

İnsan ile Küçük Endüstriyel Robot İşbirliğinde Güvenlik Sistemleri Analizi: ISO/TS 15066 Spesifikasyonu

Orhan Engin^{1*} , Gökhan Gökmen¹ , Mustafa Yusuf Anlıaçık¹ , Doğan Turgut¹ 

¹Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye. *oengin@ktun.edu.tr

Özet

Endüstri 4.0 sürecinde, insan ve endüstriyel robotların iş birlikleri günden güne artmaktadır. İnsana zarar verebilecek taşıma kapasiteli endüstriyel robotlar, korunaklı alanda çalışır ve güvenlik standartlarına tabii tutulur. İnsan-robot etkileşiminin sanayi ortamlarında başarılı bir şekilde uygulanabilmesi, insan operatörler ile robotik cihazlar arasında güvenli bir iş birliğini sağlamaya bağlıdır. Bu, robotların hızını ve hareketini kısıtlamadan, insan operatörlerin güvenliğini garanti eden bir ortam gerektirir. Bu çalışmanın temel amacı, deney tasarlama, analiz, güç-kuvvet sınırlamasına sahip küçük endüstriyel robotların, insan çalışanlar ile iş birliği yapmaları durumunda, güvenlik ve izleme sistemleri ile ilgili yapılması gereken faaliyetlerin analiz edilmesidir. Ayrıca amaç, literatürde son yıllarda yapılan çalışmaların incelenmesidir. Araştırmada, Şubat 2016'da, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) tarafından yayımlanan, ISO/TS 15066 (Robotlar ve robotik cihazlar- İşbirlikçi robotlar) standardı ve onun ile ilgili gerekliliklerin tanımlandığı rehberlik kılavuzu olan, EN ISO 10218 (Robotlar ve robotik cihazlar-Endüstriyel robotlar için güvenlik gereklilikleri)'in sağladığı katkılar incelenmiştir. Çalışmada, endüstriyel robotların, insan-robot iş birliğine yönelik uygulamalarda kullanımının giderek daha önemli hale geldiği belirlenmiştir. İnsan ve robotların avantajları birleştirilerek, dezavantajlarının minimize edilebileceği, insan yeteneklerinden olan kognisyon, adaptasyon veya dokunsal yetilerinin robotların; hız, güç veya hassasiyet gibi özellikleriyle birleştirilebileceği belirlenmiş ancak bu birleşimin, özellikle ağır robotlarla yakın çalışırken, insan bütünlüğünü korumak için yeni güvenlik önlemleri gerektirdiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsan-robot iş birliği, Güvenlik sistemleri, Küçük endüstriyel robotlar, ISO/TS 15066.

Safety Systems Analysis in Human-Small Industrial Robot Collaboration: ISO/TS 15066 Specification

Abstract

In the Industry 4.0 process, collaborations between human and industrial robots are increasing day by day. Industrial robots with carrying capacity that can harm humans operate in protected areas and are subject to safety standards. The successful implementation of human-robot interaction in industrial environments depends on providing a safe collaboration between human operators and robotic devices. This requires an environment that guarantees the safety of human operators without restricting the speed and movement of robots. The main purpose of this study is to design experiments and analyse activities related to safety and monitoring systems in the collaboration between small industrial robots (with power and force limitations) and human workers. Additionally, it aims to review recent studies in the literature on this topic. In the research, the contributions of the ISO/TS 15066 (Robots and robotic devices - Collaborative robots) standard and its guidance manual defining the requirements, EN ISO 10218 (Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots), published by the International Organization for Standardization (ISO) in February 2016, were examined. In the study, it has been determined that the use of industrial robots in human-robot collaboration applications is becoming increasingly important. It has been

determined that the disadvantages of humans and robots can be minimized by combining the advantages of humans and robots, and that human abilities such as cognition, adaptation or tactile abilities can be combined with robots' speed, power or precision, but it has been concluded that this combination requires new safety measures to protect human integrity, especially when working closely with heavy robots.

Keywords: Human-robot collaboration, Safety systems, Small industrial robots, ISO/TS 15066.

1. GİRİŞ

Endüstri 1.0, 1800'li yıllarda başlamış ve yaklaşık olarak yüz yıl sürmüştür. Montaj hatlarının üretimde kullanımı ile, seri üretime geçilmiş ve Endüstri 2.0 süreci başlamıştır. İlk işlevsel bilgisayarın tanıtımıyla, 1940'lı yıllarda, Endüstri 3.0 süreci başlamıştır. 2011 yılında, Endüstri 4.0 terimi ilk olarak Hannover fuarında, Almanya'da dile getirilmiştir [1]. Endüstri 4.0 süreci ile, akıllı fabrikalarda, akıllı üretim, insan-robot iş birliği, nesnelerin interneti, bulut temelli yaklaşımlar vd. teknolojik değişimler başlamıştır [2, 3]. Endüstri 4.0'ın ortaya çıkışıyla birlikte, iş birliği robotları (cobotlar), akıllı fabrikaları ileriye taşıyan olanak sağlayıcı teknolojiler olarak ön plana çıkmıştır. İnsanların bilişsel yeteneklerini, robotların hassasiyeti ve doğruluğuyla birleştirmenin avantajları, insan çalışanlar için ergonomik çalışma koşullarını iyileştirmiş, üretim sürecinin kalitesini artırmış ve verimliliğini yükseltmiştir [4]. Ayrıca, Endüstri 4.0, üretimde ileri teknolojilerle çalışma yöntemlerine yeni bir bakış açısı kazandıran bir devrimi beraberinde getirmiştir. Ancak, mevcut pazar koşulları, özelleştirilmiş ürünlerin daha küçük partiler halinde ve daha kısa teslim sürelerinde üretilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, üretim ve montaj sistemlerinin esnek ve değişken taleplere uyum sağlayabilir olması gerekmektedir. Hem esneklik hem de yüksek düzeyde otomasyon sağlamak amacıyla, İnsan-Robot-İş birliği (İRİ) olarak bilinen konsept, bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [4]. Robotlar, fabrika verimliliğini artırsa da yüksek kurulum ve bakım maliyetleri bulunmaktadır, bu nedenle karar verme ve hassasiyet gerektiren işlerde, insan operatörler hâlâ önemlidir. Birçok fabrika hem robotları hem de insan işçileri bir arada kullanarak İRİ'yi uygulamaktadır, ancak bu durum kaza riskini artırmaktadır. Bu bağlamda, ISO/TS 12100:2010 standardı, risk değerlendirme ve azaltma adımlarını belirlemiştir [5]. Üretim sistemlerinde esneklik ihtiyacı, artan ürün çeşitliliği ve parti büyüklerinin azalması nedeniyle fabrikalarda insan gücüne ek olarak otomasyon tekniklerine olan talep artmıştır. İRİ ile bu otomasyon teknikleri hayata geçirebilecektir [6]. Endüstriyel robotlar, özel üretim tezgahlarına kıyasla daha evrensel ve esnek bir otomasyon yaklaşımını temsil eder. Bu sistemler, ürünlere özel, daha az yatırımla farklı uygulamaların hayata geçirilmesini mümkün kılar. Bu nedenle, endüstriyel robotlar, ürün değişikliği sonrasında bile şirketler için değerini koruyan esnek üretim sistemlerini ifade eder [7].

İnsan-robot etkileşiminin tarihsel gelişimi incelendiğinde, 1928'de Londra'da, Dolly, konuşma işlevine sahip ilk insansı robot olarak sergilenmiş ve bu alandaki ilerleme 60 yıl daha sürmüştür. 1996 yılında, İsveçli, Electrolux şirketi tarafından üretilen ve "Trilobit" adı verilen ilk robotik elektrikli süpürge piyasaya çıkmıştır. İşbirlikçi robotlar ise 1996 yılında icat edilmiş ve 1994'te General Motors, robotları insanlarla daha güvenli bir şekilde takım oluşturacak şekilde tasarlamaya yönelik çalışmalar başlatmıştır. Geliştirilen endüstriyel robotların çoğu, üretim hattında, proses otomasyonuna hizmet etmek için kurulmuşken, sensör ve konumlandırma teknolojilerindeki gelişmeler, insansız üretim için robotik kolların ve otomatik yönlendirmeli araçların kullanımını artırmıştır [8]. İşbirlikçi robotlar, Endüstri 4.0 çerçevesinde önemli bir yenilik olup, insanların aynı çalışma alanını paylaşarak robotlarla iş birliği yapmasını sağlar. Geleneksel endüstriyel robotlardan farklı olarak, cobotlar güvenlik bariyerlerine ihtiyaç duymaz. Bu durum, robotların esneklik ve hassasiyet gibi avantajlarını, insanların problem çözme ve adaptasyon yetenekleriyle birleştirir. Ancak, insan-robot ortak çalışma ortamlarında çarpışma gibi mekanik tehlikeler olasılığını artırmaktadır [9]. İnsan-robot iş birliği, esnek üretim ve yüksek otomasyon sağlamak için insan esnekliği ile robot hız ve doğruluğunu birleştirir. Bu iş birliği, operatörlere ergonomik avantajlar, daha iyi kalite ve yüksek verimlilik sunar. Ancak, mevcut güvenlik mevzuatı, insan-robot iş birliğinin yaygınlaşmasını sınırlamaktadır. ISO/TS 15066 standardı, işbirlikçi robotlar için uluslararası bir güvenlik kılavuzu olarak ISO 10218'i önerir ve şirketlerin, bu kılavuzu uygulama konusunda bilgi sahibi olmalarını ister [10]. Güvenlik açısından, robotun operatörün varlığına göre tepki vermesi ve davranışlarını güvenli bir mesafede ayarlaması gerektiği belirtilmektedir. ISO 10218 standardına göre robotun operatöre yakınlığına göre hızını yavaşlatıp durması

gerekmektedir. Ayrıca, sensörlerin, operatörün konumunu doğru şekilde algılaması ve kontrol ünitesinin hızlı tepki verebilmesi, bu sürecin başarısı için kritik öneme sahiptir. Çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen yaklaşımlar, robot hızını ve güvenli ayırma mesafesini hesaplamaya odaklanmaktadır [11].

