



İŞBİRLİKÇİ ENDÜSTRİYEL ROBOTLAR VE DİJİTAL ENDÜSTRİ

S.Dilibal¹, H.Şahin¹

¹İstanbul Gedik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü 34876 Kartal, İstanbul

ÖZET

İşbirlikçi (kollaboratif) endüstriyel robotlar dijital endüstride yerini almaya başlayan önemli teknolojilerden birini oluşturmaktadır. Endüstriyel robot sistemlerindeki teknolojik gelişmeler, robot-insan etkileşimi alanında ilerlemeyi beraberinde getirmiştir. İleri teknoloji sensör, eyleyici ve kontrol sistemleri ile yeni nesil endüstriyel robotlar olarak ortaya çıkan işbirlikçi endüstriyel robotlar, insan ile aktif ve pasif işbirliği içerisinde çalışarak fabrika otomasyonuna katkı sağlamaktadır. İnsan-robot arayüzünde rijit sistemler yerine esnek robotik sistemler kullanılması, emniyet ve hassasiyet parametrelerinin standartlara uygun hale gelmesine destek olmuştur. Bu çalışmada, dijital endüstride yaygınlaşan işbirlikçi robotlar ve esnek robotik sistemlerin sistematik analizi yapılarak mevcut işbirlikçi robotlar arasında karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. İşbirlikçi robotların karakteristik davranışında etkili olan empedans kontrol açıklanmıştır. Ayrıca işbirlikçi robotların temel gelişim konsepti ile beraber esnek robotik sistemlerle birlikte kullanımı araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İşbirlikçi endüstriyel robot, Dijital endüstri, Esnek robotik sistem

COOPERATIVE INDUSTRIAL ROBOTS AND DIGITAL INDUSTRY

ABSTRACT

Collaborative industrial robots are one of the significant technologies that have begun to take place in the digital industry. Technological developments in industrial robot systems have brought progress in the field of robot-human interaction. Collaborative industrial robots, emerging as new generation industrial robots with advanced technological sensors, actuators and control systems, actively and passively collaborate with human and contribute to factory automation. The use of soft robotic systems instead of rigid systems at the human-robot interface has assisted to ensure that safety and sensitivity parameters meet standards. In this study, a systematic analysis of collaborative robots and soft robotic systems, which are becoming popular in the digital industry, has been performed. Additionally, a comparison is made among existing collaborative robots. The impedance control which is effective in the characteristic behavior of the collaborative robots is explained. Furthermore, the concept of collaborative robots has been investigated together with the fundamental development concept and soft robotic systems.

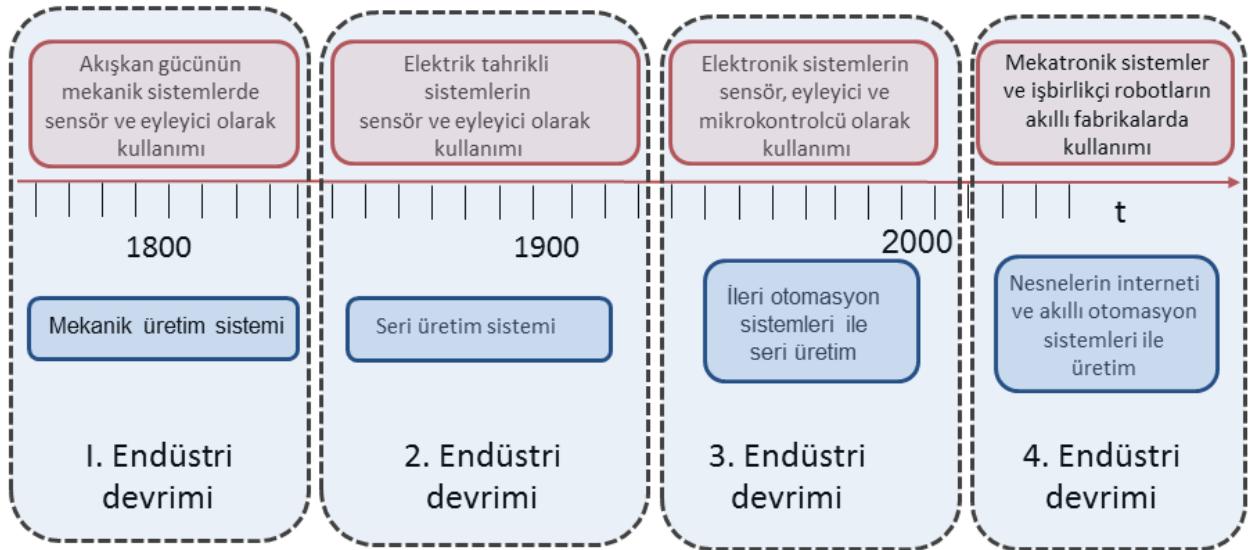
Keywords: Collaborative industrial robot, Digital industry, Soft robotics system

1.GİRİŞ

Günümüzde dijital dönüşüm ve ileri üretim teknikleri ile beslenen Endüstri 4.0 süreci, akıllı fabrikalarda çalışacak yeni nesil endüstriyel robotların işlev ve görev tanımlarını şekillendirmektedir [1]. Almanya'da ve birçok diğer ülkede Endüstri 4.0 süreci olarak adlandırılan bu süreç, Amerika'da akıllı üretim (smart

manufacturing), Japonya’da “Innovation-25” ismi ile adlandırılmaktadır. Endüstri 4.0 kapsamında geliştirilen kollaboratif endüstriyel robotlar operatör ile birlikte aynı ortamda işbölümü içerisinde çalışarak esnek üretim sisteminde önemli bir rol oynamaktadır. Türkiye’de en çok katma değer sağlayacağı değerlendirilen ileri robotik sistemler ve kollaboratif endüstriyel robotlar Endüstri 4.0’ın önemli alanlarındandır [1]. Kollaboratif endüstriyel robotların operatörler ve diğer robot otomasyon sistemi ile nesnelerin interneti (IoT) vasıtasıyla etkileşimi geleceğin akıllı fabrikalarındaki üretim sisteminin temel yapısını oluşturmaktadır [2].

