu güvenlik durdurma, robotik PLC komutları, monitörler veya mobil cihazlar gibi yakındaki sabit veya uzak cihazlara gönderilen ve fiziksel sistemlerin davranışını etkileyebilecek robotik güvenlik önlemleri olabilir bu da Şekil 34'teki grafikte gösterilmiştir.

Önerilen CPS'nin hedeflerinin sağlanmasına yönelik olarak, insan ve robot davranışını yansıtan veriler, CPS tarafından kontrol edilen, her iki tarafın davranış/eylemleri ile birlikte kullanılmalıdır.

Son yirmi yıl boyunca imalat sanayiinin evrimini gösteren çeşitli paradigmalar vardır. Üretim sistemleri seri üretimden müşteri odaklı üretime ve kişiselleştirmeye geçiş deneyimi yaşamaktadırlar. Günümüzün üretim Şirketleri küreselleşmiş, birbirine bağlı ve değişken bir pazarda performanslarını artırmak için çalışıyor.

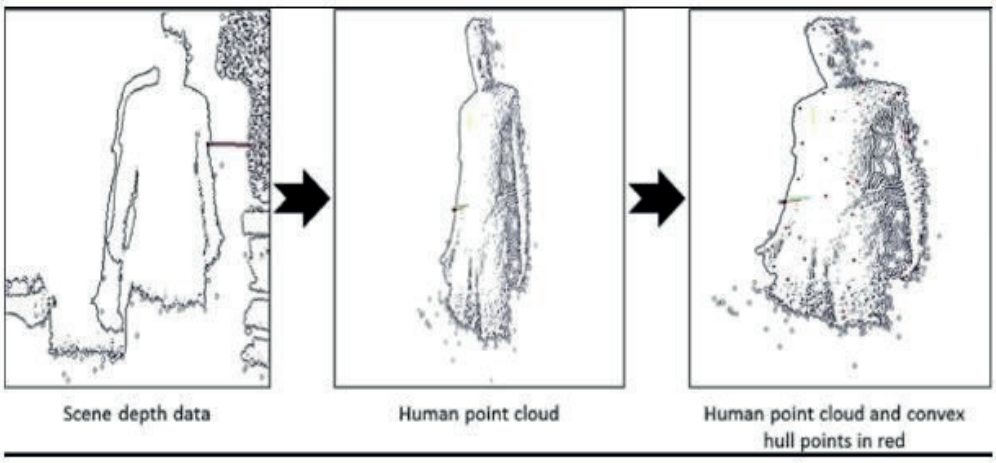
Sonuç olarak, birçok montaj hattı/istasyonu, insan müdahalesini ve karar almalara katılımını azaltmak için insan zekasını otomasyon çözümlerine entegre etmeye odaklanmıştır ve verimliliği artırmayı hedeflemektedir. Robotla birlikte çalışan operatör potansiyel bir sistem belirsizliği olarak ele alınır böylece rolü kısıtlanır ve bir güvenlik açığı olarak kabul edilir. Öte yandan, robotlar, çalışmalarında, yapılandırılmamış değişken ortamlara kısıtlama ve / veya yapılandırılmamış değişken ortama pahalı adaptasyon, karmaşık programlama, yetersiz kullanılabilirlik, değiştirilebilir ve azalan üretim gibi fonksiyonel sınırlamalarla ilişkilendirilir. İnsan becerilerinin modern otomasyon çözümleriyle birleşimi, gerçek zamanlı bağlam farkındalığı ve güvenlik mekanizmalarının entegre edilmesi, piyasaların gereksinimlerini karşılayabilecek çevik bir üretim paradigmasının yaratılmasına yol açabilir. İşçilerle paylaşılan bir ortamda çalışan robotlar, insan güvenliğinin korunmasının büyük önem taşıdığı yeni bir hibrit (karma) üretim konseptini mümkün kılmaktadır, çünkü robotlar birlikte çalıştıkları insanlarda ciddi ve ölümcül yaralanmalara neden olabilir. Bu gibi durumlarda, robotun hızı zararlı çarpışmaları önlemek için düşük tutulur. Ancak, çarpışma riski en aza indirilmişse, robot üretim süresinin büyük bir kısmında daha yüksek çalışma hızına izin verilebilir.

Güvenlikle ilgili uygulamaların, özellikle insan-robot iş birliği dahil olmak üzere, en sonuncusu, işçileri kazalardan ve yönetimi yasal yaptırımlardan koruyan çeşitli endüstriyel güvenlik standartları ile tanımlanmaktadır. İnsan-robot iş birliği için siber fiziksel sisteme göre emniyet ve güvenlik gereksinimleri, verimliliğin arttırılması için çalışma alanındaki insanlar ve robotlar arasındaki etkileşim düzeyine dayanmaktadır. İnsan ve robotlar arasındaki iş birliğinin, el ile çözüme kıyasla temas süresini azaltmak açısından, bireysel karmaşık montaj süreçlerinin verimliliğini artırıcı olduğu belirtilmiştir. Pasif hareket yönlendirme tekniği, insan güvenliğinin korunması için sınırlı bir güç yardımı ile birleştirilir, manuel hücreye göre, iş birlikçi çalışma hücrelerinde daha düşük döngü sürelerinin olduğu görülür. Bu arada operatörün görsel takibi ile birlikte kuvvet ve tork ölçümleri de sağlanır. Eşik değerlerine dayalı bir güvenlik algoritması uygulanarak insan eli ile robot üzerindeki takım arasındaki ara mesafeye bağlı olarak güvenlik politikaları (robot güvenlik durdurma veya insan elinden uzaklaşma) belirlenir, ortak fiziksel etkileşim için nicel modellerin hesaplanması ve Markov Karar Süreci'nin kullanımıyla etkinleştirilmiş bir sonraki eylem beklentisi stratejisi, ile öngörülebilir kantitatif değerlendirmeler yapılır.

Genel olarak, güvenli insan-robot iş birliğine yönelik yaklaşımlar iki kategoriye ayrılabilir: etki öncesi ve sonrası. Etki öncesi yöntemler robot ve insan ayrımına dayanır ve ayrım önceden belirlenmiş bir güvenlik eşiğinin altında olduğunda önleyici eylemlere olanak sağlar. Öte yandan, tepki sonrası yaklaşımlar, özellikle insanla teması tespit ederek tehlikeli seviyenin altındaki insanlar için temas kuvvetlerini azaltıp çarpışmaları tespit etmeye ve tepki vermeye odaklanır. İkinci kategori, insan operatörü için doğal bir risk de dahil olmak üzere bir çarpışmayı gerektirirken, ilki, yeterince doğruysa, güvenlik reaksiyonlarını önceden uygulayarak bu riski en aza indirir. Ancak, bu durum daha düşük verimliliğe yol açabilecektir. Özellikle karmaşık işlerin yapıldığı, iş birlikçi ortamlarda insan güvenliğinin korunmasına yönelik yaklaşımların, risk analizi ve azaltma önlemleri de dahil olmak üzere ayrıntılı bir risk değerlendirmesinin mutlaka yapılması gerekli görünmektedir. (Y Chinniah Robot Safety: Overview of risk assessment and reduction). Bu konuda yapılan risk değerlendirme stratejilerinin ortak bir özelliği, güvenlik politikaları ve standartları ya insan yakın olduğunda robotun hızını düşük veya sıfır seviyelerde tutmak ya da robotu insandan uzaklaştırmak ve böylece aralarındaki mesafeyi korumaktır.

Robotu kontrol eden, Programlanabilir Mantık Denetleyicisi (PLC/ Programmable Logic Control) robotun o andaki konumu, hızı ve eklem koordinatlarını yansıtan bilgiler üretir. Bu veriler, kontrol birimine gönderilen uygun komutlar aracılığıyla davranışlarının izlenmesini ve kontrol edilmesini sağlar. Hız adaptasyonu ve robot hareketlerinin yeniden yapılandırması insan güvenliği ile ilgili kritik işlevlerdir. Benzer bir yaklaşımda, operatörler iletişim servisleri tarafından desteklenen mobil cihazlar ve uygun yazılım arayüzleri aracılığıyla CPS ile etkileşime girebilir. Çalışma süresi boyunca, işçiler, akıllı bir sistem aracılığıyla mobil cihazlar aracılığıyla, talimatlar, rehberlik, görev atamaları ve çarpışma riski bildirimleri şeklinde, daha dikkatli olmaları ve/veya faaliyetlerini ayarlamaları konusunda uyarılarak verilen görevleri gerçekleştirmek için destek alabilirler. Ek mobil varlıkları destekleme bağlamında, paylaşılan çalışma alanında çalışan ve çalışanlar ve robotlarla etkileşime giren bir izleme sistemi vardır. Önerilen yaklaşımda, derinlik veri alımını desteklemek için kullanılan Kinect v2 optik sensörler kullanılmaktadır. Derinlik verileri, çalışma alanı ve içinde gerçekleşen faaliyetler hakkında 3D/3 boyutlu bilgi sağlar, böylece insan / nesne algılama ve izlemeyi mümkün kılar. 3D veri akışları, karmaşık ve zaman alıcı işlem gerektiren yüksek miktarda dijital bilgi içerir, ancak insan fiziksel vücut hacmine dayalı insan güvenliği senaryolarında önemli olarak kabul edilen herhangi bir değerlendirmeyi etkinleştirebilir. PLC,

derinlik sensörleri ve mobil cihaz donanımlarının kombinasyonu, paylaşılan çalışma alanı koşulları hakkında dijital bilgi Şeklinde gerekli bilgileri sağlar. Kurulan ağ bağlantıları ve iletişim kanalları aracılığıyla, gerçek çalışma koşulları hakkında bilgi içeren veriler, analiz ve alt süreçler için CPS'nin fiziksel kısmından siber bölüme aktarılır. CPS'nin siber bölümünde, derinlik sensörleri tarafından birden fazla düzenekten (frame) elde edilen derinlik verileri, insanların ve hareketli nesnelerin tanımlanması için işlenir. Hareket ardışık görev düzeneklerinin karşılaştırılması ile algılanır. Bu karşılaştırma ortak bilgilerin çıkarılmasıyla gerçekleştirilir. Bir derinlik sensörü tarafından üretilen veriler bir nokta bulutu biçimindedir, yani üç boyutlu uzayda Kartezyen koordinat noktaları olarak adlandırılırlar. İŞ birliği sırasında insan güvenliği için zamanında insan algılama ve izleme süreci sağlanmalıdır. Kinect v2 sensörünün iki veri akışını desteklediği göz önünde bulundurulmalıdır; derinlik verileri ve iskelet yapısı verileri. İnsana özgü derinlik bilgileri, iki veri akışı ve böylece oklüzyonlar (tıkanmalar-aksamalar) nedeniyle, insan tespitinin doğruluğunu arttırmak ilişkilendirilerek ortaya çıkarılabilir. Derinlik haritasının oluşturulması ile beraber uzaydaki Kinect konumu referans olarak kabul edilerek, üç boyutlu uzayda çok sayıda nokta içeren insan noktası bulutu üretilerek, nokta bulutunun, yerel sensörünkine göre koordinat referans sistemine sahip olduğu belirtilmelidir. Gerçek zamanlı ve insanlarla ilgili yakınlık değerlendirmesini mümkün kılmak için, insanın 3D noktalarına ilişkin veri kümesinin dışbükey gövdesinin oluşturulmasıyla boyutu küçültülür. Sonuç olarak, operatöre ait bulut zarfı üzerindeki noktalar daha fazla değerlendirilmek üzere hafıza tutulur. (Şekil 33)



Şekil 33: Temas Sırasındaki Kuvvetin Cilt Yüzeyinde Hissedilen (Nikolakis ve diğerleri, 2018)

Birden fazla sensörün birlikte çalışması, izlenen alandaki kör noktaların en aza inmesini kolaylaştırır. Deneysel kurulum için, bir robotik denetleyicide ve kablosuz bir ağ tarafından etkinleştirilen bir Android cihazında senkronize bir TCP / IP soketleri bulunur. Veri aktarım gecikmelerinin en aza inmesi için, ağ, sınırlı bir alan üzerinde ve az bir sayı düğümü için kurulur. Robotik denetleyicideki soketler, robot ucu efektör koordinatlarının denetim altında tutulması ve yavaşlatma /durdurma gibi hızla ilgili komutların iletilmesi için güvenlik stratejilerine bağlı olarak kullanılır. Ayrıca, android cihazdaki soket aracılığıyla, çalışma alanındaki çalışanlar herhangi bir hareket eden cismin sınırlandırılmış alana doğru hareket ettiği konusunda sesli olarak uyarılır. Mevcut uygulamanın temel işlevlerinden birisi ise ölçeklendirilebilir olmasıdır. Bir sensör kullanılması durumunda, siber parçanın tüm hesaplamaları tek bir bilgisayarda yerel olarak gerçekleştirilir. Ancak, birden çok sensör sistemi kullanıldığında, derinlik veri işleme adımları, koordinatların dönüşümü ve mesafe hesaplaması çeşitli düğümler arasında dağıtılır. Daha sonra, sonuçlar CPS fiziksel varlıkların (insan ve robot) kontrolünden sorumlu merkezi bir düğüme aktarılır. Daha sonra, hesaplanan mesafelerin ortalama değerlerine göre seçilen güvenlik ilkelerini uygular. Sensörlere bağlı bilgisayar sistemleri, 3D grafik işleme ile ilgili bazı minimum gereksinimleri karşılamalıdır. Böylece, bu yaklaşım kısa hesaplama süreleri ile sistemin hızlı karşılık vermesini sağlar.

Mesafe hesaplama bileşeni, daha önce belirtilen ve bağımsız bir windows uygulaması olarak dağıtılan tüm işlevlerle sarılmıştır. TCP/IP soketleri aracılığıyla iletişim sağlanır, böylece gerçek çalışma koşullarına uygun kontrol stratejilerinin neredeyse gerçek zamanlı olarak seçilmesine dayalı karar alma olanağı sağlanmış olur. Ek olarak, uygulama robot simülasyonları ve sensör sistemlerinin nokta bulutları ve dışbükey gövdeleri ile etkileşim için kullanılabilen Unity çerçevesiyle sınırlı etkileşimi destekler. Unity, bir veya daha fazla robotun

sensör bilgilerini okur ve robotun bir oyuncu olduğu gerçek çalışma koşullarını içeren modelini oluşturur, yapay zekâ davranışı Unity tarafından sağlanır, bu davranış daha sonra bu davranışı gösterecek olan fiziksel robota geri gönderilen komutlara çevrilir.

Şekil 33'de Unity görselleştirmesi ile çalışan uygulamanın ekran görüntüsü görünmektedir. Bu şekilde, insan noktası bulutu kırmızı, konveks gövde ise yeşil olarak belirmektedir. Görselleştirme arayüzü sadece denetim amaçlıdır, bu nedenle robotun yakınındaki insan varlığını görselleştirmek için insan noktası bulutunun ve dışbükey gövdenin sınırlı bir alt kümesi kullanılır. Birlik grafikleri yüksek kalitededir ve sahnenin çalışma zamanında güncellenmesini zorlaştırır. Daha net görselleştirme için daha hafif bir aracın seçilmesi veya 2D bir arayüzün benimsenmesi gelecekteki araştırmaların ana hedefi olacaktır.



Şekil **34:** Geliştirilen Uygulama Aracılığıyla Kullanım Örneği Görselleştirmesi (Nikolakis ve diğerleri, 2018)

12. RİSK ANALİZ YAKLAŞIMLARI

Kitapta endüstriyel ve kolaboratif robotlar, uygulamalar ve uygulamalar sırasında gündeme gelebilecek çeşitli riskler hakkında bilgi verilmekte ve risklerin azaltımı ile risklerin oluşumu hakkında yapılması gereken risk analizlerinde dikkat edilmesi gereken hususlar ile bunlar için alınması gereken önlemlerin neler olabileceği konusunda bilgiler verilmektedir. Risk analizleri yapılırken, özellikle ISO/TS 15066'nın tavsiyelerine göre hareket edilerek, burada verilen limitler üzerinden hareket edilmiş, risk analizi ve risk azaltma önlemleri özetlenmiş, riskleri azaltmak için kullanılan genel yöntemlerin yanı sıra ana tehlikeler hakkında da bilgi verilmiştir. Bu bölümde, yapılan çeşitli araştırmalarda, robot/insan iş birliği sırasında robot insan temasında, tehlike yaratabilecek unsurlar ele alınmış, özellikle ISO/TS 15066 tarafından verilen eşik değerlerle uyumları ele alınmıştır.

Kobot/operatör iş birliği için yapılacak risk analizlerinde çeşitli yaklaşımlar kullanılmaktadır, ancak analiz sonuçları her bir robotun kullanıldıkları uygulamalarda aynı neticeyi vermediği anlaşılmıştır. FMEA ve FTA gibi geleneksel yaklaşımların, insan faktörleri ve tehlike kombinasyonları nedeniyle her zaman tehlikeyi yakalayamadıklarından HRC için uygun olmadıkları görülmüştür. Bu yüzden de robotik uygulamalarda tehlike tanımlamasını iyileştirmek için resmi doğrulama yöntemleri tercih edilmektedir. Bu yöntemler, operatör, ekipman veya verimlilik ile ilgili potansiyel tehlikeleri belirlemek ve değerlendirmek için bir dizi toplantı ve beyin fırtınası sürecinden oluşan HAZOP gibi teknikleri tamamlamak için uygulanabilir. Buradaki amaç deneyimli kullanıcılardan ve deneyimli güvenlik mühendislerinden mümkün olduğunca fazla bilgi almaktır. Bazı durumlarda, kontrolle ilgili kusurları tanımlamak için, sistemin kontrol yapısının bir modelini oluşturan STPA kullanılıp, yarı resmi veya resmi çözümlerin bir kombinasyonu halinde robotik konulardaki güvenlik sorunları ele alınabilir. STPA ve HAZOP gibi yaygın kullanılan yaklaşımlar ise her ne kadar biçimsel çözümlerle birlikte kullanılırlarsa da ancak tehlike tanımlama ve güvenlik tasarımı için genel bir çerçeve oluşturabilirler. Robotun davranışını tanımlamak için durum çizelgeleri kullanılarak, HAZOP'la birlikte, potansiyel tehlikeleri, nedenlerini ve ciddiyetlerini belirlemek için UML modellerine ilişkin diyagramların da kullanıldığı örnekler mevcuttur.

HRC uygulamalarında, güvenlik analizlerinde kullanılan yaklaşımlardan biri de SAFER-HRC metodolojisidir. Metodoloji, operatörler ve robotlar arasındaki öngörülebilir istenen ve istenmeyen etkileşimleri (hatalar) araştırmak için resmi doğrulama tekniklerine dayanmaktadır.

2012 yılında İngiltere'de yapılan ve hazırlanan (HSE) Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive Report'ta yayınlanan Collision and Injury Criteria When Working With Collaborative Robots başlıklı makalede, robotun insana çarpması sırasında insan üstündeki koruma ekipmanını test etmek için CEN/TC 162, elektrikli kapılar için kabul edilebilir çarpma değerlerini içeren BS EN 12453:2001 standartlarından faydalanılarak, çarpışma sırasında, insan vücudundaki, darbe kuvveti, sıkışma, darbe, ezilme veya kırılma konusundaki tavsiyeleri incelenmiş ve basınç, etki, darbe, kırma kuvvetleri üzerine araştırmaların mevcut durumu ve çarpma sonrasında vücut bölgelerindeki etkilerine ilişkin değerlendirmeler üzerinde durulmuştur.

Tablo 16'de, ISO/TS 15066 taslağından alınan değerlerin, CEN/TC 162 taslağından alınan değerlerle karşılaştırması gösterilmektedir. ISO/TS 15066 taslağı için seçilen değerlerin, CEN/TC 162'de önerilen değerlerin neredeyse hepsinden daha düşük olduğu görülebilir, bu da kuvvet seviyelerinin temkinli seçildiğini gösterir. ISO/TS 15066 taslağında insan vücuduna ilişkin çeşitli kategorilerin, CEN/TC 162 belgesinde birebir eşdeğerlerinin olmadığı görülür, CEN/TC 162 sadece vücut bölgelerindeki kırılma/başarısızlık verilerini kullanma eğilimindeyken, ISO/TS 15066 ağrı eşiklerini ve cilt / et hasarını dikkate almaktadır. CEN/TC 162'deki değerler, standarttaki referanslar listesinin Ek 1'inde olduğu gibi, verilen referanslarla bir dizi araştırma kaynağından toplanmıştır.

Tablo 17: Taslak CEN/TC – 162 ve Taslak ISO/TS-15066'Dan Kuvvet Sınır Değerlerine Yönelik Bazı Karşılaştırma Değerleri (HSE, 2012)

	Level of injury resulting from impact force ranges (N)		
Body area	**CEN/TC-162 Severe / moderate**	**CEN/TC-162 Slight or no injury**	**ISO/TS 15066* Injury criteria**
Skull top / forehead impact	600 to 11000N	<1000N	175N
Face	900 to 5500	<100	90
Neck (front/larynx)	700	<100	35
Chest / ribs	580 to 8500	<500	210
Belly / abdominal organs	1000 to 4000	800 to 2000	160
Back	2000 to 5000	<2000	250
Upper arm / elbow joint	2000 to 4000	1700	190
Lower arm / hand joint	500 to 3800	500	220
Thigh / knee	2600 to 10000	1000 to <5000	250
Lower leg	900 to 8000	<1000	170
Feet / toes / joint	130 to 1300	Not listed	160

**Level of injury is defined in ISO/TS 15066 as: 'In the established main and individual body regions according to Table 1, only those stresses on the skin and underlying connecting or muscle tissue may occur where there was no deeper skin/tissue penetration accompanied by lacerations or abrasions, fractures or other skeletal damages. ... Under no circumstances a risk for injuries with higher severity than category 1 of the Abbreviated Injury Scale (AIS1) and more severe than with the codifications for surface injuries of the ICD-10-2006 can be tolerated.'*

ISO / TS 15066 taslağı sınır değerlerinin, Yolcu Koruma ve Raylı Sistemlerde Çıkış (OPERAS) projesi için raporda bulunan tolerans değerleri ile bazı karşılaştırmalar Tablo 18'da verilmiştir. Örneğin, ISO / TS 15066'da kuvvet değerleri Newton olarak verilirken, OPERAS projesi, toleransı g- kuvvet veya maksimum fiziksel yer değiştirmeyi mm cinsinden vermiştir.

Tablo 18: Taslak ISO/TS-15066 ve Diğer Literatür Kaynaklarından Kuvvet Sınır Değerlerinin Karşılaştırılması (HSE, 2012)

Value from Draft ISO/TS 15066[1]		*Value from OPERAS report*	
Criteria description	*Value (N)*	*Criteria description*	*Value[4] (mixed units)*
Skull/Forehead CSF[2]	130N	No skull fracture	<2200N
Skull/Forehead IMF[3]	175N	AIS 0-1, no concussion	<55g for 3ms
Face CSF	65N	AIS 0-1, no facial injury	<250N
Chest CSF	140N	AIS 0, no rib fracture	<=58mm chest deflection
Chest IMF	210N	Minor injury, sternum	3300N
Chest IMF	210N	25% chance of AIS 4 injury	5500N
Belly CSF	110N	AIS 0, no injury	<20mm deflection
Pelvis IMF	250N	AIS 0, no fracture, lateral	<4000N
Uppr arm/Eblw joint IMF	190N	Humerus, bending, female	1710N
Lwr arm/Hand joint IMF	220N	Ulna, bending, female	810N
Lwr arm/Hand joint IMF	220N	Radius, bending, female	670N
Hand/finger IMF	180N	No hand fracture	<5m/s impact velocity
Thigh / knee IMF	250N	Femur, bending, female	2580N
Thigh / knee IMF	250N	No dislocation	<8mm lng shear displacement
Lower leg IMF	170N	Tibia, bending, female	2240N
Lower leg IMF	160N	Fibia, bending, female	300N

[1] See Table 1 for a description of the injury criteria for the ISO/TS 15066 force values;
[2] CSF = Clamping / squeezing force
[3] IMF = Impact force
[4] Some values are not directly comparable because of the difference in the units, but are provided for making a qualitative comparison. Even where units are the same, the exact method and site of measurement is likely to be different, which limits comparisons.

Standartlar arasında, verilen kuvvet sınırlamaları arasındaki farklılıklardan dolayı bu durumlarda karmaşık bir durumun çıkması gündeme gelebilir. Zaman içindeki bu değişken kuvvet limiti 50 ila 500 mm'lik boşluklar için geçerli olup, değerler vücudun çoğu kısmı için geçerli gibi görünmektedir. Bununla birlikte, bu kuvvet sınırları için yaralanma kriterlerinin açıkça tanımlanmadığı, yani sınırın, ölümü, ciddi yaralanmayı veya hafif yaralanmayı önleyecek şekilde tasarlanıp tasarlanmadığı çok belirgin değildir.

Vücudun bir bütün olarak dinamik karmaşıklığına bir başka örnek, bir nesne ile çarpışmadan sonra başın veya vücut parçalarının hızlı hareket etmesi nedeniyle boyundaki kuvvetlerdir. Örneğin, mankenlerin kullanıldığı çeşitli çarpışma/darbe testlerinden başa gelen darbe kuvvetlerinin boyuna aktarılabileceği görülmüştür. Test mankeninden alınan kuvvet ölçümleri, test sırasında kafaya verilen darbe değerleri için boyuna gelen kuvvetler incelendiğinde, çevredeki nesnelerin kısıtlamalarının boyuna aktarılan kuvvetleri nasıl önemli ölçüde etkileyebileceği görülebilmektedir. Kafa ve gövde için kabul edilebilir bir darbe kuvveti belirleme girişimi, boyunda kabul edilebilir vuruntu kuvvetlerinin dikkate alınmasını gerektirecektir. Sonuç olarak, kafa ve gövde için verilen kabul edilebilir darbe kuvvetini belirlerken, bu kuvvetlerin boyunda oluşturabileceği darbe değerlerinin sınırlarını da belirleyeceği saptanmıştır, ancak bu tip vuruntu kuvvetlerinin ISO / TS 15066 taslağı içindeki kuvvet sınırlarında dikkate alınıp alınmadığı taslağı hazırlayanlarla karşılıklı teyit edilmemiştir.

- **İnsan Davranışının Güvenilirliği**

İşbirlikçi çalışma ortamında robot operatör teması mutlaka ortak çalışma alanında olacaktır. Robotun hareket eden kısmının konumu çok önemlidir, çünkü değişken veya bilinçsiz bir operatör hareketinde,

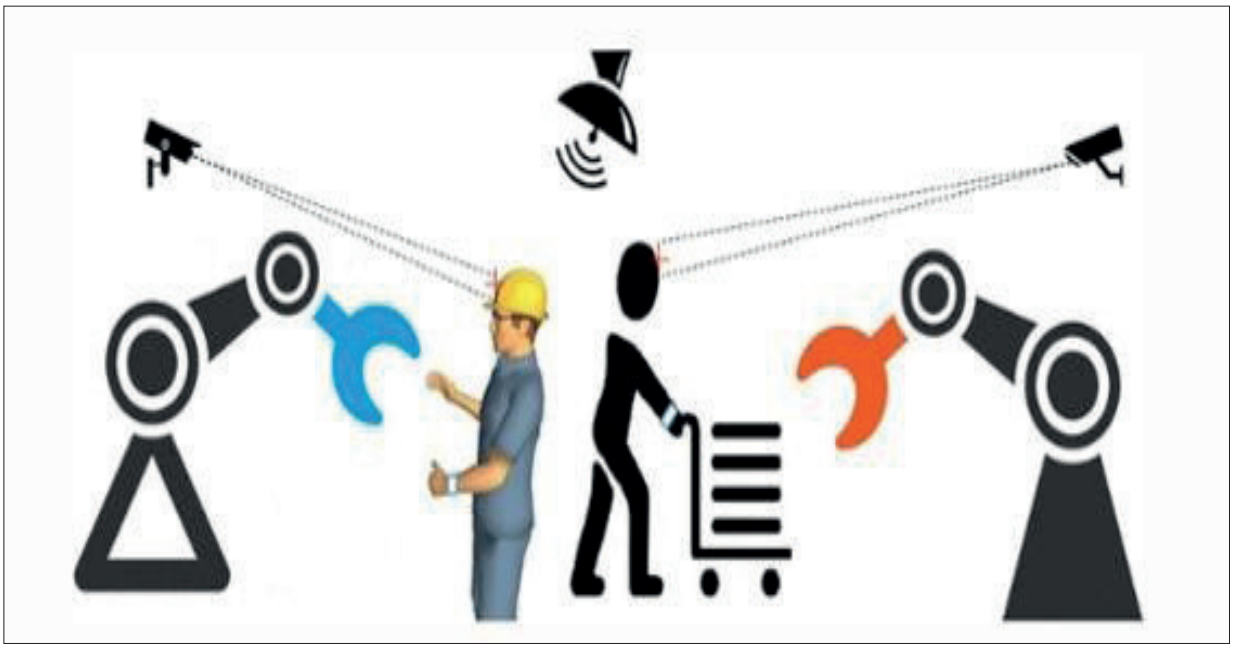
vücuttaki temas eden noktaya göre yaralanma veya ezilmenin seviyesi de farklı olacaktır. Bu istemsiz ve güvenilmez operatör davranışlarının detaylı bir Şekilde açıklanması gereklidir.

Kolaboratif robotlarda, geleneksel robotlardaki çitlerin kalkmasıyla beraber, insan/robot temas olasılığı daha çok arttığından, risk değerlendirmeleri yapılırken insan performans güvenirliliğinin de mutlaka değerlendirilmesinin gerekli olduğu görülmüştür. Çitlerin kalkmasıyla birlikte insanlarla robotların birlikte çalışıyor olmalarına rağmen daha az temas olduğu gözlenmiştir, çünkü çitlerdeki temasların veya kazaların birçoğunda istemeyerek te olsa insanların performansları etkili olmaktadır.

- **Güvenli Çalışma Alanı Paylaşımı İçin Temassız Modlar:**

ISO/TS 15066:2016, iş birlikçi çalışma alanında hareket eden robotlar için ISO 13855'te önerilen minimum güvenlik mesafelerinin dikkate alınmasını önermektedir. Her ne kadar, tasarım sırasında 15066'da önerilen sensörler kullanılıyor olmasına rağmen, yapılan çalışmalarda, birden fazla robot ve operatörün çalışmasının söz konusu olduğu iş birlikçi alanlarda, tasarım sırasında mutlaka robot ve operatörlerin göreceli konumları, hızları ve güvenli mesafeleri izleyip denetleyebilecek kademeli sensörlerin kullanılmasının gerekli olduğu saptanmıştır.

Yapılan başka bir risk analizinde, tozlu veya değişken ışık koşullarındaki, çalışma ortamlarında yetersiz görünürlük, iş birlikçi alanda çalışan gerek operatörlerin ve gerekse robotların mesafeleri ve konum bilgilerini algılamakta zorlandıklarını göstermiştir. Bu durumlarda kullanılan sensörlerin, seri, ani ve hassas tepkiler verebilecek özelliklerde olması gerektiği anlaşılmıştır. Robotların bu alanlarda, bir sisteme entegre vaziyette çalışmaları nedeniyle, buradaki sistemin de mutlaka EN ISO 13849-Bölüm 1 ve 2 ve EN ISO 13855 gibi ilgili güvenlik standartlarını karşılaması gerekir. Şekil 35'de görüldüğü gibi, birden fazla operatör ve robotun çalıştığı iş birlikçi ortamlarda, güvenlikle ilgili bileşenlerin uygun ortama göre seçilmiş ve hareketleri seri bir şekilde izleyebilir olmaları gerekir.



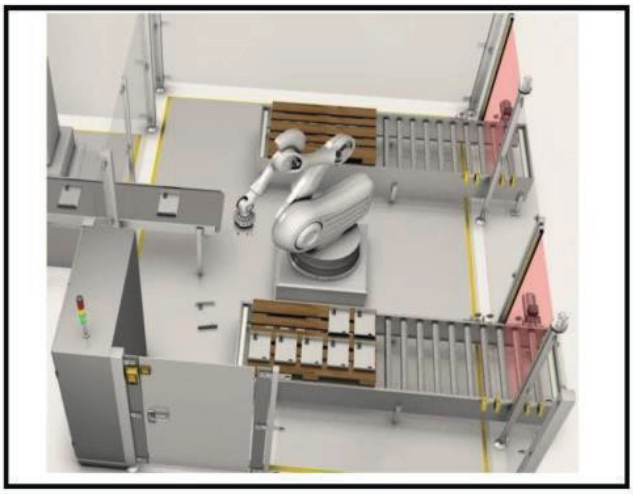
Şekil 35: Birden Fazla Tanımlamaya İhtiyaç Duyulan Çok Katılımlı Bir İş Birlikçi Çalışma Alanı Senaryosu (Khalid ve diğerleri, 2016a)

13. EKLER

EK 1: EN ISO 12100'e göre Robot Hücresi İçin Yapılan bir Risk Analizi:

EK 1 Excel Dosyasına ulaşmak için KARE KOD'u taratınız.

Robot Uygulaması Risk Değerlendirme Raporu



Fabrika :	ABC firması
İş istasyonunun bulunduğu bölüm :	Üretim Alanı
Makinenin/hattın ismi :	Montaj
Makine No	23
Değerlendirme Tarihi :	06/07/2020
Raporun Geçerlilik Tarihi :	05/07/2024
Operatör sayısı :	1
Kontrol nokta sayısı :	1
1 haftada kaç gün çalışılıyor :	5
1 günde kaç saat çalışılıyor :	8

Bu sorular sorulurken aşağıdakiler dikkate alınacaktır.

- Risk altında olan kişinin, yaşı, eğitim düzeyi, cinsiyeti
- Bu kişilerin sağlık gözetim kayıtlar, engelli, gebe veya emziren olması
- İşyerinin teftiş sonuçları, iş kazası, olay ve ramak kala kayıtları
- Ortam ve kişisel maruziyet düzeyi ölçüm sonuçları
- Acil durum planları ve patlamadan korunma dökümanı
- Varsa önceki Risk Değerlendirme raporları

İş İstasyonunda yapılan operasyonun ve varsa modifikasyonun açıklaması:

Bu dökümanın hazırlanmasında dikkate alınan direktif ve standartlar:

6331 sayılı ISG Kanunu ve ilgili diğer ulusal mevzuatlar

No	Ekip üyeleri, destek elemanı	İmza
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
No	İşyeri Çalışan Temsilcileri	İmza
1		

No	İş Güvenliği Uzmanı	Belge No	İmza
1			

No	İşyeri Hekimi	Belge No	İmza
1			

No	Bölüm Yöneticileri (İşveren veya işveren vekilleri)	Ünvanı	İmza
1		Şef	
2		Müdür	
3		Direktör	

ISG- Risk Değerlendirme Yönetmeliği madde 6-1-b gereği BSH ve İş Teftiş Müfettişleri dışındaki firma ve kişilerle paylaşılması yasaktır.
İSG Bölümü 02827484411 - Form numara: V4040 C Users Ofis-AnaPC Desktop Ali Orhan ,Rüştü Uçan Kitap Rev.14.docx içindeki Çalışma Sayfası

Kısım no	Kısım İsmi	EN ISO 13849-1
1	Robot Hücresi	d

Bu sorular cevaplanırken aşağıdakiler dikkate alınacaktır.
- Risk altında olan kişinin, yaşı, eğitim düzeyi, cinsiyeti
- Bu kişilerin sağlık gözetim kayıtlar, engelli, gebe veya emziren olması
- İşyerinin teftiş sonuçları, iş kazası, olay ve ramak kala kayıtları
- Ortam ve kişisel maruziyet düzeyi ölçüm sonuçları
- Acil durum planları ve patlamadan korunma dökümanı
- Varsa önceki Risk Değerlendirme raporları

Risk & Tehlikenin Tipi (EN ISO 12100'e göre)	Risk var mı?	Riskin oluşabileceği durumlar					Risk ile ilgili değerlendirme						CA raporundaki aksiyonlar sonrası arta kalan Risk ile ilgili değerlendirme						
		Nakliye, Taşıma, Montaj, Kurulum	Normal çalışma	Ayarlama, devre dışı bırakma	Temizlik	Bakım ve Arıza arama	LO -Olasılık FE -Bulunma sıklığı DPH -Olası yaralanm. şiddeti NP -Risk altındaki kişi sayısı				Risk Tahmini - Tehlike seviyesi değeri		CA- Uygunluk Değerlendirmesi Raporu Madde Numarası	LO -Olasılık FE -Bulunma sıklığı DPH -Olası yaralanm. şiddeti NP -Risk altındaki kişi sayısı				Risk Tahmini- Tehlike Seviyesi değeri	
	E						LO	FE	DPH	NP	HRN	Sonuç		LO	FE	DPH	NP	HRN	Sonuç
1. Mekanik Tehlikeler																			
1.1 ezilme, sıkışma, çarpma	E	x	x	x		x	8	2.5	15	1	300	Çok Yüksek Risk	Mekanik koruma, Kapı emniyet Şalteri,	0.03	2.5	15	1	1	Çok Düşük Risk
1.2 kesilme, kopma											0	n/a						0	n/a
1.3 dolanma, sarma											0	n/a						0	n/a
1.4 yakalanma, mahsur kalma	E	x	x	x		x	5	2.5	15	1	188	Çok Yüksek Risk	Mekanik koruma, Kapı emniyet Şalteri,	0.03	2.5	15	1	1	Çok Düşük Risk
1.5 saplanma, batma, delinme											0	n/a						0	n/a
1.6 boğulma											0	n/a						0	n/a
1.7 sürtünme											0	n/a						0	n/a
1.8 yüksek basınçtan etkilenme											0	n/a						0	n/a
1.9 parçanın fırlaması	E		x	x			5	2.5	2	1	25	Dikkate Değer Risk	Mekanik koruma	1	2.5	2	1	5	Çok Düşük Risk
1.10 kayarak veya takılarak düşme											0	n/a						0	n/a
2. Elektriksel Tehlikeler																			
2.1 çarpılma, şok, yanık	E		x	x		x	5	1	15	1	75	Yüksek Risk	EN 60204-1 uygun ekipman	0.03	1	15	1	0	İhmal Edilebilir Risk
2.2 elektrostatik boşalma											0	n/a						0	n/a
2.3 püskürtme, erime, diğer kimyasal prosesler sonucu kısa-devre, aşırı yüklenme veya termal radyasyon											0	n/a						0	n/a
3. Termal Tehlikeler																			
3.1 yanma, haşlanma, aleve temas, patlamaya maruz kalma											0	n/a						0	n/a

ISG- Risk Değerlendirme Yönetmeliği madde 6-1-b gereği BSH ve İş Teftiş Müfettişleri dışındaki firma ve kişilerle **paylaşılması yasaktır.**
İSG Bölümü 02827484411 - Form numara: V4041

Kısım no	Kısım İsmi	EN ISO 13849-1
1	Robot Hücresi	d

Bu sorular cevaplanırken aşağıdakiler dikkate alınacaktır.
- Risk altında olan kişinin, yaşı, eğitim düzeyi, cinsiyeti
- Bu kişilerin sağlık gözetim kayıtlar, engelli, gebe veya emziren olması
- İşyerinin teftiş sonuçları, iş kazası, olay ve ramak kala kayıtları
- Ortam ve kişisel maruziyet düzeyi ölçüm sonuçları
- Acil durum planları ve patlamadan korunma dökümanı
- Varsa önceki Risk Değerlendirme raporları

Risk & Tehlikenin Tipi (EN ISO 12100'e göre)	Risk var mı?	Riskin oluşabileceği durumlar						Risk ile ilgili değerlendirme						CA raporundaki aksiyonlar sonrası arta kalan Risk ile ilgili değerlendirme						
								LO -Olasılık FE -Bulunma sıklığı DPH -Olası yaralanm. şiddeti NP -Risk altındaki kişi sayısı				Risk Tahmini - Tehlike seviyesi değeri		CA- Uygunluk Değerlendirmesi Raporu Madde Numarası	LO -Olasılık FE -Bulunma sıklığı DPH -Olası yaralanm. şiddeti NP -Risk altındaki kişi sayısı				Risk Tahmini- Tehlike Seviyesi değeri	
	E	Nakliye, Taşıma, Montaj, Kurulum	Normal çalışma	Ayarlama, devre dışı bırakma	Temizlik	Bakım ve Arıza arama		LO	FE	DPH	NP	HRN	Sonuç		LO	FE	DPH	NP	HRN	Sonuç
3.2 çalışma ortamının soğuması yada ısınmasından dolayı oluşan tehlikeler												0	n/a						0	n/a
4. Gürültüden kaynaklı tehlikeler																				
4.1 İşitme kaybı (sağırlık), diğer zararlar (denge kaybı, dikkatsizlik, stres)												0	n/a						0	n/a
4.2 sinir bozukluğu												0	n/a						0	n/a
4.3 sesli uyarıların farkedilmemesinden kaynaklanan riskler												0	n/a						0	n/a
5. Vibrasyondan kaynaklı tehlikeler																				
5.1 sinir bozukluğu												0	n/a						0	n/a
5.2 vücutta travma												0	n/a						0	n/a
5.3 kemik, eklem ve damar rahatsızlığı												0	n/a						0	n/a
6. Radyasyondan kaynaklanan tehlikeler																				
6.1 yanma												0	n/a						0	n/a
6.2 gözün veya derinin zarar görmesi												0	n/a						0	n/a
6.3 üremeye etkisi												0	n/a						0	n/a
6.4 başağrısı v.b.												0	n/a						0	n/a
7.Malzemeden kaynaklanan tehlikeler																				
7.1 zehirli sıvı, gaz, buhar veya toza dokunulması veya yutulması (kimyasal riskler değerlenirmesi de yapılmalı)												0	n/a						0	n/a
7.2 yangın veya patlama (ATEX değerlendirmesi de yapılmalı)												0	n/a						0	n/a

ISG- Risk Değerlendirme Yönetmeliği madde 6-1-b gereği BSH ve İş Teftiş Müfettişleri dışındaki firma ve kişilerle **paylaşılması yasaktır.**
ISG Bölümü 02627484411 - Form numara: V4041

Kısım no	Kısım İsmi	EN ISO 13849-1
1	Robot Hücresi	d

Bu sorular cevaplanırken aşağıdakiler dikkate alınacaktır.
- Risk altında olan kişinin, yaşı, eğitim düzeyi, cinsiyeti
- Bu kişilerin sağlık gözetim kayıtlar, engelli, gebe veya emziren olması
- İşyerinin teftiş sonuçları, iş kazası, olay ve ramak kala kayıtları
- Ortam ve kişisel maruziyet düzeyi ölçüm sonuçları
- Acil durum planları ve patlamadan korunma dökümanı
- Varsa önceki Risk Değerlendirme raporları

Risk & Tehlikenin Tipi (EN ISO 12100'e göre)	Risk var mı?	Riskin oluşabileceği durumlar					Risk ile ilgili değerlendirme						CA raporundaki aksiyonlar sonrası arta kalan Risk ile ilgili değerlendirme						
							LO -Olasılık FE -Bulunma sıklığı DPH -Olası yaralanm. şiddeti NP -Risk altındaki kişi sayısı				Risk Tahmini - Tehlike seviyesi değeri		CA- Uygunluk Değerlendirmesi Raporu Madde Numarası	LO -Olasılık FE -Bulunma sıklığı DPH -Olası yaralanm. şiddeti NP -Risk altındaki kişi sayısı				Risk Tahmini- Tehlike Seviyesi değeri	
	E	Nakliye, Taşıma, Montaj, Kurulum	Normal çalışma	Ayarlama, devre dışı bırakma	Temizlik	Bakım ve Arıza arama	LO	FE	DPH	NP	HRN	Sonuç		LO	FE	DPH	NP	HRN	Sonuç
7.3 biyolojik veya mikrobiyolojik durumlar (virüs/bakteri)											0	n/a						0	n/a
7.4 Çıkan atıktan dolaya çevreye karşı riskler											0	n/a						0	n/a
8. Ergonomik Tehlikeler																			
8.1 makinenin çalışanın niteliklerine ve kabiliyetine uygun olmaması											0	n/a						0	n/a
8.2 aşırı bedensel olarak çaba göstermesi											0	n/a						0	n/a
8.3 makinenin tasarımında insan anatomisine uygun olmayan duruş pozisyonu(el,kol, ayak ve bacak)											0	n/a						0	n/a
8.4 yetersiz aydınlatma veya görünmeyen bölgelerdeki riskler											0	n/a						0	n/a
8.5 insan hatasından kaynaklanan riskler											0	n/a						0	n/a
9. Enerjinin kesilmesi sonucu oluşan tehlikeler																			
9.1 elektrik enerjisinin kesilmesi											0	n/a						0	n/a
9.2 basınçlı havanın kesilmesi											0	n/a						0	n/a
9.3 basınçlı yağın kesilmesi											0	n/a						0	n/a
9.4 beklenmeyen çalışlma veya yanlışlıkla çalıştırma											0	n/a						0	n/a

Risk Değerlendirmesine katılan kişilerin parafları

Bölüm Yöneticisi paraf	Tarihi

İSG- Risk Değerlendirme Yönetmeliği madde 6-1-b gereği BSH ve İş Teftiş Müfettişleri dışındaki firma ve kişilerle **paylaşılması yasaktır.**
İSG Bölümü 02627484411 - Form numara: V4041

Risk Değerlendirme Metodolojisi

HRN = LO x FE x DPH x NP

LO – Olayın meydana gelme olasılığı	
0.033	Neredeyse imkansız
1	Çok zor olasılık
1.5	Zor olasılık
2	Olası
5	Muhtemelen
8	Mümkün
10	Yüksek İhtimalle
15	Kesin

FE – Tehlikeli bölgede bulunma sıklığı	
0.5	Yılda 1
1	Ayda 1
1.5	Haftada 1
2.5	Günde 1
4	Saatte 1
5	Sürekli

DPH – Yaralanma şiddeti	
0.1	Çizilme, sıyrılma
0.5	kesilme, yırtılma
1	Küçük kemik kırılması (parmak)
2	Büyük kemik kırılması (el, kol, bacak)
4	1 veya 2 parmak kaybı
8	El, kol, bacak kaybı, kısmen görme veya işitme kaybı
10	2 el, kol, bacak kaybı, tamamen işitme veya görme kaybı
12	Ciddi kalıcı hastalık
15	Ölümcül

NP – Tehlike altında kalan kişi sayısı	
1	1-2 kişi
2	3-7 kişi
4	8-15 kişi
8	16-50 kişi
12	> 50 kişi

HRN - Tehlike oranı değeri açıklaması

Key	HRN	Risk	Açıklama
	0-1	İhmal Edilebilir Risk	Mevcut durumda sağlık ve güvenliği tehlikeye atacak risk yok, ilave emniyet tedbirine ihtiyaç yok
	2-5	Çok Düşük Risk	Mevcut durumda sağlığı ve güvenliği tehlikeye atan çok az risk var, ilave olarak kayda değer bir emniyet tedbirine gerek olmayabilir. Personel koruma ekipmanları kullanılabilir ve eğitimlerle risk azaltılabilir.
	6-15	Düşük Risk	Az da olsa risk vardır. Emniyet tedbiri için gerekli kontrol ekipmanlarının kullanılması önerilmelidir.
	16-50	Dikkate Değer Risk	Emniyet tedbirinin alınmasını gerektirecek seviyede risk vardır. İlk fırsatta bu tedbirler uygulanmalıdır.
	51-100	Yüksek Risk	Acil olarak emniyet tedbirlerinin alınması gerekecek kadar potansiyel tehlike vardır. Bu tedbirler acil olarak uygulanmalıdır.
	101-500	Çok Yüksek Risk	Çok acil olarak emniyet tedbirleri alınmalıdır. İlgili yönetim birimleri haberdar edilmelidir.
	501-	Aşırı Yüksek Risk	Çok acil olarak emniyet tedbirleri alınmalı, yeterli kontrol tedbirleri alınıncaya kadar ekipmanlar kullanılmamalı, insanlar uzak tutulmalı ve ilgili yönetim birimleri haberdar edilmelidir.

EK 2: HRC Uygulaması

TÜV Avusturya, insan robot iş birliği için bütünleştirilmiş bir emniyet ve güvenlik konseptinin geliştirilmesinde dikkate alınması gereken hususlar ve temel gereklilikleri belirtmek için, **JOANNEUM RESEARCH ROBOTICS** Enstitüsü ve Magna Steyr Fahrzeugtechnik ile birlikte yaptıkları çalışmaları, teknik mekanizmalardan ve karmaşık ölçüm yöntemlerinden ayrı olarak bir rapor haline getirmiş ve raporda belirtilen basit yapıcı ve organizasyonel önlemlerin dahi insanlar ve robotlar arasındaki işbirliğindeki riskleri azaltmaya katkıda bulunabileceğini belirtmiştir.

Bu raporda, risk azaltmaların başlangıç noktasının, insan robot iş birliği ile gerçekleştirilen bir uygulamadaki, belirsiz ve net olmayan noktaların açıklığa kavuşturulmasını öneren EN ISO 12100'de önerilen risk analizi olması gerektiği işaret edilmiş ve HRC uygulamalarında riskli olacağı düşünülen hususlar birer birer incelenmiştir.

Üzerinde durulan iki farklı örnekte bir montaj işlemi sırasında risk azaltma ve risk analizi sırasında üzerinde durulması gereken temel hatlar anlatılmıştır.

Kuka ve Universal Robot firmaları tarafından üretilen robotların kullanıldığı bu iki çalışmanın her ikisinde de montaj işlemi yapılmakta ancak Kuka robotta montajı yapılan parça 250 gr olmasına karşın UR robottaki montajı yapılan parçanın ağırlığı 4500 gr'ı bulmaktadır. Uygulamadaki parçanın ağırlığının artması düştüğü veya robotla birlikte operatöre vurduğu andaki tehlike bir önceki örneğe göre daha büyük olacağından risk analizi detaylarında bu hususun da mutlaka göz önünde bulundurulması gerekir.

Çalışmada öncelikle, hedeflenen güvenlik konsepti oluşturulmuş (güç ve uygulanan kuvvetin azaltılması/denetlenmesi), robotun izleyeceği yol belirlenmiş ve robotu çalışması için uygun kıskaç ve koruyucular ile güvenilir koşullar (uyarı işaretleri, ışıklı sinyaller, robotla operatör arsındaki güvenilir mesafenin ayarlanması, robot üzerindeki keskin köşe ve kenarlardan kaçınma) hazırlanmıştır.

Risk Analizi

Her iki örnekte robot kolu, kontrol sistemi, robot aracı ve çalışma tezgâhı veya depolama ve malzeme taşıma üniteleri gibi teknik bileşenler mevcuttur. Robotun birlikte çalışacağı makine veya üretim hattının 2006/42 /EC Makine Direktifi ve kombinasyonunun da EN ISO 10218-2'da işaret edilen HRC uygulamalarına uygun olmaları gerekir. Doğal olarak robotun entegre edildiği üniteyle birlikte bu sistemin çalıştırılacağı ülke yasa ve yönetmeliklerine de uygun olması gerekir. EN ISO 12100 tavsiyelerine göre distribütör firma tarafından yapılması gereken risk analizinin dört temel adımı aşağıdaki gibidir:

Makine Limitlerinin Belirlenmesi:

Makine sınırları belirtilerek risk analizi incelemesinin kapsamı tanımlanır. Bu örnekteki montaj işlemi, robotla operatörün aynı iş birlikçi ortamda birlikte çalıştıkları bir ortamda gerçekleştirilmektedir. Bu değerlendirmeyi yaparken, mutlaka makinenin özellik ve performans değerleri yanı sıra, zamansal, mekânsal koşullar ile robotla birlikte çalışacak operatörün nitelikleri ile ilgili varsa sınır değerlerinin de belirtilmesi gerekir. Mekânsal sınırlar, makinenin hareket edebileceği alanları ve operatör için alan gereksinimini ve ayrıca yukarı ve aşağı makine ve istasyonlara ara yüzleri ifade eder. Geçici limitler örneğin makinenin hizmet ömrünü ve bakım aralıklarını tanımlar. Örnekte kullanılan UR5 (Universal Robot) robotun kullanım ömrü robot üreticisinin önerisine göre 35,000 saat olarak alınmıştır.

Risklerin Belirlenmesi:

Makinenin kullanımından dolayı operatörü için ortaya çıkan riskler, inceleme kapsamında Şeffaflık sağlanır sağlanmaz tespit edilebilir. Bu çalışmaya başlarken, firma içi veya dışı uzmanların, işbirlikçi çalışma uygulamasına yatkınlıkları ile yapılacak olan işin teknik ayrıntılarının da mutlaka incelenmesi yararlı olacaktır. Bu durumda tehlike altındaki kişiler sadece gerçek makine operatörleri değil, aynı zamanda teknisyenler, temizlik personeli veya üretim ortamının harici ziyaretçileridir.

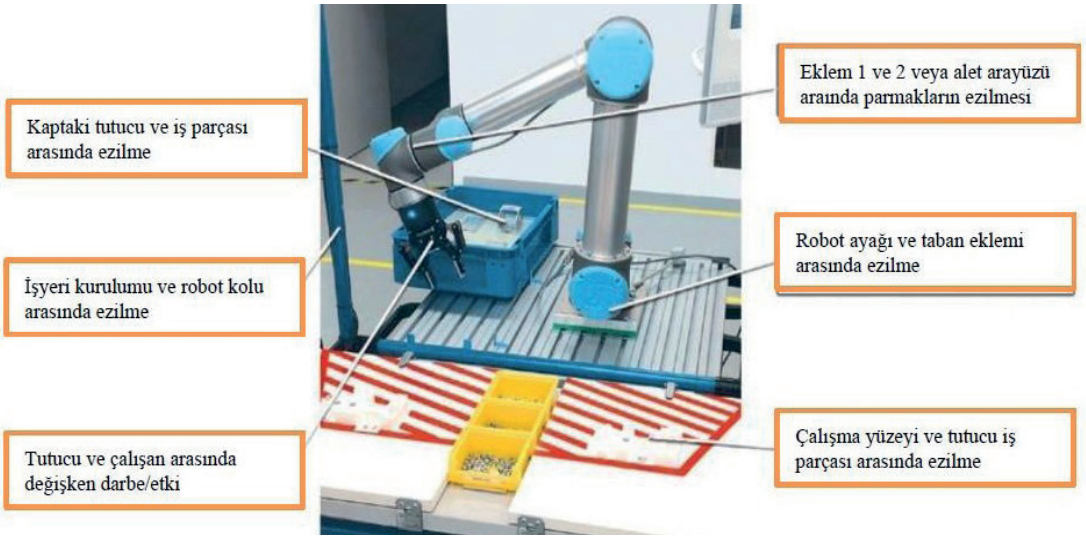


Şekil 35: Risk Analizi Prosedürü (TÜV Austria,2017)



Şekil 36: Bir HRC Uygulamasının Hizmet Ömrü Aşamaları (TÜV Austria, 2017)

Riskli bölgelerin belirlenmesi sırasında robot istasyonu veya robotun entegre olduğu sistemden kaynaklanabilecek olası mekanik, elektrik ve ergonomik riskleri de hesaba katmak yararlı olacaktır. Risk değerlendirmesi yaparken, sadece operatörlerin değil, tehlike altındaki kişiler sadece gerçek makine operatörleri değil, aynı zamanda bakım teknisyenleri temizlik personeli veya üretim ortamının olası ziyaretçileri de risk altında olabileceklerini hesaba katmak gerekir. Bunun dışında ortamdan veya diğer makinelerden gelebilecek çeşitli şiddetteki gürültünün HRC değerlendirmelerinde dikkate alınması gerekli değildir, ama yüksek bir iş monotonluğu varsa değerlendirmede ele alınmasında yarar vardır.



Şekil **37:** Tanımlanmış Çarpışma Riskleri (TÜV Austria, 2017)

Geleneksel robotlar etrafı çitlerle çevrilmiş güvenli alanlarda çalıştıklarından, robotlarla operatörlerin çarpışma riski yok denecek kadar azdır, ancak iş birlikçi ortamlarda robotla iş birliği yapan operatörün çarpışma olasılığı yüksektir. Şekil 35'te, örnek çalışmada gündeme gelebilecek olası çarpışma noktaları verilmektedir.

Risk Analizi ve Risklerin Değerlendirilmesi:

Riskler belirlendikten sonra değerlendirilmeleri gerekir. Tanımlama aşaması, değerlendirmeyi yapan kişilerin öznel bir muhakemesine dayanırken, tanımlanmış parametreler riskleri ölçmek için kullanılır ve bu aynı zamanda sürecin nesneleştirilmesi anlamına gelir. Tanımlanan her risk dört kritere göre değerlendirilebilir:

S: Riskin başlangıcında hasarın derecesi/boyutu, **F:** Bir insanın riske maruz kalma sıklığı ve süresi, **W:** Bir riskin oluşma olasılığı,

P: Riskin oluşumunun farkına vararak hasarın önlenelebilirliği,

Her bir risk bu kriterlerin her birine göre değerlendirilir. Çeşitli standartlar, bu amaç için farklı yöntemler ve ölçekler sağlar, bu nedenle bunların karşılıklı olarak uyumlu olması gerekmez. Grafiklerin temsili için tek bir kural geçerli olmayıp, bu grafik değerlerinin oluşması için aşağıda belirtilen tanımlar kullanılmıştır:

- S hasarının kapsamı, 0'dan (hasar yok) 4'e (geri döndürülemez hasar, vücut parçalarının kaybı, ölüm) bir bant aralığına sahiptir,
- F (frekans) sıklığı 1 (10 dakikadan daha kısa süreyle yılda birden az riske maruz kalma) ve 5 (saatte birden fazla riske maruz kalma) arasındadır. Bu nedenle, bir HRC uygulamasının sürekli çalışması sırasında bir dizi risk için en yüksek frekans seviyesi 5 kabul edilmelidir,
- W meydana gelme olasılığı için değerler 1 (ihmal edilebilir) ile 5 (çok yüksek) arasında varsayılır.
- Hasarın önlenebilirliği P, 1 (riskin ortaya çıkmasının ve kaçınma olasılığının tanınması) ve 5 (tanıma ve kaçınma imkansızdır) arasında tanımlanır,

Sözde toplu değerler daha sonra bu bireysel değerlendirmelerden, yani risk sınıfı ve risk öncelik numarasıyla hesaplanır.

Risk sınıfı: F+W+P

- *(RPN) Risk öncelik numarası= Risk sınıfı x S*

Bu çalışmadaki amaç, öncelik sınıfı tanımlanan riskin makul ve kabul edilebilir değerlere indirgenerek kabul edilebilir değerler altına çekilmesi ve nihai öncelikler göre risk azaltıcı önlemler almaktır.

Risk Azaltma:

Kararlaştırılan seviyenin üzerinde bir Risk Öncelik Sırası (RPN) ile derecelendirilen tüm riskler uygun önlemlerle azaltılmalıdır. Yapıcı önlemler, makinenin temel tasarımını veya işlevini değiştiren yapısal modifikasyonlarla ilgilidir. Teknik önlemler, teknik yapıya bağlı olarak elde edilir. Bunlar, bir insan-robot-iş birliğine ilişkin ek güvenlik cihazları veya sensörler olabilir, ancak aynı zamanda robotun kontrol sistemi aracılığıyla çıktı ve hız sınırlaması da olabilir.

RPN'ye bağlı olarak, kontrol teknolojisi önlemleri için teknik önlemin saat başına arıza olasılığını tanımlayan belirli bir güvenilirlik derecesi varsayılır. Bu varsayılan güvenilirlik derecesi EN ISO 13849-1'e göre Performans Seviyesi (PL) veya EN 61508 ve EN 62061'e göre Güvenlik Bütünlük Seviyesi (SIL) olarak belirtilmiştir. 30'luk RPN'si ile örnek risk, riski en az PL = c'lik bir Performans Seviyesine ve / veya maksimum saatte %0.0003 arıza olasılığına karşılık gelen SIL1 Güvenlik Bütünlük Seviyesine düşürmek için teknik bir önlemin kullanılmasını gerektirir. Bu önlemler uygulanırsa RPN 10'a düşürülür.

Probability of Dangerous Failure per Hour	PL	SIL (IEC 61508-1, high demand or continuous mode of operation)	Probability of Dangerous Failure per Hour (High demand or continuous mode of operation)
≥10^{-5} and <10^{-4}	a	No correspondence	
≥3×10^{-6} and <10^{-5}	b	1	≥10^{-6} and <10^{-5}
≥10^{-6} and <3×10^{-6}	c	1	≥10^{-6} and <10^{-5}
10-7 and <10-6	d	2	≥10^{-7} and <10^{-6}
≥10^{-8} and <10^{-7}	e	3	≥10^{-8} and <10^{-7}

Şekil 38: PL ve SIL Arasındaki İlişki (ISO 13849-1:2006'dan Alıntı)

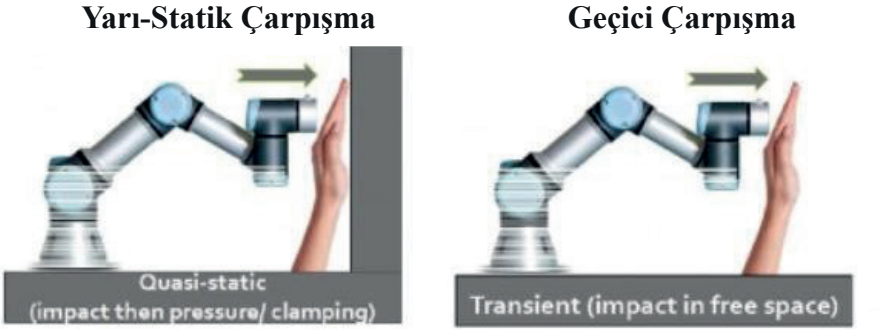
Mevcut örnekte, ek organizasyonel önlemlerle bu değer 8'e kadar azaltılabilir. Eğer bu o zaman kararlaştırılan maksimum değerin altındaysa, başka önlemler gerekli olmayacaktır. Riskleri azaltmanın çok sayıda farklı yolu olup etkileri de çok farklıdır.

İnsan-robot- iş birliğinin en belirgin özelliği, insan ve robot arasındaki potansiyel çarpışmada yatmaktadır. Risk analiz çalışmaları bu özel özellik göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Risk Azaltma Önlemleri:

Biyomekanik Limitlerin Esasları:

Bir risk analizinde insanlar ve robotlar arasındaki olası çarpışma senaryoları belirlendikten sonra, tehlike noktasından kaçınıldıktan sonraki en önemli risk azaltıcı önlem, operatör ve robot arasındaki çarpışmalar için geçerli olan kuvvet ve basınç sınırlarına uyularak, teknik bir önlem olarak kuvvetleri ve hızları azaltmaktır. ISO / TS 15066'ya göre, olası temas durumları iki kategoriye ayrılabilir: geçici ve yarı statik temas. Bunlar, öncelikle temas süresi açısından, ikinci olarak da etkilenen kişinin çarpışmadan sonra kendini kurtarmasının mümkün olup olmadığı konusunda farklılık gösterir. Yarı statik temas 0,5 saniyeden daha uzun sürer ve insan robot ile robotun çevresi veya parçaları arasında sıkışıp kalır. Bunun aksine, geçici temas maksimum 0,5 saniye sürer ve etkilenen kişi temastan sonra geri çekilebilir veya yoldan çekilebilir (bkz. Şekil 37- geçici ve yarı-statik)



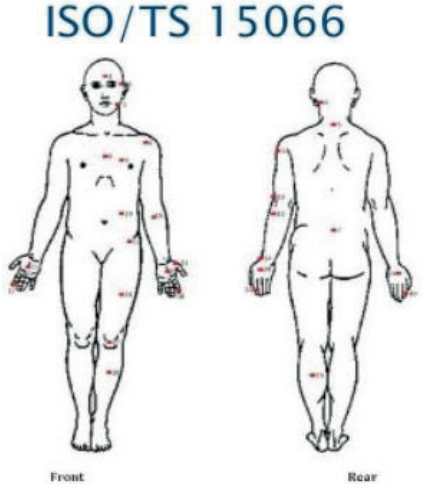
Şekil 39: Yarı Statik ve Geçici Çarpışma (Shea, R. Universal Robot Alıntı: https://www.gray.com/insights/creating-a-safety- culture-in-the-cobot-era-of-manufacturing/)

Yarı-statik bir çarpışmanın sınırlarını tanımlamak için, İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü (IFA) ve Üniversite of Mainz, 2014 yılında 100 test kişisiyle bir çalışma gerçekleştirdi ve etkili kuvvet ve basıncın bir fonksiyonu olarak, insanların ağrı eşikleri deneysel olarak vücudun 29 belirli bölgesi için belirledi.

Elde edilen sonuçlar, rasgele örneklem sayısının düşük olması nedeniyle herkesi eşit şekilde temsil etmeyecek olsa da (örneğin, erkekler- kadınlar arasındaki farklılaşma), belirlenen sınırlar Alman Sosyal Kaza Sigortası'nın (DGUV) bir bilgisinde ve teknik Şartname ISO / TS 15066: 2016 (E)'de yayımlanmıştır.

Bu çalışmaya ilişkin, örnek bir alıntı, Şekil 38'de grafiksel olarak gösterilmektedir. EN ISO 10218-1 / 2: 2012 standardını tamamlayan ISO / TS 15066: 2016, yarı-statik temas için açıklanan sınırlara ek olarak geçici temas için sınırlar da verir (bkz. Şekil 38). Yapıcı bir tahmin olarak geçici temas için, yarı-statik temastakinin iki katı yüksek bir limit varsayılır.

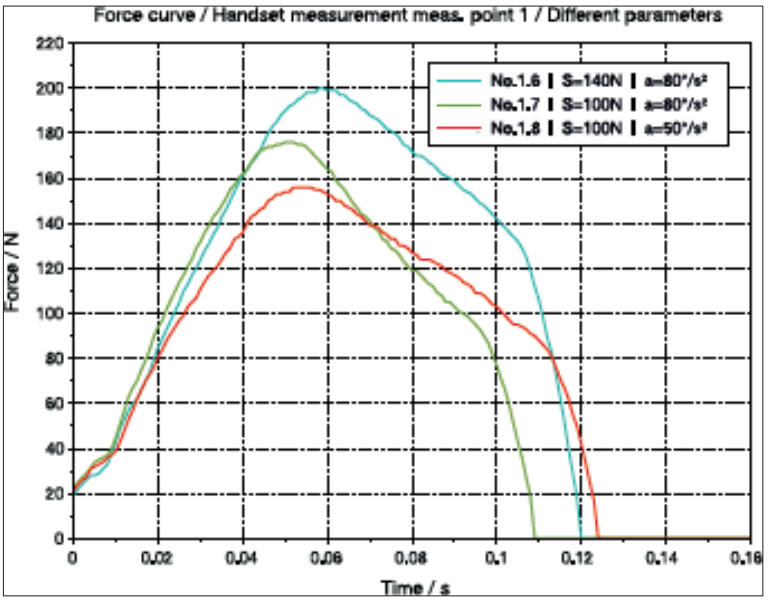
İnsanlarla robotlar arasında olası bir çarpışma sırasında, vücudun etkilenen bölgeleri için geçerli olan sınırların, kuvvetin ve basıncın her ikisi de ISO / TS 15066: 2016'ya göre aşılamaz. Küçük çarpışma alanları için basınç daha uygun olurken, etkili kuvvetler daha geniş alanlar için daha uygun olacaktır.

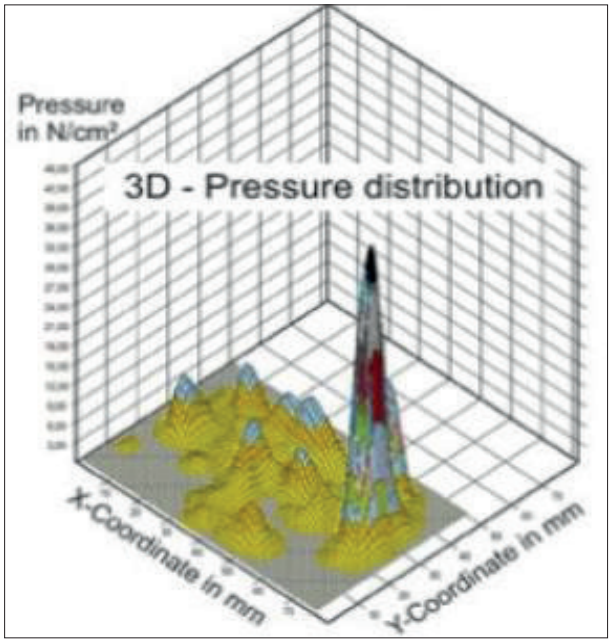


Body region		Specific body area	Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure [a] p_s N/cm²	Maximum permissible force [b] F	Maximum permissible pressure multiplier [c] P_T	Maximum permissible force multiplier [c] F_T
Skull and forehead [d]	1	Middle of forehead	130	130	not applicable	not applicable
	2	Temple	170		not applicable	
Face [d]	3	Masticatory muscle	120	65	not applicable	not applicable
Neck	4	Neck muscle	140	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	220	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	2
Chest	8	Sternum	120	140	2	2
	9	Pectoral muscle	170		2	
Abdomen	10	Abdominal muscle	140	110	2	2
Pelvis	11	Pelvic bone	210	180	2	2
Upper arms and elbow joints	12	Deltoid muscle	190	150	2	2
	13	Humerus	220		2	
Lower arms and wrist joints	14	Radial bone	190	160	2	2
	15	Forearm muscle	180		2	
	16	Arm nerve	180		2	
Hands and fingers	17	Forefinger pad D	300	140	2	2
	18	Forefinger pad ND	270		2	
	19	Forefinger end joint D	280		2	
	20	Forefinger end joint ND	220		2	
	21	Thenar eminence	200		2	
	22	Palm D	260		2	
	23	Palm ND	260		2	
	24	Back of the hand D	200		2	
	25	Back of the hand ND	190		2	
Thighs and knees	26	Thigh muscle	250	220	2	2
	27	Kneecap	220		2	
Lower legs	28	Middle of shin	220	130	2	2
	29	Calf muscle	210		2	

Şekil 40: Yarı Statik Temas için ISO / TS 15066: 2016 Uyarınca Biyomekanik Limitler (ISO TS 15066 Alıntı)

Gösterilen örnek biyomekanik limitler, endüstride HRC uygulamalarını uygularken iyi bir yönlendirme yardımcısıdır olup bir referans olarak kullanılabilirler. Modern, işbirlikçi robotların kontrol sistemlerinde kuvvet, çıktı ve hız limitleri parametrelendirilebilse bile, genel uygulama bağlamında etkili kuvvetlerin ve baskıların gerçek ölçümleri Şekil 37'de görüldüğü gibi tüm çarpışma durumları için yapılmalıdır. Böylece limit değerlere uygunluk kontrol edilmiş olacaktır.





Şekil 41: KDMG KOLROBOT Ölçüm cihazi kullanım

Şekil 42: Çarpışma yüzeyindeki kısmı basınç dağılımı (alıntı IFA)

Ölçüm Yöntemleri ve Yardımcıları:

Bu ölçümleri gerçekleştirmek için, her biri farklı ölçümler ve amaçlar için uygun olan farklı yöntemler ve ekipmanlar mevcuttur.

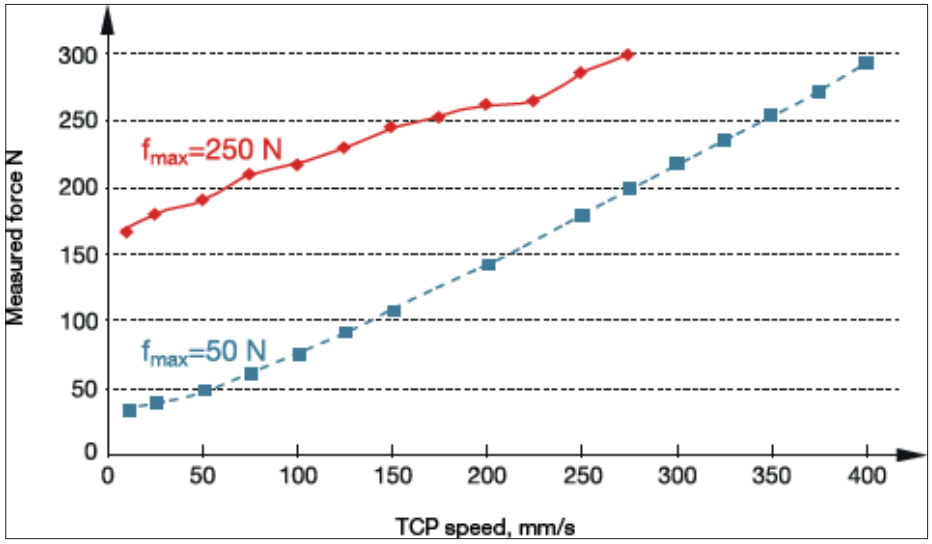
Kuvvet-basınç ölçüm cihazı

En bilgilendirici ölçüm sonuçları, (DGUV/Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung- German) Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü (IFA) tarafından geliştirilen KDMG-KOLROBOT gibi birleşik kuvvet-basınç ölçüm cihazları tarafından sağlanmaktadır. Bu ölçüm cihazı, biyofidelik bir alternatif olarak vücudun farklı bölgelerini, her biri ilgili yay sertliğine sahip gerçekçi bir şekilde simüle eder ve lokal çözünürlüklerinde basıncı ölçebilir.

Kuvvet ve basınç eğrileri tek bir çarpışma testinde belirlenebilir. Kuvveti belirlemek için ölçüm cihazının mahfazasına bir piezo yük hücresi yerleştirilir ve çarpışma yüzeyine bu kuvvetin uzamsal dağılımını ölçmek için bir sensör filmi yapıştırılır ve böylece basınç dağılımının hesaplanmasına olanak sağlanır. Farklı sensörlerden gelen veriler, analitik bir yazılım programında toplanır.

Şekil 42, bir çarpışma sırasında robotun uyguladığı maksimum kuvvetin, test edilen robotun kontrol sistemindeki kuvvet limitlerini (S) ve ivmeyi (a) kademeli olarak düşürerek nasıl azaltılabileceğini ve böylece HRC uygulamasının biyomekanik sınırlara eşlenmesini sağladığını göstermektedir.

Kuvvet ve basıncı bir zaman eğrisi üzerinden göstererek, yükün süresi belirlenebilir ve böylece, hangi noktalarda yarı statik veya geçici temas durumları için sınırın hesaba katılması gerektiğine dair bir karar alınabilir. Bazı robotların aktif ve pasif fonksiyonları, kuvvetlerin ve basınçların sadece kısa bir süre için aktif olduğu anlamına gelir.



Şekil 43: Duyarlılığı ve Gerçek Çarpışma Gücünün Ayarlanması, Robot Modeli Evrensel Robot UR3 (TÜV Austria, 2017)

Robotun kontrol sisteminde kuvvet limiti / duyarlılığının 140 ve 100 N olarak parametrelendirilmesine rağmen, aslında üç çarpışma testinde de daha yüksek tepe kuvvetlerine ulaşıldığı görülebilir.

Bu nedenle, robotun meydana gelen çarpışmayı yalnızca önceden belirlenmiş eşiğe ulaşıldığında algıladığı ve durdurma tetiklenene kadar sözde çalışmaya devam ederken kuvvet oluşturmaya devam ettiği varsayılabilir. Bu da robotun güvenlik ayarlarındaki parametrelerin yalnızca biyofidelik ölçümlerle kontrol edilmesi gereken proxy değerler olduğunu kanıtlamaktadır. (D. Kirschner, A. Schlotzhauer, M. Brandstötter: Validation of Relevant Parameters of Sensitive Manipulators for Human-Robot Collaboration. To appear in Proceedings of the 26th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region-2017)

İnsan Robot İşbirliğinin Programlanması

Teknisyenler, robot kontrol sistemindeki biyomekanik sınırlara uymak için güç, çıktı ve hız sınırlarının parametrelendirilmesi yoluyla insan-robot iş birliğindeki tüm programlama sürecini yeniden düşünmelidir. Robot için mümkün olan en kısa yolculuklar ve yüksek hızlarla döngü sürelerini en aza indirmek yerine, program tasarımının kendisi, performans üzerinde çok fazla olumsuz etki yaratmadan herhangi bir riskten kaçınmaya katkıda bulunmalıdır.

Aşağıdaki noktalar sadece bazı olası önlemlerdir;

- Potansiyel ezme ve bereleme yapabilecek noktalara geleneksel robotlarındakinden daha temkinli yaklaşılmalıdır,
- Kıskaç yayları, parmakların iş parçası ile kıskaç arasına sıkışmasını önlemek için kendi kendini kavrama yerinde olabildiğince dar tasarlanmalıdır,
- Kavrama sırasında, doğru nesnenin yakalanıp yakalanmadığını kontrol etmek için kavrama yayılımına göre kuvvet birikimi izlenmelidir,
- Ek çarpışma risklerini önlemek için yörüngeler çevredeki nesnelerden yeterli bir mesafede planlanmalıdır,
- Bir rota içindeki hız eğrisi, hareket yönüne ve engellerin ve kişilerin konumuna uyarlanmalıdır,
- Robot, kesmeye neden olabilecek çarpışmaları önlemek için mümkün olan her yerde düz yüzeylere dik açıyla yaklaşmalıdır.

HRC uygulamalarının programlanması, geleneksel endüstriyel robotlara kıyasla yeni yaklaşımlar gerektirir ve programcılar için yeni zorluklar yaratır. Personel eğitimi sırasında bu konular teker teker ele alınmalıdır.

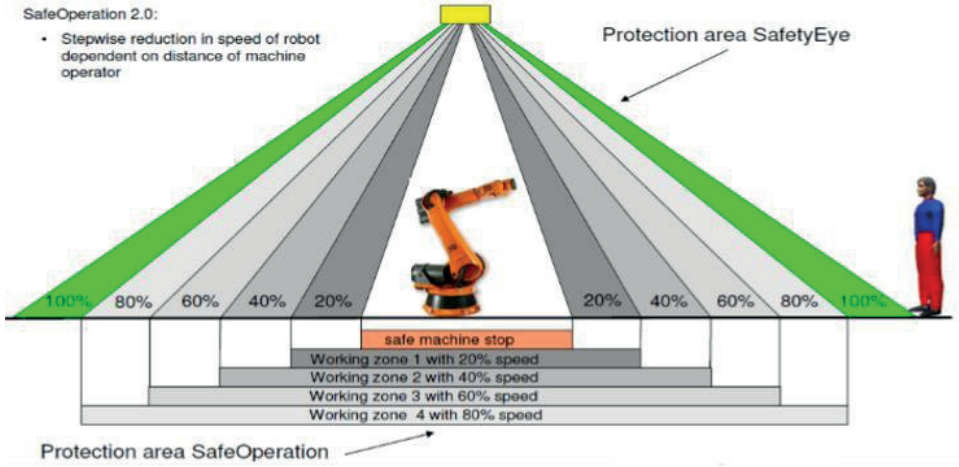
Yapıcı ve örgütsel güvenlik önlemleri:Teknik önlemlerin yanı sıra, her şeyden önce çarpışma kuvvetlerinin sınırlandırılması, riskleri azaltmak için yapıcı ve teknik önlemler de HRC uygulamalarının entegre güvenli tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Bir risk analizinin yapılandırılmış yaklaşımı, yapıcı veya örgütsel önlemlerle birleştirilebilecek riskleri de tanımlar. Bu risk azaltma önlemleri genellikle daha ucuzdur ve uygulanması daha kolaydır.

Basit konstrüksiyonlar, potansiyel kesme ve kırma noktalarına erişimi zorlaştırabilir veya hatta tamamen engelleyebilir, böylece bunların karmaşık teknik araçlarla izlenmesine gerek kalmaz Teknik izleme mümkün değilse veya potansiyel çarpışma noktalarında etkili olan kuvvetler ve basınçlar, örneğin sınırlı mekânsal erişilebilirliği nedeniyle ölçümlerle güvenilir bir şekilde belirlenemiyorsa, bu her durumda gereklidir.

Kavrayıcı uçlar gibi küçük temas yüzeylerinin alanını genişletmek, çarpışma kuvvetlerini daha geniş bir alana dağıtabilir ve dolayısıyla basıncı azaltabilir. Robot muhafazasındaki yumuşak zayıflatıcılar, tepe kuvvetlerinin aktarımını azaltır. Robot gövdesi boyunca bir kanaldaki kablo hatlarının döşenmesi, kablonun karışması nedeniyle sisteme zarar verme veya yaralanma riskini büyük ölçüde azaltabilir. En iyi ihtimalle, mümkün olduğunca harici bir kablo demetinden kaçınılmalı ve robot kolunun içinde ilerleyen kablo hatlarının kullanımı tercih edilmelidir.

İş Birlikçi Çalışma Alanı Ayrıntılar:

İş birlikçi robotların çalışma alanını uyarı işaretleri ile belirlemek ve robotun ortak çalışma alanı içindeki hareket aralığının optik olarak işaretlenmesi uygun önlemlerdir. Bunlar olası risklere dikkat çekmeye yardımcı olur ve bir riskin başlangıcını fark etme ve böylece herhangi bir hasar veya yaralanmadan kaçınma şansını artırır. Buna ek olarak, robotun çalışması, bunun sonucunda sık sık güvenlik kapatmalarıyla kesintiye uğramaz. Işıklı sinyal gibi durum göstergeleri, robotun çalışma durumunu gösterir ve sürpriz unsurları önler.



Şekil **44:** İş Birlikçi Çalışma Hücresi (B.Mike., Kuka Roboticsty)

Ortak çalışma alanındaki kontrol panelinin mantıklı bir düzenlemesi, acil durdurma ekipmanına anında erişim ve arıza ve hata mesajlarına genel bakış sağlar. Etkilenen üretim alanında artan ziyaretçi trafiği varsa, HRC uygulamasının/uygulamalarının işbirlikçi alana erişim yetkili kişilerce sınırlandırılmalıdır. Doğrudan iş birliği alanı ve yapıcı tasarımı göz önünde bulundurulduğunda, genellikle küçük alanlar yerine büyük ve kare Şekiller yerine yuvarlatılmış alanlar tercih edilmelidir. Bir çarpışma durumunda, bu önlemler, mümkün olan en büyük kuvvet soğurma alanının yönlendirildiği ve böylece etkili enerji girişinin azaltıldığı anlamına gelir.

Yalnızca manuel bir montaj ortamında kullanılması planlanan bir cihazın geometrisi nedeniyle bir insan-robot-iş birliğinde kullanım için tamamen uygun olmadığını açıkça göstermektedir. Bileşenin geometrisi keskin kenarlı konturlarla sonuçlanır; bu, büyük olasılıkla cihaz ve robot üzerindeki iş parçası arasında bir elin ezilmesi durumunda, el alanı için biyomekanik sınırları önemli ölçüde aşan çarpışma basınçlarına yol açar. Bu basınçlar tek başına kuvveti ve hızı sınırlandırarak yeterince azaltılamayacağından, ekipmanın yeniden tasarlanması gerekir.

14. UYGULAMALAR

14.1. Endüstriyel Robot Kullanılan Makinelerde Risk Değerlendirmesi Yapılırken Dikkat Edilmesi Gereken Uyumlaştırılmış Standartlar ve Saha Uygulama Örnekleri

14.1.1. Uyumlaştırılmış Standartlar ve Standart Tipleri

Endüstriyel robot uygulamalarında risk değerlendirmesi yapılırken, sistemde kullanılmış olan acil durdurma butonu sayılarının yeterli olup olmadığı, robot hücresinin etrafını çeviren emniyet çitlerinin yerden yüksekliğinin uygun olup olmadığı, robot hücrelerine erişimi sağlayan kapıların üzerinde kullanılan arakilitleme tertibatlarının uygun seçilip seçilmediği, robotların Kategori 3 Pl d seviyesine göre doğru bir şekilde bağlantılarının yapılıp yapılmadığının kontrol etmek için uyumlaştırılmış standartlardan faydalanılmaktadır.

Uyumlaştırılmış standartların makine risk değerlendirmesi uygulamalarında neden önemli olduğunu anlamak için ilk olarak makine emniyeti ile ilgili her konuda doğru sonuca ulaşmak için başucu kitabı görevi gören 2006/42/AT makine emniyeti yönetmeliği incelenmelidir.

Makine emniyeti yönetmeliği uyumlaştırılmış standardı aşağıdaki şekilde tanımlar:

Uyumlaştırılmış Standard: Komisyon tarafından belirlenen işlemlere uygun olarak, Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN), Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CENELEC) veya Avrupa Telekomünikasyon Standardları Enstitüsü (ETSI) gibi standardizasyon kuruluşu tarafından kabul edilen teknik şartname

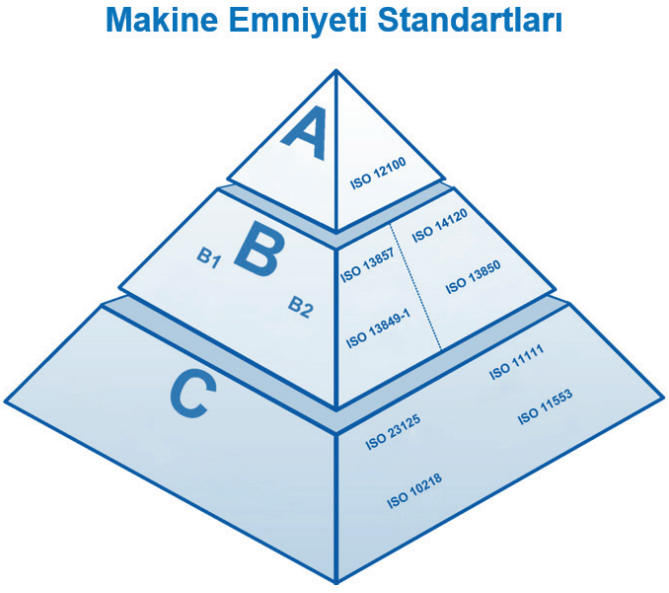
Makine emniyeti yönetmeliğinde yer alan ve uyumlaştırılmış standartları önemli konuma getiren madde ise Üçüncü Bölüm, 9. Madde'nin 2. Fıkrasındaki aşağıdaki açıklamadır:

Uyumlaştırılmış standarda uygun olarak imal edilmiş olan bir makinanın, bu tip bir uyumlaştırılmış standardın kapsadığı temel sağlık ve güvenlik kurallarına uygun olduğu kabul edilir.

Bu madde ile birlikte makine emniyeti yönetmeliği, bu standartlara göre uygun imal edilmiş bir makinenin **temel sağlık güvenlik kurallarına uygun olduğunu kabul etmektedir.**

Standart Tipleri

A, B ve C tipi olarak 3 farklı standart tipi bulunmaktadır.