Robotikteki son gelişmeler, robotların tıbbi hizmetlerden, arama-kurtarma operasyonlarına kadar birçok alanda kullanıma girmesini sağlamıştır. Son 25 yılda cobot'ların kullanımında artış görülmüş, ancak, yüksek kurulum maliyeti ve sürekli insan denetimi ihtiyacı cobot'ların dezavantajları olarak öne çıkmaktadır [12]. İRİ, manuel montaj ile tam otomatik üretim arasındaki boşluğu doldurarak insan ve robotun güçlü yönlerini birleştiren bir sistemdir. İnsanların bilişsel ve sensomotor becerileri ile robotların hız, hassasiyet ve gücünü bir araya getirir. Endüstriyel robotlar, birden fazla eksenle programlanabilen ve otomatik olarak kontrol edilebilen çok amaçlı manipülatörler olarak tanımlanırken, işbirlikçi robotlar, insanlarla doğrudan ve güvenli bir şekilde etkileşim için tasarlanmıştır. Geleneksel robotlardan farklı olarak işbirlikçi robotlar, çitsiz ortamlarda insanlarla fiziksel temas kurabilir [10]. Robot ve insan arasındaki iş birliği günümüzde tartışılan bir konudur. Birçok makale yayınlanmış olmasına rağmen, hâlâ küçük endüstriyel robotlar arasındaki iş birliği ile ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca tüm güvenlik gereksinimi ve üretim ihtiyacını karşılayabilecek optimize edilmiş sistemlere ihtiyaç vardır [13].

Bu araştırmada, fiziksel insan-robot etkileşiminin sanayi ortamlarında başarılı bir şekilde uygulanabilmesi, insan operatörler ile robotik cihazlar arasında güvenli bir iş birliğini sağlamaya yönelik olarak literatürde, ilk defa, son 10 yılda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca araştırmada, ISO/TS (Robotlar ve robotik cihazlar- İşbirlikçi robotlar) 15066 ve EN ISO 10218 (Robotlar ve robotik cihazlar- Endüstriyel robotlar için güvenlik gereklilikleri) için ek niteliğinde olan spesifikasyonun sağladığı katkılar, literatürde ilk defa değerlendirilmiştir.

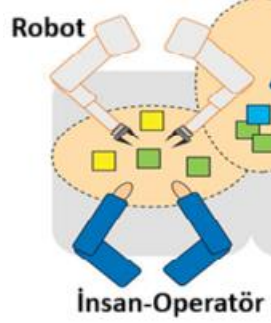
Çalışmanın ikinci bölümünde, insan robot iş birliği ve insan robot iş birliğinin endüstriyel uygulamaları açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, literatürde insan-robot etkileşimi ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalar incelenmiştir. Elde edilen bulgular dördüncü bölüm olan sonuç kısmında tartışılmıştır.

2. İNSAN ROBOT İŞBİRLİĞİ

Endüstriyel robotlar, büyük çalışma alanlarına sahip güçlü makineler olup, genellikle öngörülemeyen beklenmedik hareketler yapabilirler. Bu nedenle, robotların kullanıma alınabilmesi için bir risk değerlendirmesi yapılması gerekmektedir. Makine güvenliği için genel bir standart, EN ISO 12100 ile sunulmuştur. Endüstriyel robotlar için daha spesifik bir standart ise EN ISO 10218'dir. Bu standartlar, olası tehlikelerin tanımlanması, değerlendirilmesi ve kaza risklerini azaltmak için temel yönergeler sağlar [14]. İRİ de insan ve robot aynı ortamda çalışır. Buradaki en büyük sorun ise güvenlidir. İnsan ve robotun arasında beklenmedik temaslar zararlara yol açabilir [15].

Günümüzde işletmeler, üretim sahasında, geleneksel çitlerle korunan robotik hücreler yerine, insanların bir işbirlikçi robotla ortak bir çalışma alanında çalışmasından, insanların zekâ ve esnekliği ile robotların hassasiyet, tekrarlanabilirlik ve gücünden faydalanmaktadır. Örneğin, bir üretim tesisinde insan ve ABB'nin YuMi robotunun iş birliği yaparak soketleri monte ettiği bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulamada, insan iki parçayı birleştirirken YuMi, üçüncü parçayı tamamlayarak montajı tamamlamaktadır [4]. İlk işbirlikçi robotlar, Danimarka DLR tarafından araştırılmış ve daha sonra en ünlü robot üreticileri tarafından geliştirilmiştir. Bu robotlar, tamamen işbirlikçi olmak üzere tasarlanmış yeni ürünlerdir. Yapısal sensörlü çerçeve, düşük eylemsizlik kuvvetlerine sahip hafif yapı ve herhangi bir dış etkiyi algılamak için her ekleme kuvvet/tork sensörleri uygulanmıştır. Ancak bu çözümün dezavantajları, daha düşük yük kapasitesi, daha yüksek maliyetler ve daha düşük hızdır. Bu robotlar piyasadan olumlu geri dönüşler olsa da hâlâ birçok operasyon kapsam dışı kalmaktadır [16].

İnsanların robotlarla aynı çalışma alanını paylaşabilmeleri, iş birliği yapan robotlar sayesinde mümkün hâle gelmiştir. İnsan-robot iş birliği Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. İnsan-operatör ile robotun iş birliği içinde çalışması [6]

Şekil 1'de insan-operatör ile robotun montaj istasyonunda birlikte çalışması, iş birliği yapması görülmektedir. İnsan-operatör ile robotun iş birliği içinde çalışmasında, insan güvenliğini sağlamak hayati önem taşımaktadır. Bunun için iş birliği yapan robotların uyması gereken güvenlik standartları belirlenmiştir. ISO TS 15066, insan vücudunun hangi alanına çarptığına bağlı olarak, insan vücudunun emebileceği maksimum enerji/kraft/baskıyı tanımlar. Bu enerji, robot türüne, hareketine ve uzaydaki geometrik konumuna bağlıdır [16]. Özellikle ISO 10218-1 ve ISO 10218-2 güvenlik standartları, iş birliği operasyonları için belirli uygulama ve kriterler tanımlamakta ve ISO/TS 15066 iş birliği robotları için spesifikasyonlar sağlamaktadır [17]. ISO/TS 15066 standardı, robotların ve bileşenlerinin tasarımını, kullanılmasını, planlanan ortamı ve güvenlik değerlendirmesini kapsar. Ayrıca, ISO/TS 15066, tam bir ISO standardına kıyasla daha esnek ve hızlı uyarlanabilir bir rehber olarak öne çıkarak insan-robot iş birliğinde ortaya çıkan yeni zorluklara hızla cevap verebilir hâle-gelmiştir. ISO 10218 ve ISO 13482 gibi diğer ISO standartları da insan merkezli iş ortamlarında güvenli robot tasarımı ve kullanımı için katkı sağlamaktadır [18]. Esneklik ve sürdürülebilirliği artırmak amacıyla, insan-robot iş birliği yeni nesil robotların temel bir özelliği hâline gelmiştir. Ancak, güvenlik bariyerlerinin kaldırılması, öncelikli olarak güvenlik değerlendirme stratejilerinin ele alınmasını gerektirir [19].

İnsan ve robotun birlikte çalıştığı alan "çalışma alanı" olarak adlandırılır. Her robot ve insanın, görevlerini yerine getirirken hareket edebileceği bir alanı vardır ve bu alan "bölge" olarak adlandırılır. Çalışma bölgelerinde, etkileşim türüne bağlı olarak ek bölgeler bulunabilir. Örneğin, robot ve insan doğrudan temas ettiğinde, iş birliği için sanal bir çalışma alanı oluşturulabilir. Ayrıca, robot ve insan arasında araç veya parça değişimi gerçekleştiğinde, bu iş birliği alanı içinde bir "teslimat alanı" oluşabilir [20]. İnsan robot etkileşiminde, insanların rolleri beş ayrı başlık altında tanımlanmıştır. Bunlar [20];

1. *Denetim rolü:* İnsan, robotun davranışını denetler ancak doğrudan kontrol etmez.
2. *Operatör rolü:* Robotun davranışını değiştirme gerekliliğiyle, robota daha yüksek düzeyde bir etkileşim gösterir.
3. *Ekip arkadaşı rolü:* İnsan, bir grup görevi gerçekleştirmek için robotla ekip arkadaşı olarak çalışır ve görevler insan ile robot arasında bölünmüştür.
4. *Teknisyen rolü:* İnsan, robotun donanımını değiştirir veya programlar.
5. *Gözlemci rolü:* İnsan, robotu kontrol etmez ancak robotun davranışını anlayarak robotun çalışma alanında bir görev yürütür.

İnsan-robot iş birliğinde katılım seviyeleri, aşağıdaki gibi kategorize edilmektedir. Bunlar [6, 20];

Hücre

- Robot, bir kafes içinde çalışır ve güvenlik monitörleriyle sınırlanmıştır. İnsan, robotla doğrudan etkileşimde bulunmaz.
- İnsan, parçaları bir döner tabla veya taşıma cihazı gibi bir ara donanım aracılığıyla robota aktarır. Bu ara donanım, insan ve robotun çalışma alanlarını ayırır.

Birlikte Bulunma

- İnsanlar ve robotlar yan yana çalışır ancak aynı çalışma alanını paylaşmazlar.

- Güvenlik gereksinimlerine uygun olarak, robotun manipülatörünün güç ve kuvvet sınırlayıcı bir mekanizma olması gerekir.

Eş Güdüm

- İnsan ve robot, ortak bir çalışma alanı ve hedefe sahiptir ancak aynı anda bu alanı paylaşmazlar. Her biri sırayla görev yapar.
- Görevlerin dengeli bir şekilde dağıtılması, her kaynağın verimli kullanımı için önemlidir.

İş Birliği

- İnsan ve robot, aynı çalışma alanında ve aynı zamanda bulunur ancak farklı iş parçaları üzerinde çalışırlar.
- Örneğin, bir insan bazı görevleri tamamlarken robot başka iş parçalarında destekleyici görevleri yerine getirir.

Tam İş Birliği

- İnsan ve robot, aynı iş parçası üzerinde aynı anda çalışır.
- Robotlar, güvenlik ve durumsal farkındalık açısından adaptif olmalıdır. Bu tür bir iş birliği, karma otomasyon için büyük bir potansiyel taşır ancak teknolojik açıdan en zorlu seviyedir.