Robotik sistemlerin, başta endüstriyel üretim olmak üzere birçok alanda insanlara desteği teknolojik ilerlemelerle birlikte artmaktadır. Günümüze kadar servis ve endüstriyel robotlar olmak üzere iki ana gruba ayrılan robotik sistemler, algılayıcı ve eyleyici mekanizmalarındaki gelişmelerle birlikte, insanın yaptığı işi onunla birlikte paylaşarak yapabilen sistemlere doğru yönelmektedir. Özellikle artan işçilik maliyetlerini düşüren endüstriyel robotlar her türlü üretim faaliyetini standart bir operatörden daha hızlı ve kaliteli olarak gerçekleştirebilmektedir. Bu nedenle endüstriyel alanda üretimde rekabet ve kaliteyi artırabilmek için endüstriyel robotlar vazgeçilmez unsurlardır [3]. Üretim tekniklerine endüstriyel gelişimin etkisi tarihsel süreçleri ile beraber Şekil 1’de verilmiştir.

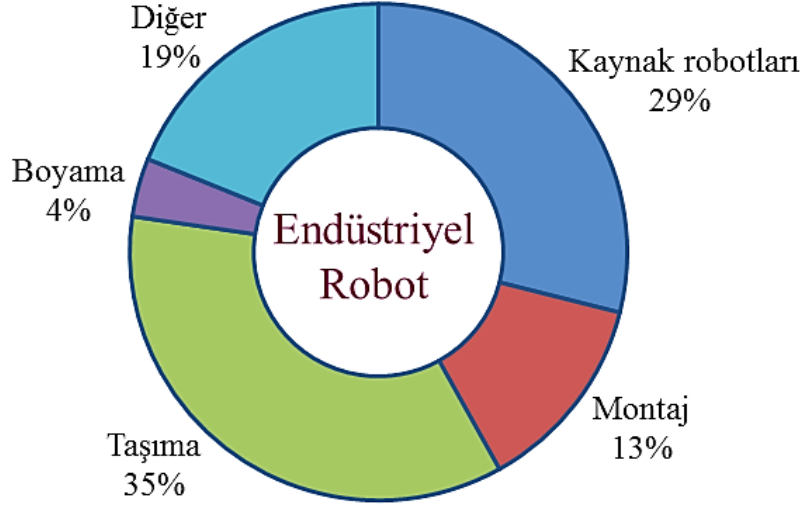


Şekil 1. Üretim tekniklerine endüstriyel gelişimin etkisi [10]

Fabrika otomasyonunda endüstriyel haberleşme ve kontrol sistemlerindeki gelişmeler, gelişen görüntü işleme ve yapay görme teknolojileri, ileri seviye yapay zekâ algoritmaları ve veri toplama sistemleri ile malzeme seçiminde etkin rol oynayan imal usulleri ve katmanlı imalat teknolojisinin gelişmesi Endüstri 4.0 konseptini ortaya çıkarmıştır [4]. Bu yapı içerisinde esnek üretim sağlayabilmek için işbirlikçi robotların esnek üretim proseslerinde kullanılması zorunlu hale gelmiştir [5]. Bununla birlikte, gelişen bu durum, daha yüksek seviyeli riskler içerdiğinden dolayı emniyet ve güvenlik parametrelerini ön plana çıkarmaktadır. İnsan-robot etkileşimi alanında yapılan ilk detaylı araştırmalar insansı ve sosyal robotlar alanında olmuştur. Bunu takip eden süreçte akıllı fabrikalardaki esnek üretim ihtiyacı işbirlikçi endüstriyel robotları ortaya çıkarmıştır. Endüstri 4.0 ana elemanlarından biri olan kollaboratif endüstriyel robotlar üretim süreçlerinin etkin yönlendirilmesinde yardımcı olarak diğer robot otomasyon sistemleri veya operatörlerle etkileşim halinde çalışarak istenilen esneklikte üretimi sağlamayı başarmışlardır [6-7]. Endüstri 4.0 kapsamında ürünlerin bakım, onarım ve takibi nesnelerin interneti ile gerçekleştirilmektedir. Bunu gerçekleştirecek sistemlerde donanımsal ve gerçek zamanlı olarak yüksek miktarda veri toplama işlemi yapabilen endüstriyel tipte mikroeletromekanik sistem (MEMS) tabanlı sensörler üretilmeye başlanmıştır. Ayrıca

ürünleri kişiselleştirerek üretimle ilişkisini sağlayabilmek için bellekli ve akıllı donanımlara ihtiyaç bulunmaktadır [8-9].

Endüstriyel robotların kullanıldığı alanlar karşılaştırıldığında en fazla kullanım alanlarını taşıma ve kaynak robotlarının oluşturduğu görülmektedir. Şekil 2’de üretim tekniklerinde endüstriyel robotların kullanım oranları gösterilmiştir. Özellikle taşıma alanında işbirlikçi robotların insan-robot etkileşimi içerisinde kullanılması, potansiyel gelişim alanlarından birini oluşturmaktadır.



