

## Endüstri 4.0 ve Bina Üretim Sektöründe Yeni Aktör: Robotik Sistemler ve Otonom Robotlar

New Actor in Industry 4.0 and Building Production Sector: Robotic Systems and Autonomous Robots

**Emine Fulya ÖZMEN<sup>1</sup>, Çağatay TAKVA<sup>2</sup>, Sariye ASLAN<sup>3</sup>, Zeynep Yeşim İLERİSOY<sup>4</sup>**

Gönderilme Tarihi: 14.11.2024 - Kabul Tarihi: 12.12.2024

### Özet

Otonom robotlar, Endüstri 4.0 sektöründe gelişen teknolojilerden biridir ve bina üretim sektöründe de otonom robotik sistemler kullanılmaktadır. Bu çalışma, bina üretim sektöründe kullanılan otonom robotların uluslararası literatürden tarama yapılarak bulgular ışığında güncel üretimlerin araştırılmasını kapsamaktadır. Otonom robotların hangi teknolojilerle entegre çalıştığı, inşaat sektöründe hangi robotların kullanıldığı konularıyla birlikte avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir. Bu robotların mevcut konumu hakkında durum analizi ile sınıflandırmalar oluşturulmuştur. Çalışmanın amacı, gelişmiş ülkelerde inşaat sektöründe kullanılan otonom robotların sayı ve çeşit bakımından artmakta olduğu görülerek farkındalık oluşturmaktır. Sonuç olarak, ülkemizde henüz çok tanınmayan ve kullanılmayan ancak gelecekte inşaat endüstrisinin ana aktörleri olacak otonom robotları tanıtılarak mevcut kullanımları ve gelecekteki dönüşümleri hakkında incelemeler yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Endüstri 4.0, Bina üretim sektörü, Robotik sistem, Otonom robot.

### Abstract

Autonomous robots are one of the emerging technologies in the Industry 4.0 sector, and autonomous robotic systems are also used in the building construction sector. This study investigates the current applications of autonomous robots in the building production sector by reviewing findings from international literature. It discusses the technologies integrated with autonomous robots, the types of robots used in the construction industry, as well as their advantages and disadvantages. Classification and situation analysis have been conducted to determine the current status of these robots. The aim of the study is to raise awareness by highlighting the increasing number and variety of autonomous robots used in the construction industry in developed countries. Consequently, this study introduces autonomous robots, which are not yet widely recognized or used in our country but are expected to become key players in the construction industry in the future, and examines their current applications and future transformations.

**Keywords:** Industry 4.0, Building manufacturing industry, Robotic system, Autonomous robot.

**Atıf:** Özmen, E. F., Takva, Ç., Aslan, S. ve İlerisoy, Z. Y. (2024). Endüstri 4.0 ve bina üretim sektöründe yeni aktör: Robotik sistemler ve otonom robotlar. *Modular Journal*, 7(1-2), 160-180.  
<https://doi.org/10.59389/modular.1585623>

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, efozcan@gazi.edu.tr | ORCID: 0000-0002-8003-5785

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, cagataytakva@gazi.edu.tr | ORCID: 0000-0002-0494-9972

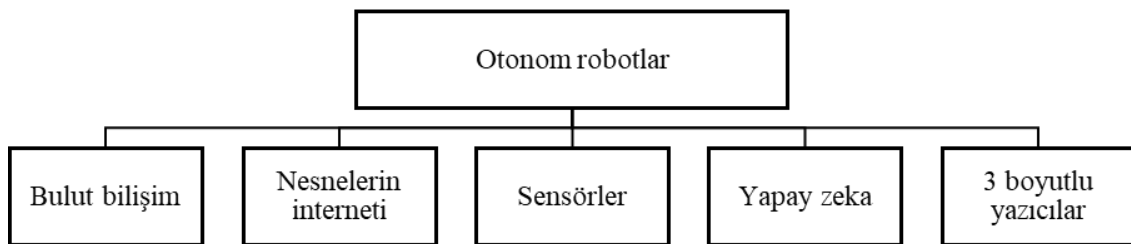
<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, yldzsariye@gmail.com | ORCID: 0009-0008-1347-077X

<sup>4</sup> Gazi Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, zyharmanakaya@gazi.edu.tr | ORCID: 0000-0003-1903-9119

## 1. Giriş

Endüstri 4.0 bünyesindeki teknolojilerden biri olan otonom robotlar, belli bir zekâya sahip robotik sistemler olarak tanımlanmakta ve makine üretiminin günümüzde geldiği en üst düzeyi oluşturmaktadır. Tarihsel olarak bakıldığında ilk makinelerin Antik Yunan'da M.Ö. 3. yüzyılda ortaya çıktığı bilinmektedir. İlk kuramsal çalışma ise 12. yüzyılda El-Cezeri tarafından ortaya konmuştur (Çırak ve Yörük, 2016). Bu dönemlerde yapılan makinelerin daha çok eğlence amaçlı kullanıldığı görülmektedir. Makinelerin endüstriyel gelişimine bakıldığında, birinci sanayi devrimi ile el işçiliğinin yerini makine üretimine bırakmasıyla makineleşmede hızlı bir artış görülmüş, ikinci sanayi devrimiyle elektrik gücüyle desteklenerek yayılım göstermiş, üçüncü sanayi devrimiyle bilgisayarlarla entegre olmuş ve dördüncü sanayi devrimiyle makineler kendi kendine iş yapabilir hâle gelmiştir (Özdoğan, 2017). Bu süreçte 1940'ta Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) yapılan sibernetik çalışmalarda otonom sistemlerin gelişmesine öncülük etmiş, 1970'lerde dijital kontrol elektroniğinin ve yapay zekânın ortaya çıkmasıyla bu alana ilgi artmaya başlamıştır. Bununla birlikte sensörler ve işlemcilerin maliyetindeki düşüşler ile otonom sistemlerin ve robotların gelişmesi, zeminde ve havada kullanımların yanı sıra denizaltı ve uzay gibi çeşitli alanlarda da bu teknolojinin kullanılmasını sağlamıştır (Watson ve Scheidt, 2005).

Dördüncü sanayi devrimi kavramı ilk olarak 2011 yılında Almanya'da Hannover Fuarı'nda ortaya atılmıştır (Özdoğan, 2017). Endüstri 4.0, inşaat sahalarında karmaşıklığın azaltılmasını, proje paydaşları arasındaki bilgi alışverişinin ve iletişimin geliştirilmesini sağlamaktadır ve bu sebeple üretkenliğin ve kalitenin artırılmasına yardımcı olmaktadır (Oesterreich ve Teuteberg, 2016). Büyük veri yönetimi, bulut bilişim sistemleri, yapay zekâ, nesnelerin interneti, sanal/artırılmış gerçeklik, siber güvenlik, robotik sistemler, katmanlı üretim/üç boyutlu yazıcılar, sensörler gibi teknolojileri içermektedir. Otonom robotlar, Endüstri 4.0 bünyesindeki diğer teknolojilerden nesnelerin interneti, sensörler, yapay zekâ ve bulut bilişim teknolojileri ile doğrudan ilişkili olarak geliştirilmektedir (Şekil 1). Otonom robotlar, bulut bilişim ile ağdan aldığı veriyi, yapay teknoloji ile geliştirilen yazılım ile karar vererek sensörler ve nesnelerin interneti teknolojileriyle birlikte çevresiyle ve diğer robotlar ya da cihazlarla etkileşim kurabilmektedir. Bu teknolojilere ek olarak, yapı üretimi ölçeğinde katmanlı üretimde üç boyutlu yazıcılarda da otonom sistemler kullanılmaktadır ve gün geçtikçe gelişim göstermektedir.