Şekil 45: Standart Tipleri

A, B veya C tipi standartlar hakkında bir bilgi vermek gerekirse;

- **A tipi standartlar**, tüm makinelere uygulanabilecek temel kavramlar, tasarım ilkeleri ve genel hususları kapsayan temel emniyet standartlarıdır. Bu standarda örnek olarak EN ISO 12100:2010- Makinelerde Güvenlik- Risk değerlendirme ve risk azaltımı tasarımına yönelik temel konseptler ve gereksinimler standardı örnek verilebilir.

EN ISO 12100 standardı, üniversitelerde mühendislik bölümlerinde ilk sınıfta okutulan Mühendisliğe Giriş Dersi olarak düşünülebilir. Genel olarak birçok konu hakkında bilgi verilir ve öğrencileri bu konularda detaylı bilgi edinmek için diğer derslere yönlendirir.

A tipi bir standart olan EN ISO 12100 standardı da risk değerlendirmesi yapılırken konular özelinde risk değerlendirmesi yapan kişiyi diğer standartlara yönlendirir. Örneğin acil durdurma butonunun zeminden yüksekliğinin uygun olup olmadığını değerlendirirken bir B tipi standart olan *EN ISO 13850:2015- Makinelerde güvenlik- Acil durumlarda durdurma teçhizatı- Tasarım prensipleri* standardındaki bilgiler referans alınmalıdır.



Şekil 46: Bir Robot Hücresinin Girişinde Bulunan Acil Durdurma Butonu

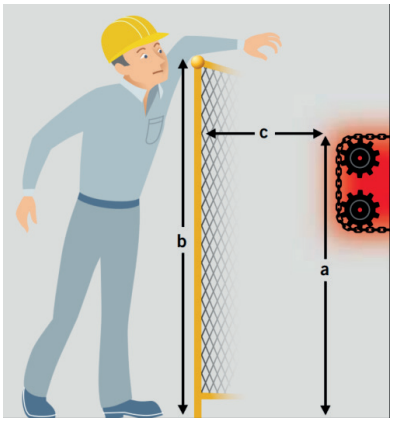
- **B Tipi standartlar,** makinelerin geniş bir yelpazesinde kullanılabilen korumanın emniyet hususları veya bir türünü kapsayan genel emniyet standartlarıdır.

B1 Tipi Standartlar, yüzey sıcaklıkları, emniyet mesafeleri, gürültü gibi belirli emniyet yönleriyle ilgilidir.

B1 tipi standarda örnek olarak *EN ISO 13857:2008- Kol ve bacakların ulaşabileceği bölgelerde tehlikenin önlenmesi için güvenlik mesafeleri* standardı örnek verilebilir.

Bu standart, risk azaltımı amaçlı robotların çalıştığı tehlikeli alana erişimi engellemek için etrafına çevrilen emniyet çitlerinin zeminden yüksekliği, tehlikeli bölgeye olması gereken emniyet mesafesi uzaklığı ve emniyet çitlerinin üzerindeki açıklıkların boyutları ile ilgili bilgiler içerir.

Aşağıda EN ISO 13857 standardı referans alınarak hazırlanmış bir görsel bulunmaktadır:



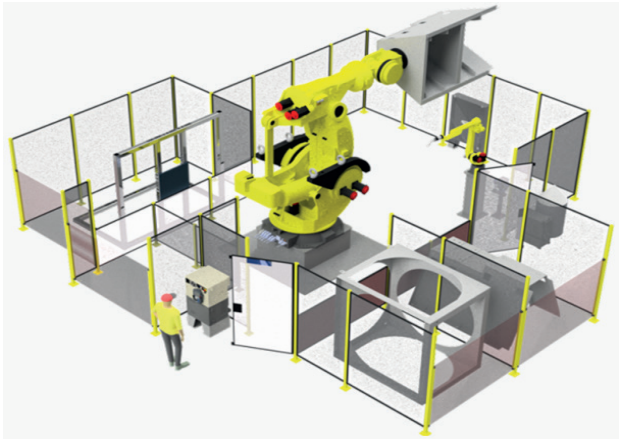
Şekil 47: EN ISO 13857'e göre Koruyucu Yapıların Üzerinden Erişim (Laurent Giraud, Ph. D., 2009)

B2 Tipi Standartlar; çift el tertibatları, arakilitleme cihazları, muhafazaların tasarımı gibi konularla ilgilidir.

B2 tipi standarda örnek olarak EN ISO 14120:2015- Makinalarda güvenlik- Mahfazalar- Sabit ve hareketli mahfazaların tasarımı ve yapımı için genel gereklilikler standardı örnek verilebilir.

Bu standart, risk azaltımı amaçlı robotların çalıştığı tehlikeli alana erişimi engellemek için etrafına çevrilen muhafaza tiplerinin tasarımları ile ilgili bilgi vermektedir. Risk değerlendirmesi yaparken sabit muhafaza, arakilitlemeli hareketli muhafaza ve genel olarak muhafaza tiplerinin uygun bir şekilde tasarlanıp tasarlanmadığı konusunda bu standart referans alınmaktadır.

Aşağıdaki görselde bir robot hücresinin etrafındaki sabit muhafazalar (sabit emniyet çitleri), arakilitlemeli hareketli muhafazalar (üzerinde kapının açık olduğunu sinyali ile robot hücresi içerisindeki tehlikeli hareketleri durduran kapı) gibi muhafaza örnekleri görülebilmektedir.



Şekil 48: Bir Robot Hücresinin Etrafındaki Muhafaza Örnekleri (GT Engineering., 2021)

- **C Tipi standartlar,** belirli bir makine veya makine grubu için ayrıntılı emniyet gereksinimlerini ele alan makine emniyet standartlarıdır.

Standartlar hazırlanırken, ilgili komitelerde aynı zamanda sektördeki makine imalatçıları ve entegratörlerde bulunmaktadır. Sektördeki firmalarında katıldığı bu çalışmalarda geçmişte ilgili makine tipi ile alakalı ölümlü iş kazaları ve ramak kala raporları da incelenerek bu tarz durumlarla tekrardan karşılaşılmaması için uygun risk azaltımı önlemleri önerilmektedir.

Bu standartlar genel olarak incelendiğinde sektörde sıkça kullanılan makine tipleri için yazıldıkları gözlemlenmektedir. Örneğin; konveyörler, hidrolik/eksantrik presler, enjeksiyon presleri gibi sektörde sıkça kullanılan makineler belirli bir standarda göre emniyetli bir şekilde imal edilmesi için C tipi standartların varlıkları çok önlemlidir.

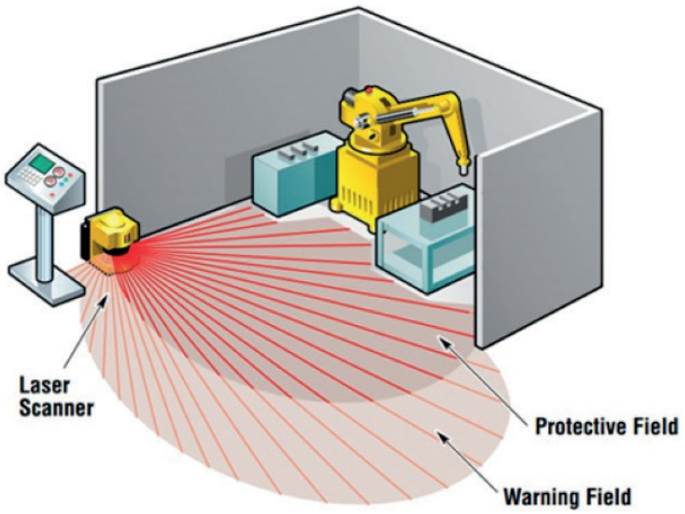
Bu standartlar incelendiğinde, A ve B tipi standartlara atıfta bulunulduğu gözlemlenebilir. Bu sayede örneğin bir robot hücresinde risk değerlendirmesi yapacak olan kişi EN ISO 10218 serisindeki standartları okuduğunda birçok konuda tekrar tekrar B tipi standartları açıp incelemesine gerek kalmamaktadır.

C tipi standarda örnek olarak konumuz ile alakalı olarak *EN ISO 10218-2:2011 Robotlar ve robotik cihazlar- Endüstriyel robotlar için güvenlik gereksinimleri- Bölüm 2 Robot Sistemleri ve Entegrasyonu* standardı örnek verilebilir.

Örneğin aşağıdaki görselde bulunan robot hücresine risk değerlendirmesi yapacak olan kişi,

Alan tarayıcı tarafından başlatılan emniyet ile ilgili durdurma emniyet fonksiyonunun, EN ISO 13849-1'e göre hangi Kategori ve PL seviyesine ulaşması gerektiğini tespit etmek için tekrardan EN ISO 13849-1 incelemesine gerek kalmamaktadır.

Bunun için *EN ISO 10218-2:2011 Robotlar ve robotik cihazlar- Endüstriyel robotlar için güvenlik gereksinimleri- Bölüm 2 Robot Sistemleri ve Entegrasyonu* standardı EN ISO 13849-1 standardına atıfta bulunarak "Kontrol sistemlerinin emniyet ile ilgili kısımlarının Kategori 3 PL d" seviyesine ulaşması gerektiğini söylemektedir.



Şekil 49: Bir Robot Hücresinin Girişinde Kullanılan Emniyet Alan Tarayıcısı

14.1.2. EN ISO 12100:2010- Makinelerde Güvenlik - Risk Değerlendirme ve Risk Azaltımı Tasarımına Yönelik Temel Konseptler ve Gereksinimler Standardı

Risk değerlendirmesi yapılırken başucu kitabı olarak yararlanılması gereken kaynakların başında bu standart gelmektedir. Bu standart ile ilgili önceki sayfalarda detaylı bilgi paylaşılmış bulunmaktadır. Paylaşılan bilgilere ek olarak EN ISO 12100 standardına pratik bir rehber olarak ISO/TR 14121-2:2012 teknik raporu bulunmaktadır.

Risk değerlendirmesi yapacak olan kişilerin mutlaka sahip olması gereken bu teknik raporu ISO resmî web sitesinde şu şekilde tanımlamaktadır:

ISO/TR 14121-2:2012, ISO 12100'e uygun olarak makineler için risk değerlendirmesi yapılması konusunda pratik rehberlik sağlar ve süreçteki her adım için çeşitli yöntem ve araçları açıklar. Riski azaltmak için kullanılabilecek farklı önlemlere örnekler verir ve karmaşıklık ve zarar potansiyeli açısından çok çeşitli makinelerde risk değerlendirmesi için kullanılması amaçlanmıştır. Hedef kullanıcıları, makinelerin tasarımı, kurulumu veya modifikasyonu ile ilgilenen kişilerdir (örneğin, tasarımcılar, teknisyenler veya güvenlik uzmanları).

Risk değerlendirmesindeki kritik önem taşıyan en önemli unsur, robot hücresinin kullanması beklenen veya etkileşimde bulunma ihtimali olan kişiler ile konuşmak ve bu kişilerin robot hücresi ile etkileşimde bulunduğu çalışmaları iyice anlamaktır.

Operatörler ile konuşulurken robot hücresi ile çalıştığı bir gün içerisinde hangi görevleri yerine getirdiği, hangi işlemleri gerçekleştirdiği sorulmalıdır. Operatör robot hücresi ile çalışma şeklini açıklarken risk değerlendirmesi yapan kişi dikkatli bir şekilde operatörü dinlemeli ve yaptığı işlerde risk oluşturabilecek noktaları not almalıdır.

İnsan psikolojisi göze alındığında, tanımadığı kişiler tarafından yaptığı işler ile ilgili sorular sorulması makine kullanıcıları tarafından endişe verici bir durum yaratabilir. Bu sebeple mutlaka ve mutlaka risk değerlendirmesi için makine kullanıcıları ile konuşmadan önce, risk değerlendirmesi gerçekleştirecek olan kişi kendini tanıtmalı, orada hangi amaçla bulunduğunu karşı tarafa iyi aktarmalıdır. Makine kullanıcıları, risk değerlendirmesi yapacak olan kişiye, onlardan aldığı bilgileri onları zor duruma sokacak bir çalışma için kullanmayacakları hakkında güvenmelidirler. Risk değerlendirmesinin, onların daha emniyetli ve daha verimli bir sisteme sahip olmaları için gerçekleştirildiği konusunda ikna olmalıdırlar.

Aynı şekilde bakım personeli, hattın temizliğini gerçekleştiren kişilerle de robot hücresi ile etkileşimde bulundukları noktalar hakkında konuşulmalıdır.

Bakım personelleri, hatalı makine/robot hücresi tasarımından kaynaklı olarak, enerji altında çalışma ihtiyacı duyabilmektedirler. Bakım operatörlerine robot hücresinde hangi arızalar meydana geldiğini ve ne kadar sıklıkla müdahalede bulunduklarını sorarak karşılaşabilecekleri riskler ile ilgili bilgi edinilebilir.

Risk değerlendirmesi işlemi her ne kadar teknik bilgiye dayalı bir çalışma olarak görülse de iletişim becerilerinin de büyük rol oynadığı bir çalışmadır. Makine kullanıcıları ile kurulacak olan iletişim ne kadar etkili olursa risk değerlendirmesinin sonucu da o kadar başarılı olacaktır.

14.1.3. EN ISO 13850:2015- Makinelerde Güvenlik- Acil Durumlarda Durdurma Teçhizatı - Tasarım Prensipleri

Bu standarda acil durdurmanın tanımı ile başlamak doğru olacaktır. Saha tecrübelerine göre operatörlerin makine/robotları normal durdurma amacıyla acil durdurma butonlarını kullanarak durdurduğu gözlemlenmektedir. Bu gibi konuların önüne geçmek için acil durdurmanın tam olarak ne anlama geldiği doğru bir şekilde anlaşılmalıdır.

Acil Durdurma (Emergency Stop):

İnsanların düştükleri tehlikeleri, makineyi veya devam etmekte olan işin başına gelecek zararı azaltmak veya ortaya çıkmasını engellemek için kullanılan bir fonksiyondur.



Şekil 50: Acil Durdurma ve Koruyucu Durdurma (Josep Plassa., 2025)

Tanımdan da anlaşılacağı üzere bu fonksiyon sadece acil durumlarda kullanılmalıdır. Makine imalatçıları acil durdurma ve normal durdurma komutları geldiğinde tasarladıkları sistemlerinin duruşunu farklı bir şekilde tasarlayabilirler.

Örneğin Endüstriyel Robotlardan bahsedilecek olursak, robot kontrolcülerinin elektrik devre şemalarına bakıldığında iki tip durdurma için bağlantı örneklerinin mevcut olduğu gözlemlenmektedir.

Genel olarak EMG input ve FENCE input olarak iki tip terminali olan robot, hangi terminalden durdurulduğuna göre daha farklı bir şekilde duruş performansı göstermektedir.

Örneğin EMG "input"a bağlı acil durdurma butonu basıldığında, robot üzerindeki eksenler kendini robot imalatçısının tasarladığı şekilde daha hızlı bir şekilde durdurur. Fakat endüstriyel robot imalatçıları bu hızlı duruşu tasarlarken robotun sürekli acil durdurma fonksiyonu ile durdurulmayacağını öngörerek robotlarını tasarlamaktadırlar. Robotu sürekli acil durdurma ile durdurmak, binilen binek otomobillerin sürekli el freni ile durdurulması ile eşdeğerdir ve robota zarar verir. Risk değerlendirmesi sırasında operatörün kullanımı için sağlanmış normal durdurma tertibatının sağlandığı kontrol edilmelidir.

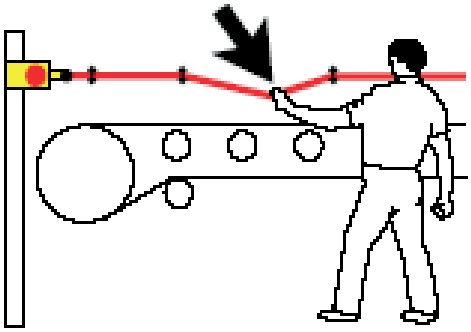
Acil durdurma ekipmanlarına aşağıdaki örnekler verilebilir:

- Avuç içi ile rahatça aktif edilebilecek butonlar



Şekil 51: Bir Acil Durdurma Butonu Örneği (Omron Electronics)

- Tel/Halat/İpli Acil durdurma Tertibatları



Şekil 52: Halatlı Acil Durdurma Tertibatı Örneği

- Acil Durdurma Çubukları



Şekil 53: Acil Durdurma Çubuğu

*Aşağıdaki acil durdurma butonları yanlışlıkla makinenin durdurulmasının büyük üretim kayıpları yaşanacağı uygulamalarda kullanılmaktadır. Fakat EN ISO 13850 standardı, zorunda kalmadıkça bu butonların kullanılmamasını tavsiye etmektedir.

Acil durdurma butonu, gerçekten acil bir durumda panik içindeki operatörün hızlıca el açıklığı ile basabileceği bir buton olmalıdır. Aşağıdaki kullanım el açıklığı ile rahatça butona basılmasını engellemekte olup, acil bir durumda butona daha geç basılarak mevcut tehlikenin daha geç bir şekilde durdurulmasına sebep vermektedir.



ŞEKİL 54: Etrafı Korumalı Tipte Acil Durdurma Butonu



ŞEKİL 55: Gömülü Yüzeye Sahip Acil Durdurma Butonu



Şekil 56: Gömülü Yüzey Acil Durdurma Butonu Örneği

- Acil durdurma cihazının aktüatörü KIRMIZI arka zemini ise SARI olmalıdır.



Şekil 57: Acil Durdurma Butonu

• Acil durdurma serbest bırakıldığında sistem manuel olarak resetlenmelidir. Bu işlem için ayrı bir reset butonu sağlanmalı ve reset butonuna basılması sistemi çalıştırmamalıdır.



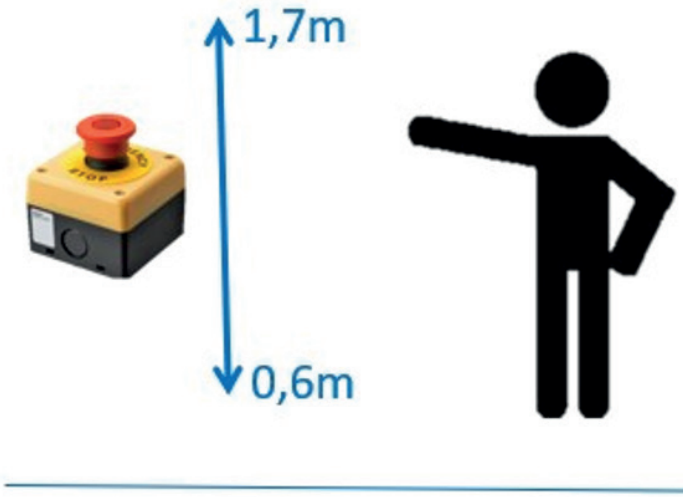
Şekil 58: Manuel Reset Örneği

• *EN 60204-1- Makinaların elektrik donanımı - Bölüm 1: Genel Kurallar standardına göre reset butonu rengi aşağıdaki renklerden birisi olarak seçilmelidir.*

IEC / EN 60204-1' de Tavsiye Edilen Reset Butonu Renkleri			
MAVİ	GRİ	BEYAZ	SİYAH

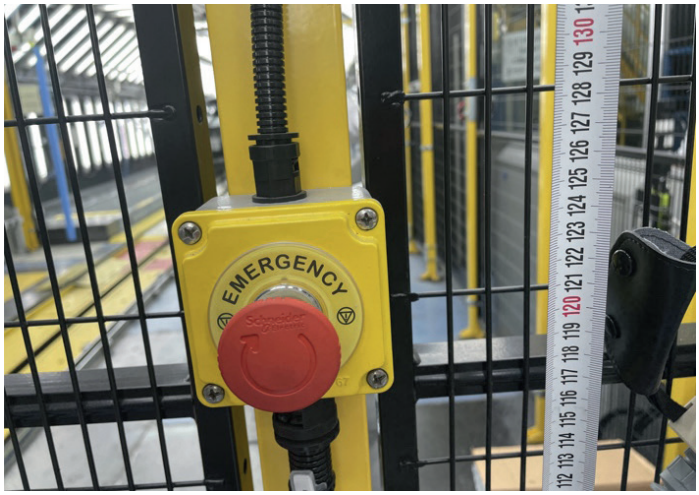
Şekil 59: Manuel Reset Buton Renk Tavsiyesi

• EN ISO 13850 standardına göre acil durdurma butonunun zeminden yüksekliği 0,6 metre ile 1,7 metre arasında olmalıdır.



Şekil 60: Acil Durdurma Tertibatı Tavsiye Edilen Zeminden Yükseklik (Erhan Eskicumalı., 2021)

• Risk değerlendirmesi çalışması yapan kişi, bir metre aracılığı robot hücresi üzerinde bulunan acil durdurma butonlarının zeminden yüksekliklerini ölçmelidir. Acil durdurma tertibatının zeminden yüksekliğinin bu ölçü aralığında olmasının sebebi, operatörün, acil bir durumda rahatlıkla acil durdurma butonuna kolayca erişebilmesinin sağlanması içindir.



Şekil 61: Acil Durdurma Zeminden Yükseklik Doğrulama Örneği

- Robot hücrelerinde risk değerlendirmesi yapılırken dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise yeterli acil durdurma tertibatının mevcut olup olmadığıdır. EN ISO 10218 standardında özel olarak belirtilmiş bir sayı bulunmamaktadır.

EN ISO 13850:2015- Makinelerde güvenlik- Acil durumlarda durdurma teçhizatı- Tasarım prensipleri standardına göre acil durdurma tertibatları:

- Bütün operatör kumanda istasyonlarında
- Robot hücresi giriş ve çıkış lokasyonlarına
- Makineye müdahale edilecek yerlerde
- İnsan ve makine etkileşimi beklenen her yere yerleştirilmelidir.

Bu sebeple operatör, bakım personeli, temizlik görevlisi ile onların çalışmaları üzerine konuşmak önemlidir. Risk değerlendirmesi yapılırken makine kullanıcılarından alınan bilgilere göre, yukarıdaki bilgiler dikkate alınarak, ilgili robot hücresinde yeterli acil durdurma tertibatı olup olmadığı hakkında yorum yapılabilir. Alınan bilgilere göre yeterli olmadığı düşünülürse risk azaltımı tavsiyesi olarak yukarıdaki bilgiler ile birlikte acil durdurma tertibatı eklenmesi tavsiyelerinde bulunulmalıdır.

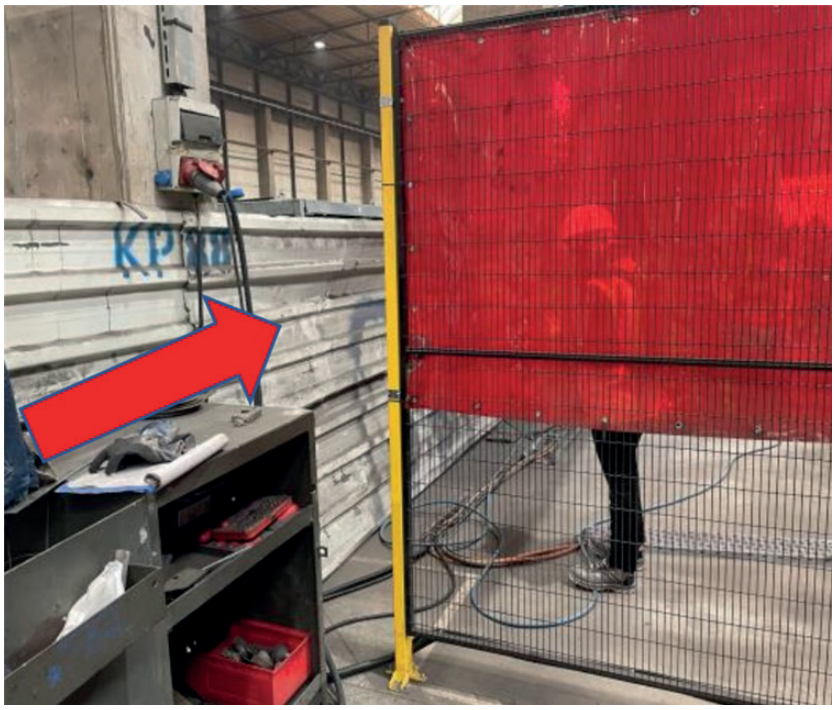
- Acil durdurma butonu kolayca teşhis edilebilir bir şekilde konumlandırılmalıdır, örneğin aşağıdaki görseldeki robot hücresinin içerisinde konumlandırılan acil durdurma butonu, etrafındaki kaynak perdesinden dolayı kolayca teşhis edilememektedir.



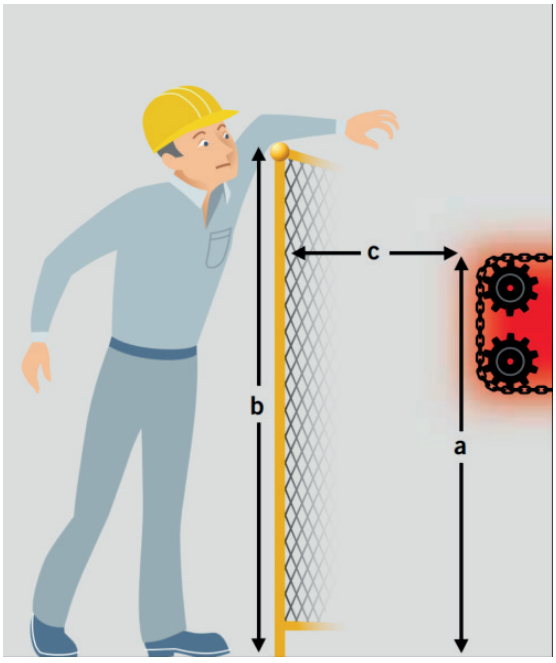
Şekil 62: Yanlış Acil Durdurma Butonu Uygulaması

14.1.4. EN ISO 13857- Kol ve Bacakların Ulaşabileceği Bölgelerde Tehlikenin Önlenmesi İçin Güvenlik Mesafeleri

- Bu standarda acil durdurmanın tanımı ile başlamak doğru olacaktır. Saha tecrübelerine göre operatörlerin makine/robotları normal durdurma amacıyla acil durdurma butonlarını kullanarak durdurduğu gözlemlenmektedir. Bu gibi konuların önüne geçmek için acil durdurmanın tam olarak ne anlama geldiği doğru bir şekilde anlaşılmalıdır. Bu standart, tehlike alanlarını üst uzuvlardan uzak tutmak için tespit edilen uygun emniyet mesafelerini belirlemek için kullanılır.
- Standartta ayrıntılarıyla açıklanan mesafeler, ek yardım almadan ve farklı erişim durumları için belirlenen koşullar kapsamında tehlike bölgelerine ulaşmaya çalışan kişilere odaklanır.



Şekil 63: Uygunsuz Emniyet Çiti Tasarımı

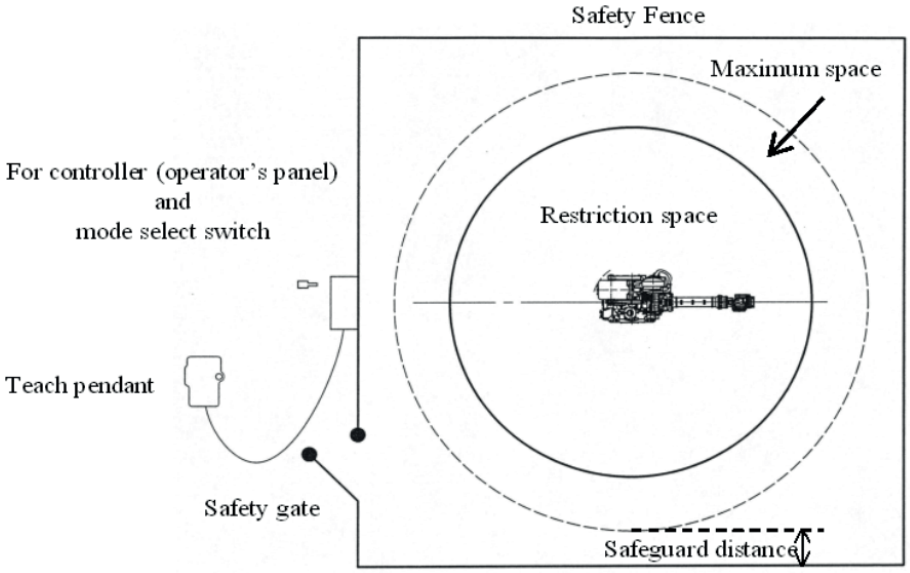


Şekil 64: EN ISO 13857'e göre Koruyucu Yapıların Üzerinden Erişim (Laurent Giraud, Ph. D., 2009)

Örneğin aşağıdaki robot hücresinin üstten görünüş çiziminde gözüken “safeguard distance” yani içerideki robotun erişebileceği azami mesafe ile emniyet çiti arasında kalan mesafe 350 mm olsun.

Robotun “gripper” veya “end effector” olarak geçen en uç kısmının ise robot çalışırken azami 2000mm’ye çıktığı bilgisinin teknik ekip tarafından paylaşıldığını varsayalım.

Risk değerlendirmesi çalışması yapılırken, çalışmayı yapan kişinin metre ile emniyet çitinin yüksekliğini 1800mm olarak ölçtüğünü varsayalım.



Şekil 65: Bir Robot Hücresi ve Emniyet Çitinin Emniyet Mesafesi Örneği (FANUC, Safety Manual)

Bütün bu bilgiler ile birlikte emniyet çitinin zeminden yüksekliğinin uygun olup olmadığı aşağıdaki tabloya bakılarak doğrulanabilir.

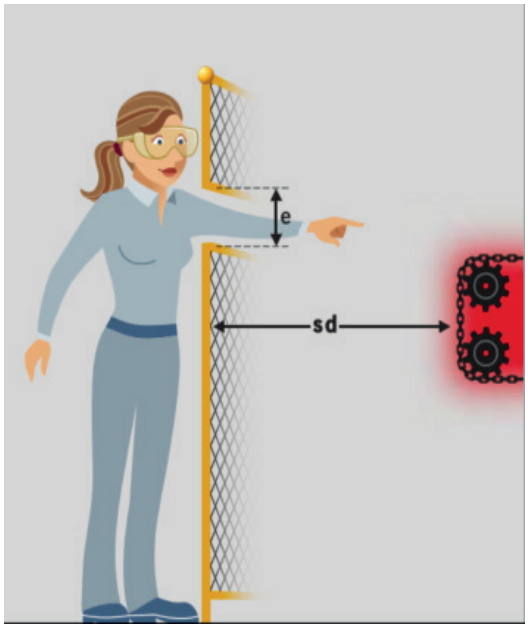
Tehlikeli alanın yüksekliği a (mm)	Tehlike alanına olan yatay mesafe C (mm)								
2500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2400	100	100	100	100	100	100	100	100	0
2200	600	600	500	500	400	350	250	0	0
2000	1100	900	700	600	500	350	0	0	0
1800	1100	1000	900	900	600	0	0	0	0
1600	1300	1000	900	900	500	0	0	0	0
1400	1300	1000	900	800	100	0	0	0	0
1200	1400	1000	900	500	0	0	0	0	0
1000	1400	1000	900	300	0	0	0	0	0
800	1300	900	600	0	0	0	0	0	0
600	1200	500	0	0	0	0	0	0	0
400	1200	300	0	0	0	0	0	0	0
200	1100	200	0	0	0	0	0	0	0
0	1100	200	0	0	0	0	0	0	0
	Ayırıcı koruma tertibatlarının yüksekliği b (mm)								
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2500

Şekil 66: EN ISO 13857 Tablo 1 (SICK, Güvenli Makina Kılavuzu, 2015)

Tablodan çıkan sonuca göre sahadan alınan bilgilere göre emniyet çiti ile robot çalışma alanı arasındaki mesafe asgari 600mm olmalıdır. Risk azaltımı amaçlı kullanılan emniyet çitinin yüksekliği EN ISO 13857’ye uygun değildir.

Bu durumda risk azaltımı amaçlı emniyet çitinin yüksekliğinin arttırılması veya emniyet çitinin 350mm mesafeden 600mm mesafeye çekilmesi tavsiye edilebilir.

EN ISO 13857 standardı ayrıca emniyet çitlerinin üzerindeki veya tehlikeli bölgeye erişimi engelleyen herhangi bir muhafazanın üzerindeki açıklıkların boyutları ile ilgili de tavsiyelerde bulunmaktadır.



Şekil 67: EN ISO 13857 Açıklıklar Örnek Görseli (Laurent Giraud, Ph. D., 2009)

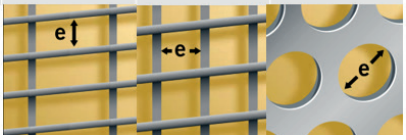
Örneğin aşağıdaki uygulamada emniyet çitinin arkasında parmak sıkışma olan tehlikeli bölgeye olan uzaklığın 180mm olduğunu varsayalım. Bu uzaklık risk değerlendirmesi çalışması yapılırken, çalışmayı yapan kişi tarafından bir metre aracılığı ile rahatça ölçülebilir.



Şekil 68: Tehlikeli Bölgeye Açıklık Üzerinden Erişim Örneği

Tehlikeli ilk sıkışma bölgesine uzaklığın yanında açıklığın şekli ve ölçüsü de önemlidir. EN ISO 13857'e ait aşağıdaki tablo incelendiğinde 3 adet açıklık tipinden bahsedilmektedir. Yarık, Kare, Daire tipinde 3 açıklık bulunmaktadır. Yukarıdaki görseldeki açıklık Kare tipinde olup, açıklığın ise 25mm olduğu varsayılırsa;

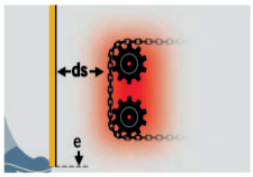
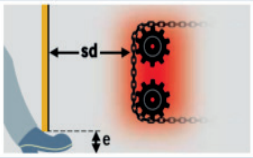
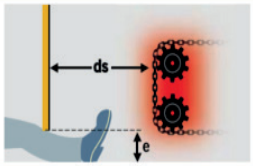
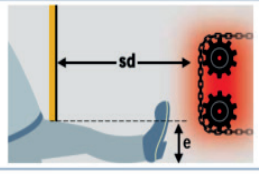
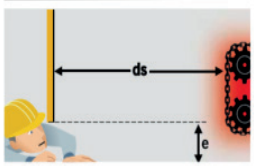
Vücut uzvu		Açıklık e (mm)	Emniyet mesafesi (mm)		
			Yarık	Kare	Daire
Parmak ucu		e ≤ 4	≥ 2	≥ 2	≥ 2
		4 < e ≤ 6	≥ 10	≥ 5	≥ 5
El ayasına kadar parmak		6 < e ≤ 8	≥ 20	≥ 15	≥ 5
		8 < e ≤ 10	≥ 80	≥ 25	≥ 20
		10 < e ≤ 12	≥ 100	≥ 80	≥ 80
		12 < e ≤ 20	≥ 120	≥ 120	≥ 120
		20 < e ≤ 30	≥ 850	≥ 120	≥ 120
Omuz eklemine kadar kol		30 < e ≤ 40	≥ 850	≥ 200	≥ 120
		40 < e ≤ 120	≥ 850	≥ 850	≥ 850



Şekil 69: EN ISO 13857 Açıklık Hesaplama Tablosu (SICK, Güvenli Makina Kılavuzu, 2015)

Mevcut emniyet mesafesi 180mm olduğundan dolayı yukarıdaki şartları sağlamaktadır.

Robot hücrelerinin etrafını çeviren sabit bir muhafaza olan emniyet çitlerinin en alt açıklığının ise azami 180mm olması gerekmektedir. Bu şekilde yetkisiz bir şekilde emniyet çitlerinin altından tehlikeli bölgeye erişim engellenmiş olacaktır.

			Safety distance «sd» (mm)	
Part of lower limb	Illustration	Opening (mm)	Slot	Square or round
Toe tip		e ≤ 5	0	0
Toe		5 < e ≤ 15	≥ 10	0
		15 < e ≤ 35	≥ 80*	≥ 25
Foot		35 < e ≤ 60	≥ 180	≥ 80
		60 < e ≤ 80	≥ 650	≥ 180
Leg (toe tip to knee)		80 < e ≤ 95	≥ 1100	≥ 650
Leg (toe tip to crotch)		95 < e ≤ 180	≥ 1100	≥ 1100
		180 < e ≤ 240	not admissible	≥ 1100
Whole body		Attention: Slot openings with "e" > 180 mm or square or round openings with "e" > 240 mm allow access for the whole body. These dimensions are not permitted.		

Şekil 70: EN ISO 13857 Alt Açıklık Ölçü Tablosu (Laurent Giraud, Ph. D., 2009)

14.1.5. EN ISO 13855:2010 Makinelerde Güvenlik- Vücut Kısımlarının Yaklaşım Hızına Göre Koruyucu Teçhizatın Yerleştirilmesi

- Endüstriyel robot hücrelerinde risk değerlendirmesi gerçekleştirilirken elektronik hassasiyetli koruyucu tertibatlar ve basınca duyarlı koruyucu tertibatlarla sıkça karşılaşılacaktır.
- Bu uluslararası standart insan vücudunun kısımlarının yaklaşım hızına göre koruyu teçhizatın yerleştirileceği konumu belirler.
- İnsan vücudunun kısımlarının yaklaşım hızını temel alan değişkenleri belirler ve algılama alanı veya koruyucu teçhizatı çalıştıran cihazlarla tehlikeli bölge arasındaki asgari mesafeyi belirleme yöntemini sağlar.
- Koşma, zıplama, düşme gibi yaklaşım hızları kapsam dışındadır.

Elektronik hassasiyetli koruyucu tertibatlar (ESPE), makineye müdahale sıklığının fazla olduğu ve bu sebeple üretimde verimliliğin arttırılması için sabit veya hareketli muhafazaların yerine kullanılan emniyet ekipmanlarıdır.

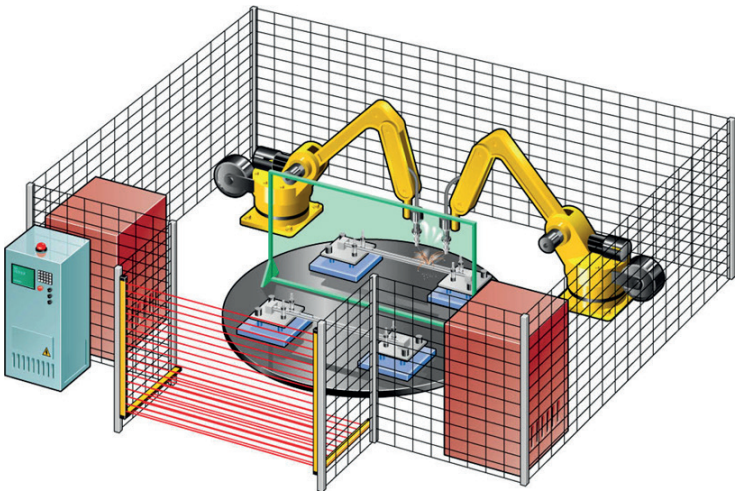
Işık bariyerleri elektronik hassasiyetli koruyucu bir tertibattır. Alıcı ve verici olarak karşılıklı birbirlerine kızılötesi ışın gönderen, bu ışınlardan herhangi birinin ihlal edilmesi durumunda ise sinyal vererek makinelerin durmasını sağlayan emniyet ekipmanlarıdır.



Şekil 71: Parmak Koruma Işık Perdesi Örneği (Omron Electronics, F3SG-4R Ürün Görseli)



Şekil 72: El Koruma Işık Perdesi Örneği (Omron Electronics, F3SG-4R Ürün Görseli)

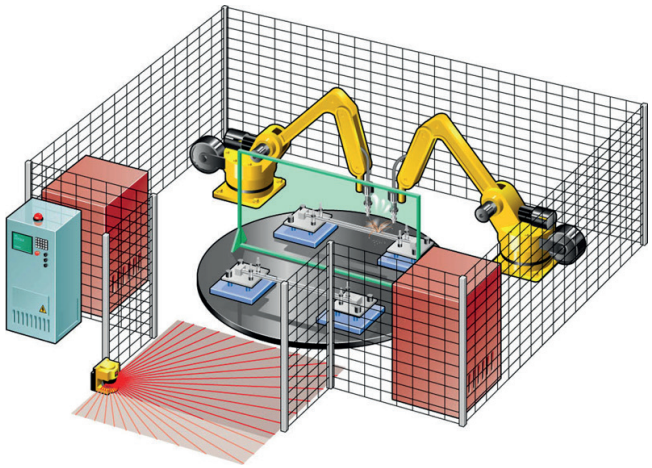


Şekil 73: Işık Perdesi Tarafından Tehlikeli Bölgeye Erişimi Korunan Robot Kaynak Hücresi (Fabricating Metal Working., 2013)

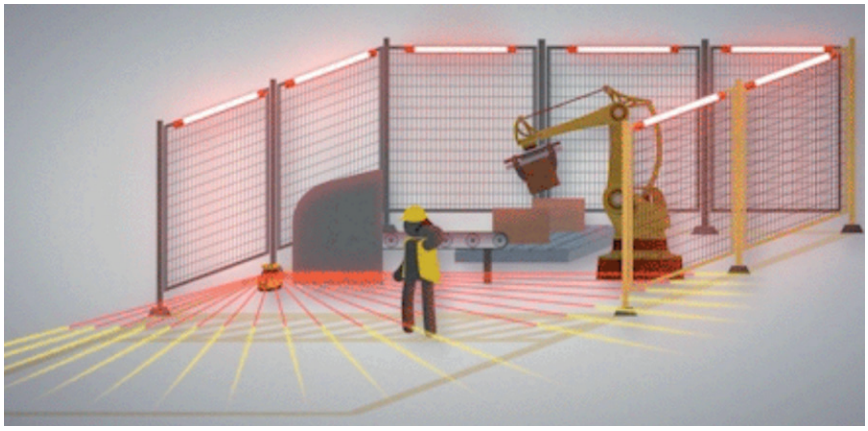
- Alan tarayıcılar da elektronik hassasiyetli koruyucu bir tertibattır.

Belirlenen alanları tarayarak kişilerin varlıklarını algılayan koruyucu emniyet tertibatlarıdır.

Gönderdiği kızılötesi lazer ışınların bir engele (cisim veya insan) çarparak geri dönmesi durumunda sinyal vererek makinelerin durmasını sağlarlar.

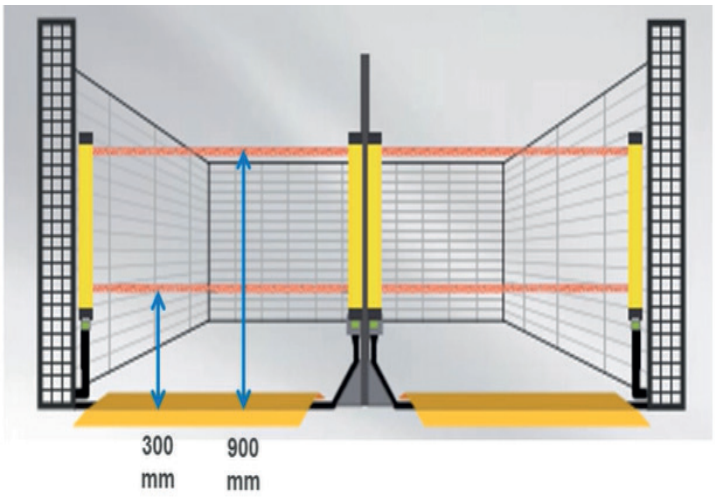


Şekil 74: Alan Tarayıcı Tarafından Tehlikeli Bölgeye Erişimi Korunan Robot Kaynak Hücresi (Fabricating Metal Working., 2013)



Şekil 75: Alan Tarayıcı Tarafından Tehlikeli Bölgeye Erişimi Korunan Robot Kaynak Hücresi (Dacelsolutions., 2019)

EN ISO 13855 standardı yukarıdaki elektronik hassasiyetli koruyucu tertibatların konumlandırılmaları ile ilgili detaylı bilgiler vermektedir. Risk değerlendirmesi yapılırken karşılaşılan ışık perdelerinin aşağıdaki görselde gözüktüğü gibi en alt ışınlarının yüksekliği zeminden asgari 300mm yükseklikte olmalıdır.



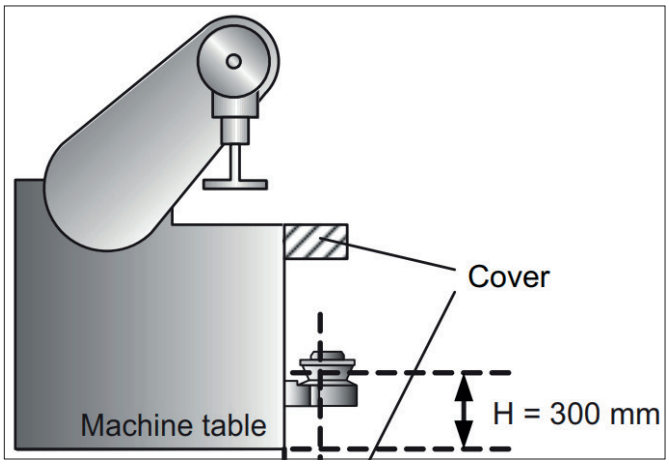
Şekil 76: EN ISO 13855 Tavsiyesi Olarak En Alt ve En Üst Işının Olması Gereken Yükseklikler (Erhan Eskicumalı, 2021)



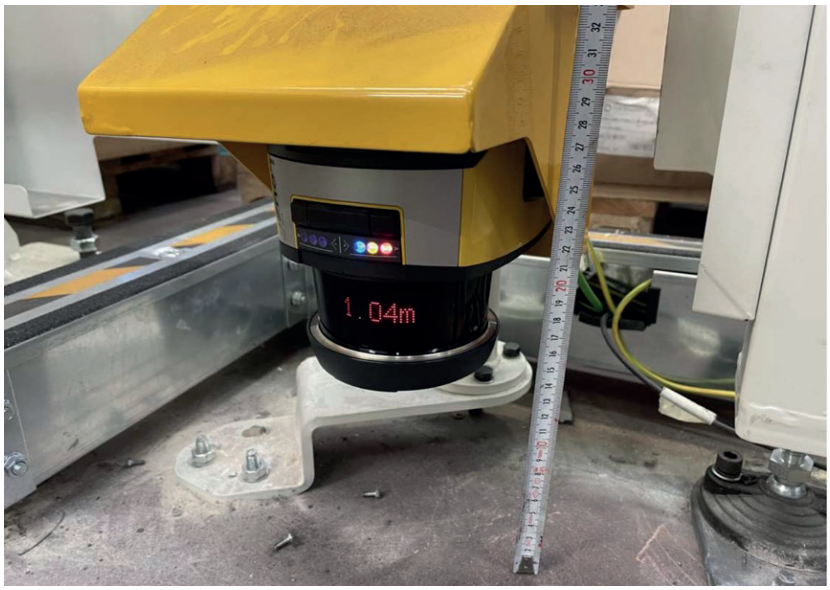
Şekil 77: Uygunsuz Işık Perdesi Konumu Örneği (Erhan Eskicumalı, 2021)

Eğer ortamda çocukların olma ihtimali olan bir uygulama varsa en alt ışının yüksekliği 300mm yerine 200mm olarak tercih edilmelidir. Işık bariyerlerinin en alt ışınlarının 300mm den yüksek olması, ışık bariyerinin altından emekleyerek tehlikeli bölgeye birisinin girme riskini doğurmaktadır. Bu sebeple risk değerlendirmesi yapılırken bu konuya dikkat edilmelidir.

Aynı ölçü aşağıda görüleceği üzere alan tarayıcılar içinde geçerlidir.

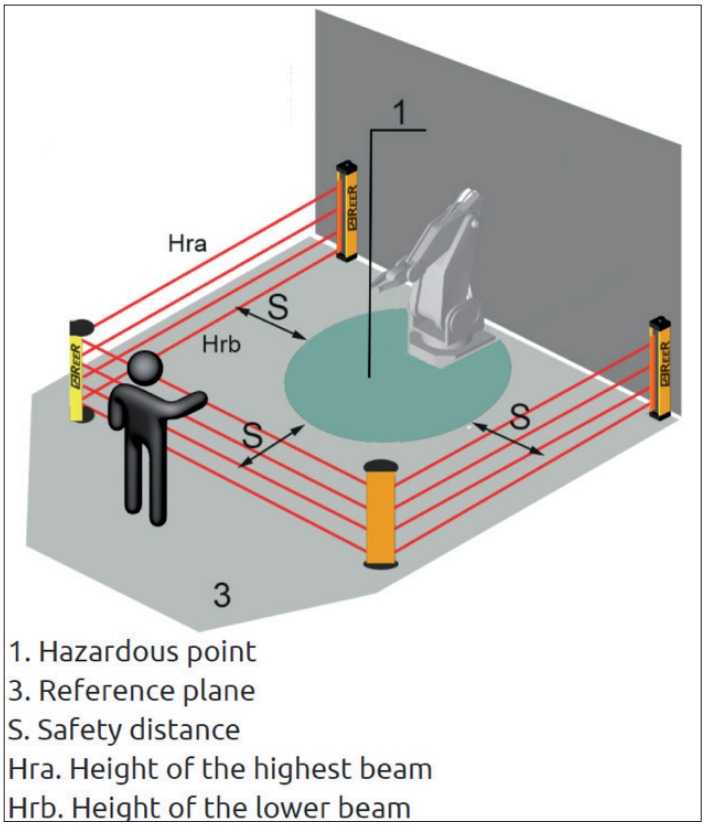


Şekil 78: Zeminden Yüksekliği Uygun Alan Tarayıcı Uygulaması (Omron Electronics, 2020)



Şekil 79: Zeminden Yüksekliği Uygun Alan Tarayıcı Uygulaması

Işık bariyerlerinin robotun tehlikeli hareketine olan emniyet mesafesinin doğruluğu makine duruş süresi ölçümü ile doğrulamak mümkündür. Risk değerlendirmesi gerçekleştirirken, imalatçıdan makine duruş süresi ölçümü mutlaka talep edilmelidir.



Şekil 80: Işık Bariyeri ile Robot'un Erişebileceği Azami Alan Arasındaki Emniyet Mesafesi (REER Safety)

Makine duruş süresi ölçümünün temel mantığı, elektronik hassasiyetli koruyucu tertibat ihlal edildiğinde robotun tehlikeli hareketinin kaç saniyede içerisinde duracağının ölçülmesidir. Bu ölçüm sonucuna göre emniyet mesafesi aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

ISO 13855 Emniyet Mesafesi Hesaplama

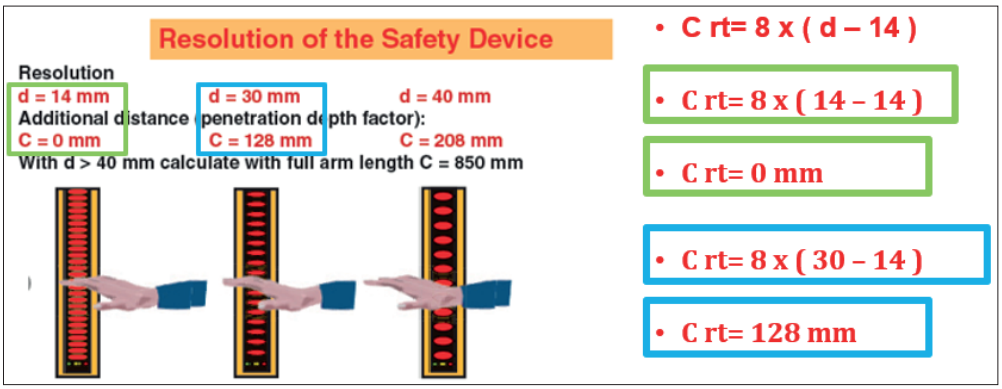
- S = K x (t1 + t2) + C

- K = İnsan vücudu veya vücudunun kısımlarının ön görülen yaklaşım hızı
  - Eğer emniyet mesafesi < 500mm ise ,K=2000mm/s (upper limb)
  - Eğer emniyet mesafesi > 500mm ise ,K=1600mm/s (yürüme hızı)
- T = Toplam Duruş Süresi (t1 + t2)
  - t1 : Koruyucu tertibatın tepki süresi
  - t2 : Makinenin duruş süresi (ataleti ile dönmeye devam eden kısımlar)
- C = İhlal mesafesi (örn. vücudun bazı kısımları ışık perdesini ihlal etmeden hareket edebilir)
  - Crt : Tehlikeli bölgeye direkt ulaşıldığındaki ihlal mesafesi

Şekil 81: EN ISO 13855'e Göre Emniyet Mesafesi Hesaplama Formülü

Burada ölçümdeki ilave mesafe olarak geçen C değişkeni, örneğin ışık perdesi için emniyet mesafesi hesaplanıyorsa, ışık perdesinin çözünürlüğüne göre değişmektedir.

Işık perdeleri aşağıda gözüktüğü üzere parmak koruma veya el koruma şeklinde modelleri bulunmaktadır.



Şekil 82: Işık Perdesinin Çözünürlüğüne Göre İlave Mesafe Parametresi Hesaplama (HHB, 2014)

Makinenin duruş süresi teorik olarak öngörülebilir olsa da kalibrasyonu yapılmış cihazlar ile birlikte, bu konuda uzman kuruluşlar tarafından ölçülmeli ve elektronik hassasiyetli koruyucu tertibatların konumunun doğruluğu raporlanmalıdır.

Risk değerlendirmesi gerçekleştirirken bu raporun varlığı mutlaka sorgulanmalıdır.

14.1.6. EN 60204-1:2006- Makinaların Elektrik Donanımı - Bölüm 1: Genel Kurallar

Risk değerlendirmesi gerçekleştirirken her makine ve robot hücresinde dikkat edilmesi gereken konulardan biriside elektriksel güvenlik konusudur.

Risk değerlendirmesi gerçekleştirirken sorgulanacak ilk konulardan birisi ilgili robot hücresine ait LVD – Alçak Gerilim Yönetmeliği'ne göre elektriksel güvenlik test raporunun olup olmadığıdır.

Toprak sürekliliği, yüksek voltaj testi ve izolasyon gerilim direncinin ölçüldüğü bu elektriksel güvenlik testlerinde operatörlerin robot hücrelerini elektriksel güvenlik açısından risk yaratmayacak bir şekilde kullanabileceği garanti altına alınmış olur.

Risk değerlendirmesi çalışmasında elektrik panosunu açarak EN 60204-1' in talep ettiği aşağıdaki maddeleri kontrol edebilirsiniz.

- IEC EN 60204-1'e göre iletkenlerin, kablo rengi, numara veya abecesayısal (alphanumeric) veya bunların kombinasyonu ile teşhis edilmesi tavsiye edilmektedir.

Kablo renkleri için aşağıdaki renklerin tercih edilmesi tavsiye edilmektedir:

	AC / DC güç devreleri
	AC kumanda devreleri
	DC kumanda devreleri
	Harici devreler
	PE
	Nötr

Şekil 83: EN 60204-1 de Tavsiye Edilen Kablo Renkleri

- Makinelerin enerjisini kesmek için kullanılan ana şalterleri kolay erişilebilecek bir yere monte edilmelidir. Önerilen montaj yüksekliği 60cm – 170cm arasındadır.



Şekil 84: Ana Şalter

- Enerjili kısımlar an az IP 2X veya IPXXB seviyesinde kapamalarla koruma altına alınmalıdır.

1. Basamak

Derece	Sembol	Koruma	Açıklama
0		Korumasız.	Kullanıcının tehlikeli bölgelere ulaşmasını ve yabancı katı cisimlerin cihazın içine girişini engeller.
1		Çapı ≥ 50 mm olan katı cisimlere karşı koruma.	Çapı 50 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
2		Çapı ≥ 12,5 mm olan katı cisimlere karşı koruma.	Çapı 12,5 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
3		Çapı ≥ 2,5 mm olan katı cisimlere karşı koruma.	Çapı 2,5 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
4		Çapı ≥ 1 mm olan katı cisimlere karşı koruma.	Çapı 1 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
5		Toza karşı korumalı.	Toz girişi tamamen engellenemez fakat koruma derecesi tozun ürüne zarar vermesini engelleyecek kadardır.
6		Toz geçirmez.	Toz girişi kesinlikle yok.

Şekil 85: IP Koruma Sınıfları (Kaynak: KAREL)

14.1.7. EN ISO 14120:2015 - Makinalarda Güvenlik - Mahfazalar - Sabit Ve Hareketli Mahfazaların Tasarımı ve Yapımı için Genel Gereklilikler

» Bu uluslararası standart,

» İnsanları mekanik tehlikelerden koruma amaçlı sağlanan muhafazaların seçimi, inşası ve tasarımı için genel gereksinimleri belirler.

» Tehlikeli bölgelere erişimi asgari seviyeye indirmek için makineler, yağlama, ayarlama ve bakım gibi sebeplerin, muhafazaların açılmadan veya yerinden sökülmeden yapılabilecek şekilde tasarlanmalıdır.

» Bu mümkün olmadığında aşağıdaki sebepler için erişime izin verilmelidir.

- Yükleme ve boşaltma
- Takım değiştirme ve ayarlama
- Yağlama
- Bakım ve Tamir
- Temizlik vb.



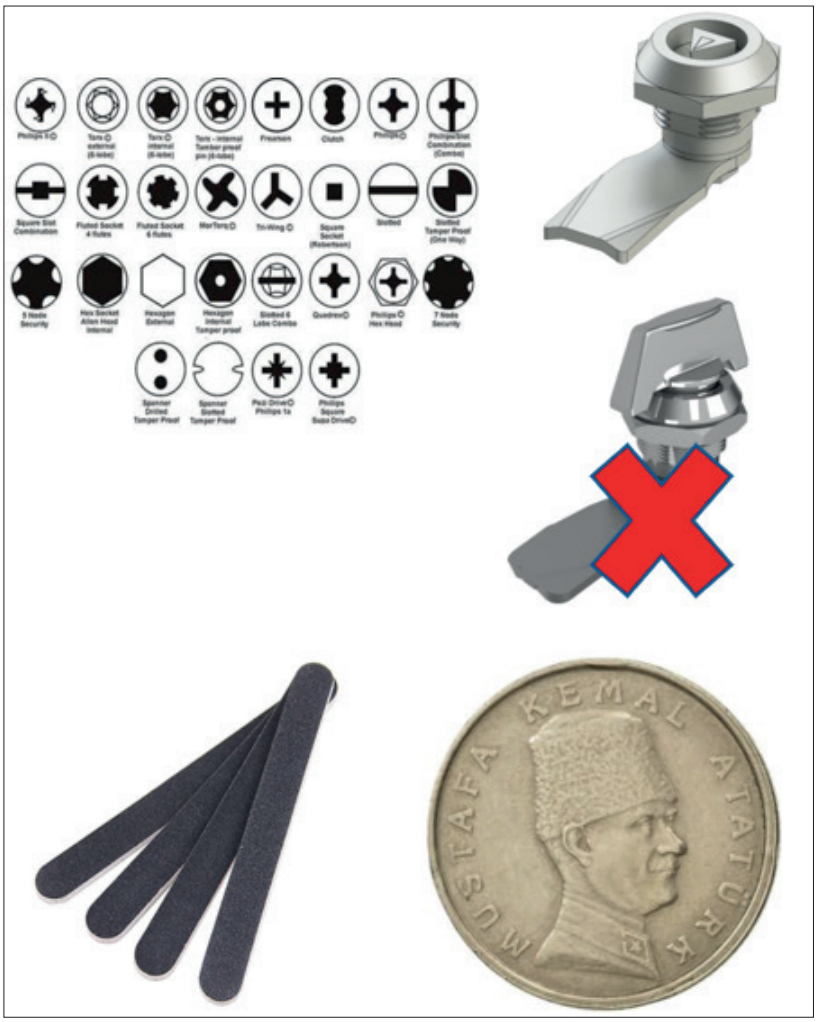
Şekil 86: Bakım Operasyonu Görseli

- **Terimler ve Açıklamalar:**

o **Sabit Muhafaza:** Sadece aletler kullanılarak veya yıkılarak, açılabilen veya sökülebilen sabitlenmiş (vida, kaynak vb.) muhafaza

o **Alet:** Bağlantı elemanını açma ve kapama için kullanılan alet-edevat (madeni para veya tırnak törpüsü birtakım olarak kabul edilemez)

o **Alet Kullanımı:** Belirli koşullarda emniyetli çalışma prosedürü hakkında bilgili bir kişi tarafından alınan aksiyon



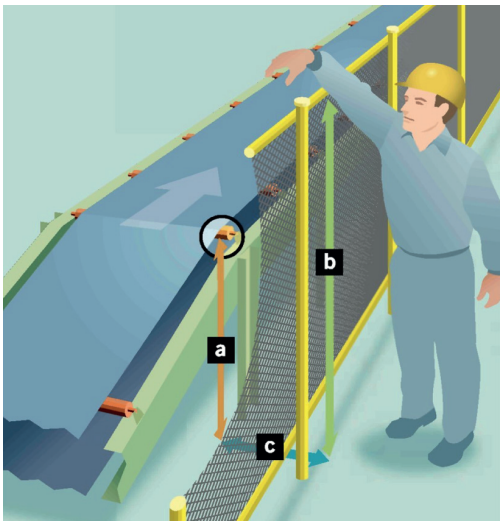
Şekil 87: EN ISO 14120'de Bahsedilen Alet Örnekleri (Erhan Eskicumalı, 2021)

Robot hücrelerinde risk değerlendirmesi yaparken EN ISO 14120'deki bu tanımlara hâkim olmak önemlidir. Sabit muhafazanın tanımı sadece belirli bir alet kullanımı ile sökülebilen muhafaza olarak yapılmıştır.

Yukarıda gözüken kelebek tipi sabitlemeler ile sabitlenmiş robot hücresinin bulunduğu ortamda herkes tarafından kolayca açılabilecek olan bir muhafaza, sabit muhafaza olarak kabul edilmemektedir. Eğer risk değerlendirmesi esnasında sabit muhafaza olarak tasarlanmış fakat herhangi bir alet kullanımı olmadan rahatça sökülebilen bir muhafaza tespit edildiyse tehlikeli bölgeye rahatça erişebilme riski ortaya çıktığından dolayı bu sabit muhafazaların EN ISO 14120'ye göre uygun hale getirilmesi gerektiği risk azaltımı tedbiri olarak paylaşılmalıdır.

- **Sabit Muhafaza:**

Robot hücreleri etrafında sabit olarak monte edilen emniyet çitleri bu muhafaza örneği altına girmektedir.



Şekil 88: EN ISO 14120'de Bahsedilen Sabit Muhafaza (Laurent Giraud, Ph. D., 2003)

- **Arakilitlemeli Hareketli Muhafazalar:**

Kilitlemeli ve kilitlemesiz tip olarak farklı modelleri bulunan arakilitlemeli muhafazalar, bakım, temizlik, ayarlama, öğretme gibi görevler için hücre içerisine erişim gerektiğinde tehlikeli hareketleri durdurma sinyali gönderme amaçlı kullanılırlar.



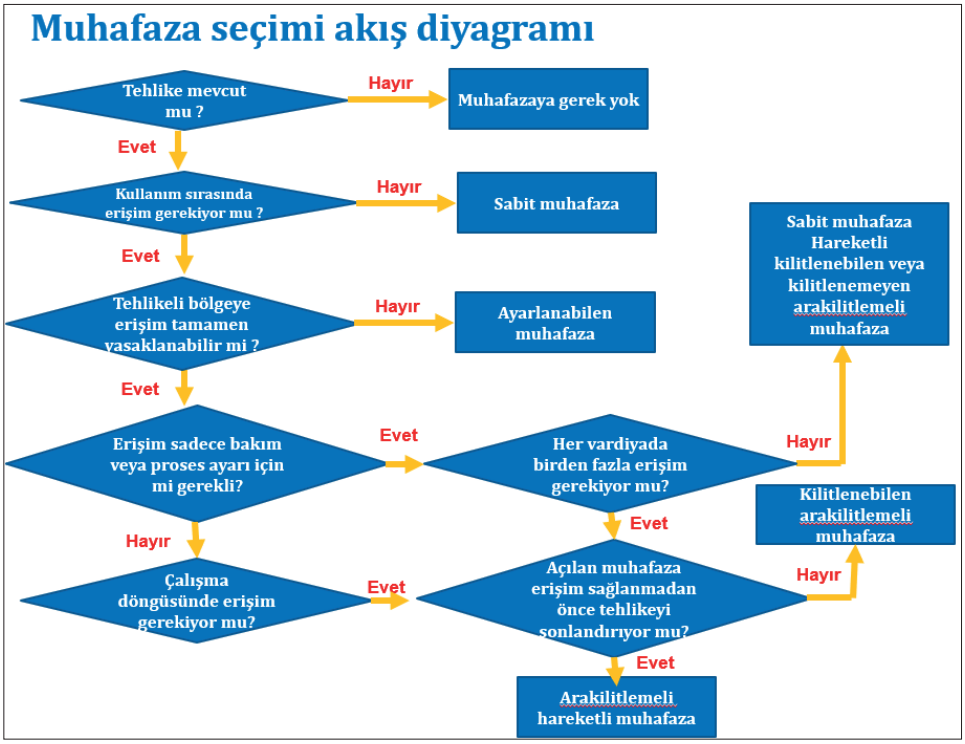
Şekil 89: EN ISO 14120'de Bahsedilen Arakilitlemeli Hareketi Muhafaza (SICK, 2018)

Hareketli muhafazalar üzerinde bulunan bu arakilitleme tertibatlarının manyetik, mekanik, kilitlemeli tiplerde modelleri bulunmaktadır.



Şekil 90: Arakilitleme Tertibatları (SICK, 2022)

EN ISO 14120 standardında, uygulama ile ilgili alınan bilgilere göre muhafa seçiş diyagramı bulunmaktadır.



Şekil 91: EN ISO 14120'de Belirtilen Muhafaza Seçim Akış Diyagramı (Erhan Eskicumalı, 2021)

- **Muhafazaların renkleri:**

o Tehlikelere dikkat çekmek için, makine üzerindeki tehlikeli kısımlar daha parlak boyanabilir. Örn. Eğer muhafaza ve makine aynı renkte ise, tehlikeli kısımlar kontrast oluşturmak için daha parlak boyanabilir.

o Renk kombinasyonları seçilirken dikkat edilmelidir. Örn. Normalde Sarı ve Kırmızı acil durdurma için kullanılır.

o Prosesin izlenmesi gerektiği yerlerde, muhafazalar parlak renkler ile boyanmamalıdır. Örn. Sarı, prosesi görünümü ile birbirine karışabilir.

14.1.8. EN ISO 13849-1:2015- Makinelerde Güvenlik- Kumanda Sistemlerinin Güvenlikle İlgili Kısımları

Kumanda sistemlerinin emniyet ile ilgili kısımlarını içeren bu standart, robot hücrelerinde risk değerlendirmesi yapılırken sıklıkla kullanılmaktadır.

EN ISO 10218 standardı, kontrol sistemlerinin emniyet ile ilgili kısımlarının EN ISO 13849-1'e göre Kategori 3 Pl d seviyesini karşılaması gerektiğini belirtmektedir.

Bir robot hücresinde genel olarak aşağıdaki fonksiyonlar sıklıkla risk azaltımı amaçlı kullanılmaktadır:

- Acil durdurma emniyet fonksiyonu
- Işık bariyeri tarafından başlatılan emniyet ile ilgili durdurma
- Alan tarayıcı tarafından başlatılan emniyet ile ilgili durdurma
- Arakilitleme tertibatı tarafından başlatılan emniyet ile ilgili durdurma

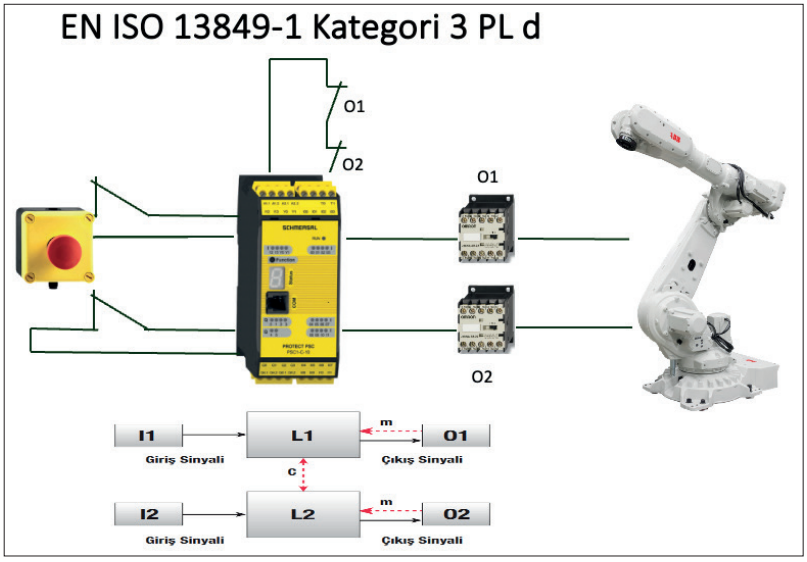
Risk değerlendirmesi sırasında bu emniyet fonksiyonlarının EN ISO 13849-1'e göre Kategori 3 PL d seviyesini karşılayıp karşılamadığını anlamak için elektrik sistemde varsa pnömatik ve hidrolik devre şemalarının erişilebilir olması gerekmektedir. Risk değerlendirmesi yapan kişi eğer elektrik devre şemasını okumayı bilmiyorsa, bu şemayı EN ISO 13849-1 bilgisi ile yorumlayacak teknik bir uzmandan destek almalıdır.

Robot entegratörleri hücreleri imal ettiklerinde, kurguladıkları emniyet fonksiyonlarının EN ISO 13849-1'e göre Kategori 3 PL d seviyesini karşılayıp karşılamadıklarını 2006/42/AT makine emniyeti yönetmeliğine göre kanıtlamakla mükelleftirler. Risk değerlendirmesi çalışmasında kontrol sistemlerinin emniyet ile ilgili kısımlarını incelerken EN ISO 13849-1 Uygunluk Raporunun varlığı sorgulanmalıdır.

Piyasada herkesin kullanımına ücretsiz bir şekilde sunulan ve birçok üreticinin ürün kütüphanesini içeren SISTEMA yazılımı ile EN ISO 13849-1 Uygunluk Raporu oluşturulabilmektedir.

Yukarıda bahsi geçen emniyet fonksiyonlarının Kategori 3 Pl d seviyesinde robotun durdurulmasını sağlayan örnek emniyet mimarileri aşağıdaki gibidir:

- **Acil durdurma emniyet fonksiyonu:**



Şekil 92: EN ISO 13849-1'e Göre Kategori 3 PL d Seviyesi Acil Durdurma Fonksiyonu (Erhan Eskicumalı, 2025)

Yukarıdaki örnek acil durdurma emniyet mimarisinde giriş katında çift NC kontaklı acil durdurma butonu, emniyet kontrolcüsü tarafından sağlanan test pulse sinyaleri vasıtası ile kontaklar arası kısa devre-açık devre algılayan bir mimari ile emniyet kontrolcüsüne bağlanmıştır.

Emniyet kontrolcüsü tarafından kontrol edilen iki adet kontaktör vasıtası ile robot kontrolcüsünün acil durdurma sinyalleri kesilmektedir. Ayrıca önceki sayfalarda anlatılan Kategori 3 Pl d mimarisi gereği, çıkış katındaki kontaktörlerden emniyet kontrolcüsüne geribildirim sinyali alındığı görülmektedir.

Yukarıdaki mimari her robot hücresinde risk değerlendirmesi yapılırken karşılaşılacak bir mimaridir. Acil durdurma emniyet mimarisinin Kategori 3 Pl d seviyesini karşılayıp karşılamadığını doğrulamak için elektrik devre şeması mutlaka okunmalıdır.

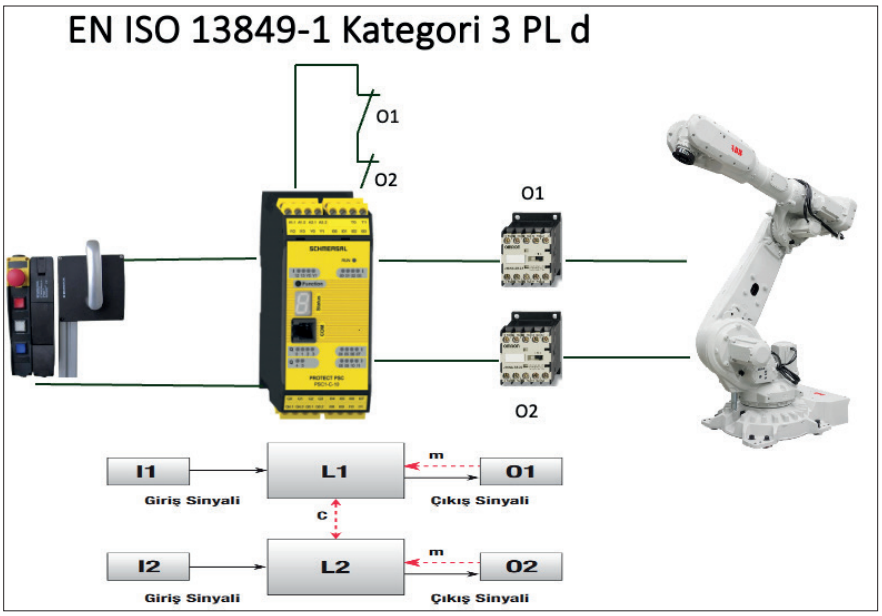
Risk değerlendirmesi yapılırken sıkça yapılan en büyük yanlışlardan birisi, elektrik panosunda emniyet rölesi veya kontrolcüsü görüldüğünde elektrik devre şeması okunmadan emniyet fonksiyonlarının Kategori 3 PL d seviyesine ulaştığının varsayılmasıdır.

Örneğin robot entegratörlerinin sıkça yaptığı hatalardan birisi, yukarıdaki görselde O1 ve O2 olarak Kategori 3 mimarisi gereği çift kontaktör kullanılan uygulamalarda, tek bir kontaktör kullanarak robot kontrolcüsüne giden sinyali kesmeleri olmaktadır.

Tek bir kontaktör kullanıldığında emniyet mimarisi Kategori 3'den Kategori 1'e düşmektedir.

- **Arakilitleme tertibatı tarafından başlatılan emniyet ile ilgili durdurma:**

Arakilitleme tertibatları da bir robot hücresinde mutlaka karşılaşılacak ekipmanlardan birisidir. Her robot hücresine temizlik, bakım, ayarlama, öğretme görevlerinden dolayı erişim gerekmektedir. Erişim için sağlanan kapının üzerinde bulunan bu arakilitleme tertibatlarının da birçok farklı modeli bulunmaktadır.

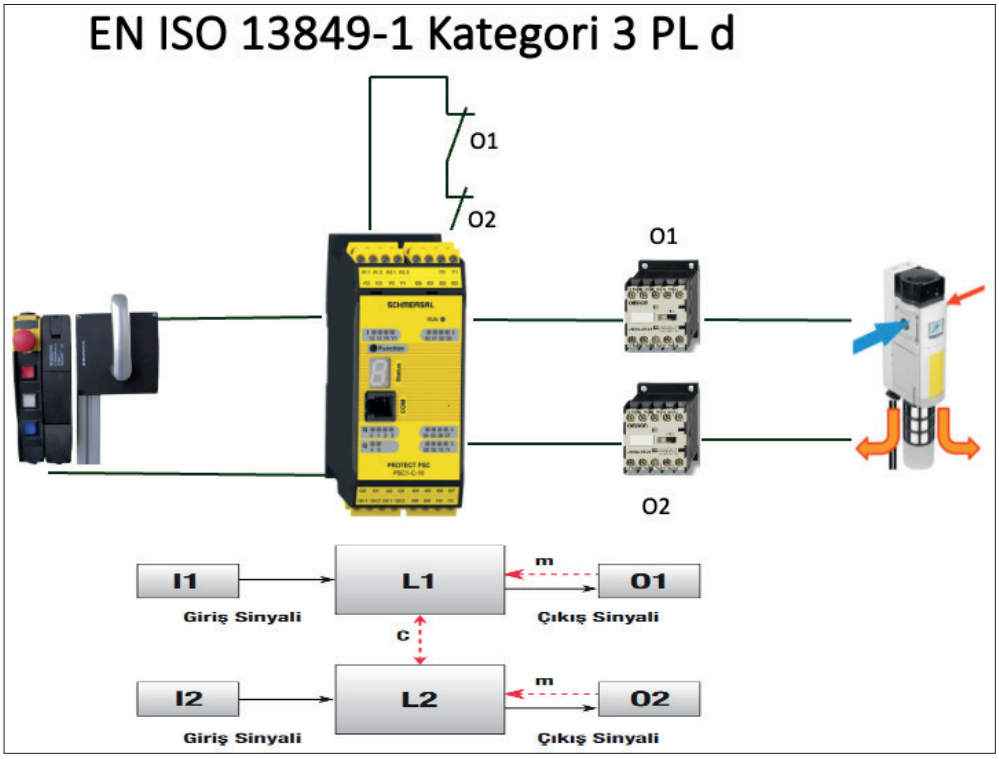


Şekil 93: EN ISO 13849-1'e Göre Kategori 3 PL d Seviyesi Arakilitleme Tertibatı Tarafından Başlatılan Durdurma Emniyet Fonksiyonu (Erhan Eskicumalı, 2025)

Risk Değerlendirmesinde ise önemli olan konu, acil durdurma emniyet fonskiyonunda olduğu gibi arakilitleme tertibatı tarafından başlatılan emniyet ile ilgili durdurma emniyet fonksiyonunun bütün emniyet mimarisinin Kategori 3 Pl d seviyesini karşılayıp karşılamadığının doğrulanması olacaktır.

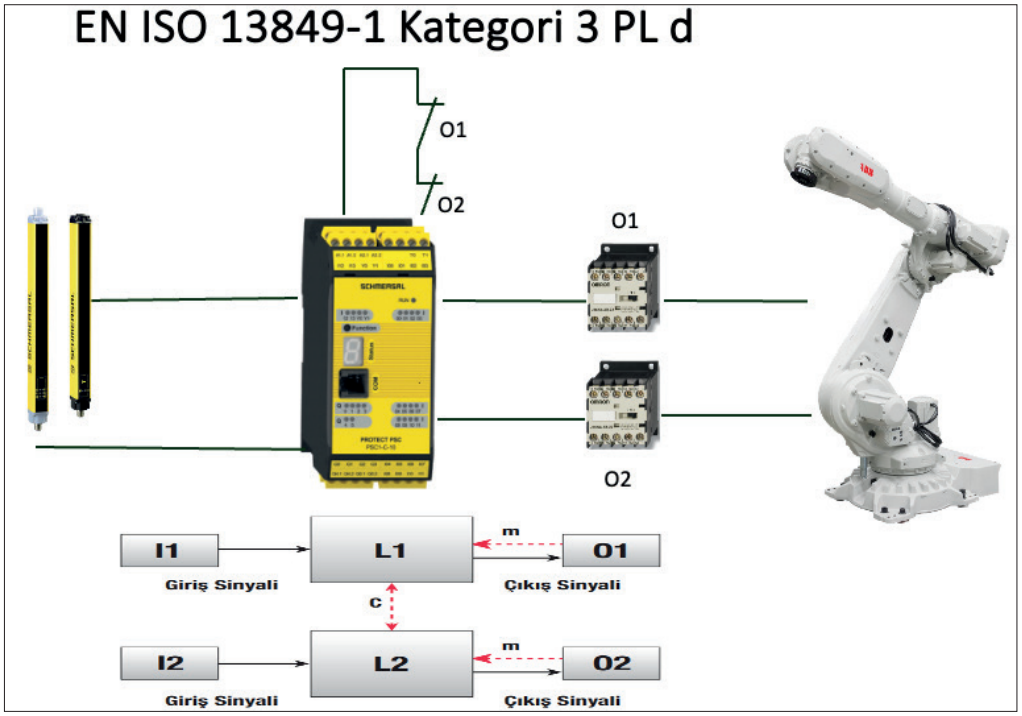
Aynı şekilde bu doğrulama esnasında elektrik devre şeması dikkatlice okunmalı, eğer arakilitleme tertibatının bağlı olduğu kapı açıldığında içeride pnömatik çalışan hareketli aksamlar varsa ve buradaki hava emniyetli bir şekilde tahliye olacaksa, elektrik devre şeması ile birlikte pnömatik devre şeması da incelenmelidir.

Aşağıda emniyet hava tahliye için örnek asgari Kategori 3 Pl d mimarisi gözükmektedir. Emniyetli hava tahliye sadece arakilitleme tertibatı ile başlatılan emniyet ile ilgili durdurma emniyet fonksiyonu ile alakalı değil, aynı zamanda acil durdurma ve ışık bariyeri ile tarafından başlatılan durdurma emniyet fonksiyonlarında da geçerlidir. Pnömatik riskler de risk değerlendirmesi yapılırken göz ardı edilmemelidir.



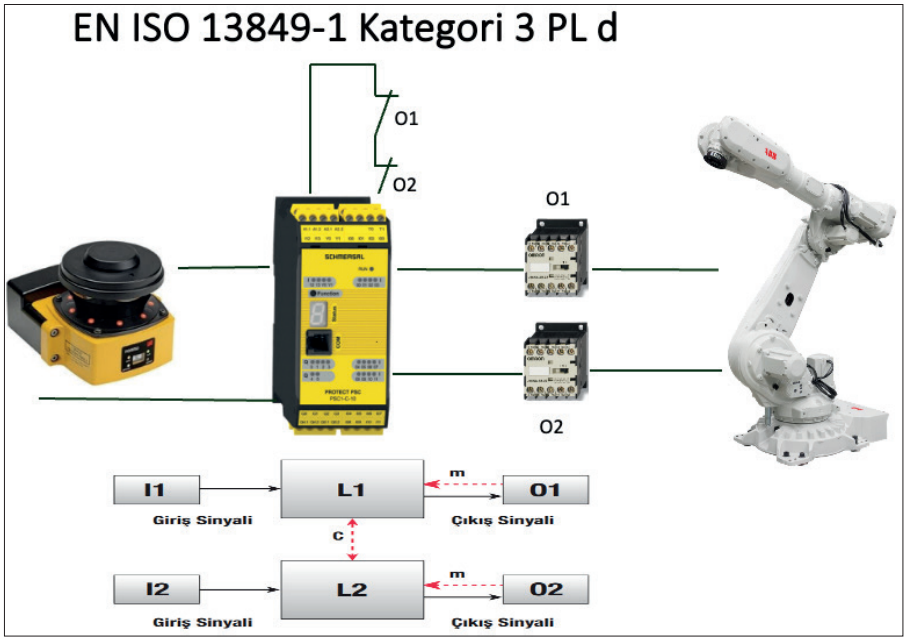
Şekil 94: EN ISO 13849-1'e Göre Kategori 3 PL d Seviyesi Arakilitleme Tertibatı Tarafından Başlatılan Emniyetli Hava Tahliye Emniyet Fonksiyonu (Erhan Eskicumalı, 2025)

- **Işık bariyeri ve alan tarayıcı tarafından başlatılan emniyet ile ilgili durdurma:**



Şekil 94: EN ISO 13849-1'e Göre Kategori 3 PLd Seviyesi Işık Bariyeri Tarafından Başlatılan Durdurma Emniyet Fonksiyonu (Erhan Eskicumalı, 2025)

Işık bariyeri ve alan tarayıcı gibi elektronik hassasiyetli koruyucu tertibatların da yukarıdaki emniyet fonksiyonları gibi EN ISO 13849-1'e göre Kategori 3 Pl d seviyesini karşılayıp karşılamadığı elektronik devre şemasından kontrol edilerek doğrulanmalıdır.



Şekil 95: EN ISO 13849-1'e Göre Kategori 3 PL d Seviyesi Emniyet Alan Tarayıcı Tarafından Başlatılan Durdurma Emniyet Fonksiyonu (Erhan Eskicumalı, 2025)

14.1.9. EN ISO 14118:2018- Makinelerde Güvenlik – Beklenmeyen Start-up Önlenmesi

EN ISO 1037:1995+A1:2008- Makinelerde Güvenlik- Beklenmeyen Start-up Önlenmesi

» Bu uluslararası standart,

» İnsanları tehlikeli bölgelere müdahale etmeleri gereken yerlerde beklenmedik makine başlangıçlarını önlemek için ihtiyaç olan gereksinimleri belirler.

» Tehlikeli bölgelerde insan varlığını gerektiren örnek çalışmalar:

- Denetleme
- Düzeltici aksiyonlar (tıkanıklıkları temizleme vb.)
- Ayarlama
- Manuel besleme / Boşaltma
- Takım değişimi
- Yağlama
- Temizlik
- Kullanımdan kaldırma
- Bakım/ Tamir
- Gözlemleme, test etme



ŞEKİL 96: Bakım Görseli

» Bu uluslararası standart, her çeşit enerji kaynağından kaynaklanabilecek beklenmedik çalışmaları kapsar.

- Güç kaynağı: Örneğin; Elektriksel, Pnömatik, Hidrolik
- Saklanan enerji: Örneğin; Yer Çekimi, Gerilmiş Yay



Şekil 97: EN ISO 14118'de Belirtilen Enerji Kaynakları

İzolasyon cihazları:

- İzolasyon cihazları enerji kaynağından güvenilir bir şekilde ayrılmayı ve bağlantıyı koparmayı garanti etmelidir.
- İzolasyon cihazının konumu açık ve belirsizliğe yer vermeyecek bir şekilde gösterilecek şekilde belli olmalıdır.
- İzolasyon cihazlarının konumları ve sayıları risk değerlendirmesi dikkate alınarak belirlenmelidir.

– Örneğin; insanların bulunması gereken tehlikeli bölgeler ve gerçekleştirilecek olan çalışma (bakım, temizlik vb.)

- Makinenin izolasyonu sırasında, belirli devrelere bağlı güç kaynaklarının beslenmesine devam edilmelidir.

– Örneğin; operatörlerin emniyeti için, koruma bilgisi veya ışık kaynakları, devamlı uyarı etiketleri gibi.

- İzolasyon cihazları **kilitlenebilecek** şekilde olmalıdır.



Şekil 98: Kilitlemeli Tip İzolasyon Cihazları

14.1.10. EN ISO 10218-2:2011 Robotlar ve Robotik Cihazlar- Endüstriyel Robotlar için Güvenlik Gereksinimleri- Bölüm 2 Robot Sistemleri ve Entegrasyonu

EN ISO 10218-2 standardı yukarıda açıklanmış olan birçok uyumlaştırılmış standarda atıfta bulunmaktadır.

Referans standartlarının daha iyi anlaşılması için yukarıda ilgili standartla ile birlikte örnekler paylaşılmıştır.