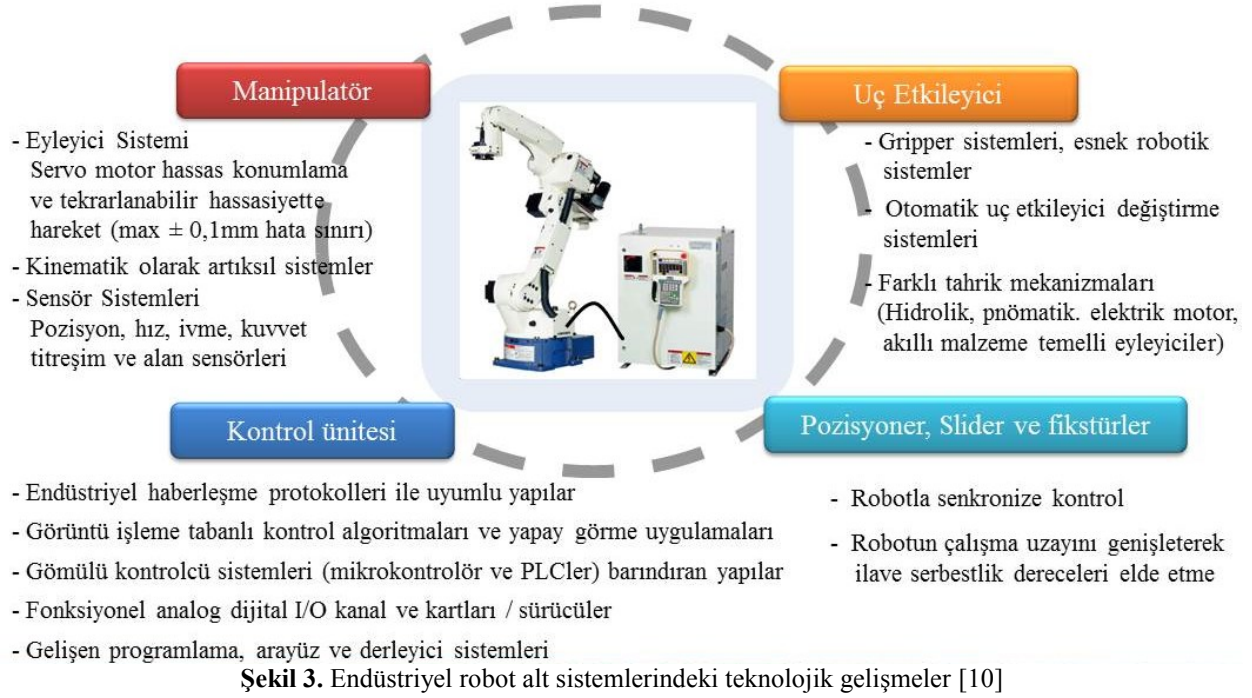
Şekil 2. Üretim tekniklerine endüstriyel robotların kullanım oranları [11]

Bu çalışmada işbirlikçi robotların insan-robot etkileşimindeki rolü ve esnek robotik sistemler konusundaki teknolojik gelişmeler incelenmiştir. Endüstride kullanılan işbirlikçi endüstriyel robotlar arasında parametrik karşılaştırma yapılarak robot alt sistemlerinin teknolojik gelişmeleri araştırılmıştır. Ayrıca, işbirlikçi robotlarda empedans kontrol kullanım yapısı teorik olarak belirlenerek esnek robotik kavrama sentezinin işbirlikçi robotlardaki yapısı ortaya konulmuştur.

