

İNŞAAT SEKTÖRÜNDE TEKNOLOJİK DÖNÜŞÜM: YAPAY ZEKÂ VE ROBOTİK İLE YENİLİKÇİ ÇÖZÜMLER

Tayfun VARNALI¹

Makale İlk Gönderim Tarihi / Recieved (First): 25.07.2024

Makale Kabul Tarihi / Accepted: 20.11.2024

Atıf/©: Varnalı, T., (2024). İnşaat Sektöründe Teknolojik Dönüşüm: Yapay Zeka ve Robotik ile Yenilikçi Çözümler. Journal of Management Theory and Practices Research, 5(2), 173-200

Özet

İNŞAAT sektörü, tarihsel süreçte birçok teknolojik yeniliğe öncülük etmiştir. Günümüzde yapay zekâ (YZ) ve robotik teknolojiler, bu dönüşümün en önemli etkenleri olarak öne çıkmaktadır. Bu makalenin amacı, yapay zekâ ve robotik teknolojilerin inşaat sektöründeki uygulama alanlarını kapsamlı bir şekilde incelemek ve bu teknolojilerin sektöre sağladığı yenilikçi çözümleri analiz etmektir. Literatür taraması yöntemiyle yapılan çalışma, YZ ve robotik teknolojilerin sektör üzerindeki verimlilik, maliyet, güvenlik ve sürdürülebilirlik etkilerini ortaya koymaktadır. YZ, proje planlama ve yönetim aşamalarında verimliliği artırırken, robotik sistemler fiziksel işlerin otomasyonunu ve hassasiyetin artırılmasını sağlamaktadır. Ancak, yüksek maliyetler ve entegrasyon zorlukları, küçük ve orta ölçekli firmalar için engel teşkil etmektedir. Etkili entegrasyon için önerilen politika çözümleri arasında yatırım teşvikleri, araştırma destekleri, standart geliştirme ve eğitim programları bulunmaktadır. Sonuç olarak, yapay zekâ ve robotik teknolojilerin inşaat sektöründe başarılı bir şekilde entegre edilmesi, verimliliği artırarak maliyetleri düşürecek ve projelerin kalitesini iyileştirecektir.

Anahtar Kelimeler: Yapay Zekâ, Robotik Teknolojiler, İnşaat Sektörü, Teknolojik Dönüşüm

TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY: INNOVATIVE SOLUTIONS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND ROBOTICS

Citation /©: Varnalı, T., (2024). İnşaat Sektöründe Teknolojik Dönüşüm: Yapay Zeka ve Robotik ile Yenilikçi Çözümler. Journal of Management Theory and Practices Research, 5(2), 173-200

Abstract

The construction industry has pioneered many technological innovations in the historical process. Today, artificial intelligence (AI) and robotic technologies stand out as the most important factors of this transformation. The aim of this article is to comprehensively examine the application areas of artificial intelligence and robotic technologies in the construction sector and to analyse the innovative solutions provided by these technologies to the sector. The study, which is based on a literature review, reveals the productivity, cost, safety and sustainability effects of AI and robotic technologies on the sector. While AI increases efficiency in project planning and management stages, robotic systems enable automation of physical works and increase precision. However, high costs and integration challenges are barriers for small and medium-sized firms. Policy solutions proposed for effective integration include investment incentives, research support, standards development and training programmes. In conclusion, the successful integration of AI and robotics in the construction sector will increase productivity, reduce costs and improve the quality of projects.

Keywords: Artificial Intelligence, Robotic Technologies, Construction Industry, Technological Transformation

¹ Uzman, Namık Kemal Üniversitesi, tayfun_kkk@hotmail.com, 0000-0003-3895-8620

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü, tarihsel süreç boyunca pek çok teknolojik değişimin ve yeniliğin merkezinde konumlanmıştır. Son yıllarda yapay zeka (YZ) ve robotik teknolojiler, bu dönüşüm sürecinin belirleyici unsurları olarak dikkat çekmektedir. Bu iki teknoloji, inşaat sektöründeki geleneksel yöntemleri köklü bir şekilde yeniden şekillendirerek projelerin gerçekleştirilme biçimini önemli ölçüde değiştirmektedir. Yapay zeka, büyük veri analizi, makine öğrenimi ve otomatik karar verme süreçleri aracılığıyla inşaat projelerinin planlama, yönetim ve bakım aşamalarında belirgin avantajlar sunmakta; robotik teknolojiler ise fiziksel işlerin otomasyonunu ve hassasiyetin artırılmasını sağlamaktadır (Liner vd., 2020; Bogue, 2018: 1-6).

Bu çalışmanın temel amacı, yapay zeka ve robotik teknolojilerin inşaat sektöründeki uygulama alanlarını kapsamlı bir şekilde ele alarak, bu teknolojilerin sektörde sağladığı yenilikçi çözümleri ve dönüşüm süreçlerini analiz etmektir. İnşaat sektöründeki bu teknolojik değişimlerin etkilerini belirlemek ve bu etkilerin verimlilik, maliyet, güvenlik ve sürdürülebilirlik üzerindeki rolünü değerlendirmek, çalışmanın ana hedefleri arasında yer almaktadır. Yapay zeka uygulamaları, proje planlamasından saha yönetimine kadar geniş bir yelpazede verimliliği artırırken, robotik sistemler inşaat işlerinin otomasyonunu sağlayarak insan hatalarını minimize etmekte ve iş güvenliğini artırmaktadır (Brosque & Fischer, 2022: 163-186; Liner vd., 2020).

Literatürdeki mevcut araştırmalar, yapay zeka ve robot teknolojilerinin inşaat sektöründeki potansiyelini ve etkilerini derinlemesine incelemektedir. Brosque ve Fischer (2022) tarafından gerçekleştirilen bir çalışma, inşaat robotlarının güvenlik, kalite, zamanlama ve maliyet üzerindeki etkilerini ele almış; robotların tekrarlayan işlerde %25 ila %90 oranında verimlilik sağladığını ve tehlikeli işlerdeki süreyi %72 oranında azalttığını göstermiştir (Brosque & Fischer, 2022: 163-186). Ayrıca, Linner ve ekibinin (2020) geliştirdiği teknoloji yönetim sistemi, tek görevli inşaat robotlarının entegrasyonunu destekleyerek paydaşların ihtiyaçlarını karşılamayı amaçlamaktadır (Liner vd., 2020). Bogue (2018), beton yapıların robotik 3D baskısı ve insansız hava araçlarının kullanımı gibi yenilikleri vurgularken, Salmi ve arkadaşları (2018) insan-robot işbirliği ile sensör tabanlı uygulamaların güvenlik ve verimlilik açısından sağladığı avantajlara odaklanmaktadır (Salmi vd., 2018). Bununla birlikte, mevcut literatürde yapay zeka ve robot teknolojilerinin inşaat sektöründeki dönüşüm süreçleri ve uzun vadeli etkileri konusunda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu çalışma, bu açığı kapatmayı ve teknolojik dönüşümün sektörel dinamikler üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemeyi hedeflemektedir. Literatür taraması yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bu araştırma, yapay zeka ve robotik teknolojilerin inşaat sektöründeki mevcut uygulamalarını ve bu teknolojilerin sağladığı yenilikçi çözümleri anlamak amacıyla yapılmıştır. Elde edilen veriler, akademik araştırmalar, sektörel raporlar ve güncel vakalar üzerinden analiz edilmiştir. Sonuç olarak, çalışma, teknolojik dönüşümün sektörel dinamikler üzerindeki etkilerini detaylandırarak akademik camiaya ve sektör profesyonellerine bilgi sunmayı amaçlamakta ve bu teknolojilerin gelecekteki gelişim potansiyeli ile sektörde yaratabileceği yenilikleri değerlendiren bir perspektif sunmaktadır.

2. YAPAY ZEKÂ VE ROBOTİK TEKNOLOJİLERİN İNŞAAT SEKTÖRÜNDEKİ EVRİMİ İLE GÜNÜMÜZDEKİ YERİ

1980'ler ve 1990'larda bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli üretim (CAM) teknolojilerinin yaygınlaşması, inşaat projelerinin planlanması ve yönetimini daha etkin hale getirmiştir (Keleş ve Keleş, 2018:613-616). CAD yazılımları, mühendisler ve mimarların karmaşık yapıların dijital ortamda hassas bir şekilde tasarlanmasına olanak tanırken, kolay revizyon ve 3D modelleme

yetenekleri projelerin anlaşılabilirliğini artırmıştır (Hamamcıoğlu, 2013:49). CAM teknolojisi ise, üretim süreçlerinde otomasyonu artırarak prefabrik yapıların daha hızlı ve verimli bir şekilde üretilmesini sağlamış, bu da maliyetlerin düşmesine ve kalite standartlarının korunmasına katkıda bulunmuştur (Sabur ve Arslan, 2018: 78-83). Bu dönemde robotik kollar ve otomasyon sistemleri de kullanılmaya başlanmıştır (Görçün, 2018:355); ancak bu teknolojiler hala büyük ölçüde insan müdahalesine ihtiyaç duymaktadır. Robotik kollar, prefabrik yapı elemanlarının montajında ve yerleştirilmesinde kullanılırken, otomasyon sistemleri üretim hatlarında belirli süreçleri otomatikleştirmiştir. Bununla birlikte, bu sistemler genellikle önceden programlanmış görevleri yerine getirdiği için esneklikleri sınırlıydı ve insan müdahalesi gerektiren durumlar sıklıkla ortaya çıkıyordu. Bu gelişmeler, günümüzde kullanılan yapay zekâ ve ileri robotik teknolojilerin temelini oluşturmuş ve inşaat sektörünün dijital dönüşümünde önemli bir adım olmuştur (Akbay vd., 2023:298-319).