ISO/TS 15066, insan-robot işbirlikçi sistemlerine yönelik genel tehlike tanımlama ve risk değerlendirmelerine göre çalışma modları aşağıda tanımlanmıştır. Bunlar [14];

1. *Güvenlik Dereceli İzlenen Durdurma*: İnsanlar ve robotlar, aynı çalışma alanını paylaşabilir, ancak aynı anda çalışamazlar. Bir insan operatör ortak çalışma alanına girdiğinde robot tamamen durur ve operatör çalışma alanını terk edene kadar çalışmaya devam edemez.
2. *El ile Yönlendirme*: Robot sistemlerinin elle yönlendirilmesini sağlamak için manuel yöntemler kullanılır. Bu kontrol yöntemi kategorisinde, robot veya insan vücuduna etki eden kuvvetler açısından tanımlanmış bir üst hız sınırı yoktur, yalnızca hareket girdisi üretilir.
3. *Hız ve Ayırma İzleme*: Operatörlerin robotla aynı çalışma alanını hareket halindeyken paylaşmalarına olanak tanır. Robotun hareketi, operatör ile robot arasındaki mesafeye bağlıdır.
4. *Güç ve Kuvvet Sınırlama*: Beklenmeyen insan-robot temaslarının etkilerini hafifletir. Bu, operatörle çarpışma anında robotun hareketinin kuvvet ve momentumun, yaralanmayı önlemek için belirlenen limitler içinde kalmasını sağlayacak şekilde kontrol eden kontrol şemaları uygulanarak gerçekleştirilir.
5. *Güvenlik İzlenebilir Durma*: Robot hareketi, yalnızca operatör işbirlikçi çalışma alanının dışında olduğu sürece izin verir. Operatör içeri girdiğinde robot hareketi durur.
6. *Hız ve Mesafe İzleme*: Operatörün işbirlikçi çalışma alanına girmesine izin verir. Burada robot hareket hızı, operatör ile robot arasındaki mesafeye bağlı olarak dinamik bir şekilde azalır veya artar. Mesafe, minimum koruma ayırma mesafesinin altına düştüğünde robot durur.
7. *El Rehberliği*: İnsan ve robot arasındaki teması kabul eden ilk durumdur. Operatör, robotu el rehberliği cihazı veya bir kuvvet-tork sensörü yardımıyla el ile hareket ettirebilir.
8. *Güç ve Kuvvet Sınırlama*: Tamamen paylaşılan bir işbirlikçi çalışma alanı ve insan-robot arasında kasıtsız çarpışmaların olasılığını mümkün kılar. Güvenliği sağlamak için güç ve kuvvet, belirlenen biyomekanik kuvvet veya basınç eşiklerine uygun şekilde sınırlandırılmıştır.

İlk üç işbirlikçi operasyon türü için yapılan risk değerlendirmesinin amacı, operatörle hareket eden robot arasında fiziksel teması engellemektir. Endüstri 4.0 sürecine geçişte, insan-robot iş birliği üzerine son yıllarda yapılan çalışmalar aşağıdaki altı başlık altında toplanmıştır [13]. Bunlar:

- *ROS Tabanlı Koordinasyon*: İnsan ve robot arası montaj koordinasyonu için ROS tabanlı yazılım kullanılır. İnsan-robot görevleri, çevrim dışı programlama kullanılarak simüle edilir ve görevler grafiksel kullanıcı arayüzü yardımıyla çağrılır; böylece robot ve insan operatörler görevlendirilebilir.
- *İnsan Güvenliği*: İnsan-robot iş birliği için kinetostatik güvenlik konsepti tanımlanmış ve hesaplama yöntemleri sunulmuştur.

- *Montaj Hücresi*: İnsan-robot iş birliği montaj hücresinde görev atama-planlama metodolojisidir. ROS kullanılarak genel bir çerçeve geliştirilmiştir.
- *Geleceğin Montaj Fabrikaları*: Robo-partner projesi tanıtılmış ve projenin ana hedefi, güvenli İRİ için entegrasyon platformu geliştirmektir.
- *Hız ve Ayrım İzleme*: Otomotiv endüstrisinde montaj süreci için insan-robot iş birliğine yönelik bir çözüm geliştirmiştir.
- *Sensörler*: İnsan-robot iş birliği için gerekli güvenliği sağlamak adına çeşitli sensör türlerinin uygulanması ve entegrasyonundan oluşur.

Endüstriyel robotlardaki mekanik risklerle ilgili olarak geliştirilen standartlar aşağıda sunulmuştur [4, 15].

- *Tip A standardı*: ISO 12100 (Uluslararası Standardizasyon Örgütü, 2010): risk değerlendirmesi ile ilgilenir.
- *Tip C standartları*: ISO 10218, 1. ve 2. bölüm (Uluslararası Standardizasyon Örgütü, 2011): Endüstriyel (geleneksel ve işbirlikçi) robotlar ve entegre robot sistemleri için genel güvenlik gereksinimlerini belirtir.
- *Teknik özellik ISO 15066*: (Uluslararası Standardizasyon Örgütü, 2016): Özellikle işbirlikçi operasyonlar için tanımlanan güvenlik gereksinimlerini açıklar.
- *IEC TS 62998-1:2019*: Kişilerin korunması için kullanılan güvenlikle ilgili sensörlerin ve sensör sistemlerinin geliştirilmesi ve entegrasyonu için gereksinimleri belirler.

Cobot'lar, sözlü ve sözsüz iletişim kanallarıyla kontrol edilir. Sözsüz iletişim, jestler, sensörler ve grafik arayüzlerle gerçekleştirilirken, robot programcısı bu iletişim yöntemlerini kullanarak robotların hareketlerini ve görevlerini belirler. Operatör ise robot üzerindeki önceden tanımlanmış eylemleri başlatır. Cobot'ların çalışmaları iki ana aşamada gerçekleşir. Bu aşamalar optimizasyon aşaması ve eğitim aşamasıdır. Optimizasyon aşamasında, cobot'un çalışma ortamındaki engeller ve takım konumları gibi unsurlar, matematiksel olarak modellenir ve en iyi performansı sağlamak için optimize edilir. Cobot'un taşıma kapasitesi, enerji tüketimi, bütçe ve ürün kalitesi gibi faktörler göz önünde bulundurularak işbirlikçi sistem geliştirilir. Eğitim aşamasında ise cobot, insanlara benzer şekilde öğrenme yöntemleri ile beceriler kazanır. Programcı, öğrenme algoritmalarını geliştirip ilk eğitim verilerini sağlarken, operatör ise robot hareketlerini geri bildirim ve sorulara yanıtlarla kontrol eder. Operatör, aynı zamanda işbirlikçi çalışma ortamının bir parçası olarak robot üzerinde dolaylı kontrol sağlar [12].

Endüstriyel entegratörlerin güvenliğini etkileyen faktörler çeşitlidir. Robotun malzemesi, kendi ağırlığı, kullanılan alet türü, çalışma hızı ve tepki süresi gibi güvenlikle ilgili faktörler ISO 15066'da belirtilmiştir. Ancak, karmaşık bir ortamda güvenliği en çok etkileyen unsur, kuşkusuz endüstriyel robotların hızıdır. Hız, insanlara zarar veren en önemli etkidir. Bu nedenle, çeşitli güvenlik göstergelerinin etkisini ve gerçek zamanlı uygulama gerekliliklerini dikkate alan bir güvenlik risk değerlendirme modeline ihtiyaç vardır [19]. ISO/TS 15066 standardı ve sanayi insan-robot işbirlikçi hücresinde risk değerlendirme paradigması dikkate alındığında risk değerlendirme ile ilgili ilkeler aşağıda özetlenmiştir [19].

1. *Bilimsellik İlkesi*: Risk değerlendirme modeli, teorik desteğe sahip olmalıdır.
2. *Bağımsızlık İlkesi*: Göstergeler birbirinden bağımsız olmalı ve tekrarlanmamalıdır.
3. *Tamlık İlkesi*: İnsan-robot işbirlikçi hücresinde, risk faktörlerini etkileyen tüm önemli göstergeler değerlendirme modelinde yer almalıdır.
4. *Sadelik İlkesi*: Geliştirilen model, değerlendirme yöntemlerinin uygulanmasını kolaylaştırmak için mümkün olduğunca basit olmalıdır.
5. *Sınıflandırma İlkesi*: Dinamik ve gerçek zamanlı risk değerlendirme ihtiyaçlarını karşılamak için göstergeler sınıflandırılmalıdır.

ISO/TS 15066'ya göre, risk değerlendirme göstergeleri üç kategoriye ayrılmıştır: robotla ilgili tehlikeler (robot özellikleri, kurulum yeri ve yarı statik temas koşulları), robot sistemiyle ilgili tehlikeler (uç eleman ve iş birliği tehlikesi, manuel kontrollü robot yönlendirme cihazı, çevresel etkiler ve faktörler) ve

uygulamayla ilgili tehlikeler (Operatör hareketleri ve konumu, süreçle ilgili özel tehlikeler, ergonomik tasarımdaki eksiklikler) olarak tanımlanır. İRİ’de güvenlik risklerinin azaltılması için son yıllarda gelişen teknolojiler kullanılmaktadır [21]. Bunlar aşağıda sunulmuştur.

- *Optik gözlem ve derin öğrenme kameraları:* İşbirlikçi alanın değerlendirilmesinde kullanım oranı giderek artmaktadır.
- *Robotik algılama sistemleri:* Elektro-mekanik sensörler ve kamera teknolojilerinde gelişmeler sürmektedir.
- *Yapay zekâ ve hata tespiti:* Yazılım tarafında, yapay zekâ ile hata tespit sistemleri geliştirilmektedir.

İnsan robot birlikteliğinde beş etkileşim seviyesi tanımlanmıştır [22]. Bunlar;

1. *Hücre Seviyesi:* Robotlar kafes içinde çalışır.
2. *Koşut Çalışma:* İnsan ve robot aynı alanda çalışır ancak birbirinden bağımsızdır.
3. *Senkronize Çalışma:* İnsan ve robot sırayla çalışır.
4. *İş birliği:* İnsan ve robot aynı alanı paylaşır ancak eş zamanlı çalışmaz.
5. *Kolaborasiyon:* İnsan ve robot aynı üründe eş zamanlı çalışır.

İnsan-makine iş birliği konusunda, Isaac Asimov bazı kurallar belirlemiştir [16]. Bunlar;

- Bir robot, bir insana zarar veremez veya hareketsiz kalarak insanın zarar görmesine izin veremez.
- Bir robot, birinci yasa ile çelişmediği sürece insanlar tarafından verilen emirlere itaat etmelidir.
- Bir robot, birinci veya ikinci yasa ile çelişmediği sürece kendi varlığını korumalıdır.