**Şekil 1.** Otonom Robotların Endüstri 4.0 Teknolojileri İle İlişkisi (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)

İmalat sanayisinde kullanılan robotların en yoğun olduğu ülkeler Japonya, Güney Kore, Almanya ve Amerika Birleşik Devletleri'dir. Robotların en hızlı yayıldığı alanlar ise bireysel aktiviteler ve askeri sistemlerdir (Yılmaz, 2018). Dünyada ekonomik faaliyetler içinde önemli bir yer tutan inşaat endüstrisi, pek çok ülkede ekonominin %9 ile %12 aralığında bir konumda bulunmaktadır. Sektörlere göre dağılımına bakıldığında, endüstriyel robotların %70'i otomotiv, elektrik/elektronik, metal ve makine sanayilerinde kullanılmaktadır. Nanoteknolojik malzemelerin geliştirilmesi de elektrik/elektronik, metal ve makine sanayilerinin ilerlemesine katkıda bulunmaktadır (İlerisoy ve Takva, 2017). Bu sektörlerin ardından sırasıyla kimya, plastik ve gıda sektörleri gelmektedir (Oesterreich ve Teuteberg, 2016). İnşaat endüstrisinin potansiyeline oranla diğer sektörler içinde araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) çalışmalarının düşük olduğu ve otonom sistemlerin en az kullanıldığı alanlardan biridir (Delgado ve diğerleri, 2019). İnşaat sektöründe Ar-Ge yatırımlarının ve teknolojik gelişmelerin yavaş ilerlemesinde çeşitli etkenler bulunmaktadır. İnşaat projelerinde birbiriyle ilişkili çok sayıda sürecin bir arada yürütülmesi ve sürecin farklı aşamalarında farklı katılımcıların (mimar, mühendis, müteahhit, alt yükleniciler, tedarikçiler, müşteri) devreye girmesi karmaşıklığı beraberinde getirmektedir. İnşaat projelerinde sınırlı bir zaman periyodunun olması bir diğer etkidir. Ayrıca, inşaat sektöründe kısa vadeli düşünmenin baskın olması ve inşaat şirketlerinin merkezi olmayan örgütlenmesi ile inşaat projelerinin geçici doğası inovasyonun önünde bir engel oluşturmaktadır (Oesterreich ve Teuteberg, 2016).

Ar-Ge çalışmalarının teşvik edilmesiyle teknolojik gelişimin her geçen gün artması sağlanmaktadır. Akıllı cihaz piyasasındaki ilerlemeler ve uygulamalar günlük yaşantıdan sanayi üretimine kadar pek çok alanda daha fazla görünür ve kullanılabilir hâle gelmektedir. Bu çalışma, bina üretim sektöründe kullanılan otonom robotların uluslararası literatürden elde edilen bilgiler ışığında güncel üretimlerin araştırılmasını kapsamaktadır. İnşaat sektörü içerisinde yer alan yol, altyapı, baraj gibi uygulamalar süreç olarak bina üretiminden farklı alanları temsil ettiği için çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Çalışmanın amacı, gelişmiş ülkelerde inşaat sektöründe kullanılan otonom robotların sayısı ve çeşit bakımından artmakta olduğu görülerek farkındalık oluşturmaktır. Çalışmada, ülkemizde henüz çok tanınmayan ve kullanılmayan ancak gelecekte inşaat endüstrisinin ana aktörleri olacak otonom robotlar tanıtılarak, mevcut kullanımları ve gelecekteki dönüşümleri hakkında incelemeler yapılmıştır.

### **1.1 Araştırmanın problemi**

Otonom robotlar, günümüzde birçok alanda aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Robotik sektörde malzeme, makine ve teçhizat ekipmanlarının yazılımlarla desteklenmesi ile farklı alanlarda farklı donanımlara sahip robotlar geliştirilmektedir. Mimaride de zamanla bu robotların varlığı ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın araştırma soruları aşağıda verilmiştir:

1. Otonom robot nedir ve bina üretim sektöründe aktif olarak hangi alanlarda kullanılmaktadır?
2. Robotik teknolojisinde trend olan otonom robotların bina üretimindeki avantajları ve dezavantajları nelerdir?

Ele alınan araştırma soruları aynı zamanda çalışmanın problemlerini oluşturmaktadır. Çalışmada, bu problemlere çözümler sunulmuştur.

## **1.2. Araştırmanın amacı**

Çalışmanın amacı, gelişmiş ülkelerde inşaat sektöründe kullanılan otonom robotların sayısı ve çeşit bakımından artmakta olduğu görülerek farkındalık oluşturmaktır. Literatürde yapı temelini kazılmasından yapı üst kotunun bitirilmesine kadar çeşitli bölümlerde otonom robotların sistematik bir şekilde konstrüksiyon sürecine dahil edildiği görülmüştür. Yapı elemanlarının (duvar, yapı kabuğu vb.) üretiminde, cephe sistemlerinin temizlenmesinde bu robotların kullanılabilirdiği, ayrıca inşa sürecinin verimli olması adına işçilerin ekipmanlarında da bu teknolojilerin entegrasyonunun sağlanabilirdiği saptanmıştır. Çalışmanın hedefi de otonom teknolojinin bina üretim sektöründe hangi mertebelerde etkin rol oynadığını araştırmacılara aktararak gelecek çalışmalara referans sağlamaktır.

## **1.3. Araştırmanın hipotezleri**

Araştırmanın hipotezi, farklı otonom robotların bina üretiminde farklı alanlarda nasıl kullanıldığını açıklamaktır. Hipotezin doğruluğunu ve sağlamasını yapmak için literatürdeki veriler gözden geçirilmiş ve otonom robotların özellikleri saptanmıştır. Küçük ölçekli teknolojik ekipmanlardan büyük ölçekli konstrüksiyon donanımlarına kadar çeşitli planlama aşamalarında otonom robotlar kullanılmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği açısından da olumlu yönde girdiler sağlayan bu robotların avantajları ve dezavantajları da belirlenerek hipotez güçlendirilmiştir.

## **1.4. Araştırmanın kapsamı**

Otonom robotlar, günümüz teknolojilerinin kompleks bir şekilde bütünleşmesi ile elde edilmektedir. Endüstri 4.0 sektörleri içerisinde yer alan bina üretim sektöründe de otonom robotik sistemler göze çarpmaktadır. Bina üretim sürecinde standardizasyonun olmaması ve her yapının farklı sistemleri barındırması, yapıların özelleşmesine göre otonom robotların da özelleşmesi veya yeniden programlanması gerektiğini göstermektedir. Ar-Ge çalışmalarının teşvik edilmesiyle teknolojik gelişimin her geçen gün artması sağlanmaktadır. Akıllı cihaz piyasasındaki ilerlemeler ve uygulamalar günlük yaşantıdan sanayi üretimine kadar pek çok alanda daha fazla görünür ve kullanılabilir hâle gelmektedir. Bu çalışma, bina üretim sektöründe kullanılan otonom robotların uluslararası literatürden tarama yapılarak elde edilen bilgiler ışığında güncel üretimlerin araştırılmasını kapsamaktadır. Bu bağlamda, son yıllar içerisindeki güncel çalışmalar taranarak ülkemizdeki ve dünyadaki uygulama örnekleri açıklanmıştır.

## **1.5. Araştırmanın yöntemi**

Çalışmada, otonom robotların Endüstri 4.0 ile birlikte gelişmesiyle bina üretim sektöründeki mevcut konumuna ve gelecekteki yönelimine dair bir yol haritası oluşturulmuştur. Bu doğrultuda, bina üretim sektöründe kullanılan otonom robotların uluslararası literatürden tarama yapılarak elde edilen bilgiler ışığında güncel üretimlerin

araştırılması yapılmıştır. Otonom robotların hangi teknolojilerle entegre çalıştığı, inşaat sektöründe hangi alanlarda hangi robotların kullanıldığı konularıyla birlikte avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir. Bu robotların mevcut konumu hakkında bilgi edinildikten sonra durum analizi ile sınıflandırmalar oluşturulmuştur. İnşaat sektörü içerisinde yer alan yol, altyapı, baraj gibi uygulamalar bina üretiminden bağımsız olarak yapı bağlamında farklı alanları temsil ettiği için çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