21. yüzyılın başlarından itibaren yapay zekâ (YZ) ve ileri robotik teknolojiler, inşaat sektöründe devrim niteliğinde değişikliklere yol açmıştır. Bu değişim, sadece teknolojinin sektöre entegrasyonunu değil, aynı zamanda inşaat süreçlerinin tamamen yeniden şekillendirilmesini de kapsamaktadır (Gürsel ve Abbas, 2020:1-5).

Makine öğrenmesi, derin öğrenme ve büyük veri analizi gibi yapay zekâ tekniklerinin kullanımı, inşaat süreçlerinin her aşamasında önemli avantajlar sağlamıştır. Makine öğrenmesi, verilerden öğrenme yeteneği sayesinde, geçmiş proje verilerini analiz ederek gelecekteki projelerin tahmin edilmesine ve potansiyel risklerin önceden belirlenmesine olanak tanımaktadır (Erdal, 2015:109; Ren vd., 2012: 1732- 1737; Nadour vd., 2019: 45-51). Derin öğrenme algoritmaları ise, karmaşık veri setlerini işleyerek daha derin içgörüler sağlayabilir ve bu sayede tasarım ve planlama süreçlerinde daha etkili kararlar alınabilir (Bingöl, Er Akan, Ömercioğlu ve Er, 2020:2199).

Büyük veri analizi, inşaat projelerinde toplanan büyük miktardaki veriyi anlamlandırmak için kullanılmaktadır (Aladağ, 2022:976). İnşaat sahalarında sensörler ve dronlar aracılığıyla sürekli veri toplama, projelerin gerçek zamanlı izlenmesini mümkün kılmakta ve bu veriler, yapay zekâ algoritmaları tarafından işlenerek anlamlı içgörüler elde edilmektedir (Li ve Liu, 2019:401-402). Örneğin, dronlar, inşaat sahalarının hava görüntülerini sağlayarak, saha ilerlemesini izlemek ve anomali tespitleri yapmak için kullanılmaktadır. Sensörler ise, yapı elemanlarının performansını ve çevresel koşulları sürekli olarak izleyerek, bakım ve onarım gereksinimlerini önceden belirlemeye yardımcı olmaktadır (Aladağ, 2022:976- 978; Saidi, 2016:1493-1520; Elghaish vd., 2021:345-363). Bu veriler, yapay zekâ tarafından analiz edildiğinde, proje yöneticilerine daha doğru ve etkili kararlar alabilme imkanı sunmaktadır (Park vd., 2018:54-68). Örneğin, yapay zekâ destekli analizler, inşaat süreçlerinde potansiyel sorunları erken aşamada tespit edebilir ve bu sayede zaman ve maliyet tasarrufu sağlayabilir. Ayrıca, risklerin proaktif bir şekilde yönetilmesi ve kaynakların daha verimli kullanılması mümkün hale gelir (Aladağ, 2022:976; Shayesteh ve Jebelli, 2021:239).

Yapay zekâ ve robotik teknolojilerin bu denli entegre edilmesi, inşaat sektöründe verimlilik ve doğruluğu artırırken, aynı zamanda iş gücü üzerindeki yükü azaltmaktadır (Ming vd, 2023:104812). Ancak, bu teknolojilerin etkin bir şekilde kullanımı, veri güvenliği ve etik sorunlar gibi yeni zorlukları da beraberinde getirmektedir. Yine de, yapay zekâ ve robotik teknolojilerin sunduğu olanaklar, inşaat sektörünün gelecekteki dönüşümünde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Yapay zekâ (YZ) ve robotik teknolojiler, günümüzde inşaat sektöründe önemli bir rol oynamaktadır. Planlama ve tasarım aşamalarında, YZ destekli yazılımlar karmaşık projelerin tasarımını optimize ederek maliyet ve zaman tasarrufu sağlamaktadır (Bogeu, 2018:1-6). Parametrik ve generatif tasarım

yazılımları, mimarların ve mühendislerin birçok tasarım alternatifi oluşturmasını ve en uygun çözümleri belirlemesini mümkün kılmaktadır. İnşaat sürecinde ise robotik sistemler, çeşitli görevleri otomatikleştirerek iş gücü ihtiyacını azaltmakta ve verimliliği artırmaktadır (Gültekin ve Doğan: 117-138). Otonom inşaat makineleri, kazı ve dolgu işlemlerini daha hızlı ve hassas bir şekilde gerçekleştirirken, 3D baskı teknolojileri yapı elemanlarının yerinde üretimini sağlayarak malzeme israfını azaltmakta ve inşaat hızını artırmaktadır (Uygunoğlu, Özgüven ve Topçu, 2019: 279- 288). Güvenlik açısından, YZ destekli güvenlik sistemleri, inşaat sahalarındaki riskleri tespit ederek kazaların önlenmesine yardımcı olmaktadır. Dronlar ve robotik sensörler, yüksek riskli alanları düzenli olarak izleyerek potansiyel tehlikeleri erken tespit etmektedir (Atahan, 2024). Ayrıca, yapıların bakım ve onarımı da YZ ve robotik teknolojiler sayesinde daha etkin bir şekilde gerçekleştirilmektedir. YZ destekli analizler, yapıların ömrünü uzatmak için gerekli bakım ve onarım süreçlerini önceden belirleyebilmektedir. Genel olarak, yapay zekâ ve robotik teknolojiler inşaat sektöründe büyük bir dönüşüm yaratmış ve bu dönüşüm devam etmektedir. Bu teknolojiler, maliyetlerin azaltılması, verimliliğin artırılması ve güvenliğin sağlanması gibi pek çok alanda önemli katkılar sağlamaktadır. Gelecekte, bu teknolojilerin daha da gelişmesiyle daha yenilikçi ve sürdürülebilir çözümlerin ortaya çıkması beklenmektedir. Bu dönüşüm, sadece inşaat süreçlerini değil, aynı zamanda şehirlerin ve yaşam alanlarının tasarımı ve inşasını da köklü bir şekilde değiştirecektir (Doğaner, 2021:55-76; Gültekin ve Doğan: 117-138; Balzan vd., 2020:95-104).

3.İNŞAAT SEKTÖRÜNDE YAPAY ZEKÂ, ROBOTİK VE ROBOTİK TEKNOLOJİLERİN ROLÜ: VERİMLİLİK, GÜVENLİK VE İNOVASYON

Yapay zeka (YZ) ve robotik teknolojiler, inşaat sektöründe verimlilik, güvenlik ve inovasyon alanlarında devrim niteliğinde değişiklikler sağlamaktadır. Bu teknolojilerin projelerin her aşamasına olan etkisi belirgin bir şekilde hissedilmektedir.

3.1. Verimlilik Artışı

Verimlilik açısından, YZ ve robotik teknolojiler inşaat projelerinde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Makine öğrenme algoritmaları, proje planlama ve yönetiminde daha doğru tahminler yaparak iş gücü ve malzeme kullanımını optimize etmektedir. Bu algoritmalar, proje sürecindeki potansiyel sorunları ve darboğazları erken aşamada tespit ederek iyileştirme önerileri sunar. Sonuç olarak, maliyetler azalırken proje süreleri kısalmaktadır (Atahan, 2024). Örneğin, YZ destekli sistemler projelerin zaman çizelgelerini ve bütçelerini dinamik olarak ayarlayarak kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır (Calp ve Akçayol, 2020). Ayrıca, insansız hava araçları (İHA) ve otonom makineler, iş sahalarının izlenmesi ve haritalanması süreçlerini hızlandırarak zaman tasarrufu sağlar (Yüksel, 2022). Bu teknolojiler, iş gücü ihtiyacını azaltırken iş süreçlerini hızlandırma potansiyeline sahiptir.

3.2. Güvenlik İyileştirmeleri

Güvenlik açısından, YZ ve robotik teknolojiler sektördeki riskleri büyük ölçüde azaltmaktadır. İnşaat sektörü, yüksek riskli ve tehlikeli işlerin yapıldığı bir alan olduğundan güvenlik öncelikli bir konu olarak öne çıkmaktadır. Robotik sistemler, yüksek riskli görevleri üstlenerek işçilerin maruz kaldığı riskleri azaltmaktadır. Örneğin, otonom robotlar yüksekten düşme, ağır malzeme taşıma veya tehlikeli kimyasallarla çalışma gibi riskli görevleri üstlenebilir. YZ tabanlı güvenlik sistemleri, iş sahalarında olası tehlikeleri önceden tespit ederek kazaların önüne geçmektedir. Kameralar ve sensörler aracılığıyla toplanan veriler, YZ algoritmaları tarafından analiz edilerek potansiyel tehlikeler belirlenir ve işçilere anında uyarılar gönderilir (Eryaman ve Akün, 2023; Can, 2021).

3.3. İnovasyon ve Teknolojik Gelişmeler

İnovasyon açısından, YZ ve robotik teknolojiler yeni malzemelerin geliştirilmesi ve yapı tasarımı süreçlerinde yaratıcı çözümler sunmaktadır. 3D baskı teknolojisi, karmaşık yapıların hızlı ve ekonomik bir şekilde inşa edilmesini mümkün kılmaktadır. Bu teknoloji, yapı elemanlarını yerinde ve hızlı bir şekilde üreterek malzeme israfını azaltır ve inşaat sürecini hızlandırır (Price, 2020). Ayrıca, YZ tabanlı analizler, yapıların enerji verimliliğini artırmak için optimize edilmiş tasarımlar sunar. Bu tasarımlar, yapıların enerji tüketimini azaltarak sürdürülebilir çözümler sağlamaktadırlar.