2.1. Endüstriyel Uygulamalar

İRİ sistemlerinin endüstriyel uygulamaları, özellikle otomotiv sektöründe önemli bir yer tutmaktadır. İlk İRİ iş birliği, BMW Grup’un Amerika Birleşik Devletleri’ndeki Spartanburg tesisinde kapı montajında gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada, operatör yapışkan boncuğu kapıya yerleştirirken, robot ses ve nem yalıtımının bastırılması gibi kuvvet gerektiren işlemleri üstlenmiştir. Robotun düşük hızda çalışması ve sensörlerin başarılı bir varlık tespitiyle robotu durdurması, güvenlik açısından kritik önlemler olarak belirtilmiştir. Ancak bu uygulamada detaylı güvenlik bilgisi verilmemiştir. Bir diğer uygulama, Almanya’nın Ingolstadt kentindeki Audi üretim tesisinde gerçekleştirilmiştir. Burada, operatör, karbon fiber takviyeli polimer çatıları döner bir tablaya yerleştirmiş ve yapıştırıcı uygulama süreci işbirlikçi bir robot tarafından tamamlanmıştır. Güvenlik için çarpışma algılama, acil durdurma düğmesi ve sistem durumu LED göstergesi gibi önlemler alınmıştır. Operatörün süreç boyunca kontrolü elinde tutması için bir düğmeye basması ve düğmeyi basılı tutması gerekmektedir. BMW’nin Almanya’daki Dingolfing tesisinde ise KUKA lbr iiwa robotu, ön aks dişli kutuları için ağır muhafazaları monte ederken, operatör diğer parçaları yerleştirme görevini üstlenmiştir. Güvenlik önlemleri arasında mafsal-tork sensörleri ile çarpışma algılama, her adımda görev onayı için bir düğme ve tutucu üzerinde koruyucu bir kılıf yer almaktadır. Robot üreticileri, PFL fonksiyonlarını entegre eden hafif işbirlikçi robotlar tasarlamıştır. Örneğin, KUKA lbr iiwa, Universal Robots UR10 ve ABB YuMi gibi robotlar, çarpışma algılama, titreşim sönümleme ve darbe kuvvetlerini azaltan özel sensörlerle donatılmıştır. Basınca duyarlı dokunsal sensörler, çarpışmaları yastıklayan materyaller ve entegre cilt modülleri, robot güvenliğini artıran diğer önemli teknolojiler arasında yer alır [10].

İnsan-operatörleri ile robotun iş birliği içinde çalışmasında kullanılan bir güvenlik yöntemi de tank tabanlı kontrol metodudur. Bu yöntemde, robotun kinetik enerjisini sınırlamak ve bu enerjinin güvenli sınırlar içinde kalmasını sağlamak amacıyla bir enerji tankı kullanılır. Bu enerji tankı, robotun hareketi sırasında üretilen enerjiyi depolar ve belirli bir limit aşılmadıkça bu enerjiyi kullanmasına izin verir. Enerji tankı, bir santral enerji deposu gibi çalışarak robotun tüm eklemlerinden gelen enerji girdilerini kontrol eder. Bu sayede, bir çarpışma durumunda robotun enerjisi önceden belirlenen güvenli limitlerin ötesine geçmez. Enerji tankı kontrolü sırasında, robot hareketine devam ederken güvenlik kontrolünün aktif olması, İRİ’nin güvenli bir şekilde sürdürülmesini sağlar [21, 23].

3. LİTERATÜR TARAMASI

İnsan robot iş birliği ile ilgili son yıllarda literatürde yapılan araştırmalar aşağıda özetlenmiştir. Matthias ve Reisinger [6] insan operatörle yan yana veya yüz yüze çalışan çift kollu robotun bulunduğu işbirlikçi çalışma modelini incelemişlerdir. ABB YuMi iki kollu işbirlikçi robotun, güç ve kuvvet sınırlaması ilkesiyle çalıştığı ve iki operatörle ortak montaj yaptığını analiz etmişlerdir. Robot ve insan operatörlerinin ortak bir tezgâhta çalışmalarını ve düzenli montaj hücrelerinin birinde işlem yapmalarını değerlendirmişlerdir. Temas durumlarının her biri için gerçek ölçümleri yapmışlar ve uygun hesaplamalar kullanılarak temasın, insan vücudundaki etkilerini belirlenmişlerdir. Baş ve diğer vücut bölgelerine olacak olası temasların ek önlemlerle hafifletilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır.

Bobka ve dig. [7] endüstriyel insan-robot iş birliğinde, bu tür sistemlerin güvenli bir şekilde tasarlanmasının önemli bir konu olduğunu vurgulamışlardır. Ancak, bu sistemlerin tüm yetenekleriyle değerlendirilmesinin, devreye alınmadan önce zor olduğunu belirtmişlerdir. Bu soruna çözüm olarak, özel simülasyon araçlarını önermişlerdir. Gerçek dünyadaki geometrik veriler kullanılarak farklı algoritmalar ve güvenlik stratejileri araştırmışlardır. Bir strateji olarak, çarpışmadan kaçınmak için genetik algoritma kullanılarak kısa bilgi işlem sürelerinde büyük veri setleriyle başa çıkılacağını göstermişlerdir.

Kuts ve dig. [13] farklı iş birliği yöntemlerinin, ISO/TS 15066:2016 standardına göre belirlendiğini, iş birliği süreçlerinin ileri düzey çok katmanlı izleme sistemi, minimum robot duruş süresiyle, insan güvenliğinin en üst düzeye çıkarılacağını belirtmişlerdir. Çevrimiçi izleme süreçlerinde en uygun çözümü bulmak için birkaç yöntemi analiz etmişlerdir. Çok katmanlı bir güvenlik izleme sistemi tasarlayıp simülasyon yazılımında, gerçek oda koşullarında endüstriyel robotla test etmişlerdir. Güvenlik modüllerinin, çok katmanlı sistemi, bir kontrol ve izleme çevrimiçi sisteminin parçası olarak farklı sensörlerden ve siber fiziksel üretim sistemine bağlanabilen mikrodenetleyiciden oluştuğunu belirtmişlerdir.

Francesco ve Paolo [16] AURA-Otomotiv ve genel endüstri uygulamaları için işbirlikçi bir robot örneğini sunmuşlardır. AURA'nın şimdiye kadar tasarlanan ilk yüksek taşıma kapasiteli işbirlikçi robot olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, İtalya'nın en ünlü üniversiteleri ile iş birliği yaparak teknoloji (ISO) sertifikalı, insan yakınlığını algılayabilen sensörlerin dış yüzeye yerleştirilmesiyle sağlanan yedekli iletişime dayanan bir konsept geliştirmişlerdir.

Antonelli ve Bruno [24] çalışmalarında, iki farklı ontoloji kullanılmışlardır. İlki, CCORA olarak adlandırılan, robotik ve otomasyon için kullanılan standart bir ontolojinin iş birliğine yönelik genişletilmiş versiyonudur. İkincisi ise MPRO olarak adlandırılan, üretim süreçleri ile ilgili makineler, araçlar ve parametreler gibi kavramları içeren bir üretim süreci ontolojisidir. Bu ontolojilerin, iş birliği hücreleri bağlamında bilgi paylaşımını ve süreç organizasyonunu desteklediğini belirtmişlerdir. Avrupa Topluluğu tarafından desteklenen "ECHORD FREE" projesi kapsamında, Politecnico di Torino'daki DIGEP Laboratuvarında işbirlikçi bir robot kaynak hücresi geliştirmişlerdir. Bu hücrenin, tüm akıllı sensörler ve robot kontrolörleriyle donatıldığını yalnızca gerekli süreçlerin incelenmesi için belirli sensörlerin etkinleştirildiğini belirtmişlerdir. Standart endüstriyel robotların güvenlik endişeleri doğrultusunda, belirli bir iş birliği mekanizması geliştirmişlerdir. ISO/TS 15066 standardının 5.10.4 maddesine göre iş birliği türü, hız ve ayırım izlemesini temel almışlardır.

Chen [8] işbirlikçi robotların, Endüstri 4.0 altyapısındaki rolü ve bu robotların güvenliğini sağlamak için karşılaşılan süreçler ve zorlukları ele almıştır. Çitsiz robotlarla doğrudan temas nedeniyle yaralanma riskinin azaltılabilmesi için mevcut robot tasarımlarında ağırlık, taşıma kapasitesi, hareket hızı ve sensör teknolojileri gibi modifikasyonlar yapılması gerektiğini belirtmiştir. ISO 10218 standardına ek olarak, 2016 yılında yayınlanan TS-15066, geliştiricilerin etkileşimdeki riskleri doğrulamalarına ve yönetmelerine yardımcı olmak amacıyla ortaya çıktığını ifade etmiştir. Ancak, otonom özelliklerin (örneğin kablosuz yeniden programlanabilir işlevler, yürüme ve uçuşa gibi) eklenmesiyle yeni zorlukların ortaya çıkacağına da dikkat çekmiştir.

Rosenstrauch ve Krüger [14] ISO/TS 15066'nın detaylı bir incelemesini yapmışlardır. Sonrasında, ISO/TS 15066'ya uygun olsa bile bir olay durumunda mevcut artık tehlike potansiyeli üzerine bir tartışma ve insan-robot iş birliği içinde daha fazla güvenlik sağlama yönünde gelecekteki yaklaşımlara bir bakış sunmuşlardır. ISO/TS 15066'nın kullanımını göstermek ve bir uygulama için risk değerlendirmesi uzmanlıkla yapılmazsa bir insan-robot sisteminin hâlâ tehlikeli olabileceğini göstermek için bir deney gerçekleştirmişlerdir. Senaryoda bir "al ve yerleştir" görevi ele alınmıştır. Soyut bir montaj sürecinde, bir iş parçasının (bir küp ile sembolize edilen) alınıp başka bir pozisyona taşınmasını analiz etmişlerdir.