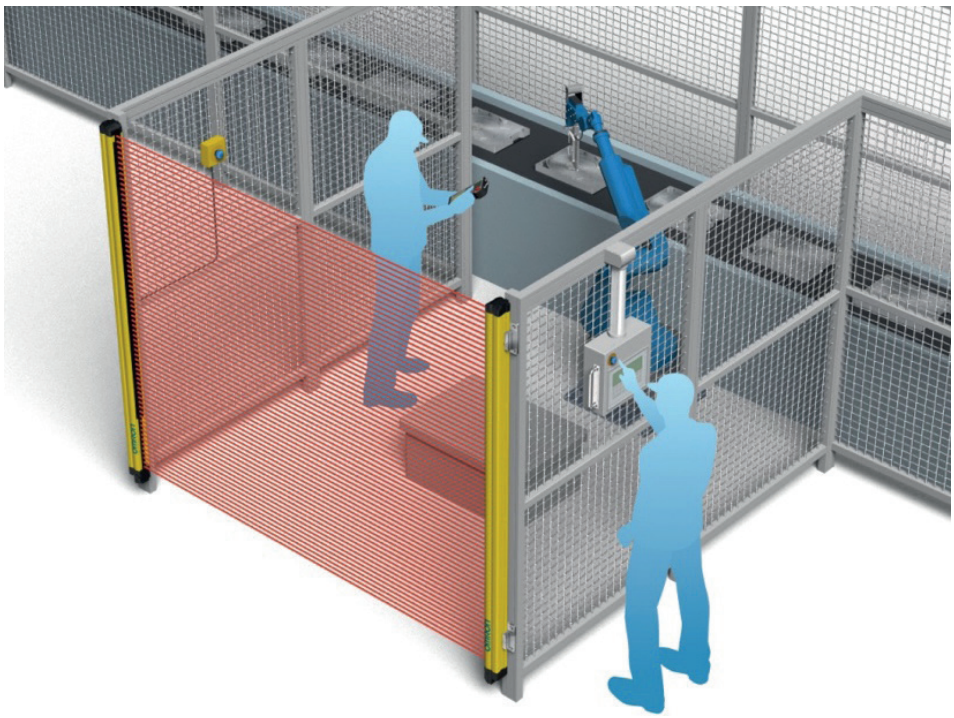
Ek olarak robot hücresi içerisinde kalma riskinin önüne geçmek için kullanılan risk azaltım yöntemleri bu madde altında paylaşılacaktır.

- **Ön-reset (Pre-Reset) Uygulaması:**

Ön-reset uygulaması robot hücreleri içerisinde personelin kalma ihtimali olan uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır.

Çalışma mantığı olarak robotu durduracak şekilde arakilitleme tertibatlı bir kapıdan veya aşağıdaki görseldeki gibi elektronik hassasiyetli koruyucu tertibat ihlal edilerek tehlikeli bölgeye girilmesi durumunda, içeride bir ön-reset butonuna basıldıktan sonra tehlikeli bölgenin dışına çıkılır ve robota çalışma komutu verilir.

Böylece, robotu çalıştıracak olan operatör, hattın içerisini gezerek, içerisinde birinin kalıp kalmadığından emin olur.



Şekil 99: Ön-Reset (Pre-Reset) Emniyet Fonksiyonu (Omron Electronics, 2014)

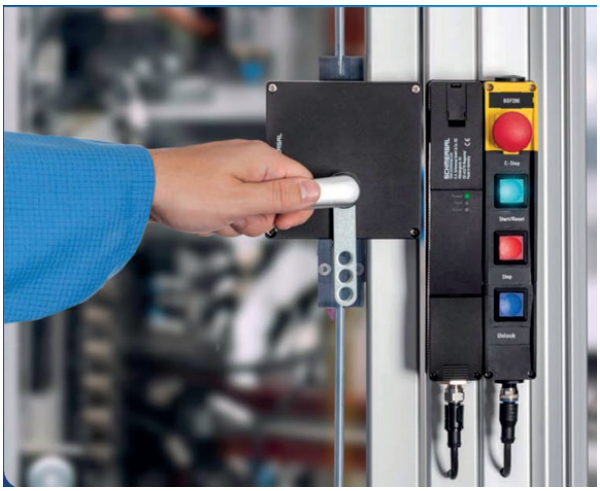
- **LOTO/EKED Uygulanabilir Arakilitleme Tertibatı Kullanılması:**

İçeride bir personelin kalma tehlikesinin önüne geçecek olan en etkili çözümlerden birisi LOTO/EKED uygulanabilir arakilitleme tertibatlarıdır. İçeriye bakım, temizlik, ayarlama, öğretme gibi görevler için girecek olan ekipman sahibi personel, asma kilidini takarak içeriye girer ve kapının üzerine kapatılmasının önüne geçer.

Risk değerlendirmesi yapılırken, kapılarda LOTO/EKED uyumlu arakilitleme tertibatının seçilip seçilmediğine dikkat edilmelidir.

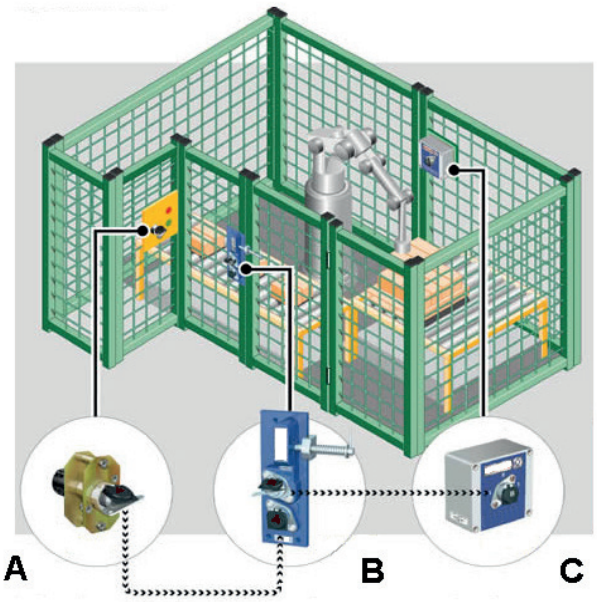


Şekil 100: LOTO/EKED Uyumlu Kilitlemeli Tipli Arakilitleme Tertibatı (Schmersal, 2025)



Şekil 101: LOTO/EKED Uyumlu Kilitlemeli Tipli Arakilitleme Tertibatı (Schmersal, 2025)

- **Mekanik Tutsak Kalma Anahtarı:**



Şekil 102: Mekanik Tutsak Kalma Anahtarı Uygulaması

» **Çalışma mantığı aşağıdaki gibidir:**

- Makineye giden gücü izole ederek anahtarı A'dan çıkarın.
- B'den anahtarı serbest bırakarak A'dan B'ye anahtarı yerleştirin.
- Kapı artık açılabilir.
- B'den anahtar bir emniyet anahtarı olarak tutulabilir veya makinenin güvenli modda çalışmasına izin vermek için C'ye yerleştirilebilir.
- Makineyi yeniden başlatmak için işlemi tersine çevirin.

15. SONUÇ VE ÖNERİLER

Risk analiz süreci, endüstriyel makine kullanan işçileri korumak için tasarlanmıştır. Robotik söz konusu olduğunda, robot ve aksesuarları ile bir işlem gerçekleştirirken robotik hücre kullanıcılarının güvende olmasını sağlamak için uygulanır. Risk analizleri, robot entegrasyonunu standartlaştırmak ve robotik hücre tarafından belirli bir güvenlik düzeyine ulaşıldığından emin olmak için uygulanır. Ancak risk analizi süreci, hücrenin entegre olduğu yerlerde geçerli olan yasa ve mevzuata uygun olarak da yapılmalıdır. Robot ve robotik cihaz üreticileri, cihazları için güvenlik gereksinimleri (PL = d kategori 3) oluşturmuş olsalar bile, robotlar ve insanlar arasında doğrudan veya yakın temas meydana geldiği için uygulama ve ortamın kendisi dikkate alınarak, risk analiz sürecinde hala işlenmesi gereken önemli noktalar mevcut olabilir.

Risk değerlendirmeleri sırasında, insan robot arasındaki dinamik çarpışma sırasında insan vücudu üzerinde çeşitli olumsuz etkiler yaratabilir, örneğin bir çarpma sonunda çarpma hızlı olmasa bile kafanın hızla dönmesi sırasındaki bir çarpışma kafatası ve beyin için oldukça zararlı olabilir. ISO / TS 15066 taslağında, kafa için darbe sınır değerleri belirtilmesine karşın, bunun beyne vereceği olası zararlar üzerinde fazla durulmamıştır. NATO için yapılan bir araştırmada, çarpma sonunda beyin hasarı oluşmadan önce baş ve boyunda oluşabilecek hayati hasarların oluşabileceğinden bahsedilmiştir, ancak konuyla ilgili diğer kaynaklar bunu teyit etmemiş bazıları da aksini ileri sürmüşlerdir.

Çeşitli vücut yaralanmalarına neden olan kuvvetler hakkında bilimsel veri elde etmenin etik zorlukları nedeniyle, kuvvet değerleri için birçok veri kaynağı genç ve çok formda bedenler, kadavralar veya bilgisayar modelleri ile çalışmalara dayanmaktadır. Elde edilen veriler düzensizdir ve yaş aralıklarında ve vücut özelliklerindeki değişkenlerle uygulanması zordur. Araştırmalar, kemik ve yumuşak dokuların esnekliğinin yaşla birlikte önemli ölçüde düştüğünü ve bunun büyük ölçüde değişebileceğini göstermiştir (Örneğin; 20 ila 80 yıl arasında esneklikte %20'lik bir azalma mümkündür). İyi veri eksikliği nedeniyle, ISO / TS 15066'da gösterilen değerler kısmen temkinli görünebilir, ancak taslakta kullanılan bilimsel verilerin kesin doğasının taslak ISO geliştiricileri ile doğrulanması gerekir.

ISO /TS 15066'da risk analizlerinde esas alınacak değerler olarak, vücut bölgelerinden, sadece boyunla beraber baş, göğüs, karın, kalça, leğen kemiği, üst kol, dirsek, el parmakları diz, ayak ve bacak için sınırlı veriler mevcut olup, bunun dışındaki bölgeler tanım dışı bırakılmıştır.

ISO/TS 15066'nın ilk taslağında, birincil hedefin çarpışmayı önlemek ve kişi ile robot arasında güvenli bir mesafeyi korumak olduğu ve ISO/TS 15066'da belirtilen kuvvet sınırlarının, güvenli mesafeyi korumak için tasarlanmış sistemler arızalandığında geçerli olduğu açıkça ortaya konmamış olmasına rağmen bunun son taslakta düzeltildiğini görüyoruz. Bu önemli bir noktadır, çünkü güvenli bir mesafeyi koruyamama olasılığı, kobotla birlikte çalışan iş birlikçilerinin maruz kaldığı risk seviyelerini ve kabul edilebilir yaralanma kriterlerinin ne olması gerektiğini belirgin bir şekilde etkiler. İnsanların yeterince korunup korunmayacağı büyük ölçüde çarpışma olasılığına ve çarpışma kuvvetlerine bağlıdır. Bu nedenle, iş birlikçi robotların kullanımında emniyet yönetimi açısından, operatörü çarpışmaya karşı koruyan arıza modları ve arıza oranları çok önemli etkenlerdir. Ancak bu arada çarpışma olasılığına ilişkin frekansı da hesaplarda göz ardı etmemek gerekir. Taslakta tüm vücut bölgelerine ait sınırlar mevcut olmayıp, temas halinde neler olacağına ilişkin tüm vücut bölgelerine ilişkin senaryolar üzerinde de çalışılmamıştır. Bu arada, iş birlikçi ortamlarda robotlarla iş birliği yapacak operatörlerin olası bir çarpışmada minimal düzeyde etkilenmelerini sağlamak için çeşitli KKD'ler

kullanılması önerilmiş, ancak herhangi bir temas, çarpışma veya sıkışmada bu koruyucuların kuvvete maruz kalmaları durumunda bu temasın operatöre nasıl yansıyacağı konusunda detaylı bir bilgi verilmemiştir.

Olası risk bilgilerinin daha önceden doğru tespit edildiği durumlarda, FMEA ve FTA analizlerinde doğru risk analizleri yapılabilir, yeni bir iş birlikçi çalışma alanı tasarımı için, eğer olası riskler hakkında detaylı bir ön bilgi mevcut değilse bu iki yöntem çok ta başarılı olamayabilecektir. Bu yöntemler, gerçekleştirilmesi gereken görevleri dikkate almadığından, risk değerlendirmesi yapmak için JAS (İş Güvenliği Analizi) daha iyi bir seçenek olacaktır. Burada asıl yapılması gereken, alt görevleri tehlike açısından analiz etmek ve bu tehlikelerin etkilerini azaltmak veya geçersiz kılmak için yöntemler veya prosedürler önermektir.

Robotlar da dahil olmak üzere, her türlü endüstriyel makine ve bunların bir üretim tesisinde kullanılması güvenlik standartlarına uygun olmak zorundadır. Robotlar ve endüstriyel makinelerin hepsinin çalışması sırasında birtakım riskler mevcuttur, ancak insanlarla birlikte çalışan iş birlikçi robotlara baktığımızda ek birtakım risklerin gündeme geldiğini görürüz. Yapılacak risk değerlendirme sırasında kullanılacak yöntemler aşağıda belirtilen standartların koşularını karşılayabilecek nitelikte olmalıdır.

Efektör, enerji sağlayıcı veya dış enerji bağlantıları Genel Makine Güvenlik Standartlarının SS-ISO- 12100:2010'da belirtilen ve risk değerlendirme sırasında kullanılacak bilgileri içermelidir.

Endüstriyel robotların emniyet tasarımlarının SS-ISO 10218-1:2011'de belirtilen öneriler ışığında yapılması gerekir. Bu bölümde robot ve entegre çalıştığı sistemdeki robotların güvenliklerinin neler olması gerektiği gibi hususlar üreticiye tavsiye edilir.

Yeni çıkan ISO/TS 15066'da ise doğrudan Kolaboratif (İşbirlikçi) Robotlardan söz edilir ve bu robotların güvenlik gereksinimlerinin yanı sıra operatörlerle birlikte çalıştıkları alanın güvenliği için neler yapılması gerektiği belirtilir.

Robotik alanında mevcut güvenlik analizi araştırmaları üzerine kapsamlı bir literatür araştırması yapıldı ve bunların hiçbirinin operatörü proaktif bir faktör olarak tanımadığı bulundu. Genel olarak insan faaliyetlerinin ve robotlarla etkileşimlerinin neden olduğu güvenlik ihlallerine odaklanılmamaktadır. Ayrıca bu konuda, uluslararası standartlar ve robotik camia ile uyumluluk yoktur.

İşbirlikçi çalışmada operatörlerin davranışlarını belirleyen bilişsel ve görev analitik modeller olmak üzere iki kavram mevcuttur. Bunlara ek olarak tekrarlama, yanlış sıralama ve izinsiz giriş gibi bilişsel-akla yatkın insan davranışları üreten ilkelerin tanımlanması ve bunlara ilişkin bilişsel psikolojiden biçimlendirilmiş şablonların oluşturulması gerekir. Bilişsel Şablonlar insan yaratıcılığından kaynaklanan makul hatalarla ilgilenmediğinden robotun hareketinin izlenmesi sırasında ön ve son koşulların denetim altında tutulması gerekir.

Risk analiz süreci, endüstriyel makine kullanan işçileri korumak için tasarlanmıştır. Robotik söz konusu olduğunda, robot ve aksesuarları ile bir işlem gerçekleştirirken robotik hücre kullanıcılarının güvende olmasını sağlamak için uygulanır. Robot entegrasyonunu standartlaştırmak ve robotik hücre tarafından belirli bir güvenlik düzeyine ulaşıldığından emin olmak için risk analizleri de uygulanır. Ancak risk analizi süreci, hücrenin entegre olduğu yerlerde geçerli olan yasa ve mevzuata uygun olarak da yapılmalıdır. Robot ve robotik cihaz üreticileri, cihazları için güvenlik gereksinimleri (PL= d kategori 3) oluşturmuş olsalar bile, uygulama ve ortamın kendisi dikkate alınarak, risk analiz sürecinde hala işlenmesi gereken önemli noktalar mevcuttur. Robotlar ve insanlar arasında doğrudan veya yakın temas meydana geldiği için iş birlikçi uygulamalar çok ciddiye alınmalıdır.

Bundan sonraki risk analizlerinde daha sağlıklı sonuçlara ulaşabilmek için ISO/TS 15066 taslağına aşağıda belirtilen hususların yararlı olacağı görülmektedir;

Kuvvet sınırı değerlerini ve taslak ISO belgesindeki genel yaklaşımı geliştirmek için kullanılan araştırma ve bilgilerin bir listesinin dahil edilmesi (veya referans olarak verilmesi), mevcut sürümü geliştirmek için hangi malzemenin kullanıldığı ve bu nedenle standardın gözden geçirilmesi gerektiğinde hangi yeni araştırma ve bilgilerin ilgili olabileceği daha açık hale gelmiş olacaktır,

İnsanların çalışma alanındaki tipik hareket hızlarının dahil edilmesi, robotların insanlarla çarpıştığında güçlerin doğasının nasıl değiştirebileceğini gösterecektir,

Yaralanma şiddetinden daha çok, çarpışma kriterlerinin bir parçası olarak robotlar ve insanlar arasındaki potansiyel çarpışma ve yaralanma sıklığının dahil edilmesi,

Risk değerlendirme süreci için grafiksel akış şeması yol haritasının kullanımı,

Kabul edilebilir çarpışma kriterleri tanımlanırken psikolojik konuların dikkate alınması gerekip gerekmediği, yani bir çarpışma sonrasında psikolojik etkiler ve bunun iş birlikçi robotlarla çalışırken güveni / performansı nasıl etkileyebileceğini değerlendirme,

Bir robot yüzeyi ile bir kişi arasındaki hareket açısının, belirli bir çarpışma kuvveti için herhangi bir yaralanmanın doğasını nasıl değiştirebileceği (örneğin; cilt yüzeyine belli bir açı ile uygulandığında kabul edilebilir olarak nitelenecek bir kuvvettin cilde dik olarak gelmesi durumunda). Bu faktör taslak ISO/TS 15066 taslağı kapsamında görünmemektedir ve çok az bahsedilmiştir,

İnsan hareketinin insan-robot çarpışma senaryolarına ekleyebileceği potansiyel ek kuvvetlerin niceliği ve KKD'nin insan-robot çarpışma senaryoları üzerindeki etkilerinin nicelleştirilmesi / nitelendirilmesi,

Kişinin (iş birlikçinin) robota doğru potansiyel hareketine dikkat edilmesi gerekebilir, çünkü bu, robot hızı ile birleşerek çarpışma kuvvetlerini daha büyük hasara neden olan seviyelere yükseltebilir. İnsan hareketinin bir çarpışma durumuna hangi kuvvetleri ekleyebileceğini belirlemek bu çalışmanın kapsamı dışındaydı. Eğer kuvvet sınırlarının amacı yaralanmayı kabul edilebilir yaralanma düzeyleriyle sınırlamaksa, o zaman kişinin olası hareketleri ciddi bir Şekilde incelenmelidir.

Önerilen çarpışma ölçüm sistemleri bunu dikkate almadığından taslak hazırlayıcıları ile daha fazla temas edip, görüşlerini alıp bilgileri doğrulatmak uygun bir yol olacaktır. İnsanın robota göre hareketi nispeten öngörülebilir ve insan hareketinin değişkenliği ve ilgili hızlar risk değerlendirmesini çok daha zor hale getirebilir. ISO/TS 15066 taslağında verilen kuvvet değerlerinin kişinin hareketi için herhangi bir şarta izin verip vermediği açık değildir. Geleneksel makine emniyeti standartları, insanların hareket hızını dikkate alan tehlikeli bölgelerde güvenli mesafelerin oluşmasını sağlar;

Standartlarda görülen odur ki, çok sayıda araştırma genç nüfuslu erkekler ve kadavralar üzerinde yapıldığından, bu sonuçları daha geniş nüfusa genelleyerek sınırlı örneklem büyüklüklerine ve popülasyonlarına dayandırılması gerekir.

ISO/TS 15066 taslağında, boyun, omuz veya dizlerdeki eklemelerde, uzun süreli sağlık komplikasyonlarına neden olabilecek travmalara neden olabilecek kuvvetleri göz önüne aldığı konusunda bir teyit bulunmamaktadır.

Bu tür yaralanmalar taslak ISO/TS 15066'da belirtilen maksimum tolere edilebilir sınırların üzerindeki çarpmalarda görünmektedir, çünkü belgede ICD-10-2006'nın yüzey yaralanmaları için yapılan kodlamaları dışındaki Şiddetin tolere edilemeyeceği belirtilmektedir.

ISO/TS 15066 taslağı, Kısaltılmış Yaralanma Ölçeği (Abbreviated Injury Scale /AIS) kategorisi 1 olarak kabul edilebilen maksimum yaralanma seviyesini belirtmektedir, AIS yaralanma kategori 1'i tamamen uygun bir yaralanma kriteri değildir, çünkü tek bir kaburga kırığı kategori 1, küçük yaralanma olarak sınıflandırılır ve bu nedenle iş birlikçi robot güvenliğine uygulama için ek uyarılar gerektirir.

Kazalardan elde edilen kanıtlar, robot-insan çarpışmalarından kaynaklanan ölümlerin bazen tuzaklardan boğulmaya bağlı olduğunu göstermektedir. Bu mevcut çalışma boğulmaya yol açabilecek kuvvet sınırları hakkında bilgi ortaya koymamıştır (boynuna veya göğsüne basarak). Bu tür değerlerin mevcut olup olmadığını veya ISO/TS 15066'nın çekme kuvveti sınırlarında belirtilen değerlerin mutlaka yeni çalışmalarla doğrulanması gereklidir.

Kişinin (iş birlikçinin) robota doğru potansiyel hareketine dikkat edilmesi gerekebilir, çünkü bu, robot hızı ile birleşerek çarpışma kuvvetlerini daha büyük hasara neden olan seviyelere yükseltebilir. İnsan hareketinin bir çarpışma durumuna hangi kuvvetleri ekleyebileceğini belirlemek bu çalışmanın kapsamı dışındaydı. Eğer kuvvet sınırlarının amacı yaralanmayı kabul edilebilir yaralanma düzeyleriyle sınırlamaksa, o zaman kişinin olası hareketleri ciddi bir Şekilde incelenmelidir. Önerilen çarpışma ölçüm sistemleri bunu dikkate almadığından taslak hazırlayıcıları ile daha fazla temas edip, görüşlerini alıp bilgileri doğrulatmak uygun bir yol olacaktır. İnsanın robota göre hareketi nispeten öngörülebilir ve insan hareketinin değişkenliği ve ilgili

hızlar risk değerlendirmesini çok daha zor hale getirebilir. ISO/TS 15066 taslağında verilen kuvvet değerlerinin kişinin hareketi için herhangi bir şarta izin verip vermediği açık değildir. Geleneksel makine emniyeti standartları, insanların hareket hızını dikkate alan tehlikeli bölgelerde güvenli mesafelerin oluşmasını sağlar.

Robotla ilgili kaza araştırmalarında ortaya çıkan ortak bir tema, robot çalışma bölgesinde olduklarının ve robot hareketlerinin farkında olmalarına rağmen çarpışan robot parçasının konumunun yaralı kişiyi şaşırtmasıdır. İnsanın güvenli bir 3 boyutlu bölgede kalmamasının öngörülebilir olduğu ve risk değerlendirmelerine dahil edilmesi gerektiği noktasında bu durum çok önemlidir. Bu durum insan-robot çarpışmaları için kabul edilebilir yaralanma seviyelerinin seçimini büyük ölçüde etkileyecektir, çünkü insanların robotlarla iş birliği yaparken hata yapmaları öngörülecektir bu yüzden de değişken ve güvenilmez insan davranışlarının açıklanması gerekecektir.

Makine tasarımcıları, tasarım sırasında, robotla birlikte çalışacak olan operatör hareketlerinin güvenli olmadığını varsayarak koruyucu çitlerden, risk azaltıcı her türlü koruyucu önlem ve bunların olası performanslarını ISO/TS 15066'daki çarpışma ve yaralanma kriterlerini dikkate alması gerekecektir.

İşbirlikçi bir robot koruma sistemi engellendiğinde, ortaya çıkan durumun bertarafı zor veya kolay arasında çeşitli derecelerde olabilir, o yüzden her bir kademenin çok detaylı bir Şekilde incelenmesi gerekecektir.

İnsan davranışının ve performansının, geleneksel makinelere kıyasla iş birlikçi robot sistemleriyle ilgili olarak daha az mı yoksa fazla mı sorun çıkaracağı proses bazında ele alınmalıdır. Son çalışmalar, insan /robot etkileşimlerinin ek komplikasyonlara neden olabileceğinden bu detaylar çözülene kadar robotların bazı endüstriyel uygulamalar için henüz kullanıma hazır olmadığını göstermektedir.

İnsanlar, olası çarpışma sırasında robot hareketi ve buna tepki olarak kaçınma reflekslerini alışılmış beklentilerle güvenli hale getirmek için çalışırken, başarısızlık halinde hangi senaryoların gündeme gelebileceği üzerinde de durmalıdırlar.

ISO/TS 15066 taslağı, geliştirilmekte olmasına rağmen, belirtilen tüm testleri gerçekleştirebilecek bir enstrümantasyon bulunmadığını belirtmektedir. Otomotiv endüstrisinde yaralanma riskinin değerlendirilmesi için yaralanma kriterleri ve "biyofidel" test mankenleri geliştirilmiştir. Ancak robot çarpışmaları test etmek için gerekli olabilecek test enstrümantasyonu daha basit gibi görünmektedir, çünkü otomotivdeki yaralanma senaryoları daha az değişken (koltuklar, yolcu ve çarpışma gibi) içermektedir. Bunlara ek olarak, eğer bu çarpışmalarda kullanılan KKD'ler var ise çarpışma sonunda bu KKD'lerin kendilerine gelen kuvveti robot ne ölçüde ilettiği veya darbeyi sönümleme yeteneği de araştırılmalıdır.

16. 2025 YILINDAKİ YENİLİKLER: ROBOTİK EMNİYET STANDARTLARINDA YENİ DÖNEM

16.1. "Kolaboratif Robot" Tanımının Kaldırılması ve "Kolaboratif Uygulama" Kavramının Getirilmesi

Son on yıl boyunca "kolaboratif robot" (kısaca "kobot") kavramı, otomasyon dünyasında sıkça kullanılan bir terim haline geldi. Bu ifade, insanlarla emniyetli şekilde birlikte çalışabilen, klasik endüstriyel robotların sınırlarını aşan yeni bir robot türünü tanımlamak için kullanılıyordu. Ancak 2025 yılında yayımlanan ISO 10218 standardı ile birlikte bu kavram önemli bir değişikliğe uğradı.

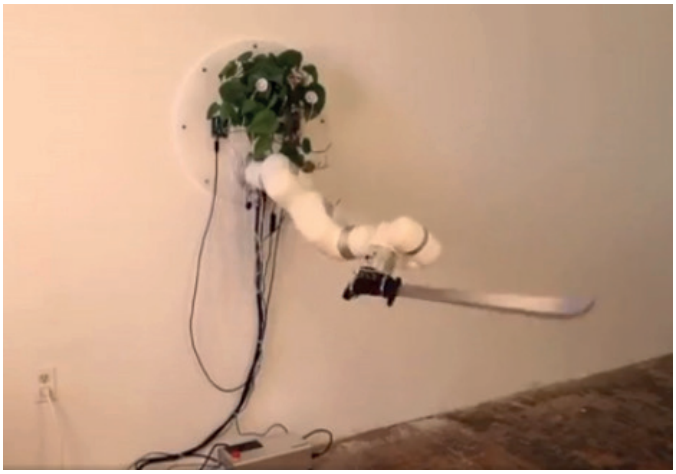
Artık **"**kolaboratif robot" ifadesi standartlardan tamamen çıkarılmış durumda. Bunun yerine "kolaboratif uygulama (collaborative application)" kavramı kullanılmaktadır.

Bu değişiklik, yüzeyde basit bir kelime düzenlemesi gibi görünse de, emniyetli insan-robot etkileşimi konusundaki düşünce yapısının olgunlaşmasını yansıtmaktadır. Bir robota "kolaboratif" demek, onun her durumda emniyetli olacağı anlamına gelmez. Standart hazırlayıcıları, yıllardır süregelen bu kavramsal karışıklığa son vermek istemiştir. Kolaboratif robot Türkiye'de ilk çıktığı dönemlerde robot emniyet çitinden kurtuldu şeklinde sahadaki robot entegratörlerinin arasındaki yaygın konuşmalar, bu konunun yanlış anlaşılmasına verebileceğimiz örneklerden birisidir.

Neden "Kolaboratif Robot" Tanımı Kaldırıldı?

Bu değişikliğin temel nedeni açıklık ve emniyettir. "Kolaboratif robot" terimi zamanla pazarlama odaklı bir tanıma dönüşmüş ve kullanıcılarda yanıltıcı bir emniyet algısı yaratmaya başlamıştır. Pek çok kullanıcı, bu ifadeyi sadece güç ve kuvvet sınırlama (Power and Force Limiting – PFL) teknolojisiyle donatılmış robotlarla eş anlamlı kullanmıştır. Oysa bir robotun bu özelliğe sahip olması, onun otomatik olarak emniyetli olduğu anlamına gelmez.

Aşağıdaki görseldeki güç ve kuvvet sınırlama özellikli robotun tutucusunda bulunan kılıçlı bir uygulamanın bir operatöre çarptığı senaryo hayal edilirse, uygulamanın tamamından bağımsız olarak düşünülen bu uygulamanın kolaboratif bir uygulama olması mümkün değildir.



Şekil 102: Kolaboratif Olmayan Uygulama

Bu sebeple gerçekte, doğası gereği "kolaboratif robot" diye bir robot türü yoktur.

Bu teknolojiler arasında:

- El ile yönlendirme (Hand Guiding)
- Hız ve mesafe izleme (Speed and Separation Monitoring – SSM)
- Güç ve kuvvet sınırlama (PFL)
  gibi işlevler yer alır.

Ancak bu özellikler, yalnızca doğru şekilde tasarlanmış bir uygulama içinde emniyetli bir etkileşime olanak sağlar.

Artık Robot Değil, Uygulama Kolaboratif

Yeni ISO 10218:2025 yaklaşımı, iş birliğinin bir robot özelliği değil, bir uygulama özelliği olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Yani artık "kolaboratif olan robot değil, uygulamadır."

Bir robot tek başına "kolaboratif" sayılamaz; ancak onu çevreleyen emniyet sistemleri, sensörler, görev tanımı ve risk değerlendirmeleri ile oluşturulan bütün uygulama kolaboratif olarak tanımlanabilir.

Bu yaklaşım, hem sorumluluğu hem de emniyet kapsamını daha net biçimde tanımlar.Bir uygulama, gerekli emniyet fonksiyonları, risk değerlendirmeleri ve koruma önlemleriyle tasarlanıp doğrulandığında kolaboratif kabul edilir.

Sektör İçin Anlamı

Bu terminolojik değişim, yalnızca bir isim değişikliği değil; sorumluluğun ve emniyet anlayışının yeniden tanımlanmasıdır. Artık bir robot üreticisi, ürününü "kolaboratif robot" olarak pazarlayamaz. Bunun yerine, hangi kolaboratif özellikleri(örneğin sensörler, kuvvet sınırlama teknolojisi vb.) sunduğunu belirtmeli ve bu

özelliklerin emniyetli bir uygulamada nasıl kullanılacağını tanımlamalıdır. Kullanıcılar ve entegratörler içinse bu değişiklik, sadece bir robot türü satın almanın yeterli olmadığını, asıl önemli olanın uygulamanın bütünsel olarak emniyetli tasarlanması olduğunu hatırlatmaktadır. Sonuç olarak, "kolaboratif robot" ifadesi tarih sahnesinden çekilmiştir.Yerine gelen "kolaboratif uygulama" kavramı, insan-robot etkileşiminin yalnızca doğru tasarım, risk yönetimi ve mühendislik süreçleriyle emniyetli hale getirilebileceğini vurgulamaktadır. Bu değişim, robotik emniyet alanında olgunlaşan bir dönemin habercisi ve 2025 yılında yenilenen ISO 10218 robot emniyet standardı serisindeki en önemli değişikliklerden birisidir.

16.2. ISO/TS 15066'nın ISO 10218-2:2025'e Entegrasyonu

2016 yılında yayımlanan ISO/TS 15066, kolaboratif robotik alanında bir dönüm noktası olmuştur. Bu teknik spesifikasyon, insan-robot etkileşiminin emniyetli biçimde yürütülmesi için sınır değerleri, çalışma modlarını ve tasarım prensiplerini tanımlamıştır. Bu doküman, uzun yıllar boyunca ISO 10218-1 ve ISO 10218-2 standartlarını tamamlayıcı nitelikte kullanılmış; ancak kendi başına bağlayıcı bir standart değil, teknik kılavuz (Technical Specification) statüsünde kalmıştır.2025 Revizyonu ile Yeni Dönem:2025 yılında yapılan kapsamlı revizyonla birlikte, ISO/TS 15066'nın içeriği ISO 10218-2:2025 standardına resmen entegre edilmiştir.Bu değişiklik, kolaboratif robotik ile ilgili gerekliliklerin artık ek bir dokümanla değil, doğrudan ana standardın bir parçası olarak ele alınmasını sağlamıştır.Revize edilen ISO 10218-2:2025, artık sadece robot sistemlerinin entegrasyon gerekliliklerini değil, aynı zamanda kolaboratif uygulamalara ilişkin emniyet gereklerini de kapsamaktadır.Bu entegrasyon sayesinde, standardın kullanıcısı – ister sistem entegratörü ister üretici olsun – tüm emniyet gereksinimlerine tek bir doküman üzerinden erişebilmektedir.

Bu Değişikliğin Önemi

Bu yapısal birleşme, iki önemli hedefi gerçekleştirmektedir:

1. Tutarlılık ve erişilebilirlik:

Kolaboratif uygulamalara ilişkin gereklilikler artık ISO 10218 serisinin içinde bütünleşik biçimde yer almaktadır. Bu durum, kullanıcıların farklı dokümanlar arasında geçiş yapmak zorunda kalmadan, tüm gereksinimleri tek referans üzerinden inceleyebilmesini sağlar.

2. Kolaboratif yaklaşımın olgunlaşması:

ISO/TS 15066'nın artık ayrı bir teknik spesifikasyon olmaktan çıkması, kolaboratif uygulamaların robotik sistemlerin ayrılmaz bir parçası haline geldiğini göstermektedir. Böylece, "kolaboratif uygulama" artık ayrı bir özel kategori değil, her robotik sistemde uygulanabilecek bir tasarım yaklaşımı olarak değerlendirilir hale gelmiştir.

ISO/TS 15066'nın Geleceği ve WG8 Çalışmaları

ISO/TS 15066 dokümanının ISO 10218-2:2025 standardına entegrasyonu, kolaboratif uygulamalara ilişkin emniyet gereklerinin artık ana standardın bir parçası haline gelmesini sağlamıştır. Ancak bu süreç burada bitmemektedir.

ISO/TS 15066'nın, kendi başına bağımsız bir standart haline getirilmesi ve güncel saha koşullarına adapte edilmesi amacıyla, ISO/TC 299 Robotics Komitesi bünyesinde çalışmalar devam etmektedir.

Bu kapsamda oluşturulan WG8 (Working Group 8) adlı çalışma grubunun ismi:

"Biomechanical Data and Validation Methods for Physical Human-Robot Interactions" (Fiziksel İnsan-Robot Etkileşimleri için Biyomekanik Veriler ve Doğrulama Yöntemleri). Bu çalışma grubunun amacı, insan-robot temasına ilişkin biyomekanik eşik değerlerini yeniden tanımlamak, deneysel doğrulama yöntemlerini geliştirmek ve gelecekteki kolaboratif uygulamalar için daha kesin, bilimsel temellere dayalı emniyet kriterleri oluşturmaktır.

Türk Standartları Enstitüsü bünyesindeki MTC 205 Robotik Komitesi'nden bir uzman, TEFDO'nun sponsorluğu ile bu çalışma grubuna aktif olarak katılmakta ve Türkiye'yi uluslararası düzeyde temsil etmektedir. Bu katılım, ülkemizin robotik emniyet standartlarının gelişimine doğrudan katkı sağlaması açısından son derece önemlidir.

WG8 Çalışma Grubu ve Yeni Standart Projesi

WG8 grubunun yürütmekte olduğu yeni proje, "ISO/AWI 15066-1 Collaborative Safety — Physical Contact — Part 1: Biomechanical Thresholds and Data" (ISO/AWI 15066-1 Kolaboratif Emniyet — Fiziksel Temas — Bölüm 1: Biyomekanik Eşikler ve Veriler) başlığını taşımaktadır. Bu proje tamamlandığında, kolaboratif uygulamalarda fiziksel temasın sınırlarını belirleyen yeni biyomekanik verilerle, robot entegratörlerinin uygulama tasarımında devrim niteliğinde değişiklikler öngörülmektedir. Yeni standardın, kolaboratif uygulamaların doğrulama süreçlerini, test metodolojilerini ve tasarım kriterlerini tamamen yeniden tanımlaması beklenmektedir.

Sektörel Etkiler ve Beklentiler

ISO/TS 15066'nın bu yeni versiyonunun, ISO/AWI 15066-1 standart projesi tamamlandığında, kolaboratif robotik alanında büyük yankı uyandırması beklenmektedir.

Yeni standart, özellikle kolaboratif uygulama entegratörlerinin ve sistem tasarımcılarının iş yapış biçimlerinde köklü değişiklikler getirecek; fiziksel temas, kuvvet sınırları, hız değerleri ve test yöntemleri artık daha bilimsel, ölçülebilir ve doğrulanabilir temellere oturtulacaktır.

Bu gelişmeler, kolaboratif robot kavramının mühendislik temelli, ölçülebilir emniyet değerleri üzerinden yeniden tanımlanmasını sağlayacak ve geleceğin insan-robot etkileşimi anlayışını şekillendirecektir.

ISO/AWI, "Approved Work Item" (Onaylanmış Çalışma Maddesi) anlamına gelir.u ifade, ilgili standardın hâlen geliştirme aşamasında olduğunu ve resmî yayıma hazırlanmakta olduğunu belirtir.

"ISO/AWI 15066-1" ifadesi, ISO/TS 15066'nın revize edilerek tam kapsamlı bir uluslararası standart haline getirilme sürecinde olduğunu göstermektedir.

KAYNAKÇA

Askarpour, M., Mandrioli, D., Rossi, M. ve Vicentini F. (2016). SAFER-HRC: Safety Analysis Through Formal verification in Human-Robot Collaboration. Italy.

Barette, M. (2016). Collaborative Robots/Risk Assessment, an Introduction. Robotiiq.

Beaupre, M. (t.y.). Collaborative Robot Technology and Applications. Erişim Adresi: https://www.robotics.org/userAssets/riaUploads/file/4- KUKA_Beaupre.pdf

Bélanger, M. (2016). Collaboratice Robots Risk Assessment, An Introduction Rev. 1.1

Bensaci, C., Zennir, Y. ve Pomorski D. (2020). A New Approach to System Safety of humanmulti-robot mobile system control with STPA and FTA, Algerian Journal of Signals and Systems (AJSS). France

Bolden, C. (2015). Cybersecurity Challenges for Manned and Unmanned Systems, American Military University, Homeland Security

Braman, R. (2019). The Basics of Designing for Safety with Collaborative Robots

Chinniah, Y. (2016). Robot Safety: Overview of Risk Assessment and Reduction, Advances in Robotics & Automation, Canada

Dağlı, M. (2019). İnsan Robot İş birliği: Kolaboratif Robotlar. Mühendis ve Makine

Dacelsolutions, SX Series Safety Laser Scanner. (2019)

Dominguez, E. (t.y). Risk Assessment Process for Collaborative Robotic Applications, Pilz Automation Safety. Ria. USA

Fabricating Metal Working,Design Considerations for Robotic Welding Cell Safety. (2013)

FANUC, Safety Manual B-80687EN/15

Fryman, J. ve Matthias, B. (2012). Safety of Industrial Robots: From Conventional to Collaborative Applications. Conference Paper, ABB

Erhan Eskicumalı. (2025). TEFDO EN ISO 13850 Eğitim Görseli

Gopinath, V. ve Johansen, K. (2016). Risk Assessment Process for Collaborative Assembly – A Job Safety Analysis Approach, 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS). Sweden

GT Engineering, (2020). Erişim Adresi: https://www.gt-engineering.it/en/Insights/the-doubt-about-reset-2

Gualtieri, L., Palomba, I., Wehrle, E. J. ve Vidoni R. (2020). The Opportunities and Challenges of SME Manufacturing Automation: Safety and Ergonomics in Human–Robot Collaboration, Industry 4.0 for SMEs Challenges, Opportunities and Requirements, Matt.D., Modrák V., Zsifkovits H. (s: 105- 138).

HHB, Safetyman DT2 Usermanual. (2014)

HSE. (2012). Collision and injury criteria when working with collaborative robots, Health and Safety Laboratory. England.

Hoffman, G. ve Breazeal, C. (2007). Effects of anticipatory action on human-robot teamwork: efficiency, fluency, and perception of team.

Inel, F., Zennir, Y. ve Adlene, R. (2020). A New Approach to System Safety of humanmulti-robot mobile system control with STPA and FTA. Algerian Journal of Signals and Systems (AJSS)

Josep Plassa (2025) Acil Durdurma ve Koruyucu Durdurma

KAREL, Erişim Adresi: https://www.karel.com.tr/bilgi/ip-koruma-sinifi-nedir-seviyeleri-nelerdir-ip67-ve-ip68-ne-anlama-gelir

Khalid, A., Kirisci, P., Ghrairi, Z., Thoben, K. ve Pannek J. (2016). A methodology to develop collaborative robotic cyber physical systems for production environments

Khalid, A., Kirisci, P., Ghrairi, Z., Thoben, K. D. ve Pannek, J. (2016b). Safety Requirements in Collaborative Human Robot Cyber Physical Systems

Khalid, A., Kirisci, P., Ghrairi, Z., Thoben, K. D. ve Pannek, J. (2017). Towards Implementing Safety and Security Concepts for Human-Robot-Collaboration in the context of Industry 4.0

Kirschner. D., Schlotzhauer. A., Brandstötter.M., (2017). Validation of Relevant Parameters of Sensitive Manipulators for Human-Robot Collaboration. To appear in Proceedings of the 26th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region)

Kobotlarla Çalışmaya Hemen Başlayın, Universal Robot

Laurent Giraud, Ph. D., junior engineer, researcher, Research Department, IRSST Sécurité des machines - Prévention des phénomènes dangereux d'origine mécanique, protecteurs fixes et distances de sécurité (2009)

Markis, A., Montenegro H., Neuhold M., Oberweger, A., Schwald, C., Sihn, W., Ranz, F., Edtmayr, T., Hold, P., Reisinger P. (2017). Human-Robot- Collaboration, Risk Analysis and Minimization (2nd Ed.), TÜV. Austria.

Matthias, B. (2017). Human-Robot Collaboration, Industrial Applications and Open Challenges. Dagstuhl Seminar on "Computer-Assisted Enginnering for Robotics and Autonomous Systems", ABB

Matthias, B. (t.y.). Collaborative Robots – Power and Force Limiting, ABB, Ria. Germany, EriĢim Adresi: https://www.robotics.org/userAssets/riaUploads/file/7-Bjorn.pdf

Matthias, B. ve Reisinger T. (2016). Example Application of ISO/TS 15066 to a Collaborative Assembly Scenario/ ABB, Germany

Matthias, B., Kock, S., Jerregard, H., Källman, M. ve Lundberg, I. (2011). Safety of Collaborative Industrial Robots, ABB. Sweden

Matúšová, M., Bučányová, M. ve Hrušková E. (2019). The future of industry with collaborative robots. Slovak University of Technology, Faculty of Material Science and Technology, Institute of production systems. Slovak Republic.

Mihelj, M., Bajd, T., Ude, A., Lenarčič, J., Stanovnik, A., Munih, M., Rejc, J. ve Šlajpah S. (2019). Robotics (2nd. ed.), Springer. Slovenia

Nikolakis, N., Maratos, V. ve Maksis, S. (2018). A cyber physical system (CPS) approach for safe human-robot collaboration in a shared workplace. Greece

Omron Electronics, A22E-M-02B Ürün Görseli

Omron Electronics, F3SG-4RA, F094-E1-07 Datasheet (2014)

Omron Electronics, OS32C z296_os32c_users_manual_en. (2020)

Owen, A. (2016). How to do Even more with Collaborative Robots, Lean Robotics

Part 1: Kick Starting Your Project Part 2: Shopping for a Robot, Getting started with collaborative robots. Lean Robotics

Payne, A.R. ve Patel, S. (2001). Occupant Protection & Egress In Rail Systems project (OPERAS): Injury Mechanisms & Injury Criteria. MIRA, UK

Pecora, A., Maiolo, L., Minotti, A., Ruggeri, M., Dariz, L., Giussani, M., Iannacci, N., Roveda, L., Pedrocchi, N. ve Vicentini F. (2019). Factories of the Future. Springer Open.

Pecora, A., Maiolo, L., Minotti, A., Ruggeri, M., Dariz, L., Giussani, M., Iannacci, N., Roveda, L., Pedrocchi, N. ve Vicentini, F. (2019b). Systemic Approach for the Definition of a Safer Human-Robot Interaction, Factories of the Future (173-196). Italy

Pilz The Spirit of Safety, t.y. Erişim Adresi: https://www.pilz.com/tr-TR/iec-en- 61496-1

Priyadarshini, I. (2017). Cybersecurity risks in Robotics

Reer Safety, Determination of the Safety Distance

Rickert, M., Foster, M. E. ve Giuliani, M. (2007). Integrating Language, Vision and Action for Human Robot Dialog Systems. International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction, HCI International. China

SCHMERSAL, Kilitlemeli RFID Emniyet (Switch) Ürünleri (2025)

SCHMERSAL, Kilitlemeli RFID Emniyet (Switch) Ürünleri (2025)

Sezai, T. (2015). Endüstride Kaynak Robotları, Proseslerin İncelenmesi ve Geliştirilmesi. Gedik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi

Shea R.N. (t.y.). ISO/TS 15066 Introduction. Universal Robots. Erişim adresi (robotics.org/userAssets/riaUploads/file/12-TR15066Overview SafetyforCollaborativeApplications-RobertaNelsonShea.pdf)

SICK, Güvenli Makina Kılavuzu. (2015)

SICK, Safe Interlocking from SICK: Safety locking solution for maximum productivity | SICK AG (2018)

SICK, Arakilitleme tertibatları ürün görseli (2022)

Wang, L., Schmidt, B. ve Nee A. Y.C. (2013). Vision-guided active collision avoidance for human-robot collaborations.

FUNDAMENTALS AND PRACTICES FOR SAFE OPERATION OF INDUSTRIAL ROBOTS

WRITERS

Asst. Prof. Rüştü UÇAN

Ali Orhan KARACIĞAN

Erhan ESKİCUMALI

TRANSLATORS

Ceren UÇAN

Dr. Nafiseh FARAJIRAD

Principles and Practices for Safe Working with Industrial Robots

Writer: Rüştü UÇAN
Writer: Ali Orhan KARACIĞAN
Writer: Erhan ESKİCUMALI
Translator: Ceren UÇAN
Translator: Nafiseh FARAJIRAD

ISBN:
E-ISBN:
1st.Edition: February 2021- EFE ACADEMY (Turkish)
2and Edition: March 2022- IKSAD Publishing (Turkish)
3rd.Edition: April 2026 – Uskudar University (Turkish – English)

Publication, sales and copying rights of this work belong to

LIBRARY CARD

Principles and Practices for Safe Working with Industrial Robots

UÇAN, Rüştü- KARACIĞAN, AliOrhan - ESKİCUMALİ, Erhan- Tranlators: UÇAN, Ceren - FARAJIRAD, Nafiseh

1.Edition, 215 s., 160 x 240 mm. There is a bibliography, no index.

Preface

The principles and practices governing the safe operation of industrial robots, which have evolved continuously since the 1960s, have gained unprecedented significance with the rapid acceleration of digitalization, particularly following the onset of the COVID-19 pandemic. As one of the key enabling technologies of Industry 4.0, collaborative robots (cobots), designed to perform repetitive and monotonous tasks alongside conventional industrial robots, have become increasingly prevalent across a wide range of sectors, including healthcare, food production, automotive manufacturing, and the metal industry during the pandemic period.

The widespread adoption and implementation of these robotic systems have highlighted the necessity of ensuring their safe integration into human-centered work environments. In particular, the increasing prevalence of human–robot collaboration has underscored the need for a more comprehensive understanding of robot safety principles and safe working practices.

In response to growing interest and demand, we found it necessary to thoroughly revise and expand our previous book, *Occupational Safety Approach in Collaborative Industrial Robots*, by enriching its content with more comprehensive information on practical applications and safety considerations. The first two editions of the book were published in Turkish as follows: the First Edition by Efe Akademi in February 2021, and the Second Edition by İKSAD Publishing in March 2022.

Since the publication of the first edition in 2021, significant advancements have taken place in the field of industrial robot safety. Most notably, the revised editions of ISO 10218-1 and ISO 10218-2, published in 2025, introduced substantial updates that reflect the latest developments in industrial robotics and functional safety.

A comprehensive understanding of any subject requires not only familiarity with its current state but also an appreciation of its historical development and evolutionary progression. As Confucius wisely stated:
"Study the past if you would define the future."

This perspective emphasizes that a sound understanding of the past is essential for correctly interpreting and positioning new developments within their proper context. Accordingly, this edition includes a newly added chapter providing a general overview of the principal revisions introduced in the 2025 edition of the ISO 10218 series of robot safety standards. We sincerely hope that this book will serve as an up-to-date, practical, and authoritative reference for professionals, engineers, researchers, and practitioners working in the field of industrial robot safety. For the first time, this edition also includes an English translation. We would like to express our sincere gratitude to Ceren Uçan and Dr. Nafiseh Farajirad, whose dedicated efforts made this translation possible.

We hope this book will prove to be a valuable resource for its readers.

10.08.2026
Asst. Prof. Rüştü Uçan
Assistant Professor Ali Orhan Karacığan
Erhan Eskicumalı

Acknowledgements

We would like to express our sincere gratitude to Nurdoğan İnci, Assoc. Prof. Dr. Müge Ensari Özay, İrem Karacığan, and Necmi Türer for their invaluable support and assistance throughout the preparation of this book.

Our thanks also go to Bülent Tellan, Fatma Özten, and Esra Ulutaş for their dedicated efforts in the preparation of this revised edition.

August 2026

Asst. Prof. Rüştü Uçan
Ali Orhan Karacığan and
Erhan Eskicumalı

INDEX

Preface **155**
Acknowledgements **157**
Index **159**
Symbols and Abbreviations **161**

1. Industrıal Robot 163
1.1. Human-Robot Collaboration 163
1.2. Matters to be Considered in the First Automation Attempt to be Made with a Robot in the Enterprise 165
1.3. Seven Factors That Create Automation Challenges 166
1.4. Building a Cobot Deployment Team 167
1.5. Benefits of Cobots 167
1.6. Bringing Management and Workforce Together 168

2. Cobot And Elements 169
2.1. Main Features Emphasized in Cobot Design 171
2.2. Benefits of Adding Safety Sensors to Collaborative Robots 175

3. Transition Process from Traditional Robots to Collaboratice Robots 176
3.1. 15066 Recommendations for Collaborative Robot Design 176

4. Cobot And Risk Assessment 180
4.1. The Basics of Designing for Safety with Collaborative Robots 181
4.2. Resources for Understanding Cobot Risks 181
4.3. Risk Assessment 181
4.4. Collaborative Robot Risk Assessment 183

5. Collaborative Robots And Applications In Terms Of Ohs 185
5.1. Precautions to be Taken for Occupational Safety During Robot Selection 185
5.2. Unexpected Movements That Could Cause Accidents in Collaborative Robots 187

6. Safety And Ergonomy in Human And Robot Collaboration 188
6.1. Introduction to Industrial Robot Safety 188
6.2. Basics of Occupational Safety in Industrial Human-Robot Interaction 189
6.3. Main Safety Standards for Industrial Collaborative Robotics 189
6.4. Technical Specification ISO TS 15066 (2016) and Collaborative Operations 190
6.5. HCD/Human Centered Design and Ergonomics 190
6.6. Ergonomics in Human-Robot Collaboration 191
6.7. Development of New Methodologies for Risk Assessment 193

7. Cybersecurity Risks In Robotics 194
7.1. Importance of Cybersecurity in Robotics 195
7.2. Current State of Security in Robotics 196
7.3. Some Mitigation Strategies to Avoid Cybersecurity Risk Among Robots 197

8. Some Rules Of Ethics To Be Followed In Robotics.....199
8.1. Laws of Robotics for Ensuring Cybersecurity.....200

9. Risk Assessment and Risk Reduction in Collaborative Robots.....200
9.1. Case Study from Quebec.....207
9.2. Risk Assessment Process for Collaborative Robotic Application.....209
9.3. Risk Assessment in Collaborative Robots.....213
9.4. Security Analysis through Official Verification in Human-Robot Collaboration.....213

10. Overview Of Safer-Hrc Methodology.....215
10.1. Collaborative Robots and Risk Assessment.....215
10.2. Collision and Injury Criteria for Working with Collaborative Robots.....226
10.3. Developments on the Draft ISO Technical Specification.....227
10.4. Security of Collaborative Robots.....227

11. Standards, Technical Specifications and Legislation on Collaborative Robots.....230
11.1. Machinery Safety Studies.....231
11.2. Safety Rules in Collaborative Robot Systems.....232
11.3. Safety Requirements for Robot Hardware and Environment:.....233
11.4. Other Precautions to be Taken Regarding System in Which Robot is Integrated.....234

12. System Security and Risk Assessment and Approaches.....234
12.1. A Systemic Approach for the Definition of a Safer Human-Robot Interaction.....234
12.2. Risk Assessment Process for Collaborative Assembly and A Job Safety Analysis Approach.....238
12.3. A Methodology to Develop Collaborative Robotic Cyber Physical Systems for Production Environments.....240
12.4. A Cyber Physical System (CPS) Approach for Safe Human-Robot Collaboration in a Shared Workplace.....247

13. Risk Analysis Approaches.....252
14. Appendixes.....256
14.1. Appendix A.....256
14.2. Appendix B.....261
15. Applications.....269
16. Conclusion And Recommendations.....300
17. Innovations Of 2025: A New Era In Robotic Safety Standards.....303
18. References.....307

SYMBOLS AND ABBREVIATIONS	
DOF	Six Degrees of Freedom
ANSI	The American National Standards Institute
BLANKING	Auxiliary Function of Safety Heat Curtains Allowing the Insertion of an Opaque Material into Parts of the Collaborative Area Protected by the Light Curtain without Causing the Machine to Stop
CC	Computational Component
CE	Concurrent Engineering
CEN	Committee of European Norms
CEN	European Committee for Standardization
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CERA	Composite Ergonomics Risk Assessment
COBOT	Collaborative Robots
CPPS	Cyber-Physical Production Systems
CPS	Cyber Physical System
CRCPS	Collaborative Robotic Cyber Physical System
CSA	The Canadian Standards Association
CTL	Computation Tree Logic
CWS	Collaborative Work Space
DFCA	Design for Collaborative Assembly
DR	Delay Rate
DOE	Design of Experimental
DPU	UDP/User Data program Protocol
EAWS	Ergonomic Assessment Work Sheet
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
HC	Human Component
HCD	Human Centered Design
HMI	Human Machine Interaction System
HRC	Human Robot Collaboration
IFR	International Robotic Federation
IMU	Inertial Measurement Units
IoT	Internet of Things
ISO	The International Organization for Standardization
JSA	Job Safety Analysis
JSI	Job Strain Index
KPI	Key Performance Indicators
LLDN	Low Latency Deterministic Network

SYMBOLS AND ABBREVIATIONS	
MAC	Manual Handling Assessment Chart
MAC	Medium Access Control
MSD	Musculoskeletal Disorders
MTTFD	Mean Time to Dangerous Failure
MUTING	Temporary Disable
NCS	Networked Control System
NIST	National Institute of Science and Technology
OCRA	Occupational Repetitive Actions
OSHA	The Occupational Safety and Health Administration
OWAS	Ovako Working Posture Analysis System
PC	Physical Component
PCB	Printed Circuit Board
PFHD	Probability of Dangerous Failures Per Hour
PHRI	Physical Human Robot Interactions
REBA	Rapid Entire Body Assessment
RFID	Radio- Frequency Identification Technology
RF-PECVD	Radio Frequency- Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
RIA	Robotic Industries Association
ROS	Robot Operating System
RPN	Risk Priority Number
RSS	Received Signal Strength
RT	Reaction Time
RT	Reverbation Time
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
SAFER-HRC	Safety Assessment Through Formal Verification In HRC Applications
SD	Safety Distance
SEA	Series Elastic Actuator
SIL	Safety Integrity Level
SMF	Smart Mini-Factory
SRP/CS	The Safety Related Part of A Control System
STAMP	Systems Theoretic Accident Model and Process
STPA	System Theoretic Process Analysis
UC	Unsafe Components
UML	United Modelling Language
VC	Virtual Commissioning
VSA	Variable Stiffness Actuator
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
SEA	Series Elastic Actuator
SIL	Safety Integrity Level

1. INDUSTRIAL ROBOT

As China's production possibilities affected Europe and the USA along with the whole world, Germany had brought up Industry 4.0 at the Hannover Fair in 2011, and in 2012 after the German Robert Bosch GmbH and Henning Kagermann working groups had sent the files that they prepared to the German Government, the 4th Industrial Revolution / Industry 4.0 has officially begun, the USA, Japan and European countries came together and took the first steps of the 4th Industrial Revolution against China.

One of the most important innovations of Industry 4.0, which set out with various slogans such as smart factories, internet of things (IoT), 3D printer, machines that communicate-talk to each other and collaborative robots, was allowing robots who were forced to work alone behind fences in cages to leave their cages. These very expensive smart machines, programmable by qualified programmers, would now be able to work with humans.

These very expensive smart machines have become easily programmable by everyone, can be easily purchased even by SMEs who want, and have been able to successfully perform flexible and routine works in the last 10 years. In course of the collaborative tasks of these smart machines which are also allowed to work with humans in the safe working area that allocated to them, when it becomes a current issue that possible involuntary movements of both sides, crushing, jamming, injury or bone fracture due to their close relations with the operators, it was determined that the existing standards that previously prepared for traditional robots were insufficient and new technical regulations were required.

Traditional robots were working on their own and, if it's not allowed, their workstations could not be accessed. On the other hand, collaborative robots were supporting the humans they work with, and they were carrying out the process by collaborating with them in some processes. Due to this collaboration, various limitations (limit values) have been identified for these smart machines, which are called Collaborative Robot or Cobot, to enable safe cooperation between humans and robots, Recommendations and limit values to be used in risk assessments proposed to be made for possible risks and dangers both during design and after integration into the systems where cobots will be used, are included in ISO / TS 15066, which is prepared especially for collaborative robots. And also, in this technical specification draft, the relevant standards that should be taken as reference in terms of machinery and safety and security are also recommended.

1.1. Human-Robot Collaboration

With the start of Industry 4.0, collaborative robots had begun to replace traditional industrial robots, that have been used in many applications nearly 50 years. In fact, collaborative robots, which are a continuation of industrial robots, have become much more preferred due to their ability to both support them with humans and work together with them. The fact that cobots can be able to work together with humans instead of working in private areas reserved for them like traditional robots, to learn their job easily, and programming can be done by unqualified people who have received a short training, rather than by qualified programmers as in industrial robots, has made them more attractive and commonly utilizable in many applications. Although cobots are a relatively new technology, that doesn't mean they are difficult to use. In fact, cobots are designed to be easier to operate than traditional industrial robots. Until recently, industrial robots were the only option when a process was wanted to be automated with robots. Until cobots began to be used, what most people thought about robots was that they were big, heavy, and expensive aids.

Industrial robots were developed to meet the needs of high-volume production, such as in the automotive, aerospace and consumer goods industries. On the contrary, Cobots are designed for the production of large quantities of different parts, most of which are found in small and medium sized enterprises. In fact, industrial robots and cobots have many similarities. Cobots have several advantages that can be a perfect fit for many enterprises, not just small and medium enterprises. (Table 1).

The most common applications of cobots are as follows:

Machine tending (loading), as required by the process, robot loads the workpiece to the machine and takes it from the machine after processing, while the operator continues to do the other tasks assigned to him,

Pick and place, the robot takes the part from any machine or belt involved in the process and puts it on another machine in the system for the next process or places the parts or products in boxes in the packaging process,

Assembly, the robot performs simple part-assembly tasks that require low dexterity, after the robot completes the simple assembly task, the part to be assembled is taken to another area by the robot, the operator completes the assembly process in this area,

Quality testing, the robot loads products into a quality testing machine and removes them once testing is complete.

Other lightweight applications, the robot performs basic packaging, finishing, gluing, and other such tasks. Cobots can do most of the simple, boring, repetitive and low value-added tasks that humans do, so long as they don't require great dexterity.

Table 1: Comparison of the benefits of industrial robots and cobots (Getting Started with Collaborative Robots, t.y.)

	Industrial Robots	Cobots
Move parts around	✓	✓
Follow a route/path	✓	✓
Work autonomously for extended periods of time	✓	✓
Increase productivity and product quality	✓	✓
Reduce musculoskeletal injuries in workers	✓	✓
Require sensors and/or fencing for safety	✓	
Require extensive robotics knowledge to integrate	✓	
Take up lots of floor space	✓	
Are expensive	✓	
Easy for non-experts to program		✓
Easy to slot into the existing workspace		✓
Easy to reconFigure for new tasks		✓
Easy to move from one task to another		✓
Quick to set up		✓

To decide which operations will be done by robots: Before starting the robot and the related work cell studies, it is necessary to decide on which tasks previously done by humans will be automated for what purpose. The task to be automated may not be suitable for the robot, or the robot may remain far from the desired efficiency due to process characteristics.

1.2. Matters to be Considered in the First Automation Attempt to be Made with a Robot in the Enterprise

Task Feasibility: Although a particular task might seem like a good candidate for automation (perhaps because it's boring and repetitive), it might not be the best fit for cobots. That's because cobots and humans have very different skill sets/abilities, although some works are easy for a human, those works can be difficult for robots, the opposite of this argument is also valid, in some cases, while the work done by humans cannot be fully efficient for various reasons, very different results can be obtained if robots/cobots do the same job.

The cobot that can be used successfully in any enterprise should have two main properties:

- Highly predictable,
- Repeatable,

Many tasks have one of these properties. For example, the work in the pizzeria is highly repeatable, although the product produced at the end of the process is pizza, the ingredients and sauces used in the pizza can vary.

However, when we talk about combining the pieces of Lego, the product that will be obtained at the end of the work will not be different from what we predicted. For this reason, the task we intend to get the cobot out of must have highly predictable and repeatable properties.

Predictability of the task: Tasks are highly predictable when the objects to be manipulated are always the same and they always arrive at the same location.

Some properties of predictable tasks:

- Ordered objects, a series of objects that is always handled in the same order, the cobot can repeat this task continuously,
- Similar objects, Objects with the same or very similar dimensions, weight range, physical form. This allows for quick changes between products without the need to change tools or grippers.
- Regular objects, objects with little variation from one to another. Your cobot can handle some irregularity with the right choice of gripper, but regular objects are much easier to work with.
- Regular part presentation, objects are arranged in a deliberate, consistent order. Matrices and trays with parts to be treated are often used for part presentation, processes involving fixed matrices are the easiest to automate, as with the trays, the cobot can be programmed to remove the empty tray and bring a new tray to the same spot for parts to be picked again.

Task Repeatability: The steps of the task are the same every time and can be repeated over and over again.

- Consistent operation: The task does not vary between objects in a batch and does not vary much between different batches.
- Long-term operation: As the operation will repeat many times, it is not possible to automate a one-time-only troublesome operation.
- High-demand operation: Operations best suited for automation are consistently done the same large number of tasks.

Three Easy-to-Implement Cobot Tasks are outlined below:

Machine Tending/Loading: Machine loading or tending is one of the most common cobot tasks. There is no need for complex programming of the robot for this task, and in this method, which does not need to communicate with other equipment, the system does not contain many sensors. They are mostly preferred for loading parts to CNC machines, quality testing machines or three-dimensional machines or removing the work piece from the machine. In classical methods, when the operator performs these tasks, he/she waits for the

work to be finished at the machine between loading and unloading, and if this work is done by the cobot, this eliminates a lot of non- value-added work.

Pick and Place: This is the second most popular application where cobots are used, it is used for the tasks of picking similar geometric shaped objects from a certain place and arranging them in another position in the desired shapes or sizes without the need for an extra sensor.

Dispensing: Sticking labels or writing labels on any packaging material can be successfully performed by cobots in terms of removing and accelerating routine work and always in the same format. With a command to be given to the robot effector, it is performed by repeating the same movements at a certain time on a desired path. In this method, there is no need for an additional sensor.

Tasks that Require Extra Sensors:

Finishing (with force sensors): Finishing involves using the robot to move a finishing tool (such as a buffing tip) over the surface of a product. This process usually requires a force sensor because polisher tools set must be applied to the surface with a constant pressure. If a force sensor has to be used, Force Sensor can be attached to the robot in minutes, this makes integration much easier than it was in the past.

Assembly (with Force Sensors): Assembly tasks can be done in a variety of ways, but most of the time, during assembly, a controlled force must be applied during pushing parts together, for this, this task is helped by adding a force sensor to the robot.

Pick and Place (with Vision Sensors): Pick and place applications can be made more flexible by adding a vision sensor to detect the position and orientation of objects.

1.3. Seven Factors That Create Automation Challenges

Seven factors need to be examined in order for robots to be used in any application, otherwise, bringing these robots to the desired conditions will cause more energy, labor, time and finance costs. Although these factors seem simple at first, if not studied in detail, they can quickly cause various risks, dangers and problems. The best strategy is to start small and work your way up to more complex projects over time.

1. **Unstructured Part Presentation:** For humans, it can be very easy to pick up objects that are together randomly, throw them into a box or bucket and take them up again, however, although robots have an advanced sensing, they need a proper configuration to ensure that they can receive objects correctly and risk-free.
2. **Widely Divergent Objects:** Robots can detect more than one object and accordingly pick it up from one position and transfer it to another position, this is easier with different geometrical shaped materials, but in similarly shaped materials this problem needs to be examined very well.
3. **Conveyors:** Conveyors, which are commonly used in factory automation, are among the most preferred equipment to offer the products to the service of the robot. To detect moving objects, a vision system or part detection sensors must often be added, advanced programming is needed to get the robot to move to the right position and grasp the moving objects.
4. **Complex Sensing:** It is not easy to detect objects at all times, in any position and with every sensor, the sensor must be selected by examining the process conditions. For example, with the new fixed laser light camera systems that built 3D models of objects and the environment of the robot, it is possible to both detect an object in 3D and to calculate the best grasping configuration.
5. **Integration with Other Machines:** In some cases, it may be necessary to integrate the robot with multiple machines to run the process. This process, which is very complex and demanding in traditional industrial robots, can be easily solved with a very simple process in new generation collaborative robots. A robot to be commissioned to input or output a machine, provided they use the same interface, it can be coupled with other machines with remote control or cable in a very short time.

6. **Logic:** Humans are natural problem-solvers. If we see a bottle lying on its side, we straighten it right away. People show various reactions while holding or grasping objects using their logic. However, robots can do as much as what they have been taught in their programs, trying to teach the robot more skills make its program even more complicated. Commands given to robots must be precise and must not allow hesitation.

7. **Advanced Force Control:** It is very easy to get the robot to move in a straight line, however, requiring the robot to apply a force for the duration of its movement requires a much more difficult and complex program. These points will need to be considered in great detail during the risk assessment, as the more advanced types of force control to the robot during implementation are a complex program.

1.2. Building a Cobot Deployment Team

One of the biggest challenges of introducing robots into a workplace is overcoming the fear of the working team that the robot will take jobs away from them. However, the purpose of using robots is not to make people unemployed, but to eliminate monotonous and repetitive jobs, to increase production, to protect people from dangerous jobs and to direct employees to jobs with higher added value. This will further increase productivity, quality, well-being and worker morale. Employees should be informed that they should cooperate with these robots, that the results obtained as a result of this cooperation will be more punctual, error-free and will provide the same quality for all repetitive works, and that they can protect their health even in environments that are risky for their health. In workplaces where robots or cobots will be used for the first time, small teams should be established and employees should be trained to love robots. Otherwise, employees who think that robots will take their jobs will be hesitant to work with them, and those who have bad intentions will take initiatives that prevent the robots from working and maybe cause accidents. Recruit Team Members:

A successful cobot deployment team must have expertise in the following areas:

1. Robotics,
2. Project Management,
3. Manufacturing Process,

The team to be formed should consist of members qualified to fulfill the ten tasks specified in Table 2. Depending on the size of the project, members of the team can undertake several of these tasks.

Table 2: The roles of the cobot team (Getting Started with Collaborative Robots, t.y.)

Manufacturing manager	Programmer
Project Leader	Operation and maintenance worker
Project Coordinator	Process Advisor
Engineer	Procurement Specialist
Installer	Continuous Improvement Specialist

1.3. Benefits of Cobots

In the enterprise, especially during the initial commissioning of a robot, employees may have various concerns about job loss, technological uncertainties and the failure of the project. Addressing these concerns at

the beginning of the project will help in solving some important problems that may arise at a later stage, and it will be easier to convince the employees.

We can summarize three important benefits of cobots as follows;

1.4. Bringing Management and Workforce Together

Many people are afraid they'll lose their jobs if a robot comes into the factory. However, in many facilities where cobots were put into operation, workers were not fired, and they were assigned to jobs with higher added value, requiring more manual skills and human intelligence. It has been observed that production has increased and the need for new workers has arisen in some facilities where applications have been initiated.

1.5. Fewer Work Accident and Injuries

One of the most practical advantages of collaborative robots is that they can improve ergonomic problems in the workplace. One of the applications where robots are most successful is repetitive jobs where jobs are most injured. Repetitive movements can cause musculoskeletal disorders and, in some industries, many working days are lost due to injury. A study conducted in the European Union in 2007 found that 35% of lost working days cause musculoskeletal disorders caused by repetitive movements. In an article by Matt Middlesworth of Ergo-Plus, 400,000 people in the USA have been treated for musculoskeletal diseases caused by repetitive movements, which cost more than $ 20 billion.

1.6. More Interesting Jobs

Robots are great at boring jobs as in drilling multi-holes. It is also tedious to constantly load or import parts into a CNC machine, whereas set-ups, quality inspections and robot programming are much more stimulating tasks for employees.

Nobody likes to do dull tasks. However, every business has some boring but necessary jobs which someone has to do. A cobot designed by examining the process can easily perform these tasks. If you give these boring jobs to the robot and explain these details to the employees, the motivation of the works will increase in a positive way. In most cases, any fear of robots that existed before the first application is quickly forgotten after the first robot is installed. People quickly realize how much the robot can help them in their work. (Getting Started with Collaborative Robots, t.y.)

1.7. Bringing Management and Workforce Together

After the application is selected and the members of the team are determined, the design phase of the cobot can be started. Before moving on to the design, the team must agree that the chosen application is exactly the right option, as it will be necessary to explain this to future employees. In the early stages of the design, the metric values for the quota will be determined and the key information that will facilitate the persuasion of both the management and the employees will be determined and this information will be detailed. For example, to be able to convince the management, instead of expressing uncertainty such as "the robot will excite the production" to be used, quantitative but provable offers should be submitted such as increasing production by 20%, improving our quality standards, reducing our waste rates from 7% to 2% or paying the price at the end of a year. The five parameters that can generally be offered for this are as follows;

Quality: People generally think speed is the most important feature of robots. However, the most distinctive aspect of robots or cobots is that they perform the task assigned to them completely, at the same time and in the same way each time. Therefore, in the system where cobots produce, each product has the same quality as the previous one and was produced in the same period of time.

Throughput: When cobots are used in the same production system, they always have the ability to increase production. This may naturally be due to the fact that the robot works faster than a human could, but

robots have the ability to work 24/7 without any breaks. For this, in order to make a numerical comparison, it is necessary to calculate very well the processes in which the cobot does the same work as the net production processes in manual operation.

ROI potential: Cobots usually have a quick payback period compared to traditional industrial robots. When comparing the costs associated with automating this process with increased production/output, improved quality, 24/7 availability and labor wages abolition, the quantitative results should be calculated. In some enterprises, these accounts should be included in the accounts in case of frequent occupational accidents and serious job losses, as they are traditionally made.

Time: Cobots can increase your employees' productive time. By moving a worker to a greater value-added task, you increase that worker's productivity. Plus, cobots reduce downtime because they work without slowing down or taking breaks. At this stage, the system with less non-value-added should be better identified and when a new job is to be given to the cobot, the preparation times until the new jtask should be calculated correctly.

Value: In business, value refers to anything the customer is willing to pay for. That doesn't mean all non-value-added operations are unnecessary.

Some, like packaging, must be done. By assigning these tasks to cobots, you and your employees are free to focus on operations that create value. In production management, since each station that makes production in the production process is a customer of the previous station, when a cobot is added to the system, the calculation of the added value created for the next station and the final customer will definitely affect the decision-making and persuasion processes.

(Source: Getting started with collaborative robots' series, t.y.)

2. COBOT AND ELEMENTS

The design phase can be started after all the questions of the employees and the management about transition to cobot are answered and their concerns are resolved. In the first stage of the design, first of all, the scope of the project, roles and responsibilities should be defined and the timetable should be determined. After the definition of the task to be performed, the robot's tasks, the robot's layout and movement area, the tasks and the work to be done are matched and the work cell of the cobot is detailed.

1. Before proceeding to the cobot design, the process of automation and process analysis should be done, existing inputs, outputs and process details should be determined by examining the existing layout.
2. The tasks to be transferred to the cobot should be determined, the input-output details of the robot that will work in the work cell should be extracted.
3. The current working area and the collaborative areas where the cobot will work should be compared,
4. After the tasks to be given to the robot are clarified and the settlement area where it will work is determined, all investment expenditures related to the robot / system investment and the return period of the investment are determined and the design process is started.

- Inputs: What and how objects are presented to the robot.
- Output: The product produced by the robot.
- Process: The value-added tasks that the robotic cell will perform or support.

Table 3: Effects of input properties on selection of cobot, effector, and sensors (Getting Started with Collaborative Robots, t.y.)

Effects of Input Properties on Selection of Cobot, Effector, and Sensors		
Property	**Affects**	**Hypothetical Application**
Part Arrangement	• Programming Options • Sensors	As the objects are placed randomly, additional sensors to detect them and advanced programming is required.
Object Spacing	• End Effector Size	The objects are packed so closely together that a chunky gripper cannot access them, instead of this, a gripper with narrow fingertips must be used.
Delivery Method	• Programming Options • Sensors • End Effector Type • Cobot Type	The objects are delivered to the cobot on a conveyor belt, complex programming is required for the cobot to pick up moving objects.
Packaging Method	• End Effector Type	The objects are packaged in closed boxes, so the end effector must be able to grasp both the box lid and objects.

Table 4: Effects of output properties on selection of cobot and end effector (Getting Started with Collaborative Robots, t.y.)

Effects of Output Properties on Selection of Cobot and End Effector		
Property	**Affects**	**Hypothetical Application**
Object Dimensions	• Cobot Size • End Effector Stroke	A cube of 200 mm must be moved 1 m, so the gripper's stroke should be at least 200 mm and the cobot's reach should be at least 1 m.
Object Material	• End Effector Type	The object is a foam block, so the end effector must not be a vacuum cup (or else the cobot won't be able to lift the block).
Object Weight	• Cobot Payload • End Effector Type	The object weighs 5 kg, so the gripper must have a payload capacity of at least 5 kg—which in turn affects the cobot's required payload capacity.
Object Type(s)	• End Effector Type	The cobot outputs parts with a variety of shapes and sizes, so it requires an adaptive gripper.
Required Speed	• Cobot Speed • End Effector Speed	The cell is supposed to output 150 parts every hour, so the cobot and end effector must be able to keep up.

The cell's output affects the choice of cobot and end effector.

Process: The cell process affects your choice of cobot, end effector, and programming options. The process also affects the size of the robot and cell dimensions, because the cobot must have everything it needs within arm's reach.

Table 5: Effects of cell process on selection of cobot and effector, and programming method (Getting Started with Collaborative Robots, t.y.)

Effects of Cell Process on Selection of Cobot and Effector, and Programming Method		
Property	**Affects**	**Example**
Task Type	• End Effector Type	The task involves welding, so the cobot's end effector must be a special process tool.
Distance Between Components	• Cobot Reach • Cell Dimensions	The task requires the cobot to push a button that is 1 meter away from it, so the cobot must either have a reach of at least 1 meter, or be moved closer to the button.
Task Complexity	• Programming Options	Easy programming options, such as Robotic Skills, can reduce the difficulty of complex tasks.
Interfacing Requirements	• Programming Options	The task requires the robot to interface with other machinery, so programming will be more complex.

Note: Table 5 provides guidelines for preparing the task map of the cobot**.**

1.1. Main Features Emphasized in Cobot Design

Payload: Payload refers to the amount of weight a cobot can safely handle. Until recently, cobots could only work with relatively light objects. In recent years, robots that can be used for heavier materials have started to be produced. In robot design, when calculating the lifting power, the weight of the gripper at the end of the robot arm must also be taken into account.

Reach: Reach, refers to the maximum horizontal distance that the robot's end effector can move away from its base. In general, bigger robots can reach further. However, the greater the reach of the cobot, the more valuable space it occupies in the production area. During the creation of the robotic task map, the distances in the area where the robot will work must also be calculated.

Repeatability: Repeatability is often confused with accuracy or precision. With traditional industrial robots, both repeatability and accuracy are important but repeatability is extremely important in terms of ensuring the continuity of quality in cobots and getting the same production data every time. Repeatability refers to the robot's ability to return to the same position every time, while accuracy refers to the robot's ability to move to a specific programmed position.

Accuracy isn't so important because we tend to program cobots by physically moving the end effector to the desired location (e.g. with hand- guiding), rather than by typing exact coordinates. However, the important thing here should be the ability to repeat this movement continuously when we move the cobot manually to a position. It's possible to improve a cobot's repeatability either through mechanical stops or force sensing.

Ease of Programming: One of the main advantages of cobots is how easily they can be programmed. Easy-to-program robots will be quicker to deploy, and their operators will require minimal training. In addition, the large number of operators who can perform programming will minimize the risks that may arise in programming.

Safety: Cobots are designed to work safely alongside humans. However, not all robot manufacturers describe the robot's safety features in the same way. However, any cobots must meet the following minimum criteria with regard to safety.

- Which safety standards it adheres to (e.g., ISO / TS 15066, TUV certification),
- Which safety features it includes (e.g., impact detection, limited motor power, soft external skin).
- The clearest indication of cobot safety is compliance with ISO/TS 15066, the first technical specification to outline recommendations for safe collaborative robot applications. Just because a robot has certain certifications or safety features, it doesn't mean your application is inherently safe. End effectors, accessories, and the nature of the task all affect safety, so you must always perform individual risk assessments.

Other Useful Specifications: Although the five specifications mentioned above are very important in cobot design, the following criteria should also be emphasized in the design of cobots to be used in some applications. (Owen, 2016)

Weight: The weight of the cobot is important in terms of its placement. For example, a lightweight cobot can be attached to a table or another machine without risk of destabilizing your setup, and it's easy for one person to move the robot around. However, a heavy robot must be bolted to the floor or plinth so that there are no jolts, vibrations and collapses during production, in this case it is not very easy to move to a different part of the plant and make it operational there.

Speed: Robot manufacturers provide speed in terms of either distance over time meter/sec or rotation over time degrees/sec. But although speed is vital for traditional industrial robots—since their users are always seeking to reduce cycle time by fractions of a second—cobot users need not be so concerned with this specification. In fact, low speed can be much better for safety as cobots work with humans, but the shorter cycle time of the cobots is more important than speed values.

Ability to Accelerate: Acceleration determines how quickly a robot can reach full speed. (Typically, both speed and acceleration are adjustable.) As with high speed, rapid acceleration is dangerous, so this specification is more important for traditional industrial robots than cobots. Cobot acceleration should be slow, smooth, and steady—never abrupt—and should give nearby humans enough time to notice that the robot is moving.

Degrees of Freedom (DoF): Degrees of freedom, or DoF, is a fundamental robot specification. It indicates how flexible a robot is for positioning its end effector. Some task specific cobots like SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) robots have 5 or fewer DoF, which restricts the orientation of the end effector. Others have 7 or more DoF, which provides greater positioning flexibility, but also entails more complex programming. But, most cobots have 6 DoF: which is the minimum necessary for the end effector to reach any orientation. For that reason, DoF is not usually a deciding factor when picking a cobot

Environmental Specifications: If your robot is at risk of being splashed with liquids, coated with dust, or affected by other environmental conditions, the Ingress Protection (IP) rating is an important specification. The IP rating gives you an idea of the robot's ability to withstand environmental hazards.

Robot Life Span: Manufacturers assume that the life span of a cobot is between 30,000 and 35,000 hours under varying operating conditions, which corresponds to approximately 4 to 4.5 years. However, the number of robots assigned to the loading of CNC machines that have been serviced for more than 10 years is substantial. Another important advantage of cobots is that they should be easy to program.

How to Pick the Best End Effector: Most cobots are not sold with their own end effectors. The end effectors need to be selected according to the applications in which the cobots will be used.

Types of End Effector: There are almost as many types of end effector as there are robot applications, the most common ones:

- Grippers, multi-purpose end effectors are suitable for most applications (including pick and place, machine tending and assembly),
- Process Tools, such as paint guns, ending attachments and milling bits. These are used to work directly on the workpiece.

- Sensors and Cameras, technically these aren't actually "end effectors," they attach to the end of the robot's arm, and transform the robot into a positioning device for advanced sensing.
- Custom End Effectors, which are built according to people's specifications for particular tasks.

1.2. Five Important Specifications for Grippers:

1. **Payload:** Cobot payload, it refers to the maximum weight the gripper can handle. As required by the process, the gripper either grasps the object completely or continues the process by taking advantage of the friction force with its fingertips. Even if your robot can carry 100 kg, if the end effector can only carry 5 kg, the cell will be limited to handling 5 kg at a time. **(Image 1 (A))**
2. **Force:** Gripper force specifies the squeezing force that the gripper can apply to an object. This is the only force keeping the object between their fingers. For heavy and durable materials, it is okay to have high strength, but care should be taken to have low grip strength for non-heavy or fragile materials. The maximum gripping force is about the length of the fingertips. For instance, in some cases, the maximum grip force will be reduced if you attach long custom fingertips. With adjustable force grippers, greater grip values can be achieved by applying less/smalest force. For example, values from 0.92 N to 235 N (such as 2F-85 grippers from Informatiq) can be obtained by applying smaller forces with adjustable grippers produced by some companies. However, this specification may not be found in the grippers produced by every company. **(Image 1 (B))**
3. **Stroke:** Stroke represents the distance between the fingertips when the gripper goes from fully closed to fully open. When choosing a gripper, a selection is made according to the width of the parts to be grasped according to the process. A 50 mm stroke indicates that the gripper can grasp parts between 0 and 50 mm**. (Image 1 (C))**
4. **Weight:** If the robot's payload capacity is 5 kg and the girpper's weight is 0,8 kg, it means the robot-gripper combination can only be used in the objects of 4,2 kg.
5. **Energy Source:** The gripper's energy source may affect the type of cobot that it can be used. If the robot is not compatible with a gripper's particular energy source, such as electric, pneumatic, magnetic, vacuum, or hydraulic, it is not possible to use them together. Some cobots come with pre-attached electric or pneumatic connectors. This means they will be better suited to grippers of this type. In general, electric grippers are more flexible than pneumatic because they don't require a separate supply of compressed air. (Owen, 2016)

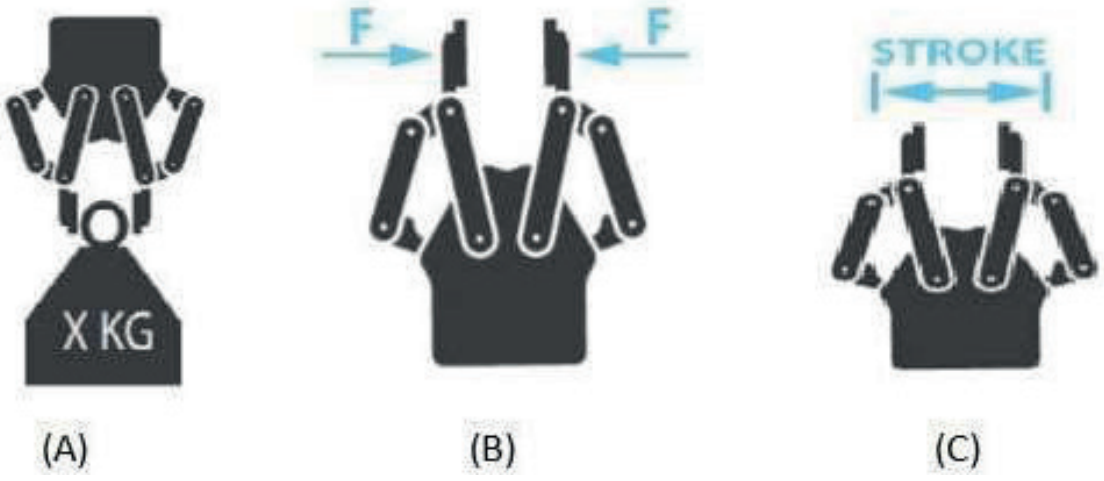


Figure 1: Gripper Types and Specifications

1.3. Choosing the Right Sensors

Many cobots used today need vision detection to detect parts more accurately. If there is no easier way to achieve the same effect without adding complexity to the robotic system, sensors with visual perception must be used. In simple applications, perhaps no sensor may be required, but it will be necessary to use sensors with various features depending on the complexity of the operation.

While the addition of sensors provides system simplification in some cases, wrong sensor selection can make the system more complex. However, each correctly selected sensor will make the application more robust and reliable. Robustness is a form of flexibility; it refers to the ability to adapt to planned changes. For example, when you add a vision sensor to a robot, the robot gains the ability to detect and grasp objects presented in random orientations. During system design, adding a new sensor can create a more reliable working environment, but the system will become a little more complex, making it difficult to integrate, program, and maintain the robot. Plus, adding sensors sometimes reduces the system's "agility" (the ability to adapt to unplanned changes), which makes it harder to move the robot from one task to another. For these reasons, cobot users are often prevented from adding extra sensors for the first time cobot users. It is recommended that they keep the system simple and do not use too many sensors.