3.4. Gelecekteki Potansiyel

Gelecekte, YZ ve robotik teknolojilerin entegre edilmesiyle daha akıllı ve sürdürülebilir projeler gerçekleştirilecektir. YZ destekli dijital ikizler, inşaat projelerinin sanal modellerini oluşturarak gerçek zamanlı veri analizi ve performans takibi yapılmasına olanak tanır. Bu sayede projelerin her aşamasında daha doğru kararlar alınabilir ve olası sorunlar önceden tespit edilerek çözülebilir. Ayrıca, robotik otomasyonun yaygınlaşmasıyla inşaat süreçlerinin daha hızlı ve daha az hatalı bir şekilde tamamlanması beklenmektedir. Bu teknolojiler, inşaat projelerinin daha etkin bir şekilde yönetilmesini sağlayarak sektördeki dönüşümü hızlandıracaktır. Gelecekte, bu teknolojilerin daha da gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla inşaat sektörü sürdürülebilir ve akıllı yapılarla donatılmış bir geleceğe doğru ilerleyecektir (Can, 2021).

3.5. Uygulama Alanları ve Örnekler

YZ ve robotik teknolojilerin inşaat sektöründeki rolü, çeşitli uygulama alanlarında kendini göstermektedir. Bu teknolojilerin sektördeki etkileri, uygulama alanlarına göre farklılık gösterir ve her biri, inşaat süreçlerini daha verimli, güvenli ve inovatif hale getirmede önemli katkılar sağlar. Aşağıda, bu teknolojilerin inşaat sektöründeki çeşitli uygulama alanları detaylandırılmaktadır:

Planlama ve Tasarım: YZ destekli yazılımlar, projelerin tasarım süreçlerinde devrim yaratmaktadır. Parametrik ve generatif tasarım yazılımları, mimarların ve mühendislerin çeşitli tasarım alternatifleri oluşturmaya ve en uygun çözümleri belirlemesine olanak tanımaktadır (Eltaweel ve Su, 2017). Örneğin, Autodesk'in Revit ve Rhino gibi yazılımları, YZ destekli analizler yaparak yapıların tasarımını optimize eder (Kaya, 2016). Bu yazılımlar, tasarım sürecinde zamandan tasarruf sağlar ve maliyetleri düşürür.

İnşaat Süreci: İnşaat sahalarında robotik teknolojilerin kullanımı, verimlilik ve hız açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Örneğin, otonom kazı makineleri, arazinin hazırlık aşamasında yüksek hassasiyet ve hızla çalışabilir. Ayrıca, 3D baskı teknolojisi, binaların ve yapı elemanlarının hızlı bir şekilde üretilebilmesini sağlar. Bu teknoloji, özellikle karmaşık ve özelleştirilmiş yapıların maliyetini ve süresini önemli ölçüde azaltır (Can, 2021).

Güvenlik: YZ ve robotik teknolojiler, inşaat sahalarında güvenliği artırmak için önemli araçlar sunar. Örneğin, Boston Dynamics'in Spot robotu, yüksek riskli bölgelerde çalışarak işçilerin bu bölgelerden uzak durmasını sağlar (Zimmermann, Poranne ve Coros, 2021). YZ destekli video gözetim sistemleri, anormal davranışları ve potansiyel tehlikeleri gerçek zamanlı olarak analiz ederek güvenlik risklerini azaltmaktadır.

Bakım ve Onarım: YZ ve robotik teknolojiler, yapıların bakım ve onarım süreçlerinde de önemli rol oynamaktadır. YZ destekli analizler, yapıların durumunu izleyerek bakım ihtiyaçlarını önceden belirler. Örneğin, BridgeBot adlı robot, köprülerin yüzeylerini tarayarak çatlakları ve diğer hasarları tespit edebilir. Bu tür robotik sistemler, yapının ömrünü uzatmak ve bakım maliyetlerini azaltmak

için etkili çözümler sunar.

Sonuç olarak, YZ ve robotik teknolojilerin inşaat sektöründeki rolü, sektörü daha verimli, güvenli ve yenilikçi hale getirmektedir. Bu teknolojilerin entegrasyonu, projelerin her aşamasında büyük iyileştirmeler sağlamaktadır. Verimlilik artışı, güvenlik iyileştirmeleri ve inovasyon, inşaat projelerinin kalitesini ve etkinliğini artırırken, maliyetleri düşürmekte ve süresini kısaltmaktadır. Gelecekte, YZ ve robotik teknolojilerin daha da gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla, inşaat sektörü daha akıllı ve sürdürülebilir projelere ev sahipliği yapacaktır. Dijital ikizler, YZ tabanlı analizler ve robotik otomasyonun birleşimi, sektördeki dönüşümün hızlanmasını sağlayacaktır. Bu dönüşüm, sadece inşaat süreçlerini değil, aynı zamanda şehirlerin ve yaşam alanlarının nasıl tasarlandığını ve inşa edildiğini de köklü bir şekilde değiştirecektir. Teknolojinin ilerlemesiyle, inşaat sektörü daha çevre dostu, verimli ve akıllı yapılarla donatılmış bir geleceğe doğru ilerleyecektir.

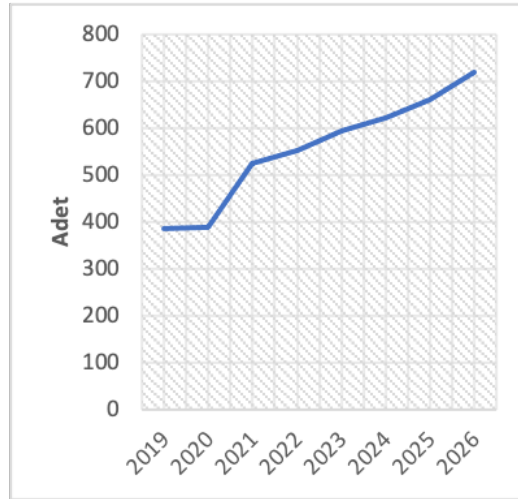
4. KÜRESEL ROBOTİK VE İNŞAAT SEKTÖRÜNDE TEKNOLOJİK DÖNÜŞÜM: BÜYÜME VE DİNAMİKLERİ VE ROBOTLAR

4.1. Küresel Robotik ve İnşaat Pazarındaki Büyüme Dinamikleri

Son yıllarda, teknolojik yeniliklerin ve endüstriyel otomasyonun etkisiyle robotik ve inşaat sektörlerinde belirgin bir büyüme gözlemlenmektedir. Bu büyüme, hem robot sayısının artışı hem de ağır inşaat ekipmanı pazarındaki genişleme ile kendini göstermektedir. Dünya genelinde bu iki pazarın dinamiklerini anlamak, gelecekteki trendleri ve yatırım fırsatlarını belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır.

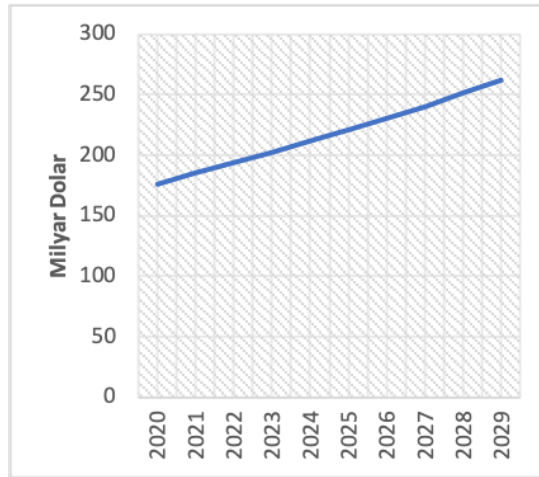
Dünya genelinde robot sayısının 2019'dan 2024'e kadar sürekli bir artış gösterdiği verilerle ortaya konmaktadır. 2019 yılında 387 olan robot sayısı, 2020'de çok az bir artışla 390'a yükselmiştir. 2021 yılında bu artış ivme kazanarak robot sayısı 526'ya ulaşmış ve bu dönemde %34,87'lik önemli bir artış kaydedilmiştir. 2022 yılında artış hızı bir miktar yavaşlamış olsa da, robot sayısı 553'e ulaşarak %5,13'lük bir büyüme göstermiştir. 2023 yılında robot sayısı 593'e yükselmiş ve %7,23'lük bir artış oranı gözlemlenmiştir. 2024 yılına gelindiğinde ise bu artış devam ederek robot sayısı 622'ye ulaşmış ve %4,88 oranında büyüme kaydedilmiştir. Bu veriler, dünya genelinde robot kullanımının giderek arttığını ve teknolojik gelişmelerin, endüstriyel otomasyonun yaygınlaşmasının ve robotik çözümlerin çeşitli sektörlerde kullanımının artmasının bu büyümeyi desteklediğini göstermektedir. Ayrıca, küresel pazarda robotik teknolojilere olan yatırımın artması ve bu alandaki yeniliklerin hızlanması da bu büyüme trendini açıklayan önemli faktörler arasında yer almaktadır (Şekil 1).