## 2. Bina Üretim Sürecinde Kullanılan Otonom Robotlar ve Özellikleri

Bina üretim sürecindeki aşamalar incelendiğinde kabaca saha hazırlığı, altyapı çalışmaları ve üstyapı çalışmaları olarak sınıflandırma yapılabilmektedir. Saha hazırlığı, binanın aplike edildiği arazinin projeye uygun şekilde gerekli tesviye ve düzenleme işlemlerini içermektedir. Altyapı çalışmaları, temellerin ve temel altı çeşitli tesisat ve teçhizatların, binaya bağlanan yolların inşası gibi aşamalardan oluşmaktadır. Üstyapı çalışmaları ise binanın temel üstünde kalan bölümünü ifade etmektedir ve binanın kullanıma hazır hâle gelene kadar geçirdiği tüm kaba ve ince işçilikleri kapsamaktadır. Bu süreçlerin tümünde farklı otonom robotlar kullanılmaktadır. İnşaat alanında yer alan bu robotların hangi aşamada kullanıldığı Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Bina Yapımında Kullanılan Otonom Robotların Yer Aldığı Aşamalar (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)

	Saha Hazırlığı	Altyapı Çalışmaları	Üstyapı Çalışmaları
Otonom iş makineleri	✓	✓	✓
Fabrika robotları		✓	✓
3 boyutlu yazıcılar			✓
İnsansız hava araçları	✓	✓	✓
İnsansız kara araçları	✓	✓	✓
İnsansız deniz araçları	✓	✓	
Tek görevli robotlar		✓	✓
Giyilebilir robotlar		✓	✓

Bina üretim sürecinde yer alan otonom robotlar genel olarak dört grupta incelenmektedir (Tablo 2): Saha dışı prefabrikasyon üretim robotları, sahada görev yapan otonom robotlar, insansız hava, kara ve deniz araçları ve giyilebilir robotlar bu kategoride yer almaktadır (Delgado ve diğerleri, 2019; Xu ve De Soto, 2020). Kategoriler arasındaki sınır kesin olmamakla birlikte mevcut robotların değişmesi ve gelişmesiyle zamanla farklılaşmalar görülmektedir. Yapılan bu kategorizasyon ile karmaşık ve çeşitli olan teknolojilerin daha iyi anlaşılabilmesi sağlanmıştır. Birinci kategori bağlamında, ilk inşaat robotları Japonya’da modüler ev bileşenlerinde inşaat kalitesinin artırılması amacıyla üretilmiştir. Gelişme gösteren bu teknoloji, Japon otomotiv endüstrisinde robotların başarılı performans göstermesi üzerine gerçekleştirilmiştir. İkinci kategori bağlamında, robotlar inşaat sahalarında görülmeye ve otonom şantiye robotları geliştirilmeye başlanmıştır. Üçüncü kategoride, denetim, görüntüleme ve bakım gibi işler için insansız otonom araçlar geliştirilmiştir. Dördüncü

kategoride ise kullanıcı kapasitesini artıran giyilebilir robotlar, inşaat endüstrisinde günümüzde hızlı ve etkin sistemlerin oluşturulmasında rol oynamaktadır (Delgado ve diğerleri, 2019).

**Tablo 2.** Bina Üretim Sürecinde Otonom Robotların Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)

No	Kategori	Kullanım Alanı
1	Saha dışı prefabrikasyon üretim robotları	Bina bileşenlerinin üretilmesi
		Büyük ölçekli prefabrikasyon üretimler
		Saha dışı katmanlı üretim
2	Sahada kullanılan robotlar	Tuğla örme, kaynak ve boyama işleri, beton dökümü işlemleri
		Bina bileşenlerinin montajı
		Sahada katmanlı üretim
3	İnsansız hava, kara ve deniz araçları	İnceleme, denetleme ve görüntüleme sistemleri
		Hafriyat ve kazı işleri
		Tehlikeli alanlara erişim ve yerinde kontrol
4	Giyilebilir robotlar	Çalışan kapasitesinin artırılmasını sağlayan durumlar
		Yaralanmaların ve iş kazalarının azaltılmasını sağlayan sistemlerin geliştirilmesi

Otonom robotların amacı, daha az işgücü ile daha verimli ve hızlı üretim/iş yapma gücüdür. Bu noktada çözülmesi gereken bazı sorunlar da bulunmaktadır. En önemli sorunlardan birisi kendi kendine karar verebilen ve iş yapabilen bu sistemlerin hak, sorumluluk ve hesap verebilirlik yükümlülüklerinin belirlenebilmesi için kanun ve yönetmeliklerin düzenlenmesi gerekliliğidir. Güvenlik sorunları ve siber saldırılar gibi tehlikeler diğer önemli sorunları oluşturmaktadır. Kullanıcıların bu sorunların bilincinde olarak gerekli önlemleri alması gerekmektedir (Çirkin ve Özdağoğlu, 2021).

Saha dışı fabrikasyon robotları, fabrikalarda bina bileşenlerinin üretilmesinde ve katmanlı üretimde kullanılan robotları kapsamaktadır. Beton, tuğla, ahşap ve çelik yapı malzemelerini üretimi, belli ölçülerde boyutlandırılması, bu malzemelerle, kapı, pencere, kaplama malzemeleri, mutfak ve banyo modülleri üretilmesini ve katmanlı üretim aracı olarak bilinen üç boyutlu yazıcıları içermektedir (Delgado ve diğerleri, 2019). Daha büyük boyutlu üretimlerde sahaya kurulan yazıcılarla yerinde üretim yapılabildiği gibi bina modülleri fabrikalarda kurulu üç boyutlu yazıcılarla da üretilebilmektedir (Şekil 2). Üç boyutlu yazıcı teknolojilerindeki hızlı gelişmeler ile bu teknolojinin gelecekte sıklıkla kullanılması beklenmektedir (Bock, 2015). Üç boyutlu yazıcı sistemleri *contour crafting*, *concrete printing* ve *D-shape printing* yöntemlerinden türemiştir. Bu yöntemler ile küçük, orta ve büyük ölçekli *Gantry* adı verilen ve x, y, z olmak üzere üç ekseninde hareket edebilen robotik yazıcı sistemleri geliştirilmiştir. Ek olarak, altı ekseninde hareket edebilen küçük, orta ve büyük ölçekli robotik kol ve kablo sistemler ile çalışan yazıcı sistemleri bulunmaktadır (Puzatova ve diğerleri, 2022). Türkiye’de inşaat sektöründe üç boyutlu baskı işlemlerinde genellikle küçük ölçekli dijital fabrikasyonların uygulandığı ve büyük ölçekli inşa işlemlerinin

sınırlı olduğu görülmektedir. Günümüzde özel şirketler, mimarlık ofisleri, üniversiteler vb. kuruluşlar üç boyutlu yazıcı sistemleriyle denemeler ve uygulamalar gerçekleştirmektedir. İstanbul Büyükşehir Belediyesine bağlı olarak çalışan İSTON tarafından ise ilk üç boyutlu beton malzemeden üretilmiş ofis yapısı bulunmaktadır (Özalp ve diğerleri, 2018).



**Şekil 2.** (a) Prefabrik Üretim Sürecinde Otonom Robotlar (WeberHaus, 2023), (b) Saha Dışı Katmanlı Üretim Robotu (KR QUANTEC, 2022)

Sahada kullanılan robotlar, inşaat sahasında doğrudan kullanılan otonom ve robotik sistemlerdir. Şantiye alanında üretime yönelik çalışan robotlar, genellikle tek kollu otonom robotlardır (Şekil 3). Bu robotlar, tuğla örme, beton püskürtme ve boya işlerinde aktif görev almaktadır (Dritsas ve Soh, 2019). Geleneksel inşaat yöntemlerine kolaylıkla uyarlanabildiği için esnek sistemler olmakla birlikte ek sağlık ve güvenlik gereksinimlerine ihtiyaç duyması ve insan faaliyetleriyle entegrasyon eksikliği gibi zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu tür zorlukları ortadan kaldırmak için inşaat sahasında fabrikasyona yönelik donanımlar ile geliştirilen robotik sistemler yer almaktadır (Delgado ve diğerleri, 2019; Takva ve diğerleri, 2024). Sahada yer alan her bağımsız robot, birbirine ağ üzerinden bağlanarak iş birliği içerisinde çalışmaktadır. Nakliye ve taşımacılık gibi tekrarlayan görevlerde ve işgücüne dayalı işlerde, işçi sayısının azaltılmasına bağlı olarak iş kazalarının ve yaralanmalarının önüne geçilmesi ve şantiye güvenliğinin sağlanmasında otonom robotların etkisi fazladır (Xu ve De Soto, 2020).