The types of sensors that can be integrated with robots include barcode readers, 3D laser scanners, light curtains, safety mats, photoelectric part detection sensors, and many more. In order to add new sensors to the system, it would be appropriate to search for answers to the following questions;

- Which functions of the robot are the most important should be listed in order of importance,
- In what ways could the new sensor improve the flexibility of each of these functions?
- In what ways could the new sensor reduce the robot's overall agility?
- Could this be solved by using a different version of the sensor (e.g. a different camera system)?
- Which other tasks would also benefit from the sensor to improve the flexibility of another part of your operation?
- What are the top benefits that the flexibility could give to the business?
- What are the top benefits that the flexibility could give to the business?
- How might the effect on the robot's agility affect the business?
- Some applications can benefit from extra sensors are; palletizing, machine tending, pick and place, dispensing, polishing, assembling, quality control, welding, product testing.
- Top 4 Sensor Types for Collaborative Robots:
- Vision Sensor,
- Force Sensor,
- Safety Sensor,
- Part Detection Sensor

Each cobot manufacturer company has developed various sensors for various applications either by themselves or through their subsidiary industries. The sensors have various advantages and disadvantages compared to each other. 2D and 3D vision sensors are also selected according to the applications to be used, while 2D vision sensors will be sufficient in some applications, it will be appropriate to select 3D sensors in terms of security in others. The advantages of 2D and 3D vision sensors are shown in the table below.

Although the vision sensor, force sensor and part detection sensors help to create a safe collaborative environment, they are mostly used to ensure that production runs smoothly, there is no stoppage in production, production is not interrupted and production loss due to these stops. The task of ensuring security in the collaborative environment and minimizing the risks that may cause occupational accidents mostly depends on the well-chosen and correct operation of the security sensors. Part detection sensor types are classified as; photoelectric sensors, ultrasonic sensors, mechanical sensors and safety sensors.

Unlike force and part detection sensors, safety sensors don't add extra capability to a robot. Instead, they help to ensure that a robot is not a danger to human workers. Since collaborative robots are designed to work with humans, it might seem that safety sensors are not necessary. In fact, safety sensors may not be as vital as with traditional industrial robots. However, they are very important in terms of determining the human presence and proximity to the robot, especially in the collaborative workspace. Safety mats, infrared light curtains, ultrasonic and photoelectric sensors, and even laser vision technologies constantly provide information about the entry of the robot or something into the restricted workspace, trying to prevent risks that may arise in terms of safety. (Owen, 2016)

2.4. Types of Safety Sensor:

- **Light Curtains** are the sensor equivalent of traditional safety cages. Light curtains are photoelectric devices with two or more photocells. These sensors are used with reflectors or mutually. The light curtain sensor detects entry into a restricted when one or more beams are
- **Safety Mats,** pressure sensitive mats, are laid on the floor of a restricted zone and detect when someone stands on them. They detect when a collision occurs.
- **Perimeter/Edge Guards;** are pressure sensor strips that are often attached to mobile robots.
- **Single Beam Laser;** these contain a single pair of transmitter and receiver modules, with a laser beam between them. They detect when the beam is broken.
- **Laser Scanners;** use a scanning laser which builds up a 3D image of the workplace. They are basically the same technology as is used in 3D vision, but instead of detecting objects they only detect when things have moved into the workplace.
- **Protective Robot Skin;** Some collaborative robots have a sensorized outer skin which acts as a safety sensor. The robot stops when the skin collides with something.
- **Camera-based Safety Sensors;** Just as 3D vision systems can be achieved with both camera and laser technology, so too can safety sensors. These allow 3D zone monitoring using two or more calibrated cameras.

2.5. Benefits of Adding Safety Sensors to Collaborative Robots

The benefits of safety sensors are not simply that they improve the safety of the system. These sensors can also help to improve the performance of the robot.

Some of the benefits are:

- Allow the robot to be run at higher speeds when there are no humans in the workspace
- Allow the system to react to obstructions in the workspace, avoiding damage to the equipment.
- Can contribute to a lower risk of the system, allowing it to stay within acceptable overall limits.
- Has the potential to reduce the floorspace required for the robot compared to traditional fencing.
- Allows the same robot to be used for both collaborative and non- collaborative tasks. (Owen, 2016)

2.6. Challenges of Adding Safety Sensors to Collaborative Robots

Compared to more complex sensors like vision, safety sensors are generally simpler to integrate into a system.

However, there are still a few challenges when using them with collaborative robots, including:

- Detection is dependent on the size of the object being detected, so smaller objects may not be detected,
- Some materials such as thin metal or hair cannot be detected by some of the detection technologies,
- Material in the surrounding environment and airborne pollutants can affect some sensors,
- Proximity sensors placed too close together can interfere with each other. (Owen, 2016).

3. TRANSITION PROCESS FROM TRADITIONAL ROBOTS TO COLLABORATIVE ROBOTS

The history of collaborative robots is not as old as the history of traditional robots, especially with the start of Industry 4.0 in 2011, while the transformation to collaborative robots gained speed, collaborative robots (cobots) started to be used in most of the new production lines. Collaborative robots were mentioned in EN ISO 10218-2 without going into details at first, but with the use of new equipment and components in collaborative robots, this standard has been found to be inadequate. Since it will take time to establish new standards, the first definitions were made under the title of ISO / TS 15066 Robots and Robotic Devices-Collaborative Robots, and various safety values regarding the collisions between the robot and the operator in a collaborative work environment were presented to the attention of those who will make a risk assessment.

3.1. 15066 Recommendations for Collaborative Robot Design

Although the standards and basic information of collaborative robots are specified in ISO 10218-2 standards, the main details are explained in ISO/TS 15066. In addition to the robot system and the risk assessment described in this standard, it also covers the following issues;

- Management of the grippers which grasp the parts by the robot during the operation, to prevent the part from ejecting
- Making sure that the information is sent to the robot to verify the security of the virtual fences,
- Identifying the robot cell and sharp edges on the robot,
- Calculation of the safe distance related to human or any object contact to the robot,

PL assessment (Standard 13849-1 and SIL 62061) is used as a risk assessment method in collaborative robots, these generally consist of the following criteria;

- Frequency of exposure,
- What kind of injury could be caused by the risk considered,
- The probability of hedging the risk involved,
- The robot manufacturer company should choose the components on the robot, taking into account the risks inherent in the robot and the application in which the robot will operate, all components must comply with the safety level (SIL Standard 62061 / PLS Standard 13849-1) that will emerge as a result of the risk assessment.

We can calculate the risk according to EN 62061 by estimating the following values.

1. Frequency and duration of exposure **(Fr)**
2. Possibility of preventing or reducing harm **(Av)**
3. Probability of a dangerous event occurring **(Pr)**
4. Severity of Injury **(Se)**

SIL (Safety Performance Integrity Level) and PL (Performance Level) provide significant convenience in terms of risk assessment as standardized values with the application of the IEC/EN 6149-1 standard with the above- mentioned standards.

Şunlara uygun olarak uygulamalarda kullanılabilir	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
EN ISO 13849-1		PL c	PL d	PL e
EN/IEC 62061		SIL 1 ve SIL CL 1	SIL 2 ve SIL CL 2	SIL 3 ve SIL CL 3

Figure 2: SIL according to EN ISO 13849-1 or EN/IEC 62061 (Matthias, 2017)

SIL/PL connections have been made legal in the **EU** as of 10/5/2015 in the designs and applications to be made in accordance with **EN ISO 13849-1** or **EN/IEC 62061 standards**. These standards also include industry-specific standards and cover all the details from design to implementation. We can calculate the risk according to EN 62061 by estimating the following values.

- Frequency and duration of exposure **(Fr),**
- Possibility of preventing or reducing harm **(Av),**
- Probability of a dangerous event occurring **(Pr),**
- Severity of Injury **(Se)**

In fact, the use of robots is quite old, and when we look at the standards mentioned above, we see that most of them are based on the basic knowledge created for traditional industrial robots. there is a working robot, it is actually a defined system. In EN ISO 10218-1, quite general information is given about collaborative robots without going into detail. However, since the number of variables used by the manufacturers in the design of the systems is very high, the IS/TS 15066 Robots and Robotic Devices guide has been prepared in order to guide the manufacturers even if there is no new standard. In this document, basic information about the units to be used in the design of collaborative robots is given, and it is stated what would be the acceptable conditions when these robots, which are thought to work with humans, collide with the people they work with.

What are the innovations in ISO/TS 15066?

In collaborative robotics, humans and robots can span an overlapping workspace. ISO/TS 15066 provides guidelines for the design and implementation of a collaborative workspace that controls risk.

One of the base ideas behind ISO/TS 15066 is:

If contact between robots and humans is allowed and incidental contact occurs, then that contact will not cause pain or injury.

To this end, ISO/TS 15066 provides a deeper explanation of 'pain baseline' data, maximum allowable Robot power/speed, design criteria and collaboration techniques. Most importantly, for the first time, ISO/TS 15066 provides those doing risk assessments for collaborative robot applications with fixed data and formulas to work with.

Pain Baseline Data:

Researchers at the University of Mainz in Germany, on behalf of the ISO Committee, studied 100 subjects in a pain onset study and decided to apply various values of pressure and force to 29 areas of the human body to establish force and pressure limits. As a result of the Mainz study, ISO/TS 15066 has compiled a list of maximum force and pressure levels for each part of the human body. This data can be used to establish a set of force/pressure thresholds that the robot must not exceed and is designed to guide robot design and integration. Maximum Allowable

Robot System Power/Speed:

ISO/TS 15066 outlines recommended power and speed limits for collaborative robot systems designed for power and power limited operation. This section of the document contains the guidance needed to determine the maximum allowable speed for robot adjustment so that it does not exceed the maximum value for End of Arm Tooling/EOAT, an important element of robotics technology, and part robot system.

According to ISO/TS 15066, four types of collaboratives working methods are mentioned. As mentioned earlier, the first 3 methods were the methods used in traditional industrial robots, the force and force limiting method, together with 15066, is a method designed directly for collaborative robots. For this reason, only the details of force and force limitation method will be discussed here, as details of the working method and standards related to industrial robots are given in other chapters.

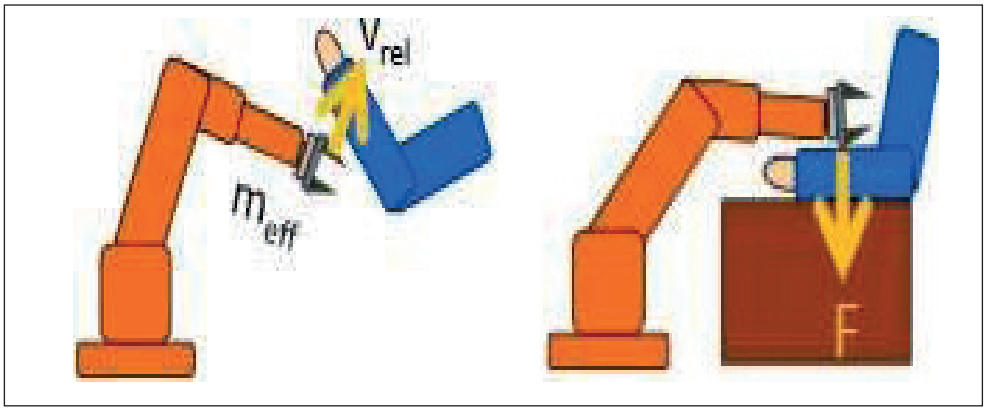
- **Power and Force Limiting Method:**

In the first three methods, the operator and the collaborative robot were not allowed to move in the collaborative space at the same time, but were monitored, blocked, so the possibility of working with the robot and the operator was low.

However, in this method, in the collaborative space, as a process requirement, the robot and the operator must be in motion in the collaborative workspace, so in this method, the risk of contact or collision for both must be evaluated. In the first three robot systems, the components used in traditional robots could be sufficient to monitor and keep the system secure, but this level of security was not sufficient in collaborative robots and the technical specification regarding the power and speed limitation method, which led to the preparation of 15066, came to the fore.

Table 6: Human-Robot Contact (Matthias, 2017)

	Transient Contact	**Quasi-Static Contact**
Description	Contact even is "short" (50 < ms) Human body part can usually recoil	Contact duration —extended Human body part cannot recoil, is trapped
Limit Criteria	Peak forces, pressure, stresses Energy transfer, power density	Peak forces, pressures, stresses
Accessible in Design or Control	Effective mass (robot pose, payload) Speed Contact area, duration	Force (joint torques, pose) Contact area, duration



It will be necessary to use various sensors to reduce the impact of the collision and to reduce the speed and force of the robot during the collision. In fact, in this method, which is the most suitable for the definition of collaborative working environment, the system design and risk assessment should be done in the most appropriate way for collaborative work in order to prevent the accident and to minimize the damage to the operator

by the robot after the accident. For example, in order to reduce crushing on the robot where there is a possibility of jamming, easily removable units, safety switches or parts called soft joints that will cause less harm to the operator during jamming should be used. The force limits that can be applied by robots to operators during compression and the force values that the human body can be exposed to are given in ISO/TS 15066 documents. These values, which were assumed during the design, should be measured and verified on-site before the system is commissioned.

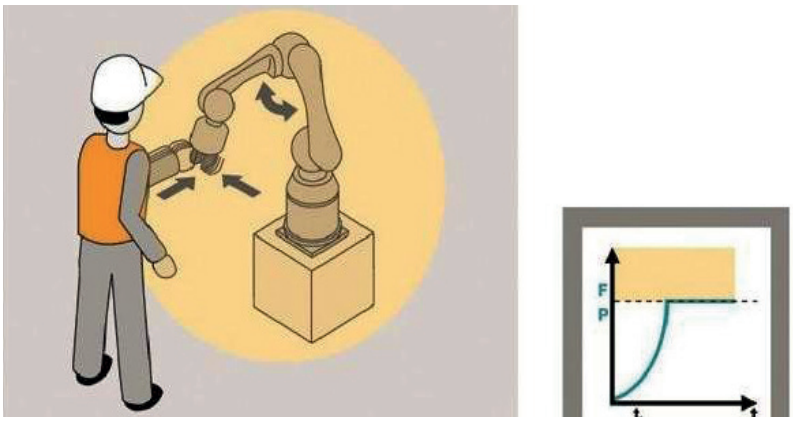


Figure 4: Representative picture of force and force limiting method (Matthias, 2017)

These measurements should be made in line with the scenario constructed during the design, and after the maximum working speed at the end of the measurement and the maximum safe forces that the robot can apply to the operator in the event of an accident, this information should be introduced to the system. Since these measurements are different for each production process, new values determined in line with the measurements should be introduced to the new process after the production range is changed. The use of collaborative robots may not be appropriate in the production and similar processes of high speed, heavy sharp or pointed parts, so it will be useful to discuss in detail the work to be done by the robot with the robot design. company before ordering and to verify the suitability of the process for the collaborative robot. This method is generally preferred in risky and complex processes, but in some processes, it is possible to use both of the above- mentioned systems together. For example, in line with the scenario, low speeds may be appropriate in terms of safety while conducting risk assessment, which means low production speed, but if it is ensured that the operator does not enter the collaborative work area unless it is necessary in the process, then the speed can be increased, collaborative robots can also be used in some complex production processes. However, safety should be at the forefront in all this design.

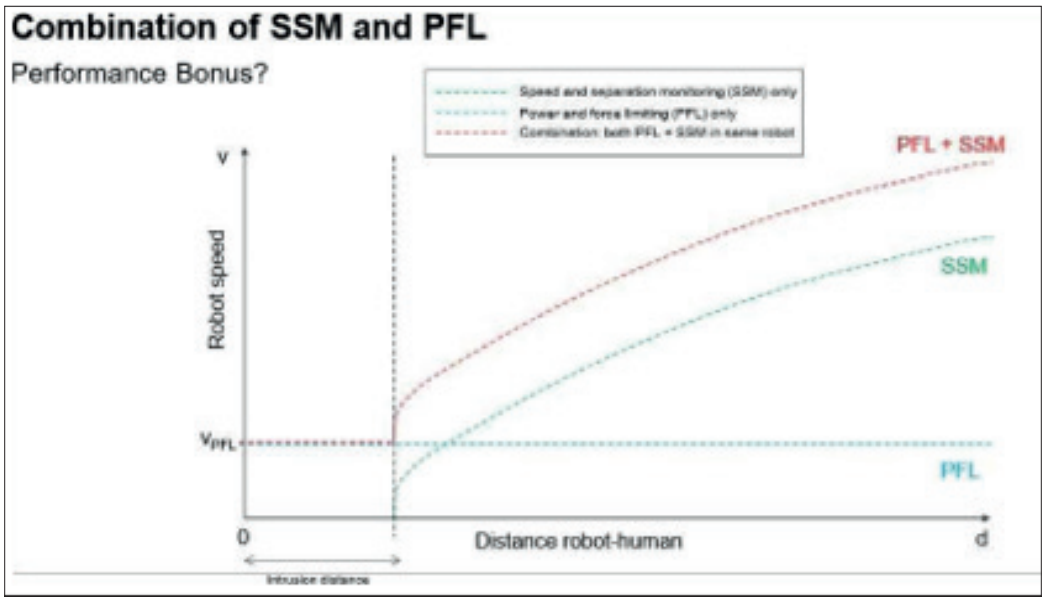


Figure 5: Combination of Speed and Separation Monitoring (SSM) and Power and Force Limiting (PFL) (Matthias, 2017)

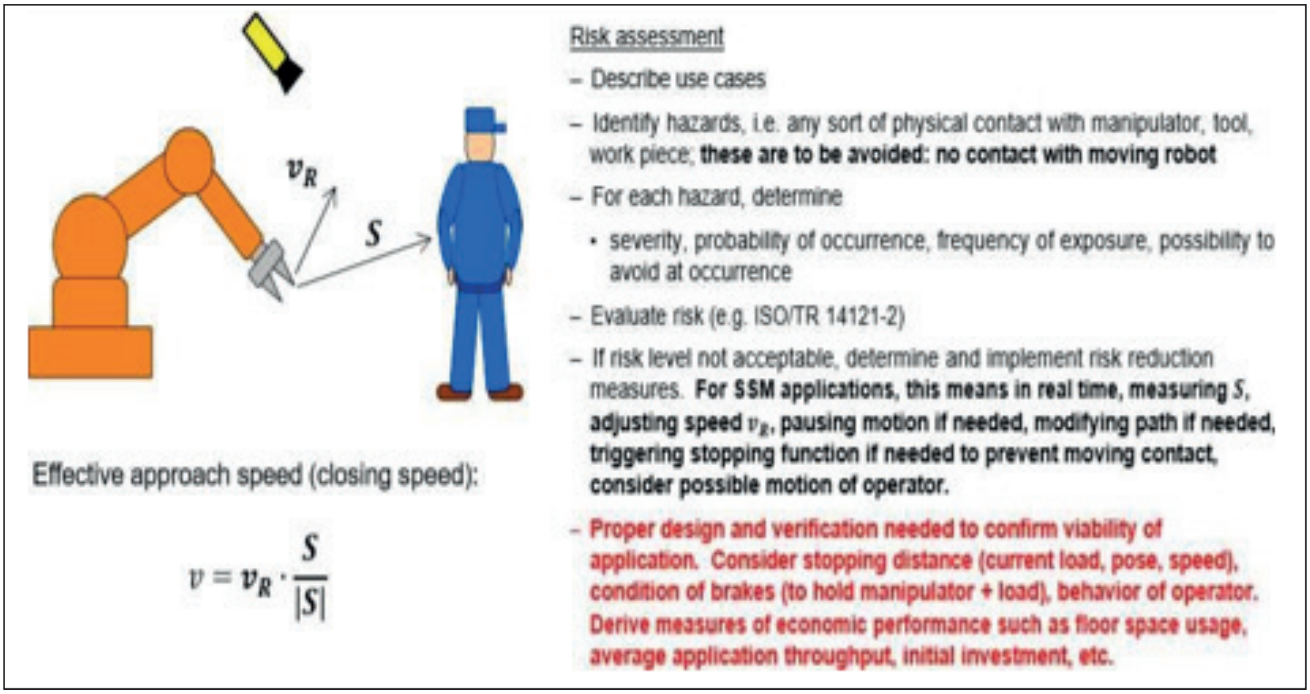


Figure 6: Challenges in Planning and Commissioning (Speed and Separation Monitoring- SSM) (Matthias, 2017)

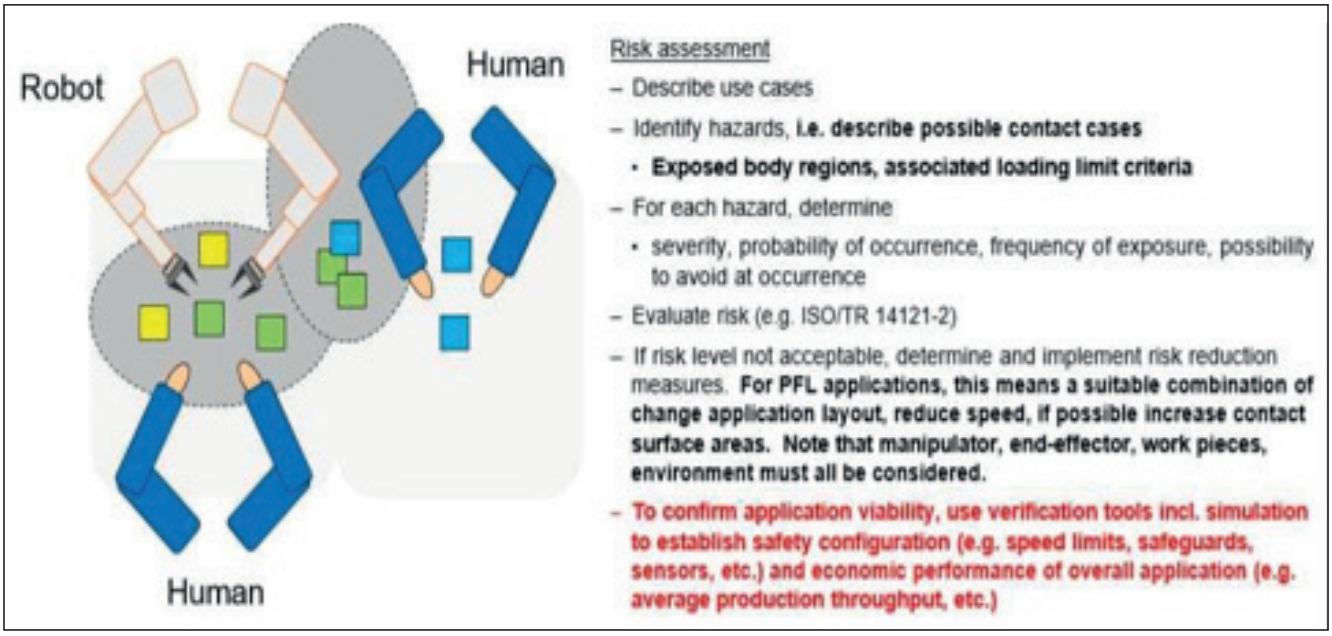


Figure 7: Challenges in Planning and Commissioning – (PFL Power and Force Limiting) (Matthias, 2017)

4. COBOT AND RISK ASSESSMENT

Risk assessment is a fact of life when working with robots. Even if collaborative robots are designed to work safely with humans, a risk assessment is essential when using them. Safety sensors can be a good way to reduce the risk of working with a robot without degrading performance. Industrial robots are also sometimes used for collaborative tasks, using safety sensors for speed and separation monitoring.

However, incorporating only one safety sensor into the system is not a sufficient solution to reduce the risk. It can be preferred to increase performance when the robot is operated at high speeds. For example, by adding a safety sensor to a robot with a predicted working speed of 250 mm/s, the speed can be increased to 750 mm/s. When there is no operator around, the robot continues to operate at this speed.

4.1. The Basics of Designing for Safety with Collaborative Robots

The works that were previously done with various mechanical methods and with the help of some machines and tools in the production facilities, started to be done with automatic machines with the developing innovations, with the increasing use of technology, many jobs that were previously done by humans started to be done with robots. In fact, industrial robots that have been used for decades have begun to leave their place to collaborative robots since the last decade. Many business owners were very attractive to robots to work faster, higher quality and more efficiently. With the increase in the use of robots, the fact that the standard regulations related to possible work accidents and hazards that they may cause did not increase at the same pace, brought some risk assessments to the agenda during the design and production of cobots. Although robot manufacturers design by considering possible risks during the design, they should definitely follow the evaluations regarding the possible risks that the robot, which will be integrated into a system later on, while fulfilling the task assigned to it in that workplace, must also follow the evaluations. will exhibit some negative attitudes in the system in which it is located. Traditional industrial robots worked in work cells that were fenced off whenever possible, as they did heavy work that could pose more of a hazard.

With the emergence of cobots, it was necessary to examine the blind spots and robot/operator contacts, which are not on the agenda in every industrial robot, during this collaborative study, since robots need to work in cooperation with operators.

4.2. Resources for Understanding Cobot Risks

Just because these robots are advertised as "collaborative" and intended to operate as cageless robots alongside humans does not necessarily mean cobots are safe. A "collaborative" robot holding a knife is in all likelihood no longer safe to operate without additional safety measures. When designing a collaborative robotic cell, engineers must take into account the intended application of the cobot and the environment it might be placed in, then develop a safety plan for each use case.

ISO/TS 15066 and RIA TR 15.606 are the newest and most important safety standards applicable to collaborative robotic cells in the industry today. These highlight the safety requirements for each of the four types of collaborative robotic cells:

- Safety monitored stop,
- Hand guiding,
- Speed and separation monitoring,
- Power and force limiting,

Additional standards provide additional information on other hazards that may be exist in collaborative robotic cells.

- UL 1740 (Robotics and Robotic Equipment)
- ANSI RIA R15.06 (Industrial Robots and Robot Systems)
- CAN/CSA Z434 (Industrial Robots and Robot Systems)
- EN/ISO 10218-1
- EN/ISO 10218-2

4.3. Evaluating Risk

While ISO/TS 15066 (RIA TR 15.606) outlines four different types of collaborative operation, the main form of collaboration used in the industry today is the power- and force-limited application. This is where the potential impact between a robot-human collision is limited by the robot itself—either inherently in the design or through the use of a safety-rated robot controller, which can limit parameters such as speed and force.

The first step in the evaluation as required by ISO/TS 15066 and (RIA TR 15.606) is to perform a risk assessment in accordance with EN/ISO 12100. This risk assessment should consider the entire collaborative workspace, access, clearances, and how an operator will interact with the robot. Each reasonably foreseeable contact situation between the operator and robot must be considered. It is important to consider if any stationary structures are involved and other aspects like the end-effector and workpiece.

The risk assessment must determine the nature of each type of contact from the following two situations:

Transient Contact: A contact in free space where the robot and human can recoil.

Quasi-static Contact: Contact between the operator and a part of the robot. In this case, any part or organ of the operator may be caught between the moving robot arm and a fixed or moving machine part in the robot cell.Based on the type of contact, ISO/TS 15066 (RIA TR 15.606) assign specific impact force and pressure limits for each part of the human body. Pain threshold is defined as the pain threshold that starts after the force applied to various parts of the human body. After the possible points where the body can be hit are determined, various values of force are applied to these points and the pain initiation values are determined, the contact status is determined after each contact, classified and verified by testing in the human body.For quasi-static contact cases, this verification is done using a suitable test device that mimics the essential properties of each part of the human body. Since the hardness of the possible impact areas on the body will also differ during the test, it is necessary to pay attention to this issue in the maps that will be drawn as a result of the test and where the pressure/pain threshold will be processed. Pressure values from the smallest to the largest value to be applied during the test and the effect of the body on it should be processed and verified on the maps. The data from each collision is recorded and compared to the limit values published in ISO/TS 15066 (RIA TR 15.606). Transient contact situations can be evaluated in two separate ways. In the first method, both the robot system mass and the body region mass must be accounted for. This means that the test device must be attached to an apparatus that allows it to move freely and must also be the same mass as the effective mass (MH) of the body part being tested. The effective mass is defined in table. A.3 of ISO/TS 15066 (RIA TR 15.606). The same test procedure as the quasi- static procedure is then followed. The second method of evaluation utilizes mathematics as opposed to physical testing. For each body region the maximum permissible energy transfer can be calculated as a function of the maximum force or maximum pressure values given in table A.2 of ISO/TS 15066 (RIA TR 15.606). The calculation will show the maximum speed at which the robot can travel for each given situation.

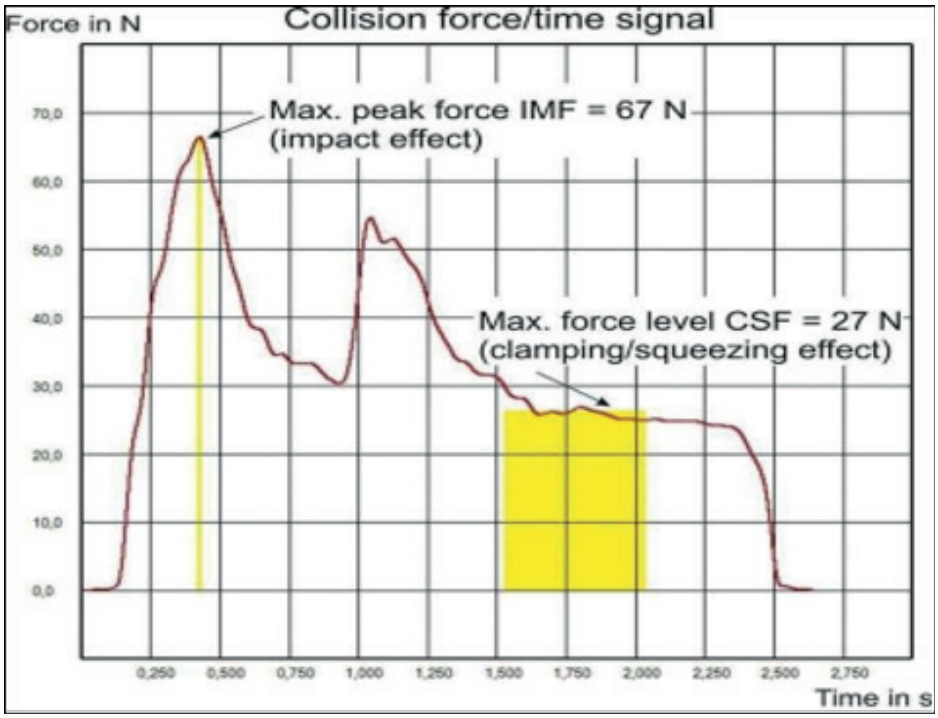


Figure 8: Force/time Signal Graph of Robot Collision (Braman, 2019)

4.4. Collaborative Robot Risk Assessment

The safety standard defines collaborative robot as a robot designed for direct interaction with a human within a defined collaborative workspace. The collaborative workspace is the space within the operating space where the robot system and a human can perform tasks concurrently during production operation (work cell).

This work cell encompasses the robot system, which includes the work- piece, end-effector, fixtures and any device controlled by the robot.

More information can be found in the Technical Specification TS 15066 and the Industrial Robots and Robot Systems – Safety Requirements standard ISO 10218 parts 1 &2 / ANSI RIA15.06-2012. ISO 10218 parts 1 and 2 and ANSI RIA15.06-2012 are harmonized standards (Harmonized standard refers to the standard adopted based on the request made by the European Commission for the implementation of the European Union harmonization legislation), with differences only being minor grammatical changes.

Requirements: A risk assessment is required for all industrial collaborative robot systems. The integrator is responsible for completing the initial risk assessment. There should be special consideration for situations when there can be contact between the robot and operator(s). The end user should participate in the initial risk assessment process and is responsible for maintaining the information and making future changes. Tasks related to the collaborative workspace may require additional and new considerations. Risk assessment determines if safety controls, hard guarding, etc. are needed for unauthorized people, auxiliary machines, and non-collaborative processes. More information about risk assessment responsibility is listed in the ISO 10218 / ANSI RIA 15.06.

Task Identification: Even if the robot does not move, other units in the system may be in operation, so during the risk assessment, the points to be considered together with the entire system, including the robot, are as follows;

- How long and how often the operator is in the collaborative workspace.
- What is the potential frequency and duration of contact between the operator and the robot? A collaborative robot application should be reconsidered or redesigned if there is a high potential for head or neck contact.
- To what extent does entering or exiting the collaborative workspace affect the process.
- If more than one operator is involved in the work area, the camera, sensor or other sensors in the system should be designed with this possibility in mind,
- If additional tasks are to be assigned to the robot during the production process, monitoring and safety tasks in the system should be reviewed, monitoring should be done according to the additional task to be assigned,
- If there is a possibility of jamming or crushing that may occur in the operator as a result of possible impacts during the process, in dangerous areas, this may cause the design to be reconsidered, additional safety measures may be considered,
- In which unusual situations may require manual control of the robot,
- Do the modes of operating the system at different speeds change the hazard levels?
- Since the levels to be evaluated in each application will also differ, has the production process been examined in detail and key points of the process that may cause danger have been determined?

Hazard Identification and Risk Reduction: Conventional industrial robots that operate under the necessary safety precautions and do not experience any danger, may come to the fore when it comes to working in collaborative environments. Therefore, when using industrial robots as cobots in a collaborative environment,

the design for the robot arm fork or gripper, fixture and part guiding needs to be reconFigured according to the new concept. The issues to be reviewed during this restructuring are as follows;

- During work in the collaborative environment, is there an extreme temperature in contact with the robot operator that could harm the operator? For example, the robot may be working with a hot glue gun at eye level of the operator. In this case, the action of the hot glue gun must be designed to operate at a distance from the operator's eye level and to protect the operator's eyes with PPE to protect it.
- If clamping forces on the end-of-arm tooling or fixtures can cause an injury, can the force be reduced? In this case, the design criteria will be to design the manufacturing process in such a way that the clamps on the robot end can be opened and closed when the operator is out of the working area, or the robot arm can be retracted immediately if there is any contact with the operator and the operator is applying a force. In this case, the impact of the next impact can be reduced by using softer material, rounding the edges and creating wider contact surfaces.
- How can robot characteristics and operator position be changed to reduce possible unacceptable contact risks? If the unexpected activation of the robot frightens the operator, the start signals are used or the restart task is left to the operator.
- For any expected and unexpected movement, such as the falling of a piece, we must consider the possible action of the operator. Not every person's reaction will be the same in fatigue, stress, reflexes, talents and interruptions.
- Could the sudden movement of the robot to escape, as a result of gloves or the operator's clothing entangling with the robot, cause a more dangerous situation, is there a need for an emergency stop button?
- Is the operator close to an application that requires shielding, such as welding sparks or a laser cutter? Can operators be prevented from being exposed to these hazards by changing the layout of the production collaborative volume or by using practical guards, if any?
- Are areas defined as collaborative or non-cooperative work volumes fully understood and properly controlled by the operator?

Risk reduction measures may not provide adequate protection. In traditional systems, risk reduction is done with security protection methods. In collaborative applications, risk reduction is always included in the design of the robot. The main measures to protect the operator from injury by reducing risk are stopping the robot and limiting force and speed. For example, after the operator approaching the restricted area is detected by the scanners that monitor the area, it starts sending signals to the robot and causes the robot to reduce its speed. Here, the difference compared to traditional robot applications is to reduce the speed of the robot instead of stopping it.

This process needs to be supported by training and signposts. The control chart hierarchy may not apply to all common applications. Among the protective measures to be determined during the risk assessment, if deemed necessary, protective measures such as area limitation and safety-grade soft axis can also be taken.

The main thing is to eliminate or control the factors that may cause the risk of crushing. Although it is recommended in ISO 10218 / ANSI RIA

15.06 that the minimum distance between the robot and the operator should be 500 mm or the use of protective measures, the situation is different compared to industrial robots. Additional requirements are speed and separation monitoring and force and force limiting sections that TS 15066 recommends. It is necessary to follow the recommendations of ISO 12100 to set the transition time limit between collaborative operations and the safety controller's continued suspension of the inspection.

5. COLLABORATIVE ROBOTS AND APPLICATIONS IN TERMS OF OHS

5.1. Precautions to be Taken for Occupational Safety During Robot Selection

In order to eliminate or minimize the risks and dangers that may arise in terms of occupational health and safety in collaborative robots, the processes in which these robots will be used must be analyzed very well. For this reason, it is of great importance to carry out risk analyzes during the selection and to carefully examine the standards on this subject.

Before proceeding to the robot design, during the examination of any process;

- The temperature in the environment where the robot will be operated,
- If the robot needs to come into contact with any machinery or equipment during the process, the temperature values at the contact point,
- The ambient humidity is not at the values that will adversely affect the operation of the robot,
- Flammable, explosive or flammable chemicals that may be present in the environment where the robot will operate,
- If the robot comes into contact with any chemical during production as a result of the process, the design should be made accordingly,
- The high current or voltage source in the working environment should be placed in a special enclosure,
- Whether the existing grounding is sufficient or not should be measured at least once a year,
- The grounding line must be protected and not exposed to mechanical impacts,
- If it breaks, the system works, but it creates a great risk of shock,
- Whether the code in which the robot will work is more than 1000 meters above sea level,
- The reaction of the floor on which the robot will work to the possible vibration,
- If the robot has vision sensors as an application requirement, dedusting the working environment to prevent dusting, absence of oily volatiles and steam in the environment, whether additional ventilation or dedusting is required,
- Preparing the electrification of the environment where the robot will work and the UPS line as recommended by the robot manufacturer,
- In order not to overload the UPS device, the UPS line should be drawn separately and it should be used only for special machines where no interruption is required,
- Determining the environments where the robots will work in a way that will not be affected by the high voltage of other machines,
- The floors of the environments where the robots will work are extremely important. Since today's robots are programmed to work in 7-8 axes, there will be stresses on the ground in various directions during the operation of the robots, the ground must be designed to withstand all these stresses. While making the static calculations of the floor, if necessary, thick plates should be placed on the connecting feet of the robot. Connection details must be prepared in accordance with the manufacturer's recommendations.
- An appropriate maintenance program should be designed, taking into account the characteristics of the robot, its working environment, transportation conditions and operating times,

Things to Do During Commissioning and Maintenance: As with industrial robots, before the assembly of the collaborative robot is completed and the robot is energized, the robot must be energized first by ensuring that no workers are found in the robot's work area (the area where the robot arms will sweep during operation). This operation must be done with two people, one person should give way to the machine and the other should

stand by the emergency stop button. In addition, in case the robot arms move out of the planned, protective walls must not be placed so that the assembly member can easily leave the work area.

Ensuring Safety During the Use of the Robot: Especially in the selection of collaborative robots, it is beneficial to choose manufacturers who are experienced in the application we will use, because it is not possible to say that they are 100% safe for any robot. This is especially important during the initial installation, commissioning and operator experience of the robot. When we look at the occupational accidents that occur in the environments where robots are used, the probability of accidents increases if the following issues are generally ignored.

- If the robot is specifically designed to operate without an operator, the robot should never move before it has been confirmed that there are no workers in the area where it will be working.
- If the robot is in automatic operation mode, the sensors on it or on the guard fence should detect that someone has entered the working area and stop the operation.
- If the working environment of the robot is controlled by safety fences or light barriers, these elements must be in working condition,
- In some cases, there may be situations where robots start suddenly and are harmful to operators, working procedures must be prepared in detail to avoid these situations. It is known that the main reason for such accidents is procedural deficiencies or non-compliance with procedures.

In order to ensure that the above-mentioned occupational accidents do not occur;

- In the latest generation robots, even if the cooperator accidentally touches the robot, the robot will stop, but if this does not happen, the operators must be warned and trained not to enter the robot's work area and not to approach the robot, as the worker may be seriously harmed by this contact,
- The robot must be locked, assuming that it may cause damage to its environment in case of sudden operation even when it is not working,
- Although robots have the ability to do the movements taught to them for days or weeks without getting tired, it will definitely be useful to constantly monitor their movements,
- Since robots are programmed to work on various axes through different joints, co-workers must be in a position to press the emergency button at any time during these movements. If necessary, it will be useful to increase the number of emergencies stop buttons around the robot.
- Robots must be used for the operations they are designed for, when they are designed, using them with different accessories in different operations may cause injury or even fatal accidents.
- Since magnetic density, noise and vibration can affect the memory of robots in the working areas of robots, it will be appropriate to examine these negativities and take necessary precautions.
- Today, robots have a large amount of joints since they can work up to 7 or 8 axes, so the joints on the robots constantly change their position within the specified time period in order to perform the tasks assigned to them. Particularly at the beginning of the process, when teaching commands to the robot, the operator's joints must be outside the working area.
- While designing, it should be noted that the operator's face is facing the robot.
- In some cases, there may be optical eyes on the robot arms as a requirement of the process, the poor functioning of the optical eye may prevent the robot from performing the given task, so care must be taken to keep the optical eyes clean, especially in dusty environments.
- At the beginning of the process, the speed must be kept low while the robot is taught what it will do. After the cycle is fully taught, the trials are started with the required speed.

- In most of the collaborative robots, after the robot stops for some reason, the robot can continue the process from where it left off, but in some applications, the robot arm may need to return to the starting point when starting the motion due to the process. This situation must be known by the cooperating operator. During the restart of the robot, the operator is warned with sound and light.
- In some cases, possible malfunctions in the robot system are reported to the operator audibly, the meaning of the voice warnings from the robot should be well known by the operator,
- When entering the collaborative area, attention should be paid to the use of the PPE foreseen for that area.
- In order to prevent any automatic operation, when programming the robot, a sign indicating that the robot has been programmed must be hung on it,
- In the workplace where there is more than one operator, the hand control should be in the hands of the operator who is teaching, instructions from the hand control should be given by only one operator,
- If various operators have to work together in a large and noisy factory, headphones integrated into the system and hand signals known by everyone should be used for communication of the operators,
- After the robots are taught what to do, the operators should be trained about the robot's movements or abnormal movements and the duties of the operators against them, and a coding of the wrong movement should be made,
- While the robot is being programmed or during an intervention, in case of any energy conversion, the robot should not be left under load, should not stand under a loaded robot arm, in case the robot arm is discharged,
- After the programming of the robot, the first trial runs should be done below the designed speed, after making sure that there is no problem, normal speed should be started,
- It may not be enough to do the first trial runs only at low speed, because in some cases there may be problems arising from the production, program or design, so before the first trial run, all these checks should be made and trial work should be started after making sure that there are no deficiencies,
- Even if it is ensured that no mistakes were made in all the controls made before the first trial, the first trials should be completed by selecting the initial speeds at 5-10% and then increasing the speed steps.

5.2. Unexpected Movements That Could Cause Accidents in Collaborative Robots

Negative movements of the robot manipulator, which may not take action due to any of the above-mentioned reasons but may cause work accident, should be examined in detail during the design and later during the risk assessment, and the component that will control the system should be selected accordingly. The most common of these movements are:

- Changes made by another operator without notice,
- User error,
- Negative effects of the manipulator due to noise and working conditions of the robot,
- Program errors or interactions with surrounding machines or other robots,
- Sudden malfunctions that may arise in the control or monitoring units on the robot arm,
- Sudden discharges that may occur in the robot gripper waiting to be locked but due to not taking the necessary precautions,

Safety Precautions to Be Taken After Robots Switch to Automatic Working Order:

- At the beginning of the shift, the precautions in the risk checklist determined before the start-up should be reviewed,

- Signs stating that it is forbidden to enter the cooperating zone should be hung on the security fences, and the robot's starting to work should be visually announced to the environment,
- The robot that will enter the automatic start mode must have the equipment to detect the absence of the operator or anyone else in the working area.
- Before instructing the robot to switch to automatic mode, it must be ensured that the program number, step number of the robot will start processing and that the robot is ready for the automatic start command,
- If, for any reason, the robot is entered into the working area, the robot will stop as it was taught, the operator should never give the start command to the robot before leaving this forbidden area for him, and the monitoring system should be defined accordingly,
- Collaborative robots generally start working from where they stopped or stopped, in some cases the robot arm can be pulled to another position in order to make any measurement or troubleshooting, in some cases, the robot arm will come to the position where it was stopped first with the first start command, and then the rest of the process will take action to complete the part. In these situations, which are one of the most dangerous stops, the operator must go out of the robot orbit after completing all his work and then press the start button. (Sezai, 2015)

6. SAFETY AND ERGONOMY IN HUMAN AND ROBOT COLLABORATION

A collaborative robot (also known as a cobot or lightweight robot) is a particular kind of industrial robot which is able to physically and safely interact with humans in a shared and fenceless workspace by introducing new paradigms from human–machine interaction (HMI). The International Federation of Robotics defines collaborative industrial robots as those able to perform tasks in collaboration with workers in industrial settings (IFR 2019). The concept of collaborative workspace can be summarized as the "space within the operating space where the robot system (including the workpiece) and a human can perform tasks concurrently during production operation" (ISO 2016, p. 8). In general, collaborative robotics is a main cyber-physical enabling technology of Industry 4.0, and aims to improve production performances and operators' work conditions by matching typical machine strengths such as repeatability, accuracy, and payload with human skills such as flexibility, adaptability, and decision-making.

When introducing collaborative robotics, a crucial part will be safety. In fact, the main difference between collaborative and traditional industrial robots is that cobots are designed to allow physical human – robot collaboration in hybrid and fenceless work cells without the necessity of isolating the robot workspace. Traditional industrial robots were introduced to improve production efficiency by replacing human operators in performing heavy, unsafe, and repetitive processes. Due to safety requirements, a traditional high-performance manipulator needs safeguards (physical barriers or optical devices) to isolate the robot activities and therefore to safeguard operators from unexpected and unwanted contacts. Since collaborative applications allow for direct Human robot collaboration and this is even required, traditional safety solutions for robot isolation are, in general, no longer possible. As a consequence, other systems have to be integrated into the collaborative arm to ensure operators' occupational safety and ergonomics. These systems have to be selected and implemented depending on the robot performance and the level of interaction, and in general, are more demanding and complicated with respect to safety solutions for traditional industrial robotics. For these reasons, the design and integration of OHS aspects will be more challenging in collaborative applications.

6.1.Introduction to Industrial Robot Safety

Considering the nature of the hazards, there are different types of occupational hazards associated with industrial machinery according to ISO 2010. Identified hazards for industrial machines are; mechanical hazards, electrical hazards, thermal hazards, noise hazards, vibration hazards, radiation hazards, material/substance hazards, work environment-caused hazards and combination of hazards. In the definition of industrial Human/

robot collaboration, collaborative systems allow and require sharing of tasks in a fenceless workspace where the main hazard category will be of a mechanical nature. In fact, due to the combined presence of both humans and robots in a shared workspace, it is possible to have potential non-functional physical interaction between the operator and the mobile parts of the machine, especially with the robot arm and with different types of end-effectors. Unexpected and unwanted contacts can generate different kinds of collisions and crushes if related mechanical risks are not properly identified, predicted, and managed. In particular, a mechanical hazard is a physical hazard which can occur when workers directly or indirectly come into contact with work process related objects. The effects are usually immediate and can cause injuries to human beings. The level of intensity can change according to the physical features of the involved work equipment such as speed, mass, and geometry. Typical mechanical hazard is due to the possibility of being crushed, smashed, cut, trapped, impacted, punctured or stabbed because of machine tools, parts, equipment, or machined/treated objects, production waste, and ejected solid or liquid materials. Other main basic mechanical hazards are due to high-pressure fluid ejection, as well as slipping, or tripping and falling.

6.2. Basics of Occupational Safety in Industrial Human-Robot Interaction

According to ISO2010a, Risk assessment is the procedure which combines the machine (limits) specifications with hazard identification and risk estimation (which basically defines risk probability and gravity), in order to judge whether the risk reduction targets have been reached. Risk assessment for traditional and collaborative industrial robots is different. In general, due to the standardization of components and diffusion of applications, traditional robotic cells are easier to evaluate from a mechanical risk point of view. In this case, the common main risk features are:

- The robotic cell is isolated (direct physical HRI is usually not allowed),
- The mechanical risk indexes are high and characterized by a high level of gravity and a low level of frequency (high mass and velocity of robot arm involves high kinetic energy levels),
- The safety protection systems are based on prevention, that means a zeroing of mechanical risk probability by using safeguards,
- There is no possibility of mitigating unexpected contacts between the operators and the mobile parts of the robot due to specific robot design and control.
- Therefore, mechanical risk management is more homogeneous and standardized, which means it is less dependent on specific robotic cell applications. Risk management is simplified due to the absence of workers in the robot workspace. On the other hand, in the case of collaborative robots, the situation will be very different and more complex. The main risk features are:
- The robotic cell is collaborative (physical HRI is allowed).
- The mechanical risk indexes are variable in terms of gravity and frequency, depending on the application and on the potential HRI form. In fact, they can vary depending on the single operator tasks during the overall application.
- More probable and less severe mechanical risks related to unexpected human-robot contacts are allowed, which means that safety systems are based on a mixture of risk prevention and attenuation.

Therefore, the risk management is more application-specific, which means heterogeneous, complex, and barely standardized. (Gualtieri et al., 2020)

6.3. Main Safety Standards for Industrial Collaborative Robotics

Considering the mechanical risks that can occur during unwanted contact, there is a short list of general international deliverables regarding the safety of machinery requirements for Human Robot Collaboration(Figure 6). In 2016, a new ISO technical report, ISO TS 15066 (ISO 2016), was published in order to help production technicians and safety experts in the development of safe shared workspaces and in the risk assessment process.

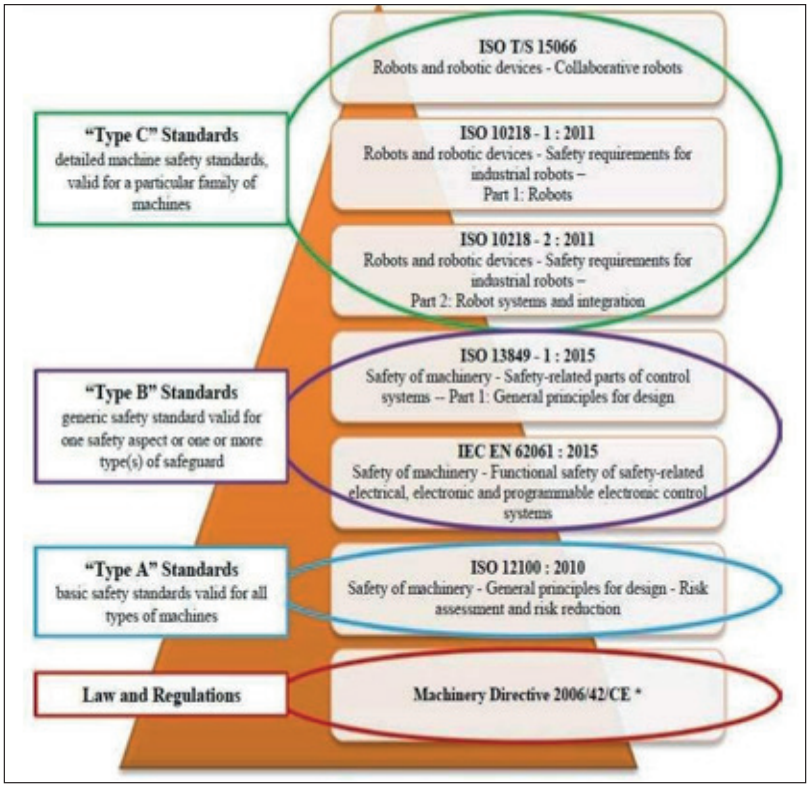


Figure 9: Main standards hierarchy related to industrial collaborative robotics (Gualtieri et al., 2020)

This report further details previous safety requirements for industrial robots included in ISO 10218 parts 1 and 2 (ISO 2011a, b). Other useful documents include the EU Machinery Directive (European Parliament 2006), standards ISO 12100 (ISO2010a) for risk assessment, and ISO 13849 part 1 (ISO 2015a) and IEC EN 62061 (IEC 2015) for functional safety requirements. In addition, a document was recently published (ISO 2018) that defines the main guidelines on safety measures for the design and integration of end effectors used for robot systems.

6.4. Technical Specification ISO TS 15066 (2016) and Collaborative Operations

The technical specification ISO TS 15066 (ISO 2016) was released in 2016 and explains in more detail the requirements regarding collaborative robots, which were preliminarily introduced in standards ISO 10218-1 (ISO 2011b) and 10218-2 (ISO 2011a) in 2011. At the moment, this specification represents one of the most detailed documents which specifies safety requirements for collaborative industrial robot work cells, especially in terms of mechanical risk. According to specific applications and types of interaction, collaborative robots should be integrated with different kinds of safety devices. The main goal of safe collaboration is to minimize the mechanical risk which could arise from unexpected contacts in terms of gravity and/or probability. ISO TS 15066 (ISO 2016) introduces four methods for safe HRC:

1. Safety-rated Monitored Stop,
2. Hand Guiding,
3. Speed and Separation Monitoring,
4. Power and Fore Limiting

6.5. HCD/Human - Centric Design and Ergonomics:

The fourth industrial (Industry 4.0) revolution has not only introduced new manufacturing paradigms, but is also changing the role played by humans. Humans play a key role that cannot easily be replaced by advanced technologies. Conversely, the introduction of new technologies complicates manufacturing systems and increases the need for highly skilled, well-trained workers. Therefore, the fourth industrial revolution renews an anthropocentric approach to conceiving new technologies, changing the question from how to replace humans to how to better complement and assist humans.

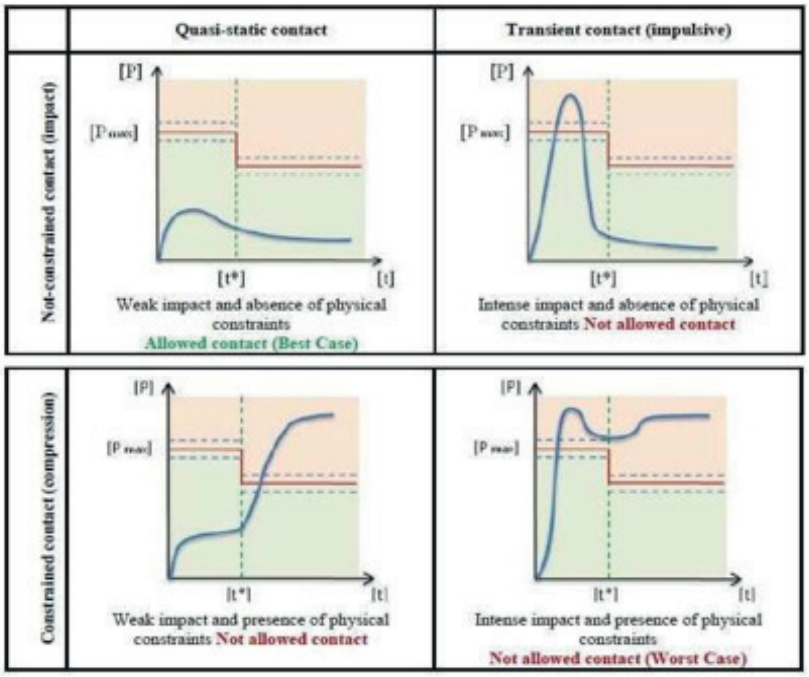


Figure 10: Human – Robot Contact Classification (Gualtieri et al.,2020)

A human-centric approach to design manufacturing systems is introduced. ISO 9241-210 (ISO 2010b) describes HCD as "*an approach to systems design and development that aims to make interactive systems more usable by focusing on the use of the system and applying human factors/ergonomics and usability knowledge and techniques.*" Therefore, such an approach aims to improve human well-being, together with user satisfaction, sustainability, and accessibility, while preventing the potential side effects to human health, safety, and performance due to the use. ISO 9241 part 210 provides guidelines on how to redesign processes to identify and plan effective and timely HCD activities, defining six key principles:

a. Design based on clear comprehension of users, tasks, and environments
b. User involvement throughout design and development
c. User-centered evaluation to drive/refine design
d. Iterative process,
e. Based on the whole user experience
f. Adoption of multidisciplinary skills and perspectives

The Human Centric Design approach can be incorporated into every kind of design approach (e.g., object-oriented, waterfall and rapid application development). One of the crucial aspects for correct application of the HCD is the respect of the ergonomic principles. ISO 26800 (ISO 2011c) defines ergonomics as being like a "*scientific discipline concerned with the understanding of interactions among human and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data and methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance.*" Such a discipline studies how to best design a workplace and the related equipment or products, in general, in order to optimize them for human use. A design based on ergonomic principles takes into account several human characteristics, e.g., weight, height, age, hearing, and sight. Ergonomics is therefore often referred to as human factors engineering.

6.6. Ergonomics in Human-Robot Collaboration

The idea behind collaborative robotics technology is to have advanced technologies that can help and support humans. An example of this interaction is when cobots remove components for a worker. Although cobots can improve the physical ergonomics of the workplace and thus reduce worker exposure to MSD, they can also cause mental stress and psychological distress to workers if the principles of cognitive ergonomics are not taken into account.

In fact, cobots must behave according to the operator's expectations (Mayer and Schlick 2012), their presence should not be a source of stress for people or even perceived as a danger. Human acceptability of cobots can be improved, for example, by implementing anthropomorphic trajectories for the robot. (Kuz et al., 2014; Rojas et al., 2019). While we are still far from an industrial application of hybrid workspaces based on standardized physical and cognitive ergonomic principles, there are some academic implications.

In 2015, a hybrid workspace with enhanced ergonomics and flexibility was designed by Faber et al. This design is based on the robot operating system (ROS/Robot operating system) and a cognitively automated assembly planner. A human-centric design for the workspace, in which process tasks are classified according to their cognitive complexity, was presented in 2018 by D'Addona et al. In addition, in the same year, a multi-criteria approach and an algorithm for task assignment that can simultaneously plan human-robot hybrid cell layout and tasks were presented. Müller et al. (2016) also suggested a skill-based task assignment approach. This approach is based on an assembly task definition model and assigns tasks between human/robot comparing their skills to their requirements.

According to Peruzzini et al, Virtual reality can assist in the design of an ergonomic workspace that allows simulation of assembly tasks for human- centric design (HCD). In fact, it is possible to improve human posture and stress by assessing different setups in digital manufacturing tools and adding digital human models and other virtual resource models (Caputo et al. 2018). Although such an approach is able to simulate assembly tasks in workplaces, taking into account ergonomic aspects such as posture, workload, and stress, it neglects higher anthropocentric aspects like human satisfaction and emotion. Although progress has been made in the design of an ergonomic workstation, a strategy to design a hybrid workstation which is completely human-centered and which satisfies all the physical and cognitive ergonomic principles is not yet possible.

The following section identifies the potential and challenges in safety and ergonomics in human robot collaboration by introducing the main organizational and technological future research areas. Figure 8 summarizes the overall classification.

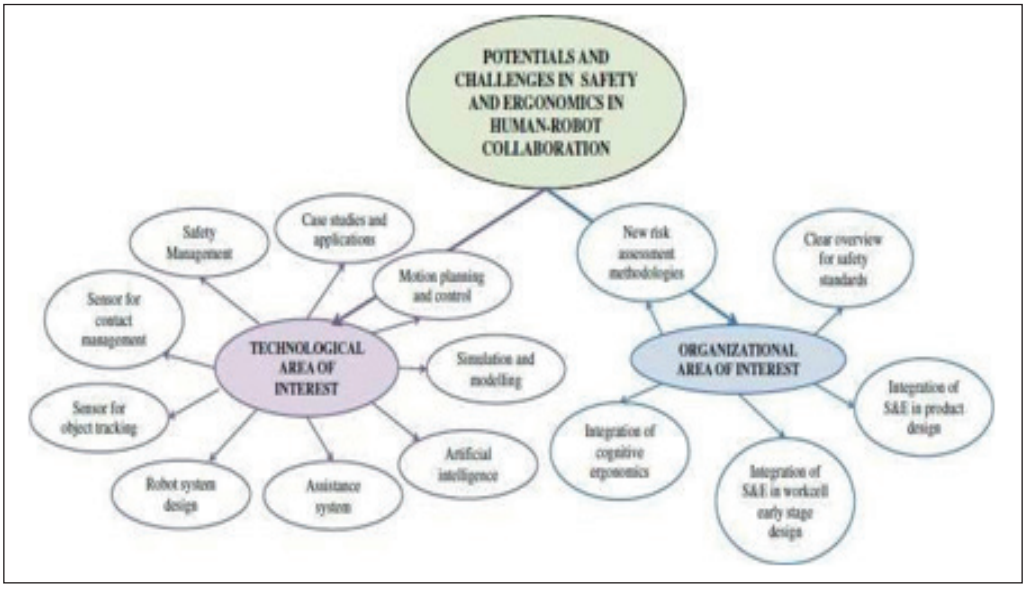


Figure 11: Potential and challenges in safety and ergonomics (S&E) in HRC: research areas (Gualtieri et al., 2020)

There are two main research areas of interest for safety and ergonomics in HRC (Human Robot Interaction): technological and organizational. The first one is related to the development of techniques for the improvement of the safety of HRI, while optimizing robot performances. The second one is related to management tools for better design and evaluation of safety and ergonomics solutions in collaborative systems.

The main organizational research areas of interest are proposed in order to comment on and discuss future developments and the main possibilities and innovations for safety and ergonomics in industrial collaborative robotics. The following list was developed according to different research results achieved by the authors in the Smart Mini-Factory (SMF) laboratory of the Free University of Bolzano-Bozen (Gualtieri et al. 2018).

6.7. Development of New Methodologies for Risk Assessment

The possibility of direct physical interaction between humans and industrial robots represents a new paradigm in the field of OHS. The introduction of collaborative systems allows new possibilities from a manufacturing point of view but also new challenges in terms of operator safety and ergonomics. For this reason, new and robust risk assessment methods should be developed by including the possibility of interaction between humans and robots. There are various methodologies for the assessment of occupational risks. At the moment, one of the more complete methods for machinery risk assessment is the hybrid method (ISO 2012). This method identifies three different risk conditions by colors: red meaning safety measures are required, yellow meaning safety measures are recommended, green meaning no safety measures are required. These risk conditions are calculated by using a risk matrix through five qualitative variables: Severity (Se), Frequency (Fr), Probability (Pr), Avoidance (Av), and Class (*CI*, which is the sum of the previous indices). These indices were estimated according to the guidelines found in (ISO 2012) and (ISO 2016).

Considering only mechanical risks, in the case of collaborative robotics, the main potential harms are mild or moderate in intensity. In general, the Probability and Frequency indices are the more relevant values. The Avoidance index can be medium since there is a real possibility of avoiding unintentional contacts due to the limited robot speed range, which is required for collaborative applications. The final goal of the risk assessment will be risk reduction through the adoption of protective measures implemented by the designer and the user in order to reach an acceptable value of residual risk. The risk reduction could be evaluated through the different values of risk class before *(CI)* and after *(CI*)* the introduction of safety solutions. Due to the complexity of the safety requirements related to collaborative applications, the use of an extended method like to one described here is suggested for proper risks assessment.

Cognitive Ergonomics Consideration: The sharing of workspaces and the physical interaction between humans and industrial robots could affect the cognitive ergonomics of the collaborative work. In this context, it will be mandatory to minimize the mental stress and psychological discomfort conditions which could be established during hybrid operations. Even if safety measures are well designed and implemented, the mere presence of the robot should not to be perceived as a hazard or as a source of stress for humans. Designers should consider these kinds of cognitive ergonomics problems in order to develop anthropocentric and human-friendly collaborative workstations also from a psychological point of view.

integration of safety and ergonomics of collaborative workspaces in the early-stage product design by Design for Collaborative Assembly (DFCA): The application of concurrent engineering (CE/Concurrent Engineering) methods for the integration of safety and ergonomics in the early-stage design of shared spaces will be crucial for the optimization of collaborative systems. CE is a "*comprehensive, systematic approach to the integrated, concurrent design and development of complex products, and their related processes*" (i.e., manufacturing, logistics, disposal, etc.) (Verhagen 2015). The aim is to improve productivity and to reduce production costs by decreasing product development and time-to-market. This methodology requires the consideration of all the early-stage features of the product life cycle, starting from conception and concluding with disposal (Verhagen 2015). Due to the nature of risks, which are potentially related to industrial HRI, concurrent design of a collaborative system necessarily involves the early consideration of OHS requirements for integrated products and process development. In order to develop safe and efficient solutions, the general design of an industrial machine (and related process) should consider the integration and the optimization of safety systems with functional systems in the early design stages. Nevertheless, it is a common procedure to design and develop the machine without considering the safety requirements and then to add them after the fact. This condition makes the design results unavoidably more inefficient and time-consuming, especially for collaborative systems.

From the engineering design point of view, product design is another fundamental part of CE. In order to satisfy customer requirements, engineering design allows the creation and transformation of ideas and concepts into functional products and processes. At the moment, large parts of optimized products, which are involved in manual operations, are designed for manual manufacturing and assembly. This means they present technical features and production processes notably designed for manual picking, handling, assembly,

and/or manufacturing. Obviously, these components do not have suitable features for robotic or automated processing. Considering that the industrial collaborative robot market is continually growing, it is reasonable to suppose that collaborative operations will be an interesting challenge in the near future. For this reason, it will be particularly useful to create new product design approaches, which consider requirements for human–robot physical interaction during collaborative tasks. Therefore, a new research field for product design could be to enrich commonly known "Design For X" (DFX) techniques by adding a new "Design for Collaborative Assembly" (DFCA) method. Some possibilities should include the design of product features according to the minimization of mechanical risk which could arise during physical human robot interaction.

7. CYBERSECURITY RISKS IN ROBOTICS

Cybersecurity can be defined as the protection against criminal or unauthorized use of electronic data in information systems, the protection of life, integration, the security, integrity and confidentiality of our material or moral assets and even our data in the electronic environment. In robotics, it is a field that seeks to defend against attacks on computer systems, which may include control systems, critical infrastructures, and technology transport systems. It ensures five security services namely confidentially, integrity, availability, authenticity and non-reputation of electronic, computer and network domains. Most governmental and legal entities collect, process and store large volumes of confidential data and transmit it over networks to other systems. One of the most contributing causes of cybersecurity is the constantly evolving nature of security. Even though the traditional systems have been successful in protecting against significant threats, many possible threats still remain unchartered. As the volume and sophistication of cyber-attacks increase exponentially, it is necessary to safeguard information which might be of personal interest as well related to national security. Thus, a body of technologies, process and practices work towards securing the networks, computers, programs and data from attack, damage or unauthorized access. The National Institute of Science and Technology (NIST), defines **cyber-attack as a means of using the cyber space for disrupting, disabling, destroying or maliciously controlling a computing environment or infrastructure**. Cyber-attack will lead to destroying the integrity of the data or stealing controlled information. In the robot environment, it will cause the robot to make involuntary movements. The cyber infrastructure generally comprises of Electronic Information and communication systems, hardware and software, storage, processing and communication. Cybersecurity being the biggest risk of technological operations finds its use in almost every realm of technology. The first generation of robots could be controlled by fixed, non- programmable, electromechanical devoid of sensors. These were replaced by second-generation robots that came with sensors and control devices. The third-generation robot was an even more refined version of the second-generation robot and packed with many different features, these robots can be stationary or mobile, and could provide complex programming capabilities with speech recognition and synthesis. Along with these developments, the definition of robot has also changed constantly, becoming a unit that is designed to perform tasks repeatedly while keeping a record of speed and precision. The term robot, which comes from the Czech word "robota", which means "forced labor", is still an employee who works by taking orders from an operator and computer system. Robots may be classified into two types depending on how they are controlled.

1. Autonomous Robots: These are the robots which do not need human or operator intervention and can perform tasks by themselves. For example: Robots that continue to work by changing direction when faced with any obstruction (Bump and Go).
2. Insect Robots: A group of robots which function on the command of a single controller fall into the category of Insect robots. It is similar to a colony of insects wherein the entire fleet follows a single leader.

We can list the main characteristics that a robot should have as follows:

1. Sensing: A robot must be able to sense its surrounding, for this purpose it is equipped with light sensors, chemical sensors, sonar sensors and taste sensors.
2. Movement: One of characteristics which makes robot is its ability to move. A robot may be dependent on wheels or walking legs to move. The movement may depict either an actual displacement in the position of the robot or simple parts of the robot to move.

3. Energy: A robot must be equipped with the required amount of energy/power to perform its functions. It may draw power from solar cells, batteries or electricity.

4. Intelligence: Robots reach a level of intelligence that will adapt to the environment with specific programs prepared for them, and they turn into smart robots. An intelligent robot is an artificial intelligence (AI/ Artificial Intelligence) system that can learn from its environment and experience and develop its abilities based on this knowledge.

Thus, a robot can be termed as a system incorporating sensors, control systems, manipulators, power supplies and software's functioning simultaneously to accomplish a task. Mechanical engineering receives support from fields such as physics, electrical and structural engineering, and mathematics and computer technology also contribute. Because of their parallels with humans, certain advanced robots are called Androids so they help humanity in more areas. Other robots should always have a person telling them what to do. As a result, robotics/robot science, as an engineering branch dealing with the design, production and operation of robots, receives great support from artificial intelligence, nanotechnology and bioengineering.

According to the 3 main laws of robotics;

- Robots must never harm humans,
- Robots must follow instructions from humans without violating rule,
- Robots must protect themselves without violating any rules.

7.1. Importance of Cybersecurity in Robotics

In a world undergoing rapid change, innovation and technology have led to the continuous advancement of robotics over the past few decades. Robotics, which was initially limited only to the world of production, has become a structure that increases productivity in a shorter time and can-do complex work. The cyber threat has grown exponentially as data, systems and people become digitally connected. It has been estimated that the Robotics and automation industry will grow from 63 billion dollars to 1.2 trillion dollars in to the next ten years. The costumer robotics industry by 2019 is believed to be over 1.5 billion dollars. Moreover, robotics may also be associated with the Cloud Computing Environment. As the demand for robotics will grow, so will the risk associated with robotics, cyber security breaches in robots will have an adverse effect on robotics, thus damaging the financial aspects and reputation. A hacked service robot could be otherwise used to harm people or carry out malfunctions deliberately. Therefore, in the years to come, it will become much easier for hackers to override industry protections, disrupt services, damage products, and steal important information. Real-time constraints often play a very important role in many robotics applications. Y Apart from software bugs and vulnerabilities, robotics is also prone to communication. If we talk about a few applications that require security and privacy in the field of robotics;

Defense and Space Industry: Robotics is used in the promotion of devices, also known as unmanned aerial vehicles, which can be used for military purposes, surveillance and combat purposes. Such devices generally need to be used encrypted. If they are not encrypted, it is possible for a malicious person to take control and easily manipulate an unencrypted drone. If desired, it is possible to misdirect the vehicle under his control to a densely populated area with malicious intent. Apart from that, there may be malicious attacks that take control of connected robots that break into an organization's sensitive data centers and sabotage records.

Medical Surgery: There is a potential danger in operating patients by giving commands to robots. In a surgery where a robot is used, the robot uses the same collaborative environment as the surgeon during the surgery, if there is no encryption or authentication stage in the system, the system is vulnerable to attack and the robot becomes vulnerable to all kinds of risks if an unauthorized organization takes control of the surgical robot.

Household Robots: These robots can be assistants or assist in the daily chores of households in various tasks at home. During their work, they may have a fairly large pool of information equipped with various sensors and cameras as a requirement of their work. However, this information must be very well protected. Some

robots can help with housework, while others can collect information about people's health. Such sensitive information should be taken into account, negligence can cause an unauthorized person to take control of the home robot and gain access to sensitive data.

Disaster Robots: Today, robotics technology has also started to be used in disaster recovery studies. Disaster robots may be given the responsibility to access, break, repair and disrupt harmful systems or substances. As with other robot applications, they should not be accessed by an external organization as robots can pose extreme danger. For example, the ability of an unauthorized person to access the robot in any nuclear facility, etc. as.

7.2. Current State of Security in Robotics

It uses sensors, control systems, manipulators and software to efficiently manage and control the robotic device. Because component- based software engineering plays an important role in robotics, components act like individual computer programs communicating with each other using protocols. Robot Operating System (ROS/Robot Operating System) and Yet Another Robot Platform (YARP/Yet Another Robot Platform) are robotics-oriented architectures that contain a set of programs on many hosts connected to the topology. Because component-based software engineering plays an important role in robotics, components act like individual computer programs communicating with each other using protocols. In the robot operating system, messages are transmitted using various protocols with or without encryption. MD5 is a message digest algorithm that ensures data integrity and introduces various authentication mechanisms. If the system is not encrypted, the system can very easily pass under the control of another power. In YARP, sensors, processors and actuators are linked by software. It poses a high security risk as the application is vulnerable to corrupt data.

Cybersecurity for robotics requires the system to be flexible beyond existing security technologies. For example, if a robot is to deliver a small package to a destination, it must consider multiple factors. It should be able to approach the target safely by intelligently controlling the environment, while determining the target and heading towards it, the bus it is on should not be detected. It is important to be meticulous to avoid obstacles and be adaptable in case any damage occurs. It should be easy to reconFigure and replace if necessary. Despite these characteristics, the risk of falling under the control of other powers is still high. By breaching smart devices, it is possible to obtain personal information and use them for other purposes. As a matter of fact, in a study, more than 69.00 smart devices were hacked wirelessly recently. (Bolden, 2015)

Any cyberattack in the robotic domain is either an endpoint compromise issue or a network-communication-based attack. Endpoint compromise sees that the controller cannot control the robot, while networking-based attack encourages an attacker to eavesdrop or inject malicious code into the network. One factor comparing the intensity of the two attack vectors is physical access.

Networking based attacks are more common than endpoint compromise attacks because they have more physical access. The robotic environment is threatened by many risks and vulnerabilities.

Attacks resulting from decision change: Such attacks are carried out deliberately to influence the actions of a robot commanded by the controller. This particular attack aims to manipulate the message while the packets are still in transit mode. Specifically, packet headers are modified by a competitor to forward packets to another destination or to modify data residing on target machines. Denial of Service attacks represent a class of Change of Intent attacks. In such attacks, the robots' network interface Transport Layer Protocol traffic is blocked by TCP (Transmission Control Protocol). These attacks have two main consequences;

Robot Halting: It is a physical indication that the robot has been overwhelmed by a denial-of-service attack. It can also lead to erratic movements of the robot. The robot can stop repeatedly and for different durations, the speed can also change.

Delay in Responding to Direction Commands: A bot under a denial-of- service attack will experience delays when transitioning from low to high speed. It may not respond immediately to various navigation commands.

Intention Manipulation Attacks: In intention manipulation attack, the attacker reconstructs the message transmitted from the robots to the controller. These are also known as feedback messages as they are a response to input given by the controller. These attacks are somewhat difficult to perform, since the purpose of the controller is real. However, if executed correctly, such attacks can be difficult to detect or prevent. If manipulated feedback is believed to be legitimate, it can lead to negative consequences. Because most robots are managed by communication networks, they are extremely vulnerable to manipulation attacks. A worm (Worm virus is designed to copy itself from one computer to another computer to manipulate the components in the robot and spread it to the network without any human intervention. However, this process happens automatically. It first takes control of the features on the computer that transmit files or information. The worm once After it enters your system, it can progress on its own.) can be written.

Hacking Attacks: This is the form of attack in which the enemy or attacker takes control of the communication between two endpoints. If the two endpoints are known to be a controller and a robot, the attacker disables the controller and unethically tries to take over the system the robot is in. This hijacking may temporarily or permanently take control of the robot and disrupt the services for a few hours or irreversibly. These attacks can be carried out in two ways:

Network Observer: An adversary with an intention of eavesdropping or snooping on the information being transmitted between a controller and a robot. This may be malicious, gathering information, inserting unreliable information into the network, and someone who seems benevolent to both parties.

Network Intermediary: An adversary who positions himself between the controller and the robot thus preventing confidential communication between the ends.

7.3. Some Mitigation Strategies to Avoid Cybersecurity Risks Among Robots

Because security breaches know no bounds and the robotics field is so vulnerable to insecurity, such attacks must be prevented before they harm humans. Several methods have been put forward for identifying attacks and mitigating the threats to secure a system.

- **Communication Robustness:** A transmission medium is required for commands to be transmitted from a controller to the robot and for feedback from the robot to the controller. It is this transmission medium that is vulnerable to most attacks. Providing a layer of security over channels for transmitted information will certainly reduce potential insecurities. Since communication is dedicated, encryption and promotion of authentication mechanisms on transmitted data will restrict modification, manipulation and hacking attacks.
- **Data Distribution Service in Robot Operating System:** As already discussed, in Robot Operating Systems (ROS), messages may be transmitted without encryption which encourages eavesdropping. However, integrating data Distribution Service (DDS) as a transport layer will lead to installation of plugins that ensure authentication, access control and cryptography.
- **Authentication Mechanism in (YARP/Yet Another Robot Platform):** When making use of YARP, the entire infrastructure may be revealed. However, an authentication mechanism may be introduced in YARP by ensuring key exchange. Port monitoring and arbitration may ensure proper encoding and decoding of transmitted data.
- **Securing the Cloud:** Cloud robotics is an emanating field which has robotics embedded into the cloud computing environment. It relies on cloud storage and other internet technologies of cloud infrastructure. It leads to enhancement of memory, computational power and interconnectivity for robotics applications. The data is collected by sensors, and the corresponding information is uploaded to remote computation center. The information is processed and may be shared with other robots.
- **Communication Between Computers and Computer Units**: Secure communication may also be provided by Communication buses. Unlike traditional buses, communication buses are based on Ethernet and hence can make use of features pertaining to TCP/UDP/IP.

1) Robots as Secure Applications:

Robotics platform is based on the traditional computer systems platform, hence making the security issues similar for both. Robotic platforms are mainly constituted of hardware and software components. As general-purpose robots become popular, many apps also surface which enable the robots to perform specific tasks. Thus, there is a need to secure the robot. High level abstractions may be used to secure the system whereas privacy is another major concern which may be achieved by certain access control mechanisms. As users are identified securely and privileges are given levels, privacy is ensured. Specific software architectures have been proposed to ensure security in robotics. High level abstractions define policies for robots. Securing web browsers also has its own impact. Separating main components of framework and defining a rigid interface between them may allow securing the system easily. The inter component communications in this case will pass through a common message passing interface which may be easily inspected. The given Figure is proposed architecture which resembles a microkernel inhabiting a thin layer of software responsible for transmitting different messages. The layers above implement hardware specific features, robot abstractions and abstractions for applications. The applications running on the top make use of the abstractions conveyed by lower level. There are many security applications in robots, if we examine four of them;

- **Robots for Remote Surveillance:** Robots relying on autonomous mobile platform such as RoboSentry can not only move with the help of wheels but can also record video, audio and other sensitive data. They may be autonomous of teleoperated with high resolution cameras. They have the ability to detect hazardous gases and may also integrate security and Close Circuit Television (CCTV) systems.
- **Robots for Alarm Verification:** False alarms are undesirable for any security installation. Many robots ensure verifiability of alarm conditions. The robots may be integrated to existing security, access control and CCTV systems. If alarm conditions are identified, robots may be dispatched as soon as possible. On reaching, the onboard sensors may confirm the presence of heat, smoke and flames and also send live audio and video messages. A confirmation signal sent to the centralized station may assist in preventing any mishap.
- **Robots for Asset Tracking:** Given a certain range with an autonomous mobile platform, a robot can track and locate items tagged with Radio Frequency Identification (RFID). The current position of a particular item in the settlement can be created and maintained by a robot. It can also be integrated into an already existing security system.
- **Robots for Facility Management:** An autonomous mobile robot has the ability to create and maintain a highly accurate, dynamically protected layout of a facility. This map can be used to gather information. For example, parameters such as corridors, clogged corridors, temperature, wi-fi coverage, security lighting failures and cell phone coverage in any settlement can be detected by these robots. Audio and video recordings and snapshots detected by the robot can be used for facility management.

Ethics in Robotics: With recent developments, robotics has become an integral part of our daily lives in driving, medical records and daily activities. However, since most of these transactions are done on the internet, the issue of privacy and security has come to the fore. Intelligent robots and driverless cars are effective, but they also bring ethical issues. Cyber technology, hand tools, personal computers, mainframe computers, etc., where robotics can be widely used. It is used in the manufacture of many devices. Cyberethics is the basis of ethical issues in computing machines performed by computer experts. Cybersecurity ethics in robotics consists of both cyberethics and technological ethics. Technological ethics is more concerned with the development of new technology, while cyberethics may deal with the ethics of computers and consider the behavior and effects of computer systems. Because robotics supports both cyber and technology, ethics in robotics must be relevant to both fields.

Ethics in robotics is concerned with the behavior of humans, how humans construct, design and treat robots. Some ethical challenges for robotics from the perspective of technology and cyberspace are as follows:

Copyrights: The ethical rules; the robot can affect the industries, national government and international relations in the countries of which it is a part, as well as affecting artists and producers. Therefore, the use of copyrighted material to create new innovation is restricted.

Cybercriminality: Technology affects social, cultural and economic fields. Oftentimes, businesses want to exploit copyright issues. As cybercrime increases rapidly, criminals can use digital tools to threaten people's freedom.

Privacy and Security (A case of Full Body Scanners at the airports): Ever since full-body X-ray scanners were introduced; many began to question people's privacy. In order to increase security, it is possible to display the human body naked by using an alternative wavelength, if desired, by using personal privacy and modesty in order to detect metal on people, by asking people to stand inside a rectangular electronic frame.

Privacy and Global Positioning System (GPS) Technologies: GPS devices have played a pivotal role in evolution of robotics. The location of people carrying cellphones can be tracked in no time with GPS technology which challenges privacy. It not only affects the interaction of citizens with their states but also that of employees at their workplaces. Many vehicles and equipment support GPS thereby contradicting civil liberties. Appropriate privacy levels are questioned due to such technological impacts.

Autonomous Robots on Choosing Their Own Targets: With autonomous systems becoming popular, human domains are invaded, thus there is a need to control them. These cars may zip ahead to take parking spots people have been waiting for. There may be systems that buy an unlimited supply of goods from a store while people wait on. One cannot allow their mechanical valets to cote on behalf of them. An autonomous robot should not be allowed to choose its own targets. The need is to create civilized robots which can be only done by following certain ethics.

8. SOME RULES OF ETHICS TO BE FOLLOWED IN ROBOTICS

Robots serve many functions to the society ranging from an entrainer to educator to executioner. As the robotics technology advanced, certain ethical issues surface. For the robotic domain related to cybernetics and technological ethics, precise principles must be established to define ethics.

1. Human Dignity Considerations:
   - The emotional needs of humans to be always respected
   - The humans' right to privacy to be always respected
   - Human frailty to be always respected, physically and psychologically.
2. Considerations During Design:
   - Maximal, reasonable transparency in the programming of robotic systems to be ensured,
   - Predictability in robotic behavior is desirable.
   - Trustworthy system design principles are required across all aspects of a robot's operation,
   - Real-time status indicators to be provided to users to the greatest extent consistent with reasonable design objectives,
   - Obvious opt-out mechanisms must be required to the greatest extent consistent with reasonable design objectives.
3. Legal Considerations:
   - All relevant laws and regulations concerning individuals' rights and protections to be respected.,
   - A robots decision paths must be re-constructible for the purposes of litigation and dispute resolution.
4. Social Considerations:
   - To avoid any racist, sexist, ableist morphologies or behaviors while designing a robot,
   - Tendency of humans to form attachments to robots must be carefully considered during designing.

8.1. Laws of Robotics for Ensuring Cybersecurity

Some laws have been introduced so that a robot can perform all its functions within ethical limits.

1. It is mandatory to determine whether the designer, programmer, manufacturer or operator is at fault in case an autonomous drone strikes or goes wrong or an automatic car causes an accident.to allocate responsibilities, autonomous systems must be equipped with logs with timestamp so that they can be referred to whenever needed.
2. If ethical systems be embedded into robots, it is necessary that the decisions made must seem justified to most of the people. Experimental philosophy may be used for the same.
3. Collaboration between engineers, lawyers and ethical policy makers will help design the right system, (Source: Priyadarshini, 2017)

9. RISK ASSESSMENT AND REDUCTION IN COLLABORATIVE ROBOTS

In addition to our previous definitions, we may refer to robots used in industry as an automatically controlled, reprogrammable multi-purpose manipulator that can be programmed in 3 or more axes that can be stationary or mobile for use in industrial automation applications. Both industrial robots and their collaborators have become used in various sectors of the industry in addition to screwing, assembling, placing, welding, loading, unloading, loading and painting, even in surgery in medicine. In addition, they can easily be used in dangerous and repetitive tasks. Robots, which are involved in more and more applications every day, can cause serious and fatal work accidents if the applications are not properly examined and scrutinized. In the study, a case study involving the safety of an industrial robot used as an auxiliary equipment to a horizontal injection molding machine, a risk analysis or risk reduction measures are emphasized, and the main hazards and general methods used to reduce risks are presented.

Causes of Accidents Involving Industrial Robots:

In a study based on analysis of 32 accidents, robot operators (72%), maintenance workers (19%) and programmers (9%) also suffered various injuries. Of these injuries, the injuries in which the operator was trapped between the robot and an object accounted for 56%, and the accidents involving the robot and the worker accounted for 44%. The causes of injuries included unexpected robot behavior, human errors (e.g., a second worker activating the robot when one worker is close to the robot) and unexpected software problems. The harm ranges from slight injuries with no loss time, to fatal injuries. In France, Charpentier et al. (Charpentier P, Sghaier A (2012) Industrial robotic: Accident analysis and human-robot coactivity. SIAS Conference.) analyzed 31 accident reports which occurred during the 1997- 2010 period. They found that 20 of these were due to operations and 11 to maintenance activities. Of these accidents, 8 were fatal and 21 were serious injuries. The causes of injuries included safeguards being absent, improperly installed or bypassed because they are unsuited to the intended task. 6 of the violations in the movement area of the robot were prevented by fixed safety fences and 8 of them were prevented by movable protective fences. In 5 cases there was guard rail or emergency stop. Before risk assessment, problems with safeguards included: bypassing, unsuited to the situation, improper usage, not installed, temporarily disabled and in a degraded mode.

Risk Assessment for Machinery:

Risk associated with machinery linked to machinery is defined in **ISO 12100 Safety of machinery-General principles for design-Risk assessment and risk reduction** as a combination of the severity of harm and the probability of occurrence of that harm. The advantages of machinery risk assessment are numerous:

- Hazards are identified effectively and better risk reduction measures, can be implemented,
- Injuries and deaths are prevented,
- Fines and criminal prosecution are avoided,

- Regulatory compliance is ensured and productivity is increased,

The hazard is the source the harm. Machines possess mechanical and electrical hazards, as well as those generated by heat, noise, vibration, radiation and dangerous chemical and biological substances. ISO 12100 specifies principles of machinery risk assessment and reduction. The standard describes risk assessment as two stages namely risk analysis and risk evaluation, as illustrated in Figure 5.