Şekil 2'ye göre, 2020-2029 yılları arasında dünya genelinde ağır inşaat ekipmanı pazarının sürekli bir büyüme eğiliminde olduğu gözlemlenmektedir. 2020 yılında 176,2 milyar ABD doları olan pazar büyüklüğü, 2021 yılında 185,63 milyar ABD dolarına ulaşmıştır. 2022 yılında bu büyüme devam ederek 193,8 milyar ABD doları seviyesine çıkmıştır. 2023 yılında pazar büyüklüğü 202,33 milyar ABD doları olarak kaydedilmiştir (Statista,2022). 2024 yılında ise bu rakam 211,23 milyar ABD dolarına yükselmiştir. Gelecek yıllara ilişkin tahminlere göre, 2025 yılında pazar büyüklüğünün 220,53 milyar ABD doları, 2026 yılında ise 230,23 milyar ABD doları olması beklenmektedir. 2027 yılına gelindiğinde pazar büyüklüğünün 240,36 milyar ABD doları, 2028 yılında 250,93 milyar ABD doları ve 2029 yılında ise 261,97 milyar ABD doları seviyelerine ulaşması öngörülmektedir (Statista,2022). Bu veriler, ağır inşaat ekipmanı pazarının yıllık bazda istikrarlı bir şekilde büyüdüğünü ve bu dönemde önemli bir ekonomik genişleme yaşandığını göstermektedir. Bu büyüme trendi, inşaat sektöründe artan talep, teknolojik yenilikler ve küresel altyapı projelerindeki artış ile desteklenmektedir (Şekil2).



Şekil 1. Dünya Genelinde Bulunan Robot Sayısı (Adet)

Kaynak: IFRS,2023



Şekil 2. 2020-2030 Yılları Arasında Dünya Genelinde Ağır İnşaat Ekipmanı Pazar Büyüklüğü (Milyar ABD Doları)

Kaynak: Statista,2022

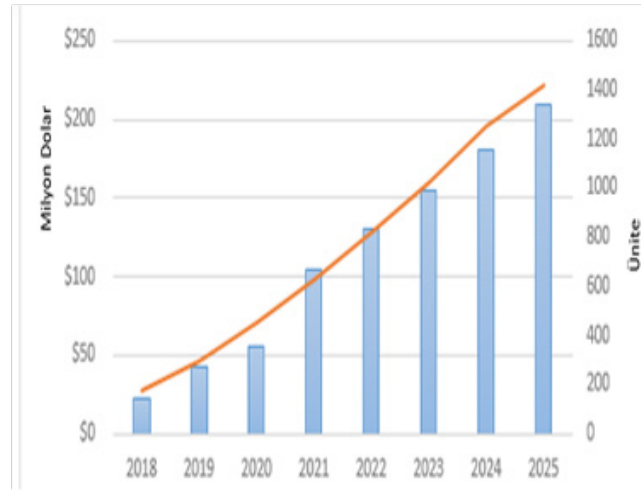
2018-2025 yılları arasında dünya genelinde inşaat robotlarının gelir ve sevkiyatlarının yıllık artış trendi gözlemlenmektedir. Şekil 3'e göre, 2018 yılında inşaat robotlarının gelirleri ve sevkiyatları nispeten düşük seviyelerde başlamış olup, bu yıl içerisinde yaklaşık 50 milyon ABD doları gelir elde edilmiştir. 2019 ve 2020 yıllarında bu gelirler sırasıyla yaklaşık 70 milyon ve 90 milyon ABD doları seviyelerine ulaşmıştır (Şekil3).

2021 yılı itibarıyla, inşaat robotları pazarında belirgin bir büyüme kaydedilmiş ve gelirler yaklaşık 110 milyon ABD dolarına yükselmiştir. 2022 yılında bu artış devam etmiş ve gelirler 140 milyon ABD doları seviyesine geçmiştir (Univdatos, 2023).. 2023 ve 2024 yıllarında pazar büyüklüğü daha da artarak sırasıyla 170 milyon ve 200 milyon ABD doları seviyelerine ulaşmıştır. Şekil 3 ayrıca sevkiyatların da yıllık bazda artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. 2018 yılında yaklaşık 200 ünite ile başlayan sevkiyatlar, 2024 yılına gelindiğinde 1400 ünite seviyesine ulaşmıştır (Univdatos, 2023).

Şekil 3 inşaat robotları pazarının hem gelir hem de sevkiyatlar açısından istikrarlı ve sürekli bir büyüme trendi içerisinde olduğunu göstermektedir. Bu büyüme, inşaat sektöründe artan otomasyon ihtiyacı, teknolojik gelişmeler, robotların verimliliği artırma potansiyeli ve iş gücü maliyetlerini düşürme avantajlarından kaynaklanmaktadır. Küresel inşaat robotu pazarı, geliştiriciler ve tedarikçiler için büyük bir fırsat sunmaktadır (Şekil3).

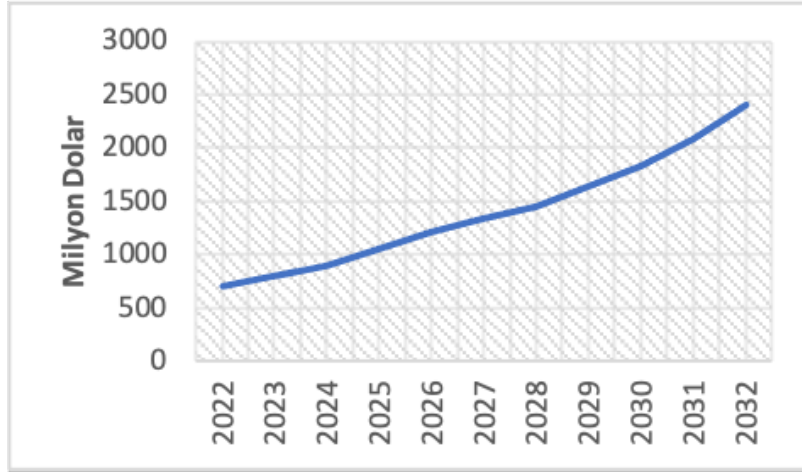
Tractica, 2018'deki 22,7 milyon dolardan 2025'te 226 milyon dolara çıkabileceğini öngörmektedir. Research and Markets, pazarın 2025'e kadar 126,4 milyon dolara ulaşacağını tahmin etmektedir. Uluslararası Robot Federasyonu ve Robot Endüstrisi Derneği'ne göre, inşaat robotu pazarı 2018'den 2022'ye kadar %8,7'lik bir bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) yaşamıştır. Araştırma şirketi IDC ise %20,2'lik bir CAGR öngörmektedir (Univdatos, 2023).

Şekil 4' te 2022-2032 yılları arasındaki dönemde inşaat robotları pazarının milyon dolar cinsinden değerleri verilmiştir. Şekil 4 inşaat robotları pazarının zaman içinde sürekli bir büyüme trendi sergilediğini ortaya koymaktadır. 2022 yılında 710 milyon dolar olan pazar değeri, 2023'te 804,4 milyon dolara yükselmiş ve bu artış, 2024 yılında 897,6 milyon dolara ulaşmıştır. Takip eden yıllarda, pazar değerinde belirgin bir artış gözlemlenmektedir; 2025 yılında 1048,3 milyon dolara, 2026 yılında ise 1206 milyon dolara çıkması beklenmektedir. Özellikle 2027 yılında 1345,6 milyon dolar olan değer, 2028 yılında 1455,8 milyon dolara ve 2029 yılında 1649,4 milyon dolara ulaşacaktır. 2030 yılında 1840,4 milyon dolara, 2031 yılında ise 2085,1 milyon dolara çıkarak, 2032 yılında 2398,7 milyon dolara yükselmesi beklenmektedir. Bu veriler, inşaat robotları pazarının önümüzdeki yıllarda güçlü bir büyüme potansiyeline sahip olduğunu ve sektörün genişlemeye devam edeceğini göstermektedir (Enterpriseappstoday, 2023) (Şekil 4).



Şekil 3. İnşaat Robotları Gelir ve Gönderim Verileri, Küresel Pazarlar: 2018-2025 (Adet)