**Şekil 3.** (a) Tek Kollu Saha Robotları (Anyango, 2022), (B) Sahada Üç Boyutlu Yazıcı ile Katmanlı Üretim Uygulaması (Zeiba, 2019)

İnsansız hava, kara ve deniz araçları, uzaktan kontrol edilebilen otonom robotlardan oluşmaktadır (Şekil 4). İnsansız hava araçlarından olan dronlar, inşaat sahasının denetlenmesi, şantiye alanlarının görüntülenmesi, ölçüm yapılması, hafif yapı malzemelerinin taşınması ve güvenliği sağlama gibi durumlarda kullanılmaktadır. Otonom bir dron, sensörleri sayesinde uçuş güzergâhını belirleyerek görev yerine ulaşmakta ve yüksek çözünürlüklü görüntü ve üç boyutlu modeller oluşturabilmektedir (Takva ve İlerisoy, 2023; Yi ve Sutrisna, 2021). İnsansız kara araçları, askeri ve uzay çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır ve günümüzde inşaatlarda da gelişimi artmaktadır (Czarnowski ve diğerleri, 2018). Robotik kolları ile yönlendirmeler yapılarak görevleri gerçekleştirmektedir. Tırmanan robotlar ise genellikle erişimin zor olduğu bölgelerde etkin olarak kullanılmaktadır. Mobil robotlar, nokta bulutu teknolojisiyle görüntüledikleri alanı üç boyutlu modele dönüştürebilmektedir. Şantiye uygulamalarında otonom iş makineleri ile tesviye ve kazı işleri yapılabilmektedir (Melenbrink ve diğerleri, 2020). İnsansız deniz araçları, deniz altında ya da kısmen suya gömülü yapıların inşaatında kolaylık sağlamaktadır. Askerî operasyonlarda sıklıkla kullanılan insansız deniz araçları, inşaat sektöründe de etkin bir şekilde kullanılabilir (Watson ve Scheidt, 2005). Kısmen suya gömülü binalar ve su altı yapıları, bina üretim sürecinde çok kısıtlı bir alanı oluşturmakla birlikte üretim süreci olarak en zor süreçlere sahiptir.



**Şekil 4.** (a) İnşaat Alanında İnsansız Kara Aracı (Cao, 2021), (b) Otonom İş Makinesi ve Dron (Volvo, 2018)

Giyilebilir robotlar, doğrudan bina üretiminde kullanılmamakla birlikte yardımcı servis robotları olarak düşünülmektedir. Bu robotlar özerk olarak iş yapan robotların aksine, işçiler ve kullanıcılar tarafından giyilerek kullanılan ekipmanlardır (Şekil 5). Ağır yük kaldırma, güvenlik riski olan yerlerde alet kullanımını kolaylaştırma, yorgunluğu azaltma gibi işlevleri ile çalışan performansını ve üretkenliklerini artırmaktadır (Delgado ve diğerleri, 2019). İnşaat işçileri tarafından gerçekleştirilen, tekrarlı ve fiziksel olarak zorlayan işler kalıcı sakatlıklara neden olabileceği için bu durumlara önlem almak gerekmektedir (Ray ve Teizer, 2012). Giyilebilir robotlar, önlem almayı sağlarken yaşlanmaya bağlı işgücünün düşmesine bir çözüm olarak da görülmektedir. Akıllı baretler, üzerinde bulunan sensörler ve yazılımlar ile sahada çeşitli kolaylıklar sağlamaktadır. Tüm bu olanakların yanı sıra takılma ve düşme riskleri, hijyen, dayanıklılık ve sağlık sorunları, her türlü hava ve çevre koşulunda çalışabilme zorluğu gibi etkenler giyilebilir robotların kullanımının yaygınlaşması gerektiğini göstermektedir.





Şekil 5. İnşaat Alanında Giyilebilir Robotların Kullanımı (Hilti, 2022)

### 3. Bulgular ve Değerlendirme

Otonom robotların avantajlarına bakıldığında, iş kazalarını ve buna bağlı ölüm ve yaralanmaları minimize etmektedir. İnsan-makine iş birliği, doğru ve hızlı karar verilmesini sağlayarak kontrol ve denetleme mekanizmalarında kolaylıklar oluşturmaktadır. Tekrarlı ve tehlikeli işlerde işgücü ve maliyet açısından tasarruflar sağlamaktadır. Üretim esnekliği, süreç ve ürün kalitesine katkıda bulunarak nitelikli yapıların inşasında rol oynamaktadır. Robotlarla birlikte yemek molası, yıllık izin, vardiya değişimi gibi insani ihtiyaçlar ortadan kalkarak zaman kayıpları önlenmektedir. Parametrik tasarım ürünleri gibi çok parçalı, değişken ve tekrarlı parçalardan oluşan ürünlerin kolay bir şekilde üretimine olanak sağlamaktadır. Otonom sistemler ile iş güvenliği dikkate alınarak yüksek verimler alınmaktadır. Dezavantajlara bakıldığında, otonom robotların karşı karşıya kaldığı siber güvenlik tehditleri ve saldırılar olumsuz bir etki yaratmaktadır. Diğer endüstri alanlarında etkin kullanılabilmesine rağmen bina yapım sürecinde adaptasyon sağlaması gerekliliği zaman kaybı oluşturabilmektedir. Geleneksel bina üretim sürecinde köklü değişikliklere neden olması da bir kaygı ortamı meydana getirebilmektedir. Bunlara ek olarak, yüksek yatırım maliyetleri de otonom sistemlerin olumsuz taraflarından biridir.

Tablo 3'te bina üretim sürecinde yer alan otonom robotların sınıflandırıldığı kategorilere göre sağladığı avantaj ve dezavantajlar verilmiştir. Tablo incelendiğinde, dezavantaj olarak görülen kısımların bu alanlardaki teknoloji ve yetişmiş işgücü eksikliği temelinde olduğu görülmektedir. Siber güvenlik konusu, gelişen teknolojilerle birlikte önlemlerin artırıldığı bir konu olmasına karşın her koşulda dikkat edilmesi gereken bir alandır. Yetişmiş işgücü eksikliği, otonom robotların benimsenmesi ve yaygınlaşması ile kısa sürede ortadan kalkabilecek bir sorundur. Otonom robotların artması ve ticari alternatiflerinin üretilmesi, ilk yatırım maliyetlerini zamanla düşürecektir. Ayrıca daha kaliteli ve hızlı üretim yapılması, ilk yatırım maliyeti yüksek olan bir alanda kâr payını artıracaktır. Bütün bu durumlar göz önüne alındığında, otonom robotların geleneksel tekniklerin yerini alacak kadar yaygınlaşacağı bir döneme gelindiğinde bugün dezavantaj olarak görülen unsurların avantaja dönüşmesi mümkün olacaktır.

**Tablo 3.** Bina Üretim Sürecinde Otonom Robotların Sınıflandırılması ve Sağladığı Avantaj/Dezavantajlar (Yazarlar tarafından oluşturulmuştur.)