Risk analysis consists of (i) Determining the limits of the machinery, (ii) Hazard identification and (iii) Estimating the risk. The risk estimation step, which is carried out for each identified hazard and hazardous situation, is important since its results will dictate risk evaluation and therefore the choice and prioritization of risk reduction methods.

Various sources of hazards exist during the life cycle of the robot. Risk assessment is required for example, for the design, integration, installation, testing, verification, operation, maintenance and training. An important step is to identify the hazard, hazardous situation, hazardous event and possible harm. There are different hazards, namely mechanical, electrical, thermal, noise, vibration, radiation, material or substance, ergonomic, associated with the environment in which the machine or the robot is used. The hazardous situation is the circumstance in which a person is exposed to at least one hazard and often the consequence of performing a task on the machine or the robot. The hazardous event can have many causes which are often technical in nature or by human actions. In Annex A of ISO 10218-1, a list of significant hazards for robots and robot systems is provided.

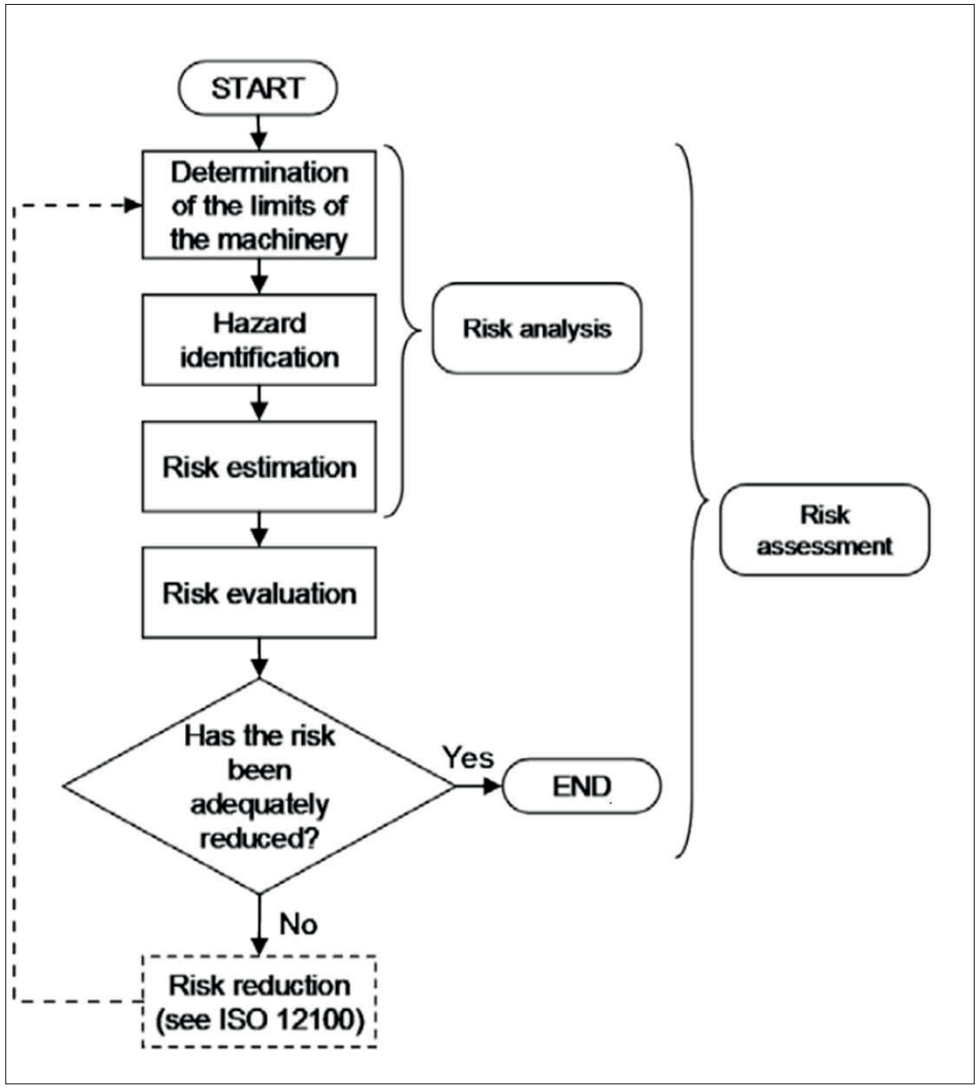


Figure 12: Simplified management of risk based on ISO 12100 (Chinniah, 2016)

Risk Estimation Tools:

ISO 12100 provides guidelines on how to estimate risk and what parameters to use. This international standard mentions that the risk associated with a particular hazardous situation depends on the following two main elements:

- The severity of harm,
- The probability of occurrence of that harm, The probability of harm is a function of;
- The exposure of person(s) To the hazard,
- The occurrence of a hazardous event,
- The technical and human possibilities of avoiding or limiting the harm,

The standard also provides guidance on how to estimate all those parameters, as summarized in Table 7. Moreover, an ISO technical report has been published where several examples of risk estimation tools are given. The ISO report provides practical guidance on conducting risk assessment for machinery.

Table 7: Summary of risk estimation parameters defined in ISO 12100 (Chinniah, 2016)

Parameters	**ISO 12100 Reference**	**Factors to be taken into consideration when estimating the parameter as given by ISO 12100**
Severity of harm	5.5.2.2	Severity of injuries or damage to health (e.g., slight, serious, or death) and the extent of harm (e.g., one or several persons)
Probability of occurrence of harm	5.5.2.1	Exposure of person(s) to the hazard, the occurrence of a hazardous event, and the technical and human possibilities to avoid or limit the harm.
Frequency of exposure to the hazard	5.5.2.3.1	Need for access to the hazard zone; nature of access; time spent in the hazard zone and number of persons requiring access and frequency access
Duration of exposure to the hazard	5.5.2.3.1	
Probability of occurrence of hazardous event	5.5.2.3.2	Reliability and other statistical data; accident history; history of damage to health; and risk comparison
Possibility of avoiding or limiting harm	5.5.2.3.3	Different persons who can be exposed to the hazard(s), (e.g., skilled, or unskilled); how quickly the hazardous situation could lead to harm (e.g., suddenly, quickly, or slowly); any awareness of risk (e.g., by general information, information for use, by direct observation, or through warning signs and indicating devices on the machinery; the human ability of avoiding or limiting harm (e.g., reflex, agility, possibility of escape); and practical experience and knowledge, (e.g., of the machinery, of similar machinery, or absence of experience).

Risk Reduction:

Designers are required to carry out risk assessments as well as risk reduction, i.e., to implement protective measures. Standards such as ISO 12100, ANSI B11-TR3 presents the 3-step approach for risk reduction,

- Inherent safe design measures (hazard elimination),
- Safeguarding and complementary protective measures (fixed guards, movable guards with interlocks, safety devices),
- Information for use (safe working practices for the use of the machinery, warning of residual risks, recommended personal protective equipment).

The residual risk is then managed by the user, based on the information for use provided by the designer.

The protective measures implemented by the user include;

- Organization of safe working procedures such as lockout, supervision, permit-to work,
- Provision and use of additional safeguards required due to a specific process not foreseen by the designer in the intended use of the machine,
- Use of personal protective equipment,
- Training,

Training and so on. To ensure robot safety, manufacturers and users apply the 3-step method detailed in ISO 12100. Specific risk reduction strategies are given in ISO 10218-1.

In Annex F of ISO 10218-1 [1], the means of verification of the safety requirements and measures for robot manufacturers are listed. The methods listed are:

- Visual inspection,
- Practical tests,
- Measurement,
- Observation during operation
- Review of application specific schematics, circuit diagrams and design material,
- Review of task-based risk assessment,
- Review of specifications and information for use.
- The safety requirements in Annex F of ISO 10218-1, include:
- General requirements (e.g., fixed and moveable guards),
- Actuating controls (e.g., status, indicator light, pendant),
- Safety-related control (hardware and software),
- Robot stopping functions (e.g., protective stop functions),
- Emergency stop functions,
- Reduced speed control,
- Operational modes,

- Pendant controls,
- Control of simultaneous motions,
- Collaborative operation requirements,
- Singularity protection,
- Axis limiting,
- Movement without drive power
- Provisions for lifting and electrical connectors

ISO 13849 and IEC 62061 provide the design principles of safety control systems for machinery. The safety-related parts of control systems for robots need to be reliable. Reliable safety control systems incorporate redundant architectures, use well tried safety components, include fault monitoring principles and use basic safety principles. The control systems are resistant to random and systematic failures. Usually, reliable safety controls will be difficult to bypass or to modify. Examples of well-tried safety components and basic safety principles are:

- Using safety position switches with forced opening of their contacts and mounted positively to monitor position of moveable guards,
- Preventing modification to the program when electronic programmable systems are used to control safety functions. Safety PLCs restrict such changes and also possess a redundant internal architecture,
- Use mechanically linked safety relays instead of ordinary relays;
- Use safety light curtains instead of optical sensors;
- Separating safety control and operation control and hence decreasing the likelihood that unwanted modifications by mechanics, electricians, and programmers are made to safety control system;
- Protecting safety position switches and safety devices from harsh environment which could degrade them and result in premature wear and damage.

ISO 10218 sets performance requirements as being a performance level d with structure category 3. ISO 10218 also mentions compliance with SIL 2 with a single fault tolerance in the hardware.

The speed of the robot end effector must be controllable at selectable speeds and under reduced speed control, it means a speed less than or equal to 250 mm/s. Enabling devices (pendant or teaching control) has 3 positions. When the operator continuously holds the centre-enabled position, the device allows robot motion but under reduced speed control. When the pendant has no cables, the loss of communication results in a protective stop of the robot.

Collaborative Robots:

Collaborative robots are purposely designed robots in direct cooperation with a human within a defined workspace. The human can perform tasks simultaneously during production operation. Table 8 presents the four operating modes for such robots. Collaborative robots are presented by their manufacturers as tools to empower operators in plants. The operators are responsible for training and supervising robots.

Table 8: Operating Modes for Collaborative Robots (Chinniah, 2016)

Modes of operation of collaborative robots	Description	Comments on safety aspects
Stopped state monitoring or safety- rated monitored stop	Robot stops when worker enters the collaborative workspace. This space can be a scanned area. It continues to monitor until the worker leaves. It then resumes working, i.e. automatic operation when the worker leaves the collaborative workspace.	Although it is called a collaborative workspace, it resembles a safeguarded robot inside a cage which stops when the worker enters the cage. One difference is that the robot automatically resumes work when the worker leaves. It is more like cooperation than collaboration. One example is a manual loading station.
Speed and separation monitoring	Robot slows down when worker comes near. Robot may stop if worker gets closer. Robot motion is allowed only when the separation distance is above a minimum separation distance. Different technologies can be used to detect the operator's position with respect to the robot (laser scanners, safety mats, vision-based systems)	The robot maintains a determined speed and separation barrier between itself and the worker. The relative speed of the worker and the robot is considered for minimum distance requirements. One example is worker replenishes parts. Safety control systems need to be reliable.
Hand guiding or gesture assistance robots	Worker is in direct contact with robot. Worker guides and trains robot. The robot assists the worker in tasks in which a force has to be exerted. The robot relieves the worker in that the force is exerted by the robot and not the worker.The robot motion is allowed only through direct input of the operator.	The hand guiding part is close to the end effector and consists of an enabling device and an emergency stop. A safety-rated monitored speed is used. This is collaboration between the robot and the worker.
Power and force limiting	Power and force of robot are limited. When the robot makes contact with a human being or any object with a certain force value, it stops immediately.	It is an inherent design and control of the robot. The robot knows the required amounts of force to pick up a load and to move it. When it recognizes an increase in torque or force required for movement, such as in a collision, the robot arm safely stops. Sensors at joints and output side of gearing are used. Control system is safety rated (fault tolerant). Robots are made of light material, have low inertia and no sharp or blunt edges. However, the worker who collaborates with the robot is not likely to accept being hit (although with little contact force) repeatedly.

There is an increase in quality of products and in overall productivity. In the long run, collaborative robots are expected to replace operators dealing with highly repetitive tasks. Some manufacturers specifically aim at small and medium sized enterprises (SMEs) which traditionally have not been heavily involved with the use of robots. By building relatively inexpensive robots that do require technical staff to program, robot manufacturers aim at automation in businesses and competition with low-wage manufacturing. In general, collaborative robots have user-friendly features that allow them to be taught, thus eliminating the need for sophisticated programming. The operator shows the robot the operation needed by grabbing the arm and guiding it to the object to be handled. They recognize with their vision system the object and the operator use a simple set of menus to tell the robot what sequence of tasks to take.

Table 9 shows some robots on the market belonging to various companies performing similar tasks. The use of collaborative robots can lead to musculoskeletal disorders for hand guiding stress due to the robot, loss of expertise and skills, dependence on technology to perform tasks, fear of loss of job and reduced autonomy. The absence of guards or physical barriers increases the need for thorough risk assessment and adequate design of safety control systems. The risks associated with the robots need to be considered as well as the products or process the robots are involved with.

Table 9: Comparison Among Collaborative Robot (Chinniah, 2016)

Robot Name (year introduced and cost where available)	Single arm or Dual arm	Number of Axis	Weight or robot (kg)	Load capacity (kg/arm)	Speed (m/s)	Design feature and applications
Baxter (2012, 22.000 to 40.000 USD)	Single or dual arm	6 or 7 axis per arm	75	2.3	0.6	Series elastic actuators providing flex joints; Human like; Repetitive tasks; Camera sensors for human detection
Dexter dot (2013, over 100.000 USD)	Dual arm	15 axis including two 7 axis arms connected to rotating torso	N/A	5 - 20	High speed	Precision of traditional robots for process and assembly; High repeatability
Kuka (2013)	Single arm	7 Axis arm	23	N/A	N/A	Power and force sensing; Force guided assembly
Universal Robot (UR) (2009, 34.000 USD)	Single arm	6 Axis	18 for UR5	5 or 10	1.0	Power and force limiting; Very repetitive task; Easy to use and set up
ABB	Dual arm	14 Axis	N/A	N/A	N/A	Small part Assembly operation in Electronics sector; Camera sensors for parts location

9.1.Case Study from Quebec

On OSHA website, a fatal accident involving a robot and a plastic injection machine is described. On May 13th 2007, in US, an employee in the plastic sector was troubleshooting a robotic arm used to remove CD jewel cases from an injection molding machine, when the arm cycled and struck the employee. He suffered blunt force trauma to his head and ribs. He was transported to the hospital, where he died two weeks later. As seen by this example, robots often interact with other machinery and risk assessment has to include the robot and as well as the immediate environment. To illustrate the risk assessment and reduction process, a case study is described in this section. The case study involves a 6-axis robot in Quebec used to unload products on a large automated horizontal plastic injection molding machine. The company specializes in manufacturing electrical components which also contain some plastic parts. At the end of each injection cycle, the mold area of the plastic injection machine opens. The arm of the robot then reaches into the mold area and with specialized end effectors delicately picks up simultaneously several small plastic parts directly from the mold. The arm of the robot enters the mold area from the operator side. The robot then rotates and places the plastic parts on a conveyor found on its side which transports the parts through an opening in the guard surrounding the robot (i.e., a cage) for quality inspections. There is a second conveyor found in the mold area which collects remaining unused plastic parts.

The molding area of the injection molding press is a hazardous zone due to both the closing mold and the moving robot. The original moveable guard protecting the operator side of the injection molding machine had to be removed by the company when the robot was integrated to the press since it prevented the robot from reaching into the molding area. Table 10 presents the hazards linked to the robot and press. Workers perform set-up, adjustments, unjamming, and maintenance activities in or around the mold area.

Table 10: Hazard identification for press and robot system without considering existing risk reduction measures (Chinniah, 2016)

Hazard	Hazardous Situation	Hazardous Event	Possible Harm
Movement of the arm of the robot in the direction of the worker	Worker in close proximity to the arm	Struck by the arm. Trapped against a mechanical part	Fractures, death
Movement of the gripper or other retention device in the direction of the worker	Worker in close proximity to the gripper or other retention device	Struck or pinched by the gripper or other retention device Trapped against a mechanical part	Fractures, punctures, crushing injuries, death
Stored energy -high pressure at the end effector	Worker doing maintenance activities on parts of the robot	Release of stored energy and struck by moving part High pressure jets	Fractures, puncture wounds, crushing injuries
Electricity (press)	Worker in close proximity to live parts intervening on panel- troubleshooting	Contact with live parts or with parts accidentally becoming live due to a short circuit or insulation problem	Electrocution, electrical shock
Projected object from robot	Worker in the path of the projected object	A failure of fixtures, grippers or another mechanical parts retention device	Fracture, bruises, death
Closing movement, the mold of the press	Worker in close proximity to the mold or inside the molding area	Struck by the mold Trapped and crushed inside the molding area	Fractures, crushed to death
High temperature of molten plastic	Worker in close proximity to the nozzle of the injection unit and inside the molding area	Splashed with hot molten plastic following a technical problem or human error	Serious burns

Table 10: Hazard identification for press and robot system without considering existing risk reduction measures (Chinniah, 2016)

Stored energy - high pressure (hydraulic or pneumatic) on the could closing system and/or inside the mold	Worker doing maintenance activities on parts of the press and/or robot	Release of stored energy and struck by moving part High pressure jets	Fractures, puncture wounds, necrosis, crushing injuries
Projected object found inside of mold	Worker in the path of the projected object	Struck by projected object (parts of the broken mold or forgotten tools) from the closing mold	Fracture, bruises, death
Gravity	Worker climbs on the press	Loss of balance and fall from height due to slippery parts or detective/poor access	Fractures, death (head injuries)

An operator could enter the molding area following a jam or a mechanic for troubleshooting or adjustments of the press and/ or of the robot. On several occasions, it was observed that the workers had their back facing the robot (so they were working with their arms inside the mold area and they could not see the robot). In Table 9, the corresponding hazardous situations, hazardous events and possible harm for each identified hazard are given. As described in ISO 12100, the hazard identification phase is carried out without considering risk reduction measures in place. This approach enables to better evaluate existing risk reduction methods and, if needed, to improve or change existing risk reduction methods.

After hazard identification as described in Table 10, risk estimation is needed for each hazard. A risk estimation tool can be used (e.g., a risk graph or a risk matrix). Based on the severity of harm and the probability of harm, a risk index is obtained for each hazard, followed by risk evaluation. Risk reduction strategies are then implemented and risk reduction measures need to be evaluated to ensure that the acceptable level of risk is reached and that no new hazards have been introduced (e.g., a sharp edge on the guard).

Briefly, the guard and openings in the guard need to be at a safe height and size. Standards exist to calculate the dimensions of guards. The doors of the guard surrounding the robot and mold area (i.e., cage) were interlocked such that no movement of the robot and of the press was allowed when the doors were opened and a worker entered the hazardous zone.

Reliable safety control systems incorporate redundant architectures, use well tried safety components and include fault monitoring principles. They are resistant to random and systematic failures. Usually, reliable safety controls will be difficult to bypass or to modify. Safety control system need to be designed following basic safety principles and well-tried safety components. ISO 13849 and IEC 62061 provide the design principles of safety control systems for machinery.

Well-tried safety component and basic safety principles used in the press- robot system were safety position switches (not ordinary limit switches) with forced opening of their contacts and mounted positively. Those safety switches monitored the position of moveable guards which are gates of the cage. Moreover, the safety position switches were protected from harsh environment which could degrade them and result in premature wear and damage. However, several safety principles were not implemented in the press-robot system. For example,

a safety principle is to separate safety functions or controls and operation controls. Separating safety control and operation control decreases the likelihood that unwanted modifications by mechanics, electricians, and programmers are made to safety control system. In our case, there was no such separation. Safety functions were achieved using the same programmable logic controllers (PLCs) for the press and that of the robot used for operational control. No safety PLCs was used. Safety PLCs prevent modification to the program, when electronic programmable systems are used to control safety functions. Safety PLCs also possess a redundant and fault tolerant internal architectures (e.g., different compilers). Software is also programmed and tested using stringent rules. In fact, the safety control system for the press-robot system was not designed with regards to their performance levels or PL (i.e., probability of dangerous failures per hour). Redundancy, monitoring and reliability principles are used to calculate the PLs. The PL calculations involve input, logic and output elements of the circuit. In our example, the inputs were the safety switches, the logic were standard PLCs and the outputs are hydraulic valves and electrical contractors. No PLs calculations were done in the press-robot system.

One important design feature on machinery includes the control mode for interventions such as maintenance, setup, when safeguards are bypassed i.e., worker being in the hazardous zone. ISO 12100 and the machinery directive mention that the safety of the operator is achieved using a specific control mode which simultaneously satisfies 4 conditions. The first condition is that the specific control mode disables all other control modes in the machinery to ensure that another worker does not restart the equipment. The second condition is that the specific control mode, permits operation of the hazardous elements only by continuous actuation of an enabling device, a two hand control device or a hold-to-run device. This ensures that the worker has full control of the hazard. The third condition is that the specific control mode permits operation of the hazardous elements only in reduced risk conditions (e.g., reduced speed, reduced power/force, step-by-step using a limited movement control device). The objective behind this condition is to limit the severity of harm, increase the possibility of avoidance of harm by anticipating it and having enough time to react accordingly. The fourth condition of the specific control mode is that it prevents any operation of hazardous functions by voluntary or involuntary action on the machine's sensors. In the press-robot system, a worker can set up the robot using a pendant while being inside the cage, close to the robot which then moves at a reduced speed of 250 mm/s.

9.2. Risk Assessment Process for Collaborative Robotic Application

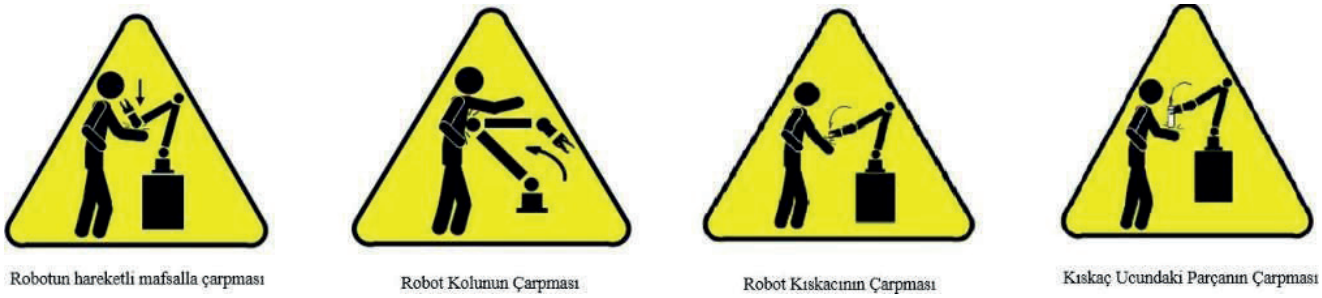
A comprehensive risk assessment is necessary to evaluate not only the robot system itself, but also the environment in which it is placed, i.e., the workplace.

Hazard Identification and Risk Assessment should cover;

- Hazards arising from the robot,
- Hazards related to the robot system,
- Application-related hazards,

Definition of Hazard;

- The hazardous movement of the robot,
- Hazardous movement of the robot gripper,
- Machines in the work cell,
- Exposure (intentionally or accidentally) to the motion of a moving robot



Hazards of Compression



Trap/Capture Hazards



Figure 13: Sources of Risk and Collision Hazards (Dominguez, t. y.)

Other Dangerous Possibilities:

- Unexpected unscheduled movement of the robot,
- Speed limitation error,
- Operation of the robot outside the programmed force limits,
- Contact with clamps, moving parts and hot surfaces on the process equipment,

An Example Collaborative Work Cell:

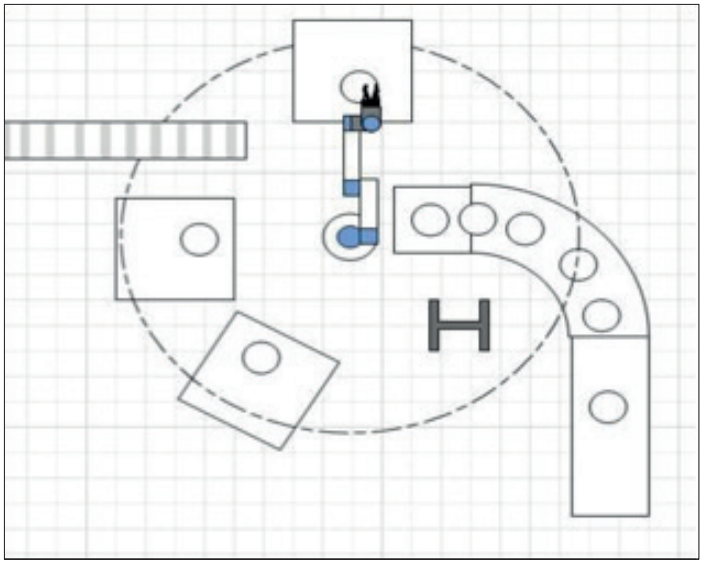


Figure 14: Collaborative Work Cell **(Dominguez, t.y.)**

Definition of Limits:

Limits of Usage:

- Intended use collaborative work cell, limited force
- Personnel: Operator, maintenance team, quality
- Collaborative robot with limited force during operation, projected payload 10 kg in 6 axes,
- Transportation and transfer of the produced machine parts

Working Space Limits:

- The working environment is clean and dry, and the working area is 3 X 3 X 2m.

Time Limits:

- Rate 1/90 s, Task lifetime 20 years, Usage Rate 5 days/week, 2 shifts per day, approximately 250 days per year,

Normal Operation:

The robot works independently, however,

- The operator is very close to the robot within the determined working area and periodically moves towards the robot as required by the job,
- Periodic quality control processes are carried out in the robot's working area,

Setup:

- Pallet change once per shift is adjusted according to the new part,

Cleaning:

- Cleaning is done in the work area for 2 minutes at the beginning of each shift,

General Information about the Robot in the Work Cell:

- UR 10 type collaborative robot,
- The load to be used is 100- 250 N,
- Momentum control available,
- Speed limiter,
- Axis limiter,
- Area limiter,

Adjustable Robotic Grabber/Grip:

- Electric gripper type R 85 with adjustable two claws,
- Weight 5 kg,
- The force it can apply is 5 – 220 N,

Information on the Workpiece:

- Weight 4 kg,
- Aluminum,
- 30 mm X 80 mm X 80 mm, radius 0.5 MM on edges and corners,

Fixture:

- Simple pocket type that fits the part to the assembly place,
- Dimension 500 mm X 300 mm X 40mm
- Radius 0,50 mm on all sides
- The parts fit into the fixture softly,

Table 11: Work and risks related to the process (Dominguez, t.y.)

Work	Risk
Jamming while grabbing	Crush between empty gripper and part
Jamming while grabbing	Robot bracket, fixture, conveyor and bench crush between
Jamming while grabbing	Crush between robot elbow and part
Approaching the robot tour/path	Collision with robot arm
Approaching the robot tour/path	Robot elbow/articulated collision
Approaching the robot tour/path	Collision with the grapple
Approaching the robot tour/path	Collision with the workpiece in the gripper
Approaching the robot's motion path	Crush between gripper, fixture, conveyor, workpiece
Clamp jaw loosening	Crush between gripper, fixture, conveyor, robot arm
Clamp jaw loosening	Crush between gripper, robot joint, fixture and bench
Clamp jaw loosening	Crush between robot joint, fixture, conveyor and bench
Process quality control	Crush between gripper, fixture, conveyor, robot arm
Process quality control	Crush between gripper, robot joint, fixture and bench
Process quality control	Crush between robot joint, fixture, conveyor and bench
Correct part direction	Crush between gripper, fixture, conveyor, robot arm
Correct part direction	Crushing between gripper, robot joint, fixture and machine
Correct part direction	Crush between robot joint, fixture, conveyor and bench
Touching or grasping the robot	Entangling/wrapping with robot arm or knuckle
Touching or grasping the robot	Clamping and entanglement of the part

9.3. Risk Assessment in Collaborative Robots

In human-Robot collaborative (HRC) applications, since operators and robots work in a shared space, their close interaction increases the likelihood of direct physical contact due to the nature of the operations or the operator's mistakes (misunderstanding of instructions, malicious intent). and these undesired physical contacts can also lead to dangerous situations for the operator. In order to identify and prevent such situations as much as possible, a comprehensive approach should be defined and developed for the safety assessment of the following human robot collaboration applications.

- To comply with risk analysis and robotic safety standards,
- To ensure that there are no unforeseen dangerous situations during the design of the systems with official verification,
- To focus on the hazards arising from the behavior of the operators,
- Examining possible risks by examining the operational perspective and experiences of the operator working with collaborative robot, instead of automatically identifying the hazards,
- Estimating the severity of the identified hazard as a quantitative value, called risk, calculated based on a detailed analysis of the entire system (e.g., severity of injury caused)
- Suggesting appropriate solutions known as Risk Mitigation Measures that reduce the risk to a negligible threshold,
- The aforementioned factoring approach uses formal methods for specification and verification of system properties and focuses on the following steps.
- Observe a real (HRC human-robot collaboration) case study with robotic environments to gain a common understanding of safety requirements, hazards and solutions,
- A consistent methodology is defined to identify applications and verify that they provide minimal security,
- A modular model of the case study is created using a solvable piece of trimetric temporal logic and an iterative validation is performed according to the defined methodology using the Zot (a limited validation checker) tool,
- The model is generalized so that it will be adapted to different case studies with the least number of changes necessary,
- Evaluate the methodology and generality of the model with new case studies,
- A framework is created to help security engineers design a system and iteratively fitted as many times as possible to make the design reliable,
- Extend the use of the framework to runtime, helping safety engineers to monitor the system, detect hazards, and take appropriate action in a timely manner,

9.4. Security Analysis through Official Verification in human- Robot collaboration

In Human-Robot Collaboration (HRC) applications, close proximity and direct interaction between robot and operator are unavoidable, so providing safety for the operator requires more effort and a more rigorous approach. Thus, the safety of machinery community has published several standards which include a list of significant hazards in HRC applications, potential sources of harms for the operator, their likely origins, and safety regulations for guiding the design and deployment of robotic solutions. In particular, ISO standard 10218-2 identifies four possible collaborative modes between humans and industrial robots. Of these, Power and Force Limitation (PFL) is the one involving actual physical contact, and it is associated with strict safety requirements in terms of pressure and force thresholds, in order to limit the effects on the human body.

HRC applications must be evaluated through the analysis laid out in ISO standard 12100 [12], to identify existing hazards and unwanted situations due to intentional misuses or unconscious errors of the operator; and to prevent their consequences, which are measured in terms of quantified risk values.

Figure 7 shows the stages of a standard iterative risk analysis (resulting in the CE marking in the case of European directives).

- Limits of Machinery: The desired tasks of the robot and its machinery regulations and constraints are determined.
- Hazards Identification: The existence of hazards (and combinations thereof) listed in product-specific standards such as ISO 10218-2 is identified.
- Risk Estimation: The risk values associated with hazards identified in the previous step are measured. Many risk-scoring methods are introduced in all of which combine the severity of a harm with its likelihood.
- Risk Evaluation: The significance of each hazard is evaluated. The methods reported in [14] help determine the range of acceptability for the risk scores.
- Risk Reduction: If the risk value is not negligible, appropriate measures are (iteratively) introduced to reduce each risk, either by redesigning the system to eliminate the hazard, or through the introduction of a safety function (e.g., "full stop in case of a signal from a protection sensor"), which needs to be verified against suitable requirements of reliability and availability.

The process continues iteratively until no new risk is identified and the residual risk value is acceptable. New risks may appear due to hazards related to risk reduction measures, or to operator behaviors in reaction to such measures. Devices and protection measures can alter the course of actions (use and misuse).

Security analysis through formal validation in HRC applications the SAFER-HRC (Safety Analysis through Formal verification in HRC applications) methodology, which provides a technique to comprehensively identify hazards through the exhaustive exploration, rooted in formal methods, of the behavior of the target system. Among the different types of hazards (e.g., electrical, ergonomic, ...), this work addresses operational hazards with a specific focus on those that are caused by human-robot interactions. Although we do not claim that SAFER-HRC guarantees that all possible hazards in a system are found, we argue that the exhaustive exploration on which the methodology is based helps increase the confidence that no significant hazardous situations are left unconsidered. To achieve an exhaustive analysis of the system model, we rely on the state-space exploration capabilities of formal verification techniques. Due to the impossibility of foreseeing all possible behaviors of the operator, it cannot be claimed that all possible interactions of operator and system are taken into account; nevertheless, an iterative methodology based on formal verification techniques can eventually provide a thorough analysis of all significant ones. At each iteration, if the design fails to satisfy the desired safety requirements, it is improved by adding new risk reduction measures. This methodology relies on a "human-in-the-loop" approach and it does not automatically select risk reduction measures.

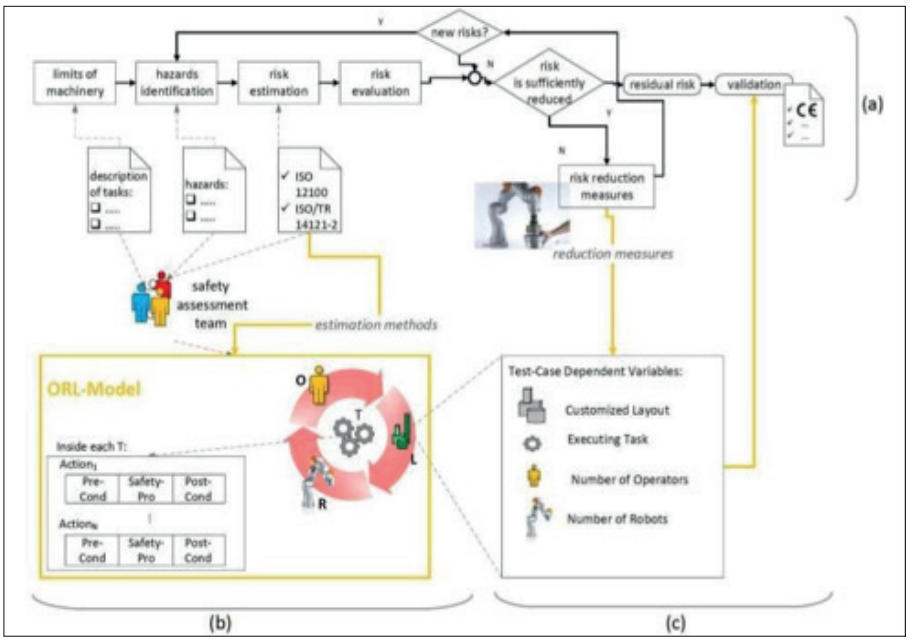


Figure 15: Overview of the safety analysis methodology: (a) standard procedure; (b) principal model of SAFER-HRC; (c) scenario refinement. (Askarpour et al., 2016)

As shown in Figure 11, the safety strategy is designed and acknowledged by a pool of experts and users of the application under assessment (the safety assessment team). The essential aspect of the proposed methodology is the systematic validation of the constraints and their possible violations at all steps of the application. The thoroughness of the validation ensures that the selected safety strategy is failsafe. SAFERHRC starts from informal, goal-oriented descriptions of collaborative tasks, and converts them into formal models built upon logical formulae, on which formal verification techniques are applied to check whether the safety requirements are satisfied or not. The model includes separate formalizations for operator and robot; hence, the verification phase also checks their interactions, taking into account how they are affected by the physical environment. After the principal model has been thoroughly analyzed, it can be modified and re-used to study different scenarios for the HRC application (e.g., combinations of different safety functions, uncommon actions by the operator).

The main contributions of the methodology presented in this study are:

- Applying formal methods to the safety assessment of HRC applications, where the presence of the operator negatively impacts on the predictability of the system behavior, but also imposes demanding safety standards that must be rigorously studied.
- Providing a flexible approach that supports the safety assessment team in thoroughly exploring different design assumptions, thus complementing the human insight with the power of formal verification.

10. OVERVIEW OF SAFER-HRC METHODOLOGY

SAFER-HRC is a semi-automatic verification methodology that uses formal verification techniques to detect violation of the security requirements specified in ISO 10218 during the design of collaborative robotic systems. As shown in Figure 7(, SAFER-HRC has a security assessment team (SATeam) at its core. SATeam, which includes robotics and formal methods experts, examines the limitations of machines and the tasks of the target robot and predicts possible human-robot interactions. It also identifies which of the hazards listed in ISO 12100 may occur and evaluates techniques based on the level of risk defined in ISO standard 14121. At SAFER-HRC, SATeam relies on a formal model of HRC implementation to support and systematize these activities. Rather, SATeam starts with informal, textual descriptions of tasks and then builds UML diagrams as a bridge to the formal representation.

10.1. Collaborative Robots and Risk Assessment

Traditional robots have done very heavy work for many years under various protective fences and electronic measures, but since no living things are allowed to enter the area they work, they have always worked alone in the area allocated to them. With the introduction of collaborative robots, the working environment has completely changed, the protective fences, light curtains and similar protective elements surrounding the robot's working environment have been disabled, and in addition, they have started to work in cooperation with people in the working areas. In traditional robots, since the robot works alone and every object that may pose a risk is prevented from entering the robot's work area, the risks of occupational accidents were much less than in collaborative robots, because the collaborative robot's constant presence with the operator in the collaborative area greatly increased the risk of accidents involving humans. Therefore, in order to minimize the risks, the severity and probability of injury for the employee must be determined by different parameters, and it must be determined that the robotic system and its environment meet certain safety levels before being considered safe for collaborative work. A risk assessment is the only way to determine whether a potential hazard exceeds acceptable standards for safety. In order to make an appropriate risk assessment, the relevant standards and regulations of the country in which the collaborative robot, the cobot, must be verified must be verified. For this, the support of the company that will integrate the robot in the enterprise is most important. with the recent release of the technical specification ISO/TS 15066, an updated version of the 'Risk Assessment

for Collaborative Robots' was required. Since certain previous parameters have been adjusted or new ones established based on this tech spec, this revision has incorporated this information. Still, we must remember that safety requirements are a work in progress and periodic revision is a necessity. Today, while collaborative robots are widely marketed in almost all branches of the industry, it has become necessary to provide detailed information about possible safety issues and concerns regarding them. With the introduction of technical specification ISO/TS 15066, a lot of data, calculations and methodologies have been developed to make sure your collaborative robot application is safe for use alongside humans. However, the technical specification has no effect on the certification of the robot and its application. This is why robot manufacturers will still use third parties to accredit their robots. This means that according to some designated external safety body, the robot under certain given conditions is certified as being safe as a tool. This does NOT mean that the application will automatically be safe. So, this means that the application in its entirety requires a risk assessment. This is why you should build an internal knowledge in terms of safety, so you can use your past experiences to build a new risk assessment for any given situation.

Although the production, management and safety of all kinds of machinery and equipment must be ensured in line with the norms and regulations used by that machine or equipment, these standards are an International Standard that is accepted and approved worldwide, forming the norms of all kinds of products from medicine to robot safety. Organization (ISO). They provide guidance on the design, use or performance of materials, products, processes, services, systems or persons. Standards ensure consistency of essential features for goods and services, such as quality, ecology, safety, economy, reliability, compatibility, interoperability, efficiency and effectiveness. So, this is basically a guide that should be followed in order to produce things within the safety guidelines for a particular product or production process. However, a standard is not legally binding, though in reality they often have the effect of law. The fact is that even though standards are not laws, they can be used to complement laws and are often thereby incorporated into them. So, if a governing organization is promulgating a law, it will probably refer to some standard, ISO or other, which is already established by world experts instead of reinventing a whole new standard. This might then unify different existing laws and reduce the complexity of the law, since it might refer to standards that are already being followed. You should notice that there could be organizations other than ISO that could provide standards relative to your robotic cell, like the International Electrotechnical Commission (IEC) that also establishes standards.

A short list of some organizations that promulgate standards:

ISO (The International Organization for Standardization): The International Organization for Standardization is an international standard setting body composed of representatives from various national standards organizations. The organization promotes worldwide proprietary, industrial and commercial standards.

OSHA (The Occupational Safety and Health Administration): The Occupational Safety and Health Administration is an agency of the United States Department of Labor. Their mission is to assure safe and healthful working conditions for working men and women by setting and enforcing standards and by providing training, outreach, education and assistance.

ANSI (The American National Standards Institute): The American National Standards Institute is a private non-profit organization that oversees the development of voluntary consensus standards for products, services, processes, systems, and personnel in the United States.

CSA (The Canadian Standards Association): The Canadian Standards Association, a division of CSA Group, is a not-for-profit standards organization which develops standards in 57 areas. CSA publishes standards in print and electronic form and provides training and advisory services. CSA is composed of representatives from industry, government and consumer groups. Otherwise, each country or region can decide which standard it will use for its laws or regulations. However, other organizations, such as the Conformité Européenne (CE), apply directives for the whole European Union. This type of organization is not writing standards, but it is using them to provide legal guidelines to products that are manufactured or imported in European Union countries.

ISO standards are constructed in a way so that the Highest-Level standard is the first reference. Among the various standard levels are the most specific safety standards applicable to robots, industrial robots, collaborative robots.

Essentially, the **A-Level standards** are the highest-level standard. They apply to fundamental safety knowledge, basic design features and general machine aspects. The **B-Level standards** are more specific to particular devices that can be found on different types of machines. It is still a general standard, but it goes into specific safety features. **C-Level standards** are specific safety requirements for a specific kind of machine, a robot for example. As you go down the diagram illustrated in Table 12, you get more and more specialized or refined for your product or process. For example, ISO 12100 - Safety of machinery defines different basic concepts such as risk assessments and risk reduction for all types of machines. But, the ISO 10218 – Robots and robotic devices is written specifically in terms of robotics and uses robotic examples for detailing safety requirements for industrial robots. Both standards pretty much provide the same function, i.e., machine safety, but since ISO 10218 is specific to robots, this is a more direct way to communicate.

ISO 13482 was issued in 2014 and is specific to Personal Care Robots which allows close human robot interaction and even human robot contact.

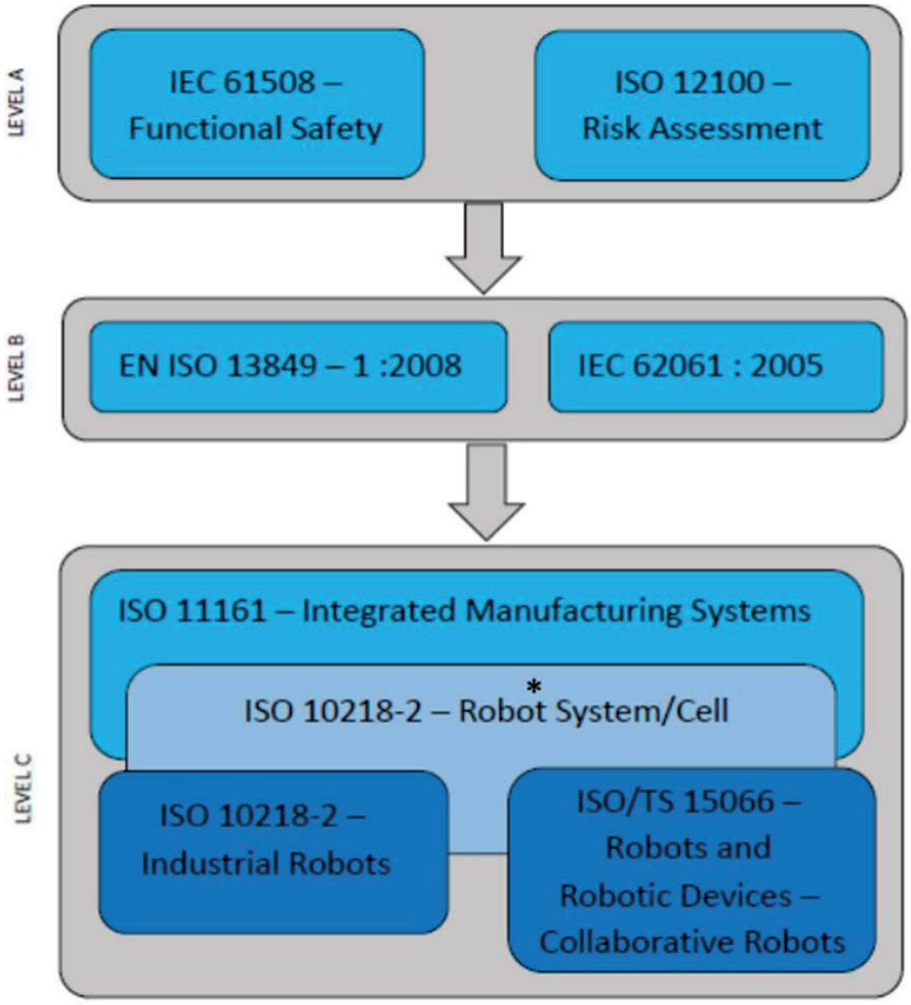


Table 12: Standard Levels (Bélanger, 2016)

The revised ISO 10218 standard Parts 1 and 2 and the ISO/TS 15066 Technical Specification, define the safety requirements for the sphere of robots and especially collaborative robots.

Besides the robot itself, the collaborative robot in this context includes its end effector; (i.e., the tool attached to the robot arm with which the robot performs tasks); the objects moved by it; its environment; and all its potential interactions. Close or direct contact between the collaborative robot and the operator gives rise by definition to the possibility of collision. The robot manufacturer's risk assessment must therefore also cover the intended industrial workplace.

- **Technical Specification:**

A Technical Specification represents an agreement between the members of a technical committee and is accepted for publication if it is approved by 66% of the members of this committee. The content of the technical specification is a normative document representing the technical consensus within an ISO committee.

In the case of collaborative robots, ISO/TS 15066 was released to give further data and support for ISO 10218 that did not have a lot of information directly relating to collaborative robots. It has the TS (Technical Specification) nomenclature because more application knowledge and data need to be analyzed before accrediting it as a standard, i.e., it is still a work in progress. Important data such as acceptable pain levels and body part inertia have to be considered in the design of any future standard to establish a force/energy/speed limit for collaborative robots.

- **Risk Assessment:**

The literal definition of a risk assessment is: The identification, "**evaluation and estimation of the levels of risk involved in a situation, their comparison against benchmarks or standards and the determination of an acceptable level of risk"**. In the robotic world, a risk assessment is used to evaluate potential risks – and afterwards mitigate them to achieve acceptable levels – of potential risk of harm to a human worker during the operation of a robotic system. To conform to the ISO standard, all machines must pass through a risk assessment in order to make sure it is safe. As cited in previous sections, some devices have already been approved by their manufacturers or a third party and this simplifies the risk assessment process since you don't have to verify the safety level of certain parts, the robot actuator, for example. However, even if the robot's internal components and software have been certified, this doesn't mean it is safe relative to its surrounding environment. Especially in the case of industrial applications, usage is so varied that it is impossible for a part manufacturer to approve any given process. This is where the risk assessment comes into play. Another way to look at this is that you need to evaluate each industrial application as a whole and not each device separately. If you take the example of a sharp part or a knife being manipulated by a certified robot, this does not mean that the application is safe, even if each part is safe in and unto itself.

- **Why is Risk Assessment Necessary?**

Ensuring your worker's safety is your responsibility. The risk assessment is a tool to achieve worker safety. In some areas of the world, local laws and regulations impose doing a risk assessment for any machinery installed on the factory floor. Not all governing regions will require you to respect standards, but most safety institutions will have laws incorporating or referring to safety standards. This also applies to large corporations that usually have their own safety guidelines. So, you will most likely have to comply with some standard, ISO or other, when integrating and designing your robotic cell in order to respect the laws in your region and ensure worker safety. Risk analysis is then performed against selected standards to ensure workplace safety, either at the national or global level. In cases where the safety of the robotic cell is desired, it will be necessary to perform tests according to all the points required by the selected standards and to make the work cell safe. The performance of the cell must also be documented according to this standard.

- **Risk Analysis Process:**

As most devices used in robotic cells will already have a certain level of performance, the risk assessment for the end user or integrator will mostly be about the application itself. The steps related to the process are outlined in the diagram below.

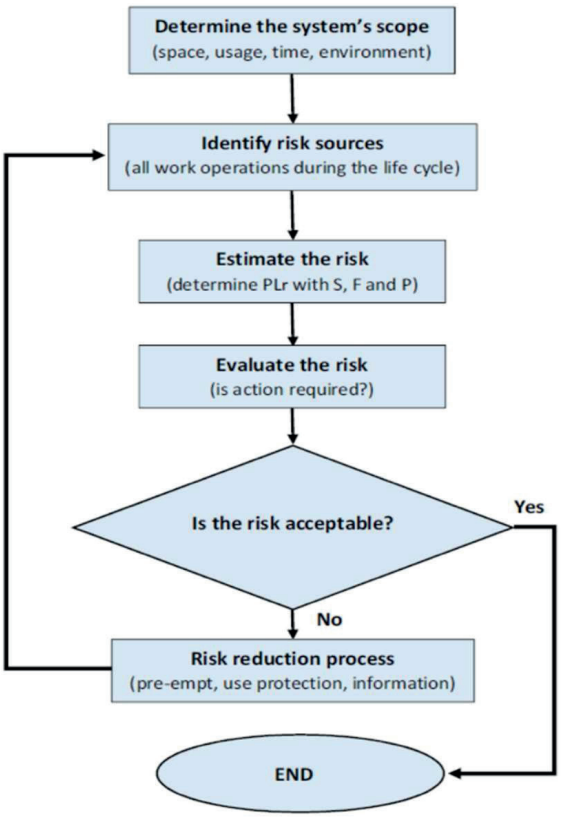


Figure 16: Risk Reduction Process (Bélanger, 2016)

Determine Scope:

This part of the risk assessment is a description of the context of the use of the machine.

- Where (in which process) will the robot be used?
- Which tools will be used?
- What objects will be a part of the operation?

Answers to the above questions are sought. In addition, the maximum speed, acceleration, reach, load capacity and part weights of the robot should be added to this study. These values are very important for the risk assessment to be realistic, and it may be necessary to add some other information to this.

Identify Risk/s:

It is necessary to list any operation that may pose a danger. These operations include not only the robot operation, but everything from the moment the robot is delivered off the truck to the moment you decommission it. This part of the analysis might seem a little exaggerated, but it can also sometimes be underestimated. Earlier last year, the media was full of a tragic case where a robot crushed a worker to death during the installation process. So, a risk assessment will analyze the different motions and actions of the robot throughout its lifespan and simply divide each operation for further analysis. This process is called task-based risk assessment.

Estimate Risk/s:

From the observations you have made during your risk identification analysis, you then need to rank the risk of given motions. There are various ways to monitor or rate a risk. To simplify the explanation, I will use the same example used in ISO 13849-1: 2006.

Risk is estimated using the Performance Level Rating (PLr) nomenclature. This analysis uses three different parameters: severity of injury **(S),** frequency of exposure to a hazard **(F)** and the possibility of avoiding the hazard **(P).** To simplify reading, I will use the S, F and P nomenclature.

So, the basic way to estimate a risk would be to rate each parameter and go through a risk estimation tree to see what the risk level is. On the risk evaluation tree, the top case represents the lowest risk and the bottom case represents the highest risk.

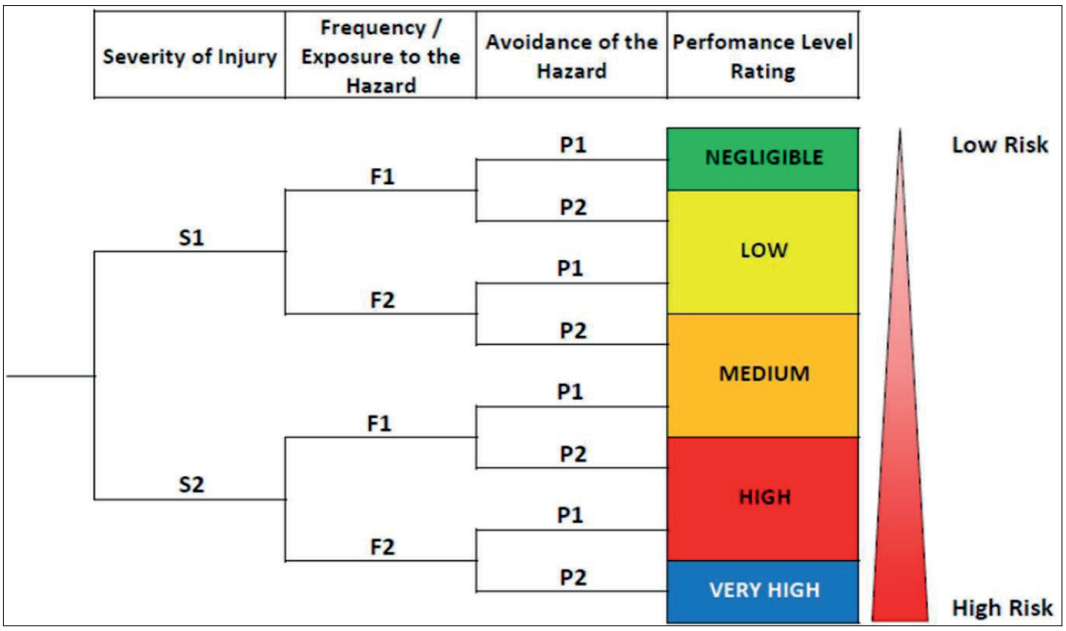


Figure 17: Risk estimation diagram (Bélanger, 2016)

To quantify the PLr, the following parameters have to be evaluated.

S: Severity of injury

S1: Slight (normal reversible injury),

S2: Serious (normally irreversible injury or death),

F: Frequency and/or exposure to hazard

F1: Seldom to less often and/or exposure time is short,

F2: Frequent to continuous and/or exposure time is long,

P: Possibility of avoiding hazard or limiting harm

P1: Possible under specific conditions,

P2: Scarcely possible,

Notice that some risk evaluation trees will have further choices to choose from. Some nomenclature will split the parameters into three or more different intensities instead of two. This will give a more precise estimation of the risk. In any case, the goal is to identify if the risk is too high for the robotic cell. Which brings us to the next step of the risk assessment: risk evaluation.

Evaluate Risk/s:

After identifying the risks identified in the process, actions should be taken to reduce these risks. The links between the Performance Level Rating (PLr) and the overall Performance Level (PL) should be reviewed. To restate this, if you estimate that your cell or application has a high risk (PLr = high) you need to ensure that the safety features that will secure this application will have a Performance Level equal or greater than d (PL ≥ d). In this case d or e. This ensures that the risk will be monitored or secured by a device that will be able to accept the level of danger present.

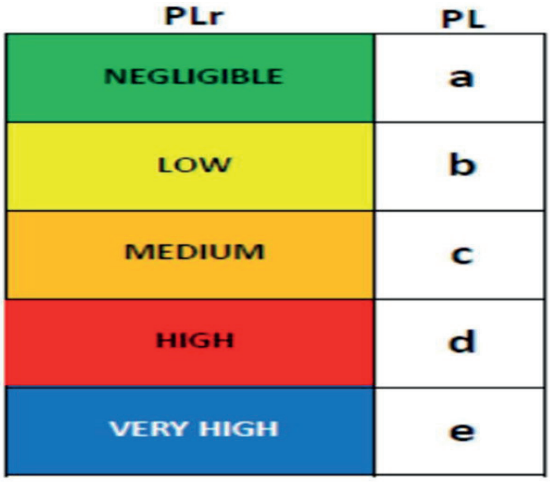


Figure 18: Evaluating Risk (Bélanger, 2016)

In many cases, it is desirable to be in the low or negligible category to make sure employees are safe. In case of falling outside of this acceptable category, various levels should be applied. If the risk assessment gives a potentially high risk; it is necessary to focus on these risks and reduce or eliminate them. As the risks decrease, it is necessary to back up the risk identification chain for risk analysis and complete the whole process again to ensure that the downloaded risk does not pose another risk. Let's say you want to integrate some protections to prevent collisions, but if this protection increases the likelihood of a worker being crushed during maintenance operations, then the configuration of this protection needs to be reconFigured by reviewing it. Any configuration change requires a review of the entire system.

Risk Reduction Process:

As cited in the last section, you need to make sure the risk elimination, reduction or avoidance does not come into conflict with other aspects of the robot cell or does not create a bigger risk for the workers somewhere else in the robot cell application. This process is really iterative and needs to be done very carefully by considering and reconsidering each potential risk as you go back up the chain.

What is a Risk Assessment for Collaborative Applications?

There are four types of collaborative applications:

- Safety monitored stop,
- Hand guiding,
- Speed and separation monitoring,
- Power and force limiting,

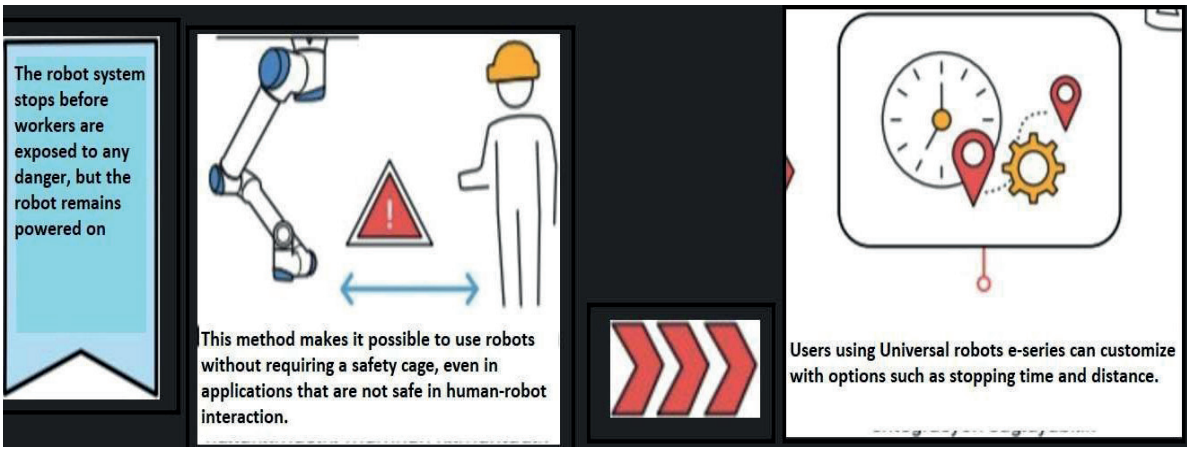


Figure **19:** Classified safe posture method (Start Working with Cobots Now, n.d.)

Safety Monitored Stop:

In other words, the robot stops when the operator enters the collaborative space. So, let's say the robot is monitored by a laser scanner, safety switches or a vision system that detects the presence of a human, the system will then shut down all robot motion to make sure the human cannot be harmed. Notice that the robot is not completely shut down, in fact, it has simply stopped all its robot motors though it is still monitoring all their positions. In order to prevent an accident, a processor is analyzing if the robot is where it should be (Safety Level 3). This kind of collaboration can be used if the robot has to be in close proximity to a worker, for example if a robot has to lift something heavy and a worker has to do a second operation on the part. The robot is usually stopped before the operator enters the collaborative workspace.

Hand Guiding:

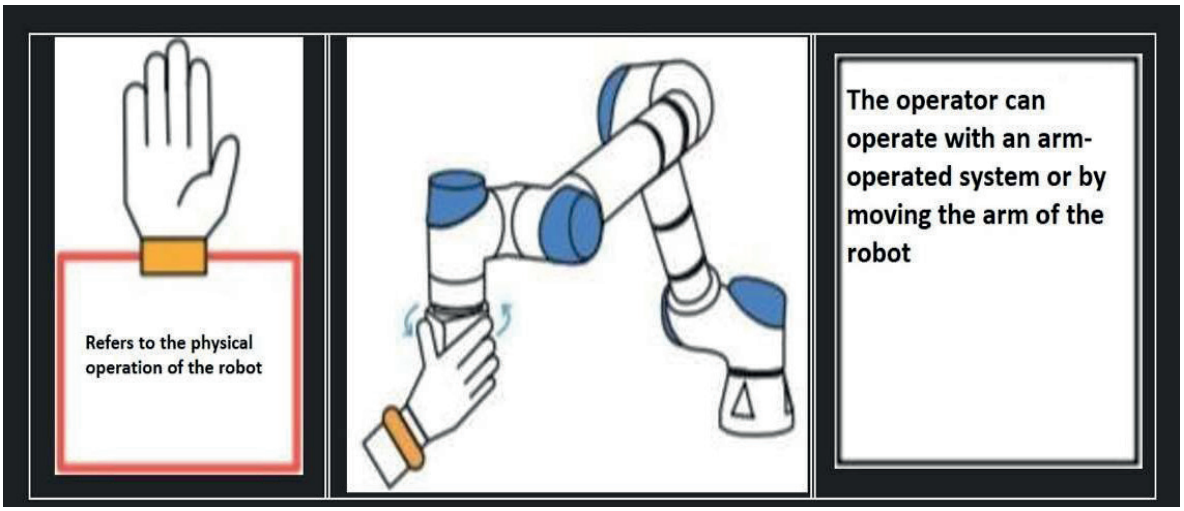


Figure 20: Hand Guiding Method (Start Working with Cobots Now, n.d.)

In this case, the robot's motions are only possible using the direct input of the operator. So, you literally teach the robot where to go. Notice that all robots using this kind of collaboration need a device that will allow it to sense the force exerted on the robot tool. Force torque sensors at the robot wrist or at the robot actuator can be used to achieve these applications.

Speed and Separation Monitoring:

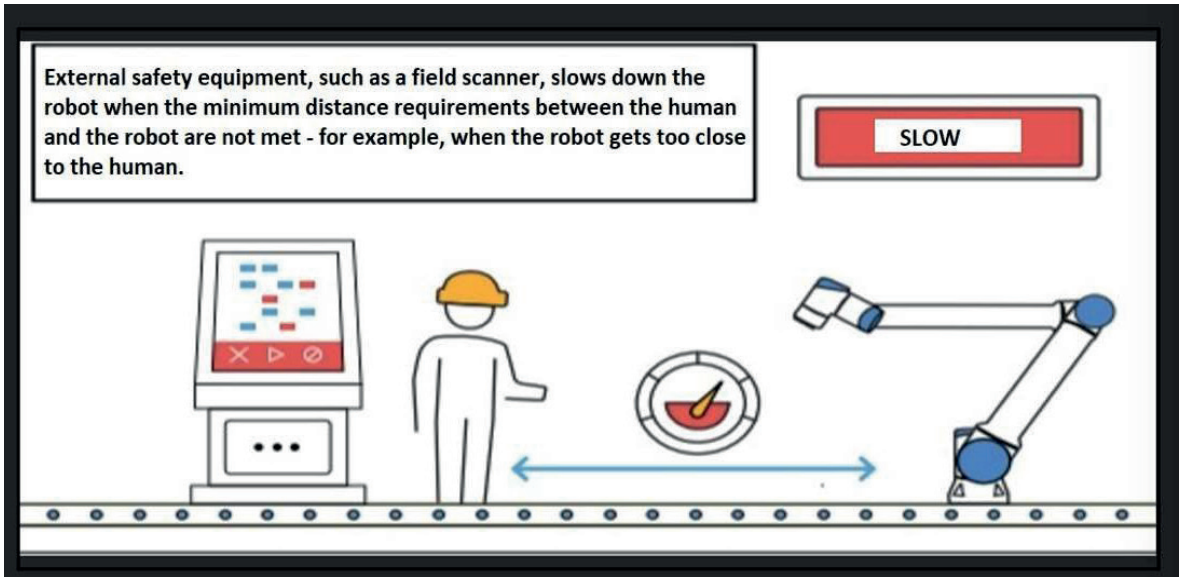


Figure 21: Speed and Separation Monitoring Method (Start Working with Cobots Now, n.d.)

This type of collaboration is achieved when different safety zones are delimited in the robot working space. Certain zones will allow maximum speed for the robot though some zones will require lower speeds, because of the potential proximity of the worker. Other zones will stop the robot altogether, usually because the worker is very close to the robot. The monitoring of the safety zone is done by different monitoring systems mostly using vision. The safety zone can be of any size and geometry, the user will set different zones and will associate different acceleration and speed settings to these zones to make sure the worker will not be harmed by the robot under any conditions. This might occur in cases where collaboration between the human and the robot is not constant and where the robot will work most of the time at full speed, alone. Doing it this way can speed up the process and still allow worker robot collaboration.

Power and Force Limiting:

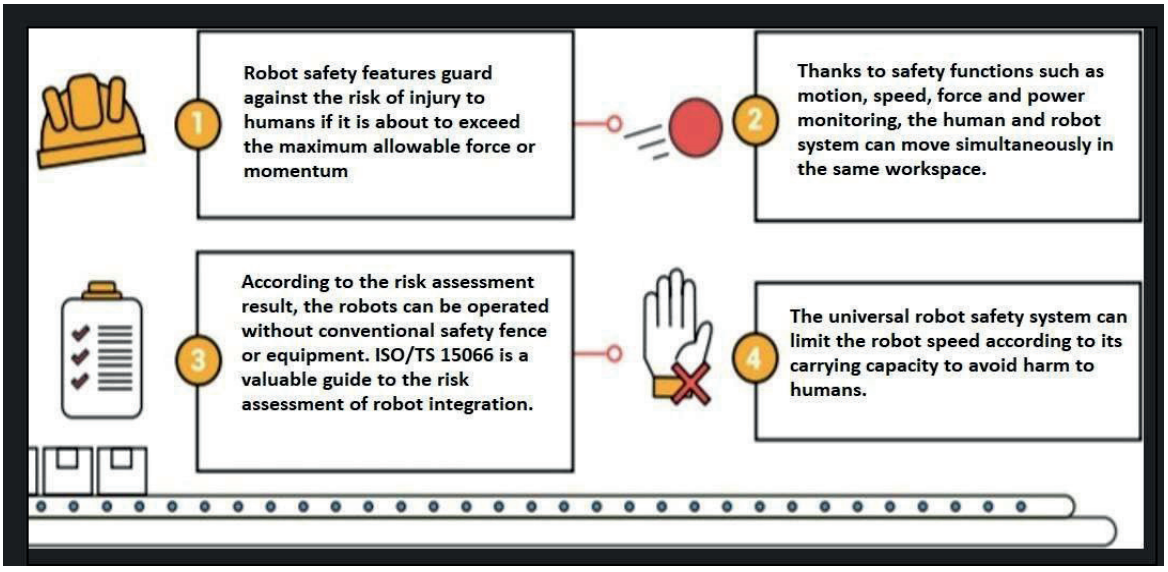


Figure 22: Power and Force Limiting Method (Start Working with Cobots Now, n.d.)

By inherent design and control the robot is able to feel an abnormal force being exerted on its body. So, in the case of contact, the robot only imparts limited static and dynamics forces. In other words, once it hits something the actuators and brakes act to provide less energy (inertia) in the direction of the impact. Some robots will simply stop and others will respond by moving in the opposite direction from the impact. These robots are used for a wide range of applications.

During the application of the working methods mentioned above, risk assessments should be made for the following situations.

- **Distance Before a Complete Stop:** This parameter is being used in speed and stop monitoring, for collaborative mode. The TS provides a complete calculation of the distance (and time) required for a robot to stop. This parameter has to be set and approved to limit the speed of the robot if it is working alongside humans. The calculation will include the different speeds involved (robot and human) and the distance separating them, as well as a couple of other parameters that will allow you to calculate the stop time, distance and speed required for the application.
- **Speed Conditions:** This part of the Technical Specifications is generally used for safety monitored stops. In fact, this part of the risk assessment will list the different conditions under which you can run the robot and at what speeds, as well as when it should stop. So in certain types of conditions, you will be able to run the robot full speed and in other enumerated situations, the robot should slow or stop completely (though it can still remain powered).
- **Force:** Since human robot collaboration most probably will include human robot contact, it is important to have data on what is the limit a robot can reach without harming humans. The technical specification uses

a study which analyzed human pain levels and uses the different data of this study to establish acceptable force thresholds that a human can endure without permanent harm. The chart that was created lists all body parts and gives precise force thresholds that should not be contravened at any time during the collaborative operation. Note that this data is only valuable in the use of power and force limited robots. In fact industrial robots even when they are used in a collaborative operation should never come in contact with humans at their normal running speeds.

- **Pressure:** Pressure is the force applied divided by the surface area of the part applying the pressure. As the robot can create certain forces on the human worker (uniquely in force and power limited applications) the pressure area might need to be enhanced to make sure that the robot does not overshoot acceptable pressure levels. This means that the surface area might need to be enhance and perhaps cushioned or made compliant to make sure too large an amount of pressure isn't applied.

- **Transient and Quasi- Static Forces:** The new technical specification lists maximum forces (thus pressure) that should not be breached in the use of robots. However, there is a slight difference between a static and dynamic force. In fact, an impact is calculated by the relative speed of each object. If you are moving in the same direction as the robot, the impact won't be as strong as if the robot is running straight into you while you are standing still or while you are moving towards it. So, if we are going to make a short definition of each type of contact;

- **Quasi-Static Contact:** This type of impact includes clamping or crushing situations in which a part of the body is trapped between a moving part of the robot and a fixed or moving part of the robot cell. In this precise situation, the robot will apply a force/pressure on the trapped body for an extended amount of time until the robot is removed. This type of contact requires a smaller force to reach the pain threshold.

- **Transient Contact:** This type of impact is referred to as 'dynamic impact' and describes a situation where the moving robot hits a human body part with the possibility to retract or recoil without clamping or trapping between the robot and the human body part. This type of impact is considered as being of short duration. A transient contact depends on the inertia of the robot, the inertia of the body part and the relative speed between them.

- **Who should Perform the Risk Assessment?**

  There is no absolute answer to this question. In fact, end users can perform risk assessments in their own plant. However, integrators are used to doing these evaluations and are usually faster than having to learn the whole process from scratch. Integrators will have templates and will know exactly what to do first to reduce a risk at the design stage. Doing it yourself is still doable, but will involve more time. On the plus side, you will gain in-house knowledge on how to perform a risk assessment. On the down side, you will keep all the liability in-house as well.

- **Manufacturer Certification:**

  A risk assessment is required for the entire robotic cell. In this environment, the robot will be playing a major role, but all other devices will also be involved in the risk calculation. This is the reason why each manufacturer should provide a minimum certification for their product, so the end user does not have to repeat the entire risk assessment ad nauseam. For example, if we give an example of an ordinary household electrical appliance, if it is not used in accordance with the manufacturer's warnings, it may cause an accident. For this reason, the company that manufactures this tool must perform a risk analysis to determine the dangers that may arise during the use of this tool by the end user. Therefore, a series of warnings will be given in line with the information obtained in the risk analysis to the instructions for use attached to the device. If this power tool is to be used in European countries, CE recommendations will also be required to be complied with during manufacture. These requirements are certified by the manufacturer itself and not by a third party. These standards are the minimum to be used in European countries.

However, if you want your product to respect a given standard you may want to use a third party to approve your product. In this case, the approval of an insurance company or neutral accreditation body can be obtained as a third party before the robot is put on the market. These organization(s) can ensure that their robot has the highest level and trusted security certification, stating that it is likely to apply the strictest standards in terms of security. Later this document can be used in different countries, but still needs to be approved by the local norms that it will undoubtedly meet. In general, the manufacturer will definitely prefer to attach the documents of the product with a reliable document accepted in the market in order to certify that it sells the most reliable product in the market.

- **Performance Requirements:**

If we go into deeper detail on what is considered as acceptably safe in a robotic cell, we have to refer to section **5.4.2 Performance requirement of ISO 10218-1:2011** which states:

Safety related parts of control systems shall be designed so that they comply with **PL 'd'** with structure category 3 as described in **ISO 13849-1:2006 (Safety of machinery),**

- A single fault in any of these parts does not lead to the loss of the safety function;
- Whenever reasonably practicable, the single fault shall be detected at or before the next demand upon the safety function;
- When the single fault occurs, the safety function is always performed and a safe state shall be maintained until the detected fault is corrected;
- All reasonably foreseeable faults shall be detected.

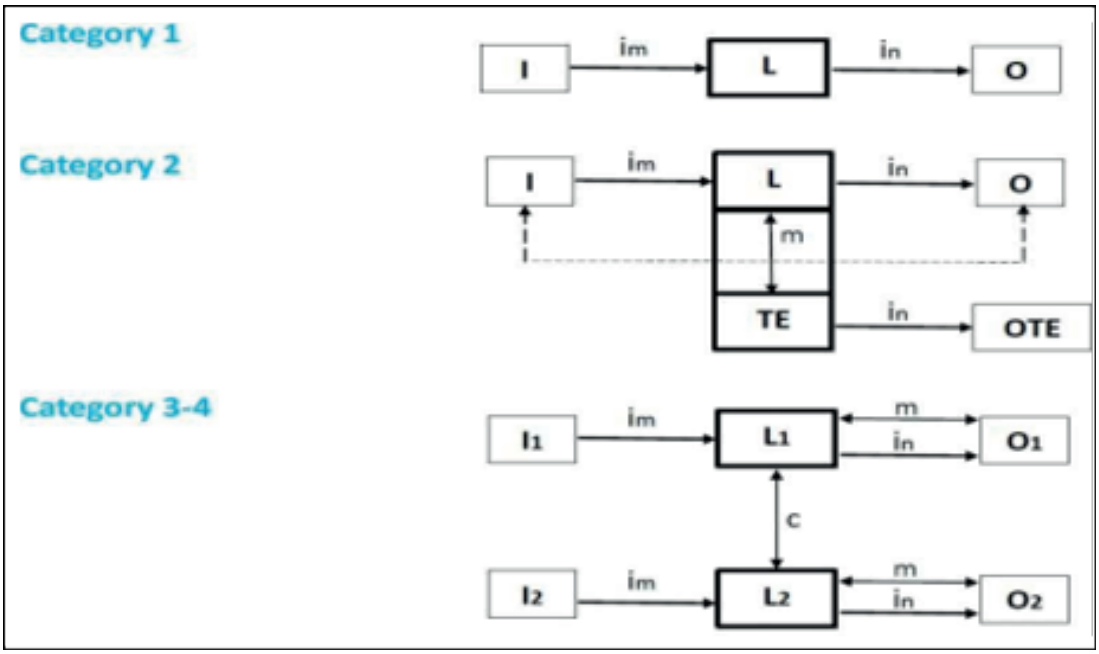
In order to respect the ISO standards, all equipment or machinery must respect a certain level of safety. This level, the Performance Level, is set with regards to the probability of failure for the equipment being tested. Table 13 describes the different performance levels set out in ISO 13849-1.

Table 13: Performance Level (PL) (Barette, 2016)

PL	Mean Time to Dangerous Failure per hour 1/h
a	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$
b	$\geq 3x10^{-6}$ to $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ to $< 3x10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$

The structural category depends on the amount of redundancy that your device uses. To put this another way, if you have a single channel hardware (encoder, for example) you will have a lower level of redundancy than a system that is using double encoders that double check each other to ensure the position of the robot is right where it should be. The following diagram demonstrates the different category levels.

Figure 23: Levels of Category (Barette, 2016)



Without going into complete detail regarding the diagram, Category 1 would include a simple single channel safety hardware. For example, a switch (input or I) that is turned off will be treated by the Logical device (L) and will result in a stop (output or O).

A Category 2 device will include a second device (TE or Test Equipment) that will always verify the validity of the input and output (OTE Test Equipment Output) for the main system and will react when a failure occurs. We can consider that a device with an emergency stop can be considered as a Category 2 safety device. A Category 3 or 4 device incorporates two parallel devices that will act independently, but will always double check each other to make sure they have the same signal. This way, a single fault can occur and the second channel will still be able to see that there is a fault. This ensures that the system can still read a defect if a channel has failed. As you may have seen the different nomenclature elsewhere, PL=d category 3; you now know what it all means. Most safety devices (Safety relays, key switches, estops, etc.) will be rated in this nomenclature. As mentioned before, all devices that will be involved in the collaborative robot cell must be rated at least PL=d category 3 to respect the ISO standards.

10.2. Collision and Injury Criteria for Working with Collaborative Robots

Hazards to humans from robots and machinery have traditionally been controlled by fencing, locking and cordoning off. Today, a newer type of collaborative robots/cobots have been developed that can share workspace at a closer distance and are designed to have human and robot work closer together. This requires new approaches to maintain a safe space between humans and robots and to set standards that can adequately protect humans working with robots from the health and safety risks of collaborative robot systems. Therefore, preparation of a Technical Specification draft that will provide guidance on acceptable risk levels, risk assessment and countermeasures by ISO has come to the fore, and this draft has tried to answer the following questions regarding collaborative robots;

- Whether force limits defined in the draft TS 15066 are safe and realistic;
- Whether methods proposed in the draft TS 15066 for testing the force limits are likely to be reliable, realistic and pragmatic for risk assessment of collaborative robot systems under real circumstances;
- Whether the proposed approach in the draft TS 15066 is likely to adequately protect people from the risks.

The development and implementation of collaborative robots takes place in industries with or without health and safety restrictions. When determining adequate levels of security for applications, it is important to avoid those regulatory requirements create vulnerable lines. The use of collaborative robots is seen as a possible growth area with significant pressures expected by the industry. Safety recommendations should ensure the development and maturation of the workplace while preventing the development of serious accidents.

10.3. Development of the Draft ISO Technical Specification:

During the studies, a largely revised draft was initially prepared under the title of ISO/TS 15066 and Collaborative Robots. A substantial amount of this project report was completed based on the first draft Technical Specification titled 'Risk assessment according to mechanical hazards of workplaces with collaborative robots – Specification to safety requirements for collaborative robot operation which are defined in ISO 10218-1 and ISO 10218-2' but every effort has been made to update the text to take into account the more recent ISO document.

The various body injuries that a person might sustain from collaborative robot systems, ranging from minor surface injuries to fatal injuries, can be put into a classification system. The description of the type and degree of body damage forms the criteria for classifying the injury – the injury criteria. An injury criterion, as defined in the draft ISO/TS 15066, is a 'selected biomechanical threshold which corresponds to a defined injury severity'.

Collision criteria are the properties of a human-robot collision that lead to a certain level of injury. The criteria are generally a description of the pressure, impact and shear forces acting on a body area that lead to a given type and degree of injury.

A definition of injury criterion is; -An injury criterion is a mathematical relationship, based on empirical observation, which formally describes a relationship between some measurable physical parameter interacting with a test subject and the occurrence of injury that directly results from that interaction-. The same source provides the definition of the tolerance level for injury criteria; - 'The tolerance to injury can be defined as the value of some known injury criterion that delineates a non-injurious event from an injurious event. Or, phrased another way, the tolerance is the minimum dose associated with a specified probability of producing injury of a specified severity-

Various force limits for robot-human collisions are being proposed, and an assessment of whether these appear to be safe and realistic is sought. An assessment of whether the proposed measures can be practically implemented is grouped with 3 purposes.

- Gauge the research available on crush / pinch / shear force limits for various body parts. Provide overview of available research. Find out what research the proposed force limits are based on, including discussions with the primary originators of the first draft of the standard.
- Examine the approach of defining body areas & force limits, given realistic foreseeable scenarios. Provide initial views on whether forces & measures proposed are safe & realistic, or what further steps are needed to establish this.
- Carry out an initial appraisal of whether robot designers and installers are likely to be able to implement the proposed approach, given technological limits of robotics and force measurement instrumentations and costs. Consider measurement instruments available, and further steps / research required to establish realistic measurement methods. Give consideration to realistic collision scenarios, and whether the approach suggested in the draft standard is pragmatic. (Rayne and Patel, 2001)

10.4. Security of Collaborative Robots:

Figure 19 includes the criteria to be considered for the safety of collaborative robots, and Figure 17 shows the possible risks that may arise in case of collisions between humans and robots.

Collaborative Robots Safety Research – Subject Areas			
Collision and Injury Criteria	**Risk Assessment**		**Risk Control**
	Measuring Robot Collision	**Assessing Potential Collision and Risk Scenarios**	
Collision injury data	Biofidel testing bodies, sensors and instruments	Accident / incident data – lessons about risks	Robot and cell design and safety technology
Collision injury data (crushing / pinching / cutting / impact forces)	Practicalities of reliable measurement	Robot cell workplace and job design risks	Human and organizational factors
Psychological aspects		Risks at the company / organizational level	Regulation, guidance and inspection - Standards and guidelines - Safety law and regulation - Inspection methods
Effects of PPE (protection / damaging forces / reliability)		Risks arising from human attributes and behavior	
Acceptability (societal / national / industry sector / personal)			

Table 14: A draft structure for safety research on collaborative robots (HSE, 2012)

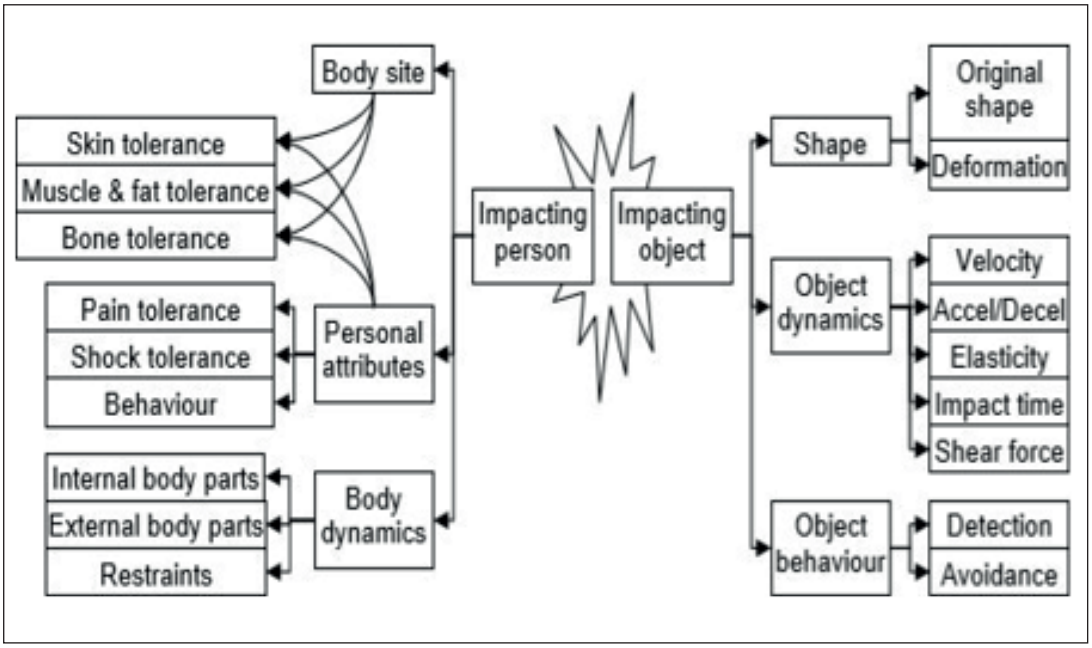


Figure 24: Aspects of human-robot collisions (HSE, 2012)

- **Recommended Force Values for Injury Criteria with Collaborative Robots**

The force limit values in the draft International Standardization Technical Specification for ISO/TS 15066 seem quite reliable when compared to other values found during this study, but this does not necessarily mean that the values are safe and realistic. however, there should not be any lack of research on the tolerance limits of the human body due to the ethical and practical issues involved in obtaining good data in this area.

The developers of the force limits (according to work at a research institute in Germany) have confirmed that the force values are based on a comprehensive review of available data, but data on what injury levels are acceptable for a given crash frequency, even if the force values limit bruises to the skin without deep scratches to the skin as recommended. must be determined.

Injury limits in draft ISO / TS 15066 are set not to exceed AIS/Abbreviated Injury Scale level 1; these forces should not cause skeletal damage.

However, it is worth noting that the AIS level 1 injury criteria include one broken rib, so the AIS scale criteria don't appear to be entirely suitable – this raises the question of whether a customized injury criteria and classification system would be beneficial.

Given the lack of available data for certain parts of the body, and speaking of variable quality for all body regions, there is some doubt as to whether the predicted forces will adequately protect all areas of the body under a variety of possible real-life collision conditions.

Unless the suggested force values are tested on various real people and cover all possible variables (impact area, impact angle, impact velocity, etc.), different unforeseen risks will come to the fore.

In addition, people have a tolerance for injury and variables such as avoidance of collisions or falls (rates of reaction and ability to avoid overbalance) because force values may not affect everyone to the same degree.

- **Applying the limits to real risk assessments**

Without investment in standard instrumentation and testing methods, it is not possible to reliably use the limits outlined in the draft. Already, the ISO / TS 15066 draft also states that standard equipment has been developed for testing robot collisions. Once standardized instruments are ready for use, it will also be necessary to consider the possibilities in advance of making sure of appropriate test points in the complex human/robot cycle and what to do in case of misbehavior that will cause unplanned movements and collisions.

The recommended force limits are designed to be applied when an undesirable situation (contact) occurs for any reason in systems that need to maintain a safe distance between the human and the robot. Robotic systems are good at precisely tracking a repetitive programmed motion pattern, but system security is low when humans perform this task. The accidents that have occurred have shown that unpredictable human behavior and movements are one of the leading factors that cause accidents.

In order for the robotic system to maintain a safe distance from humans, it must be able to precisely monitor and manage the potentially volatile and unreliable behaviors and movements of the people around it. If robotic systems use tracking and avoidance systems to prevent collisions caused by human contact, this will add a wealth of movement to the robot.

Since the relative movements of human and robot are potentially complex and variable, conditions at the moment of human and robot contact in any collision are likely to be complex. This will make measuring and risk assessment for that collision a complex task for some systems. It will be very difficult to predict and prepare collision scenarios for situations where human and robot speeds create a complex situation together.

Although the motion of certain robot systems is programmed and normally predictable, the variety of robot motions that can occur in different robot setups can vary greatly, so it can be difficult to find criteria and measurement approaches that can take this variation into account. Also, some robot setups are programmed with a long series of motion paths (e.g., stacking on a pallet) or may need to be reprogrammed frequently at each

subprocess stage where they can provide temporary support with variable tasks. Collaborative robots, developed for different movements and tasks, which are expected to increase the range of motion of robots in any installation, and which can be easily reprogrammed, have started to be used more in small and medium-sized enterprises. Thus, the draft of the ISO required extensive testing in a variety of systems and conditions to cope with the diversity of existing and emerging robotic systems.

Biofidel test dummies have been developed, especially for use in the automotive industry, to assess the risk of injury in these trials and to determine realistic injury criteria. The resulting test dummies are only valid for use in car crash scenarios because they are adapted to collect measurements of car crashes.

Compared to the automobile industry, developing practical biofidel test dummies and injury criteria for the collaborative robotics industry may present additional complexity due to the potential diversity of human and robotic tasks, movements, and effects, because inside any automobile, the test dummy is in the seatbelt and subsequently at the wheel, Since the airbags on the doors and the front panel are protected, their movement will be much more restricted compared to the collaborative working environment, so it will be easy to standardize.