Malik ve Bilberg [20] üretim alanında insanlar ve robotlar arasındaki çeşitli etkileşim türlerini ve seviyelerini incelemişlerdir. İnsan-robot iş birliğini, ekip bileşimi, etkileşim seviyesi ve güvenlik olmak üzere üç boyutta ele alan bir sentezleme mimarisini önermişlerdir. Bu mimari ile iş birliğini 3 boyutlu bir referans ölçeğiyle tanımlamışlardır. Çalışmaları, hem geleneksel ağır yük endüstriyel robotlar hem de hafif iş birliği robotları için uygulanabilir bir insan-robot iş birliği taksonomisi sunmaktadır. Taksonomi, insan-robot iş birliğinin çeşitli yönlerini içeren 3 boyutlu bir model formundadır.

Shin ve dig. [25].işbirlikçi robotların, insan uzuvlarıyla çarpışması durumunda aşılması gereken maksimum çarpışma tepe basıncını içeren, ISO/TS 15066 teknik spesifikasyonunu çeşitli modellerle hesaplanması ve değerlendirilmesi için çalışma yapmışlardır. İşbirlikçi robotlar çalışma alanlarını insanlarla paylaştığından, genellikle insan ve robot arasında fiziksel çarpışmanın kaçınılmaz olduğunu belirtmişlerdir. Çarpışmadan kaynaklanan insan yaralanmalarını önlemek için robotların, çarpışma tepe basıncının gerçek zamanlı olarak tahmin edilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Araştırmalarında, işbirlikçi robot için çarpışma güvenliğini, temas yüzeyi, çarpma tertibatı şekli ve malzeme ile ilişkili sonlu elemanlar modeline dayalı gerçek zamanlı bir basınç tahmin yöntemini önermişlerdir.

A-IHamouz ve dig. [5] insan-robot etkileşimi bulunan endüstriyel çalışma ortamlarında, güvenlik sağlamak amacıyla bir yazılım-donanım entegrasyonu geliştirmeyi amaçlamışlardır. ISO'nun belirlediği güvenlik standartlarına uygun olarak, robotların insan çalışanlarla etkileşimi sırasında olası kazaları önlemeye odaklanmışlar. Çalışmalarında, iki ana bölümden oluşan bir sistem önermişlerdir. Bunlar, kritik kararları alan bir yapay zekâ modülü ve sensörlerle çalışan bir yazılımdır. Önerdikleri sistemin hedefinin, iş akışını veya üretim hızını etkilemeden, çalışanların güvenliğini sağlamak olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmalarında insan-robot etkileşimi olan üretim hatlarında, güvenliği sağlamak amacıyla iki robot manipülatörü içeren bir sistem önermişlerdir. Önerdikleri sistemin hedefinin, fabrikalardaki üretim hatlarında çalışan robotlar ve insan işçiler arasındaki etkileşimde güvenliği sağlarken üretim hızını en yüksek seviyede tutmak olduğunu belirtmişlerdir.

Vysocký ve dig. [11] işbirlikçi insan-robot çalışma ortamında operatör güvenliğini sağlama konusunu incelemişlerdir. Genel robot hareketi için evrensel kısıtlamalar getirmenin verimliliği düşürebileceğini ve çalışma süresini uzatabileceğini belirtmişlerdir. Bunun yerine, güvenlik önlemlerinin hareket planlama aşamasında dikkate alınarak üretim sürecinin verimli tutulabileceğini vurgulamışlardır. Çalışmalarında, robot hareketlerini planlarken güvenlik açısından çeşitli yöntemleri önermiş ve değerlendirmişlerdir. Operatör güvenliğini, ISO/TS 15066 standartlarına ve operatörün vücudu tarafından enerji emilimi prensibine dayalı olarak tanımlamışlardır. Önerdikleri yöntemle, robot hızını kontrol ederek, işçilere zarar verme riskini azaltmayı hedeflemişler ve farklı yöntemlerin etkinliği karşılaştırmışlardır. Robotun her hareketini, bağıl hız ve ayırma mesafesi hesaplayarak planlamışlar ve çarpışma durumunda robotun kinetik enerjisinin, operatörün vücudu tarafından emildiğini belirtmişlerdir.

Schaffert [10], ISO/TS 15066'ya uyumlu ve sertifikalı güvenlik teknolojileriyle bir güvenlik sistemi geliştirmiştir. Tasarımda, lazer tarayıcı ve KUKA LBR iiwa robotu kullanılarak dört teorik güvenlik sistemi önermiştir. Sistemlerin, robot hareketini durdurma, hızını azaltma veya çarpışma sonrası durdurma gibi fonksiyonları içerdiğini belirtmiştir. Sistemlerden birinin, hız ve ayırma izleme prensibini güç ve kuvvet sınırlayıcı koruma modu ile birleştirerek güvenlik bölgesinin boyutunu küçülttüğünü bildirmiştir. Statik güvenlik bölgelerini, ISO/TS 15066'ya göre hesaplamıştır. Risk değerlendirmesiyle, tüm riskler kabul edilebilir seviyeye indirilmiş ve nihai tasarım oluşturmuşlardır. Uygulamayı, Scania laboratuvarında bir

prototip ile test etmiş, teorik ve pratik uygulamalar arasındaki farkları belirlemişlerdir. Robotun güvenlik tepkilerini, lazer tarayıcı ve robotun dahili güvenlik fonksiyonlarını entegre ederek gerçekleştirmişlerdir.

Liu ve dig. [19] güvenlik göstergeleri setini belirlemişler ve en son güvenlikle ilgili ISO standartlarına ve üretim koşullarına dayalı bir değerlendirme modeli oluşturmuşlardır. İnsan-robot iş birliğinin güvenliğini sağlarken üretkenliği en üst düzeyde tutmak için dinamik olarak modifiye edilmiş bir hız ve ayırım izleme yöntemi önermişlerdir. Ayrıca, sanal robot modeli ve görsel sensörlerden elde edilen insan iskelet noktası verilerini kullanarak dinamik risk değerlendirme ve güvenli hareket kontrolünü içeren bir prototip sistem geliştirmişlerdir. Çalışma sırasında robotun gerçek zamanlı risk durumu ve robot etrafındaki risk alanı artırılmış gerçeklik ortamında görselleştirilerek güvenli bir iş birliğini sağlamışlardır. Sistemlerini, altı serbestlik derecesine sahip bir endüstriyel robot kullanarak yapılan insan-robot iş birliği hücresinde deneysel olarak doğrulamışlardır.

Scalera ve dig. [26] işbirlikçi robotik için güvenlik standartlarının gerekliliklerine dayanan dinamik güvenlik bölgelerinin uygulanmasına yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmuşlardır. Önerdikleri yöntem, robot ile operatör arasındaki çarpışma ihtimalini, robotu çevreleyen hacimlerin, insanı çevreleyen hacimlerle kesişip kesişmediğini çevrimiçi olarak test ederek doğrulamayı amaçlamıştır. Bu yaklaşımlarının, aşırı temkinli güvenlik kısıtlamalarının, robotun işbirlikçi göreve katkısını sınırlayan etkilerini ele almayı sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca, robotik kol için durma yollarını çevrimiçi olarak hesaplamışlardır.

Ferraguti ve dig. [27] ISO/TS 15066, insan ve robotların aynı iş üzerinde güvenli bir şekilde iş birliği yaptığı robotik hücrelerin tasarımına yönelik uluslararası bir kılavuz olduğunu belirtmişlerdir. Ancak mevcut yaklaşımların, robotların genellikle düşük hız gibi ölçülü davranmasına neden olarak işbirlikçi hücrelerin performansını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Çalışmalarında, ISO/TS 15066'nın gerekliliklerine uyum sağlarken, robotların daha hızlı ve etkin çalışabilmesi için bir kontrol yöntemi önermişlerdir. Amaçlarının, robot ve insan arasındaki mesafenin güvenlik sınırlarını zorlamadığı durumlarda robotun hızını artırarak kontrol yaklaşımı sunmak olduğunu belirtmişlerdir. Yaklaşımlarının, Kontrol Bariyeri Fonksiyonlarının teorik çerçevesine dayandığını ve sistemin davranışını güvenli sınırlarda tutarken robotun performansını optimize etmeyi hedeflediğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarının yenilikçi katkısının, Sıfırlama Kontrol Bariyeri Fonksiyonları tabanlı bir kontrol tasarımı sunduğunu, insan-robot mesafesinin ISO teknik şartnamesinin ölçülü kısıtlamalarından kurtulmayı ve daha yüksek hızlarda robot operasyonları gerçekleştirmeyi sağladığını belirtmişlerdir. Deneysel doğrulama için Universal Robot UR5 manipülatörü ve bir derinlik kamera sistemi kullanmışlardır.

Laudante ve dig. [22] endüstride ergonominin, çalışan güvenliği ve üretkenlik artırımı açısından kritik bir role sahip olduğunu belirtmişlerdir. Havacılık sektöründe, ağır yük kaldırmanın, zorlayıcı pozisyonlar ve tekrarlayan hareketler nedeni ile kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına neden olabileceğini ifade etmişlerdir. İnsan merkezli tasarımın, Endüstri 4.0 çerçevesinde önemli bir prensip olduğunu ve bu yaklaşımın iş istasyonlarının dijital ikiz ile tasarlanmasını sağladığını belirtmişlerdir. Robotların üretim süreçlerine entegrasyonunun, kaliteyi artırdığını, ergonomik sorunları azalttığını ve iş süreçlerini hızlandırdığını belirtmişlerdir. Havacılık üretiminde robotların kullanımının henüz sınırlı olduğunu; bu durumun, düşük üretim hacimleri, karmaşık sistemler ve yüksek hassasiyet gereksinimleri gibi zorluklardan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Robotların, hassasiyet gerektiren delme, havşa açma ve perçinleme işlemlerinde kullanılmasını önermişlerdir.

Chemweno ve dig. [28] ISO 15066 standardının, robot sistemlerinin güvenli tasarımı, entegrasyonu ve işbirlikçi alanların oluşturulması için yönergeler sunduğunu belirtmişlerdir. Standardın odak noktasının, tehlike analizi ve risk değerlendirme süreçlerinin yapılandırılması olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak, mevcut literatürde tasarımcıların bu süreçleri nasıl yönlendirmesi gerektiği ve hangi yöntemleri kullanabileceğinin net olmadığını söylemişlerdir. ISO 31000'e dayalı bir çerçeve önermişler ve tasarım önlemlerinin tehlike analizi ve risk değerlendirme sonuçlarına nasıl yönlendirilebileceğini incelemişlerdir.