	Kullanım Alanları	Avantajlar					Dezavantajlar		
		Zaman tasarrufu	İşgücünün azaltılması	Üretim kalitesinde artış	Tehlikeli işlerde kullanılma	Toplam maliyet tasarrufu	Siber güvenlik	Yetersiz işgücü eksikliği	İlk kurulum maliyetini yüksek olması
1. Saha Dışı Fabrikasyon Robotları	Bina bileşenlerinin üretilmesi	✓		✓		✓			
	Büyük ölçekli prefabrikasyon yönteminin uygulanması			✓		✓	✓		✓
	Saha dışı katmanlı üretim	✓	✓				✓	✓	
2. Sahada Kullanılan Robotlar	Tuğla örme, kaynak ve boyama işleri ve beton dökümü işlemleri		✓	✓		✓	✓		✓
	Bina bileşenlerinin montajı	✓		✓		✓	✓		✓
	Sahada katmanlı üretim	✓		✓			✓	✓	
3. İnsansız Hava, Kara ve Deniz Araçları	İnceleme, denetleme ve görüntüleme işleri	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
	Hafriyat ve kazı işleri		✓	✓			✓	✓	✓
	Tehlikeli alanlara erişim	✓	✓		✓			✓	
4. Giyilebilir Robotlar	Çalışan kapasitesinin artırılmasının sağlanması	✓	✓		✓		✓	✓	✓
	Yaralanmaların ve iş kazalarının azaltılması	✓			✓		✓		✓

Otonom robotların sağladığı avantajları ve dezavantajları daha net bir şekilde anlamak için güncel olarak yapılmış çalışmalar gözden geçirilmelidir (Şekil 6). Bu noktada, insan-robot ve insan-nesne etkileşimi ile robotların kendi aralarındaki senkronizasyon, otonom özelliklerin gelişimini göstermektedir. Bina üretim endüstrisinde geliştirilen otonom robotlara bakıldığında;

- Oscar (*Optimum Strength Compact Articulated Robot*) 1000 adı verilen bir otonom robot, cam panellerin ve pencerelerin taşınmasında görev almaktadır. Vakumlu taşıma ekipmanları sayesinde 1000 kilogram ve üzerinde taşıma kapasitesine sahiptir. Şarj edilebilir pillerle çalışmaktadır. Yüksek binalarda, kapalı ve kısıtlı erişimin olduğu alanlarda kullanılabilmesi yönüyle avantaj oluşturmaktadır. Kule vinçlere, inşaat iskelelerine veya araç yolunu kapatmayı

gerektirebilecek daha büyük vinçlere göre maliyet ve zaman açısından tasarruf sağlamaktadır (Bogue, 2018).

- Otonom serbest biçimli bir yürüyen ekskavatör olan HEAP (*Hydraulic Excavator for an Autonomous Purpose*) isimli robot, CAD modelinde tanımlanan arazide kazı işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Hidrolik bağlantılarla otonom olarak kontrol edilebilen bu robot ile kanal açılabilir. Geliştirilen yazılım aracılığıyla gerçek zamanlı kazı operasyonlarına kıyasla planlama stratejisinin bir sonucu olarak daha fazla enerji verimliliği sağlamaktadır. CAD modelinde alanın kazı haritası ortaya çıkarılmaktadır ve kazı haritasından yararlanan yörünge planlaması ile robotik kola sinyaller gönderilmektedir (Jud ve diğerleri, 2019).
- Münih, Almanya’da bulunan Fraunhofer-Gesellschaft yönetim binasında cephe temizleme işlemini gerçekleştirmek için SIRIUSc adında bir otonom robot geliştirilmiştir. Yönetim binası, 4000 metrekarelik cephe alanına sahiptir ve 80 metre yüksekliğinde bir yüksek bina. Otomatik bir sistem ile cephe temizleme işlemini yapan bu robot, diğer cephe temizleme robotlarının aksine ray sistemiyle hareket etmemektedir. Dikey cepheler için serbest dolaşım imkânı sunmaktadır. Robotik donanım olarak kontrol sistemi, sensörler, navigasyon sistemi ve kullanıcı arayüzü bulunmaktadır (Elkmann ve diğerleri, 2008). Yapının çatısına kurulan vinç ve gergin kablolar aracılığıyla rüzgâra karşı dayanıklılık sağlanmıştır. Bir saat içerisinde 80 metrekareye kadar temizleme yapabilen bu robot, temizlik sırasında kapalı bir döngü içerisinde su akışını yapmaktadır (Armada ve diğerleri, 2005).
- Bina üretim endüstrisinde tuğla işçiliği önemli bir yer tutmaktadır. Tuğlaların taşınmasını ve üst üste konulmasını sağlayan bir otonom ve mobil robot geliştirilmiştir. Deneysel bir çalışma ile parametrik bir tuğla duvar inşasını gerçekleştirmek için geliştirilmiş otonom robot test edilmiştir. Deneysel çalışmanın yapılmasının amacı, yapıdaki inşa sürecinde robotun performansının analiz edilerek şantiye ortamına adapte edilmesidir. Lokasyona duyarlı sensörlere ve yazılımlara sahip olması nedeniyle yönlendirme yapılabilir. Deneysel konstrüksiyon alanında yazılımlar ile uygulamanın tutarlılığı gözden geçirilmiştir (Dörfler ve diğerleri, 2016).



(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 6.** (a) Oscar 1000 Otonom Robotu (Bogue, 2018), (b) HEAP Robotunun Görünümü (Jud ve diğerleri, 2021), (c) SIRIUSc Cephe Temizleme Robotu (Armada ve diğerleri, 2005), (d) Tuğla İşçiliğine Yardımcı Olan Otonom Robot (Dörfler ve diğerleri, 2016)

Yüksek binalarda cephe temizliği, robotların kullanımı bakımından önemli fırsatlar sağlamaktadır. Son yıllarda, gökdelenlerde insan gücü ile yapılan cephe temizliğinin yerini otonom robotlar almaktadır. Bu doğrultuda, manuel iş gücü ile yapılan cephe temizleme işlemlerinde yüksekte düşme, yaralanma veya ölümlü iş kazalarının ve risklerinin de önüne geçilmektedir. Cephe temizleme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan robotlara bakıldığında;

- Şanghai Bilim ve Teknoloji Müzesi'nin karmaşık cephe yüzeylerini temizlemek için Sky cleaner robotu geliştirilmiştir. Bütüncül bir şekilde pnömatik aktivatörler ile tasarlanmıştır ve bir dizi algoritma ile vakumlu vantuzları sayesinde cam yüzeyde hareket ederek cephenin çok yönlü temizlenmesinde kullanılmaktadır.
- İsviçre'de bir endüstriyel şirket olan Serbot AG tarafından geliştirilen GEKKO cephe temizleme robotu, yatay olarak dönen vakumlu vantuzlarla tasarlanmıştır. Düşey yüzeye tırmanan ilk ticari robot olan GEKKO, donanım mekanizması ile bina cephe formlarına göre adapte ve entegre edilebilmektedir.
- ABD'de RATIOFOREM tarafından geliştirilen Tito 500 cephe temizleme robotu, dikey konumda tutulmasını sağlayacak şekilde binaya monte edilebilen bir vinç ile çalışmaktadır. Robot, düşey kablolar boyunca bina cephesinde yukarı aşağı hareket ederek temizlik işlemini gerçekleştirmektedir (Zhang ve diğerleri, 2007; Akiniev ve diğerleri, 2009; Tun ve diğerleri, 2018).

Otonom sistemlerde kullanılan lazer tarayıcı ve bulut yöntemleri de son yıllarda gelişme göstermektedir. Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) ile birlikte konstrüksiyon süreçlerinin izlenmesi için bir binanın inşaat hâlindeki durumu takip edilebilmektedir. BIM araçları entegrasyonu ile inşa hâlindeki yapının lazer taraması yapılabilen ve ardından taranan nokta bulutları dijital ortamda işlenebilmektedir. Otonom sistemlerde bu teknolojilerin kullanımı için nokta bulutu semantik segmentasyonu ve LİDAR sensörü kullanan yeni bir robot destekli mobil lazer tarama yaklaşımı benimsenmektedir (Wu ve diğerleri, 2021; Hu ve diğerleri, 2023).

Deprem bölgelerinde de makro ve mikro ölçekte otonom robotlardan yararlanılmaktadır. Deprem sırasında mobilyalar ve mobil ekipmanlar, olaya dahil olan kişilere güvenli bir barınak sağlayarak pasif can güvenliği sistemi görevi görebilmektedir. Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazları ile sismik önleyici mobilyaların birleşimi, bir deprem durumunda insanları korumak için akıllı koruma sistemlerine dönüştürmenin bir aracı olarak hizmet edebilmektedir. Destekleyici bilgi ve iletişim teknolojisi altyapısı sensörler ile kombine edilerek kurtarılmaya ihtiyaç duyan bireylerin varlığına işaret eden, anti-sismik mobilyalara entegre edilmiş kablosuz IoT cihazlarından oluşan platformu geliştirmektedir (De Donato ve diğerleri, 2024). Deprem sonrası depremzedelerin arama-kurtarma faaliyetlerinde de binaların kızılötesi ve termal analizlerini gerçekleştiren sensörler bulunmaktadır (Cuevas-Rasgado ve diğerleri, 2022). Deprem anında ve sonrasında sensör sistemleri aktif olarak çalışabilirken ve deprem öncesinde de erken uyarı sistemleri tasarlanmaktadır. Bu sistemler, binalara entegre edilerek sismik hareketlere duyarlı hassasiyette monte edilmektedir (Lin ve diğerleri, 2022).