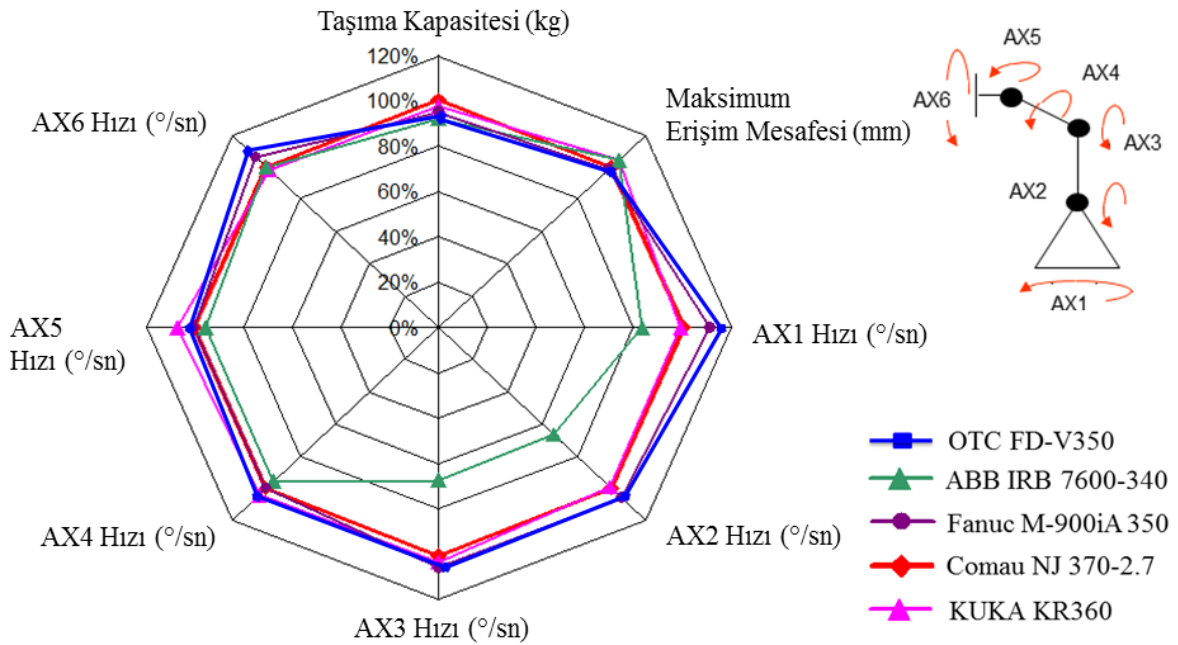
2. ENDÜSTRİYEL ROBOT ALT SİSTEMLERİNDEKİ TEKNOLOJİK GELİŞMELER

Endüstriyel robotların manipülatör, kontrol ünitesi, uç etkileyici, pozisyoner ve slider alt sistemlerinde meydana gelen teknolojik gelişmeler yeni nesil endüstriyel robotlar olan işbirlikçi robotların kullanımını hızlandırmıştır. Endüstriyel robot alt sistemlerindeki gelişmeler Şekil 3’de, farklı endüstriyel robotların dinamik özellikleri Şekil 4’de detaylı olarak gösterilmiştir.

İşbirlikçi robot ve operatör etkileşimini insanla pasif işbirliği ve insanla aktif işbirliği olmak üzere Şekil 5’de görüldüğü gibi iki ayrı grupta değerlendirmek mümkündür. İnsanla pasif işbirliği içerisinde bulunan işbirlikçi robotlar üretim sisteminde yapılacak işi ayrı iki çalışma zarfında yaparak birbirleriyle koordineli olarak çalışırlar. İnsanla aktif işbirliği içerisinde bulunan işbirlikçi robotlar ise insanla aynı çalışma zarfı içerisinde doğrudan birbirleriyle etkileşim halinde bulunurlar. İnsanla aktif işbirliği içerisinde çalışan işbirlikçi robotların risk analizi pasif işbirliğine oranla daha fazla risk parametresi içermektedir [12-13].

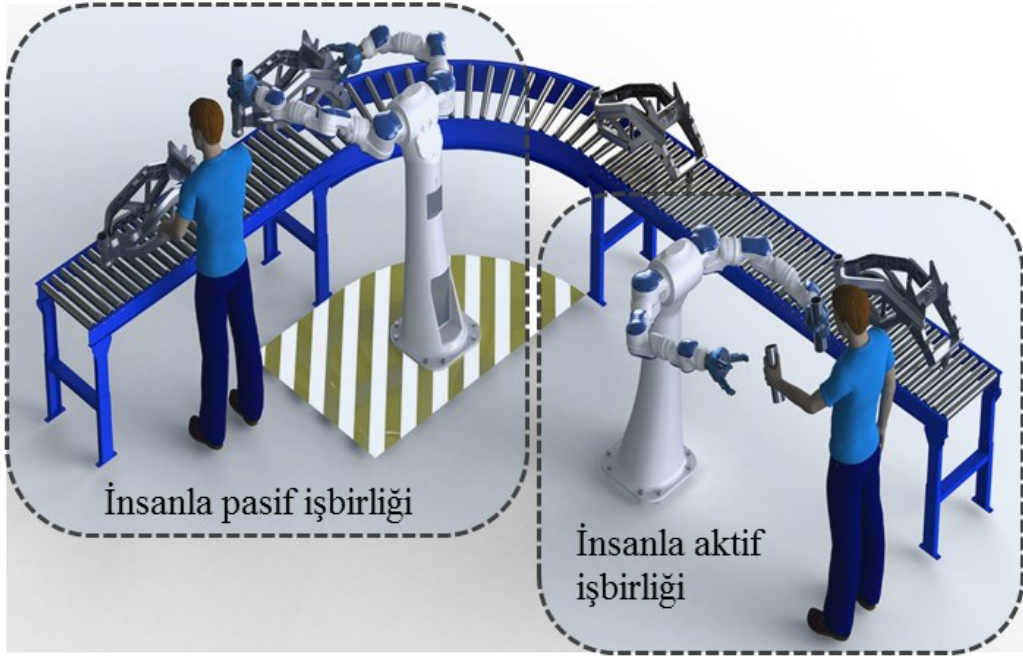


İleride işbirlikçi robot sistemlerde, robot ile insan senkronize olarak çalışarak pasif işbirliği ile robotlu katmanlı imalat yöntemi olarak gelişmekte olan ark kaynağı ile katmanlı imalat konsepti içerisinde yer alabilir. Katmanlı imalat tekniğinde yapısal ilişki, parametre analizi, yörünge planlaması ve elde edilen ürün topolojisi arasında tanımlanmaktadır [14]. Bu konsept içerisinde işbirlikçi robotların kullanılması ile malzeme biriktirme proseslerinin kontrolü daha sistematik olarak yapılabilir.



Dünyada endüstriyel robot teknolojisi yeni bir döneme girmektedir. Robot hücreleri içerisinde insanla en az etkileşim içerisinde bulunan birinci nesil endüstriyel robotlardan insanla pasif/aktif işbirliği içerisinde

bulunan yeni nesil endüstriyel robotlara doğru bir geçiş süreci devam etmektedir. Nesnelerin interneti ve akıllı otomasyon sistemleri ile üretimde kullanılan işbirlikçi endüstriyel robotların yanında servis robotları da aynı geçiş sürecini takip etmektedir.