Bricher ve Müller [29] insan-robot iş birliği ortamlarında, dayanıklılık, sağlamak için kullanılan farklı insan tanıma ve vücut bölgesi tanıma yöntemleri ve bu işlevlerdeki gecikme sürelerini analiz etmişlerdir. İş birliği yapılan cobotların, insanların yakınında güvenli bir şekilde çalışmak üzere tasarlandığını belirtmişlerdir. ISO/TS 15066'nın bu robotların insanların güvenli bir şekilde etkileşime geçebilmesi için maksimum kuvvet ve basınç limitlerini belirlediğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, insan tanıma bölgesi ve vücut geliştirmelerini robot hızının nasıl optimize edilebileceğini ve gecikme sürelerinin nasıl en aza indirilebileceğini kullanarak araştırmalar yapmışlardır

Gabrielli ve Secchi [17] ISO/TS 15066 yönetmeliğine uygunluğun, sertifikalandırılabilir bir insan-robot iş birliği uygulaması gerçekleştirmek için kritik öneme sahip olduğunu belirtmişlerdir. Bu yönetmeliklerin robotun kontrol eyleminin tanımına doğru bir şekilde entegre edilmemesi, robotun muhafazakâr ve verimsiz bir davranış sergilemesine yol açabileceğini ifade etmişlerdir. Performansı en üst düzeye çıkarmak için, güvenlik standartlarını iş birliği uygulamasına entegre etmek için Derin pekiştirmeli öğrenme (Deep Reinforcement Learning) tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Önerdikleri stratejiyi, deneysel olarak doğrulamışlardır. Derin Pekiştirmeli Öğrenmenin (DPÖ) robot için uzun vadede optimal olan, model gerektirmeyen ve çok verimli (küresel olarak optimal) yörüngeler elde etmek için çok etkili bir strateji olduğunu belirtmişlerdir. DPÖ'ü robotikte karmaşık davranışlar elde etmek için kullanmışlar ve özellikle yüksek boyutlu durum uzayı problemlerinde optimal sonuçlar elde etmişlerdir. DPÖ, iş birliği senaryosunda güvenli bir davranış uygulamak için kontrol bariyer fonksiyonlarıyla entegre etmişlerdir. Bu amaçla, iki farklı Sinir ağı tabanlı, Actor-Critic çerçevesinden oluşan bir DPÖ mimarisini önermişlerdir. İki aktörün çıktılarını uygun bir şekilde birleştirerek, robot güvenlik standardına uygun olarak hedef konfigürasyona ulaşacak bir giriş belirlemişlerdir.

Kirschner ve dig. [30], ISO/TS 15066'ya göre insan-robot etkileşimi sırasında sınırlı çarpışma senaryolarında güvenliğin nasıl sağlanabileceğini analiz etmişlerdir. Araştırmada, robotun darbe hızını ve çarpışma sırasında kullanılan tepki parametrelerini, zirve çarpışma kuvveti ile ilişkilendiren "Constrained Collision Force Map (CCFM)" kavramını önermişlerdir. UR10e, UR5e ve Franka Emika Panda robotlarının farklı parametreler altında sınırlı çarpışma davranışlarını incelemişlerdir. İnsan-robot etkileşimi bağlamında yapılan çarpışma deneyleri, robotun etkin kütlelerinin çarpışma sırasında insan yaralanma olasılığını etkileyen ana parametrelerden biri olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca mevcut standart olan ISO/TS 15066'nın bu parametrenin önemini vurguladığını ve etkin kütleyle dayalı olarak maksimum güvenli robot hızının belirlenmesi yöntemini sunduğunu belirtmişlerdir. Hem güvenli hem de verimli robot uygulamaları sağlamak için robotun anlık etkin kütlelerini yeterli doğrulukla belirlemenin önemli olduğunu bildirmişlerdir. Bunun, ya a) kinematik ve dinamik bir model ya da b) uygun bir çarpışma deneyi ile yapılabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında, Khatib tarafından geliştirilen yerleşik yansıtılmış kütle modeli ile ISO/TS 15066'da sunulan basitleştirilmiş modelin, KUKA LWR IV+ ve Franka Emika Panda robotları için karşılaştırmasını yapmışlardır. Ayrıca etkin kütleli pratik olarak belirlemek için bir pasif mekanik sarkaç düzeni önermişlerdir. Simülasyon ve gerçek dünya sonuçlarından insan güvenliği ve robot verimliliği ile ilgili çıkarımlar yapmışlardır.

Sultanov ve dig. [12] hem endüstri hem de hizmet sektörlerindeki modern cobot'ları ele alırken, sanal ve gerçek dünya uygulamalarına dair araştırmaları incelemişlerdir. Ayrıca, ISO/TS 15066 standardı kapsamında, insan operatörlerin güvenliğini sağlamak amacıyla cobot'ların rolünü vurgulamışlardır. ISO/TS 15066 gibi teknik standartlar ve bu standartların cobot'ların güvenlik özelliklerini nasıl şekillendirdiği üzerinde durmuşlardır. Ayrıca, cobot'ların insan operatörlerle iş birliği sırasında ortam güvenliğini sağlamak için kullanılan çeşitli yöntemler, potansiyel tehlikeler ve risk azaltma stratejilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında, insan-robot etkileşimi ile ilgili tehlikelerin tanımlanması ve bu tehlikelerin önlenmesi için kullanılan teknikleri detaylandırmışlardır. Özellikle insan hareketlerinin tahmin edilmesi, dinamik uyum yöntemleri, uzaktan kontrol ve temasa dayalı etkileşim teknikleri gibi cobot'ların programlama stratejileri ve öğrenme tabanlı yöntemleri tartışmışlardır.

Nandeshwar ve diğ. [15] insanla robot arasındaki mesafeye göre robotun hızını ayarlayabilen, ISO/TS 15066 Hız ve Ayırma İzlemeye odaklanmışlardır. Robotun durması gereken koruyucu mesafeyi, Güvenlik Dereceli İzlenen Hıza kıyasla azaltılabileceğini belirlemişlerdir.

Kang ve diğ. [31] son yıllarda, akıllı fabrikalarda, robotlar ve insan etkileşimi üzerine yapılan çalışmaların arttığını belirtmişlerdir. Özellikle manipülörlerin kullanımının yaygınlaşmasıyla, robotların ve insanların çalışma alanlarının örtüşmekte olduğunu ve bunun da güvenlik konularının önemini artırdığını ifade etmişlerdir. ISO 15066 güvenlik standardını karşılayan bir 3D potansiyel alan tabanlı manipülör çarpışma önleme algoritması önermişlerdir. Bu algoritmanın, robotun hızını, mesafe tabanlı olarak kontrol edip çarpışma riskini azalttığını belirtmişlerdir. Geliştirdikleri sistemin, manipülörün çalışma alanındaki engelleri algıladığını ve hız kontrolünü ISO 15066 kriterlerine göre yaptığını ifade etmişlerdir. Geleneksel engel tespiti algoritmalarının, sensörlerin kör noktalarından kaynaklanan sorunları çözmekte yetersiz kaldığını ve önerdikleri sistemin bu sorunu ortadan kaldırarak, manipülörün çevresindeki engellerden kaçınmasını sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca, önerdikleri algoritmanın, robot ve insan etkileşimini güvenli bir şekilde yönetebilmek için hız ve mesafe tabanlı kontrol uygulamaları sunduğunu belirtmişlerdir. Sistemlerini, simülasyon ve deneysel verilerle test etmişlerdir.

Kóczi ve Sárosi, [21] insan-makine iş birliğinin özellikle güvenlik boyutunu ele almışlardır. Araştırmalarında, insanların fiziksel bariyer olmadan, robotlarla güvenli bir şekilde çalışabileceği bir ortam sunarak iş yerlerini daha güvenli, işbirlikçi ve üretken hâle getirilmesine odaklanmışlardır. Çalışmalarında, ISO/TS 15066:2016 standardına dayalı olarak mevcut teknolojileri ve risk değerlendirme yöntemlerini incelemişlerdir. Ayrıca, standartların etkilerini ve insan-makine iş birliğinin gelecekteki yönelimlerini değerlendirmişlerdir.

Benzi ve diğ. [23] insan-robot etkileşimi sırasında güvenliği sağlamak için enerji tankı tabanlı bir kontrol çerçevesi sunmuşlardır. ISO/TS 15066'ya uygun olarak, İR'nin güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesi için robot sistemlerinin enerji seviyelerinin kontrol edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Önerdikleri yöntemin, enerji tanklarının kullanımı yoluyla robotun güvenli sınırlar içinde çalışmasını garanti ettiğini ifade etmişlerdir. Deneysel sonuçların, kontrol yönteminin etkili bir şekilde robotun güvenliğini sağladığını ve insanlarla güvenli bir iş birliği gerçekleştirebildiğini gösterdiğini belirtmişlerdir. Geleneksel yöntemlerin genellikle kuvvet-tork sensörleri kullanarak çarpışmaları algılayıp tepki vermeye dayandığını fakat bu tür algılama tabanlı yaklaşımların çarpışmayı önlemek için yeterince hızlı tepki veremeyebileceğini ve bu nedenle yaralanma riskini azaltmada yetersiz kalabileceğini ifade etmişlerdir. Enerji tabanlı kontrol yaklaşımlarının, çarpışma durumunda potansiyel olarak iletilecek enerjiyi sınırlayarak güvenliği sağlamada avantaj sunduğunu belirtmişlerdir. Enerji tankı temelli kontrol yöntemlerinin, robotun kinetik enerjisini bir enerji deposunda depolayarak bu enerjiyi sınırlı tuttuğunu ve gerektiğinde bu enerjiyi güvenli bir şekilde kullandığını ifade etmişlerdir.

Chemweno ve Arastehfar [32] iş birliği yapan robotların üretim ortamlarında insanlarla etkileşimde bulunarak gerçekleştirdiği görevler sırasında karşılaşılabileceği yaralanma risklerini değerlendirmek için bir simülasyon çerçevesi geliştirmişlerdir. ISO 15066 standardının, bu robotların güvenli bir şekilde çalışabilmesi için gereken güvenlik gereksinimlerini belirlediğini ifade etmişlerdir. Bu güvenlik gereksinimlerinin nasıl uygulanabileceğini analiz etmek ve potansiyel çarpışma senaryolarının etkilerini değerlendirmek için araştırma yapmışlardır.