Türkiye’de otonom robotların inşaat sektöründeki uygulamaları sınırlıdır. Günümüzde bina üretiminde yurtdışında kullanılan sistemler genellikle ülkemize uyarlanmaktadır. Bu doğrultuda, OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*) verilerine göre Teknoloji ve Mühendislik alanında AR-GE harcamalarına en yüksek bütçeyi ayıran ülkenin Japonya olduğu görülmektedir. Endüstri 4.0 bağlamında otonom robotların geliştirildiği bu alanda Japonya’nın ardından Amerika ve Avrupa ülkeleri ön planda yer alırken Türkiye’nin bu ülkelere göre daha az bütçe ayırdığı belirlenmiştir (Bulut ve Akçacı, 2017).

Ülkemizde iş gücü açısından bakıldığında, otomotiv, savunma sanayi ve tıp alanlarında robotların etkinliği görülmektedir. Ek olarak, akıllı fabrika ve üretim tesislerinde insan gücünün daha az kullanıldığı saptanmaktadır. Bu alanlarda, üretimin artış gösterdiği, daha az maliyet ile daha fazla kazançların sağlandığı ve standardizasyon/seri üretim potansiyel hacminin genişlediği göze çarpmaktadır. Ancak, bina üretiminde insan gücü olmadan robotların verimliliği düşük seviyededir. Bina üretiminde de standardizasyon sağlanarak seri üretime yönelik girişimlerin artması ve iş kalemlerinin bu yönde düzenlenmesi, inşaat sektöründe kâr oranını artırarak iş gücünü destekleyecektir. Bina temellerinin kazılmasında, yapı bileşenlerinin taşınmasında, cephe sistemlerinin temizlenmesinde ve duvarların inşasında kullanılan robotların gelecekte birçok planlamada kullanılacağı düşünüldüğünde, iş gücü ve üretim parametrelerine olumlu yansıtacağı öngörülmektedir.

Geliştirilen otonom robotların konstrüksiyon aşamasında ve bina üretim sürecinde kullanılmak üzere tasarlandığı görülmektedir. Robotların belirli bir bölümü inşa aşamasında zaman ve maliyet bazında avantajlar sağlarken diğer bölümü ise bakım ve onarım aşamasında görev almak üzere planlanmıştır. Tehlikeli görevlerde robotik donanımların kullanımı ile kaza ve yaralanmaların önüne geçilmesi, esnek tasarım mantığı ve sürdürülebilir sistemlerin entegrasyonu ile otonom robotların avantajlarının daha fazla olduğu saptanmıştır.

### 3.1. Bina üretim sürecinde otonom robotların geleceği

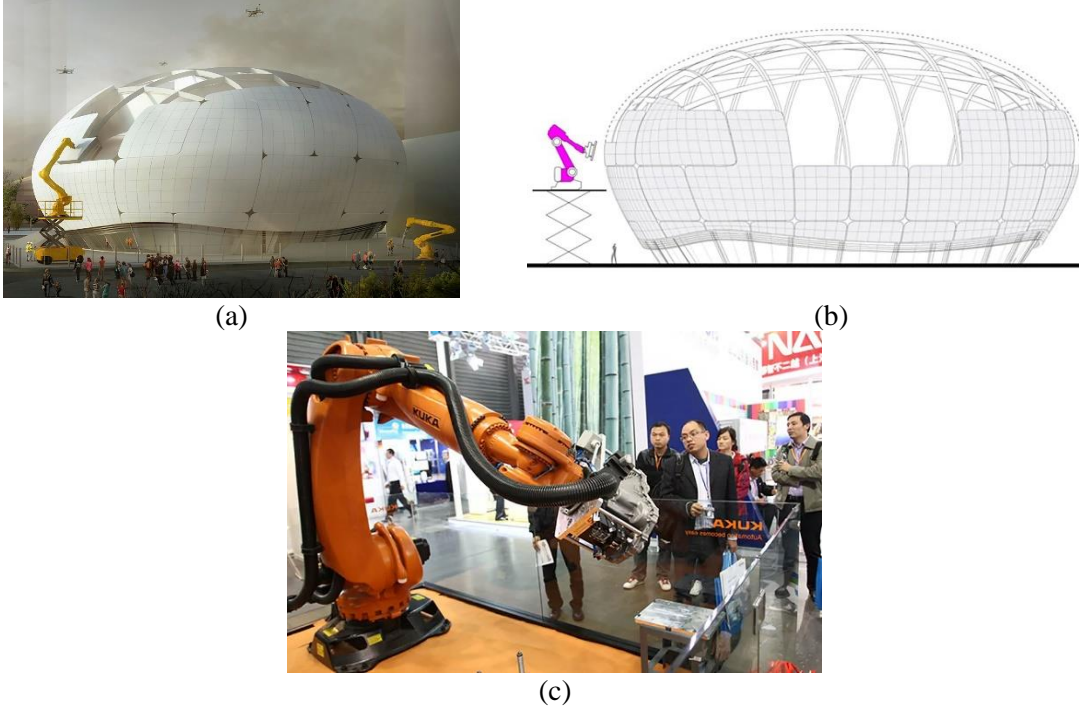
Robotik sistemler, bina üretim sürecinde çok sayıda fayda sağlamasına rağmen ülkemizde günümüz koşullarında inşaat sektörleri tarafından benimsenme durumu düşük seviyededir. Gelecekte otonom robotlara daha fazla yer verilebilmesi için öncelikle diğer sektörlerde uzun yıllardır kullanılan bu sistemlerin bina üretim sürecinde kullanılamamasının nedenleri araştırılmalıdır ve buradaki sorunlar giderilerek gelişim sağlanmalıdır. Literatür çalışmalarında (Kumar ve diğerleri, 2016; Oesterreich ve Teuteberg, 2016; Delgado ve diğerleri, 2019) görüldüğü üzere bu durumun başlıca nedenleri olarak aşağıdaki maddeler sayılabilmektedir:

- Geleneksel inşaat yöntemlerine olan bağlılık ve alışkanlıkların getirdiği rahatlık,
- Müşteri ve yüklenici açısından ekonomik faktörler,
- Her binanın benzersiz ve kendine özgü olması,
- Mevcut robotların yeterli verimliliği sağlayamaması ve şantiye ortamında birbirleri ile iletişiminin yetersiz kalması,
- Otonom robotları kontrol edecek yeterli işgücünün yetişmemiş olması,
- Otonom robotların insanların yerini alacağından iş kayıpları yaşanacağı endişesi.

Lisans eğitiminde ve akademik düzeyde verilen atölyelerde, yapay zekâ, makine öğrenmesi ve robot sistemlerinin tanınması önemlidir. Erken yaşlarda kazanılan deneyimler ile gelecek yılların temelleri atılarak büyük ölçekli sistemler geliştirilebilir. Bina üretiminde aktif rol üstlenen mimarlık ve mühendislik öğrencilerinin yapı sektöründeki son teknolojileri uygulamalı olarak anlayabilmesi, ilerde uygulayacakları projeler için bir dayanak oluşturacaktır. Bu kapsamda, dünya çapında bilgisayar sınıflarında yapay zekâ ve makine öğrenmesine yönelik dersler verilirken robot yapımından robot-bina üretimi etkileşimine dayanan deneysel laboratuvar ve atölye etkinlikleri de gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde de mimarlık ve mühendislik öğrencilerinin bitirme tezlerinde Endüstri 4.0 teknolojileri teşvik edilmektedir. Örneğin, 3 boyutlu yazıcıların kullanılabilirdiği seçmeli dersler açılarak bina üretimine yönelik prototipler geliştirilebilmektedir.