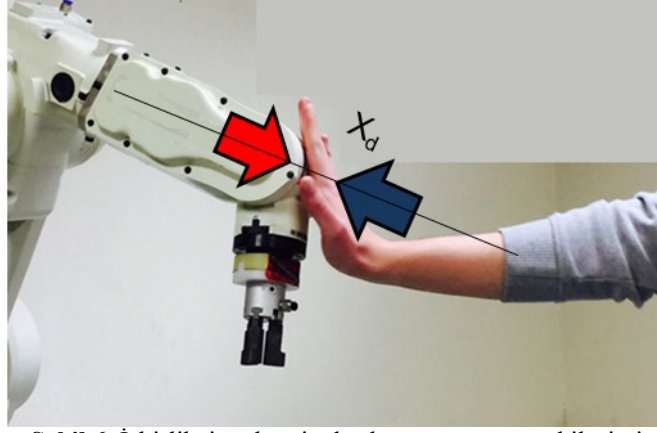
Şekil 5. Kollaboratif endüstriyel robot ve operatör etkileşimi [13]

Bugüne kadar kullanılan işbirlikçi endüstriyel robotları üreten firma ve modeller Tablo 1.de detaylı olarak gösterilmiştir. Burada işbirlikçi robot ağırlığı 19 ile 990 kg arasında değişmektedir. Bu robotların taşıma kapasiteleri 0,5 - 35 kg arasındadır. Tablo 1'deki işbirlikçi robotların erişim uzunluğu 0,5 – 2,438 m. arasında, maksimum hız ise 0,6 ile 2,5 m/s aralığındadır. Kullanılan işbirlikçi robotlar genelde 6 veya 7 serbestlik derecesine sahiptir. Önemli diğer bir parametre olan tekrar edilebilirlik ise 0,02 ile 0,15 mm arasında değişmektedir.

Dördüncü endüstri devrimi ile geliştirilen yeni nesil işbirlikçi robot yaklaşımı üretimde esneklik, fonksiyonellik ve verimlilik sağlamayı amaçlamaktadır. Belirlenen amaçlara göre risk faktörlerinin çıkarılarak güvenlik önlemlerini kapsayacak ana standartlara uygunlaştırılması gerekmektedir. Endüstriyel robotların emniyeti ile ilgili ISO 10218-1,-2 ve işbirlikçi robotlara ait ISO TS 15066 standartlarına uyulması gerekir. Yeni nesil endüstriyel robot sistemleri olan işbirlikçi robotların temel belirleyici özellikleri; operatörün teması ile durma, robot yörüngesini operatör tarafından elle yönlendirerek çalıştırma, robotun güç, kuvvet ve hızının sınırlayarak çalıştırma işlemlerini kapsar.

Denklem (1)'de görüldüğü gibi işbirlikçi robota dışarıdan uygulanan kuvvet değerine göre istenilen eylemsizlik katsayısı (B_m), sönüm katsayısı (D_m) ve yay katsayısını (K_m) ayarlamak için sürdürülebilir bir kontrolcü algoritması geliştirilir. İşbirlikçi endüstriyel robot ve insan etkileşimi olarak ilgili uygulanan kuvvet (F_e), yer değişimi (X_d), hız ve ivme parametrelerini içeren teorik empedans kontrol yapısı aşağıda denklem (1) ile belirtilmiştir. İşbirlikçi endüstriyel robot ve operatör etkileşimi Şekil 6'da gösterilmiştir.

$$B_m(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + D_m(\dot{x} - \dot{x}_d) + K_m(x - x_d) = F_e \quad (1)$$



Şekil 6. İşbirlikçi endüstriyel robot ve operatör etkileşimi

Tablo 1: Kollaboratif endüstriyel robotların karşılaştırılması [13]

Özellik Marka	Ağırlık [kg]	Erişim[m]	Taşıma kapasitesi [kg]	Tekrar edilebilirlik [mm]	Serbestlik derecesi	Maks.hız [m/s]
Universal Robot (UR10)	28,9	1,30	10	0,1	6	1
Mrk-Systeme (KR 5 SI)	N/A	1,42	5	0,04	6	-
ABB (Yumi)	38	0,50	0,5	0,02	7	1,5
Fanuc (CR-35iA)	990	1,81	35	0,08	6	2,5
Rethink Robotics	19	1,26	4	0,1	7	0,6
KUKA (LBR iiwa 14 R820)	29,9	0,82	14	0,15	7	-
F&P Robotics (P-Rob)	20	0,78	3	0,1	6	-
Robonaut (Robonaut2)	150	2,438	9	0,05	7	2,1

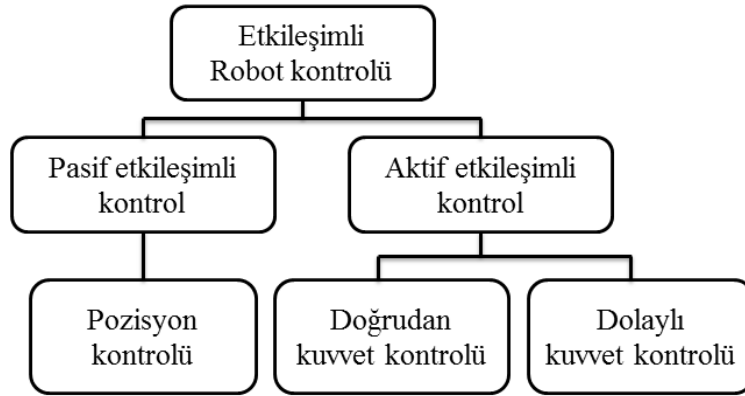
Robotun karakteristik davranışını ortaya çıkaran empedans değerleri işbirlikçi robotlar için belirlenen standartlara göre oluşturulmalıdır. Bu standartlar içerisinde emniyet ile ilgili kontrol sistemlerinin performansı maddesinde belirlenen toleransı aşan hata durumlarında emniyet ve güvenlikle ilgili sorunlar oluşturmaması gerekir. İşbirlikçi robotların çalışma şekilleri ile ilgili standartlar, dört ayrı şekilde

incelenebilir. Bunlar; emniyetli izlemeli duruş, elle yönlendirme, hız/mesafe izleme ve güç/kuvvet sınırlama şeklinde ifade edilebilir.