Parvangada Chinnappa [4] insan-robot iş birliği için bir güvenlik yaklaşımı sunmuşlardır. Araştırmalarının ana hedefinin, robotlarla birlikte çalışırken insan operatörlerinin güvenliğini sağlama zorluğunu ele almak, aynı zamanda üretkenliği artırmak ve bu bağlamdaki ana güvenlik standartlarından biri olan ISO/TS 15066'ya uygunluğunun araştırılması olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmaları, kullanılan yöntemler, insan-robot iş birliğinde genel unsurların bir özetini ve mevcut güvenlik standartlarının ve yöntemlerinin detaylı bir literatür taramasını içermektedir. Bu güvenlik unsurlarındaki boşlukların tartışılmasıyla, ISO/TS 15066'dan hız ve mesafe izleme ve güç ve kuvvet sınırlama yöntemlerini birleştiren yeni bir güvenlik çerçevesini önermişlerdir.

Murino ve diğ. [9] mevcut standartların eksikliklerini gidermek amacıyla Hata Türleri ve Etkileri Analizi (HTEA) ve Orantılı Risk Değerlendirme (ORD) tekniklerini birleştiren pratik bir risk değerlendirme yöntemi önermişlerdir. Özellikle küçük ve orta ölçekli işletmeler için uygulama kolaylığı sağlamak amacıyla bu yöntemi geliştirmişlerdir. Araştırmaları, işbirlikçi robotların risk değerlendirme süreçlerini sistematik bir şekilde ele alan sekiz aşamalı bir metodoloji sunmaktadır. Özellikle karmaşık görevleri basitleştirip daha kolay uygulanabilir hale getirmek amacıyla bu yöntemi geliştirmişlerdir. Önerdikleri yöntemin aşamalar aşağıda sıralanmıştır.

1. *Görevlerin Hiyerarşik Analizi*: İşbirlikçi robotun gerçekleştireceği işlemler, görev ve alt görevler şeklinde detaylandırılır. Her alt görev, potansiyel riskleri belirlemek için ayrıntılı olarak analiz edilir.
2. *Tehlike Listesinin Oluşturulması*: Alt görevler sırasında karşılaşılabilecek potansiyel tehlikeler tanımlanır ve listelenir.
3. *İlgili Vücut Alanlarının Belirlenmesi*: Belirlenen her tehlike için hangi vücut alanlarının etkilenebileceği analiz edilir. Bu, özellikle mekanik tehlikelerin etkilerini anlamak için önemlidir.
4. *Tehlikelerin Sınıflandırılması ve Şiddet Değerlendirmesi*: Tehlikeler, mekanik ve diğer tehlikeler olarak kategorize edilir. Şiddet düzeyleri belirlenir ve bu değerlere göre risk yönetimi süreci planlanır.
5. *Uzman Görüşlerinin Alınması*: Uzmanlardan risk değerlendirme parametreleri (örneğin, HTEA için oluşma olasılığı ve ORD için maruz kalma sıklığı) hakkında bilgi toplanır.
6. *Yargı Dağılımının Kontrolü*: Uzmanların değerlendirmeleri arasında tutarlılık sağlanır. Gerekliğinde farklı görüşler uzlaştırılır.
7. *Risk Öncelik Numarası Hesaplama ve Sıralama*: Her tehlike için HTEA ve ORD teknikleriyle Risk Öncelik Numarası hesaplanır. Bu numaralar tehlikeleri sıralamak için kullanılır.
8. *Risk Öncelik Listesinin Hazırlanması*: Elde edilen sıralamaya göre riskler önceliklendirilir ve müdahale planları oluşturulur.

Önerdikleri metodolojiyi, yapı sektöründe kullanılan "Robbie" adlı bir işbirlikçi robota uygulamışlardır. "Robbie"nın, tuğla kaldırma ve yerleştirme görevlerini yerine getirirken, bir insan operatörle iş birliği içinde çalıştığını ifade etmişlerdir. Operatörün, robotu elle yönlendirerek tuğlaları alıp, taşıyıp yerleştirdiğini belirtmişlerdir. Kovinčić ve diğ. [33] insan-robot iş birliği ortamında, güvenli yarı-statik çatışmalar için fizik tabanlı bir makine yapısı sunmuşlardır. Önerdikleri modelin, ISO/TS 15066 standartlarına uygun olarak gerginlik kuvvetlerini güvenli sınırlar altında tutabilecek şekilde tahmin etmeyi ve tekrarlayan ölçümler yerine esnek bir güvenlik ölçümleri yapılmasını sağladığını belirtmiştir.

Pupa ve Secchi [34] ISO/TS 15066 güvenlik standartlarına uyum sağlarken, robotların görev yürütme performansını artırmayı hedefleyen bir Model Kestirimci Kontrol yaklaşımını sunmuşlardır. Çalışmalarında, robotların güvenlik kısıtlamalarına bağlı kalırken görev süresini en aza indirerek planlanan yolu korumalarını sağlamışlardır. Önerdikleri yöntemi hem simülasyonlar hem de bir Kuka LWR4+ robotuyla gerçekleştirilen gerçek endüstriyel uygulamalarla doğrulamışlardır. Hiyerarşik İkinci Dereceden Programlama yaklaşımıyla, çarpışmasız yörüngeler sağlayarak performans kayıplarını önlemişlerdir. Önerdikleri çerçevenin, insan operatörlerin robotla güvenli bir şekilde etkileşime girmesini sağlarken, robotun görevlerini daha verimli tamamlamasını mümkün kıldığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında, n serbestlik dereceli (n -DoFs) hız kontrollü bir robot manipülatörünün, bir insan operatörle iş birliği yaparak ortak bir görevi tamamladığı bir insan-robot iş birliği senaryosu ele almışlardır. Robotun, önceden belirlenmiş bir başlangıç pozisyonundan son pozisyona kadar, görev uzayında optimal olarak hesaplanmış bir yörüngeyi takip ettiğini ifade etmişlerdir. Robot hareketini, kinematik modeli ve Jacobian matrisi ile tanımlamışlardır.

Oleinikov ve diğ. [35] insan-robot etkileşimli çalışma alanlarında, robotların güvenli bir şekilde çalışmasının, özellikle endüstriyel uygulamalarda kritik bir konu haline geldiğini belirtmişlerdir. Geleneksel yöntemlerde, robotlar ve insanların genellikle fiziksel bariyerlerle ayrılırken, yeni teknolojilerin bu bariyerleri ortadan kaldırarak insanlarla robotların aynı çalışma alanını paylaşmalarına olanak tanıdığını ifade etmişlerdir. Ancak bu durumun, çarpışma riskini artırma gibi güvenlik açısından yeni gereksinimler doğurduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında, insan hareketlerini daha kesin bir şekilde tahmin etmek için

Yüksek Dereceli Markov Zincirlerini kullanmışlar ve robot hareket planlamasında doğrusal olmayan model öngörülü kontrol stratejisi uygulamışlardır.

Kovinčić ve dig. [36] insan-robot iş birliği sırasında güvenliği sağlama konusuna odaklanmışlardır. ISO/TS 15066 standardına göre, insan güvenliğinin ancak robot-insan etkileşimindeki çarpma kuvvetlerinin ve basınçlarının belirlenen sınırların altında olmasıyla sağlanabileceğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, özellikle "kuasi-statik çarpma" durumlarını ele almışlardır. Mevcut yöntemlerin tekrarlayan risk analizi ve ölçümler gerektirmesinden dolayı esneklik sorunlarına yol açtığını belirtmişlerdir. Bu bağlamda, araştırmalarında, bir fizik rehberliğinde makine öğrenimi yöntemini, kuasi-statik çarpmalar sırasında maksimum güvenli hızları tahmin etmeye çalışmışlardır.

Ghanbarzadeh ve Najafi [18] ISO/TS 15066 güvenlik standardına, özellikle güç ve kuvvet sınırlama moduna uygun hareket eden, yenilikçi bir değişken empedans temelli robot kontrolörü önermişlerdir. Önerdikleri kontrolörün etkinliğini geleneksel yöntemlerle karşılaştırmışlar ve iki farklı robot platformunda test etmişlerdir. 3R robotunda %78'e, Panda robotunda %18'e varan oranda daha yüksek çalışma hızlarına ulaşırken güvenlik standartlarına uyumu sağlamışlardır. Önerdikleri değişken empedansın, insan-robot iş birliğinin, sanayi ortamlarında verimli ve güvenli bir şekilde sağlanmasında önemli bir potansiyele sahip olduğunu belirtmişlerdir. Önerdikleri kontrolörün etkinliğini değerlendirmek için iki farklı robot manipülatörü üzerinde bir dizi simülasyon gerçekleştirmişlerdir. İlk robotun, iki boyutlu bir çalışma alanında çalışan 3 serbestlik derecesine sahip (3R) bir robot olduğunu ifade etmişlerdir. İkinci robotun ise Franka Emika Panda olarak bilinen, 7 serbestlik derecesine sahip endüstriyel bir iş birliği robotu olduğunu söylemişlerdir.

4. SONUÇ

Bu araştırmada, deney tasarlama, analiz, güç-kuvvet sınırlamasına sahip küçük endüstriyel robotların, insan çalışanlar ile iş birliği durumunda, güvenlik ve izleme sistemleri ile ilgili yapılması gereken faaliyetler ile ilgili, literatürde son yıllarda yapılan çalışmalar analiz edilmiştir. İnsan-Robot Etkileşiminin, sanayi ortamlarında başarılı bir şekilde uygulanabilmesi, insan operatörler ile robotik cihazlar arasında güvenli bir iş birliğini sağlamaya bağlıdır. Bu, robotların hızını ve hareketini kısıtlamadan, insan operatörlerin güvenliğini garanti eden bir ortam gerektirir. Ayrıca araştırmada, ISO/TS (Robotlar ve robotik cihazlar- İşbirlikçi robotlar) 15066 ve EN ISO 10218 (Robotlar ve robotik cihazlar- Endüstriyel robotlar için güvenlik gereklilikleri) için ek niteliğinde olan spesifikasyonun sağladığı katkılar incelenmiştir.