Kaynak: Univdatos, 2023

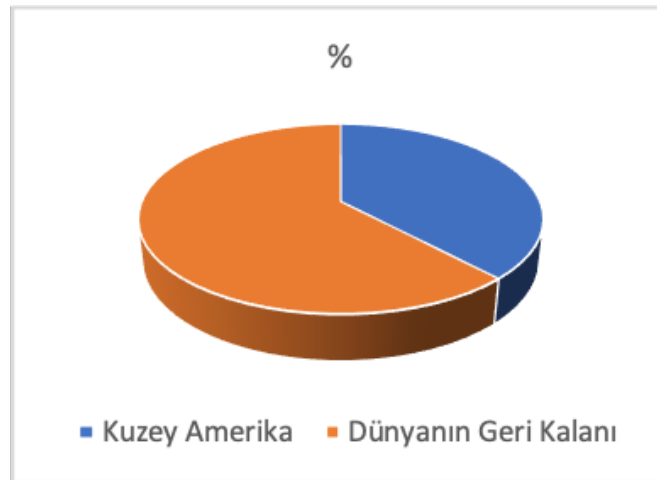


Şekil 4. İnşaat Robotları Pazarının 2022-2032 Milyon Dolar Cinsinden Değeri

Kaynak: Enterpriseappstoday, 2023

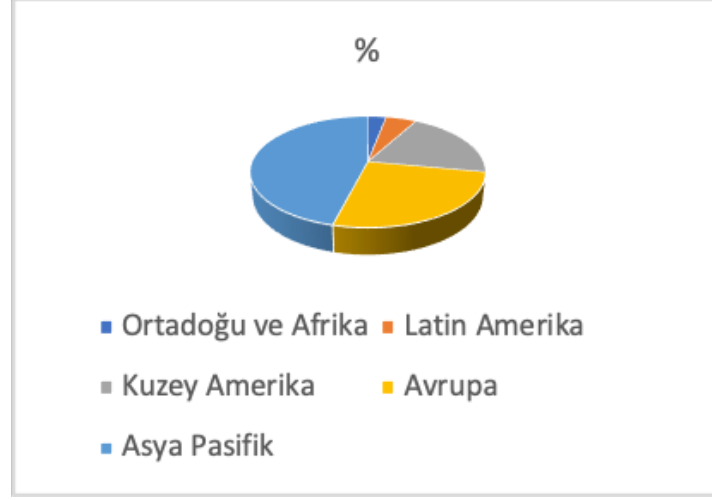
Şekil 5, 2021 yılı itibarıyla küresel inşaat pazarının bölgesel dağılımını yüzdeler halinde sunmaktadır. Verilere göre, Kuzey Amerika'nın inşaat pazarındaki payı %38 olarak belirlenmişken, dünyanın geri kalan bölgeleri toplamda %62'lik bir pazar payına sahiptir. Bu dağılım, Kuzey Amerika'nın inşaat sektöründeki önemli rolünü vurgulamakla birlikte, diğer bölgelerin de önemli bir pazar payına sahip olduğunu ve küresel inşaat pazarının daha geniş bir coğrafi yayılım gösterdiğini ortaya koymaktadır (Exactitudeconsultancy, 2023) (Şekil 5).

Şekil 6'da ise 2022 yılı itibarıyla kıtalar bazında robotik teknoloji pazarının yüzdeler halinde dağılımını sunulmaktadır. Verilere göre, Asya Pasifik bölgesi robotik teknoloji pazarının en büyük payına sahip olup, %46'lık bir oranla sektörde belirleyici bir rol oynamaktadır. Avrupa, pazarın %26'sını oluştururken, Kuzey Amerika %20'lik bir paya sahiptir. Latin Amerika'nın pazar payı %5 olarak belirlenmişken, Ortadoğu ve Afrika'nın payı ise %3'tür. Bu dağılım, Asya Pasifik bölgesinin robotik teknoloji pazarındaki baskın konumunu ve Avrupa ile Kuzey Amerika'nın da önemli katkı sağladığını göstermektedir. Diğer bölgeler ise pazarın daha küçük bir kısmını oluşturmaktadır (Precedenceresearch, 2023) (Şekil 6).



Şekil 5. 2021 Yılı İtibarıyla Amerika ve Dünya İnşaat Pazarının Yüzde Dağılımı

Kaynak: Exactitudeconsultancy, 2023



Şekil 6. 2022 Yılı İtibarıyla Kıtalar Bazında Robotik Teknoloji Pazarının Yüzde Dağılımı

Kaynak: Precedenceresearch, 2023

4.2. İnşaat Robotik Devrim: Yeni Nesil Robotlar ve Uygulama Alanları

Robotik teknolojilerinin pratik uygulamalarındaki yenilikler dikkat çekmektedir. Japon araştırmacılar tarafından geliştirilen uzaktan kumandalı çift kollu inşaat robotu, afet yardım operasyonlarında önemli bir yenilik sunmaktadır (Phys, 2017). Çift salımlı çift kollu mekanizma, robotun hareket kabiliyeti ve işlevselliğini geleneksel makinelerden çok daha ileriye taşımaktadır. Sağ ve sol kolların aynı ekseninde konumlandırılması, yüksek denge ve ağır iş yapabilme kapasitesi sağlar. Ayrıca, 360 derece dönebilme özelliğine sahip kollar, esneklik sunarak eller arasında ayırım yapmaksızın geniş bir hareket alanı sağlar. Robotun 4 parmaklı eli, kazı ve kavrama işlevlerini destekleyerek geniş bir kavrama gücü aralığı sunmaktadır (Phys, 2017).

Bu yenilikler, robot teknolojilerinin uygulama alanlarını genişletirken, sektördeki gelişmeleri de hızlandırmaktadır. Örneğin, Wienerberger'de Prefabrikasyon ve Robotik Uzmanı Meysam Taghavi'nin belirttiği gibi, robotun mevcut döşeme hızının beş duvarcıya eşdeğer olduğu vurgulanmaktadır (Wienerberger, 2021). Şubat 2021'de başlatılan proje, Wienerberger Czech Republic, KM Robotics ve Çek Teknik Üniversitesi'nden Çek Bilişim, Robotik ve Siberetik Enstitüsü (CIIRC) tarafından yürütülmektedir (Şekil 7). Bu projede, robotun apartman blokları, ticari binalar ve bölme duvarlarının inşasında daha dinamik, akıllı ve hızlı bir çözüm olarak optimize edilmesi hedeflenmektedir. Gelecekte, robotun daha hızlı, verimli ve güvenlik standartlarına uyumlu hale getirilmesi amaçlanmaktadır (Wienerberger,2021).

Hilti'nin geliştirdiği Jaibot, yarı otonom bir tavan delme robotu olarak dikkat çekmektedir. Bu robot, Bina Bilgi Modelleme (BIM) verilerine dayanarak iç mekanlarda hassas konumlandırma yapmaktadır(Hilti, 2020). Kablosuz ve kullanımı kolay olan Jaibot, toz kontrollü delikler açma ve işaretleme işlevlerini yerine getirmektedir (Hilti, 2020). Özellikle baş üstü delme gibi fiziksel olarak zorlayıcı görevlerde destek sağlar ve Hilti PLT 300'den elde edilen referans verilerle uzaktan kumanda edilerek yönlendirilir (Hilti, 2020) (Şekil 7).

Diğer bir önemli örnek olan Baubot MRS12, olağanüstü denge, erişim ve tork özellikleri sunan bir inşaat robotudur. Kompakt bir tasarıma sahip olan MRS12, 2100 mm uzunluk, 1800 mm yükseklik ve

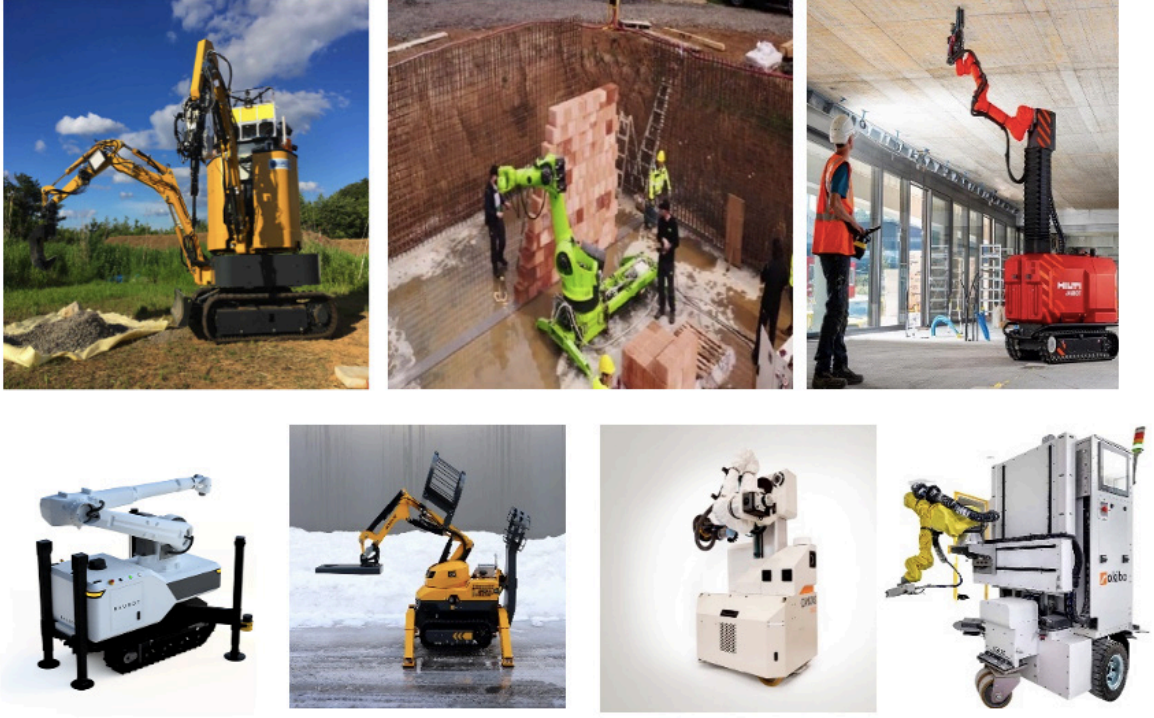
800 mm genişlik ölçülerindedir ve standart kapılardan rahatlıkla geçebilir. Çalışma pozisyonunda 1700 mm genişliğe kadar ayarlanabilen bu sistem, çeşitli inşaat ortamlarında optimum denge sağlar (Baubot, 2023). 1300 kg'dan düşük ağırlığı, levhalarda kullanımını mümkün kılarken, 4 metre yüksekliğe kadar etkili görevler yapabilen ve 20 kilogramlık nominal yük kapasitesine sahip manipülatörü, yüksek hassasiyet ve güvenilirlik sunar. Bu teknik özellikler, MRS12'yi çok yönlü ve etkili bir araç olarak konumlandırmaktadır (Baubot, 2023).