Standartta belirlenen robot durdurma fonksiyonunda koruyucu durma fonksiyonuna sahip olması, bağımsız acil durma fonksiyonuna sahip olması ayrıca dışarıya bağlı emniyet ekipmanına bağlı olması gerektiği bildirilir. Hız kontrolü ile ilgili maddesinde ise uç etkileyicisinin (TCP) hızı kontrol edilebilir olmalı, özellikle işbirlikçi robotlarda çalışma zarfı içinde uç etkileyicisindeki hızı 250 mm/s'yi geçmemelidir [5]. Ülkemizde de uygulanan güvenlik enstrüman sistemlerine ait standartlar ve emniyet seviyesi TS EN ISO 13849-1 kumanda sistemlerinin emniyeti ile ilgili standartlara göre belirlenmiştir. Bu kapsamda üç boyutlu emniyet kamera sistemleri ile işbirlikçi robota ait risk analizleri yapılabilmektedir.

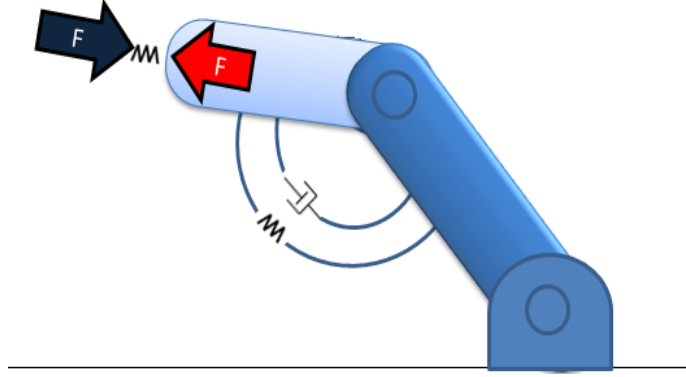
İşbirliği işleminin gereksinimleri, robot işbirliğine başladığı zaman bunu görsel bir göstergeyle belli etmesi gerekir. Sürekli monitör edilen robot sistemi emniyet açısından derecelendirilip, yüksek emniyet gerektiren durumda ise otomatik olarak kendiliğinden durabilen sistem olmalıdır. Ayrıca, eğer insan robotun çalışma zarfına girerse emniyet açısından durması gerekir. Robot yörüngesinin operatör tarafından elle yönlendirerek belirlenmesi, robotun operatör ile arasındaki belli bir mesafeyi ve hızı koruyup korumadığı, robot iç kontrol sistemi ve harici kontrol sistemi ile sürekli denetlenmesi gerekir. Ayrıca, mekanik tasarım ve kontrol parametrelerini dikkate alarak güç/kuvvet sınır değerleri standartlarla belirlenen limitleri aşmaması gerekir [5].

İşbirlikçi endüstriyel robot sistemlerinde insan-robot etkileşimini ve robot-robot etkileşimini gözeterek yeni nesil bir kontrol algoritmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu kapsamda pasif veya aktif olmak üzere iki farklı etkileşimli robot kontrolü ortaya çıkmıştır. Aktif etkileşimli kontrol doğrudan veya dolaylı kuvvet kontrolü ile çalışırken pasif etkileşimli kontrol pozisyon kontrolü ile geri besleme sağlar. Etkileşimli robot kontrolü ile ilgili sistematik yapı Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Etkileşimli robot kontrol çeşitleri

İşbirlikçi robot ve operatör etkileşiminde, etkileşimli robot kontrolünün aktif veya pasif olmasına göre iki ayrı empedans kontrol değeri bulunur. İşbirlikçi robotlarda empedans kontrol, istenilen konuma göre kuvvet geri beslemeli kapalı çevrim kontrol veya istenilen kuvvete göre konum geri beslemeli kapalı çevrim kontrol olabilir. İşbirlikçi robotların gerek operatör gerekse başka robotlar ile birlikte çalışırken empedans kontrol katsayılarını karşısındaki sistem veya operatör davranışına göre tahmin etme algoritmalarının geliştirilmesi ile ilgili araştırmalar sürmektedir [14]. İşbirlikçi robotlarda konum, hız ve kuvvet kontrolü işbirliğinin karakterine göre gerçekleştirilir. İnsan-robot işbirliği çerçevesinde operatörün manipülatöre kuvvet uygulayarak istenilen konuma getirebilmesi için servo motorların empedans kontrollü hareket ettirmesi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Kollaboratif endüstriyel robot ve operatör etkileşimi

Artıksıl kontrolün bu avantajını esnek robotik sistemlerle beraber kullanarak, işbirlikçi robotlar için standartların emniyet ve hassasiyet ile ilgili gereksinimleri sağlanabilir. Sensörler, eyleyiciler ve esnek uç etkileyicilerle beraber mekanizmalar işbirlikçi robotlar için konum geri beslemeli kuvvet kontrolü veya kuvvet geri beslemeli konum kontrolü ile insan-robot etkileşimi amacına uygun alternatif çözümlere ulaştırır [15]. Burada esnek robotik sistemler, insan-robot etkileşiminde işbirlikçi robotların standartlara uygun yapılandırılmasında anahtar teknoloji olarak ortaya çıkar. Dolayısıyla, geliştirilecek olan işbirlikçi robotlar Endüstri 4.0 gereksinimlerini sağlayan yaratıcı esnek mekanizmaların tasarlanmasıyla ihtiyaçlara cevap verebilecektir. Esnek robotik sistem olarak özellikle tutucu (gripper) veya uç etkileyici sistemlerin işbirlikçi robotlardaki rolü ve kavrama sentezi üçüncü bölümde analiz edilecektir. Ayrıca, çözüm olarak kullanılacak olan esnek uç etkileyicilerin işbirlikçi robotlarda kavramayı nasıl gerçekleştirmesi gerektiği örneklerle ve kavrama sentezinin yapısıyla ortaya konulacaktır.