Akademik çalışmalara ek olarak; müze, sergi ve atölye çalışmaları ile de farkındalık oluşturulmaktadır (Şekil 7). Uluslararası bir yarışma sonucu Melike Altınışık Architects (MAA) tarafından tasarlanan Robot Science Museum robotların desteğiyle inşa edilecektir. Seul, Güney Kore’de konumlandırılan proje, “robotlar ve ziyaretçileri için kendi evrenini yaratmak” konsepti ile insan-robot etkileşimini ön plana çıkarmaktadır. Küresel bir görünüme sahip olan yapıda, yapay zekâ, sanal ve artırılmış gerçeklik ve hologramlar dahil olmak üzere güncel robot teknolojileri sergileneyecektir. Robotik konstrüksiyon metodolojileri ve fabrikasyon teknikleri BIM sistemleri ile entegre

edilerek inşaat aşaması sürdürülecektir (Walsh, 2019). Dünya çapında sektör buluşmaları temalı sergiler de farkındalığın oluşturulmasında rol oynamaktadır. Robotik alanında çalışan KUKA (endüstriyel robot üreticisi) gibi şirketler, sergilerde ürünlerinin geniş kitlelere yayılmasını sağlamaktadır.



**Şekil 7.** (a) ve (b); Seul, Güney Kore’de İnşa Edilecek Robot Müzesi (Walsh, 2019), (c) KUKA Endüstriyel Robotik Kolun Yer Aldığı Sergi (Ackerman, 2015)

Otonom robotların gelecekte özellikle niteliksiz işgücü gerektiren işlerin büyük bölümünün yerini alacağı öngörülmektedir. Gelecekte her işi robotların yapacağı düşünüldüğünde insanların ne iş yapacağı sorusu pek çok çalışmada dile getirilmiştir. Robotların her alanda nitelik gösterebildiği ve insanlar tarafından gerçekleştirilen birçok işin kontrolünü sağlayabildiği görülmektedir. Bu durumun sorun olmaması için insanların iş profillerini ve yeteneklerini gelişimlere göre değiştirerek, robot üretim ve ilgili yapay zekâ yazılım işlerinde daha çok yer almasına ihtiyaç duyulacaktır. Bu uyum sağlanmadığı takdirde teknolojik işsizlik kaçınılmaz olacaktır (Oztemel ve Gursev, 2020). Otomasyonun artmasıyla çalışma ortamlarının büyük ölçüde değişeceği, gayrimenkul varlıklarının da değişen gereksinimlere göre şekilleneceği düşünülmektedir. Günümüzde, birçok endüstri dalı üretimini kısmen ya da tamamen otomasyona dayalı hâle getirdiği gibi gelecekte inşaat sektörüyle birlikte bina üretim süreci de büyük ölçüde otonom hâle gelecektir.

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Endüstri 4.0 ile birlikte tüm hayatımıza etki eden ve dönüştürmeye başlayan dijitalleşme, mimarlık ve inşaat alanlarında da dönüşümlere neden olmaktadır. Tasarım süreci ile başlayan değişim, yeni üretim araçları ile yapı malzemelerinden inşa sürecine kadar pek çok noktada kendini göstermektedir. İnşaat endüstrisinde otonom robot

kullanımı, otomotiv ve elektronik sektörlerine kıyasla daha yavaş gelişmektedir. İnşaat endüstrisinde görülen örnekler ise genelde küçük ölçekli üretimlerdir. Teknolojik gelişime bağlı olarak büyük ölçekli bir projenin tam otonom olarak üretilebilmesi yakın gelecekte mümkündür. Endüstri 4.0 teknolojilerinin birbiriyle entegre ve multidisipliner bir şekilde çalışması ile bina üretim sektöründeki paydaşların etkin sonuçlar alacağı görülmektedir. Büyük veri yönetimi, bulut bilişim sistemleri, yapay zekâ, nesnelerin interneti, sanal/artırılmış gerçeklik, siber güvenlik, robotik sistemler, katmanlı üretim/üç boyutlu yazıcılar, sensörler multidisipliner çalışma ortamını oluşturmaktadır ve verimli bir inşa sürecinin anahtarı konumundadır.

İnşaat sektörü, diğer imalat sektörleri gibi standartlaşmadan bağımsız olduğu için otonom sistemlerin entegrasyonu da daha yavaş olmaktadır. Bir otomobil fabrikasında aynı tip arabada standartlaşma görülürken inşaat sektöründe ise her yapı birbirinden farklıdır. Şantiye ortamının sürekli olarak değişen ve gelişen yapısı, geniş bir alanda ve farklı kotlarda aynı anda farklı üretimlerin gerçekleştirilmesini gerektirmektedir. İnşaat sahasının farklılaşması, farklı iklim ve çevre koşullarında gerçekleştirilmesi ile birlikte yapı detaylarının farklılaşması inşaat sektörünün otonom hâle gelmesinde zorluklar yaratmaktadır. Bu bağlamda, her şantiye alanına farklı bir planlama yaklaşımı yapılarak BIM teknolojilerinin robotlarla iş birliği hâlinde koordine edilmesi sağlanmalıdır. Tasarımdan üretime geçilen süreçte, bina temellerinin kazılmasında, yapı bileşenlerinin taşınmasında, cephe sistemlerinin temizlenmesinde ve duvarların inşasında kullanılan robotların iş gücü ve potansiyelleri düşünüldüğünde, kompakt ve bütüncül iş paketlerinin hazırlanması bir gerekliliktir. Bu noktada, zaman, malzeme, nakliye ve maliyet parametrelerine yönelik optimum çözümler geliştirilmelidir. İş planlamalarında robotların aktif rol alması sağlanarak kazançlar elde edilmelidir.

Gelecekte prefabrik üretimin artarak sahada yapılan bazı imalatların fabrikalara aktarılması ile robotik üretimin de artması olasıdır. Ayrıca bugünün yetişmiş iş gücü, robotik ve otonom teknolojileri ile yetişkinlik dönemlerinde tanışmıştır ve uyum sağlamakta zorlanmaktadır. Bu zorlanmaların önüne geçmek için lisans düzeyinde eğitimler, atölyeler ve seminerler gerçekleştirilerek insan-robot etkileşimi güçlendirilmeli ve bilinçlendirme sağlanmalıdır. Günümüz bireyleri ise bu teknolojiler ile birlikte büyümektedir. Geleceğin iş gücü olacak genç nesil ile uyum problemleri azalarak yeni teknolojilere yönelim artacaktır.



### Yazarın Katkı Oranı

Sıra	Adı soyadı	ORCID	Yazıya katkısı*
1	Emine Fulya ÖZMEN	0000-0002-8003-5785	1, 2, 3, 4, 5
2	Çağatay TAKVA	0000-0002-0494-9972	1, 2, 3, 4, 5
3	Sariye ASLAN	0009-0008-1347-077X	1, 2, 3, 4, 5
4	Zeynep Yeşim İLERİSOY	0000-0003-1903-9119	1, 2, 3, 4, 5

\*Katkı bölümüne ilgili açıklamanın karşılığına gelen rakamlar yazılmıştır.

1. Çalışmanın tasarlanması
2. Verilerin toplanması
3. Verilerin analizi ve yorumu
4. Yazının yazılması
5. Kritik revizyon

### Çatışma Beyanı

Çalışma kapsamında herhangi bir kişisel ve/veya finansal çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Kaynaklar

Ackerman, E. (2015). KUKA endüstriyel robotunun yer aldığı bir sergi. *IEEE Spectrum*. 14 Kasım 2024 tarihinde <https://spectrum.ieee.org/chinese-unmanned-factory-replaces-humans-with-robots> adresinden alındı.

Akinfiev, T., Armada, M., & Nabulsi, S. (2009). Climbing cleaning robot for vertical surfaces. *Industrial Robot: An International Journal*, 36(4), 352–357.

Anyango, A. (2022). Sahada tek kotlu robotik kol. *Construction Review Online*. 14 Kasım 2024 tarihinde <https://constructionreviewonline.com/management/construction-industry-goes-robotic/> adresinden alındı.