Benzer şekilde, Brokk Vakumlu Ekskavatör de önemli teknik özellikler sunmaktadır. 2100 mm uzunluk, 1800 mm yükseklik ve 800 mm genişlikteki bu cihaz, çalışma pozisyonunda 1700 mm genişliğe ayarlanabilir (Brokk,2024). 4 metreye kadar yükseklik erişimi ve 20 kilogram nominal yük kapasitesi sunan Brokk Vakumlu Ekskavatör, 24,8 beygir gücündeki motoru ile tek depo ile 8 saat kesintisiz çalışma sağlamaktadır (Brokk,2024). Ayrıca, uç efektörle 100 metreye kadar emme nozul taşıyabilir ve uzaktan kumanda ile 300 metreye kadar hassasiyetle kontrol edilebilir. Kompakt boyutu ve düşük ağırlık merkezi, standart kapılardan geçiş ve dar alanlarda kullanım için ideal kılmaktadır (Brokk,2024).

Tuval 1200CX ise 34,5" x 30" boyutlarıyla dar alanlarda etkili manevra kabiliyeti sunar ve 1550 sistemine göre %36 daha küçüktür. Tüm tekerleklerden direksiyon sistemi sayesinde kolay konumlandırma ve otomatik sürüş özellikleri sağlar. Patentli 2 günlük bitirme sistemi, alçıpan yüzeyleri Seviye 4 veya Seviye 5 kalitesinde bitirir. Tek bir şarjla 8 saat kablosuz çalışma süresi sunan Tuval 1200CX, 12 metreye kadar yüksekliklere ulaşarak dar alanlar ve yüksek yerler için uygun bir çözüm sunar. Bu üç robotik cihaz, inşaat ve temizlik süreçlerinde sağladıkları teknik avantajlarla dikkat çekmekte ve çeşitli uygulamalarda etkin çözümler sunmaktadır (Canvas, 2023).

Okibo boya , kaplama ve alçıpan bitirme robotu; akıllı ve bağımsız çalışma kapasitesi ile inşaat sektöründe önemli bir yenilik sunmaktadır. Sağlam bir robotik platform üzerine inşa edilen bu sistem, entegre pompa ve pilli çalışma özelliği ile yüksek operatif esneklik ve mobilite sağlar (Brosque vd., 2020: 1-14). Gerçek zamanlı 3D tarama ve modelleme teknolojileri, otonom yol planlaması ve BIM 5D analitikler gibi gelişmiş donanımlarla desteklenen robot, bitirme süreçlerinde yüksek verimlilik ve hassasiyet sunar (Okibo, 2023).

Bu ileri düzey teknoloji, robotun boya, kaplama ve alçıpan bitirme hizmetlerini, geleneksel yöntemlere göre üç kat daha hızlı ve %50 maliyet azaltımıyla gerçekleştirmesine olanak tanır. Özellikle yüksek işgücü mevcudiyeti, mükemmel kalite ve güvenli çalışma ortamı sağlama yeteneği, robotu inşaat projelerinde etkili bir araç olarak konumlandırmaktadır (Gossellin vd., 2016: 102-109). Dolayısıyla, boya, kaplama ve alçıpan bitirme robotu hem operasyonel verimliliği artıran hem de maliyetleri azaltan bir çözüm sunarak sektördeki standartları yeniden şekillendirmektedir (Okibo, 2023).



Şekil 7. İnşaat Sektöründe Örnek Robotik Teknolojiler

Kaynak: Wienerberger, 2021; Hilti, 2020; Baubot, 2023; Brokk, 2024; Canvas, 2023

5. YAPAY ZEKÂ VE ELEKTRİKLİ MAKİNELERLE İNŞAATA YENİ DÖNEM: TEKNOLOJİK: GELİŞMLER VE UYGULAMA ALANLARI

5.1. Elektrikli Makinelere Yapay Zekâ'ya: İnşaat Sektöründe Teknolojik Dönüşüm ve Gelecek Vizyonu

Küresel inşaat sektöründe, teknolojik yenilikler önemli bir dönüşüm sürecine işaret etmektedir. Bu dönüşümün merkezinde elektrikli makineler, yapay zekâ (YZ) ve otonom ekipmanlar yer almaktadır. Elektrikli makineler, fosil yakıtlarla çalışan ekipmanların yerine geçerek enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik alanında önemli ilerlemeler sağlamaktadır. Bu makineler, enerji tüketimini azaltırken, emisyonları minimize ederek çevre dostu inşaat uygulamalarının önünü açmaktadır.

Yapay zekâ, inşaat süreçlerinin her aşamasında akıllı çözümler sunarak, veri analizi ve gerçek zamanlı karar verme yetenekleri ile operasyonel verimliliği artırmaktadır. YZ destekli sistemler, proje planlamasından malzeme yönetimine kadar birçok alanda optimizasyon sağlamakta, hata risklerini azaltmakta ve projelerin daha hızlı ve ekonomik bir şekilde tamamlanmasına olanak tanımaktadır.

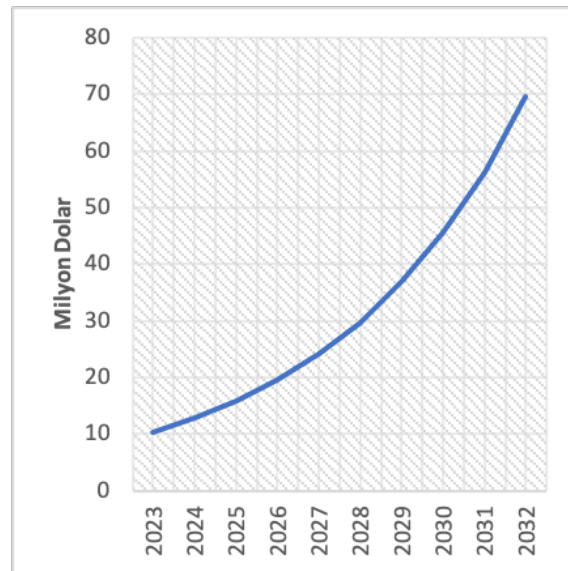
Otonom ekipmanlar ise iş sahalarında güvenlik ve verimliliği artırarak, insan müdahalesini minimumda tutmakta ve iş süreçlerini daha öngörülebilir hale getirmektedir. Bu ekipmanlar, otomatikleştirilmiş görevler ve uzaktan kontrol özellikleri ile iş gücünün verimliliğini artırmakta ve iş sahalarının daha güvenli hale gelmesini sağlamaktadır.

Bu bağlamda, bu makale elektrikli makineler, yapay zekâ ve otonom ekipmanların küresel inşaat teknolojileri üzerindeki etkilerini derinlemesine inceleyecek; her bir teknolojinin sağladığı yenilikler, avantajlar ve sektörel dönüşüm üzerindeki katkılarını analiz edecektir. Bu teknolojilerin sektördeki

uygulamaları ve potansiyel gelişmelerinin, inşaat endüstrisinin geleceği üzerindeki etkilerini anlamak, bu dönüşüm sürecinin daha iyi kavranabilmesi için kritik öneme sahiptir.

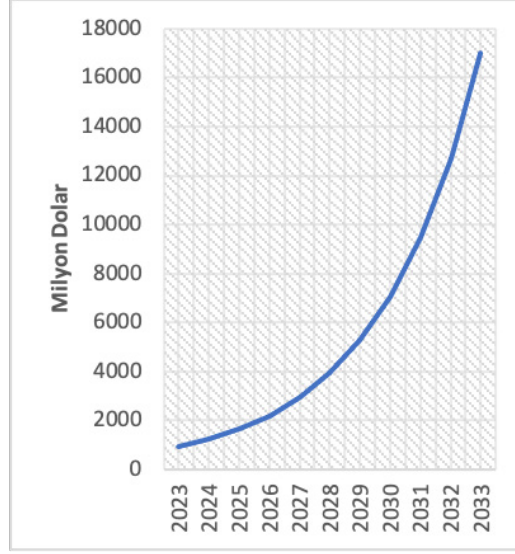
Şekil 8’de 2023-2032 yılları arasındaki dönemde küresel elektrikli inşaat makineleri satışlarının milyon dolar cinsinden değerleri verilmiştir. Veriler, bu on yıl boyunca elektrikli inşaat makineleri pazarında belirgin bir büyüme trendi olduğunu ortaya koymaktadır. 2023 yılında 10,32 milyon dolar olarak ölçülen pazar değeri, 2024 yılında 12,76 milyon dolara yükselmiş, 2025 yılında ise 15,77 milyon dolara ulaşmıştır. Takip eden yıllarda, pazar değeri istikrarlı bir şekilde artış göstermiş; 2026 yılında 19,5 milyon dolara, 2027 yılında 24,1 milyon dolara çıkması beklenmektedir. 2028 yılı itibarıyla pazar değerinin 29,79 milyon dolara, 2029 yılında 36,83 milyon dolara ve 2030 yılında 45,53 milyon dolara ulaşması öngörülmektedir. 2031 yılında 56,28 milyon dolara ve 2032 yılında ise 69,58 milyon dolara çıkarak, elektrikli inşaat makineleri pazarının sürekli bir büyüme eğiliminde olduğunu ve bu sektörün önemli bir gelişim potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 8).