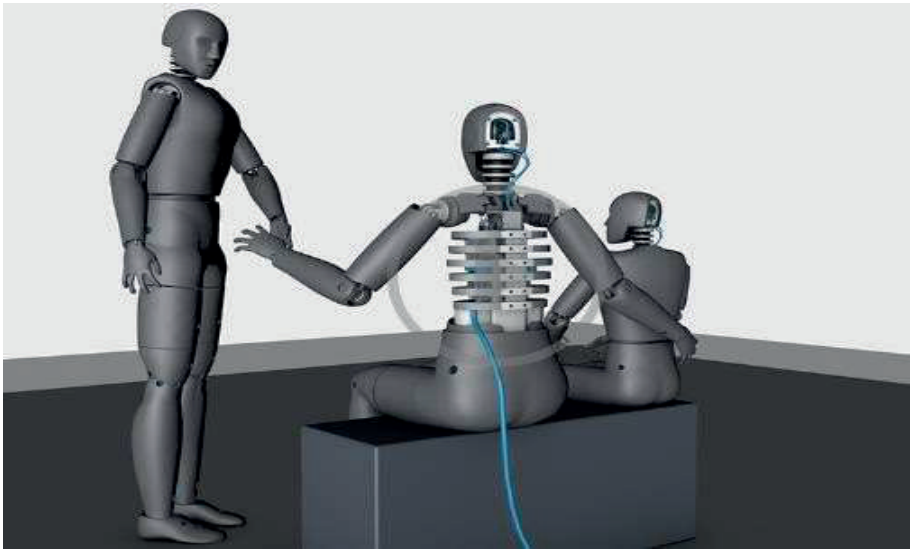


Figure 25: Cysts, measurement, analysis, innovation (HSE, 2012)

Various potential failure scenarios of robot and human performance need to be identified and elaborated on in order to make a practical risk assessment. One of the most difficult aspects of risk assessment for the collaborative robots work environment is determining what the failure scenarios might be and how to determine the probability, extent and consequences of failure during any collision in the human/robot mix.

11. STANDARDS, TECHNICAL SPECIFICATIONS AND LEGISLATION IN COLLABORATIVE ROBOTS

With the rapid spread of the 4th Industrial Revolution, which first came to the fore in 2011, all over the world, industrial robots, one of the most prominent representatives of traditional automation, started to leave their place to collaborative robots. Although they are preferred in facilities where faster, serial and quality products are produced, the definition of collaborative robots as automation workers used in environments where human work is costly, tiring and even dangerous has made collaborative robots popular everywhere from the smallest scaled factories to giant production facilities. The fact that collaborative robots are not operated alone, but become a part of an integrated system, work together with operators in collaborative environments, but receive commands completely automatically and from the cyber environment, required a more detailed examination of the optimization of their use, feasibility and safety and security of the collaborative environment in which they work.

Currently, there is no specific legislation or standard regarding collaborative robots in our country. Because robots are produced and brought abroad, international standards are generally used in this regard. However, since robots are not a machine on their own, they are integrated units into a production line, they are considered as partially completed machines according to the Machinery Safety Regulation. For this reason, a robot is not considered sufficient to receive the CE mark on its own, but if the line in which the robot is used becomes a fully integrated production line, it can be entitled to receive the CE mark if it meets the various compliance values required in the regulations. In addition to these, in order for these robots to be put into use by manufacturers and integrators, they must also meet the requirements of the Occupational Health and Safety Law, the Regulation on Health and Safety in the Use of Work Equipment and the Risk Assessment Regulation.

Collaborative robots can cause work accidents up to death due to the fact that they are asked to perform the tasks assigned to them very quickly, and that they work very quickly in some applications during operation, often in cooperation with operators in collaborative environments. Therefore, a detailed risk assessment, which is also a part of the Machinery Safety Regulation, is required both in the machine design and before the machine is put into production.

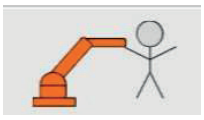
11.1. Machinery Safety Studies:

As with other machines, a risk assessment must be made in order to determine the safety needs of robots. During this risk assessment, all stages from the design of the robot to the process in which it will be used are handled one by one, among these stages, all possibilities are discussed, from possible control system failures to the cleaning of the collaborative working environment from slippery materials, if any. In order to guide these studies, it starts with EN ISO 12100, a type A standard. Apart from this, the main standards related to robot safety are;

EN ISO 10218-1: Robots and Robotic Devices – Safety Requirements of Industrial Robots - Part 1 Robots,

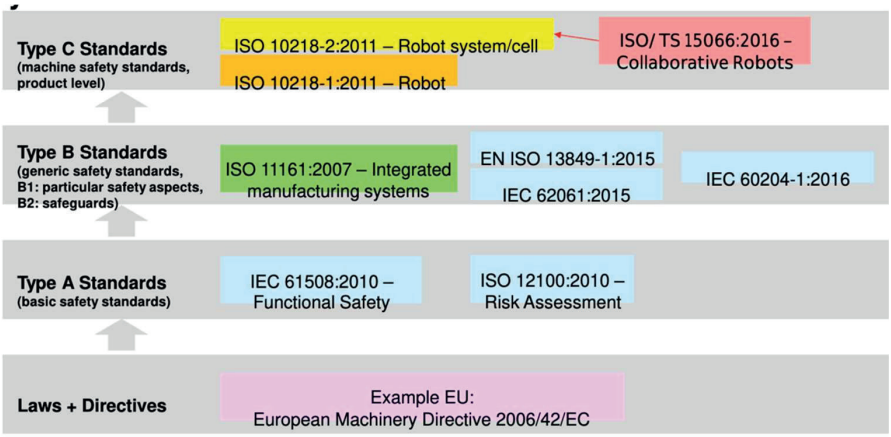
EN ISO 10218-2: Robots and Robotic Devices – Safety Requirements of Industrial Robots -Part 2: Robot Systems and Integration, type C standards.

Table 15: Types of Collaborative Operation – According to 10218, ISO/TS 15066 (Matthias, 2017)

ISO 10218- 1, clause	Type of collaborative operation	Main means of risk reduction	
5.10.2	Safety-rated monitored stop (Example: manual loading-station)	No robot motion when operator is in collaborative work space	
5.10.3	Hand guiding (Example: operation as assist device)	Robot motion only through direct input of operator	
5.10.4	Speed and separation monitoring (Example: replenishing parts containers)	Robot motion only when separation distance above minimum separation distance	
5.10.5	Power and force limiting by inherent design or control	In contact event robot can only impart limited static and dynamics forces	

The first of the above standards is the standards used in industrial robots operating on their own, and the second (EN ISO 10218-2) is the documents used for collaborative environments in which robots are integrated. Although EN ISO 10218-2 is generally used for collaborative robots, the details are referred to the documents with ISO/TS 15066 technical specifications.

Table 16: Safety and Human – Robot Collaboration: Relevant Standards + Directives (Matthias, 2017)



11.2. Safety Rules in Collaborative Robot Systems:

In EN ISO 10218-2 standard, as in every C type standard, associations are made with B class standards as well;

- **Type A standards** are basic safety standards that cover basic concepts, design principles and general issues that can be applied to all machines,
- Type B standards are general safety standards covering safety aspects or one type of protection that can be used in a wide range of machinery. However, standard B has two types, Type B1 standards for certain safety aspects and Type B2 standards for protections,
- **Type C standards** are machinery safety standards that address detailed safety requirements for a particular machine or group of machinery,

The requirements from the standards can be grouped under 3 main headings;

1. Requirements Regarding the Safety Components of the Robot System and the Control System:

In robot systems, and especially in collaborative robots, some of the dangers arising from the control system or incorrectly selected safety equipment are quite insidious, so in order to prevent or eliminate the hazards in these systems, the following requirements regarding the safety of the system must be determined at an optimal level.

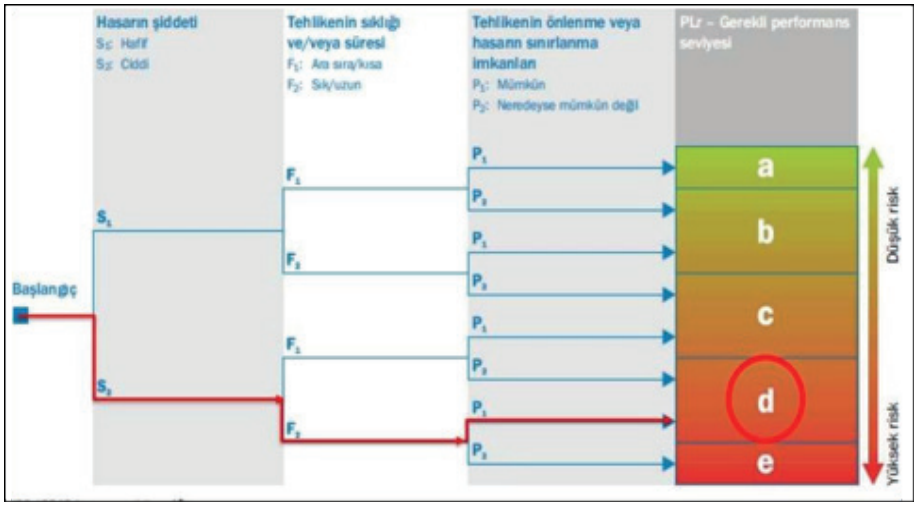


Figure 26: ISO 13849-1 standard required performance level (Matthias, 2017)

ISO 13849-1 Standard: Required Performance Level (PLr)

- As stated in the EN ISO 13849-1 Standard, the Performance Level (PL/Performance Level), where a represents the lowest and e the highest risk values, must be determined at optimal values for machines defined in this group. It is recommended in EN ISO 10218-2 that control systems in Collaborative Robots should meet the d value of the PL level. EN ISO 10218-2 recommends that the system meet the PL/d and Category 3 requirements. Some of the factors affecting the values of the performance level are the ability to diagnose faults, the probability of failure of the components in the system and their connections with each other. These factors may vary according to the process and its complexity, but the assessment should be made with the aim of the highest reliability relative to the hazard gamut of the process.
- According to the situation of the workplace, the right resolution light curtains should be selected and positioned as recommended in the EN ISO 13855 Standard. Positioning is done by ESPE measurement, which determines the robot's stopping time and how much it moves during this time.
- However, after these measurements, light curtains can be placed to ensure the safety of the collaborative environment. It is not possible to expect the safety and confidence expected by the system from the light curtains placed without ESPE measurement. In this case, it is very likely that the light curtains will be positioned in the wrong places, and the operators who do not know this and are sure of the positions of the light curtains will cause unpredictable work accidents and will face unexpected dangers.
- ESPE measurements should be made for collaborative field scanners supervised by three-dimensional safety camera systems, as well as for light curtains,
- Muting (temporary deactivation) and blanking (the auxiliary function of safety light curtains, which allow inserting an opaque material into parts of the collaborative area protected by the light curtain without causing the machine to stop), should be precisely set up in the design and after assembly of the light curtains. It should be ensured that the system in the collaborative environment where the operator is located has the ability to distinguish the human limb from the materials entering and leaving this area.
- Care should be taken to ensure that any sensor or camera to be selected for monitoring and monitoring the collaborative environment is suitable for what will be done in this area. For example, in cases such as sparks or flame creep in the work done in this area, the selection of optical monitoring and protection components should be done carefully.
- Mechanical reed switches should not be used on monitoring doors, as they cannot provide PL d on their own.
- Although control systems are selected according to the nature of what is done in the collaborative field, it is useful to examine the differences in business cultures in detail, even if they are doing the same job during this selection. In some businesses, monitoring doors are monitored by a second actuator or equal/full coded monitoring systems, while in a different business, even if the process is the same, monitoring is carried out with area scanners, three-dimensional safety cameras or safety mats.
- In the learning process of robots, commands must be made only with hand controls activated for that job, and during learning, robots should receive the command from a single control. Even for testing during training, the speed of the robot should never exceed 250 mm/s. In case of an emergency, besides the active hand control, even the emergency stop buttons should be ready

11.3. Safety Requirements Regarding Robot Hardware and Environment:

We can list the minimum safety requirements that the robot hardware should have as follows;

- The main body connections to which the robot arms are connected must have the strength values required by the process,
- As it is known, the commands given to the robot are carried out by electrical, vacuum, hydraulic or pneumatic means. During design, the use values of each of these should not be chosen too close to the limits. During the stop of the robot arm, the state of the operator getting under the loaded robot arm should be monitored.

- If the operator's entry into the collaborative work area during the process is part of the process, care must be taken to define this entry with different codes than violation entries.
- Selection of drive shafts and transfer units that enable the robot to move in various axes according to the process should be done according to ISO 14120 recommendations.
- Care must be taken to ensure that all electrical units and components selected in the system comply with the IEC 60204-1 recommendations in order to prevent undesirable negative situations that may arise while the robot is operating, such as grounding, stored energy, cables or panels,
- The closures that will be activated for any violation or technical reason while the robot is operating must comply with the EN ISO 14120 Standard.

11.4. Other Precautions to Be Taken Regarding the System in Which the Robot is Integrated:

Since there is not a single application related to the work of robots, the process should be examined in detail while performing risk assessment, and the assessment should be completed by taking into account the possible negativities that may come from the working environment. For this reason, we can state some additional recommendations of the standards related to Machinery Safety as follows;

- EN ISO 14118 standards state that there should be a tagging and locking procedure adopted by the operating staff on the robot and the system it is in. For this, the energy points and diagrams of the robot and the system it is in should be examined one by one, and the way the system should follow until it comes to a safe stopping point in terms of energy values should be specified in these procedures.
- One of the most common causes of occupational accidents when robots work alone or in collaborative environments is the short- term entry of the operator or one of the maintenance team into the collaborative area, although not defined in the process, and the safety door being closed behind the employee. The simplest solution to prevent this is to control the safety door with a padlock. However, this solution may not be practical in every application, it would be more appropriate to use area scanners, safety mats or three-dimensional security cameras, especially in work cells where the robot is required to work together with the operator or where the input and output are required to be more frequent due to the process.
- Despite all the technical precautions taken in the system, light warning signs recommended by EN ISO 7010, if necessary, must be hung in necessary places so that they can be easily seen by the employees,
- Even if all kinds of warning signs are hung in the working environment and all necessary technological precautions are taken, it is necessary for all personnel who may enter the cooperative environment to wear their protective equipment or vests that signal the robot,
- Even if new changes or improvements are not made in the environment where the robot or robots work, those who are likely to enter this environment should be trained periodically and be reminded of what to pay attention to in collaborative areas.

12. SYSTEM SECURITY AND RISK ASSESSMENT AND APPROACHES

12.1. Systemic Approach for the Definition of a Safer Human- Robot Interaction

Smart factories must accelerate their processes to face new manufacturing challenges and cope with new production trends by establishing an extremely high degree of flexibility to reduce production costs and time. This kind of issues can be addressed by the cooperation between humans and robots in a mixed human-robot working environment. Robots have the compelling advantage of spatial precision and repeatability, as well as the ability to apply defined forces. On the other hand, humans are especially skilled at complex manipulations and adapting to changing task requirements. In this complicate scenario of co-shared workplace and continuous human-robot interaction, safety strategies are a key requirement to avoid possible injuries to humans or fatal accidents. This chapter proposes a systemic approach to respond to these requirements. The approach merges and manages multiple sensing sources, redundant transmission protocols and software decision

mechanisms, aiming to guarantee a continuous and reconfigurable co-share scenario that enables an operative interaction between human workers and robots in a controlled and safe environment. Furthermore, new technological solutions and innovative methodologies are presented for the definition of a safer workplace in human-robot interaction scenarios.

- **Scientific and Industrial Motivations:**

The need to face the production of complex families of product, with short life cycles, often characterized by strongly variable production patterns, requires factories to be able to quickly evolve and reconfigure. These reconfigurable factories must exhibit strong modularity and adaptability to exogenous and endogenous events. In accordance with production dynamics, the design of workplaces within factories must take into account the current social and demographic trends (e.g., increase in average life expectancy and increase in retirement age). Paying attention to issues such as safety, education and ergonomics can also be an important element in increasing the productivity and profitability of the factory.

Traditionally, factory design has clearly distinguished between the roles and areas of expertise of human operators and automated and/or robotized production cells. Unfortunately, this operative model is nowadays obsolete since it cannot react and quickly adapt to the incoming opportunities arising from the global market. In this new scenario, it is crucial to provide innovative paradigms that ensure an efficient and safe work environment, as well as comfortable and stimulating for human workers. The new factories that make cooperation between humans and automated devices will be able to cope with difficult production scenarios characterized by products with short life cycles and high variability, thus requiring a fast adaptation of production capacity and the development of new knowledge.

The research presented in this chapter will specifically address the topic of designing and implementing human worker and robot cooperating systems. In particular, design methodologies, technologies and devices will be explored to guarantee a safe and fruitful human-robot interaction. To this aim, it is necessary to address themes related to the study of man-machine interactions, and hence the modelling of work areas and their perception by robots using advanced sensing systems, thus creating safe hybrid work environments. Indeed, the achievement of a strong interaction between a robot and a human worker, in a completely safe environment, relies on the development of a suitable framework including sensing technology, system architecture and proper cognitive models. A sensor network must provide a sufficient amount of information to the robot about the surroundings and these data must be reliably transmitted and interpreted by the machine to adopt the right behaviors. Moreover, the suitable sensing technology must be shared and it has to be portable, light and easy to wear so that the worker can comfortably operate in the workplace.

In a seamless assembly / disassembly scenario approach, which is carried out by evaluating different works during different working processes, especially in disassembly processes, in fact, many diverse tasks must be executed according to local workflow, adapting the control settings for general and local motion/interaction planning with a high grade of versatility.

In a complex structure created by combining the abilities of operators and robots, the safe behavior of robots requires a dynamic modification while operators enter and leave the process area due to their duties while performing various tasks assigned to them. This avoids the possibility of injury or unexpected erratic robot behavior.

This contextual analysis represents a significant working environment since it joins a high level of adaptability and variability of processes, parts, manufacturing conditions, specific mechanical parameters and, more critically, unique human-robot association modes and assignments in assisted/cooperative mechanized manufacture.

The proposed innovative approach will face also the development of algorithms and cognitive systems for the perception and representation of spacetime environment of the factory and for the implementation of automatic processes of decision and action.

- **Current Technology:**

The first layer to build a systemic approach for the definition of a safer human machine environment relies on the possibility to maximize and diversify the different sensor sources deployed both on the robot and on

the worker with the intent of providing continuous feedback related to the position of the worker and his tasks. However, the presence of various materials such as conductive, insulating or magnetic in a specific workplace and the consequent issue related to anomalous absorbance in the electromagnetic spectrum still represents a critical aspect in the creation of a reliable set of data for the robot. In the years, many different sensing solutions have been proposed to overcome these issues and most of them rely on the use of multiples cameras and microphones. Unfortunately, these technologies are limited by the line of sight of the associated camera or produce signals that are difficult to interpret for the robot. A further possible solution considers the specific operation distance between the worker and the robot (short and long- range). In case of long-range sensing technology, radio-frequency identification technology (RFID/Radio-Frequency Identification Technology) has recently received a great attention due to manufacturing costs, power consumption, sensors wearability, response time, etc. Indeed, the tags embedded in worker smart garments (gloves, suite, etc.) can provide a reliable information of a tracked movement, without hindering the worker operation. Robots can use the signals coming from the RFID sensing technology to properly interpret the movements of the human worker and to consequently adapt their behavior. However, also in RFID technology, different problems can arise from the signal detection at particular angle and from the specific distance between the tag and the reader involved in the localization process and the signal can be misinterpreted by the robot. To properly manage and transmit the data produced by all the sensing networks, a robust wireless infrastructure needs to be adopted. In this case, the identification/recognition system identifies the operator presence and position in the robot area, using the combination of safe wireless channels and of unsafe low power wireless communication protocols (like the Ultra-low power Bluetooth end Zigbee). This process works both acquiring presence of communication link between the access points in the robot area and the units directly in the operator body, and applying an algorithm featuring the geo-referenced position of the operator based on the signal reception power from the operator unit. A deep analysis on communication physical characteristics, power consumption, power management, easiness of reception power recognition systems, transceiver integration, availability and robustness in respect to industrial environment, must be taken into account to provide reliable data between the robot and the human workers.

Flexible/reconfigurable production, specifically when manual tasks can be assisted by robots, is remarkably supported by collaborative robotic methodologies that can guarantee a safe behavior in unstructured dynamic environments. Lightweight solutions specifically designed for physical Human-Robot Interaction (PHRI / Physical Human Robot Interactions) can be employed for these tasks. Since years, both academic and manufacturing settlements have given careful consideration to broadening the coordinated effort space amongst robots and workers in industrial robotics as well. Industrial robots, from small to large size manipulators (e.g., anthropomorphic, Cartesian, parallel, etc.) still do not extensively display native safety features, either by design or by control (Fig. 22). Nevertheless, such platforms are required to be integrated in safe setups at both machine and plant level.

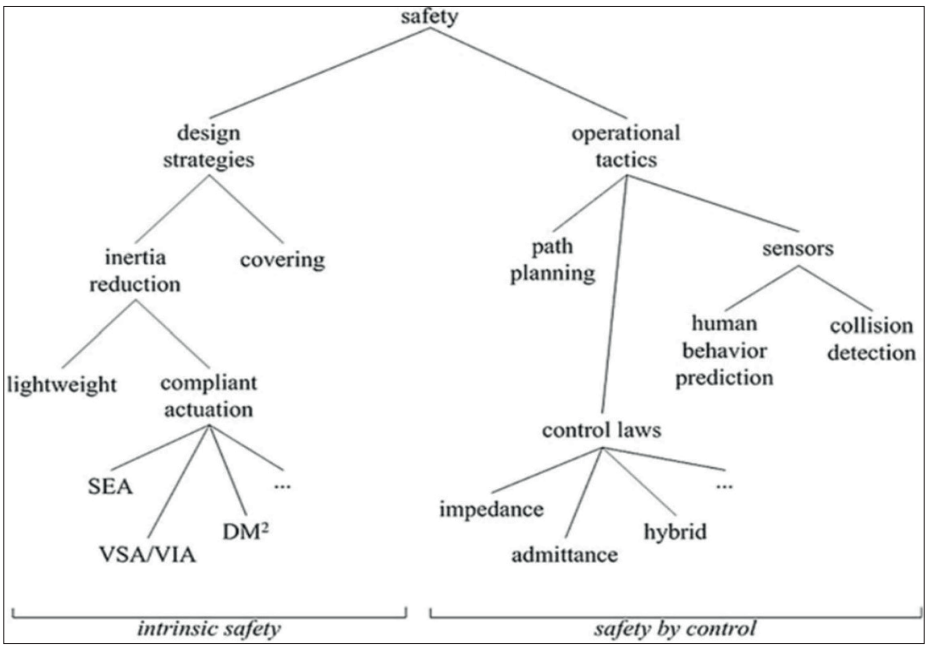


Figure 27: Map of hardware features or design strategies that are used for embedding safety in robot systems (Pecora et al., 2019a)

Normally most recent standards define human-robot cooperation modes and happen to apply on top of the consolidated standardization initiatives in machinery and robotics that encapsulate the concept of functional safety altogether. Safety is obviously an integrated concept, whose procedural logical and technological aspects are spread among hardware, algorithms and networks. Safety options of devices are in all probability among the foremost self-addressed by technology suppliers due to a consolidated regulation and restricted needs in terms of integration may hinder the safety certification grade.

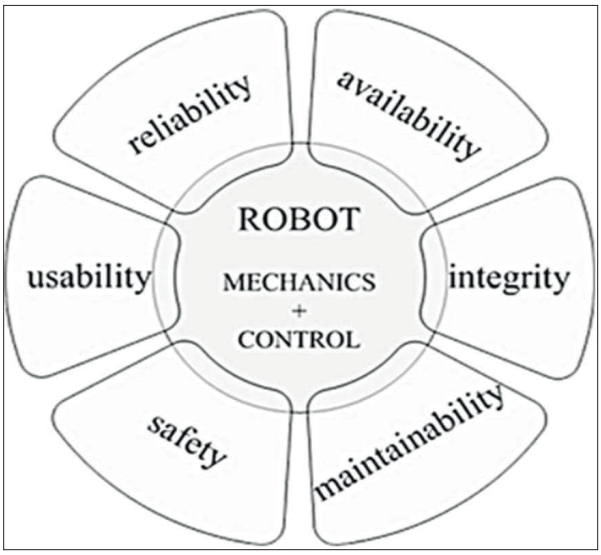


Figure 28: Dependability chart (Pecora et al., 2019a)

The notion of interaction in robotics can span different spatial conditions, from distant functional inter-action to close contact. Non-contact interaction is involved in the task cooperation and scenarios where the same workspace is concurrently visited. Contact interaction can occur either by planning or by accident.

Primarily involved in most of the low-power tasks, like manipulation, handling, assembly, etc. where compliant controls represent a prominent class of settings. The latter has been considered as the major issue to be discussed and formalized in relationship with the normative requirements of safety, the very wide family of collision avoidance algorithms, etc.

At all interaction levels the cooperating robots should be transparent, i.e., they should resemble a naturally interacting companion, removing all cumbersome configurations or access modes, uneven motions or patterns, etc. This behavior can be formulated through the concept of dependability that is considered as the property of displaying easiness, confidence and reliance to the user when performing interaction tasks. Under such conventionally abstract notion, dependability wraps a set of clearly defined child properties (Figure 23) that altogether have a great impact over the robot control and resulting behavior.

User confidence, as a matter of fact, stands on:

- usability, which can measure the feeling, comfort and easiness of learning and/or setting up the robot motion,
- reliability, which mainly addresses the continuity of service rarely throwing unexpected exceptions or rarely presenting failures,
- availability, which gives account of readiness of such service,
- maintainability and integrity, which are the ability to recover from system alteration and the absence of improper alterations, respectively,
- safety, which has been extendedly discussed before.
- Most of the reliability sub-features can be fulfilled as a whole system-level trade-off.

12.2. Risk Assessment Process for Collaborative Assembly and A Job Safety Analysis Approach

The safety of the defined area where the operators and robots cooperate during the task is extremely important in order to be able to perform the tasks assigned to them together. There are three important factors for this area to be safe and to show a high performance in terms of working efficiency.

- The ability to adapt to market fluctuations,
- Improve productivity,
- Improve ergonomic work environment and reducing the risk of work accidents.

In collaborative work environments, operator safety is a major concern, as a serious injury may result if the robot crashes into the operator due to an incorrect movement for any reason.

According to the International safety standard, risk assessment is the first step in understanding and eliminating hazardous work environment. For non- collaborative robotic cells, risk assessment was carried out with the understanding that robots and operators do not interact. That is, a robots can only be operated in the automatic mode within a designated workspace and intrusion should result in a monitored stop of the robot. Physical barriers such as safety fences were used to ensure operator safety by avoiding the possibility for collision.

One of the most important aims of the collaborative robotic assembly system seeks is to remove these barriers to enable closer interactions between operators and robots, Therefore, risk assessment should consider both operators and robots as valid participants to ensure safety of operators and productivity of the assembly station. With a focus on operator safety, international safety standards define the use of collaborative task only within a predefined work area called the collaborative workspace. To ensure safety and enable task sharing, safety standards require that the assembly cell is continuously monitored during execution of the task. Therefore, the motion of the robot and the operator within the assembly cell must be monitored using safety sensors. such as vision system, safety mats, proximity sensors, etc. Before safety devices are selected and installed, a systematic risk assessment will ensure that appropriate devices and procedures are implemented.

Since collisions are an important cause of injury and damage, during the risk assessment, the work done by the robot and the operator in the collaborative area is handled within the framework of a methodology, subtasks are determined, and the emerging risks and solutions for them are determined. (Figure 24)

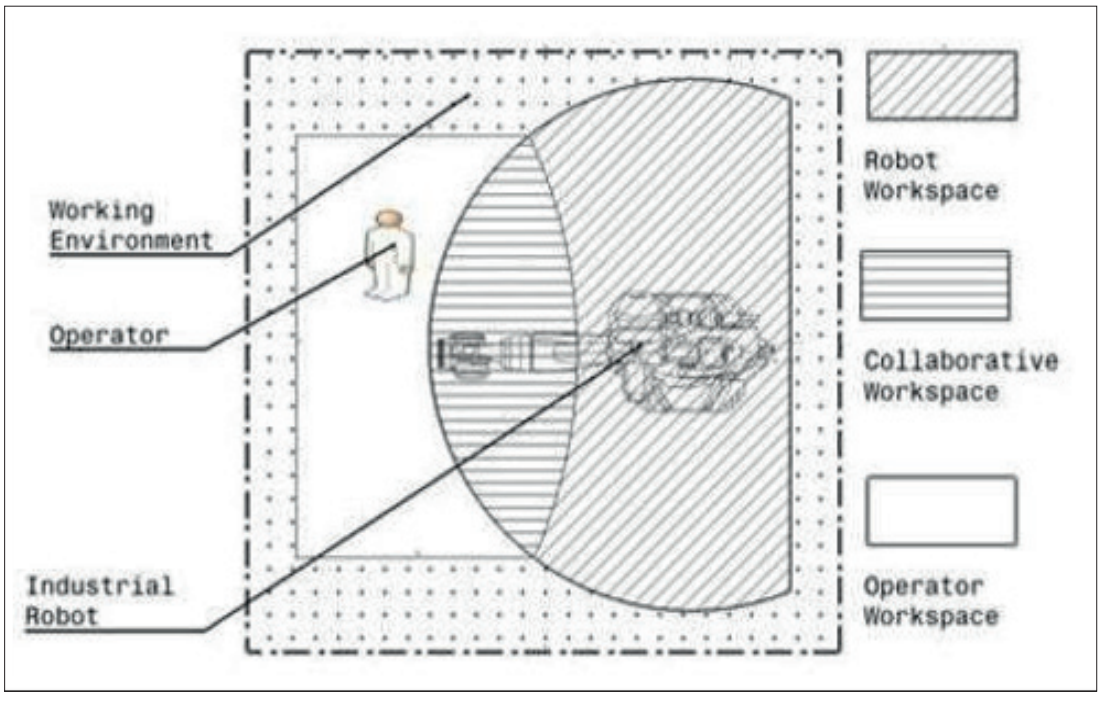


Figure 29: Illustration of the interaction between the three participants of a collaborative assembly cell within their corresponding workspaces. (Gopinath and Johansen, 2016)

Various methods are available for risk analysis in collaborative robot systems. Two of the most preferred among these analyzes are FTA (Fault Tree Analysis) and FMEA (Failure Mode and Effect Analysis). Some organizations indicate that Occupational Safety Analysis may be more appropriate to conduct risk assessment in application areas where operator duties must be considered. In order to be able to evaluate accidents that may result from errors caused by robots, quantitative Fault Tree Analysis needs information about possible causes for these errors. The qualitative Failure Mode and Effect analysis (FMEA) is used to understand and document all possible failures (and its effects) so that corrective actions can be suggested to mitigate the sources of failure. FMEA uses a tabular form to document each failure mode and its effect along with the probability of failure and possible solution.

Collaborative Assembly Cell:

In a designated area, a collaborative assembly cell will be characterized in terms of the tasks that will be performed, the participants that are responsible for the tasks and the workspace to complete the task. The main purpose of describing an assembly cell in terms of tasks and participants is to map the interactions between them.

- **Workspace in a Collaborative Cell: International standards define three working areas in this cell:**

» **Robot Workspace:** Within the robot workspace, an industrial robot can be programmed to move in automatic mode at rated speed and must stop if the there is an intrusion. Traditionally, the robot workspace is closed off from external interaction using physical fences or safeguards.

» **Operator Workspace:** The area assigned to the operator to do his task can be termed as operator workspace and can be monitored for safety with corresponding reduction of speed if the operator goes near the robot and complete stop if the operator is close to the robot to warrant a complete stop.

» **Collaborative Workspace:** This area is the area where the robot and the operator work together. The collaborative workspace allows the robot and the operator to work together, which means that the robot and operator share a common workspace. Although the robot can be moved in automatic mode within the co-working area, the robot's speed is limited. Since the robot/human combination is envisaged in this area, they need to know that in this joint work, both have common tasks defined in the work to be done.

In a collaborative assembly cell, there are three distinct participants;

- **Industrial Robotic System:** Industrial robotic system as recognized by the safety standards include the manipulator, end-effector and external sensor system that are designed to work cohesively. These separate parts must conform to the corresponding safety requirements and must be designed to work safely with operators during the collaborative mode.
- **Operator:** An operator is the trained personnel expected to share the robotic cell but can also include other personnel present in the vicinity. They are also expected to be take responsibility of an assembly cell and shut down the assembly system in case of emergency.
- **Working Environment:** The working environment should also meet the standards for robotic safety as external interferences can lead to injury or production delay. The working environment includes equipment located near to the assembly cell that can interfere with the intended functionality of the robotic cell.

Job Safety Analysis for Collaborative Assembly Cell (JSA):

Risk analysis can be used to drive the design of the robotic system that is safe for the operator and ensure a productive assembly cell. Therefore, it has to be understood as an iterative process which begins when the basic functionality of the assembly cell is established i.e., cell layout to carry out the assembly task is defined.

The proposed work process that emphasis the interactions between the participants (robot/s and operator/s) and their tasks can be described as follows;

1. The assembly function of the production cell can be reformulated into discrete and sequential subtasks. The subtasks are allocated to the participants who will perform them within an allocated workspace. That is, the first step is to divide the assembly task into subtasks and establish participants and workspaces for each subtask.

2. (JAS) Job Safety Analysis require that the subtasks are critically analyzed for hazards. In the second step, the objective is to analyze the subtasks allocated to each of the participant. To estimate all possible hazards, each subtask associated with a participant can be critically analyzed by focusing the analysis on the interaction of the participant with the other set of participants. For example, if T1 is a subtask to be performed by an operator, the analysis should capture the interaction of T1 has on the robot as well as the Working Environment.
3. In this step, the causal factor for each of the hazard can be documented along with the effect of the risk. Information on the causal risk along with the effects can be used to suggest solutions to mitigate the risks. Probable solutions can be in form of assembly cell monitoring solutions, safety by design, guidelines from safety standards etc., which can then be used to specify design requirements for the robotic syste

12.3. A Methodology to develop collaborative robotic cyber physical systems for production environments

As it is known, the main feature in Industry 4.0 is to meet the customer's real-time variable demand for products in very small lots. This will allow the robot to meet many demands of the customer in the production or assembly line where it will work, without wasting time for installation, adjustment and reconfiguration of the line. The intelligent manufacturing implementation may take place though the concept of internet of things (IoT), in which each participating component has a specific IP address. Due to the availability of big data in IoT, the manufacturing system characteristics can be predicted precisely like predictive maintenance, robustness in product design and adaptive logistics.

For a smart robotic factory to work in the context of Industry 4.0, high productivity and flexibility is the demand of the future.

To cope with this issue, robots may take most of the workshare in future manufacturing, yet the human worker has to stay in the work area either in supervision role or for the jobs for which the robots cannot be trained. The constant human presence in or near the work area of intelligent robot leads to a shift regarding safety. The conventional approach is to expose human workers up to a limited extent to the robot and with appropriate safety control that leads to full stoppage of a machine in case of worker violation of the robot workspace. This causes interruptions and resetting procedures to be activated which reduces productivity. The futuristic approach is to implement robotic applications where robot and human workers can coexist and collaborate safely. In this setting, the robots share the same workspace with human counterparts and perform activities like raw material handling, assembly and industrial goods transfer.

This situation is very attractive for today's manufacturers, due to its advantages such as cost, quality and reduction in work accidents, more than one million industrial robots working in various industrial branches are rapidly leaving their tasks to collaborative robots. B It seems very difficult for all these robots to turn into a collaborative system in the near future, as it will bring huge financial burdens.

The most popular approach to converting traditional industrial robots to collaborative robots today is to make the collaborative workspace smarter by placing sensors in the areas where robots and operators work together and monitoring the movements of collaborative operators. With this method, many industrial robots will be able to work with operators as collaborative robots. Thus, many manufacturers will find the opportunity to use their industrial robots in safer collaborative environments with more reasonable expenditures without making large investments.

To establish such a collaborative environment, a cyber physical system (CPS/Cyber Physical System) needs to be established which takes care of all the necessary requirements of communication, safety, security, sensors and electronics.

In this way, it will be possible to safely assemble, transport, package and similar processes in collaborative environments, even for parts weighing 15 kg, which may cause problems in terms of occupational safety. A virtual part, resembling the real scenario between the operator and the collaborative robot, is used to calculate the distance between the robot and the operator. Based on real-time distance calculation, by an external module, the robot controller is systematically tasked with reducing the speed.

State of the art in collaborative robot technology:

The state-of-the-art development in collaborative robotics has roots in the technologies arriving from the humanoid robotics, artificial intelligence and exoskeletons, which were developed over the last two decades. The basic objective of such robotic humanoids is to work in household and medical applications to attend the needs of disabled and old people. Industrial collaborative applications are based on the fact that robots work safely with humans in an industrial environment, instead of working on their own. So far, the collaborative robotics is developing fast in industry and it is estimated that the collaborative robotics sector will grow to US$1 billion by 2020. This growth is driven by small to medium manufacturing, electronic manufacturing and allied services provider companies. For industries looking for such agile manufacturing technologies, robot manufacturers develop collaborative robot designs which are suited for small- to medium-size product handling and other operations.

In Figure 29, there are skilled robots that can move at different angles.

In most of the cases, the tool end-effector repeatability shows the capabilities of modern collaborative robots to handle intricate tasks. All of these robots can work and collide gently with humans on the factory floor as the joints are developed with internal force sensors. The arms and heads are equipped with high-resolution cameras, even 3D cameras to ensure a secure traceability. In some cases, visual markers are used for fast recognition and tracking, on every tool which are needed to the robot to complete the job. All the robots have programmable compliance, such that they can be trained for the new job. The payloads of these robots are commonly between 0.5 and 14 kg. Immediate detection of collision and reduction of the speed of the robot arm in case of violation of the working area are the technology features commonly used in collaborative robots.

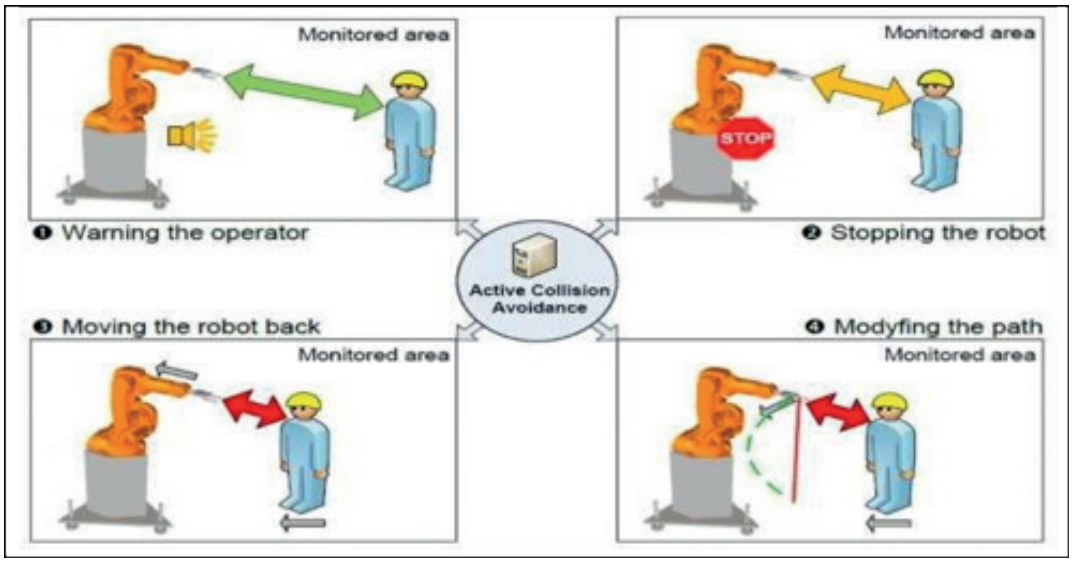


Figure 29: Active collision avoidance. (Gopinath and Johansen, 2016)

When we examine it in general, it can be easily seen that mostly collaborative robots are preferred instead of traditional industrial robots in the industry and service sector. In addition, we can see that collaborative robots are very popular in these latest developments in human-robot cooperation (HRC) in small to medium-sized payload handling processes, especially in applications where occupational health and safety is at the forefront. We can also characterize these applications as a preliminary preparation for the assembly or packaging of heavier parts in collaborative environments in the coming years. It is stated that some robot manufacturers will be able to put into use collaborative robots with a payload of 35 kg in early 2021 according to ISO 10218-1:2011 and performance level (PL) (d) safety rules (FANUC).

At this stage, manufacturers need to pay close attention to two issues, the first is to define cooperation plans and to establish a formal rating system; The second is to define a Cyber Physical System (CPS/Cyber Physical System) for human-robot collaboration in industrial scenarios and to develop a methodology that can reach the most appropriate solutions up to the sensor level in a defined industrial scenario. With the CPS method, it will

be possible to switch from traditional robots to collaborative robots and to take part in the process of heavier workpieces with collaborative robots.

Thus, more detailed considerations for an external environment equipped for collaborative robots can be derived from the predefined safe CPS according to the desired scenario requirement and level of cooperation. The approach to this is initiated by examining the implemented robot safety schemes and then developing effective collaboration schemes. When the collaboration schemes are listed, some key indicators are presented for the formal classification of industrial collaboration scenarios with a few selected sensor examples. A collaboration sample assumption should be prepared to define the sensor level requirements for a particular industrial scenario.

CPS in Human Robot Collaboration:

The proposed approach is to exhibit safe intermediate HRC without passive safety mechanisms such as fences. In order to realize this, extra safety and protection measures need to be implemented for a collaborative robotic CPS (CRCPS). These safety and security (protection) requirements are based on the level of interaction between humans and robots on the shop floor to increase productivity. Security is moreover closely related to safety as both these system level properties have to be considered concurrently. In fact, the approach in the design of CRCPS is to merge the safety and security concerns just like designing industrial facility, control and risk assessment that consider both aspects.

CPS is an intelligent system in which numerical and physical systems are integrated to control and detect the changing state of real variables.

The success of such CPS relies on the sensor network and communication technologies that are reliable, safe and secure. In CPS, all the functional components are in modules and interconnected (wirelessly) in the production line or in the smart factory. Even raw materials and machines are connected to the network cooperating with human workers through human–machine interaction (HMI) systems. In particular, the CPS for manufacturing and production may consist of electronics, computing, communications, sensing, actuation or robot, embedded systems and sensor networks. The CPS in manufacturing needs other resources like flexibility of the manufacturing system, the manufacturing scenario and the adaptability of changing assembly tasks, in addition to HMI technologies and other typical CPS modules. For the application in HRC, the deployment of a full-scale CPS accounts for the human worker as an inherent part of the system and requires calculations accordingly.

- HC/human component,
- PC/physical component,
- CC/computational component represents the three main integrated entities.

The quality of interaction between these three components depends on the security levels of the enabling technologies. HC is well connected with different adaptation technologies, for example Accurate human position tracking technology is the basic adapter in CRCPS.

CRCPS is a highly automated system as it eliminates the boundaries between composite elements and favors operational interactions.

There are various HMI (Human Machine Interface) technologies based on human senses of vision, acoustics and haptics. The proposed CRCPS can utilize vision system for detection, tracking and gesture recognition of human workers. The robots can also be commanded using acoustic signals from humans (e.g., voice control). Additionally, a variety of sensors and actuators can provide the interaction between HC (Human Component), CC (Cyber Component) and PC (Physical Component). There are standard interactions shown between the components which have to contribute with a role. Adaptor technologies are scenario dependent and can be seen as plug and play devices. There are other optional scenario-dependent interactions between the standard components and adaptors in CRCPS.

The CRCPS is an extension of the CPS and for that reason must show compliance to the system level properties of a CPS. For this, CRCPS must exhibit properties like integrality, sociability, locality and irreversibility.

Moreover, it must be adaptive, autonomous and highly automated. Integrality for CRCPS means that its functional components are well integrated to perform self-organizing tasks like learning and adaptation. As an example, if the two CRCPS are functioning in a close physical distance, then the worker belonging to a CRCPS must be able to interact safely with the robot that belongs to the other CRCPS. Locality introduces the computational, human and physical capabilities of a CPS, as bounded by spatial properties of the environment. Irreversibility of the CPS makes it self-referential in timescale and state-space. The adaptive characteristic makes the system self-organized and evolving. The autonomy refers to the roles of functional components and the CPS itself as capable to make independent decisions.

Collaboration Classification:

For CRCPS industrial environment, a smooth overlapping of workspace zones of robots and humans is considered in which both can interact. The formal grading of the human– robot collaboration involves the level of interaction between the two entities. The level of interaction can be formalized based on the distance between the two entities; workspace share level and the complexity of collaborative tasks which both are performing mutually.

There are also fatalities reported where usage of robots is intensive despite putting all the safety and protection protocols. For example, in Germany between 2005 and 2012 3 and 15 workers per year lost their lives because of it, however none of these accidents occurred in collaborative environment. There is also an issue of mental strain on humans in addition to the physical interaction of robot and human. In the researches, even the restriction of the entrance to the work area and the speed of the robot was sufficient to relieve the mental pressures on the operator. In addition, knowing the details of robot movements in advance reduced the pressure on the operator. In order to reduce the HRC risk level, the level of cooperation must be well and the payloads must be classified in a realistic way.

Safety schemes based on position prediction and building intelligent environment around robots are summarized. The intelligent environment means to equip the robot environment with appropriate monitoring sensors to make it aware of situation, human, safety zone and distance. However, the four basic principles of safety protection for collaborative work with robots need to be explored in detail.

A common approach using small size robots is to provide guidance manually or reduce the robot speed as per requirement. This manual approach is open loop, without sensing, has high HRC level, is restricted to small size robots and depends on the defined risk assessment. The basic safety approach can be termed as ‘complete isolation’. In this approach, a specified work zone is covered with sensors like laser scanner or proximity sensor. In this case, the robots must stop at the human access to the work area. These systems are sensor dependent, closed loop and have almost no HRC level attainment.

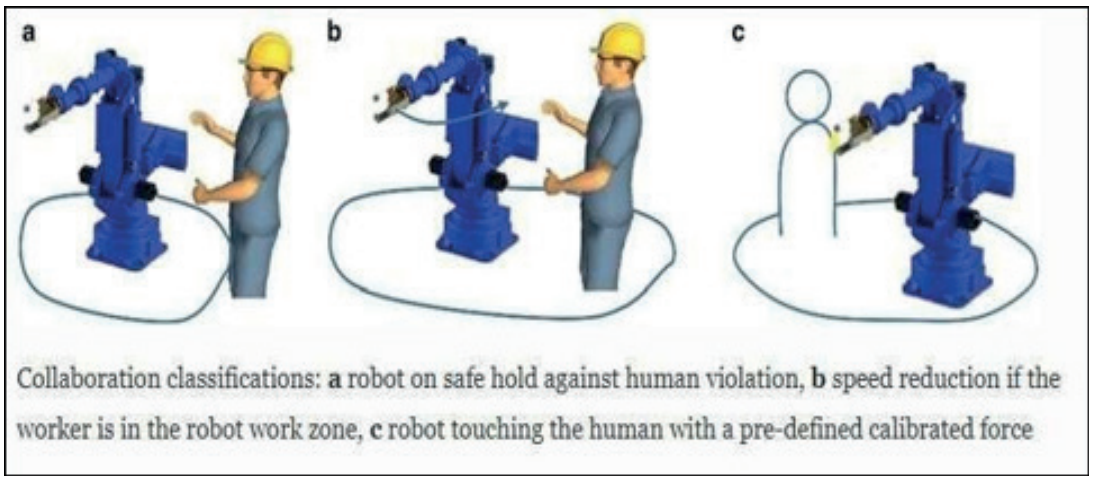


Figure 30: Collaboration Classification (Khalid at al., 2016b)

The third approach is to monitor the system visually or with speed- monitoring sensors. In this case, when the worker enters the danger zone, the speed is slowed down and the robot is stopped if necessary. For this safety concept HRC, this technique uses a multi-integrated and fusion-capable sensor to realize fast and secure simultaneous monitoring. With this technique, it is possible to achieve a high level of HRC, but it creates difficulties in risk assessment in the event of a possible failure of the monitoring function. In line with the principles of dynamic monitoring, algorithms used to detect possible erroneous movements of operators working in a collaborative environment should be integrated with speed and separation modules.

In the collaborative area, the area where the operator can be found has been determined, his movements are constantly controlled, the robot is forced to stay in this area actively as it has been taught, and the robot is ensured that the determined force values are not produced by force sensors. This system will also work with the help of a vision field which will guide the robot in case of a human presence. The robot speed and acceleration reduction will take place according to the level of force allowed to hit a specific part of the worker's body. Because of this, monitoring systems require the integration of force sensors in addition to sensor technology. Thus, the highest HRC gain is achieved, but some difficulties may arise in the risk assessment in case of failure of any monitoring function. There are four equally weighted key performance indicators (KPIs) selected to contribute in the overall HRC grading scheme. These indices are PL, safety distance (SD), risk (R) and the reaction time (RT). PL is taken as the 'mean time to dangerous failure' (MTTFd) and defined in the EN ISO 13849- 1 based on the average number of cycles per year until 10% of the components have a dangerous failure.

Equation 1:

$$\mathrm{MTTF_d} = \frac{1}{10}E(x) \quad \text{for } x = \min\{P(\text{failure of part} \cdot \text{cycle/year}) = 1\} \tag{1}$$

E is the mean time until 10% of the components have a dangerous failure or the component operating time is restricted to E. The units of this indicator are expressed in years, e.g., the MTTFd range for electromechanical components is 100–200 years. This means that the component needs replacement after 10% of the MTTFd value. A period of 20 years as a component replacement time is set as a goal according to the standard and can be taken as the maximum value for this indicator.

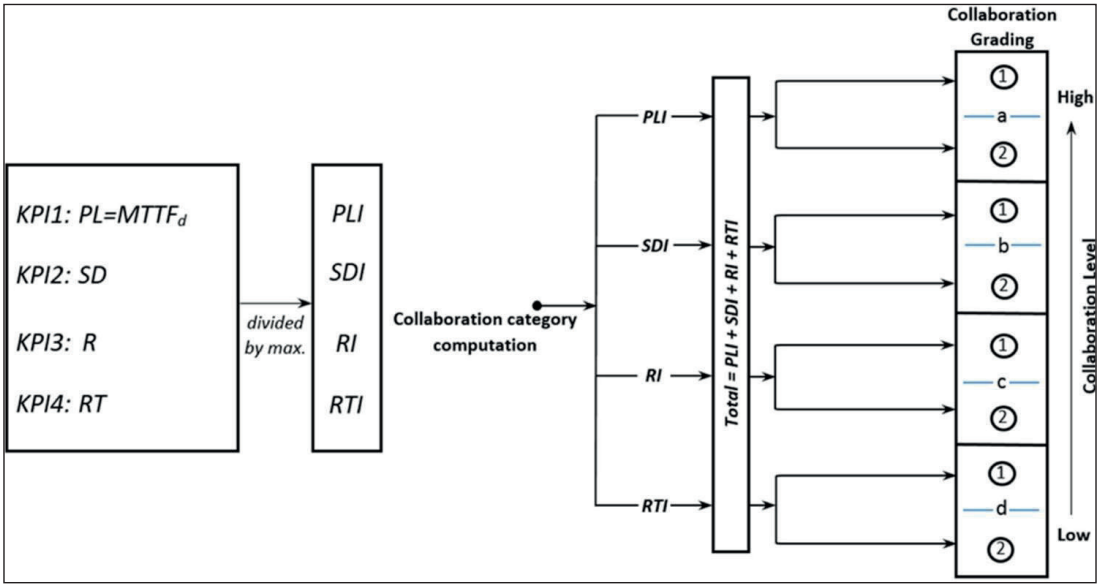


Figure 31: HRC grading scheme (Khalid at al.,2016a)

**There is 4 KPIs on the left and grading calculation is on the right side*

The second indicator is the SD calculated between human (Operator) and a working robot. The SD formula for a human working with an industrial robot is given in EN ISO 13855.

Equation 2: $$\mathbf{SD} = (K \cdot T) + C \quad (2)$$

SD computes the minimum SD from the risk zone. K is the speed of the man approaching to collision with the robot (mm/s). T is the robot's follow- up time in (s) to stop completely, once the brakes are applied. C is the additional distance (mm) for safety compliance that depends on the sensor's capability or resolution. In case of multiple sensors used in a system, the sensor with lowest resolution can decide the resolution of the overall system if any sensor fusion technique is not used. Calculations with various sensors show that SD = 0.5 m is not possible even with very fast sensors. Yet, no human robot collaboration can be implemented if SD is larger than approximately 2 m. The 3rd indicator is calculated based on the manufacturer specifications according to the number of unsafe components used and is termed as risk (R).

Equation 3: $$R = \frac{U}{U+S} \quad (3)$$

The ratio of the number of unsafe components (U/ Unsafe components) divided by the total number of components is referred as risk (Equation 3), where S (Safe components) is the number of safe components used in the system. According to the PL range specified above, i.e., electromechanical component below 100 years $MTTF_d$, is considered unsafe. Additionally, each sensor product itself may be specified based on the number count of safe and unsafe components used.

In a CRCPS perspective, all the used sensor components and equipment can be marked safe or unsafe. The minimum risk can be specified when all the components used are safe. The maximum risk can be checked according to a benchmark or left on the designer's disposal or risk assessment based on the ISO 12100:2010.

The fourth index that measures the effectiveness in collaboration is through the data delay rate (Di) of the sensors (see Equation 4).

The diversity of sensors used in a designed CRCPS may have an asynchronous data transmission rate. Data delay rates (ms/ delay rates) are important as the delay time from every sensor counts on the overall system's RT to respond in a case where any sensor fusion technique is not used. Thus, the overall delay time of the system is the key indicator, enabling the robot to initiate the safety protocol in time to avoid any hazard. Larger delay time can affect the robot's RT adversely and hence reduce the effective HRC attainment.

The other variable is the number of sensors (N) installed in a CPS system. In the case, the system consists of a number of heterogeneous sensors, this variable represents the number count of slowest sensors. Here, k is a constant. It is zero for a completely isolated systems and one for all other monitored systems.

Equation 4: $$\mathbf{RT} = k(D_i \cdot N) \quad (4)$$

After looking at different collaboration techniques and the performance indicators, we now formalize the collaboration grading scheme. Figure 3 shows the grading pattern of HRC from low to high. On the right side in Fig. 3, the HRC grades are specified, where a1 shows the highest level of HRC attainment and d2 the lowest.

All of the above-mentioned indicators are converted to the corresponding indices on the scale of 0–1 (divide by the best KPI value).

Equation 5: $$I_j = \frac{\mathrm{KPI}_j}{(\mathrm{KPI}_j)_b} \quad (5)$$

In case of SDI and RTI, inverse scale is used as the best values are the smallest, 0.5 m for SD calculation is very difficult to achieve. On the right side in Fig. 3, the collaboration grading is specified based on the sum of all the four indices with equal weights, resulting in a maximum score of 4. Here, 'a', 'b', 'c' and 'd' correspond to a scale of 3–4, 2–3, 1–2 and 0–1, respectively. This way, the collaboration attainment is divided into four large categories, where each category is comprised of two subcategories.

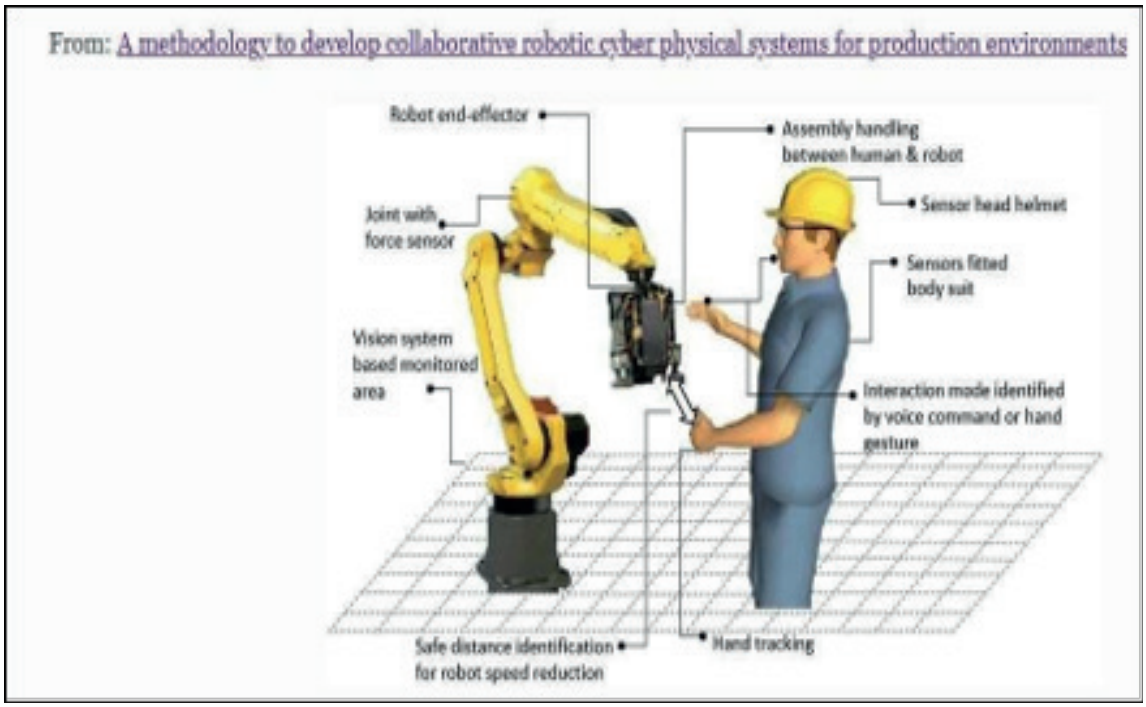


Figure 32: HRC in CRCPS design (Khalid at al., 2016b)

As seen in Figure 28, sensors positioned on both the robot and the operator monitor the safe distance limits for how close the operator should get.

Speed or deceleration phases can be initiated abruptly upon identification of a hazardous situation in the collaborative environment, causing the robot to come to a complete stop until the worker leaves the safe distance limit in the work area. After the danger has passed, the robot will resume its work from where it left off. Apart from that, an interaction mode can also be added to the system where hands or employee voice can be used to train the robot. For this, it will be necessary to train the robot in an interactive environment using different hand movements. For the force monitoring system, the force reduction approach is applied abruptly when the SD limit is reached. Force sensors can give additional responses if the robot touches the operator. However, in order to design such systems, it is necessary to calibrate the force values that they can be exposed to for different body organs. The joints of the new collaborative robots are equipped with force sensors, torque sensors and load cells used to convert a force into an electrical signal. Conventional robots without force sensors at their joints cannot be used in a force reduction and tracking approach. Collaborative robots are capable of detecting this collision and slowing/stopping the operation after colliding with the operator. Force calibration of these robots to impact forces below any threshold of human pain level is required. Related to this, there are biomechanical test results regarding these contact forces that can aid evaluations and design.

In such a CRCPS, multiple sensors integration and computational intelligence schemes like human tracking, human avoidance and intelligent use of multiple sensory data can be implemented. Due to the resource exhaustive nature, the real time and software issues arise in the embedded systems distributed intelligence. The integration between the cyber and physical layer requires communication and synchronization of the embedded system software that introduces complexity, limiting performance of real-time system and the emerging problems due to the compromised cyber-security during the

product life cycle. To cater for such issues, there are overhead controlling and self-verification approaches. Such approaches can be useful in dealing with unusual system behavior within CPS modules and to find out the actual cause of the malfunction. These systems integration approaches in CPS research include intelligent sensor fusion techniques, intelligent modular synchronization and different layers of protection checks and verification schemes depending upon the allowed overhead.

12.4. A Cyber Physical System (CPS) Approach for Safe Human-Robot Collaboration in a Shared Workplace

There are many studies and classifications to ensure pre-effect safety in human-robot interaction. One of the most important of these is a study by A. Sanderud, T. Thomessen, H. Osumi, M. Niitsuma, A. Sanderud (A proactive strategy for safe human-robot collaboration based on a Simplified risk analysis) on a real time security system for human-robot interaction based on the hazard index. In this study, the base factor for calculating is the distance between the robot and the human. In a similar approach, an operator-based risk minimization strategy approach accompanied by robot trajectory control was made by C. Morato, K.N. Kaipa, B. Zhao (S.K. Gupta Toward safe human robot collaboration by using multiple kinects based real-time human tracking). In this study, sphere-based geometric modals representing human and robot were used. However, in this approach the response time of the system was in the order of seconds. On the other hand,

A.M. Zanchettin, N.M. Ceriani, P. Rocco, H. Ding, B. Matthia (Safety in human-robot collaborative manufacturing environments: metrics and control), in their work, they studied multiple Kinect approaches for real-time human tracking in a human-robot collaboration scenario.

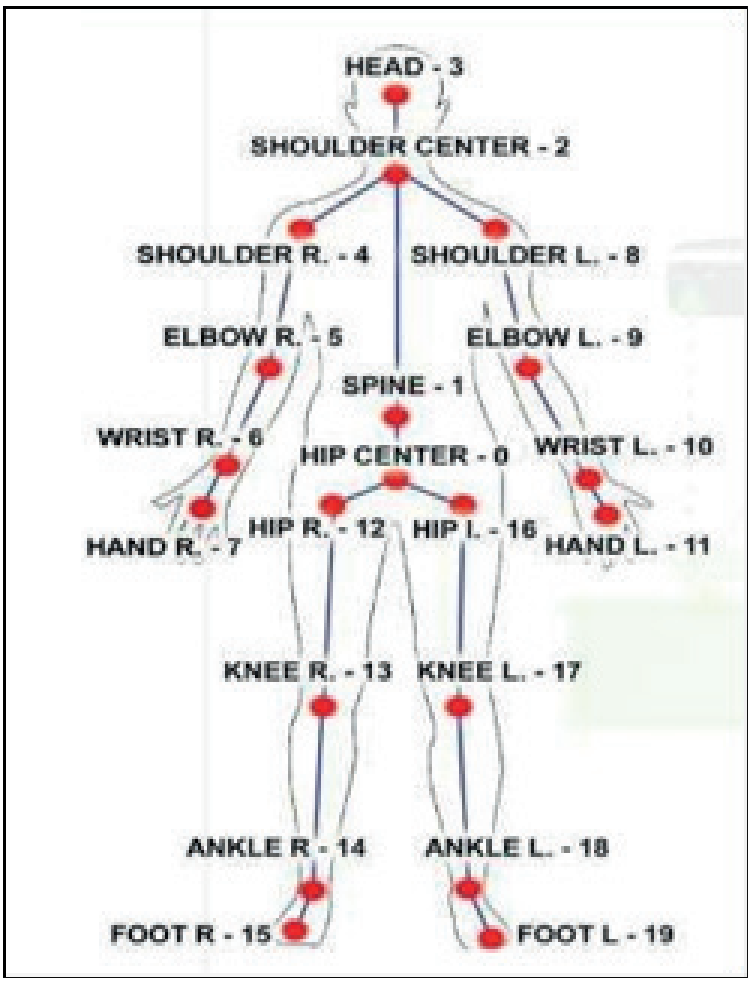


Figure 33: Joint points tracked by the Kinect co-tracking algorithm (Nikolakis at al., 2018)

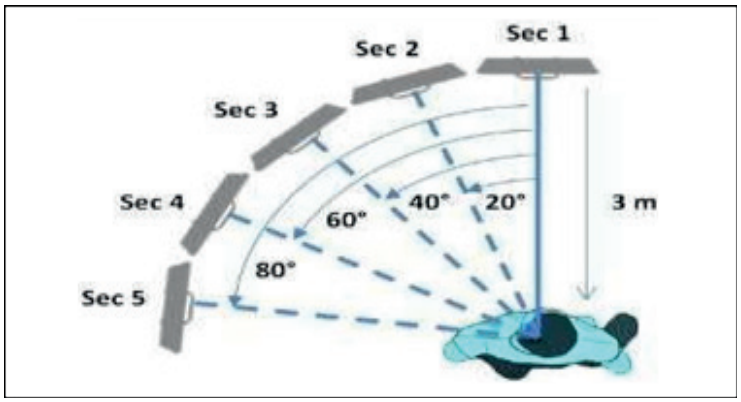


Figure 34: Position of the sensor for each recorded motion (Nikolakis at al., 2018)

This study highlights the importance of the separation area and the evaluation of implementing a proactive or pre-collision avoidance strategy, which includes stopping the robot completely when necessary.

An approach to a control strategy for robot speed based on the distance metric between robot and human was made by K. Jackson, K. Efthymiou, J. Borton (Digital manufacturing and flexible assembly technologies for reconfigurable aerospace production systems) in their study. In this study, it is argued that although distance is one of the important metrics for proactive or pre-collision avoidance in a human-robot collaboration scenario, the response time of the presented applications does not seem to meet real-time constraints.

However, given the increasing complexity of production spaces and the need for interconnected systems, applications approaching real-world conditions and low response times are needed.

To ensure human safety at runtime, the robot's behavior must become adaptive based on human actions, which introduces a new complexity to the operation. To solve this complexity, a new integrated framework for data, sensor and communication services is required to simulate, monitor and control runtime operations. This integrated framework enables their assets to interact and collaborate by constantly evaluating the operation and adjusting it to real-world conditions. This results in the creation of an intelligent system that combines the analytical and physical aspects. This intelligent system that performs the interactions between interconnected computer systems and the world is called CPS (Cyber Physical System). Robotic CPS, which enables human-robot cooperation and coexistence, must be adaptable, autonomous and highly automated. Physical systems detect the changing state of real-world variables through various electronics, computers, communications, sensing, actuation, embedded systems, and sensor networks. As a result of the risk assessment covering the design of the robotic CPS and the safety aspects for human operators, the CPS consists of three parts.

- HC/ Human Component,
- PC/Physical Component
- CC/ Computational Component.

The main control parameter of robotic CPS is human safety distance, an important issue for realizing a high level of human-robot cooperation is the technical limitations of real-time constraints of a high-level human-robot cooperation at sensor data rates. During operations, operators experience high mental strain or, in other words, feel less secure when their distance from the robot decreases or the robot moves towards them at a high speed.

Workspaces overlap in collaborative workspaces where humans and robots work together. The level of interaction and collaboration can be tailored to the distance between human and robot entities, the complexity of the collaboration, and the level of sharing of the workspace. In the structure to be configured, all operating resources belong to the physical part of the CPS, because they can all interact with each other or independently, exchange data, and their behavior can be customized by a control algorithm in the cyber part. Depending on the actual conditions being followed, the structure aims to provide seamless human-robot collaboration by combining the requirements and constraints of such collaboration with the production capabilities of all business resources in a workspace. Human safety can be achieved by creating a closed-loop control system that acts depending on the proximity of the human to the robot. The appropriate collision avoidance strategy is

determined using a collision risk detection module. Vision and distributed monitoring systems provide low processing and evaluation times, allowing real-time safety assessment and collision avoidance strategies to occur.

Operators working in robotic environments need the following combinations to be safe from accidents when collaborating or interacting with robots.

- Information on real-world conditions of the study area,
- Data collection mechanisms from operating organizations,
- Communication services for timely data exchange,
- Software components capable of checking and reconfiguring the status of CPS assets.

CPS related assets are operators and robot arms. The components at each level of the approach regarding the automation levels in the approach are shown in Figure 31.

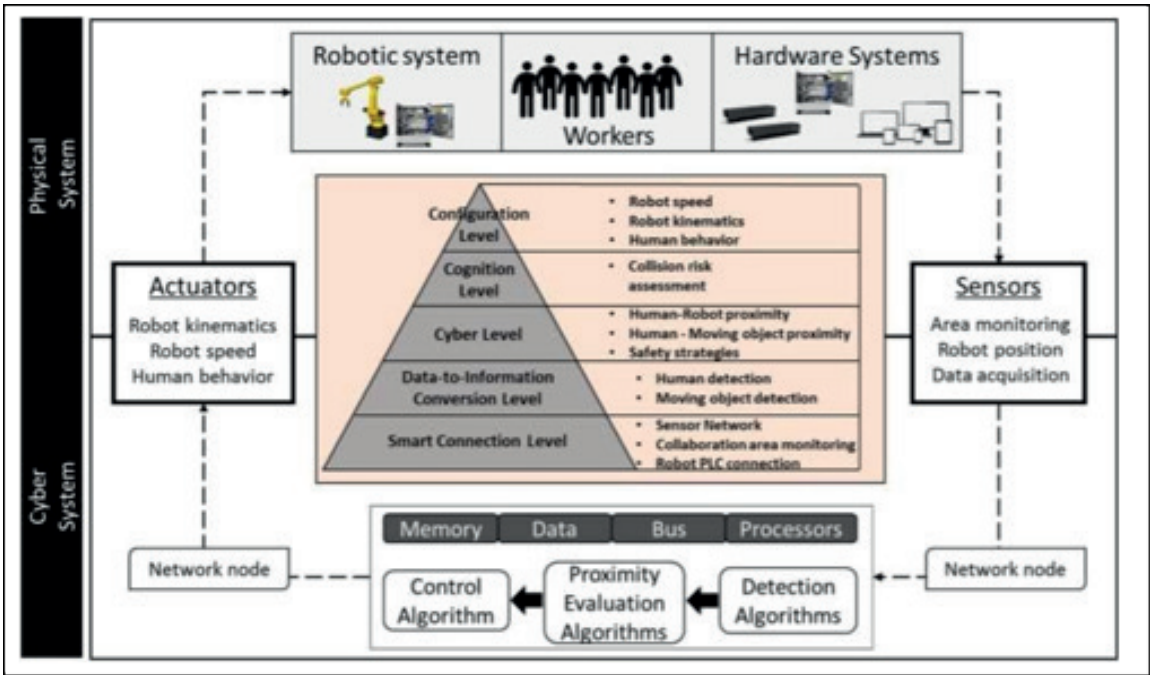


Figure 35: Hierarchical diagram during implantation of the CPS approach (Nikolakis at al., 2018)

- The lowest level includes hardware components (sensor systems to monitor the operating field, human mobile devices to support a communication interface to the cyber part, physical robot(s) and its controller) to retrieve and reconFigure real operating conditions.
- Communication services for data exchange, transforming the field data into the information required by the cyber part, to evaluate the proximity to the human and thus the risk of hitting the robot and secondly any moving object.
- The third and middle level contains all necessary algorithms for data processing, evaluation and control of physical assets. At this point, it should be taken into account that any reaction to the physical part, this level of evaluation and data processing should be done in a short time.
- At the level of cognition, the human(s) risk of collision is evaluated as the distance between the human(s) proximity to a moving object.
- In the upper layer, the configuration level includes reaction strategies and algorithms that control or influence the movements of the physical part, such as triggering an emergency stop to the robot or sending a warning signal to the human operator's mobile device.

Mechanisms in the five layers of the referenced pyramid aim to bridge with a connected CPS, operators, robotic manipulators, Information and Communication Technology (ICT) and Artificial Intelligence (AI/Artificial Intelligence) components and sensor systems and embedded components. They transfer data streams

(sensor data, time information, robot controller data) to the cyber part. Then, a control strategy implemented in the cyber department collects and correlates data according to time information, references and their source. Next, the processing of the data takes place to evaluate the actual operating conditions. There may be robotic security measures sent to nearby fixed or remote devices such as controllers, hard- wired safety stop, robotic PLC commands, monitors or mobile devices that can affect the behavior of physical systems, this is illustrated in the graph in Figure 34.

To achieve the objectives of the proposed CPS, data reflecting human and robot behavior should be used in conjunction with the behavior/actions of both parties controlled by the CPS.

There are several paradigms that illustrate the evolution of the manufacturing industry over the past two decades. Production systems are experiencing the transition from mass production to customer-oriented production and customization. Today's manufacturing companies are working to improve their performance in a globalized, interconnected and volatile market. As a result, many assembly lines/stations are focused on integrating human intelligence into automation solutions to reduce human intervention and participation in decision-making, aiming to increase efficiency. The operator working with the robot is treated as a potential system uncertainty, thereby restricting its role and being considered a vulnerability. On the other hand, robots are associated with functional limitations in their work, such as constraint to unstructured variable environments and/or expensive adaptation to unstructured variable environment, complex programming, poor availability, changeable and reduced production. Combining human skills with modern automation solutions, integrating real-time context awareness and security mechanisms can lead to the creation of an agile manufacturing paradigm that can meet the requirements of the markets. Working in a shared environment with workers, robots enable a new concept of hybrid (hybrid) manufacturing in which maintaining human safety is of paramount importance, because robots can cause serious and fatal injuries to the people they work with. In such cases, the speed of the robot is kept low to avoid harmful collisions. However, higher operating speed can be allowed for most of the robot production time if the risk of collision is minimized.The last of safety-related practices, particularly human-robot collaboration, is defined by various industrial safety standards that protect workers from accidents and management from legal sanctions. Safety and security requirements for human-robot collaboration relative to the cyber- physical system are based on the level of interaction between humans and robots in the workplace to increase productivity. Collaboration between humans and robots is stated to increase the efficiency of individual complex assembly processes in terms of reducing contact time compared to manual solution. The passive motion routing technique is combined with a limited power assist to maintain human safety; it appears that lower cycle times are seen in collaborative work cells compared to manual cell. Meanwhile, force and torque measurements are also provided, along with visual tracking of the operator. Safety policies (robot safety stop or away from human hand) are determined based on the intermediate distance between the human hand and the tool on the robot by applying a safety algorithm based on threshold values, the calculation of quantitative models for joint physical interaction and the anticipation of the next action enabled by the use of Markov Decision Process strategy, predictable quantitative evaluations are made.

In general, approaches to secure human-robot collaboration can be divided into two categories: pre- and post-impact. Pre-impact methods are based on robot and human separation and allow preventive actions when the separation is below a predetermined safety threshold. On the other hand, post- response approaches focus on detecting and responding to collisions, especially by detecting human contact, reducing contact forces for people below the dangerous level. The second category entails a collision, including an inherent risk to the human operator, while the first minimizes this risk, if accurate enough, by pre-implementing safety reactions. However, this may result in lower efficiency. It seems essential that a detailed risk assessment, including risk analysis and mitigation measures, of approaches to protecting human safety, especially in collaborative environments where complex work is carried out, must be carried out. (Y Chinniah Robot safety: overview of Risk assessment and reduction). A common feature of risk assessment strategies in this regard is to either keep the speed of the robot at low or zero levels when the human is close, or to move the robot away from the human and thus maintain the distance between them.

The Programmable Logic Controller (PLC) controlling the robot blows information reflecting the robot's current position, speed and joint coordinates. This data allows its behavior to be monitored and controlled through appropriate commands sent to the controller. Speed adaptation and reconfiguration of robot movements are critical functions related to human safety. In a similar approach, operators can interact with CPS via mobile

devices supported by communication services and appropriate software interfaces. During the working time, workers can receive support to perform assigned tasks through an intelligent system via mobile devices, in the form of instructions, guidance, task assignments and collision risk notifications, alerting them to be more careful and/or adjust their activities. In the context of supporting additional mobile assets, there is a monitoring system working and interacting with workers and robots in the shared workspace. In the proposed approach, Kinect v2 optical sensors are used to support depth data acquisition. Depth data provides 3D/3D information about the work area and the activities

taking place in it, thus enabling human/object detection and tracking. 3D data streams contain a large amount of digital information that requires complex and time-consuming processing, but can enable any assessment considered important in human safety scenarios based on human physical body volume. The combination of PLC, depth sensors and mobile device hardware provides necessary information in the form of digital information about shared workspace conditions. Through established network connections and communication channels, data containing information about actual operating conditions are transferred from the physical part of the CPS to the cyber part for analysis and sub-processes. In the cyber part of the CPS, depth data from multiple frames is processed by depth sensors to identify people and moving objects. Motion is detected by comparing sequential task setups. This comparison is performed by subtracting common information. The data produced by a depth sensor is in the form of a point cloud, that is, they are called Cartesian coordinate points in three-dimensional space. Timely human detection and monitoring should be ensured for human safety during cooperation. It should be noted that the Kinect v2 sensor supports two data streams; depth data and skeletal structure data.

Human-specific depth information can be revealed by correlating the two data streams, thereby increasing the accuracy of human detection due to occlusions. It should be noted that the point cloud has a coordinate reference system according to that of the local sensor, by taking the Kinect location in space as a reference, with the creation of the depth map, and generating a human point cloud containing a large number of points in three-dimensional space. To enable real-time and human proximity assessment, the dataset of 3D points of the human is reduced in size by rendering the convex body. As a result, points on the operator's cloud envelope are retained for further evaluation. (Fig. 32)

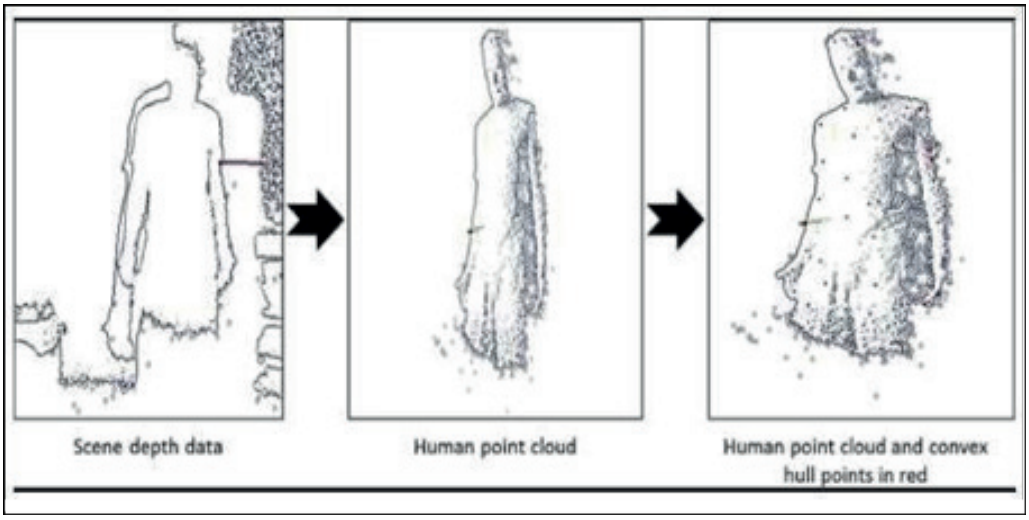


Figure 36: The force felt on the skin surface during contact (Nikolakis et al., 2018)

The interoperability of multiple sensors makes it easy to minimize blind spots in the monitored area. For the experimental setup, a synchronized TCP/IP sockets are available on a robotic controller and an Android device enabled by a wireless network. To minimize data transfer delays, the network is set up over a limited area and for a small number of nodes. Sockets in the robotic controller are used depending on safety strategies for controlling the robot tip effector coordinates and transmitting speed-related commands such as slow/stop. Also, through the socket on the android device, workers in the work area are audible alerted that any moving object is moving towards the restricted area. One of the main functions of the current application is that it is scalable.

In the case of using a sensor, all calculations of the cyber part are performed locally on a single computer. However, when using multiple sensor systems, the depth data processing steps, transformation of coordinates, and distance calculation are distributed among the various nodes. The results are then transmitted to a central node responsible for controlling the CPS physical assets (human and robot). It then applies the selected safety principles based on the average values of the calculated distances. Computer systems connected to sensors must meet some minimum requirements for 3D graphics rendering. Thus, this approach enables the system to respond quickly with short computation times

The distance calculation component is wrapped with all the functionality mentioned earlier and distributed as a standalone windows application. Communication is provided via TCP/IP sockets, thus enabling decision-making based on almost real-time selection of control strategies suitable for real operating conditions. In addition, the application supports limited interaction with the Unity framework, which can be used for robot simulations and interaction with point clouds and convex bodies of sensor systems. Unity reads the sensor information of one or more robots and creates a model of the robot with real operating conditions, in which it is a player, the artificial intelligence behavior is provided by Unity, this behavior is translated into commands that are then sent back to the physical robot that will display this behavior.

Figure 36 shows the screenshot of the application working with Unity visualization. In this way, the human point cloud appears in red and the convex body in green. The visualization interface is for inspection purposes only, so a limited subset of the human point cloud and convex body is used to visualize the human presence near the robot. Unity graphics are of high quality, making it difficult to update the scene at runtime. Choosing a lighter tool for clearer visualization or adopting a 2D interface will be the main target of future research.



Figure 37: Use case visualization through the developed application (Nikolakis et al., 2018)

13. RISK ANALYSIS APPROACHES

In the book, information is given about industrial and collaborative robots, applications and various risks that may come to the fore during applications, and information is given about the points to be considered in the risk analysis that should be done about the reduction of risks and the formation of risks, and the precautions to be taken for them. While performing the risk analysis, especially following the recommendations of ISO/TS 15066, the limits given here were acted upon, the risk analysis and risk reduction measures were summarized, and information was given about the main hazards as well as the general methods used to reduce the risk. In this section, in various studies, the elements that can create danger in robot-human contact during robot/human cooperation are discussed, especially their compliance with threshold values given by ISO/TS 15066. Various approaches are used in risk analyzes for cobot/operator cooperation, but it has been understood that the analysis results do not give the same results in the applications in which each robot is used. Traditional approaches such as FMEA and FTA have been shown to be unsuitable for HRC as they do not always capture the hazard due to combinations of human factors and hazards. Therefore, formal verification methods are preferred to improve hazard identification in robotic applications. These methods can be applied to complement

techniques such as HAZOP, which consists of a series of meetings and brainstorming processes to identify and assess potential hazards to the operator, equipment or productivity. The goal here is to get as much information as possible from experienced users and experienced security engineers. In some cases, security issues in robotics can be addressed by using STPA, which creates a model of the control structure of the system, to identify control-related defects, and in a combination of semi-formal or formal solutions. Common approaches such as STPA and HAZOP, although used in conjunction with formal solutions, can only provide a general framework for hazard identification and safety design. There are examples of HAZOP using state charts to describe the behavior of the robot, along with diagrams of UML models to identify potential hazards, their causes and their severity.

One of the approaches used in HRC applications and security analysis is SAFER-HRC methodology. The methodology is based on formal validation techniques to investigate predictable desirable and undesirable interactions (errors) between operators and robots. In the article titled "Collision and Injury Criteria When Working with Collaborative Robots" published in the (HSE) Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive Report, which was made and prepared in England in 2012, it was used to test the protection equipment on the human body during the collision of the robot with the human. Using the CEN/TC 162, BS EN 12453:2001 standards, which includes the acceptable impact values for electric doors, the recommendations on the impact force, compression, impact, crushing or breaking on the human body during the collision were examined and on pressure, impact, impact, crushing forces. The current status of the studies and the evaluations of the effects on the body regions after the impact were emphasized.

Table 16 shows the comparison of the values from the ISO/TS 15066 draft with the values from the CEN/TC 162 draft. It can be seen that the values chosen for the ISO/TS 15066 outline are lower than nearly all of the values recommended in CEN/TC 162, suggesting that force levels were chosen with caution. It is seen that various categories related to the human body in the ISO/TS 15066 draft do not have exact equivalents in the CEN/TC 162 document. Values in CEN/TC 162 were collected from a number of research sources with references given, as in Annex 1 of the reference list in the standard.

Table 17: Some comparison values for force limit values for force limit values from draft CEN/TC – 162 and draft ISO/TS-15066 (HSE, 2012)

	Level of injury resulting from impact force ranges (N)		
Body area	**CEN/TC-162 Severe / moderate**	**CEN/TC-162 Slight or no injury**	**ISO/TS 15066* Injury criteria**
Skull top / forehead impact	600 to 11000N	<1000N	175N
Face	900 to 5500	<100	90
Neck (front/larynx)	700	<100	35
Chest / ribs	580 to 8500	<500	210
Belly / abdominal organs	1000 to 4000	800 to 2000	160
Back	2000 to 5000	<2000	250
Upper arm / elbow joint	2000 to 4000	1700	190
Lower arm / hand joint	500 to 3800	500	220
Thigh / knee	2600 to 10000	1000 to <5000	250
Lower leg	900 to 8000	<1000	170
Feet / toes / joint	130 to 1300	Not listed	160

**Level of injury is defined in ISO/TS 15066 as: 'In the established main and individual body regions according to Table 1, only those stresses on the skin and underlying connecting or muscle tissue may occur where there was no deeper skin/tissue penetration accompanied by lacerations or abrasions, fractures or other skeletal damages. ... Under no circumstances a risk for injuries with higher severity than category 1 of the Abbreviated Injury Scale (AIS1) and more severe than with the codifications for surface injuries of the ICD-10-2006 can be tolerated.'*

Some comparisons of the ISO/TS 15066 draft limit values with the tolerance values found in the report for the Passenger Protection and Exit in Rail Systems (OPERAS) project are given in Table 17. For example, while force values are given in Newtons in ISO / TS 15066, the OPERAS project gives the tolerance g-force or the maximum physical displacement in mm.

Value from Draft ISO/TS 15066[1]		***Value from OPERAS report***	
Criteria description	*Value (N)*	*Criteria description*	*Value[4] (mixed units)*
Skull/Forehead CSF[2]	130N	No skull fracture	<2200N
Skull/Forehead IMF[3]	175N	AIS 0-1, no concussion	<55g for 3ms
Face CSF	65N	AIS 0-1, no facial injury	<250N
Chest CSF	140N	AIS 0, no rib fracture	<=58mm chest deflection
Chest IMF	210N	Minor injury, sternum	3300N
Chest IMF	210N	25% chance of AIS 4 injury	5500N
Belly CSF	110N	AIS 0, no injury	<20mm deflection
Pelvis IMF	250N	AIS 0, no fracture, lateral	<4000N
Uppr arm/Eblw joint IMF	190N	Humerus, bending, female	1710N
Lwr arm/Hand joint IMF	220N	Ulna, bending, female	810N
Lwr arm/Hand joint IMF	220N	Radius, bending, female	670N
Hand/finger IMF	180N	No hand fracture	<5m/s impact velocity
Thigh / knee IMF	250N	Femur, bending, female	2580N
Thigh / knee IMF	250N	No dislocation	<8mm lng shear displacement
Lower leg IMF	170N	Tibia, bending, female	2240N
Lower leg IMF	160N	Fibia, bending, female	300N

[1] See Table 1 for a description of the injury criteria for the ISO/TS 15066 force values;
[2] CSF = Clamping / squeezing force
[3] IMF = Impact force
[4] Some values are not directly comparable because of the difference in the units, but are provided for making a qualitative comparison. Even where units are the same, the exact method and site of measurement is likely to be different, which limits comparisons.