Armada, M. A., de González Santos, P., Elkmann, N., Kunst, D., Krueger, T., Lucke, M., ... & Stürze, T. (2005). SIRIUSc—Façade cleaning robot for a high-rise building in Munich, Germany. In *Climbing and walking robots: Proceedings of the 7th International Conference CLAWAR 2004* (pp. 1033–1040). Springer Berlin Heidelberg.

Bock, T. (2015). The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics. *Automation in Construction*, 59, 113-121.

Bogue, R. (2018). What are the prospects for robots in the construction industry? *Industrial Robot: An International Journal*, 45(1), 1-6.

Bulut, E., ve Akçacı, T. (2017). Endüstri 4.0 ve inovasyon göstergeleri kapsamında Türkiye analizi. *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi*, 4(7), 55-77.

Cao, L. (2021). Şantiye alanında insansız kara aracı. *ArchDaily*. 14 Kasım 2024 tarihinde <https://www.archdaily.com/954784/how-does-spot-r-work-the-robot-that-compares-design-to-reality-at-the-construction-site> adresinden alındı.

Cuevas-Rasgado, A. D., González-Morán, C. O., López Chau, A., & Bröckl, U. (2022). Interoperability of sensors in buildings for monitoring the search for live victims after earthquakes. *Computación y Sistemas*, 26(1), 21-32.

Czarnowski, J., Dąbrowski, A., Maciaś, M., Główka, J., & Wrona, J. (2018). Technology gaps in human-machine interfaces for autonomous construction robots. *Automation in Construction*, 94, 179-190.

Çırak, B., ve Yörük, A. (2015). Mekatronik biliminin öncüsü İsmail El-Cezeri. *Siirt Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (4), 175-194.

Çirkin, E., ve Özdağoğlu, A. (2021). Endüstri 4.0 bünyesindeki otonom robotların sürdürülebilirlik perspektifleri açısından değerlendirilmesi. *Erciyes Akademi*, 35(4), 1534-1553.

De Donato, M. C., Corradini, F., Fornari, F., & Re, B. (2024). SAFE: An ICT platform for supporting monitoring, localization and rescue operations in case of earthquake. *Internet of Things*, 27, 101273.

Delgado, J. M. D., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M., & Owolabi, H. (2019). Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption. *Journal of Building Engineering*, 26, 100868.

Dörfler, K., Sandy, T., Giftthaler, M., Gramazio, F., Kohler, M., & Buchli, J. (2016). Mobile robotic brickwork: Automation of a discrete robotic fabrication process using an autonomous mobile robot. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*, 204-217.

Dritsas, S., & Soh, G. S. (2019). Building robotics design for construction: Design considerations and principles for mobile systems. *Construction Robotics*, 3, 1-10.

Elkmann, N., Lucke, M., Krüger, T., Kunst, D., Stürze, T., & Hortig, J. (2008). Kinematics, sensors and control of the fully automated façade-cleaning robot SIRIUSc for the Fraunhofer headquarters building, Munich. *Industrial Robot: An International Journal*, 35(3), 224-227.

Hilti. (2022). Giyilebilir robot teknolojisi. 14 Kasım 2024 tarihinde <https://www.hilti.co.uk/content/hilti/E1/GB/en/business/news/hilti-blog/construction-exoskeleton-takes-the-load-when-working-overhead.html#nav/close> adresinden alındı.

Hu, D., Gan, V. J., & Yin, C. (2023). Robot-assisted mobile scanning for automated 3D reconstruction and point cloud semantic segmentation of building interiors. *Automation in Construction*, 152, 104949.

Ilerisoy, Z. Y., & Takva, Y. (2017). Nanotechnological developments in structural design: Load-bearing materials. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7(5), 1900-1903.

Jud, D., Kerscher, S., Wermelinger, M., Jelavic, E., Egli, P., Leemann, P., ... & Hutter, M. (2021). Heap-the autonomous walking excavator. *Automation in Construction*, 129, 103783.

Jud, D., Leemann, P., Kerscher, S., & Hutter, M. (2019). Autonomous free-form trenching using a walking excavator. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(4), 3208-3215.

KR QUANTEC. (2022). Saha dışı katmanlı üretim robotu. 14 Kasım 2024 tarihinde <https://ifr.org/case-studies/kr-quantec-prints-3d-facades> adresinden alındı.

Kumar, V. P., Balasubramanian, M., & Raj, S. J. (2016). Robotics in construction industry. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(23), 1-12.

Lin, T. H., Huang, J. T., & Putranto, A. (2022). Integrated smart robot with earthquake early warning system for automated inspection and emergency response. *Natural Hazards*, 110(1), 765-786.

Melenbrink, N., Werfel, J., & Menges, A. (2020). On-site autonomous construction robots: Towards unsupervised building. *Automation in Construction*, 119, 103312.

Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121-139.

Oztemel, E., ve Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 127-182.

Özalp, F., Yılmaz, H. D., ve Yaşar, Ş. (2018). 3D yazıcı teknolojisine uygun sürdürülebilir ve yenilikçi betonların geliştirilmesi. *Hazır Beton*, 62-70.

Özdoğan, O. (2017). *Endüstri 4.0: Dördüncü sanayi devrimi ve endüstriyel dönüşümün anahtarları*. Pusula Yayıncılık.

Puzatova, A., Shakor, P., Laghi, V., & Dmitrieva, M. (2022). Large-scale 3D printing for construction application by means of robotic arm and gantry 3D printer: A review. *Buildings*, 12(11).

Ray, S. J., & Teizer, J. (2012). Real-time construction worker posture analysis for ergonomics training. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), 439-455.

Takva, Ç., & İlerisoy, Z. Y. (2023). Flying robot technology (drone) trends: A review in the building and construction industry. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 16(1), 47-68.

Takva, Ç., Top, S. M., Gökgöz, B. İ., Gebel, Ş., İlerisoy, Z. Y., İlcan, H., & Şahmaran, M. (2024). Applicability of 3D concrete printing technology in building construction with different architectural design decisions in housing. *Journal of Building Engineering*, 111257.

Tun, T. T., Elara, M. R., Kalimuthu, M., & Vengadesh, A. (2018). Glass facade cleaning robot with passive suction cups and self-locking trapezoidal lead screw drive. *Automation in Construction*, 96, 180-188.

Volvo. (2018). Geleceğin inşaat ekipmanları. 14 Kasım 2024 tarihinde <https://www.volvoce.com/china/en-cn/about-us/news/2018/volvo-construction-equipment-and-lego-technic-team-up/> adresinden alındı.

Walsh, N. P. (2019). Seul, Güney Kore’de inşa edilecek robot müzesi. 14 Kasım 2024 tarihinde <https://www.archdaily.com/911761/robots-will-construct-melike-altinisik-robot-museum-in-seoul> adresinden alındı.

Watson, D. P., & Scheidt, D. H. (2005). Autonomous systems. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 26(4), 368-376.

WeberHaus. (2023). Fabrikada kullanılan otonom robotlar. 14 Kasım 2024 tarihinde <https://www.weberhaus.fr/construction/qualite/> adresinden alındı.

Wu, C., Yuan, Y., Tang, Y., & Tian, B. (2021). Application of terrestrial laser scanning (TLS) in the architecture, engineering and construction (AEC) industry. *Sensors*, 22(1), 265.

Xu, X., & De Soto, B. G. (2020). On-site autonomous construction robots: A review of research areas, technologies, and suggestions for advancement. In *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction* (Vol. 37, pp. 385-392). IAARC Publications.

Yılmaz, F. (2018). Robotlar hayatımızda. *FSM İlmî Araştırmalar İnsan ve Toplum Bilimleri Dergisi*, (12), 109-120.

Yi, W., & Sutrisna, M. (2021). Drone scheduling for construction site surveillance. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(1), 3-13.

Zeiba, D. (2019). Şantiye alanında 3 boyutlu katmanlı üretim. Erişim tarihi: 14 Kasım 2024, <https://techplus.co/apis-cor-claims-to-have-created-the-largest-on-site-3d-printed-building/>

Zhang, H., Zhang, J., Wang, W., Liu, R., & Zong, G. (2007). A series of pneumatic glass-wall cleaning robots for high-rise buildings. *Industrial Robot: An International Journal*, 34(2), 150-160.