Şekil 9’da 2023-2033 yılları arasındaki dönemde yapay zekâ (YZ) temelli inşaat pazarının milyon dolar cinsinden değerleri verilmiştir. Verilere göre, bu on yıl boyunca YZ tabanlı inşaat pazarında önemli bir büyüme trendi gözlemlenmektedir. 2023 yılında pazar değeri 903,56 milyon dolar olarak belirlenmişken, 2024 yılında bu değer 1211,86 milyon dolara yükselmesi beklenmektedir. 2025 yılında 1625,35 milyon dolara çıkacağı öngörülen pazar büyüklüğünün, 2026 yılında 2179,91 milyon dolara ulaşması beklenmektedir (Precedenceresearch, 2024). Takip eden yıllarda, pazar değerinin hızlı bir artış göstermesi ve 2027 yılında 2923,7 milyon dolara, 2028 yılında 3921,27 milyon dolara, 2029 yılında ise 5259,21 milyon dolara çıkması beklenmektedir. 2030 yılında 7053,65 milyon dolara, 2031 yılında 9460,35 milyon dolara ve 2032 yılında 12688,22 milyon dolara yükselmesi öngörülmektedir (Precedenceresearch, 2024) 2033 yılında ise pazarın 17017,45 milyon dolara ulaşması beklenmektedir. Bu veriler, yapay zekâ temelli inşaat pazarının güçlü bir büyüme potansiyeline sahip olduğunu ve sektörün önümüzdeki yıllarda önemli bir genişleme kaydedeceğini göstermektedir (Precedenceresearch, 2024) (Şekil 9).



Şekil 8. 2023-2032 Döneminde Küresel Elektrikli İnşaat Makineleri Satışlarının Milyon Dolar Cinsinden Değeri

Kaynak: Towardsautomotive, 2023

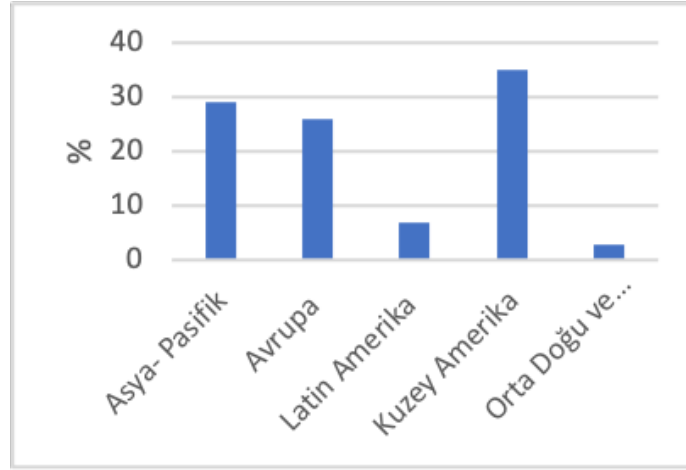


Şekil 9. 2023-2033 Döneminde Yapay Zekâ (AI) Temelli İnşaat Pazarının Milyon Dolar Cinsinden

Kaynak: Precedenceresearch, 2024

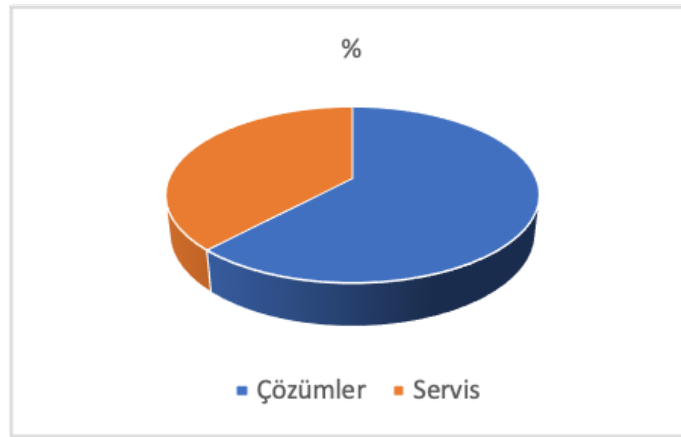
Şekil 10, 2023 yılı itibarıyla kıtalar bazında yapay zekâ (YZ) temelli inşaat pazarının yüzdelerle dağılımını göstermektedir. Verilere göre, Kuzey Amerika pazarın en büyük payına sahip olup, %35'lik bir oranla sektördeki önemli rolünü vurgulamaktadır. Avrupa, %26'lık bir pazar payı ile önemli bir ikinci sıradadır (Precedenceresearch, 2024). Asya-Pasifik bölgesi, %29'luk bir pay ile büyük bir pazar segmentini temsil ederken, Latin Amerika'nın payı %7 olarak belirlenmiştir. Orta Doğu ve Afrika ise %3'lük bir pazar payına sahiptir. Bu dağılım, yapay zekâ temelli inşaat pazarının bölgesel olarak nasıl dağıldığını ve Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya-Pasifik'in pazar üzerindeki dominant etkilerini ortaya koymaktadır (Precedenceresearch, 2024) (Şekil 10).

Şekil 11'de 2023 yılı itibarıyla yapay zekâ (YZ) temelli inşaat pazarının tekliflere göre pazar payı verilmiştir. Verilere göre, yapay zekâ temelli inşaat pazarında çözümler, %62'lik bir paya sahip olup, bu segmentin pazarın büyük bir kısmını oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Precedenceresearch, 2024). Servisler ise %38'lik bir pazar payına sahiptir. Bu dağılım, yapay zekâ temelli inşaat pazarında çözümlerin daha büyük bir pazar payına sahip olduğunu ve servislerin de önemli bir yer tuttuğunu göstermektedir (Precedenceresearch, 2024) (Şekil11).



Şekil 10. 2023 Yılı İtibarıyla Kıtalar Bazında Yapay Zekâ (AI) Temelli İnşaat Pazarının Dağılımı

Kaynak: Precedenceresearch, 2024



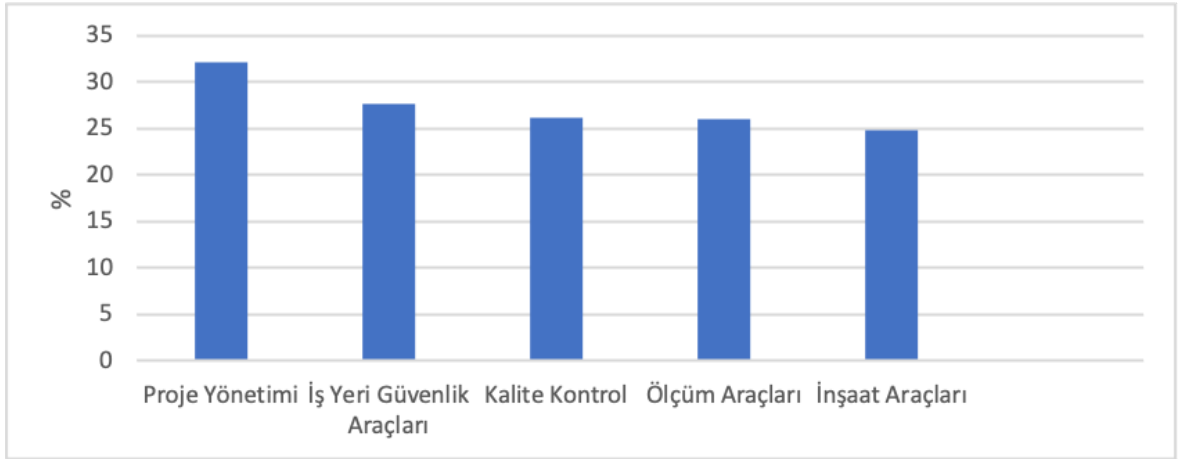
Şekil 11. İnşaat Pazarının Yapay Zekâ (YZ) İnşaat Pazar Payı, Tekliflere Göre, 2023

Kaynak: Precedenceresearch, 2024

Küresel otonom inşaat ekipmanı pazarı, 2018 yılından itibaren %7,60'lık bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) ile büyüyerek, 2023 yılında yaklaşık 12,9 milyar dolarlık bir piyasa değerine ulaşmıştır. Pazarın, 2023-2028 yılları arasında %9,45 oranında büyüyerek 20,3 milyar dolara, 2028-2033 yılları arasında ise %9,59'luk bir CAGR ile 32 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (Research and Markets, 2024). Bu büyüme, güçlü ekonomik gelişim, altyapı projeleri ve inşaat güvenliği ihtiyaçları tarafından yönlendirilmiştir. Geçmişteki büyüme, güçlü ekonomik performans, artan altyapı ve köprü inşaatları ve inşaat güvenliği önlemlerine duyulan ihtiyaç ile desteklenmiştir. Ancak, inşaat maliyetlerindeki dalgalanmalar büyümeyi olumsuz etkilemiştir. Gelecekte ise hızlı kentleşme, artan inşaat faaliyetleri, hükümet destekleri ve akıllı şehir projelerinin sayısındaki artış pazar büyümesini teşvik edecektir. Bununla birlikte, kalifiye işçi eksikliği gibi faktörler büyümeyi sınırlayabilir. Otonom inşaat ekipmanı pazarı, kısmi/yarı otonom ve tam otonom segmentlere ayrılmaktadır. Kısmi/yarı otonom segment, 2023 yılında %92,9'luk bir pazar payıyla en büyük segmenti oluştururken, tam otonom segmentin 2023-2028 yılları arasında %40,18'lik bir CAGR ile en hızlı büyüyen segment olması beklenmektedir. Uygulamaya göre pazar, yol yapımı, bina yapımı ve diğer uygulamalar olarak ayrılmaktadır. Bina inşaatı