Bu araştırmanın sonucunda genel olarak aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- İnsan-robot etkileşiminde hedef, standart bir robotun işbirlikçi bir robota dönüştürülebilmesidir.
- Seri üretim hatlarında, robotun tek bir çevriminin her bir operasyonuna bağlı olarak hem işbirlikçi hem de işbirlikçi olmayan olarak kabul edilmesidir.
- Robotun etkin kütlelerinin çarpışma durumunda operatör güvenliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir.
- TS 15066, İşbirlikçi Robotların genişlemesini takip etmek amacıyla sürekli olarak güncellenip yalnızca bir Teknik Şartname olmakla kalmayıp, daha gerçekçi uygulamalarla daha uyumlu olacak şekilde yepyeni bir Standart haline gelmesi gerekir.
- İşbirlikçi Robotların kullanımının, Endüstri 4.0'ın uygulanmasıyla hem küçük hem de büyük fabrikalarda artacağı ve her tesiste güvenlik koşullarını artıracığı değerlendirilmiştir.
- Otomasyon hedefinin "otomasyon seviyesi" yerine "iş birliği seviyesi" olarak yeniden tanımlanması gerektiği belirlenmiştir.

Gelecek çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

- Farklı üreticilerin robotlarını tek bir araç ile kontrol etmeleri gerektiği konusunda çalışma yapılması,
- Simülasyon iyileştirmeleri ile yanıt süresinin azaltılması ve esnekliğin artırılması,
- Sanal gerçeklikte insan varlığı simülasyonu,

- Sanal gerçeklik ve simülasyon araçları kullanarak esnek robot hücre tasarımı,
- Robotların daha hızlı ve daha verimli çalışması için güvenlik sınırlarını aşmadan daha etkili bir şekilde performans gösterilebileceği ile ilgili çalışmalar,
- Ayrıca, insan tespiti ve güvenlik sınırlarının dinamik olarak uyarlanabilmesi için daha gelişmiş sensör teknolojilerinin kullanılması, gelecekte yapılması önerilen çalışmalardır.

REFERANSLAR

- [1] U. Aydoğmuş, O. Engin, Endüstri 4.0 Sürecinde Ağırlama Sektörüne Yönelik Uygulamaların İncelemesi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 13(3), 851- 874. 2021, DOI: 10.17932/IAU.IAUSBD.2021.021/iausbd_v13i3013
- [2] B. Sarıcan & O. Engin, Makine Çizelgeleme Problemlerinin Çözümünde Pekiştirmeli Öğrenme Etkisinin Analizi. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 116-140. 2024, <https://doi.org/10.46740/alku.1390397>
- [3] R. Manzak, O. Engin, “Akıllı Fabrikalarda Çizelgeleme Yöntemlerinin Analizi, *Verimlilik Dergisi*, 57(4), 761-774. 2023. <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1136778>
- [4] C., U. Parvangada. An approach for risk mitigation and safety during human-robot collaboration, *University of Twente*. 2023.
- [5] A-IHamouz, S. O., NKT El-Omari, AM Al-Naimat. An ISO compliant safety system for human workers in human-robot interaction work environment. 2019, 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE), IEEE. 10.1109/DeSE.2019.00012
- [6] B. Matthias, T. Reisinger, Example application of ISO/TS 15066 to a collaborative assembly scenario. *Proceedings of ISR, 2016: 47st international symposium on robotics, VDE*.
- [7] P. Bobka, T Germann, JK Heyn, R Gerbers, F Dietrich, K Dröder, Simulation platform to investigate safe operation of human-robot collaboration systems. *Procedia Cirp*, 2016, 44: 187-192. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.199>
- [8] B.Chen, Verification and Validation Strategies On Collaborative Robotic Agv: the process and challenges in the certification development. 2017 IEEE International Symposium on Product Safety and Compliance Engineering-Taiwan (ISPCE-TW). 10.1109/ISPCE-TW.2017.8626833
- [9] T. Murino, M.D. Nardo, D. Pollastro, N. Berx, A.D. Francia, W.. Decré, J Philips, L. Pintelon, Exploring a cobot risk assessment approach combining FMEA and PRAT. *Quality and Reliability Engineering International*, 2023. 39(3): 706-731. <https://doi.org/10.1002/qre.3252>
- [10] C. Schaffert, Safety system design in human-robot collaboration: Implementation for a demonstrator case in compliance with ISO/TS 15066. KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM). Independent thesis Advanced level (degree of Master (Two Years)), (2019).
- [11] A. Vysocký, H. Wada, J. Kinugawa, K. Kosuge, Motion planning analysis according to ISO/TS 15066 in human-robot collaboration environment. 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM).10.1109/AIM.2019.8868390

- [12] R. Sultanov, S. Sulaiman, H. Li, R. Meshcheryakov, E. Magid. A review on collaborative robots in industrial and service sectors. 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), IEEE. 10.1109/SIBCON56144.2022.10003014
- [13] V. Kuts, M. Sarkans, T. Otto, T. Tähemaa, Collaborative Work Between Human And Industrial Robot In Manufacturing By Advanced Safety Monitoring System. Annals of DAAAM & Proceedings, 2017. 28. 10.2507/28th.daaam.proceedings.138
- [14] Rosenstrauch, M. J. and J. Krüger. Safe human-robot-collaboration-introduction and experiment using ISO/TS 15066. 2017 3rd International conference on control, automation and robotics (ICCAR), IEEE. 10.1109/ICCAR.2017.7942795
- [15] N Nandeshwar, J Humphries, N Amer._Optimization of the Speed & Separation Monitoring Protective Separation Distance in Human-Robot Collaboration Safety Systems. 2022 7th International Conference on Mechanical Engineering and Robotics Research (ICMERR), IEEE. 10.1109/ICMERR56497.2022.10097793
- [16] P. Francesco, G.G. Paolo, AURA: An example of collaborative robot for automotive and general industry applications. Procedia Manufacturing, 2017. 11: 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.116>
- [17] G. Gabrielli, C. Secchi, An actor-critic strategy for a safe and efficient human robot collaboration. 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 2021, IEEE. 10.1109/ICAR53236.2021.9659462
- [18] A. Ghanbarzadeh, E. Najafi. Safe physical human–robot interaction through variable impedance control based on ISO/TS 15066. Int J Interact Des Manuf (IJIDeM): 2024, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02074-9>
- [19] Z. Liu, X. Wang, Y.. Cai, W Xu, Q.. Liu, Z. Zhou, D.T. Pham, Dynamic risk assessment and active response strategy for industrial human-robot collaboration. Computers & Industrial Engineering (2020). 141: 106302. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.10630>
- [20] A. A. Malik, A. Bilberg. Developing a reference model for human–robot interaction. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2019, 13(4): 1541-1547. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00591-6>
- [21] D. Kóczy, J. Sárosi.The Safety of Collaborative Robotics-a Review. Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara 2022. 20(2): 73-76.
- [22] E. Laudante, A. Greco, M. Caterino, M. Fera. Human–robot interaction for improving fuselage assembly tasks: A case study. Applied Sciences, 2020. 10(17): 5757. <https://doi.org/10.3390/app10175757>
- [23] F. Benzi, F. Ferraguti, C. Secchi. Energy tank-based control framework for satisfying the ISO/TS 15066 constraint. IFAC-PapersOnLine. 2023. 56(2): 1288-1293. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1763>
- [24] D. Antonelli, G. Bruno Human-robot collaboration using industrial robots. 2nd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering, 2017. Atlantis Press. 10.2991/eame-17.2017.24
- [25] H. Shin, S. Kim, K. Seo, S. Rhim.A real-time human-robot collision safety evaluation method for collaborative robot. 2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). 10.1109/IRC.2019.00106
- [26] L. Scalera, A. Giusti, R. Vidoni, V. Di. Cosmo, D. Matt, M. Riedl. Application of dynamically scaled safety zones based on the ISO/TS 15066: 2016 for collaborative robotics." Int. J. Mech. Control. 2020. 21(1): 41-49.

- [27] F. Ferraguti; M. Bertuletti; C. T. Landi; M. Bonfè; C. Fantuzzi; C. Secchi. A control barrier function approach for maximizing performance while fulfilling to ISO/TS 15066 regulations. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2020.5(4): 5921-5928. [10.1109/LRA.2020.3010494](https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3010494)
- [28] P. Chemweno, L. Pintelon, W. Decre. Orienting safety assurance with outcomes of hazard analysis and risk assessment: A review of the ISO 15066 standard for collaborative robot systems. *Safety Science*, 020, 129: 104832. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104832>
- [29] D. Bricher, A. Müller. Analysis of Different Human Body Recognition Methods and Latency Determination for a Vision-based Human-robot Safety Framework According to ISO/TS 15066. *ICINCO*. 2020. 10.5220/0009446403690376
- [30] R.J. Kirschner, N Mansfeld, S. Abdolshah, S. Haddadin. Experimental analysis of impact forces in constrained collisions according to ISO/TS 15066. 2021 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR), IEEE. [10.1109/ISR50024.2021.9419494](https://doi.org/10.1109/ISR50024.2021.9419494)
- [31] Y. Kang, D. Kim, D. Yun. Manipulator collision avoidance system based on a 3D potential field with ISO 15066. *IEEE Access*, 2022.10: 126593-126602. [10.1109/ACCESS.2022.3221182](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3221182)
- [32] P. Chemweno, S. Arastehfar. Quantifying injury risks of collaborative robots in a manufacturing cell using a simulation approach. *Procedia Cirp*, 2023. 120: 607-612. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.046>
- [33] N. Kovičić, H. Gattringer, A. Müller, M. Brandstötter. Physics Guided Machine Learning Approach to Safe Quasi-Static Impact Situations in Human-Robot Collaboration Following the Power and Force Limiting Method of the ISO/TS 15066 Standard. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers. 2023. <https://doi.org/10.1115/DETC2023-109517>
- [34] A. Pupa, C. Secchi. Efficient ISO/TS 15066 Compliance through Model Predictive Control. 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), [10.1109/ICRA57147.2024.10610039](https://doi.org/10.1109/ICRA57147.2024.10610039)
- [35] A. Oleinikov, S. Soltan, Z. Balgabekova, A. Bemporad, M. Rubagotti. Scenario-based model predictive control with probabilistic human predictions for human-robot coexistence." *Control Engineering Practice*. 2024. 142: 105769. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105769>
- [36] N. Kovičić, H. Gattringer, A. Müller, M. Brandstötter. Physics-Guided Machine Learning Approach to Safe Quasi-Static Impact Situations in Human-Robot Collaboration. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* 2024. 19(7). <https://doi.org/10.1115/1.4065671>