3. ESNEK ROBOTİK SİSTEMLERİN İŞBİRLİKÇİ ROBOTLARDAKİ ROLÜ

İnsan-robot etkileşiminde üretim sürecinde insan el ve parmakları ile robot uç etkileyicileri esas olarak işbirliğini sağlayan unsurlardır. İnsan el ve parmaklarındaki esnek yapıyla uyumlu hareket edebilecek esnek robotik sistemler, işbirlikçi robotlarda özellikle uç etkileyici hareketleri için kuvvet üretimi, kuvvet iletimi ve algılama işlemlerini yapabilmek için tercih edilir. Esnek robotik sistemler temel olarak işbirlikçi robotlarda eyleyici sistemleri, iskelet sistemi ve gömülü sensör sistemlerinde kullanılmaktadır. Esnek robotik sistemlerin aynı zamanda sönümleme özelliğine sahip olması fonksiyonelliğini artırmaktadır.

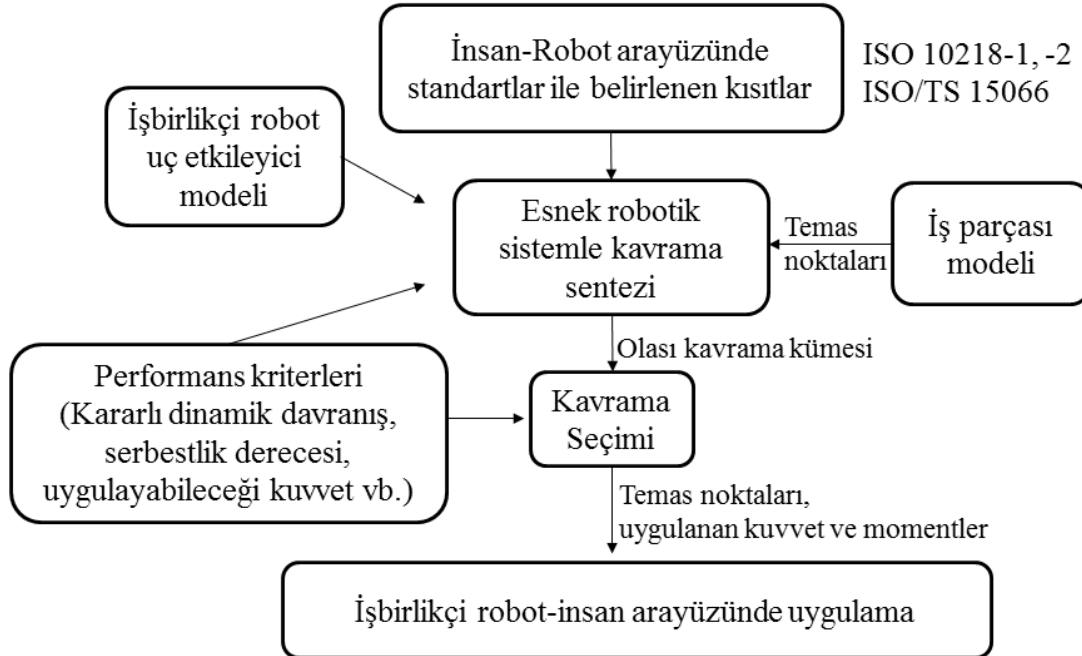
Esnek robotik sistemlerde kuvvet üretimi ve iletimi genellikle akışkan basıncı, şekil bellekli alaşım temelli eyleyiciler, dielektrik eyleyiciler, elektrik motorları ve piezoelektrik malzeme temelli eyleyiciler kullanılarak sağlanmaktadır. Uygulanan kuvvet, sıcaklık ve akım değişimleri ile elde edilen dinamik hareket, robot uç etkileyicilerde kavrama işleminin uygulanmasını sağlar. Eyleyici sistemleri uygun esnek malzeme ve sensör sistemleri ile birlikte gömülü olarak kullanıldığında, işbirlikçi robotlar için gerekli etkileşim parametreleri ortaya çıkar. Elde edilen parametreler sistemin kontrol algoritmasının oluşturulmasında kullanılır [16-17].

İşbirlikçi robotlarda kavrama maksatlı olarak; eklemli rijit, esnek ve çok amaçlı esnek uç etkileyicilerden biri kullanılabilir. Karşılaştırma yapıldığında, eklemli rijit yapıda serbestlik derecesi düşük olmasına rağmen uygulanabilen kuvvet değeri ve doğruluk oranı diğer esnek uç etkileyicilere göre daha yüksektir. Öte yandan, esnek uç etkileyiciler serbestlik derecesi yüksek olması sebebiyle, karmaşık parçaların kavranmasında kolaylık sağlar. Endüstriyel robotlarda esnek robotik uç etkileyicilerle aktif kavrama sistemi Şekil 9'de gösterilmiştir.



Şekil 9. Endüstriyel robotlarda esnek robotik uç etkileyicilerle aktif kavrama sistemi

İşbirlikçi robotlarda esnek robotik kavrama sentezi, standartlarda belirlenen emniyetle ilgili kısıtlar, iş parçası modeli, uç etkileyici modeli ve performans kriterlerine göre gerçekleştirilir. Bu sentez sonucunda tespit edilen olası kavrama kümesi, kararlı dinamik davranış, serbestlik derecesi ve uygulayabileceği kuvvet kriterleri göz önüne alınarak temas noktaları, uygulanan kuvvet ve momentler hesaplanır. İşbirlikçi robot, elde edilen bu parametre değerlerini insan arayüzü sistemine uygular. İşbirlikçi endüstriyel robotlarda esnek robotik kavrama sentezi Şekil 10'da açıklanmıştır.