Table 18: Comparison of force limit values from draft ISO/TS-15066 and other literature sources **(HSE, 2012)**

Due to the differences between the standards and the force limitations given, a complex situation may arise in these cases. This variable force limit over time applies to gaps of 50 to 500 mm, and the values appear to apply to most body parts. However, it is not very clear that injury criteria for these force limits are not clearly defined, i.e., whether the limit is designed to preventdeath, serious injury, or minor injury. Another example of the dynamic complexity of the body as a whole is forces in the neck due to rapid movement of the head or body parts after a collision with an object. For example, it has been seen from various crash/impact tests using dummies that the head impact forces can be transferred to the neck. When the force measurements taken from the test dummy and the forces on the neck for the impact values given to the head during the test are examined, it can be seen how the constraints of the surrounding objects can significantly affect the forces transferred to the neck. Attempting to determine an acceptable impact force for the head and torso will require consideration of acceptable impact forces on the neck. As a result, it has been determined that while determining the acceptable impact force for the head and body, it will also determine the limits of the impact values that these forces can create on the neck, but it has not been mutually confirmed with the drafters whether these types of knock forces are taken into account in the force limits in the ISO/TS 15066 draft.

Reliability of Human Behavior

In the collaborative working environment, the robot operator contact will definitely be in the common working area. The position of the moving part of the robot is very important, because the level of injury or crushing will be different depending on the point of contact on the body in a variable or unconscious operator movement. These involuntary and unreliable operator behaviors need to be explained in detail.

Since the possibility of human/robot contact in collaborative robots has increased with the removal of the fences in traditional robots, it has been seen that human performance reliability must be evaluated while making risk assessments. With the removal of the fence, it has been observed that there is less contact with humans, even though robots are working together, because in most of the contacts or accidents on the fence, the performance of humans is unintentionally effective.

Contactless Modes for Secure Workspace Sharing: ISO/TS 15066:2016 recommends considering the minimum safety distances recommended in ISO 13855 for robots moving in collaborative workspace. Although the sensors recommended in 15066 were used during the design, it has been shown that the use of stepped sensors that can monitor and control the relative positions, speeds and safe distances of the robots and operators during the design in collaborative areas where more than one robot and operator work is in question. detected.

In another risk analysis, insufficient visibility in dusty or variable light working environments showed that both operators and robots working in the collaborative space had difficulty perceiving distances and location information. It has been understood that the sensors used in these cases should be capable of giving rapid, immediate and sensitive responses. Since robots work in these areas, integrated into a system, the system here must also meet relevant safety standards such as EN ISO 13849-Part 1 and 2 and EN ISO 13855. As seen in Figure 32, in collaborative environments with multiple operators and robots, safety-related components must be selected according to the appropriate environment and be able to monitor movements in a rapid manner.



Figure 38: Industrial scenario with multiple workers needs multiple worker identification tracker (Khalid at al., 2016a)

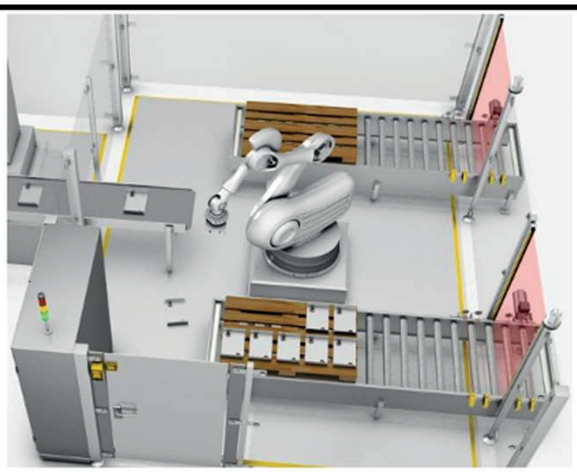
14. APPENDIXES

14.1. Appendix 1:

APPENDIX 1: A Risk Analysis for Robot Cell According to EN ISO 12100:

Scan the SQUARE CODE to access the APPENDIX 1 Excel File

Robot Application Risk Assessment Report



Factory :	ABC Company
The section where the workstation is located :	Production area
Name of machine/line:	Montage
Machine No	23
Evaluation Date :	6.07.2020
Validity Date of the Report:	5.07.2024
Number of operators :	1
Number of control points :	1
How many days are worked in a week: :	5
How many hours are worked in a day :	8

"The following will be taken into account when asking these questions.

- Age, education level, gender of the person at risk
- Health surveillance records of these people, disabled, pregnant or breastfeeding
- Inspection results of the workplace, work accident, incident and near miss records
- Ambient and personal exposure level measurement results
- Emergency plans and explosion protection documentation
- Previous Risk Assessment reports, if any"

Description of the operation and modification, if any, of the Workstation:

Directives and standards taken into account in the preparation of this document:

OHS Law No. 6331 and other relevant national legislation

No	Team Members, Support	Signature
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

No	Workplace Employee Representatives	Signature
1		

No	Job security specialist	Doc No	Signature
1			

No	Workplace Doctor	Doc No	Signature
1			

No	Department Managers (Employer or employer representatives)	Title	Signature
1		Chef	
2		Manager	
3		Director	

Part no	Part Name	EN ISO 13849-1
1	Robot Cell	d

"The following will be taken into account when answering these questions.
- Age, education level, gender of the person at risk
- Health surveillance records of these people, disabled, pregnant or breastfeeding
- Inspection results of the workplace, work accident, incident and near miss records
- Ambient and personal exposure level measurement results
- Emergency plans and explosion protection documentation

"Type of Risk & Hazard (According to EN ISO 12100)"	Is there any risk?	Situations where the risk may occur					Risk assessment						"CA- Conformity Assessment Report Item Number"	CA raporundaki aksiyonlar sonrası arta kalan Risk ile ilgili değerlendirme					
		Transport,Handling, Assembly, Instalation	Normal operation	Adjustment, deactivation	Cleaning	Maintenance and Troubleshooting	"LO -Probability FE -Presence frequency DPH -Possible injury.severity NP -Number of people at risk"				"Risk Estimation - Hazard level value"			"LO -Probability FE -Presence frequency DPH -Possible injury.severity NP -Number of people at risk"				"Risk Estimation - Hazard level value"	
	Y						LO	FE	DPH	NP	HRN	Result		LO	FE	DPH	NP	HRN	Result
1. Mechanical Hazards																			
1.1 crushing, squeezing, impact	Y	x	x	x		x	8	2,5	15	1	300	very high risk	Mechanical protection, Door safety switch, Light Curtain	0,033	2,5	15	1	1	Very low risk
1.2 rupture, cut off											0	n/a						0	n/a
1.3 entanglement, winding											0	n/a						0	n/a
1.4 getting caught, stranded	Y	x	x	x		x	5	2,5	15	1	188	very high risk	Mechanical protection, Door safety switch, Light Curtain	0,033	2,5	15	1	1	Very low risk
1.5 stab, sting, puncture											0	n/a						0	n/a
1.6 drowning											0	n/a						0	n/a
1.7 friction											0	n/a						0	n/a
1.8 affected by high pressure											0	n/a						0	n/a
1.9 ejection of the piece	Y		x	x			5	2,5	2	1	25	Considerable risk	Mechanical protection	1	2,5	2	1	5	Very low risk
1.10 slipping or tripping											0	n/a						0	n/a
2. Electrical Hazards																			
2.1 Distortion, shock, bum	Y		x	x		x	5	1	15	1	75	High risk	Equipment in accordance with EN 60204-1	0,033	1	15	1	0	negligible risk
2.2 electrostatic discharge											0	n/a						0	n/a
2.3 short-circuit, overload or thermal radiation from sputtering, melting, other chemical processes											0	n/a						0	n/a
3. Thermal Hazards																			
3.1 burning, scalding, contact with flame, exposure to explosion											0	n/a						0	n/a

Part no	Part Name	EN ISO 13849-1
1	Robot Cell	d

*The following will be taken into account when answering these questions.
- Age, education level, gender of the person at risk
- Health surveillance records of these people, disabled, pregnant or breastfeeding
- Inspection results of the workplace, work accident, incident and near miss records
- Ambient and personal exposure level measurement results
- Emergency plans and explosion protection documentation

"Type of Risk & Hazard (According to EN ISO 12100)"	Is there any risk ?	Situations where the risk may occur					Risk assessment						CA raporundaki aksiyonlar sonrası arta kalan Risk ile ilgili değerlendirme						
													"CA- Conformity Assessment Report Item Number"						
	Y						LO	FE	DPH	NP	HRN	Result		LO	FE	DPH	NP	HRN	Result
3.2 Hazards due to cooling or heating of the working environment											0	n/a						0	n/a
4. Dangers from noise																			
4.1 Hearing loss (deafness), other damages (loss of balance, carelessness, stress)											0	n/a						0	n/a
4.2 nervous breakdown											0	n/a						0	n/a
4.3 Risks arising from not noticing the audible warnings											0	n/a						0	n/a
5. Dangers from vibration																			
5.1 nervous disorder											0	n/a						0	n/a
5.2 trauma in the body											0	n/a						0	n/a
5.3 bone, joint and vascular disease											0	n/a						0	n/a
6. Hazards from radiation																			
6.1 burning											0	n/a						0	n/a
6.2 damage to the eyes or skin											0	n/a						0	n/a
6.3 effect on reproduction											0	n/a						0	n/a
6.4 headache etc.											0	n/a						0	n/a
7.Hazards from the material																			
7.1 touching or swallowing toxic liquid, gas, vapor or dust (chemical risks assessment should also be done)											0	n/a						0	n/a
7.2 fire or explosion (ATEX assessment should also be done)											0	n/a						0	n/a

Part no	Part Name	EN ISO 13849-1
1	Robot Cell	d

"The following will be taken into account when answering these questions.
- Age, education level, gender of the person at risk
- Health surveillance records of these people, disabled, pregnant or breastfeeding
- Inspection results of the workplace, work accident, incident and near miss records
- Ambient and personal exposure level measurement results
- Emergency plans and explosion protection documentation

"Type of Risk & Hazard (According to EN ISO 12100)"	Is there any risk?	Situations where the risk may occur						Risk assessment						CA raporundaki aksiyonlar sonrası arta kalan Risk ile ilgili değerlendirme							
								"LD-Probability FE-Presence frequency DPH-Possible injury severity NP-Number of people at risk"				"Risk Estimation - Hazard level value"		"CA- Conformity Assessment Report Item Number"	"LD-Probability FE-Presence frequency DPH-Possible injury severity NP-Number of people at risk"				"Risk Estimation - Hazard level value"		
	Y	Transport/Handling, Assembly, Installation	Human interaction	Adjustment, Interventions	Cleaning	Maintenance and Troubleshooting		LD	FE	DPH	NP	HRN	Result		LD	FE	DPH	NP	HRN	Result
7.3 biological or microbiological conditions (virus/bacteria)												0	n/a						0	n/a
7.4 Risks to the environment from waste												0	n/a						0	n/a
8. Ergonomic Hazards																				
8.1 the machine is not suitable for the qualifications and abilities of the worker												0	n/a						0	n/a
8.2 excessive physical effort												0	n/a						0	n/a
8.3 Posture position that is not suitable for human anatomy in the design of the machine (hand, arm, foot and leg)												0	n/a						0	n/a
8.4 risks in poor lighting or invisible areas												0	n/a						0	n/a
8.5 risks from human error												0	n/a						0	n/a
9. Hazards resulting from power cut																				
9.1 cut off electrical energy												0	n/a						0	n/a
9.2 cutting off compressed air												0	n/a						0	n/a
9.3 cutting off pressure oil												0	n/a						0	n/a
9.4 unexpected start-up or accidental start-up												0	n/a						0	n/a

Initials of persons participating in the Risk Assessment	Department Manager initials	Date

Risk Assessment Methodology

HRN = LO x FE x DPH x NP

LO — The probability of the event occurring	
0,033	Almost impossible
1	Very difficult possibility
1,5	Difficult possibility
2	Likely
5	Probably
8	Posible
10	Most Probably
15	Definite

FE — Frequency of being in the danger zone	
0,5	1 Per Year
1	1 Per Month
1,5	1 Per Week
2,5	1 Per Day
4	1 Per Hour
5	Continually

DPH — Injury severity	
0,1	Scratching, scraping
0,5	Cut, tear
1	Minor bone fracture (finger)
2	Major bone fracture (hand, arm, leg)
4	Loss of 1 or 2 fingers
8	Loss of hands, arms, legs, partial vision or hearing loss
10	Loss of 2 hands, arms, legs, complete loss of hearing or vision
12	Serious persistent illness
15	Fatal

NP — Number of people at risk	
1	1-2 people
2	3-7 people
4	8-15 people
8	16-50 people
12	> 50 people

HRN - Hazard Ratio Value Explanation

Key	HRN	Risk	Explanation
	0-1	Negligible Risk	Currently, there is no risk to endanger health and safety, no need for additional safety measures
	2-5	Very Low Risk	Currently, there are few risks to health and safety, and additional significant safety measures may not be necessary. Personnel protection equipment can be used and the risk can be reduced with training.
	6-15	Low Risk	There is a little risk though. It should be recommended to use the necessary control equipment for safety measures.
	16-50	Considerable Risk	There is a level of risk that requires safety measures to be taken. These measures should be implemented at the earliest opportunity.
	51-100	High Risk	There is enough potential danger that safety measures need to be taken immediately. These measures must be implemented urgently.
	101-500	Very High Risk	Safety measures must be taken very urgently. Relevant administrative units should be informed.
	501-	Extremely High Risk	Safety measures should be taken very urgently, equipment should not be used until adequate control measures are taken, people should be kept away and the relevant management units should be informed.

14.2. Appendix 2: HRC Application

TÜV Austria has compiled their work with the JOANNEUM RESEARCH ROBOTICS Institute and Magna Steyr Fahrzeugtechnik into a separate report from technical mechanisms and complex measurement methods to outline the considerations and key requirements in the development of an integrated safety and security concept for human-robot collaboration. And he stated that even the simple constructive and organizational measures outlined in the report can contribute to reducing the risks in cooperation between humans and robots.

In this report, it was pointed out that the starting point for risk reductions should be the risk analysis recommended in EN ISO 12100, which recommends clarifying the unclear and unclear points in an application realized with human-robot collaboration, and the issues that are considered to be risky in HRC applications are examined one by one.

In the two different examples discussed, the basic lines that should be emphasized during risk reduction and risk analysis during an assembly process are explained.

In both of these studies, in which robots produced by Kuka and Universal Robot companies are used, the assembly process is carried out, but the weight of the assembled part in the UR robot reaches 4500 g, although the part assembled in the Kuka robot is 250 gr. Since the danger when the weight of the part in the application falls or when it hits the operator with the robot will be greater than the previous example, this issue must be taken into account in the details of the risk analysis.

In the study, first of all, the targeted safety concept was created (reducing/controlling the force and applied force), the path to be followed by the robot was determined, and suitable clamps and protectors for the robot to operate and reliable conditions (warning signs, light signals, setting the reliable distance between the robot and the operator, sharp corners on the robot. and avoiding edges).

Risk Analysis

Both of the use cases shown here are a combination of various technical components – robot arm, control system, robot tool, as well as the sur- rounding elements such as workbench or storage and materials handling technology. Only this combination and collaboration with humans re- sults in an HRC application pursuant to EN ISO 10218-2 and a machine from the point of view of the Machinery Directive 2006/42/EC, that may only be placed on the market and thus put into operation, if it is in line with this regulation, amongst others, and thus its CE-conformity has been tested and confirmed. The four basic steps of the risk analysis that should be done by the distributor company according to EN ISO 12100 recommendations are as follows:

Defining the Limits of the Machine:

By specifying the machine limits the scope of the examination for the risk analysis is defined. In this case it is an assembly system to assemble products in which the robot and humans share the work. It also de- scribes the features and performance of the machine as well as spatial, temporal and a number of other limits such as the conditions of use and personnel qualifications.

Spatial limits refer to spaces in which the machine can move and the space requirement for the operator as well as interfaces to upstream and downstream machines and stations. Temporal limits describe the service life and maintenance intervals for the machine, for example. Thus, the service life of the robot model UR5 (Universal Robot) that is used in the first Use Case is 35,000 hours according to its manufacturer, something that also has to be taken into account in the service life of the overall HRC application.

Identifying the Risks:

Risks that arise from the use of the machine for its operator can be identified as soon as transparency has been achieved on the scope of the examination. Workshop formats have proven their worth for this analysis, where various internal and external experts, which are or are not familiar with the application, identify possible risks along the service life phases of the HRC application through a methodical discussion of concept, drawings, process illustrations and technical data for the application under assessment. Endangered persons in this case are not just the actual machine operators but also technicians, cleaning personnel or external visitors to the production environment.

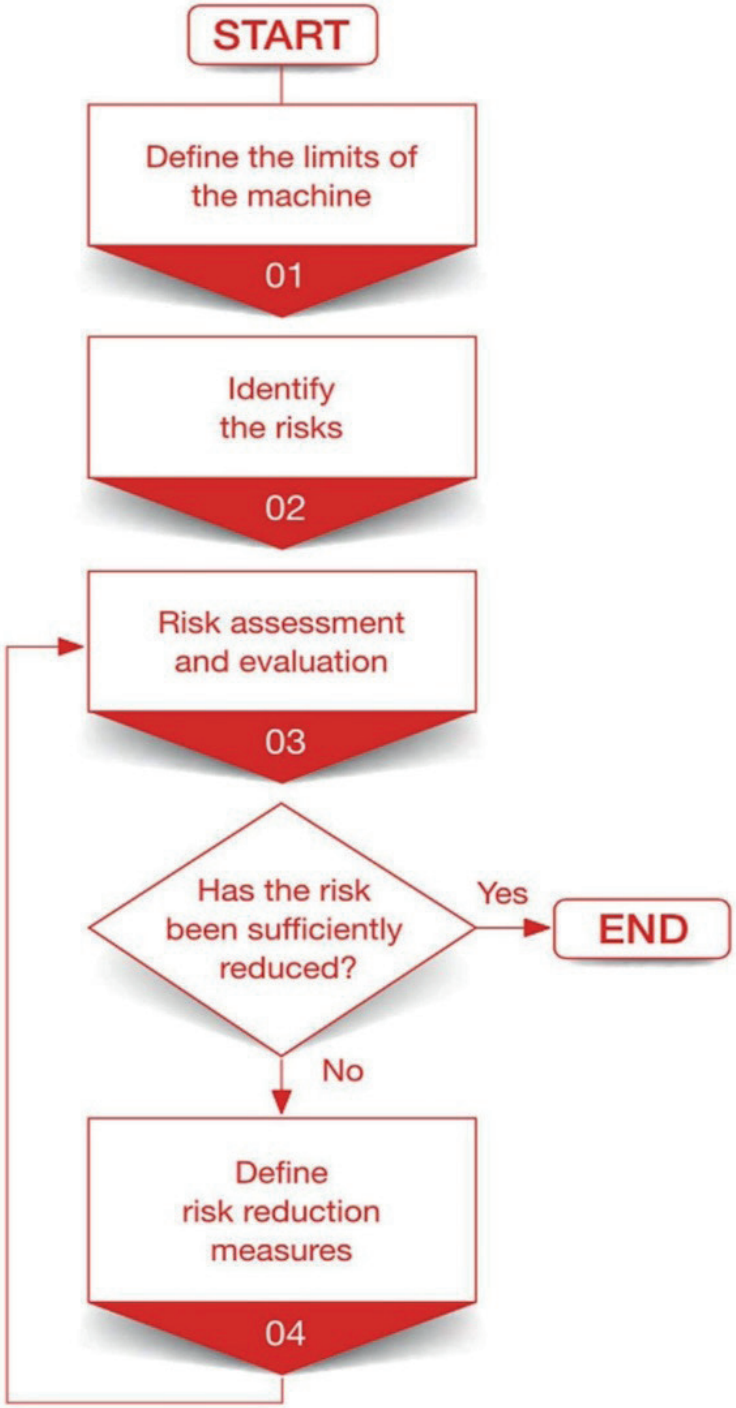


Figure 39: Risk Analysis Procedure (TÜV Austria, 2017)

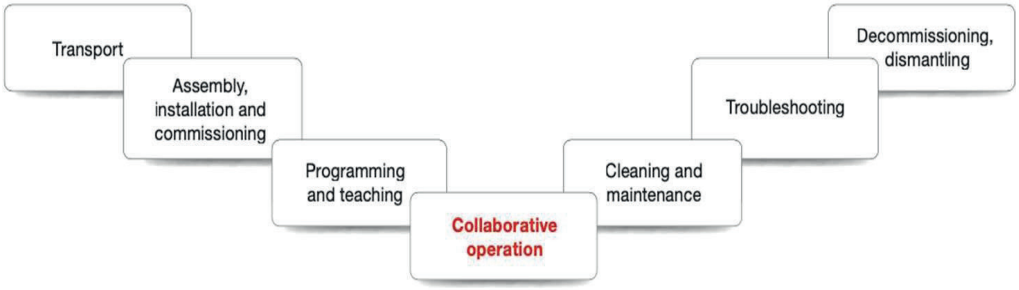


Figure 40: Service Life Phases of and HRC Application (TÜV Austria 2017)

During the determination of the risky areas, it will be useful to take into account the possible mechanical, electrical and ergonomic risks that may arise from the robot station or the system in which the robot is integrated. When analyzing risk, it is necessary to take into account that not only operators, but also those at risk, not only real machine operators, but also maintenance technicians, cleaning personnel or potential visitors to the production environment may be at risk. Apart from this, it is not necessary to take into account the noise of various intensity that may come from the environment or other machines in HRC evaluations, but if there is a high work monotony, it is useful to consider it in the evaluation.

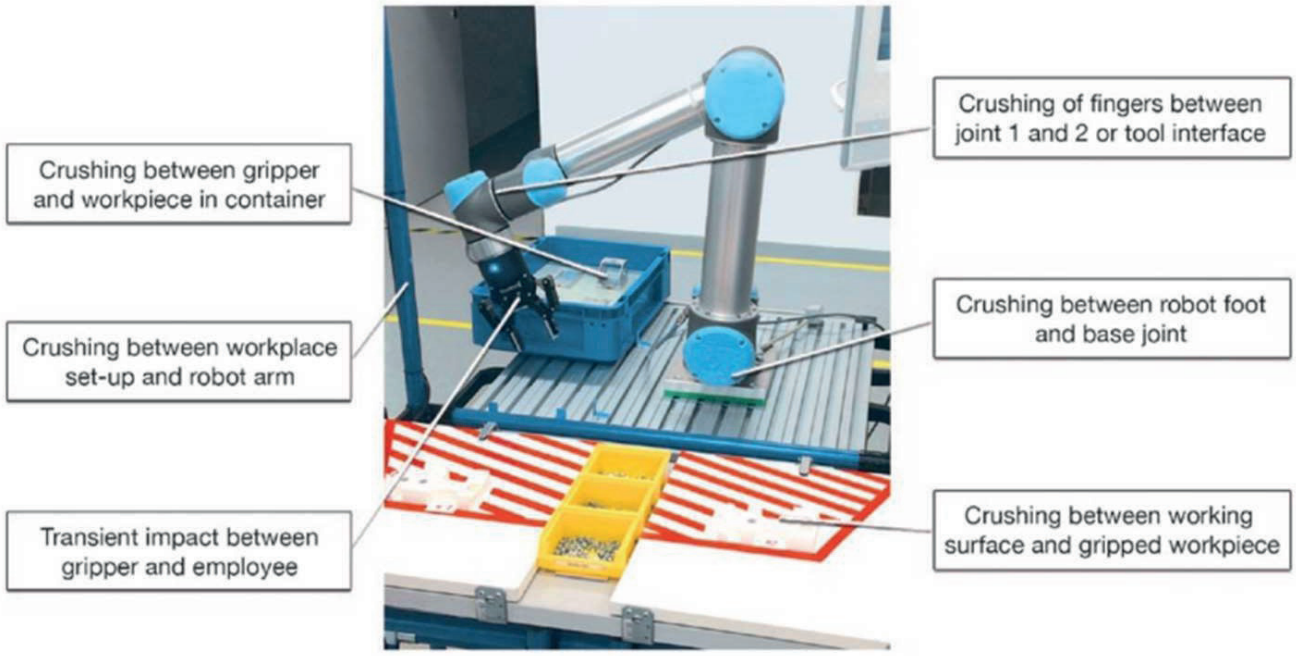


Figure 41: Identified Collision Risks (TÜV Austria, 2017)

Risk Assessment and Evaluation:

Once all of the risks have been identified, they have to be assessed. Whereas the identification phase is based on a subjective judgement of the assessing persons, defined parameters are used to quantify the risks, which at the same time means an objectification of the process. Each identified risk can be evaluated according to four criteria:

S: Extent of damage at the start of the risk

F: The frequency and duration for which a human is exposed to the risk

W: The probability of a risk occurring

P: The avoidability of damage by recognizing the occurrence of the risk Each risk is assessed according to each of these criteria. Various standards provide different methods and scales for this purpose, whereby these do not have to be mutually compatible. Nor do uniform rules apply for their representation in so- called risk graphs. The following definition has proven its worth:

- The extent of damage S has a bandwidth from 0 (no damage) to 4 (irreversible damage, loss of parts of the body, death).
- The frequency F lies between 1 (exposure to risk less than once a year for fewer than 10 minutes) and 5 (exposure to risk more often than once per hour). The highest frequency level 5 thus has to be assumed for a number of risks during continuous operation of an HRC application.

- For the probability of occurrence **W**, values are assumed between 1 (negligible) to 5 (very high).
- The avoidability P of the damage is defined between 1 (recognition of the risk occurrence and avoidance is likely) and 5 (recognition and avoidance is impossible).

So-called aggregated values are then calculated from these individual assessments, namely the risk class and the risk priority number.

Risk class: F+W+P

(RPN) Risk Priority Number= Risk Class x S

The goal of this study is to reduce the identified risk in priority class to reasonable and acceptable values, and to take risk-reducing measures according to final priorities.

Risk Reduction:

All identified risks that are rated with an RPN above the agreed level have to be reduced by appropriate measures. Constructive measures relate to structural modifications to the machine that change its basic design or function. Technical measures are achieved with aids of a technical nature. These can be additional safety devices or sensors with respect to a human- robot- collaboration, though also the limitation of output and speed by means of the robot's control system.

Depending on the RPN, a certain degree of reliability that describes the failure probability per hour of the technical measure is assumed for control technology measures. This presumed degree of reliability is quoted as the Performance Level (PL) according to EN ISO 13849-1 or Safety Integrity Level (SIL) according to EN 61508 and EN 62061. The exemplary risk with its RPN of 30 requires the use of a technical measure to reduce the risk to a Performance Level of at least PL = c and/or a Safety Integrity Level of SIL1, corresponding to a maximum failure probability of 0.0003% per hour. The RPN is reduced to 10 if these measures are implemented.

Probability of Dangerous Failure per Hour	PL	SIL (IEC 61508-1, high demand or continuous mode of operation)	Probability of Dangerous Failure per Hour (High demand or continuous mode of operation)
≥10^{-5} and <10^{-4}	a	No correspondence	
≥3×10^{-6} and <10^{-5}	b	1	≥10^{-6} and <10^{-5}
≥10^{-6} and <3×10^{-6}	c	1	≥10^{-6} and <10^{-5}
10-7 and <10-6	d	2	≥10^{-7} and <10^{-6}
≥10^{-8} and <10^{-7}	e	3	≥10^{-8} and <10^{-7}

Figure 42: Relationship between PL and SIL (quote from ISO 13849-1:2006)

It can be reduced even further by supplementary organizational measures, in the present example to 8. If this is then below the agreed maximum value, no further measures would be necessary. There are a large number of different ways to reduce the risks and their effects are very different too.

The specific feature of a human-robot-collaboration lies in the potential collision between a human and the robot. The following chapters offer an overview of how to deal with this specific feature as well as further ideas for risk-reducing measures.

Risk Reduction Measures:

Fundamentals of Biomechanical Limits:

Once the possible collision scenarios between humans and robots have been identified in a risk analysis, the most important risk-reducing measure, after an avoidance of the danger spot, is to reduce the forces and speeds as a technical measure – so as to comply with the force and pressure limits that apply for collisions between the operator and robot. The potential contact situations can be classified into two categories pursuant to ISO/TS 15066: transient and quasi-static contact. These differ firstly in terms of the duration of the contact and secondly as to whether it is possible for the person affected to free himself after the collision. Quasi-static contact lasts for longer than 0.5 seconds per definition and the human is trapped between the robot and the surroundings or parts of the robot. In contrast, transient contact lasts a maximum of 0.5 seconds and the affected person can withdraw or step out of the way after contact (See Figure 37- transient and quasi-static).

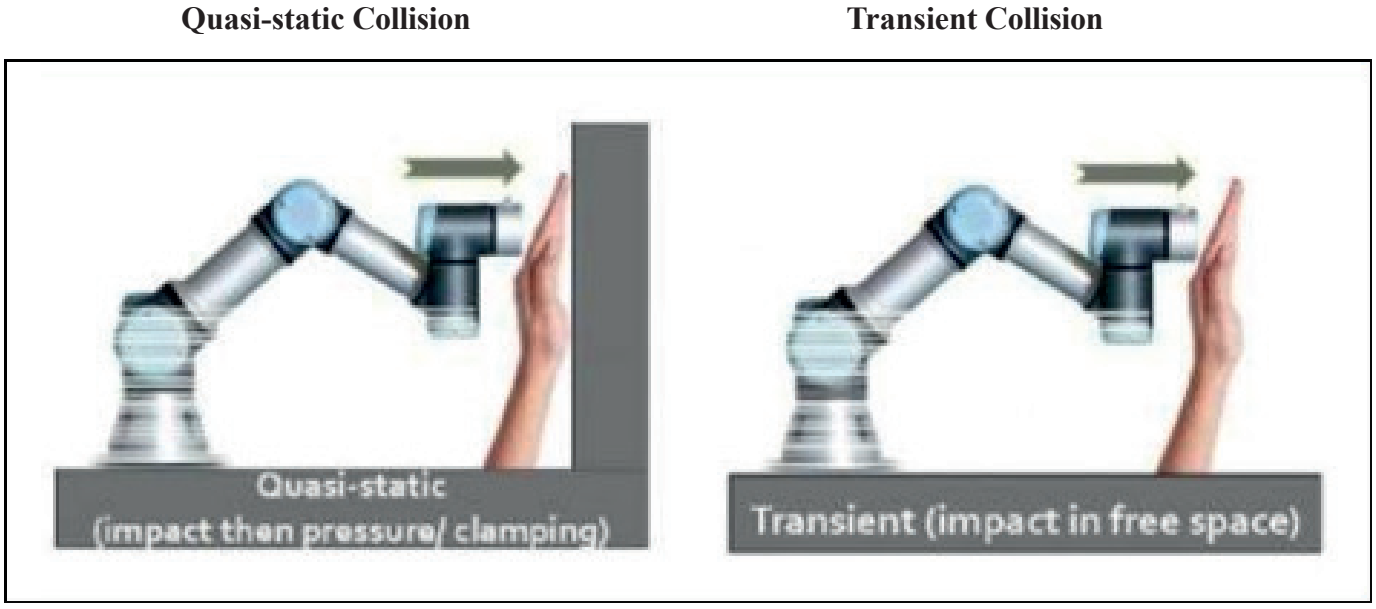


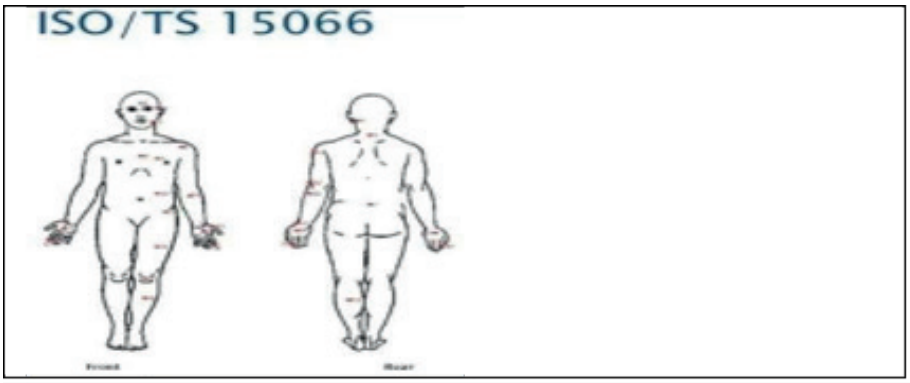
Figure 43: Quasi-static and transient collision
(Shea, R. Universal Robot Quote.: https://www.gray.com/insights/creating-a-safety- culture- in-the-cobot-era-of-manufacturing/)

In order to define the limits for a quasi-static collision, the pain thresholds of humans were determined empirically for 29 specific regions of the body as a function of the effective force and pressure The Institute for Occupational Safety and Health (IFA) and the University of Mainz carried out a study with 100 test persons in 2014.

Although the results obtained will not be representative equally for everyone on account of the low number of random samples (e.g., differentiation between men - women), the limits that were identified were published in an information of the German Social Accident Insurance (DGUV) (3) and the technical specification ISO/TS 15066:2016(E) (1). An exemplary excerpt is cited graphically in Figure 38.

ISO/TS 15066:2016, which supplements the standard EN ISO 10218- 1/2:2012, also quotes limits for transient contact in addition to the described limits for quasi-static contact (see Figure 38). For transient contact a limit twice as high as that for quasi-static contact is assumed, whereby this is a constructive estimate.

During a possible collision between humans and robots, both of the limits, force and pressure, which apply for the affected regions of the body, may not be exceeded according to ISO/TS 15066:2016. For small collision areas the pressure will be more relevant, whereas the effective forces will be more relevant for larger areas.



Body region	Specific body area		Quasi-static contact: Maximum permissible pressure a) p0 N/cm²	Quasi-static contact: Maximum permissible force b) N	Transient contact: Maximum permissible pressure multiplier c) fT	Transient contact: Maximum permissible force multiplier c) fT
Skull and forehead	1	Middle of forehead	130	130	not applicable	not applicable
	2	Temple	110		not applicable	not applicable
Face	3	Masticatory muscle	120	65	not applicable	not applicable
Neck	4	Neck muscle	210	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	2
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	210	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	2
Chest	8	Sternum	120	140	2	2
	9	Pectoral muscle	170		2	2
Abdomen	10	Abdominal muscle	140	110	2	2
Pelvis	11	Pelvic bone	210	210	2	2
Upper arms and elbow joints	12	Deltoid muscle	250	150	2	2
	13	Biceps	220		2	
Lower arms and wrist joints	14	Radial bone	190	120	2	2
	15	Forearm muscle	180		2	
	16	Arm nerve	180		2	
Hands and fingers	17	Forefinger pad D	300	140	2	2
	18	Forefinger pad ND	270		2	
	19	Forefinger end joint D	280		2	
	20	Forefinger end joint ND	220		2	
	21	Thenar eminence	200		2	
	22	Palm D	260		2	
	23	Palm ND	260		2	
	24	Back of the hand D	200		2	
	25	Back of the hand ND	190		2	
Thighs and knees	26	Thigh muscle	250	220	2	2
	27	Kneecap	220		2	
Lower legs	28	Middle of shin	220	130	2	2
	29	Calf muscle	210		2	

Figure 44: Biomechanical limits in accordance with ISO / TS 15066: 2016 for quasi-static collision (Quote from ISO TS 15066)

The sample biomechanical limits shown are a food guidance aid and can be used as a reference when applying HRC applications in industry. Even though force, output, and speed limits can be parameterized in the control systems of modern collaborative robots, actual measurements of the effective forces and stresses in the context of the general application must be made for all collision situations, as shown in Figure 37. Thus, compliance with the limit values will be checked.

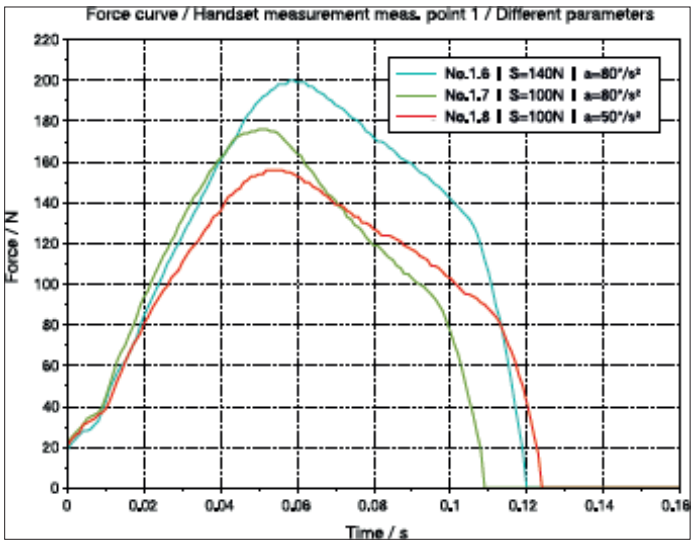


Figure 45: Using the KDMG-KOLROBOT Measuring device. (TÜV)

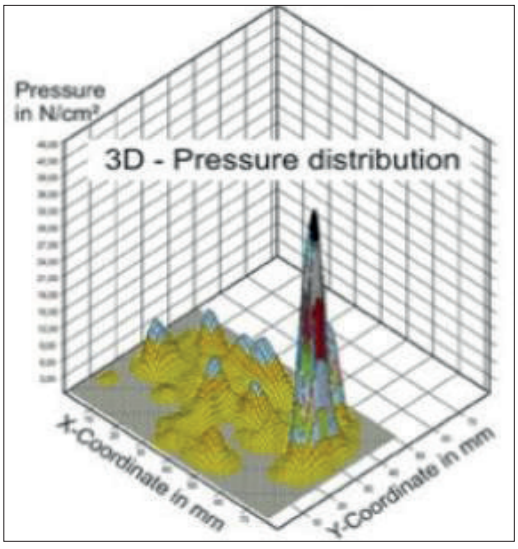


Figure 46: Partial pressure distribution at the collision surface (IAF)

Measurement Methods and Aids:

Different methods and equipment are available to perform these measurements, each of which is suitable for different measurements and purposes.

Force-Pressure Measuring Device

The most informative measurement results are provided by combined force-pressure measuring devices such as the KDMG- KOLROBOT that has been developed by the Institute for Occupational Safety and Health (IFA) of DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung -German). This measuring device realistically simulates the different regions of the body, each with their respective spring stiffness, as a biofidelic substitute and is even able to measure pressure in their local resolution.

Force and pressure curves can be determined in a single collision test. A piezo load cell is installed in the measuring device's housing to determine the force and a sensor film is attached to the collision surface, to measure the spatial distribution of this force, thus allowing the calculation of the pressure distribution. The data from the different sensors is compiled in an analytical software program.

Figure 39 shows how the maximum force exerted by the robot during a collision can actually be reduced by gradually lowering the force limit (S) and acceleration (a) in the control system of the tested robot, thus allowing the HRC application to be aligned to the biomechanical limits.

By showing the force and pressure over a time curve, the duration of the load can be determined and thus a decision taken on which points in time the limit for quasi-static or transient contact situations has to be taken into account. The active and passive functions of certain robots mean that the forces and pressures are only active for a short time.

İt can be seen that despite a parameterization of the force limit/sensitivity to 140 and 100 N in the robot's control system, higher peak forces were in fact reached in all three collision tests.

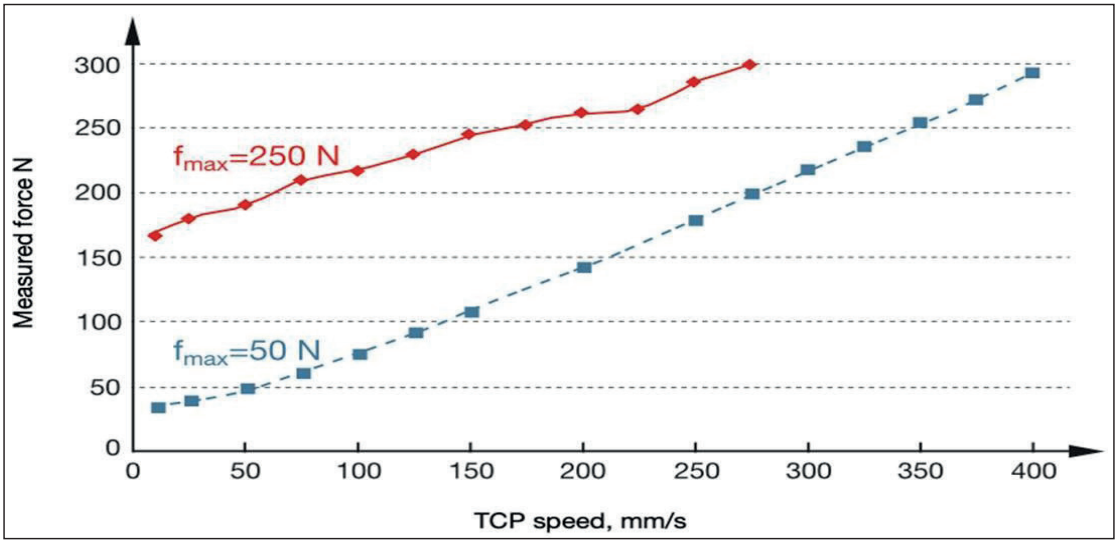


Figure 47: Set sensitivity and actual collision force, robot model Universal Robot UR3. (TÜV Austria, 2017)

It can therefore be assumed that the robot only detects the occurred collision when the preset threshold is reached and it continues to build up force in the so-called run-on until the stop is triggered.

This proves that the parameters in the robot's safety settings are only proxy values that have to be checked by means of biofidelic measurements (D. Kirschner, A. Schlotzhauer, M. Brandstötter: Validation of Relevant Parameters of Sensitive Manipulators for Human-Robot Collaboration. To appear in Proceedings of the 26th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region-2017).

Programming for Human-Robot-Collaboration

Technicians have to rethink the entire programming process in human- robot-collaboration through the parameterization of limits for force, output and speed so as to comply with the biomechanical limits in the robot control system. Instead of minimizing cycle times through the shortest possible travels and high speeds for the robot, the program design itself should contribute to avoiding any risks without having too much of a negative effect on the performance.

The following points are just some possible measures;

- Gripping points as potential crushing points should be approached more slowly than in conventional robot programs.
- Gripper spreads should be designed as narrow as possible at the place of gripping itself to prevent fingers getting caught between the workpiece and gripper.
- During gripping, the buildup of force in relation to the gripper spread can be monitored to check if the correct object has been gripped.
- The trajectories should be planned at an adequate distance from surrounding objects to avoid additional collision risks.
- The speed curve within a path should be adapted to the direction of movement as well as the position of obstacles and persons.
- The robot should approach level surfaces at a right angle wherever possible so as to avoid shearing collisions.

Programming HRC applications calls for novel approaches compared to conventional industrial robots and poses new challenges for programmers. Personnel training is urgently needed here and the topic has to be dealt with accordingly during vocational training.

Constructive and Organizational Safety Measures:

Apart from the technical measures, above all the limitation of collision forces, constructive and technical measures to reduce risks also play an important role in the integral safe design of HRC applications. The structured approach of a risk analysis also identifies risks that can be combated by constructive or organizational measures. These risk-reducing measures are often cheaper and easier to realize.

Simple constructive elements can obstruct or even completely prevent access to potential shearing and crushing points so that these do not have to be monitored by complex technical means. This is necessary in any case if technical monitoring is impossible or the forces and pressures acting at potential collision points cannot be reliably deter- mined by measurements, for example on account of their restricted spatial accessibility.

Enlarging the area of small contact surfaces such as gripper tips can distribute the collision forces over a larger area and hence reduce the pressure. Soft attenuators on the robot housing reduce the transmission of peak forces. Laying media lines in a duct along the robot housing can greatly reduce the risks of damage to the system or injuries due to the cable becoming entangled. At best, an external cable bundle should be avoided wherever possible and sole preference be given to the use of media lines that run inside the robot arm.

Collaborative Workspace Details:

Identifying the work area of collaborative robots with warning signs and optically marking the robot's range of motion within the collaborative workspace are appropriate measures. These help to draw attention to potential risks and increase the chances of noticing the onset of a risk and thus avoiding any damage or injury. In addition, the operation of the robot is not interrupted by frequent safety shutdowns as a result. Status indicators, such as a light signal, show the robot's operating status and prevent surprises.

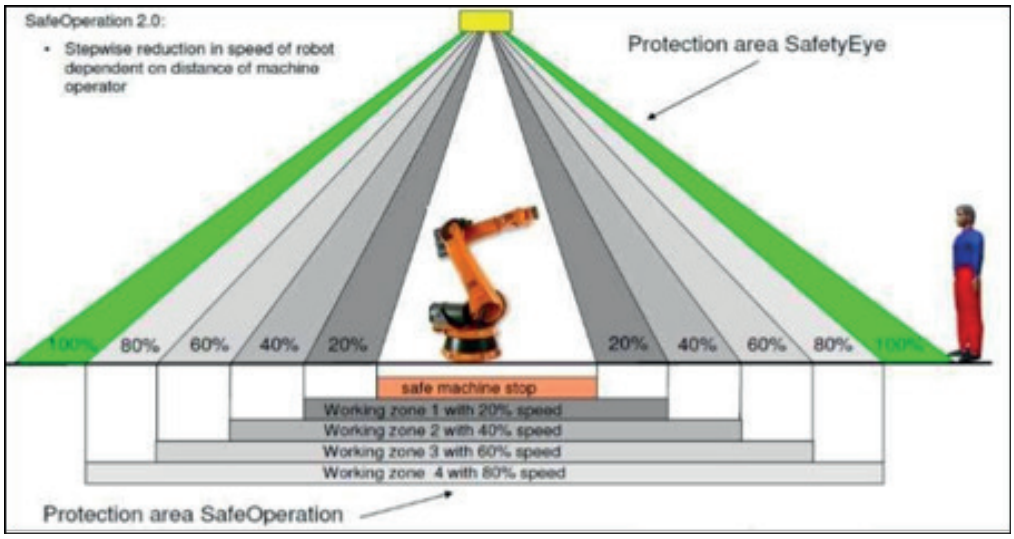


Figure 48: Collaborative work cell (B.Mike., Kuka Robotic)

A logical arrangement of the control panel in the co-working area provides instant access to emergency stop equipment and an overview of fault and error messages. If there is increased visitor traffic in the affected production area, access of the HRC application(s) to the collaborative area should be restricted to authorized persons. When considering direct collaboration space and constructive design, rounded areas should generally be preferred over small, square shapes rather than small spaces. In the event of a collision, these measures mean that the largest possible force absorption area is directed, thereby reducing the effective energy input.

It clearly demonstrates that a device intended for use only in a manual assembly environment is not entirely suitable for use in a human-robot-collaboration due to its geometry. The geometry of the component results in contours with sharp edges; this results in collision pressures for the hand area that significantly exceed the bio-mechanical limits, possibly if a hand is crushed between the device and the workpiece on the robot. Equipment needs to be redesigned as these pressures cannot be sufficiently reduced by limiting force and speed alone.

15. APPLICATIONS

15.1. Key Harmonized Standards and Field Application Examples to Be Considered in Risk Assessments for Machines Utilizing Industrial Robots

15.1.1. Harmonized Standards and Their Types

When conducting a risk assessment in industrial robot applications, it is essential to evaluate whether the system complies with relevant harmonized standards. These standards provide the necessary technical framework to verify, among other things:

- Whether the number of emergency stop buttons installed is sufficient,
- Whether the safety fencing surrounding the robot cell meets the appropriate height and distance requirements,
- Whether the interlocking devices installed on access doors are correctly selected and conFigured, and
- Whether the robot control circuits have been properly connected to meet Category 3, Performance Level d (PL d) requirements.

The use of harmonized standards enables engineers, integrators, and inspectors to objectively determine compliance with essential safety and health requirements in industrial automation systems.

To understand why harmonized standards are vital in machine risk assessment applications, one must first examine the cornerstone of machine safety regulation — the Machinery Safety Directive 2006/42/EC, which serves as a reference guide for achieving correct and consistent outcomes in all matters concerning machinery safety.

According to the directive, a *harmonized standard* is defined as follows:

Harmonized Standard: A technical specification adopted by a recognized standardization body — such as the *European Committee for Standardization (CEN)*, *European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC)*, or the *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)* — in accordance with the procedures established by the European Commission.

The clause that highlights the importance of harmonized standards within the Machinery Safety Directive is found in Part III, Article 9, Paragraph 2, which states:

A machine manufactured in accordance with a harmonized standard shall be presumed to comply with the essential health and safety requirements covered by that standard.

This provision establishes a presumption of conformity, meaning that machines built in compliance with relevant harmonized standards are deemed to meet the essential health and safety requirements set forth by the directive.

Thus, harmonized standards not only serve as technical references but also form the legal foundation for demonstrating safety compliance in both national and international regulatory frameworks governing machinery and industrial robotics.

Types of Standards

There are three different types of standards, classified as Type A, Type B, and Type C.

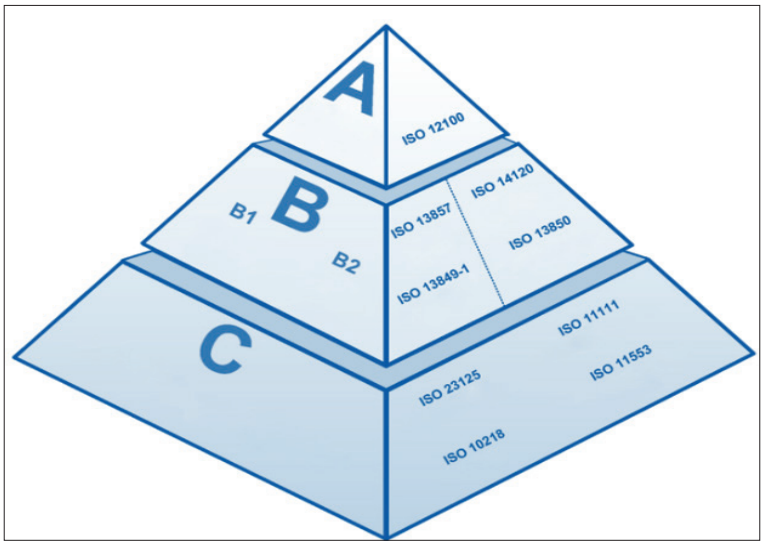


Figure 49: Types of Standards

To provide some background information on **Type A, B, and C standards**:

- Type A standards are fundamental safety standards that cover the basic concepts, design principles, and general aspects applicable to all types of machinery. An example of this is EN ISO 12100:2010 – Safety of Machinery – General Principles for Design – Risk Assessment and Risk Reduction. The EN ISO 12100 standard can be thought of as similar to an "Introduction to Engineering" course taught in the first year of university engineering programs. It provides general knowledge on a wide range of topics and directs

students to other, more specialized courses for detailed understanding. In the same way, the EN ISO 12100 standard, as a Type A standard, guides the person performing the risk assessment to other relevant standards for detailed evaluations depending on the specific subject matter.

For example, when assessing whether the height of an emergency stop button from the floor is appropriate, one should refer to a Type B standard, namely EN ISO 13850:2015 – Safety of Machinery – Emergency Stop Function – Principles for Design.



Figure 50: Emergency Stop Button Located at the Entrance of a Robot Cell

- Type B standards are general safety standards that address specific safety aspects or types of protective measures applicable to a wide range of machinery. Type B1 standards focus on particular safety aspects such as surface temperatures, safety distances, and noise levels. An example of a Type B1 standard is EN ISO 13857:2008 – Safety of Machinery – Safety Distances to Prevent Hazard Zones Being Reached by the Upper and Lower Limbs.

This standard provides information regarding the height of safety fences installed around hazardous robot operating areas, the required minimum safety distances between personnel and the danger zone, and the dimensions of openings permitted in protective barriers — all designed to reduce risk by preventing unintended access to dangerous areas.

Below is an illustration prepared with reference to the EN ISO 13857 standard:

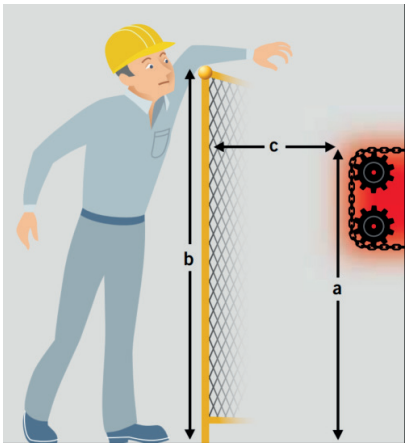


Figure 51: Access Over Protective Structures According to EN ISO 13857
(Laurent Giraud, Ph.D., 2009)

Type B2 standards address topics such as two-hand control devices, interlocking mechanisms, and the design of guards and protective enclosures. An example of a Type B2 standard is EN ISO 14120:2015 – Safety of Machinery – Guards – General Requirements for the Design and Construction of Fixed and Movable Guards. This standard provides information on the design principles of protective guards installed to prevent access to hazardous areas where robots operate. During a risk assessment, EN ISO 14120 is used as a reference to evaluate whether fixed guards, interlocked movable guards, and other types of protective enclosures have been properly designed and implemented. In the Figure below, examples of fixed guards (fixed safety fences surrounding a robot cell) and interlocked movable guards (doors equipped with interlock switches that send an open-door signal and stop hazardous movements inside the robot cell) can be seen.



Figure 52: Examples of Protective Guards Surrounding a Robot Cell (GT Engineering, 2021)

Type C standards are machine safety standards that address detailed safety requirements for a specific machine or group of machines.When these standards are being developed, the relevant technical committees also include manufacturers and integrators from the industry. In these collaborative efforts, past fatal accidents and near-miss reports related to the specific type of machinery are analyzed, and appropriate risk reduction measures are proposed to prevent such incidents from recurring in the future.Upon examination, it can be observed that Type C standards are typically written for machine types that are commonly used in industry.For example, conveyors, hydraulic or mechanical presses, and injection molding machines are all frequently used in the manufacturing sector, and the existence of corresponding Type C standards ensures that these machines are designed and produced safely according to defined requirements.Type C standards often make references to Type A and Type B standards, allowing the reader to avoid repeatedly consulting multiple documents.For instance, when conducting a risk assessment on a robot cell, the assessor can refer directly to the EN ISO 10218 series without needing to reexamine various B-type standards individually.An example of a Type C standard relevant to this topic is EN ISO 10218-2:2011 – Robots and Robotic Devices – Safety Requirements for Industrial Robots – Part 2: Robot Systems and Integration.For example, when performing a risk assessment on the robot cell shown in the Figure below, the assessor does not need to revisit EN ISO 13849-1 to determine what Category and Performance Level (PL) must be achieved by the safety-related stop function triggered by a safety laser scanner.This is because EN ISO 10218-2:2011 – Robots and Robotic Devices – Safety Requirements for Industrial Robots – Part 2: Robot Systems and Integration already refers to EN ISO 13849-1 and specifies that the safety-related parts of the control system must achieve Category 3, Performance Level d (PL d).

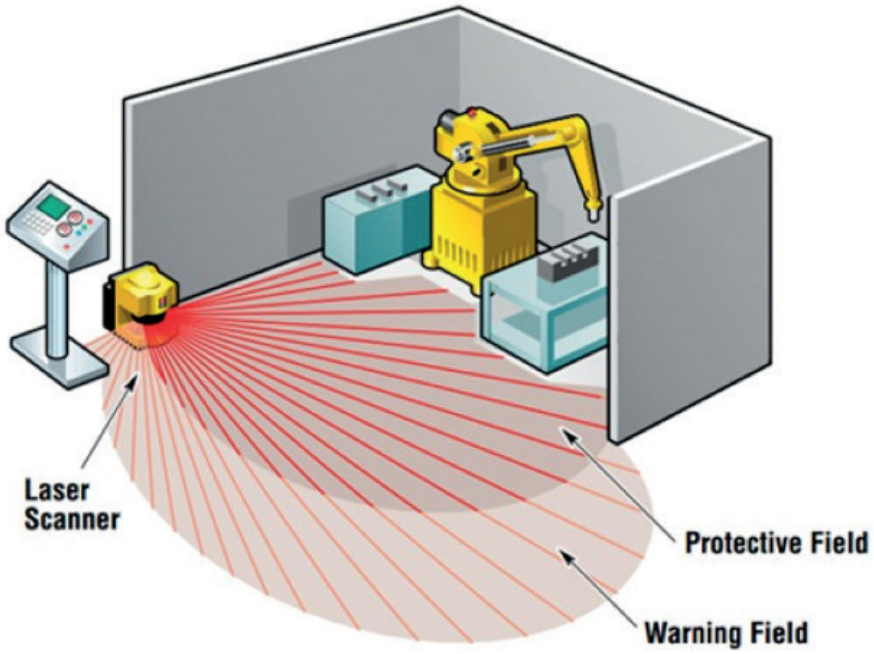


Figure 53: Safety Laser Scanner Used at the Entrance of a Robot Cell

15.1.2 EN ISO 12100:2010 – Safety of Machinery – General Principles for Design – Risk Assessment and Risk Reduction

When performing a risk assessment, EN ISO 12100 should be regarded as the primary reference source — the essential guidebook for all activities related to machinery safety. Detailed information about this standard has already been provided in the previous sections. In addition to those details, a practical companion document to EN ISO 12100 is the technical report ISO/TR 14121-2:2012, which serves as a practical guide for risk assessment. This technical report, which should be considered indispensable for anyone performing risk assessments, is defined on the official ISO website as follows:

ISO/TR 14121-2:2012 provides practical guidance on conducting risk assessments for machinery in accordance with ISO 12100 and describes a variety of methods and tools for each step of the process. It gives examples of different measures that can be applied to reduce risks and is intended for use across a wide range of machinery types, varying in both complexity and potential for harm. The intended users of this document include those involved in the design, installation, or modification of machinery — such as design engineers, technicians, and safety specialists. The most critical element in risk assessment is to communicate with the individuals who are expected to use or may potentially interact with the robot cell, and to gain a thorough understanding of their interactions and tasks involving the cell. When speaking with operators, it is essential to ask what tasks they perform and what operations they carry out during a typical day working with the robot cell. While the operator explains how they work with the robot cell, the person conducting the risk assessment must listen carefully and take notes on any points in the workflow that may pose potential risks. Considering human psychology, it is important to recognize that being questioned about one's work by unfamiliar individuals can create discomfort or anxiety among machine users. Therefore, before speaking with the operators for risk assessment purposes, the assessor must introduce themselves properly and clearly explain the purpose of their presence. Machine users should trust that the information they provide will not be used against them or to create problems for them. They should be convinced that the purpose of the risk assessment is to help ensure a safer and more efficient system for their own benefit. Similarly, it is also necessary to speak with maintenance personnel and those responsible for cleaning the production line about the points at which they interact with the robot cell. Maintenance staff, due to deficiencies in machine or robot cell design, may sometimes need to work under energized conditions. By asking maintenance operators what types of faults occur within the robot

cell and how frequently they intervene, valuable information can be gathered regarding the risks they may encounter. Although risk assessment is often regarded as a technically oriented task, it is also a process in which communication skills play a major role. The more effective the communication established with machine users, the more successful and accurate the outcome of the risk assessment will be.

15.1.3 EN ISO 13850:2015 — Safety of Machinery — Emergency Stop Equipment — Design Principles

It is appropriate to begin with the definition of emergency stop as specified in this standard. Based on field experience, it has often been observed that operators use emergency stop buttons to bring machines or robots to a normal stop. To prevent such misuse, it is essential to clearly understand the exact meaning and purpose of the emergency stop function.

Emergency Stop (E-Stop):

A function used to reduce or prevent hazards to people, or to mitigate damage to the machine or to the ongoing process.



Figure 34: Emergency Stop and Protective Stop *(Josep Plassa, 2025)*

As is evident from the definition, this function must be used only in emergency situations. Machine manufacturers may design their systems to respond differently to emergency stop and normal stop commands.For instance, in the context of industrial robots, examination of robot controller electrical circuit diagrams reveals that two types of stop connections are typically provided. Generally, robots feature two types of terminals — EMG input and FENCE input — and their stopping behavior varies depending on which terminal initiates the stop signal.For example, when the emergency stop button connected to the EMG input is pressed, the robot's axes stop more rapidly in accordance with the manufacturer's design. However, industrial robot manufacturers design this rapid stop function with the assumption that it will not be used repeatedly as a routine stopping method. Frequently stopping a robot via the emergency stop function is comparable to stopping a passenger car solely by using the parking brake — it causes unnecessary mechanical stress and potential damage to the system.During risk assessment, it must therefore be verified that a normal stop mechanism is available and properly provided for operator use, ensuring that emergency stop buttons are reserved strictly for genuine emergency conditions.

Examples of emergency stop equipment include:

- Buttons that can be easily activated with the palm of the hand



Figure 55: Example of an Emergency Stop Button *(Omron Electronics)*

- Rope / Cable / Cord-Type Emergency Stop Devices

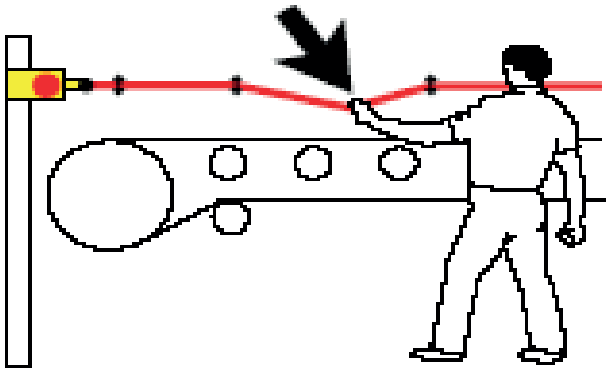


Figure 56: Example of a Rope-Operated Emergency

- Emergency Stop Bars



Figure 57: Emergency Stop Bar

The emergency stop buttons shown below are typically used in applications where an unintended machine stop could result in significant production losses. However, the EN ISO 13850 standard advises against the use of such buttons unless absolutely necessary.

An emergency stop button should be designed so that an operator in a state of panic can press it quickly and easily with an open hand. The design shown below prevents easy hand access to the button, which may cause a delay in activation during an actual emergency—potentially allowing the existing hazard to persist for a longer period before the machine comes to a stop.



Figure 58: Emergency Stop Button with Protective Guard



Figure 59: Emergency Stop Button with Recessed Surface



Figure 60: Example of a Recessed-Surface Emergency Stop Button

• The actuator of the emergency stop device shall be RED, and its background shall be YELLOW.



Figure 61: Emergency Stop Button

When the emergency stop is released, the system must be manually reset. A separate reset button shall be provided, and pressing this button must not initiate machine operation.



Figure 62: Example of Manual Reset

According to the EN 60204-1 – Safety of Machinery – Electrical Equipment of Machines – Part 1: General Requirements standard, the color of the reset button should be selected from one of the following colors.

Recommended Reset Button Colors According to IEC/EN 60204-1			
Blue	Grey	White	Black

Figure 63: Recommended Colors for Manual Reset Button

According to the EN ISO 13850 standard, the height of the emergency stop button from the floor should be between 0.6 meters and 1.7 meters.

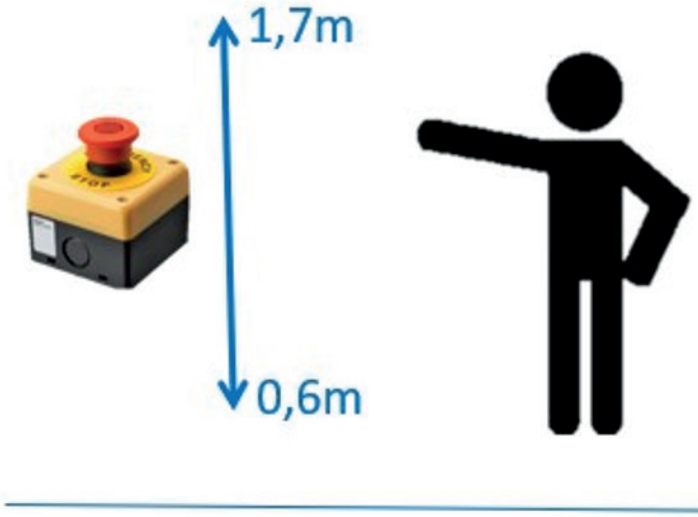


Figure 64: Recommended Mounting Height of Emergency Stop Device from Floor Level
(Erhan Eskicumalı, 2021)

The individual performing the risk assessment should measure the height of the emergency stop buttons located on the robot cell from the floor using a measuring device such as a meter stick. The reason for maintaining the height of the emergency stop device within this specified range is to ensure that the operator can easily and quickly reach the emergency stop button in the event of an emergency.



Figure 65: Example of Verifying the Height of an Emergency Stop from the Floor

- Another important point to consider when performing a risk assessment on robot cells is whether a sufficient number of emergency stop devices are available. The EN ISO 10218 standard does not specify an exact required number.

According to EN ISO 13850:2015 – Safety of Machinery – Emergency Stop Function – Principles for Design, emergency stop devices should be installed in the following locations:

- At all operator control stations
- At the entry and exit points of the robot cell
- At locations where intervention with the machine is required
- At every area where human-machine interaction is expected

Therefore, it is essential to communicate with operators, maintenance personnel, and cleaning staff to understand their interactions with the system. During the risk assessment, based on the information gathered from these users and by referring to the above guidelines, an evaluation can be made regarding whether the robot cell has a sufficient number of emergency stop devices.

If it is determined that the number of emergency stop devices is inadequate, it should be recommended—within the context of risk reduction measures—that additional emergency stop devices be installed as described above.

- The emergency stop button must be positioned in a way that makes it easily identifiable. For instance, in the example shown below, the emergency stop button located inside the robot cell is not easily visible due to the surrounding welding curtain.



Figure 66: Incorrect Emergency Stop Button Application

15.1.4 EN ISO 13857 – Safety Distances to Prevent Hazard Zones Being Reached by Upper and Lower Limbs

- It is appropriate to begin with the definition of emergency stop. Field experience shows that operators often use emergency stop buttons to perform normal stops of machines or robots. To avoid such misuse, it is essential to clearly understand what an emergency stop truly means.
- This standard, however, is used to determine the appropriate safety distances required to keep hazardous areas out of reach of upper limbs. The distances specified in the standard are based on conditions that consider individuals attempting to reach hazardous areas without the aid of additional tools and under different access situations defined within the standard.



Figure 67: Improper Safety Fence Design

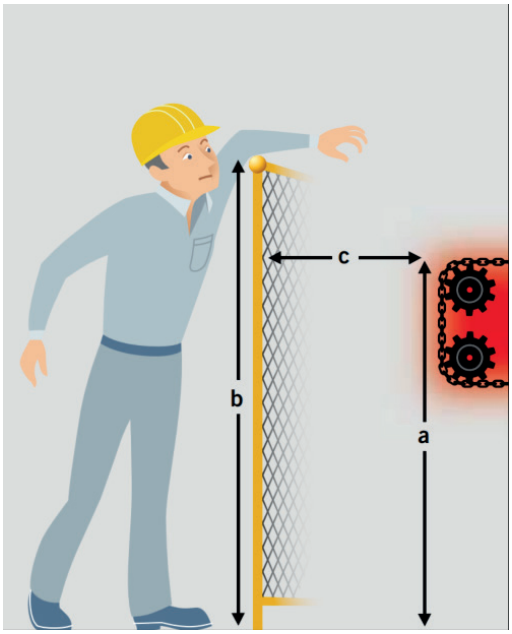


Figure 68: Access Over Protective Structures According to EN ISO 13857 (Laurent Giraud, Ph.D., 2009)

For example, in the top-view diagram of the robot cell shown below, let us assume that the "safeguard distance"—the distance between the safety fence and the maximum reach of the robot inside—is 350 mm.

Suppose that the technical team has reported that the robot's furthest point, known as the "gripper" or "end effector," reaches a maximum height of 2000 mm during operation.

During the risk assessment, let us also assume that the assessor measured the height of the safety fence with a measuring tape and found it to be 1800 mm.

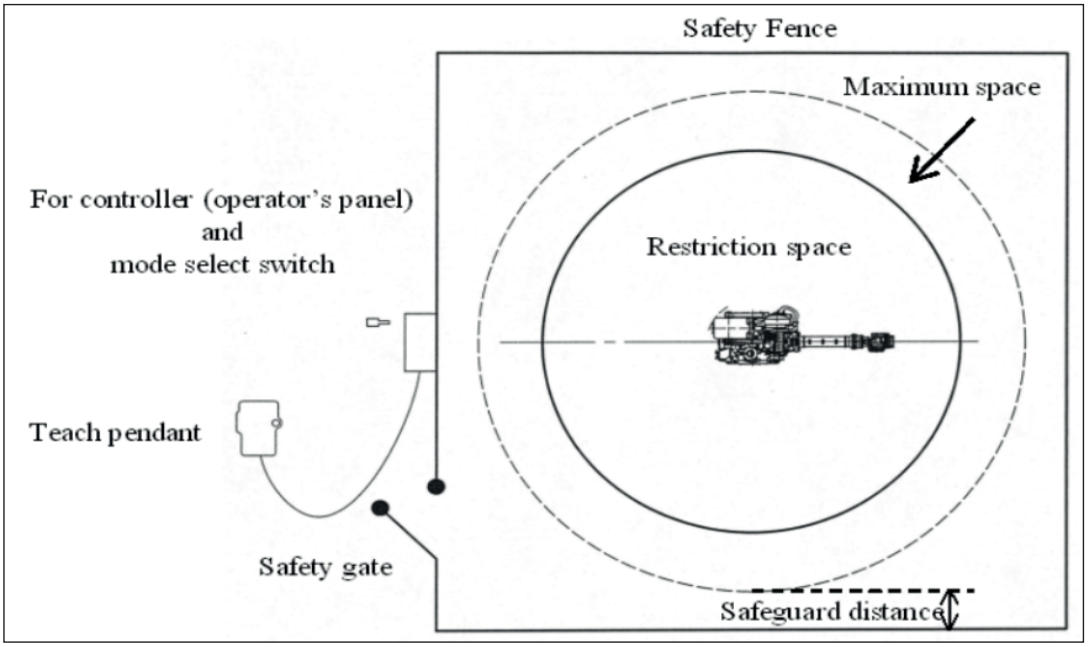


Figure 69: Example of Safety Distance Between a Robot Cell and Safety Fence (FANUC, Safety Manual)

Using all the information above, the suitability of the safety fence height from the floor can be verified by referring to the table below.

Tehlikeli alanın yüksekliği a (mm)	Tehlike alanına olan yatay mesafe C (mm)								
2500	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2400	100	100	100	100	100	100	100	100	0
2200	600	600	500	500	400	350	250	0	0
2000	1100	900	700	600	500	350	0	0	0
1800	1100	1000	900	900	600	0	0	0	0
1600	1300	1000	900	900	500	0	0	0	0
1400	1300	1000	900	800	100	0	0	0	0
1200	1400	1000	900	500	0	0	0	0	0
1000	1400	1000	900	300	0	0	0	0	0
800	1300	900	600	0	0	0	0	0	0
600	1200	500	0	0	0	0	0	0	0
400	1200	300	0	0	0	0	0	0	0
200	1100	200	0	0	0	0	0	0	0
0	1100	200	0	0	0	0	0	0	0
	Ayırıcı koruma tertibatlarının yüksekliği b (mm)								
	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2500

Figure 70: EN ISO 13857 Table 1 (SICK, Safe Machinery Guide, 2015)

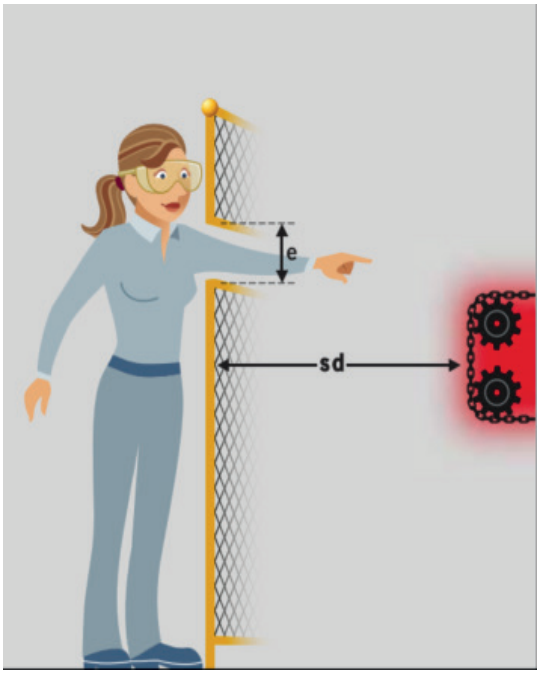


Figure 71: Example Illustration of Openings According to EN ISO 13857 (Laurent Giraud, Ph.D., 2009)

According to the results derived from the table and the field data, the minimum required distance between the safety fence and the robot's operating area should be 600 mm. Therefore, the height of the safety fence currently used for risk reduction does not comply with EN ISO 13857.In this case, it is recommended either to increase the height of the safety fence or to reposition the fence from 350 mm to 600 mm from the hazardous zone.Additionally, the EN ISO 13857 standard provides recommendations regarding the dimensions of openings on safety fences or any guards designed to prevent access to hazardous areas.

For example, in the following application, let us assume that the distance from the safety fence to the hazardous area where a finger-entrapment risk exists is 180 mm. This distance can be easily measured by the person conducting the risk assessment using a standard measuring tape during the evaluation process.



Figure 72: Example of Access Through an Opening to a Hazardous Area

In addition to the distance to the initial hazardous pinch point, the shape and size of the opening are also crucial factors. As outlined in the table from EN ISO 13857 below, there are three main types of openings: Slot, Square, and Round.In the illustration above, the opening is of the Square type, and if we assume that the opening size is 25 mm, then the safety evaluation should be conducted according to the corresponding criteria in the standard.

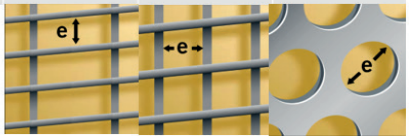
Vücut uzvu		Açıklık e (mm)	Emniyet mesafesi (mm)		
			Yarık	Kare	Daire
Parmak ucu		e ≤ 4	≥ 2	≥ 2	≥ 2
		4 < e ≤ 6	≥ 10	≥ 5	≥ 5
El ayasına kadar parmak		6 < e ≤ 8	≥ 20	≥ 15	≥ 5
		8 < e ≤ 10	≥ 80	≥ 25	≥ 20
		10 < e ≤ 12	≥ 100	≥ 80	≥ 80
		12 < e ≤ 20	≥ 120	≥ 120	≥ 120
		20 < e ≤ 30	≥ 850	≥ 120	≥ 120
Omuz eklemine kadar kol		30 < e ≤ 40	≥ 850	≥ 200	≥ 120
		40 < e ≤ 120	≥ 850	≥ 850	≥ 850
					

Figure 73: EN ISO 13857 Opening Calculation Table (SICK, Safe Machinery Guide, 2015)

Since the existing safety distance is 180 mm, it meets the required conditions stated above.For fixed guards such as safety fences that surround robot cells, the maximum permissible opening at the bottom of the fence should be 180 mm.This limitation ensures that unauthorized or accidental access to hazardous areas beneath the safety fence is effectively prevented.

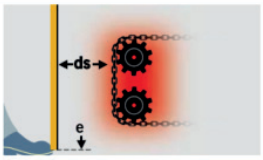
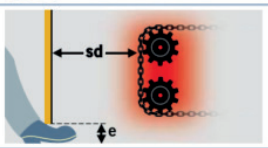
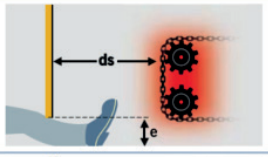
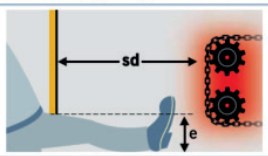
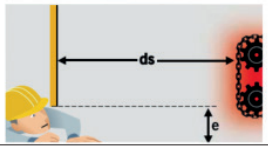
Part of lower limb	Illustration	Opening (mm)	Safety distance «sd» (mm)	
			Slot	Square or round
Toe tip		e ≤ 5	0	0
Toe		5 < e ≤ 15	≥ 10	0
		15 < e ≤ 35	≥ 80*	≥ 25
Foot		35 < e ≤ 60	≥ 180	≥ 80
		60 < e ≤ 80	≥ 650	≥ 180
Leg (toe tip to knee)		80 < e ≤ 95	≥ 1100	≥ 650
Leg (toe tip to crotch)		95 < e ≤ 180	≥ 1100	≥ 1100
		180 < e ≤ 240	not admissible	≥ 1100
Whole body		Attention: Slot openings with "e" > 180 mm or square or round openings with "e" > 240 mm allow access for the whole body. These dimensions are not permitted.		

Figure 74: EN ISO 13857 Bottom Opening Measurement Table (Laurent Giraud, Ph.D., 2009)

15.1.5 EN ISO 13855:2010 — Safety of Machinery — The Positioning of Protective Equipment in Relation to the Approach Speeds of Parts of the Human Body

During risk assessments in industrial robot cells, it is common to encounter electro-sensitive protective equipment (ESPE) and pressure-sensitive protective devices.This international standard determines the appropriate positioning of protective equipment based on the approach speed of parts of the human body.

It defines the variables derived from approach speed and provides a method for determining the minimum safety distance between the sensing field or the activating device of protective equipment and the hazardous area.

Running, jumping, or falling movements are excluded from the scope of this standard.Electro-sensitive protective equipment (ESPE) refers to safety devices used in place of fixed or movable guards, particularly in applications where frequent human interaction with the machinery is necessary to maintain production efficiency.

Light curtains are a type of electro-sensitive protective device.They consist of a transmitter and a receiver that emit and detect infrared beams across a defined area.If any of these beams are interrupted, the system immediately sends a signal to halt machine operations, thereby ensuring operator safety.



Figure75: Example of Finger Protection Light Curtain (Omron Electronics, F3SG-4R Product Image)



Figure 76: Example of Hand Protection Light Curtain (Omron Electronics, F3SG-4R Product Image)

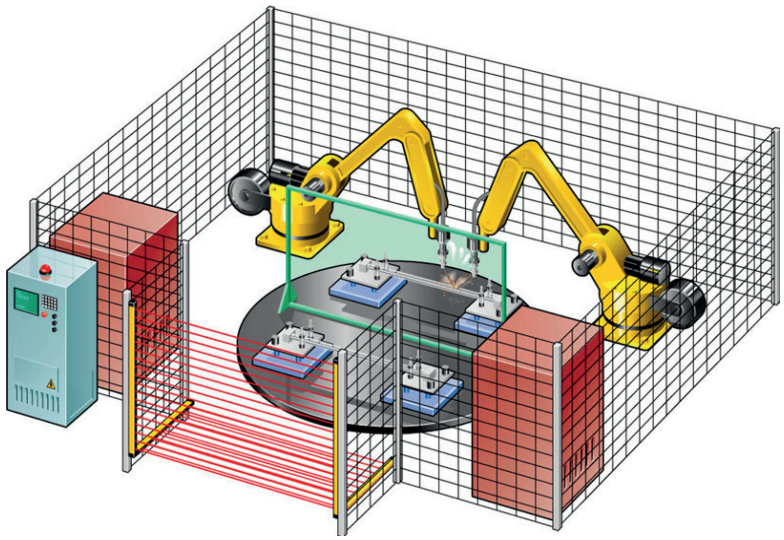


Figure 77: Robot Welding Cell with Hazardous Area Protected by a Light Curtain (Fabricating Metal Working, 2013)

• Area scanners are also a type of electro-sensitive protective device (ESPE).They are protective safety devices that detect the presence of people by scanning designated areas.When the emitted infrared laser beams hit an obstacle (object or person) and are reflected back, they send a signal that causes the machine to stop.

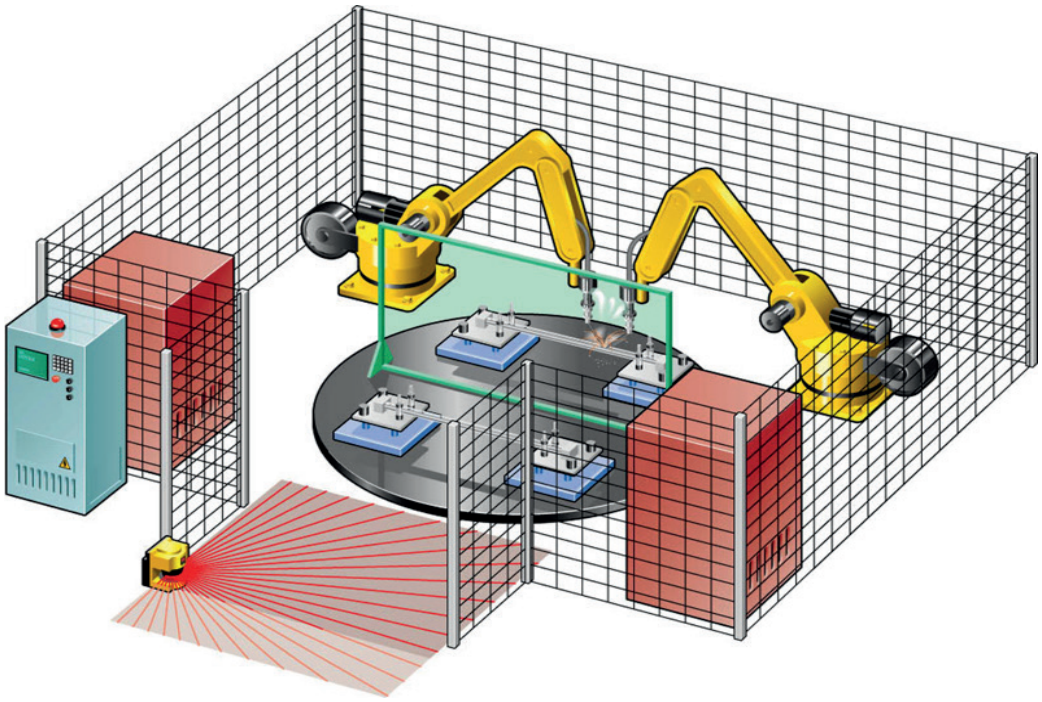


Figure 78: Robot Welding Cell with Hazardous Area Protected by an Area Scanner (Fabricating Metal Working, 2013)

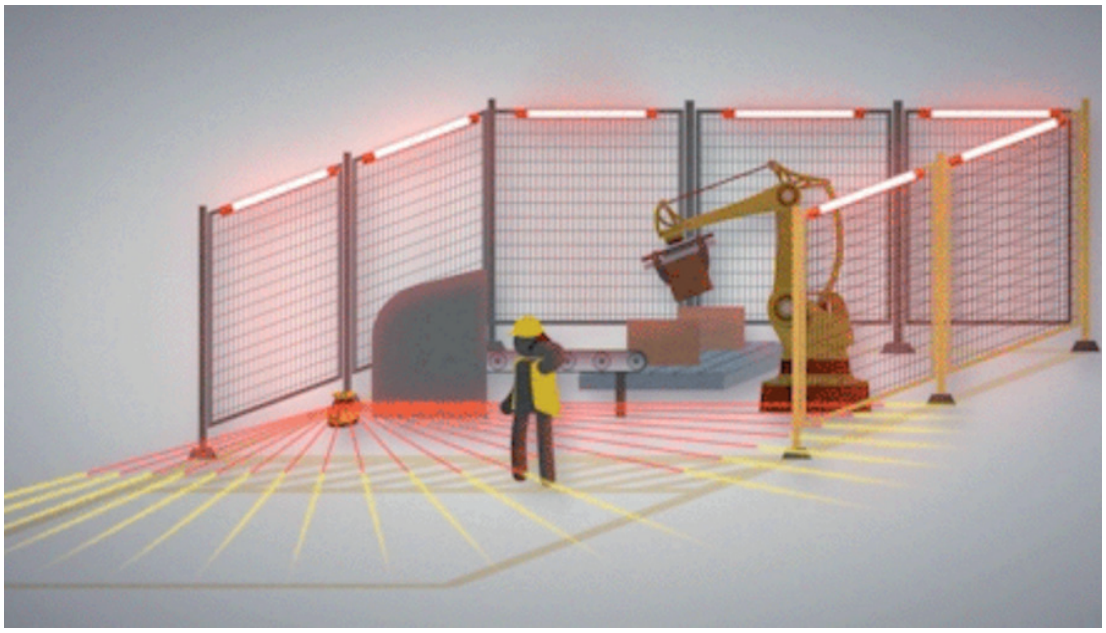


Figure 79: Robot Welding Cell with Hazardous Area Protected by an Area Scanner (Dacelsolutions, 2019)

The EN ISO 13855 standard provides detailed information on the positioning of the above-mentioned electro-sensitive protective equipment.During risk assessment, it should be verified that the lowest beam of the light curtains—such as those shown in the Figure below—is positioned at a minimum height of 300 mm above the floor.

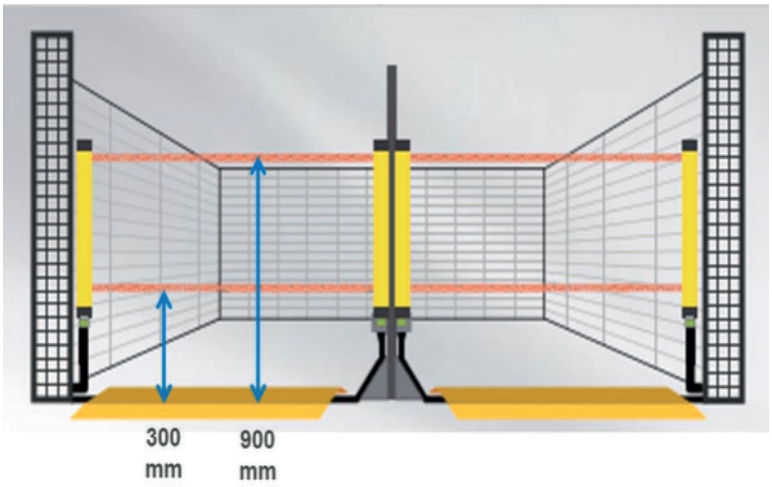


Figure 80: Recommended Lower and Upper Beam Heights According to EN ISO 13855 (Erhan Eskicumalı, 2021)



Figure 81: Example of an Improper Light Curtain Position (Erhan Eskicumalı, 2021)

If the application is in an environment where there is a possibility of children being present, the height of the lowest beam should be set to 200 mm instead of 300 mm.

If the lowest beams of the light curtains are higher than 300 mm, there is a risk that someone could crawl under the light curtain and enter the hazardous area.Therefore, this issue must be carefully considered during the risk assessment process.The same measurement also applies to area scanners, as shown below.