Şekil 10. İşbirlikçi endüstriyel robotlarda esnek robotik kavrama sentezi

4. SONUÇ

İnsan-robot arayüzünde rijit sistemler yerine esnek robotik sistemler kullanılması, emniyet ve hassasiyet parametrelerinin standartlara uygun hale gelmesinde etkin rol oynamıştır. Bu çalışmada, dijital endüstride yaygınlaşan işbirlikçi robotlar ve esnek robotik sistemlerin sistematik analizi yapılarak mevcut işbirlikçi robotlar arasında karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. İşbirlikçi robotların karakteristik davranışında etkili olan

empedans kontrol alt parametrelerin empedans kontrole etkisi teorik olarak açıklanmıştır. Ayrıca, işbirlikçi robotların temel gelişim konsepti ile beraber esnek robotik sistemle kavrama sentezinde etkin olan kriterler araştırılmıştır.

Önümüzdeki yıllarda, Endüstri 4.0 Endüstri 4.0 ile uyumlu üretim teknolojileri içerisinde yer alan işbirlikçi endüstriyel robotlar ile esnek robotik sistemlerin kullanılması ivme kazanacaktır. Bu gelişim ve değişim, fabrika otomasyonu konseptini, işbölümü ile çalışan insan ve robotlardan oluşan çalışma gruplarına doğru yöneltmektedir. Yapay zekâ algoritmaları ve yazılımdaki ilerlemelerle birlikte gömülü kontrol donanım ve yazılım sistemlerindeki artan işlemci hızı ve düşen maliyet, yakın gelecekte öğrenebilen/öğretebilen işbirlikçi robotların akıllı fabrikalarda kullanılmasını sağlayacaktır.

5. KAYNAKLAR

- [1] Yeni sanayi devrimi akıllı üretim sistemleri yol haritası, TÜBİTAK Bilim, Teknoloji ve Yenilik Politikaları Daire Başkanlığı (2016).
- [2] A. Amir, G. Sascha, S. Francesca, (2016) Metrics and benchmarks in human-robot interaction: Recent Advances in cognitive robotics, *Cognitive Systems Research*.
- [3] C. Andrea, P. Robin, C. Andre, L. Antoine, F. Philippe (2016) Collaborative manufacturing with physical human-robot interaction, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 40 1-13.
- [4] J. Krüger, T. K. Lien, A. Verl, (2009) Cooperation of human and machines in assembly lines, *Manufacturing Technology*, (58) 628-646.
- [5] G. Michalosa, S. Makrisa, P. Tsarouchia, T.Guaschb, D. Kontovrakisa, G.Chryssolourisa (2015) Design considerations for safe human-robot collaborative work places, *Procedia CIRP* (37) 248 – 253.
- [6] P. Akella, M. Peshkin, E. Colgate, W. Wannasuphprasit, N. Nagesh, J. Wells, S. Holland, T. Pearson, B. Peacock (1999) Cobots for the automobile assembly line, *IEEE, ICRA*.
- [7] G. Michalos, S. Makris, N. Papakostas, D. Mourtzis, G. Chryssolouris (2010) Automotive assembly Technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach, *Manufacturing Technology* (2) 81–91.
- [8] N. Papakostas, G. Michalos, S. Makris, D. Zouzias, G. Chryssolouris (2011) Industrial applications with cooperating robots for the flexible assembly, *Int.J.Comput. Integr.Manuf.* 24 (7) 650–660.
- [9] H. Sahin, and L. Guvenc (2007) Household robotics: Autonomous devices for vacuum and lawn mowing, *IEEE Control Systems Magazine*, v27, n2, p20-23.
- [10] S. Dilibal, H. Şahin (2016) Endüstriyel robotlar ve tutucu sistemleri ders notları, İstanbul Gedik Üniversitesi.
- [11] <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/> erişim tarihi: 10.03.2017.
- [12] K. Azfar, K. Pierre, G. Zied, T. Klaus-Dieter, P. Jürgen (2016) A methodology to develop collaborative robotic cyber physical systems for production environments, *Logist. Res.*
- [13] J. Tan, D. Feng, Y. Zhang, K. Watanabe, R. Kato, T. Arai (2009) Human–robot collaboration in cellular manufacturing: Design and development, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [14] A. Djuric and R.J. Urbanic (2018) Using collaborative robots to assist with travel path development for material deposition based additive manufacturing processes *Computer-Aided Design & Applications*, pp.1-14.
- [15] R. Ikeura, H. Inooka (1995) Variable Impedance Control of a Robot for Cooperation with a Human, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [16] E.S. Conkur ve R. Buckingham (1997) Clarifying the definition of the redundancy as used in robotics, *Robotica* 15, 583-586.
- [17] G. Alıcı, S. Dilibal, H.Sahin, C.Sözer (2016) Esnek (Soft) robotik sistemler, ToRK-2016 Türkiye Robotbilim Konferansı, Esnek Robotik Sistemler Çalıştayı, İstanbul.
- [18] S. Tepeyurt, S. Dilibal, H.Sahin (2016) Katmanlı İmalat Tekniği Kullanılarak Endüstriyel robot gripper üretimi ve operator eklem hareketleri ile manipülasyonu, ToRK-2016 Türkiye Robotbilim Konferansı, ISBN 978-6058557215.