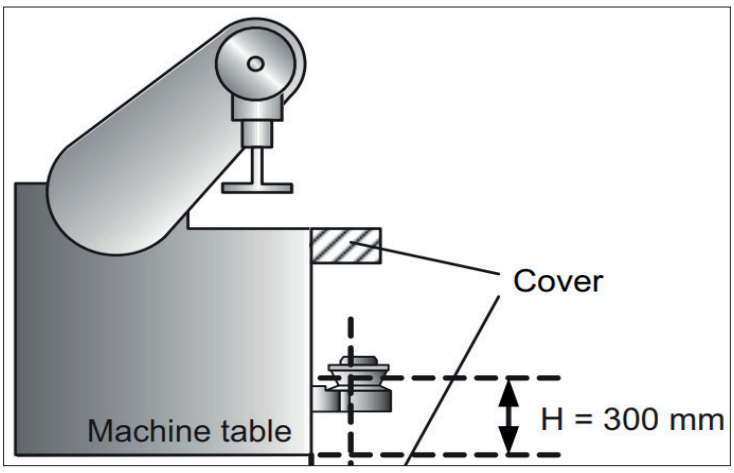


Figure 82: Properly Positioned Area Scanner at Correct Height from the Floor (Omron Electronics, 2020)

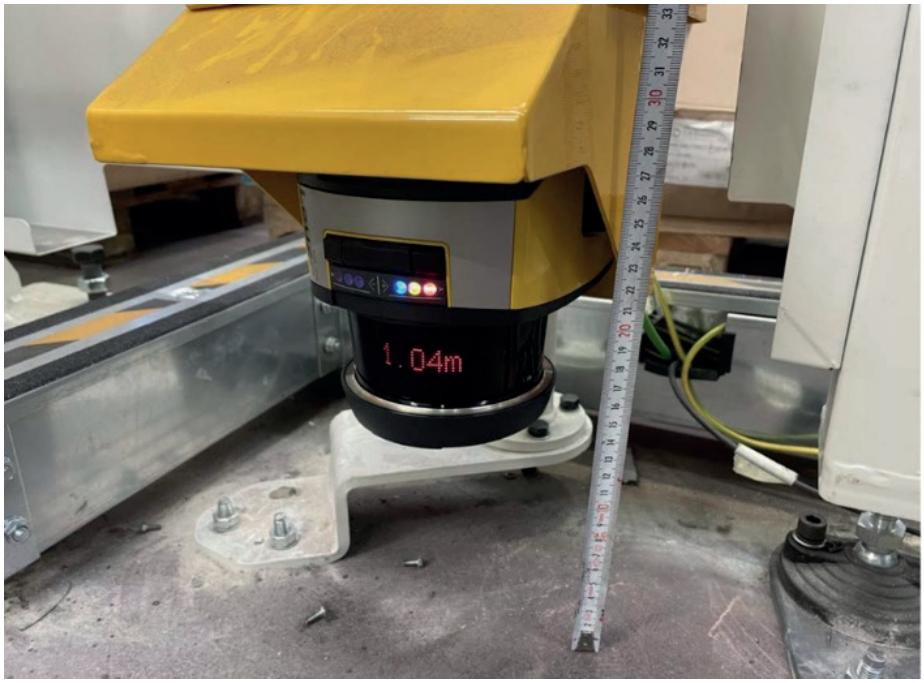


Figure 83: Properly Positioned Area Scanner at Correct Height from the Floor

The accuracy of the safety distance between the light curtain and the robot's hazardous motion can be verified by performing a machine stop time measurement. During the risk assessment process, it is essential to request the machine stop time measurement from the manufacturer.

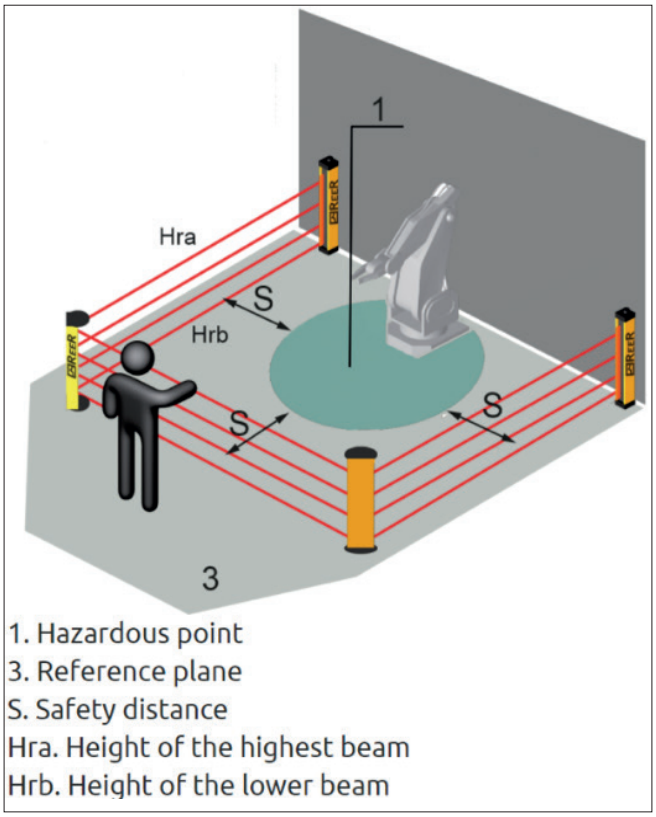


Figure 84: Safety Distance Between the Maximum Reachable Area of the Robot and the Light Curtain (REER Safety)

The basic principle of the machine stopping time measurement is to determine how many seconds it takes for the robot's hazardous movement to come to a complete stop once the electronic sensitive protective equipment (ESPE) is triggered.Based on this measured value, the safety distance is calculated using the formula given below.

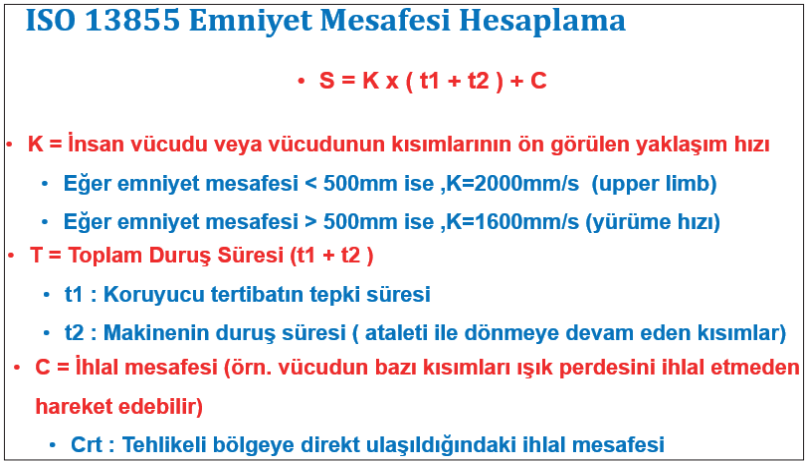


Figure 85: Safety Distance Calculation Formula According to EN ISO 13855

In this context, the additional distance in the measurement, represented by the variable C, varies depending on the resolution of the light curtain when calculating the safety distance for such a device.As shown below, light curtains are available in finger protection and hand protection models.

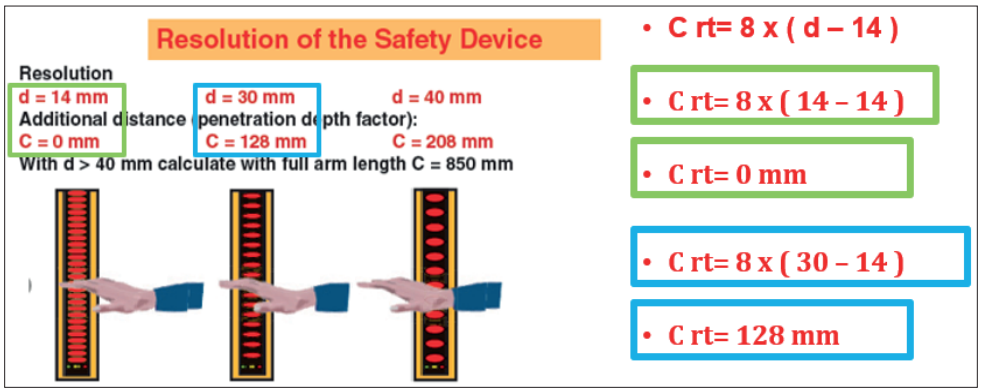


Figure 86: Calculation of the Additional Distance Parameter According to the Resolution of the Light Curtain (HHB, 2014)

Although the machine's stopping time can be theoretically estimated, it must be measured by calibrated equipment and verified by specialized organizations to ensure the correct positioning of the electro-sensitive protective devices.During a risk assessment, the existence of this measurement and verification report must always be confirmed.

15.1.6 EN 60204-1:2006 – Safety of Machinery – Electrical Equipment of Machines – Part 1: General Requirements

One of the critical topics to be considered during a risk assessment for any machine or robotic cell is electrical safety.The first question to ask is whether the robotic cell has an electrical safety test report in compliance with the LVD – Low Voltage Directive.These tests, which include earth continuity, high voltage (dielectric strength), and insulation resistance, ensure that operators can use robotic cells without electrical safety hazards.

When performing a risk assessment, you can open the electrical panel and verify the following points required by EN 60204-1:

According to IEC/EN 60204-1, conductors should be identified by color, number, alphanumeric code, or a combination of these.

The recommended wire color codes are as follows:

	AC / DC power circuits
	AC control circuits
	DC control circuits
	External circuits
	Protective Earth (PE)
	Neutral

Figure 87: Recommended Cable Colors According to EN 60204-1

The main switch used to disconnect the machine's power supply should be mounted in an easily accessible location.The recommended installation height is between 60 cm and 170 cm above the floor.



Figure 88: Main Switch

1. Basamak

Derece	Sembol	Koruma	Açıklama
0		Korumasız.	Kullanıcının tehlikeli bölgelere ulaşmasını ve yabancı katı cisimlerin cihazın içine girişini engeller.
1		Çapı ≥ 50 mm olan katı cisimlere karşı koruma.	Çapı 50 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
2		Çapı ≥ 12,5 mm olan katı cisimlere karşı koruma.	Çapı 12,5 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
3		Çapı ≥ 2,5 mm olan katı cisimlere karşı koruma.	Çapı 2,5 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
4		Çapı ≥ 1 mm olan katı cisimlere karşı koruma.	Çapı 1 mm'den büyük cisimler cihazın içine temas edemez.
5		Toza karşı korumalı.	Toz girişi tamamen engellenemez fakat koruma derecesi tozun ürüne zarar vermesini engelleyecek kadardır.
6		Toz geçirmez.	Toz girişi kesinlikle yok.

Figure 89: IP Protection Classes (Source: KAREL)

15.1.7 EN ISO 14120:2015 – Safety of Machinery – Guards – General Requirements for the Design and Construction of Fixed and Movable Guards

This international standard specifies the general requirements for the selection, construction, and design of guards provided to protect persons from mechanical hazards.

To minimize access to hazardous areas, machines should be designed so that operations such as lubrication, adjustment, and maintenance can be performed without removing or opening the guards.When this is not possible, access should be permitted for the following purposes:

- Loading and unloading
- Tool changing and adjustment
- Lubrication
- Maintenance and repair
- Cleaning, etc.



Figure 90: Maintenance Operation Image

Terms and Definitions:

- **Fixed Guard:** A guard that is fastened (e.g., by screws, welding, etc.) and can only be opened or removed using tools or by destruction.
- **Tool:** An instrument used to tighten or loosen a fastening element (a coin or nail file is not considered a proper tool).
- **Use of Tools:** An action taken under specific conditions by a person knowledgeable about safe working procedures.

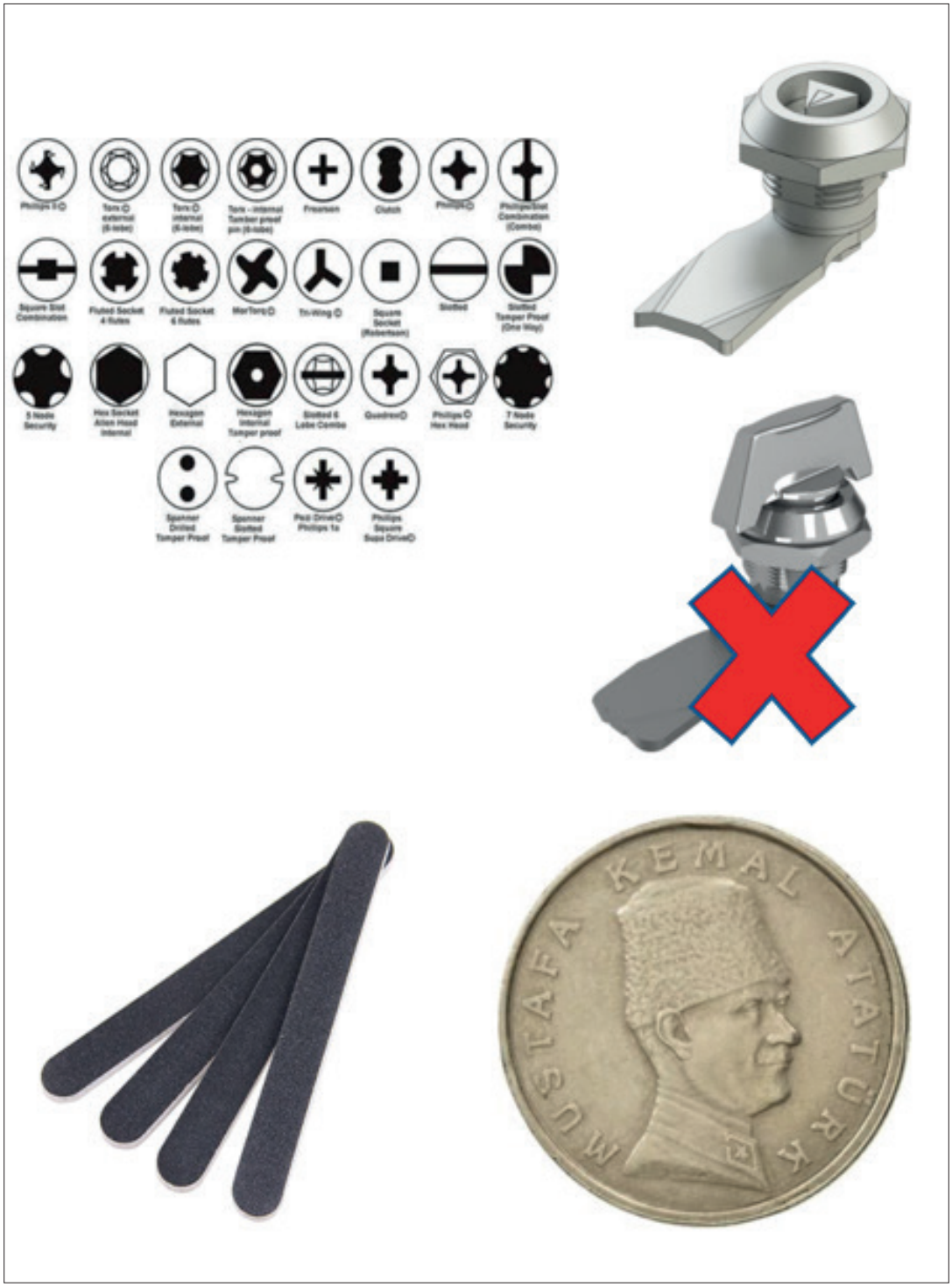


Figure 91: Examples of Tools Mentioned in EN ISO 14120 (Erhan Eskicumalı, 2021)

It is important to be familiar with these definitions in EN ISO 14120 when conducting risk assessments for robot cells. The definition of a fixed guard refers specifically to a guard that can only be removed using a particular tool.

In a robot cell where guards are fastened using butterfly-type clamps as shown above, such guards can be easily opened by anyone in the area and therefore cannot be considered fixed guards. If, during the risk assessment, a guard that was designed as a fixed guard is found to be easily removable without the use of any tools, this indicates a risk of easy access to the hazardous area. In such cases, it should be recommended as a risk reduction measure that these fixed guards be brought into compliance with EN ISO 14120.

Fixed Guard: The safety fences permanently installed around robot cells fall under this type of guarding.



Figure 92: Fixed Guard Mentioned in EN ISO 14120 (Laurent Giraud, Ph.D., 2003)

Interlocked Movable Guards:

Interlocked guards, available in both locking and non-locking types, are used to send a stop signal for hazardous movements when access inside the cell is required for tasks such as maintenance, cleaning, adjustment, or teaching.



Figure 93: Interlocked Movable Guard Mentioned in EN ISO 14120 *(SICK, 2018)*

The interlocking devices installed on movable guards are available in various models, including magnetic, mechanical, and locking types.



Figure 93: Interlocking Devices (SICK, 2022)

The EN ISO 14120 standard includes a guard selection diagram that helps determine the appropriate type of guard based on the information obtained from the specific application.

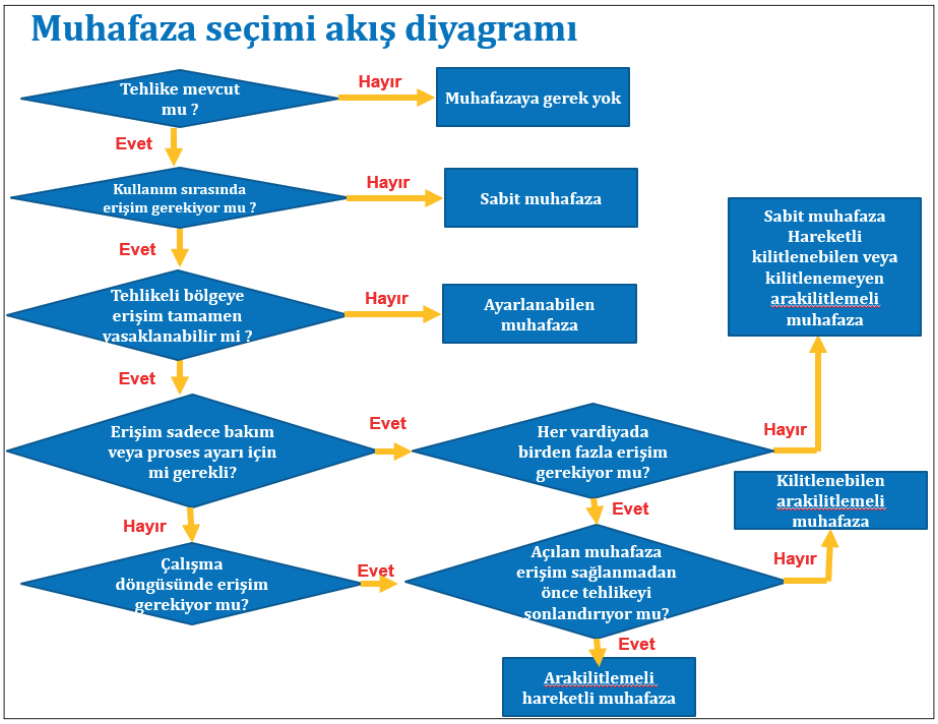


Figure 94: Guard Selection Flow Diagram Specified in EN ISO 14120 (Erhan Eskicumalı, 2021)

Colors of Guards:

- To draw attention to hazards, the dangerous parts of a machine may be painted in **brighter colors.** For example, if both the guard and the machine are the same color, the hazardous parts should be painted in a **contrasting bright color.**
- Care must be taken when choosing **color combinations**. For example, **yellow** and **red** are normally reserved for **emergency stop functions.**
- In areas where the **process must be visually monitored**, guards should **not be painted in bright colors.** For instance, **yellow** may interfere with the visibility of the process itself.

15.1.8 EN ISO 13849-1:2015 — Safety of Machinery — Safety-Related Parts of Control Systems

This standard, which covers the **safety-related parts of control systems**, is frequently used during risk assessments of robot cells.

The **EN ISO 10218** standard specifies that the safety-related parts of control systems must meet the **Category 3, Performance Level d (PL d)** requirement according to **EN ISO 13849-1.**

In a robot cell, the following safety functions are commonly used as **risk reduction measures:**

- Emergency stop safety function
- Safety-related stop initiated by a light curtain
- Safety-related stop initiated by an area scanner
- Safety-related stop initiated by an interlocking device

During the risk assessment, in order to verify whether these safety functions meet **Category 3 PL d** according to **EN ISO 13849-1**, the **electrical circuit diagrams** (and if applicable, **pneumatic and hydraulic schematics)** must be accessible. If the person conducting the risk assessment is not able to interpret electrical circuit diagrams, they should seek assistance from a **technical expert** familiar with **EN ISO 13849-1** to correctly evaluate the system. Robot integrators, when manufacturing cells, are obligated under the Machinery Safety Directive 2006/42/EC to demonstrate that their implemented safety functions meet Category 3 PL d requirements according to EN ISO 13849-1. Therefore, during a risk assessment, the presence of an EN ISO 13849-1 Compliance Report should be verified while examining the safety-related parts of the control systems. The **S**ISTEMA software, which is publicly available and free of charge, allows the creation of an EN ISO 13849-1 Compliance Report and includes extensive product libraries from various manufacturers. Examples of **safety architectures** that ensure the robot is stopped at Category 3 PL d level for the above-mentioned safety functions are as follows:

- **Emergency Stop Safety Function:**

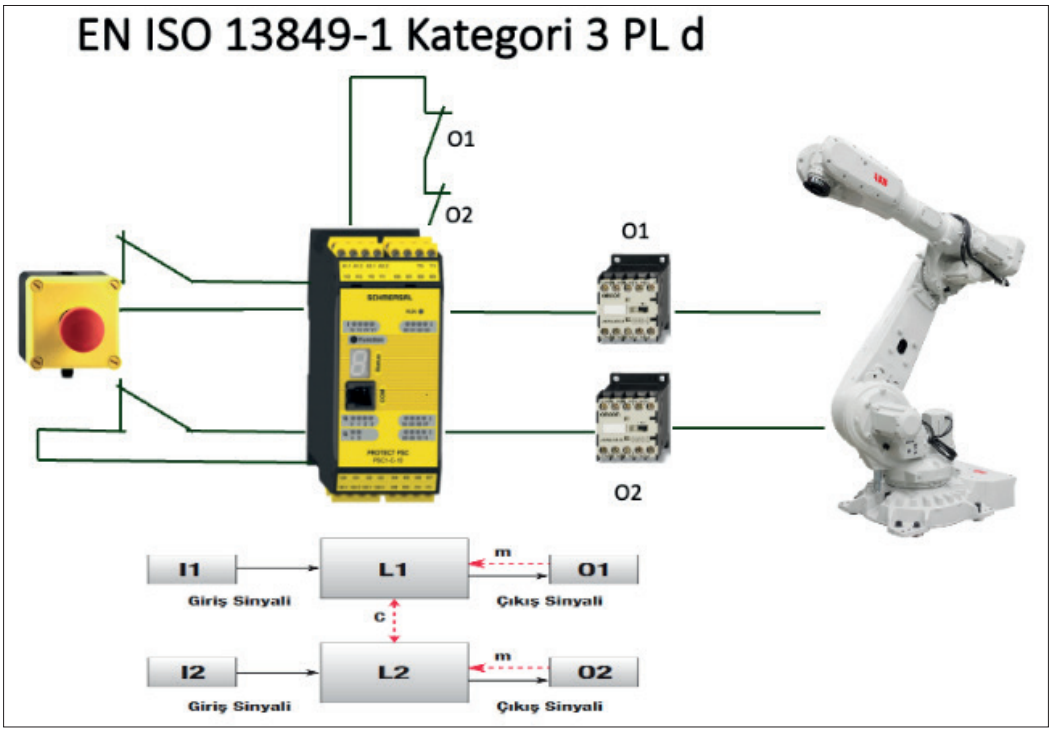


Figure 95: Emergency Stop Function at Category 3 PL d Level According to EN ISO 13849-1 (Erhan Eskicumalı, 2025)

In the emergency stop safety architecture shown above, a dual NC contact emergency stop button is connected to the safety controller through an architecture that detects short circuits and open circuits between the contacts by means of test pulse signals supplied by the safety controller.Through two contactors monitored by the safety controller, the emergency stop signals of the robot controller are interrupted.Additionally, as required by the Category 3 PL d architecture described on previous pages, a feedback signal is received from the output contactors back to the safety controller.The architecture illustrated above is one that will commonly be encountered during risk assessments of robot cells. To verify whether the emergency stop safety architecture meets Category 3 PL d, it is essential to review and interpret the electrical circuit diagram.One of the most frequent mistakes made during risk assessments is assuming that the safety functions meet Category 3 PL d simply because a safety relay or controller is observed inside the electrical panel — without actually reading the electrical diagram.For example, a common error made by robot integrators is using a single contactor to interrupt the signal to the robot controller instead of two, as required by the Category 3 architecture (labeled O1 and O2 in the diagram above).Using only a single contactor reduces the safety architecture from Category 3 to Category 1.

- **Safety-related stop initiated by an interlocking device:**

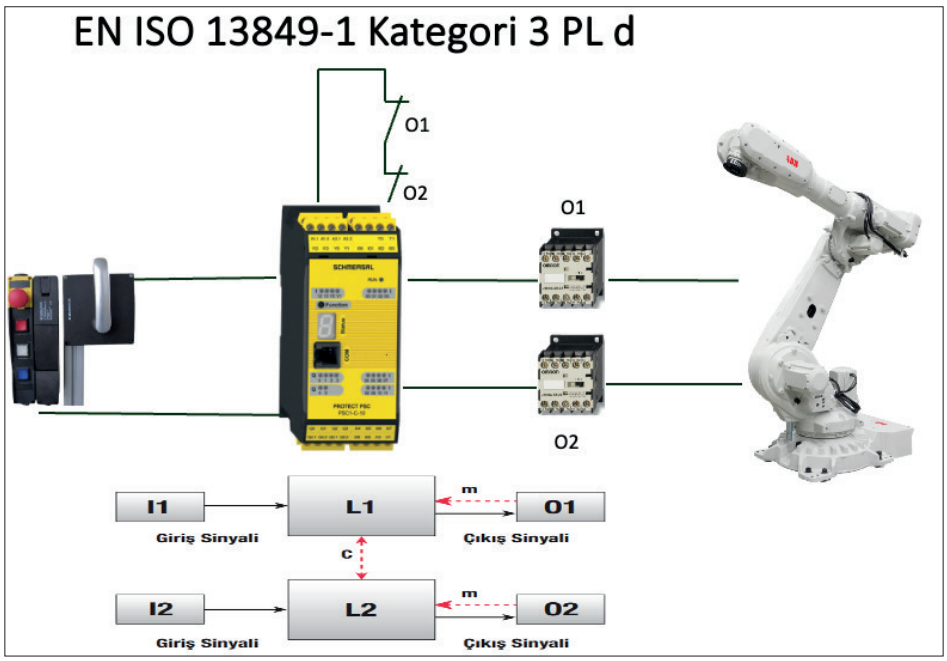


Figure 96: Safety-Related Stop Function Initiated by an Interlocking Device at Category 3 PL d Level According to EN ISO 13849-1 (Erhan Eskicumalı, 2025)

In the risk assessment, as with the emergency stop safety function, the important point is to verify whether the entire safety architecture of the safety-related stop function initiated by the interlocking device meets the Category 3 PL d requirement.Similarly, during this verification, the electrical circuit diagram must be carefully examined. If the door to which the interlocking device is connected provides access to an area containing pneumatically operated moving components, and if the air in these components is to be safely exhausted when the door is opened, then the pneumatic circuit diagram should be reviewed alongside the electrical one.Below is an example of a minimum Category 3 PL d architecture for safe air exhaust.Safe air exhaust is not only relevant to the safety-related stop function initiated by the interlocking device but also applies to emergency stop and light curtain-initiated stop safety functions.Pneumatic risks should never be overlooked during a risk assessment.

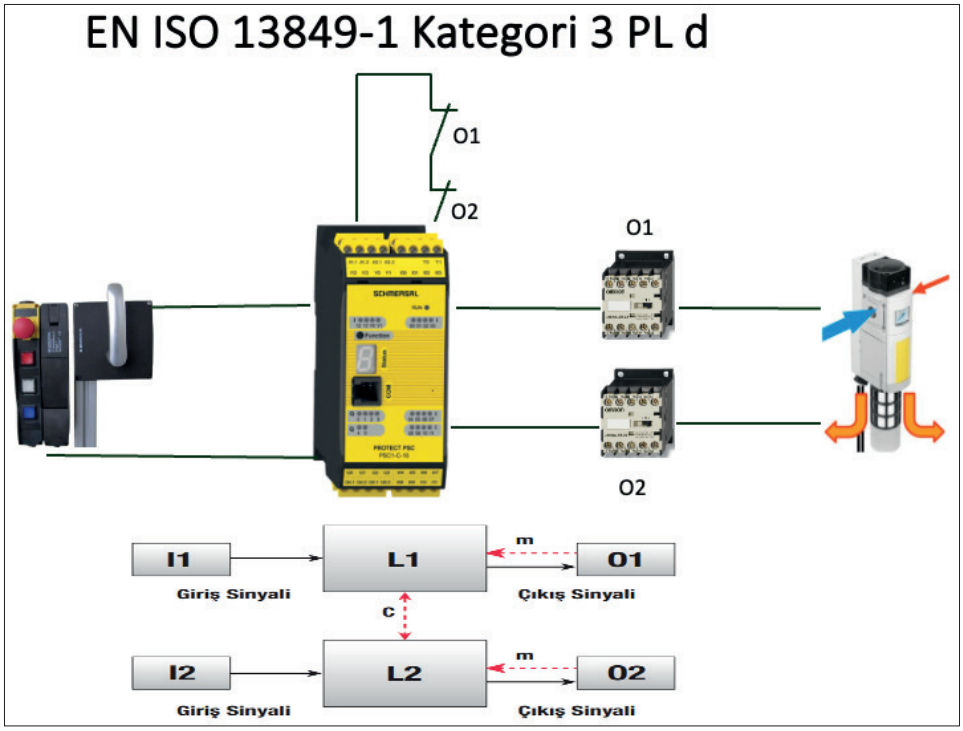


Figure 97: Safe Air Exhaust Safety Function Initiated by an Interlocking Device at Category 3 PL d Level According to EN ISO 13849-1 (Erhan Eskicumalı, 2025)

- **Safety-related stop initiated by a light curtain or area scanner:**

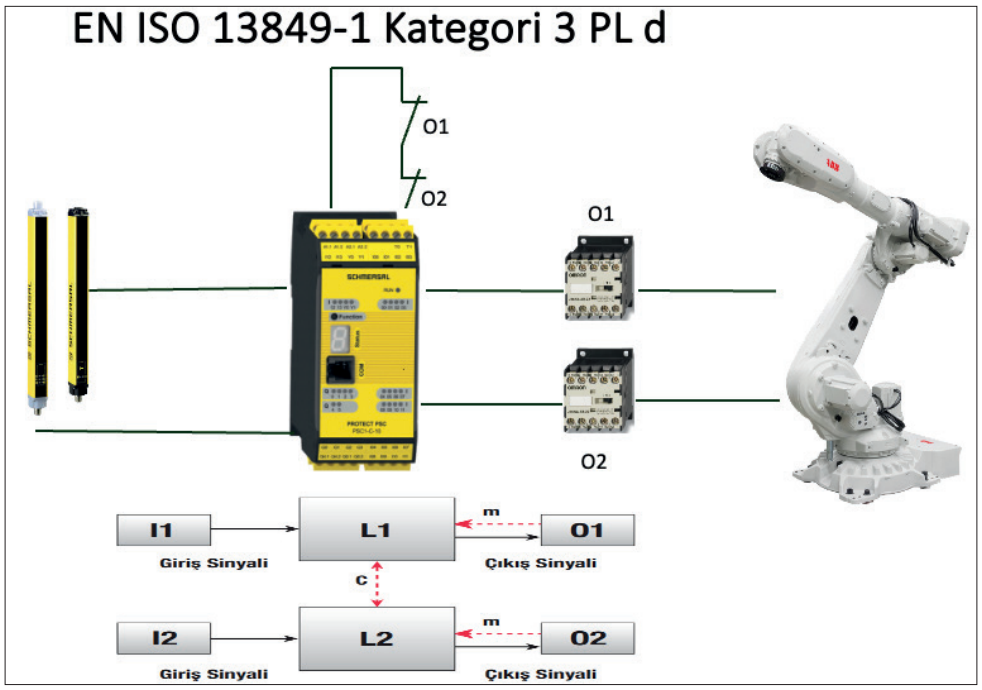


Figure 98: Safety-Related Stop Function Initiated by a Light Curtain at Category 3 PL d Level According to EN ISO 13849-1 (Erhan Eskicumalı, 2025)

Light curtains and area scanners, as types of electro-sensitive protective equipment, must also be verified—through examination of the electronic circuit diagram—to ensure that their associated safety functions meet the Category 3 PL d requirement in accordance with EN ISO 13849-1.

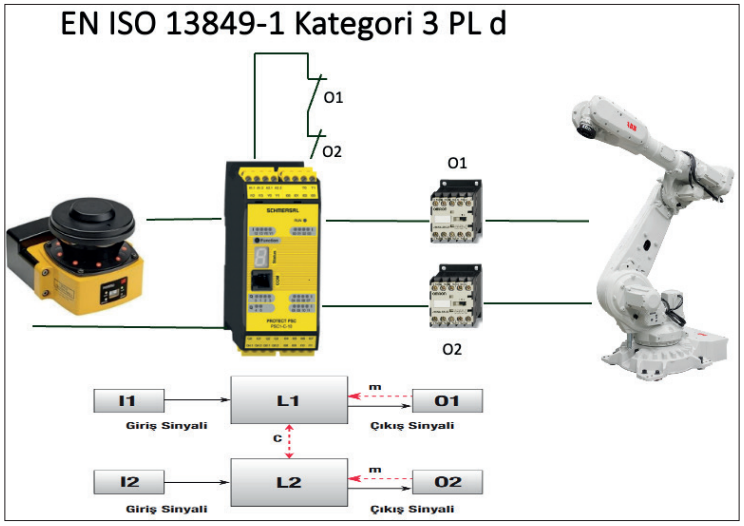


Figure 99: Safety-Related Stop Function Initiated by a Safety Area Scanner at Category 3 PL d Level According to EN ISO 13849-1 *(Erhan Eskicumalı, 2025)*

15.1.9 EN ISO 14118:2018 – Safety of Machinery – Prevention of Unexpected Start-Up
EN ISO 1037:1995+A1:2008 – Safety of Machinery – Prevention of Unexpected Start-Up

- This international standard specifies the **requirements necessary to prevent unexpected machine start-up**, particularly in situations where people need to intervene within hazardous areas.
- Examples of tasks that require the presence of a person within a hazardous area include:

» Inspection

» Corrective actions (e.g., clearing blockages)

» Adjustment

» Manual loading / unloading

» Tool changing

» Lubrication

» Cleaning

» Decommissioning

» Maintenance / repair

» Observation and testing



Figure 100: Maintenance Illustration

- This international standard covers unexpected start-ups that may occur due to any type of energy source.

» Power sources: for example, *electrical, pneumatic, hydraulic*

» Stored energy: for example, *gravity, compressed spring*

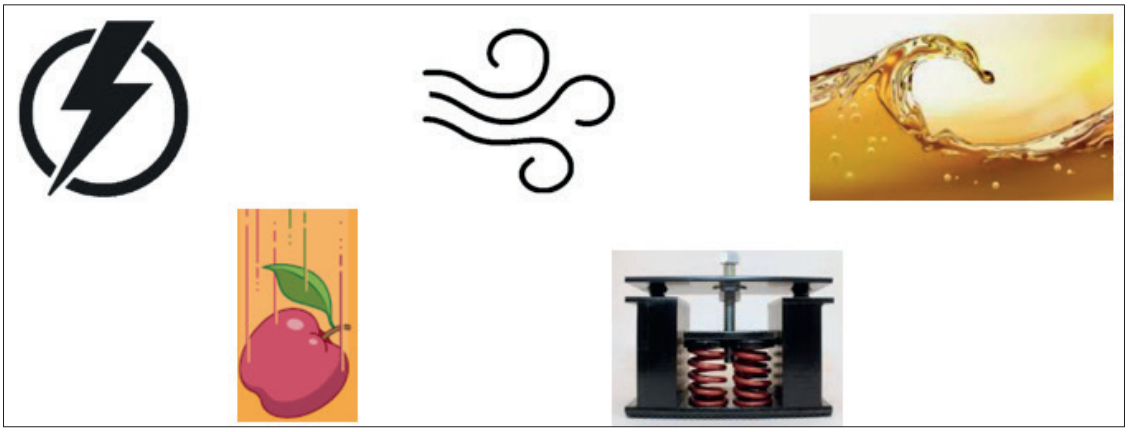


Figure 101: Energy Sources Specified in EN ISO 14118

Isolation Devices:

- Isolation devices must ensure reliable disconnection and separation from the energy source.
- The position of the isolation device must be clearly indicated and leave no room for ambiguity.
- The locations and number of isolation devices should be determined based on the risk assessment, – for example, considering hazardous areas where personnel are present and the type of work being performed (maintenance, cleaning, etc.).
- During isolation of the machine, power supply to specific circuits should continue when necessary, – for example, for operator safety, maintaining protective information systems, light sources, or continuous warning signals.
- Isolation devices must be designed so that they can be locked in place.



Figure 102: Lockable Type Isolation Devices

15.1.10 EN ISO 10218-2:2011 – Robots and Robotic Devices – Safety Requirements for Industrial Robots – Part 2: Robot Systems and Integration

The EN ISO 10218-2 standard makes reference to many of **the harmonized standards** explained in the preceding sections. Examples related to these referenced standards have been provided earlier to facilitate a clearer understanding of their application. In addition, this section outlines risk reduction methods used to prevent the risk of personnel being trapped inside a robotic cell.

- **Pre-Reset Application:**

The pre-reset function is frequently used in robot cells where there is a possibility of personnel remaining inside the hazardous area. Its operating principle is as follows:

If access to the hazardous zone is gained either through an interlocked gate (which stops the robot when opened) or by violating an electro-sensitive protective device (as shown in the Figure below), the operator must first press a pre-reset button located inside the hazardous area. After leaving the area, the operator can then issue a start command to the robot. This procedure ensures that the operator, before restarting the robot, checks the interior of the cell and verifies that no one remains inside.

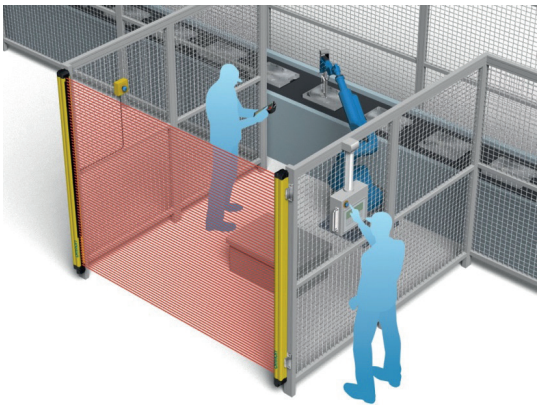


Figure 103: Pre-Reset Safety Function (Omron Electronics, 2014)

- **Use of LOTO/EKED-Compatible Interlocking Devices:**

One of the most effective solutions to prevent the risk of personnel remaining inside the robotic cell is the use of LOTO/EKED-compatible interlocking devices.When maintenance, cleaning, adjustment, or teaching tasks require entry into the cell, the responsible operator applies their personal padlock to the interlock device before entering, thereby preventing the door from being closed while they are inside.During the risk assessment, it is essential to verify whether the interlocking devices installed on access doors are compatible with LOTO/EKED procedures.



Figure 104: LOTO/EKED-Compatible Locking-Type Interlocking Device (Schmersal, 2025)



Figure 105: LOTO/EKED-Compatible Locking-Type Interlocking Device (Schmersal, 2025)

- **Mechanical Trapped Key System:**

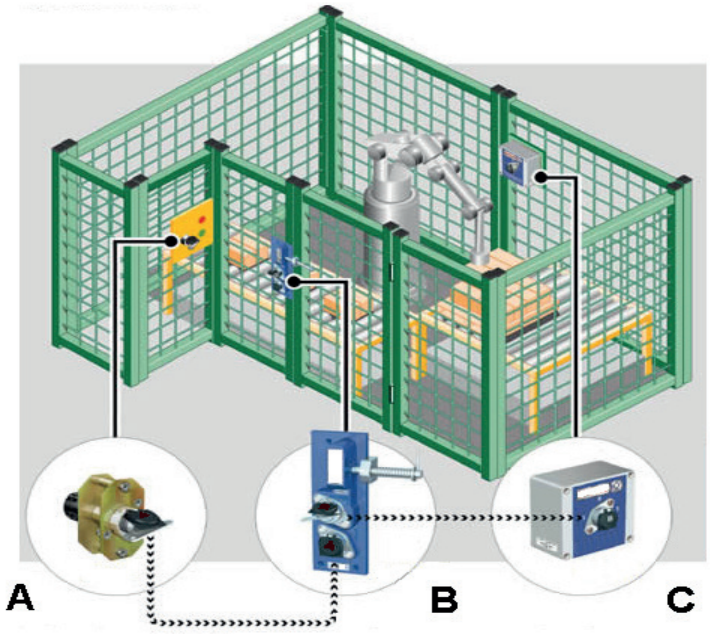


Figure 106: Mechanical Trapped Key System Application

Operating Principle:

- Isolate the power to the machine and remove the key from position A.
- Release the key from B and insert it from A to B.
- The door can now be opened.
- The key removed from B can be kept as a safety key or inserted into C to allow the machine to operate in safe mode.
- To restart the machine, reverse the procedure.

16. CONCLUSION AND RECOMMENDATION

The risk analysis process is designed to protect workers who operate industrial machinery. In the context of robotics, it is applied to ensure the safety of users within robotic cells while performing operations involving robots and their accessories. Risk analyses are implemented both to standardize robot integration and to ensure that a defined level of safety has been achieved within the robotic cell. However, the risk analysis process must also be carried out in accordance with the laws and regulations applicable to the locations where the cell is integrated. Even though robot and robotic device manufacturers establish safety requirements for their equipment — such as Performance Level d (PL = d), Category 3 — there may still be critical aspects that need to be addressed during the risk analysis process, taking into account the specific application and environment in which the robot operates. Because direct or close interaction between humans and robots occurs in collaborative applications, such applications must be approached with the utmost seriousness and careful risk management.

During risk assessments, it must be recognized that dynamic collisions between humans and robots can have various adverse effects on the human body. For example, even if the impact velocity is not high, a sudden rotation of the head caused by a collision can be extremely harmful to the skull and brain. Although ISO/TS 15066 specifies impact threshold values for the head, it does not extensively address the potential brain injuries that could result. A study conducted for NATO indicated that life-threatening damage to the head and neck may occur before any detectable brain damage is sustained; however, other sources have not confirmed this finding, and some have even suggested the opposite.

Due to the ethical challenges associated with obtaining scientific data on forces that cause various bodily injuries, many of the available data sources are based on studies conducted using young, physically fit individuals, cadavers, or computer models. The resulting data are inconsistent and patchy, and their applicability across different age groups and body characteristics is limited. Research has shown that the elasticity of bones and soft tissues decreases significantly with age — for example, a 20% reduction in flexibility between the ages of 20 and 80 is possible — and this decline can vary greatly between individuals. Because of this lack of reliable data, the values presented in ISO/TS 15066 may appear somewhat conservative; however, the scientific validity and origin of the data used in the draft should ideally be verified with the ISO developers.

In ISO/TS 15066, the reference data for use in risk analyses are limited to specific body regions — namely the head (including the neck), chest, abdomen, hip, pelvis, upper arm, elbow, hand and fingers, knee, foot, and leg. Other body regions fall outside the defined scope, and scenarios for all body parts in the event of contact have not been comprehensively studied.

In the first draft of ISO/TS 15066, it was not clearly stated that the primary goal was to avoid collision and maintain a safe distance between humans and robots, nor was it clearly specified that the force thresholds in ISO/TS 15066 would apply only when the systems designed to maintain a safe distance fail. This omission was corrected in the final draft, and the clarification is crucial. The inability to maintain a safe distance significantly influences both the level of risk faced by human collaborators working with cobots and the determination of acceptable injury criteria. Whether people are adequately protected depends largely on the likelihood of collision and the forces involved. Therefore, in terms of safety management for collaborative robot systems, the failure modes and failure rates of the mechanisms protecting operators from collisions are of critical importance, and the frequency of potential collisions must not be overlooked in safety calculations. The draft also does not provide limits for all body regions, nor does it include comprehensive scenarios detailing what happens in the event of contact across all body parts. Furthermore, while ISO/TS 15066 recommends the use of various personal protective equipment (PPE) to minimize the impact of potential collisions in collaborative environments, it does not offer detailed information on how such protective gear would behave under force exposure — that is, how the force transmitted through the PPE would ultimately affect the operator during contact, collision, or entrapment.

When potential risk information has been accurately identified in advance, reliable risk analyses can be conducted using established methods such as Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA). However, when designing a new collaborative workspace where there is insufficient preliminary knowledge about potential risks, these two methods may not yield successful results, as they do not inherently account for the specific tasks to be performed. In such cases, Job Safety Analysis (JSA) — also referred to as Occupational Safety Analysis — becomes a more suitable approach for risk assessment. The primary objective of JSA is to analyze sub-tasks in terms of potential hazards and to propose methods or procedures that can either reduce or eliminate the effects of those hazards.

All types of industrial machinery, including robots, and their use within a production facility must comply with applicable safety standards. While all robots and industrial machines pose certain risks during operation, collaborative robots introduce additional unique risks due to their direct interaction with humans. Therefore, the risk assessment methods employed must be capable of meeting the requirements specified in the relevant standards. Effectors, power sources, or external energy connections must comply with the information provided in the General Machinery Safety Standard SS-ISO 12100:2010, which defines the concepts and principles to be applied during the risk assessment process. The safety design of industrial robots must be carried out in accordance with the recommendations stated in SS-ISO 10218-1:2011, which provides guidance to manufacturers regarding the necessary safety measures for robots and for integrated systems in which multiple robots operate together. The newly published ISO/TS 15066 standard specifically addresses Collaborative Robots (Cobots), defining not only their safety requirements but also what needs to be done to ensure the safety of the shared workspace where operators and collaborative robots interact.

A comprehensive literature review on existing safety analysis research in the field of robotics revealed that none of the studies identified the operator as a proactive factor. In general, little attention has been given to safety violations caused by human activities and human–robot interactions. Moreover, there is currently no alignment between international standards and the broader robotics community on this issue. In collaborative work environments, two key concepts define operator behavior: cognitive models and task analytic models. In addition to these, it is necessary to identify the principles that lead to cognitively plausible human behaviors — such as repetition, sequence errors, and unauthorized access — and to establish cognitive templates derived from cognitive psychology to represent such behaviors. Because cognitive templates do not account for reasonable errors arising from human creativity, it is essential to maintain control over the preconditions and postconditions during monitoring of robot movement.

A common theme emerging from robot-related accident investigations is that, although individuals are aware they are within the robot's operating area and conscious of the robot's movements, they are often surprised by the position of the moving robot part at the moment of collision. This is very important in that it highlights the predictability of humans failing to remain within a defined safe three-dimensional zone — a factor that must be incorporated into risk assessments. Such a factor will significantly influence the selection of acceptable injury levels for human–robot collisions, since it is foreseeable that humans will make mistakes while collaborating with robots, and thus variable and unreliable human behaviors must be clearly understood and addressed. Machine designers must, during the design phase, assume that operator movements will not always be safe when working alongside robots, and therefore must account for protective barriers, all types of risk-reducing safety measures, and their potential performance, in accordance with the collision and injury criteria outlined in ISO/TS 15066. When a collaborative robot protection system is disabled or bypassed, the resulting hazardous situation may vary in severity — from difficult to mitigate to easily recoverable — and thus each scenario must be examined in detail.

The question of whether human behavior and performance will pose more or fewer issues in collaborative robot systems compared to conventional machinery must be evaluated on a process-by-process basis. Recent studies indicate that human–robot interactions may introduce additional complications, and until these details are fully resolved, robots may not yet be suitable for certain industrial applications. While humans rely on habitual expectations and reflexive avoidance behaviors during potential collisions with robots, it is equally important to consider the possible failure scenarios that may arise when these reflexes or assumptions fail.

Although ISO/TS 15066 continues to evolve, it explicitly acknowledges that no existing instrumentation can yet perform all the tests described within it. In the automotive industry, injury criteria and biofidelic test mannequins have been developed to assess injury risks in collision scenarios; however, the testing instrumentation required for evaluating robot collisions appears to be somewhat simpler, as automotive collision scenarios involve more complex variables — such as seating configurations, occupant positioning, and impact geometry. Additionally, if personal protective equipment (PPE) is used during such collisions, it is necessary to investigate the extent to which the robot's impact force is transmitted through the PPE to the operator, and to determine the PPE's capacity to absorb or mitigate collision forces.

To achieve more reliable and comprehensive results in future risk analyses, it is considered beneficial to include the following aspects in future revisions of the ISO/TS 15066 standard:

- Inclusion — or explicit reference — of a list of studies and data sources used to establish the force limit values and the overall approach presented in the draft ISO document. This would clarify which materials and research were used to develop the current version and indicate what new scientific findings should be considered during future revisions of the standard.
- Incorporation of information regarding typical human movement speeds within the workspace, which would help demonstrate how the nature of impact forces changes when a robot collides with a moving human.
- Inclusion of the frequency of potential collisions and resulting injuries between humans and robots as part of the collision criteria, rather than focusing solely on injury severity.
- Utilization of a graphical flowchart as a roadmap to guide the risk assessment process, making it more intuitive and consistent across different users.
- Consideration of psychological factors when defining acceptable collision criteria — for example, assessing how the psychological effects of a collision experience may influence an operator's confidence and performance when working with collaborative robots.
- Evaluation of how the angle of contact between a robot surface and a human body part can alter the nature of the injury for a given collision force. For instance, a force that might be acceptable when applied at an angle to the skin surface could cause significant damage when applied perpendicularly. This factor is not explicitly addressed within the current ISO/TS 15066 draft and is only briefly mentioned.
- Quantification and characterization of the additional forces that human motion may contribute in human–robot collision scenarios, as well as a formal assessment of how personal protective equipment (PPE) affects such interactions — including its capacity to absorb or transmit impact forces to the operator.
- Greater attention should be given to the potential movement of the human operator toward the robot, as this motion could combine with the robot's speed to amplify collision forces to levels that cause greater injury. Determining the additional forces that human motion may contribute in a collision was beyond the scope of the original study; however, if the purpose of force thresholds is to limit injuries to acceptable levels, then human motion dynamics must be carefully examined in future research and standardization efforts. Human motion relative to the robot is somewhat predictable, but the variability in human movement and associated speeds make risk assessment significantly more complex. It is also unclear whether the force values given in the ISO/TS 15066 draft allow for any conditions related to human motion. Traditional machinery safety standards already ensure safe distances in hazardous zones by taking human approach speeds into account.
- Since many of the studies referenced in the standards have been conducted on young adult male subjects or cadavers, the results must be applied to a wider population despite being based on limited sample sizes and demographics. This generalization should be explicitly acknowledged and addressed in future revisions.
- The ISO/TS 15066 draft provides no confirmation that it considers forces leading to trauma in joints such as the neck, shoulders, or knees, which could cause long-term health complications. Such injuries occur during impacts exceeding the maximum tolerable limits specified in the draft, as the document explicitly states that injuries exceeding the ICD-10-2006 surface injury codes represent intolerable severity.

- The ISO/TS 15066 draft defines the maximum acceptable injury level as Category 1 according to the Abbreviated Injury Scale (AIS). However, AIS Category 1 is not an entirely appropriate criterion for collaborative robot safety, since even a single rib fracture falls under this category as a minor injury. Therefore, this classification requires additional caution and caveats when applied to collaborative robot safety evaluations.
- Evidence obtained from accident investigations indicates that fatalities resulting from human–robot collisions are sometimes caused by asphyxiation due to entrapment. The current standard does not provide data on force limits that may lead to suffocation — for instance, from pressure on the neck or chest. It is therefore necessary to verify whether such data exist or to confirm through new research that the tensile and compressive force limits specified in ISO/TS 15066 are adequate.

Since the proposed collision measurement systems do not account for many of the above factors, it would be appropriate to engage in further consultation with the ISO/TS 15066 draft developers, obtain their views, and validate the supporting data and information.

17. INNOVATIONS OF 2025: A NEW ERA IN ROBOTIC SAFETY STANDARDS

17.1. Removal of the Term "Collaborative Robot" and the Introduction of the Concept of "Collaborative Application"

Over the past decade, the term "collaborative robot" (commonly referred to as a "cobot") has become widely used in the world of automation. This expression was originally employed to describe a new class of robots capable of working safely alongside humans—robots that went beyond the operational boundaries of conventional industrial robots. However, with the publication of the 2025 edition of the ISO 10218 standard, this concept has undergone a significant transformation. The term "collaborative robot" has now been completely removed from the standards. In its place, the term "collaborative application" is now used. Although this may appear to be a simple change in terminology, it actually reflects a maturation in the conceptual understanding of safe human–robot interaction. Labeling a robot as "collaborative" does not inherently guarantee that it will operate safely under all conditions. The standards committees sought to eliminate the long-standing conceptual ambiguity surrounding this issue. When collaborative robots were first introduced in Turkey, it was common among field integrators to describe them as "robots freed from safety fences." This popular but misleading notion exemplifies the misinterpretations that prompted the revision of the terminology. The 2025 revision thus represents not only a linguistic update but also a shift in safety philosophy—from viewing collaboration as a property of the robot itself to defining it as a function of the entire application context, where safety depends on system design, risk assessment, and operational parameters.

Why Was the Definition of "Collaborative Robot" Removed?

The primary reasons for this change are clarity and safety.

Over time, the term "collaborative robot" evolved into a marketing-oriented expression, gradually creating a misleading perception of safety among users. Many practitioners began to equate this term exclusively with robots equipped with Power and Force Limiting (PFL) technology. However, the mere presence of such a feature does not inherently guarantee that a robot is safe under all conditions. A robot's technical capability to limit power and force does not, on its own, ensure safe human interaction within the working environment. To illustrate this point, consider a scenario in which a PFL-enabled robot—that is, one with built-in power and force limitation carries out an operation using a tool equipped with a sharp blade. If such a tool were to come into contact with an operator, the interaction would clearly not qualify as a collaborative application, regardless of the robot's built-in safety features. This example demonstrates that safety cannot be attributed to the robot in isolation. Instead, it must be assessed in relation to the entire application, including the end effector, the workpiece, and the operational environment. The shift from "collaborative robot" to "collaborative application" therefore embodies a more comprehensive and accurate understanding of functional safety, emphasizing system-level evaluation rather than hardware labeling.



Figure 102: A Non-Collaborative Application

In reality, by its very nature, there is no distinct category of robot that can be inherently defined as a *"collaborative robot."*

Instead, collaboration emerges as a result of specific technological functions and system-level design choices that enable safe interaction between humans and robots. Among these technologies are:

- Hand Guiding – manual guidance of the robot by an operator,
- Speed and Separation Monitoring (SSM) – maintaining a safe distance through real-time monitoring of human and robot positions,
- Power and Force Limiting (PFL) – controlling contact forces and kinetic energy during interaction.

However, these features do not independently guarantee safety. They provide safe interaction only when integrated within a properly designed application, supported by comprehensive risk assessment, validated control measures, and appropriate system configuration.

Thus, the collaborative nature of a system is defined not by the robot itself, but by the context, configuration, and conditions of its deployment.

The Collaborative Entity Is No Longer the Robot, but the Application

The new ISO 10218:2025 approach clearly establishes that collaboration is not a characteristic of the robot itself, but of the application in which it operates.

In other words, it is no longer the robot that is collaborative — it is the application.

A robot, by itself, cannot be considered collaborative. It becomes collaborative only when integrated within a system that includes appropriate safety mechanisms, sensors, task definitions, and risk assessments. It is this complete application environment—not the robot alone—that determines whether human–robot interaction can safely occur.

This approach provides a clearer delineation of both responsibility and safety scope. An application is recognized as collaborative only when it has been designed and validated with the necessary safety functions, risk assessments, and protective measures in place.

Implications for the Industry

This change in terminology represents far more than a linguistic adjustment; it signifies a redefinition of responsibility and safety philosophy within the robotics sector.

A robot manufacturer can no longer market a product as a *"collaborative robot."* Instead, manufacturers must specify which collaborative features their products provide—such as sensors, power- and force-limiting technologies, or speed and separation monitoring—and describe how these features are intended to be used within a safe collaborative application.

For users and system integrators, this revision reinforces a critical message: Purchasing a specific type of robot alone does not ensure safety. What truly matters is the holistic safety design of the entire application, encompassing the robot, tooling, workspace, and human interaction.

Consequently, the term "collaborative robot" has now disappeared from the stage of industrial robotics. In its place, the concept of the "collaborative application" has emerged—emphasizing that safe human–robot interaction can only be achieved through sound design principles, rigorous risk management, and disciplined engineering processes.

This evolution marks a mature phase in the understanding of robotic safety, and it stands as one of the most significant changes introduced in the 2025 revision of the ISO 10218 series of robotic safety standards.

Integration of ISO/TS 15066 into ISO 10218-2:2025

Published in 2016, ISO/TS 15066 represented a major milestone in the field of collaborative robotics. This technical specification defined the limit values, operating modes, and design principles necessary for ensuring safe human–robot interaction.

For many years, ISO/TS 15066 served as a complementary reference to ISO 10218-1 and ISO 10218-2, providing essential guidance for implementing collaborative systems. However, it remained a non-binding technical guide rather than a fully enforceable international standard.

A New Era with the 2025 Revision

With the comprehensive revision completed in 2025, the content of ISO/TS 15066 has been formally integrated into ISO 10218-2:2025.

This change ensures that the requirements related to collaborative robotics are no longer contained in a separate supporting document, but are instead included directly within the main body of the standard itself.

As a result, the revised ISO 10218-2:2025 now covers not only the system integration requirements for robot installations but also the safety requirements for collaborative applications.

Through this integration, users of the standard—whether system integrators or manufacturers—can now access all relevant safety requirements within a single comprehensive document, eliminating the need to cross-reference multiple publications.

This consolidation marks a significant step forward in simplifying the application of safety standards, promoting consistency, clarity, and accessibility in the global implementation of collaborative robotic systems.

Significance of This Change

This structural integration achieves two major objectives:

1. **Consistency and Accessibility**

   The requirements concerning collaborative applications are now fully incorporated within the ISO 10218 series. This integration enables users to examine all relevant requirements through a single reference document, eliminating the need to consult multiple publications or cross-check between separate technical specifications.

2. **Maturation of the Collaborative Approach**

   The discontinuation of ISO/TS 15066 as an independent technical specification signifies that collaborative applications have evolved into an integral component of robotic systems. Consequently, the concept of the "collaborative application" is no longer treated as a distinct or exceptional category, but rather as a design approach that can be implemented within any robotic system when appropriate safety conditions are met.

The Future of ISO/TS 15066 and the Work of WG8

The integration of ISO/TS 15066 into ISO 10218-2:2025 has effectively brought the safety requirements for collaborative applications under the umbrella of the main standard. However, this process does not signify the end of development in this area.

Efforts are continuing within the ISO/TC 299 Robotics Committee to transform ISO/TS 15066 into a standalone international standard, better aligned with current field practices and the evolving realities of industrial automation.

Within this framework, a dedicated working group—WG8 (Working Group 8)—has been established under the title:

"Biomechanical Data and Validation Methods for Physical Human–Robot Interactions."

The objective of this group is to redefine the biomechanical threshold values relevant to human–robot physical contact, to develop advanced experimental validation methods, and to establish more precise, scientifically grounded safety criteria for future collaborative applications.

This initiative reflects an ongoing global effort to ensure that the foundations of robotic safety remain evidence-based, measurable, and verifiable, aligning practical implementation with human-centered design and scientific rigor.

National Participation and International Representation

An expert from the MTC 205 Robotics Committee of the Turkish Standards Institution (TSE), with the sponsorship of TEFDO, is actively participating in the WG8 Working Group, representing Türkiye at the international level.

This participation holds strategic importance for Türkiye, as it enables direct contribution to the global development of robotic safety standards and ensures that national expertise and perspectives are reflected in international standardization efforts.

WG8 Working Group and the New Standardization Project

The ongoing project led by **WG8** is titled:

ISO/AWI 15066-1 Collaborative Safety — Physical Contact — Part 1: Biomechanical Thresholds and Data *(ISO/AWI 15066-1 Collaborative Safety — Physical Contact — Section 1: Biomechanical Thresholds and Data)*

Upon completion, this project is expected to introduce new biomechanical datasets that define the limits of physical contact in collaborative applications. These data are anticipated to bring about transformative advancements in the way robot integrators design, validate, and implement collaborative robotic systems.

The forthcoming standard is expected to completely redefine the verification processes, testing methodologies, and design criteria associated with collaborative applications. By grounding these parameters in quantitative biomechanical research, the new standard will provide a more precise, scientifically validated framework for ensuring the safety and reliability of human–robot physical interaction.

This initiative not only strengthens global safety practices but also ensures that Türkiye's industrial and academic sectors remain actively engaged in shaping the future of collaborative robotics.

Sectoral Impacts and Expectations

The forthcoming version of ISO/TS 15066, under development as the ISO/AWI 15066-1 standard project, is expected to generate significant impact across the field of collaborative robotics upon its completion.

This new standard will introduce fundamental changes to the working methodologies of collaborative application integrators and system designers. Parameters such as physical contact, force limits, velocity values, and testing methodologies will now be established on scientifically validated, measurable, and verifiable foundations.

These advancements will enable the redefinition of collaborative robotics through engineering-based, quantifiable safety metrics, shaping the future understanding and framework of human–robot interaction.

The abbreviation ISO/AWI stands for "Approved Work Item." This designation indicates that the standard in question is currently under active development and is being prepared for official publication within the ISO system.

Accordingly, "ISO/AWI 15066-1" signifies that ISO/TS 15066 is now in the process of being revised and elevated into a fully recognized international standard—one that will unify existing safety principles with empirical data and advanced biomechanical insights.

Once finalized, the ISO 15066-1 standard is expected to form a new scientific foundation for collaborative safety, guiding both industry and research toward more reliable, human-centered robotic design.

18. REFERENCES

Askarpour, M., Mandrioli, D., Rossi, M. ve Vicentini F. (2016). SAFER-HRC: Safety Analysis Through Formal verification in Human-Robot Collaboration. Italy.

Barette, M. (2016). Collaborative Robots/Risk Assessment, an Introduction. Robotiiq.

Beaupre, M. (t.y.). Collaborative Robot Technology and Applications. Erişim Adresi: https://www.robotics.org/userAssets/riaUploads/file/4-KUKA_Beaupre.pdf

Bélanger, M. (2016). Collaboratice Robots Risk Assessment, An Introduction Rev.1.1

Bensaci, C., Zennir, Y. ve Pomorski D. (2020). A New Approach to System Safety of humanmulti-robot mobile system control with STPA and FTA, Algerian Journal of Signals and Systems (AJSS). France

Bolden, C. (2015). Cybersecurity Challenges for Manned and Unmanned Systems, American Military University, Homeland Security

Braman, R. (2019). The Basics of Designing for Safety with Collaborative Robots Chinniah,

Y. (2016). Robot Safety: Overview of Risk Assessment and Reduction, Advances in Robotics & Automation, Canada

Dağlı, M. (2019). İnsan Robot İş birliği: Kolaboratif Robotlar. Mühendis ve Makine

Dominguez, E. (t.y). Risk Assessment Process for Collaborative Robotic Applications, Pilz Automation Safety. Ria. USA

Erhan Eskicumalı. (2025). *TEFDO EN ISO 13850 Training Visual Material* [Educational Illustration]. TEFDO Publications.

Fryman, J. ve Matthias, B. (2012). Safety of Industrial Robots: From Conventional to Collaborative Applications. Conference Paper, ABB

Gopinath, V. ve Johansen, K. (2016). Risk Assessment Process for Collaborative Assembly – A Job Safety Analysis Approach, 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS). Sweden

Gualtieri, L., Palomba, I., Wehrle, E. J. ve Vidoni R. (2020). The Opportunities and Challenges of SME Manufacturing Automation: Safety and Ergonomics in Human–Robot Collaboration, Industry 4.0 for SMEs Challenges, Opportunities and Requirements, Matt.D., Modrák V., Zsifkovits H. (s: 105 - 138).

HSE. (2012). Collision and injury criteria when working with collaborative robots, Health and Safety Laboratory. England.

Hoffman, G. ve Breazeal, C. (2007). Effects of anticipatory action on human-robot teamwork: efficiency, fluency, and perception of team.

Inel, F., Zennir, Y. ve Adlene, R. (2020). A New Approach to System Safety of humanmulti- robot mobile system control with STPA and FTA. Algerian Journal of Signals and Systems (AJSS)

Khalid, A., Kirisci, P., Ghrairi, Z., Thoben, K. ve Pannek J. (2016a). A methodology to develop collaborative robotic cyber physical systems for production environments

Khalid, A., Kirisci, P., Ghrairi, Z., Thoben, K. D. ve Pannek, J. (2016b). Safety Requirements in Collaborative Human Robot Cyber Physical Systems

Khalid, A., Kirisci, P., Ghrairi, Z., Thoben, K. D. ve Pannek, J. (2017). Towards Implementing Safety and Security Concepts for Human-Robot-Collaboration in the context of Industry 4.0

Kirschner. D., Schlotzhauer.A., Brandstötter.M., (2017). Validation of Relevant Parameters of Sensitive Manipulators for Human-Robot Collaboration. To appear in Proceedings of the 26th International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region)

Kobotlarla Çalışmaya Hemen Başlayın, Universal Robot

Markis, A., Montenegro H., Neuhold M., Oberweger, A., Schwald, C., Sihn, W., Ranz, F., Edtmayr, T., Hold, P., Reisinger P. (2017). Human-Robot- Collaboration, Risk Analysis and Minimization (2nd Ed.), TÜV. Austria.

Matthias, B. (2017). Human-Robot Collaboration, Industrial Applications and Open Challenges. Dagstuhl Seminar on "Computer-Assisted Enginnering for Robotics and Autonomous Systems", ABB

Matthias, B. (t.y.). Collaborative Robots – Power and Force Limiting, ABB, Ria. Germany, Erişim Adresi: https://www.robotics.org/userAssets/riaUploads/file/7-Bjorn.pdf

Matthias, B. ve Reisinger T. (2016). Example Application of ISO/TS 15066 to a Collaborative Assembly Scenario/ ABB, Germany

Matthias, B., Kock, S., Jerregard, H., Källman, M. ve Lundberg, I. (2011). Safety of Collaborative Industrial Robots, ABB. Sweden

Matúšová, M., Bučányová, M. ve Hrušková E. (2019). The future of industry with collaborative robots. Slovak University of Technology, Faculty of Material Science and Technology, Institute of production systems. Slovak Republic.

Mihelj, M., Bajd, T., Ude, A., Lenarčič, J., Stanovnik, A., Munih, M., Rejc, J. ve Šlajpah S. (2019). Robotics (2nd. ed.), Springer. Slovenia

Nikolakis, N., Maratos, V. ve Maksis, S. (2018). A cyber physical system (CPS) approach for safe human-robot collaboration in a shared workplace. Greece

Owen, A. (2016). How to do Even more with Collaborative Robots, Lean Robotics Part 1: Kick Starting Your Project Part 2: Shopping for a Robot, Getting started with collaborative robots. Lean Robotics

Payne, A.R. ve Patel, S. (2001). Occupant Protection & Egress In Rail Systems project (OPERAS): Injury Mechanisms & Injury Criteria. MIRA, UK

Pecora, A., Maiolo, L., Minotti, A., Ruggeri, M., Dariz, L., Giussani, M., Iannacci, N., Roveda, L., Pedrocchi, N. ve Vicentini F. (2019a). Factories of the Future. Springer Open.

Pecora, A., Maiolo, L., Minotti, A., Ruggeri, M., Dariz, L., Giussani, M., Iannacci, N., Roveda, L., Pedrocchi, N. ve Vicentini, F. (2019b). Systemic Approach for the Definition of a Safer Human-Robot Interaction, Factories of the Future (173-196). Italy

Pilz The Spirit of Safety, t.y. EriĢim Adresi: https://www.pilz.com/tr-TR/iec-en- 61496-1 Priyadarshini, I. (2017). Cybersecurity risks in Robotics

Plassa, J. (2025). *Emergency Stop and Protective Stop: Functional Safety Perspectives*. Barcelona: Independent Technical Publication.

Rickert, M., Foster, M. E. and Giuliani, M. (2007). Integrating Language, Vision and Action for Human Robot Dialog Systems. International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction, HCI International. China

Sezai, T. (2015). Endüstride Kaynak Robotları, Proseslerin Ġncelenmesi ve GeliĢtirilmesi. Gedik Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi

Shea R.N. (t.y.). ISO/TS 15066 Introduction. Universal Robots. EriĢim adresi (robotics.org/userAssets/riaUploads/file/12-TR15066Overview- SafetyforCollaborativeApplications-RobertaNelsonShea.pdf)

Schmersal. (2025). *RFID Safety Switches with Guard Locking: Product Overview and Safety Integration Guide*. SCHMERSAL GmbH & Co. KG.

Wang, L., Schmidt, B. and Nee A. Y.C. (2013). Vision-guided active collision avoidance for human-robot collaboration

İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ E-KİTAP SERİSİ

Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.

www.uuyayinlari.com

İSG SERİSİ - 1



II. ULUSAL İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ÖĞRENCİ KONGRESİ BİLDİRİ KİTABI

KİTABI İNDİRMEK İÇİN QR KODUNU TARATIN!



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.
https://uuyayinlari.com/

www.uuyayinlari.com

İSG SERİSİ - 2



İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ TEZ KÜLLİYATI (2015-2021

DR. ÖĞR. ÜYESİ **RÜŞTÜ UÇAN**

KİTABI İNDİRMEK İÇİN QR KODUNU TARATIN!



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.
https://uuyayinlari.com/

www.uuyayinlari.com

İSG SERİSİ - 3



VI. TÜRKİYE'DE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ALANINDA YAŞANILAN SORUNLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ SEMPOZYUMU

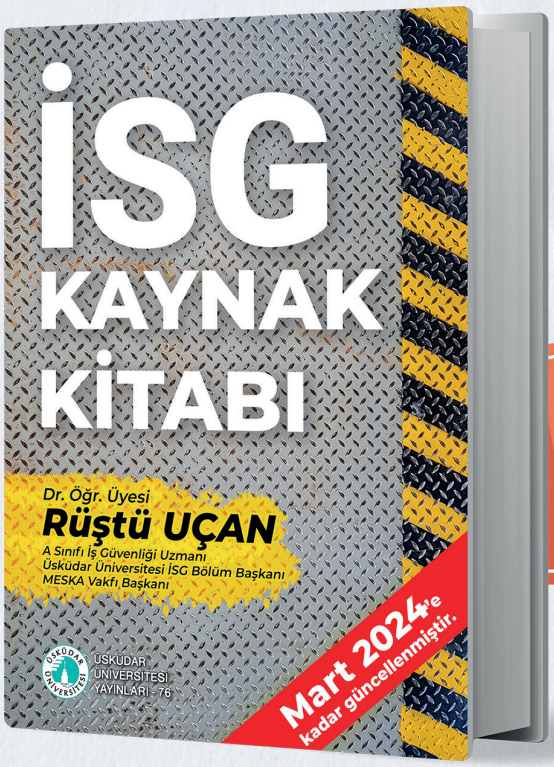
KİTABI İNDİRMEK İÇİN QR KODUNU TARATIN!



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.
https://uuyayinlari.com/

www.uuyayinlari.com

İSG SERİSİ - 4



İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ KAYNAK KİTABI

DR. ÖĞR. ÜYESİ **RÜŞTÜ UÇAN**

KİTABI İNDİRMEK İÇİN QR KODUNU TARATIN!



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.
https://uuyayinlari.com/

www.uuyayinlari.com

İSG SERİSİ - 5



PATLAYICI MADDELERİN TAŞINMASINDA VE DEPOLANMASINDA İŞ GÜVENLİĞİ UYGULAMALARI

BURHAN IRGAT
DR. ÖĞR. ÜYESİ **RÜŞTÜ UÇAN**
DOÇ. DR. **MÜGE ENSARİ ÖZAY**

KİTABI İNDİRMEK İÇİN QR KODUNU TARATIN!



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.
https://uuyayinlari.com/

www.uuyayinlari.com

İSG SERİSİ - 6



VII. TÜRKİYE'DE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ALANINDA YAŞANILAN SORUNLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ SEMPOZYUMU

KİTABI İNDİRMEK İÇİN QR KODUNU TARATIN!



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.
https://uuyayinlari.com/

www.uuyayinlari.com

İSG SERİSİ - 7



VIII. TÜRKİYE'DE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ALANINDA YAŞANILAN SORUNLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ SEMPOZYUMU

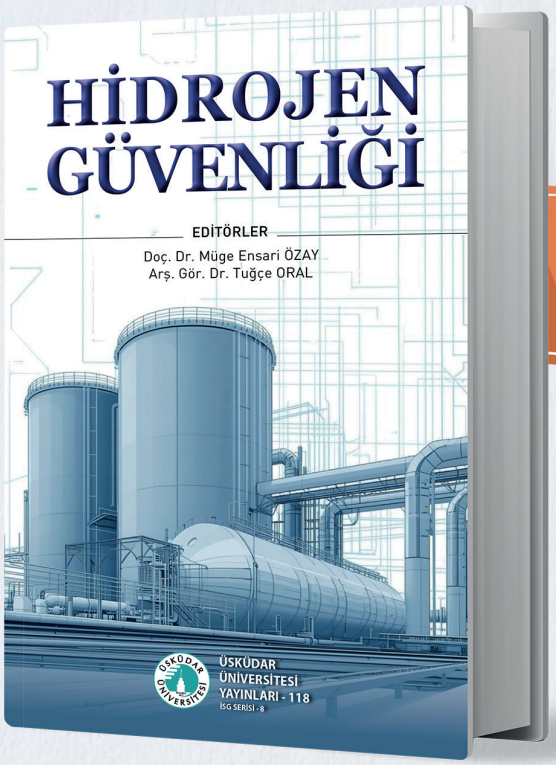
KİTABI İNDİRMEK İÇİN QR KODUNU TARATIN!



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.
https://uuyayinlari.com/

www.uuyayinlari.com

İSG SERİSİ - 8



HİDROJEN GÜVENLİĞİ

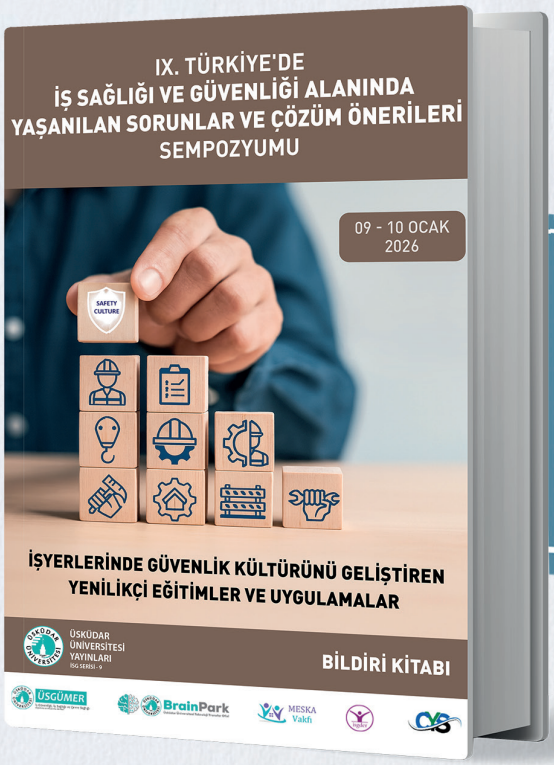
KİTABI İNDİRMEK İÇİN QR KODUNU TARATIN!



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.
https://uuyayinlari.com/

www.uuyayinlari.com

İSG SERİSİ - 9



IX. TÜRKİYE'DE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ALANINDA YAŞANILAN SORUNLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ SEMPOZYUMU

KİTABI İNDİRMEK İÇİN QR KODUNU TARATIN!



Kitapları ücretsiz olarak Üsküdar Üniversitesi Yayınları web sitesinden indirebilirsiniz.
https://uuyayinlari.com/

www.uuyayinlari.com



Dr. Öğretim Üyesi Rüştü UÇAN

Born in Kars in 1956, he completed his undergraduate, graduate, and doctoral studies in Mechanical Engineering at Yıldız Technical University. He began his academic career at Isparta State Engineering Academy in 1979, followed by a lectureship at Yıldız Technical University (1981–1992), where he taught Machine Elements, Construction Techniques, and Technical Drawing. Following a period in the private sector, he served at Istanbul Okan University (2009–2014) as Programme Coordinator, Head of the Associate Degree Department, and Director of the Occupational Health and Safety Training Centre. He currently serves as Head of the Occupational Health and Safety Department and Graduate Programme at Üsküdar University, and as Director of ÜSGÜMER (Research and Application Centre for Occupational Safety, Health, and Environmental Health). He is also President of MESKA Foundation, Turkey's first foundation dedicated to the prevention and investigation of occupational diseases and workplace accidents. He holds a Class A Occupational Safety Specialist Certificate and a Workplace Physician and Occupational Safety Trainer Certificate, and is an active court-appointed expert witness in occupational health and safety, machinery, and traffic. Founder of *OHS Academy* journal — published continuously for over a decade in collaboration with Üsküdar University faculty — he has authored books, peer-reviewed articles, and symposium papers in his field. He serves on the Academic Advisory Board of the Earthquake Early Warning System Project, the Scientific Board of the planned Earthquake Commemoration and Education Centre in Nurdağı, Gaziantep, and as Vice-Chairman of the TSE – MTC 205 Robotics Committee.

Ali Orhan KARACIĞAN



Born in Konya in 1954, he graduated from the Department of Mechanical Engineering at Yıldız Technical University in 1979. Over a distinguished industrial career, he held senior positions — including Production Chief, Sales Manager, Deputy General Manager, Technical Coordinator, and Procurement Manager — at leading companies such as Erka Balata, Temsan Makine, Alarko, Sertler Örme, Ovisan, Sıhhi Bez Sanayi A.Ş., and Demisaş A.Ş. He subsequently completed both non-thesis and thesis Master's programmes in Occupational Health and Safety. Following his retirement in 2015, he has been serving as a part-time lecturer for over five years at Üsküdar University in the Departments of Health Management and Occupational Health and Safety, delivering courses on Facility Management in Healthcare Institutions, Machinery and Equipment, OHS for Maintenance Personnel, Ventilation, Industry 4.0 and OHS, Industrial Machines and OHS, and OHS for Maritime and Aviation Workers. He also teaches Occupational Health and Safety at the Faculties of Chemistry, Civil Engineering, Electrical Engineering, and Mechanical Engineering at Boğaziçi University.



Erhan ESKİCUMALI

Erhan Eskicumalı holds a degree in Mechatronics Engineering from Bahçeşehir University and is a certified Functional Safety Application Expert — a qualification earned through an intensive, machine-focused one-year training programme by TÜV Rheinland, culminating in a successful jury presentation in Barcelona. Since 2015, he has led numerous projects across Turkey in the industrial automation sector, specialising in the functional safety of machinery and robotic cells. Through TEFDO, the company he founded, he continues to deliver Machine CE Certification, safety consultancy for machines, production lines, and robotic cells, as well as risk assessment services. He serves as Chairman of the TSE – MTC 205 Robotics Committee, actively contributing to the development of international standards in robotic safety and representing Turkey in this field.

TRANSLATORS

Ceren UÇAN



She holds a Bachelor's degree in French Translation and Interpretation from Yıldız Technical University and a Master's degree in Child Development from Üsküdar University. She served as Editor of *OHS Academy* journal for three years and currently works as a Technical Analyst at ETİYA.



Dr. Nafiseh Farajirad

She completed her undergraduate studies in Chemical Engineering at the University of Isfahan, Iran, before redirecting her academic focus to Occupational Health and Safety. She obtained her Master's degree from the Islamic Azad University, Science and Research Branch, and subsequently completed her doctoral studies in Occupational Health and Safety at Üsküdar University in Turkey, consolidating her interdisciplinary expertise at the academic level. Her commitment to continuous professional development has led her to participate in various advanced specialisation programmes. She is proficient in Persian, Turkish, and English, enabling effective communication across multilingual professional and academic environments. Over a career spanning more than fifteen years, she has worked in the petrochemical, energy production, and construction sectors, serving as trainer, consultant, and auditor in the planning, implementation, and oversight of quality, occupational health and safety, environmental management, and information security systems. She has also taken active responsibility in multidisciplinary projects aimed at advancing corporate risk management and fostering a culture of safety.



Dr. Öğretim Üyesi Rüştü UÇAN

1956 Kars'ta doğdu. Makina mühendisliği lisans, lisansüstü ve doktora eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. 1979 yılında Isparta Devlet Mühendislik Akademisinde iş hayatına başladı.1981-1992 yılları arasında Yıldız Teknik Üniversitesinde öğretim görevlisi olarak çalıştı. Bu dönemde Makine Elemanları, Konstrüksiyon Tekniği ve Teknik Resim dersleri vermiş ayrıca bitirme projelerinde çalıştı. 2009 yılına kadar özel sektörde çeşitli görevlerde bulundu. 2009-2014 yılarında İstanbul Okan Üniversitesinde İş Sağlığı ve Güvenliği Program Koordinatörlüğü, Ön Lisans Bölüm Başkanlığı ve İş Sağlığı ve Güvenliği Kurs Müdürlüğü görevlerini yürüttü. Halen Üsküdar Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü Başkanlığı, İş Sağlığı ve Güvenliği Yüksek Lisans Ana Bilim Dalı Başkanlığı ve ÜSGÜMER (İş Güvenliği, İş Sağlığı ile Çevre Sağlığı Uygulama Araştırma Merkezi) Merkez Müdürlüğü görevini yürütmektedir. Aynı zamanda Türkiye'de konusunda ilk kurulmuş vakıf olan MESKA Vakfı (Meslek Hastalıkları-İş Kazalarını Önleme ve Araştırma) başkanıdır. İş Yeri Hekimliği ve İş Sağlığı Eğitici Belgesi, A sınıfı İş Güvenliği Uzmanlık Belgesi sahiptir. Aktif olarak İSG, makine ve trafik konularından bilirkişilik yapmaktadır. OHS Academy dergisini kurarak, Üsküdar Üniversitesi öğretim üyeleri ile birlikte 4 yıldır dergi çıkarmaktadır. İş Sağlığı ve Güvenliği konusunda kitapları, hakemli dergilerde birçok makalesi ve çeşitli sempozyumlarda konuyla ilgili bildirileri bulunmaktadır.

Ali Orhan KARACIĞAN



1954 yılında Konya'da doğdu. 1979 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun olduktan sonra Erka Balata, Temsan Makine, Alarko, Sertler Örme, Ovisan, Sıhhi Bez Sanayi A.Ş. ve Demisaş A.Ş. gibi şirketlerde Üretim Şefi, Satış Müdürü, Genel Müdür Yardımcısı, Teknik Koordinatör ve Satınalma Müdür olarak görev aldı. İSG Bölümü'nde Tezsiz ve Tezli Yüksek Lisans yaptı. 2015 yılında emekliliğe ayrıldıktan sonra 5 senedir Üsküdar Üniversitesi Sağlık Yönetimi ve İş Sağlığı ve Güvenliği bölümlerinde yarı zamanlı olarak Sağlık Kurumlarında Tesis Yönetimi, Makine ve Teçhizat, Bakım Çalışanları için İSG, Havalandırma, Endüstri 4.0 ve İSG, Endüstriyel Makineler ve İSG, Deniz ve Havayolu Çalışanları için İSG gibi çeşitli derslere girmektedir.



Erhan ESKİCUMALI

TÜV Rheinland tarafından makine odaklı, bir yıl süren yoğun bir eğitim programının ardından Barcelona'da jüri sunumunu başarıyla tamamlayarak Functional Safety Application Expert sertifikasını almaya hak kazanan Erhan Eskicumalı, Bahçeşehir Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur.
2015 yılından beri endüstriyel otomasyon sektöründe, makinelerin ve robot hücrelerinin emniyetli hale getirilmesi üzerine Türkiye'nin farklı bölgelerinde çok sayıda proje yürütmüştür. Kurucusu olduğu TEFDO firmasında; Makine CE Belgelendirme, makine/hat/robot hücreleri emniyet danışmanlığı ve risk değerlendirme hizmetleri ile sektördeki çalışmalarına devam etmektedir. Ayrıca, TSE – MTC 205 Robotik Komitesi Başkanlığı görevini yürüten Erhan Eskicumalı, robotik emniyet alanında hazırlanan uluslararası standartlara aktif katkı sağlamakta ve Türkiye'yi bu alanda temsil etmektedir.

ÇEVİRMENLER

Ceren UÇAN



Yıldız Technical University Fransızca Mütercim ve Tercümanlık bölümünden lisans derecesine ve Üsküdar University Çocuk Gelişimi bölümünden yüksek lisans derecesine sahiptir. Üç yıl boyunca OHS Academy dergisinde editör olarak görev yapmış olup, halen ETİYA bünyesinde Teknik Analist olarak çalışmaktadır.



Dr. Nafiseh Farajirad

İran'da İsfahan Üniversitesi Kimya Mühendisliği lisans eğitimini tamamladıktan sonra akademik gelişimini İş Sağlığı ve Güvenliği alanına yönlendirmiş; bu doğrultuda İslami Azad Üniversitesi Ulum ve Tahkikat Birimi bünyesinde yüksek lisans derecesini almış ve devamında Türkiye'de Üsküdar Üniversitesi İş Sağlığı ve Güvenliği alanında doktora eğitimini tamamlayarak disiplinler arası uzmanlığını akademik düzeyde pekiştirmiştir. Mesleki ve akademik gelişimini süreklilik ilkesiyle sürdüren yaklaşımı sayesinde çeşitli ileri düzey uzmanlık programlarına katılmıştır. Bunun yanı sıra Farsça, Türkçe ve İngilizce dillerindeki yetkinliği sayesinde çok dilli çalışma ve akademik yayın ortamlarında etkin iletişim kurabilmektedir. On beş yılı aşkın profesyonel deneyimi boyunca petrokimya, enerji üretim tesisleri ve inşaat sektörlerinde faaliyet göstermiş; bu süreçte kalite, iş sağlığı ve güvenliği, çevre yönetimi ile bilgi güvenliği sistemlerinin planlanması, uygulanması ve denetlenmesi alanlarında eğitici, danışman ve denetçi olarak görev almış, aynı zamanda kurumsal risk yönetimi ve güvenlik kültürünün geliştirilmesine yönelik çok disiplinli projelerde aktif sorumluluk üstlenmiştir.