segmenti, 2023 yılında %47,2'lik pazar payı ile en büyük segmenti oluştururken, diğer uygulamalar segmenti 2023-2028 yılları arasında %10,43'lük bir CAGR ile en hızlı büyüyen segment olacaktır. 2023 yılında, Asya Pasifik bölgesi %36,5'lik pazar payı ile en büyük pazar olmuştur. Bu bölgeyi Kuzey Amerika, Batı Avrupa ve diğer bölgeler takip etmiştir. Asya Pasifik ve Afrika bölgelerinin, sırasıyla %11,1 ve %10,5'lik CAGR ile en hızlı büyüyen bölgeler olması beklenmektedir. Küresel otonom inşaat ekipmanı pazarı, yüksek bir yoğunluğa sahiptir ve 2022 yılında pazarın %78'ini oluşturan on büyük oyuncu bulunmaktadır. Caterpillar Inc., %28,1'lik pazar payı ile en büyük rakip olurken, onu %21,4 ile Komatsu Limited ve %9,9 ile Volvo Group takip etmektedir. Pazarda rekabet avantajı sağlamak için, şirketlerin otonom iş araçları gibi yenilikçi ürünler geliştirmeye, gelişmiş yazılım teknolojileri kullanmaya, insansız buldozerler ve yarı otonom kompakt paletli yükleyiciler gibi ürünler geliştirmeye odaklanmaları önerilmektedir. Ayrıca, tam otonom pazar segmentine, toprak işleme ve malzeme taşıma ekipmanlarına odaklanarak, gelişmekte olan pazarlarda genişlemeleri ve rekabetçi fiyat teklifleri sunmaları tavsiye edilmektedir (Researchandmarkets, 2024).

En çok kullanılan beş otonom teknoloji incelendiğinde, proje yönetimi %32,1 ile en yüksek kullanım oranına sahiptir. Bu, otonom sistemlerin proje planlaması, koordinasyonu ve denetimi süreçlerinde sağladığı verimlilik ve doğruluğun önemli bir göstergesidir. İş yeri güvenlik araçları %27,7 ile ikinci sırada yer almakta olup, iş sağlığı ve güvenliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Otonom güvenlik sistemleri, tehlikeleri önceden tespit edebilme ve acil durumlarda hızlı müdahale edebilme yetenekleri ile iş kazalarını ve yaralanmaları azaltmada etkili olmaktadır. Kalite kontrol teknolojileri %26,1 oranında kullanılarak, inşaat süreçlerinin standartlara ve spesifikasyonlara uygunluğunu sağlamakta önemli bir görev üstlenmektedir. Ölçüm araçları %26 ile dördüncü sırada yer alırken, bu teknolojiler hassas ölçümler yaparak projelerin doğruluğunu ve ilerlemesini sağlamaktadır. Son olarak, inşaat araçları %24,8 kullanım oranı ile inşaat süreçlerinin otomatikleştirilmesi ve verimliliğin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu dağılımlar, otonom teknolojilerin inşaat sektöründeki farklı alanlarda nasıl entegre edildiğini ve bu alanlardaki önemini vurgulamaktadır (Constructionbriefing, 2023) (Şekil 12).



Şekil 12. En Çok Kullanılan Beş Otonom Teknoloji

Kaynak: Constructionbriefing, 2023

5.2. Yapay Zekâ Destekli Otonom ve Elektrikli İnşaat Makineleri: Yeni Teknolojiler ve Uygulama Alanları

Küresel inşaat sektöründe, teknolojik yenilikler önemli bir dönüşüm sürecine işaret etmektedir. Bu dönüşümün merkezinde, elektrikli makineler, yapay zekâ (YZ) ve otonom ekipmanlar yer almaktadır. Elektrikli makineler, fosil yakıtlarla çalışan ekipmanların yerini alarak enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik alanında kayda değer ilerlemeler sağlamaktadır. Özellikle bu makineler, enerji tüketimini azaltırken emisyonları minimize ederek çevre dostu inşaat uygulamalarının önünü açmaktadır (Aladağ, 2022:973-986). Örneğin, XCMG'nin ZNK95 otonom maden kamyonu, gelişmiş sensör teknolojisi ile donatılmış olup, 7/24 kesintisiz çalışma kapasitesi sunarak operasyonel verimliliği artırmaktadır. Bu tür makineler, enerji tüketimini optimize ederek hem yakıt maliyetlerini düşürmekte hem de çevresel etkileri azaltmaktadır (LinkedIn, 2024). Benzer şekilde, KAMAZ'ın Atlant 49 modeli, uzaktan kontrol seçenekleri ile insan gücüne olan bağımlılığı azaltarak maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Uzaktan kontrol imkânları, iş gücü verimliliğini artırmakta ve operatörlerin tehlikeli ortamlardan uzak kalmalarına olanak tanımaktadır (Turkmenportal, 2023). Dolayısıyla, bu yenilikler, inşaat projelerinin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarına katkı sağlamaktadır (Şekil 13).

Otonom sistemlerin inşaat projelerinde sunduğu avantajlar, özellikle iş güvenliği açısından önemlidir. Otonom makineler, tehlikeli alanlarda insan müdahalesini azaltarak iş sağlığı ve güvenliğini önemli ölçüde iyileştirmektedir (Dodoo vd., 2024:84-95; Immad ve Mishra, 2024: 1-10). Örneğin, Kanga TR825 uzaktan kumandalı yükleyici, operatörlerin tehlikeli alanlara girmeden güvenli bir şekilde çalışmalarını sağlamaktadır. Uzaktan kumanda ve sensör teknolojileri sayesinde, iş kazaları riski önemli ölçüde azalmaktadır (Kangaloder, 2023). Bu bağlamda, yapay zeka destekli sistemler, çevresel değişkenleri analiz ederek kendilerini sürekli olarak optimize edebilmekte ve bu sayede iş süreçlerinin hızını artırmaktadır (Brosque ve Fisher, 2022:163-186). Örneğin, Develon'un Concept-X platformu, GNSS tabanlı sürüş teknolojisi sayesinde 3D derecelendirme ve otomatik kazma işlemlerini otomatikleştirerek iş süreçlerini hızlandırmaktadır (Mobilehydraulictips, 2023). Bu teknolojiler, yalnızca iş güvenliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda iş gücü üzerindeki psikolojik stres faktörlerini de azaltmaktadır. Otonom sistemlerin kullanımı, çalışanların tehlikeli ortamlardan uzak durmasına olanak tanıdığından, iş güvenliği kültürünün gelişmesine katkı sağlamaktadır (Obiye vd.,2021). Sonuç olarak, inşaat projelerinin daha hızlı ve verimli bir şekilde tamamlanmasına yardımcı olmakta ve bu da hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlamaktadır (Dodoo vd., 2024:84-95; Immad ve Mishra, 2024: 1-10).

Yapay zeka destekli makinelerin kendini değerlendirme yeteneği, operasyon sırasında topladıkları verileri analiz ederek performanslarını sürekli olarak optimize etmelerini sağlamaktadır (Aladağ vd., 2024:1654-1669). Bu makineler, çevresel engelleri algılayarak güvenli bir çalışma ortamı oluşturmakta ve iş süreçlerinin aksamadan devam etmesine katkıda bulunmaktadır. Özellikle rota optimizasyonu, YZ'nin sağladığı önemli bir avantajdır. Makineler, hedeflerine ulaşmak için en verimli rotayı belirleyebilir ve bu sayede taşıma sürelerini kısaltabilir. Bu özellik, büyük ölçekli projelerde zaman ve maliyet tasarrufu sağlamak için kritik öneme sahiptir (Zaland vd., 2024).

Sürekli öğrenme kabiliyeti, YZ destekli makinelerin çevresel değişkenleri analiz ederek kendilerini zamanla daha verimli hale getirmelerine olanak tanır (Tatineni ve Raviteja Boppana, 2021:58-88). Bu durum, bakım ve onarım maliyetlerini düşürmekte ve makinelerin daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır; böylece, işletme verimliliği artmaktadır. Örneğin, yapay zekâ destekli sistemler, belirli bir inşaat sahasındaki zemin yapısını veya hava koşullarını dikkate alarak makinelerin en uygun çalışma yöntemlerini geliştirmesine olanak tanır. Bu özellik, özellikle karmaşık inşaat projelerinde bakım ve

onarım süreçlerini optimize ederek maliyetleri azaltmakta ve iş gücünün etkin kullanımını sağlamaktadır (Ali vd., 2024:1-23; Mai vd., 2024:1-29). Sonuç olarak, YZ destekli otonom ve elektrikli makineler, inşaat sektöründe verimlilik, iş güvenliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Bu yenilikler, hem çevresel hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir bir gelecek inşa etme hedefi doğrultusunda önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Uzun vadede, bu teknolojilerin inşaat sektörünün sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada ve maliyetlerin düşürülmesinde kritik bir rol oynaması beklenmektedir (Ali vd., 2024:1-23; Mai vd., 2024:1-29; Rasheed vd., 2024:1-23).



Şekil 13. Yapay Zek â Destekli Otonom ve Elektrikli İnşaat Makineleri

Kaynak: Mattsonloader, 2023; Bobcat, 2024; Oemoffhighway, 2021; Robo, 2023; Mobilehydraulictips,

2023; Equipmentworld, 2022; Robo-us, 2023; Machinerytrader, 2021; Unmannedsystemstechnology, 2015; Koreatimes, 2024; Xcmgpng, 2024; Forconstructionpros, 2020; Hitachi, 2024.

SONUÇ ve TARTIŞMA

Yapay zekâ ve robotik teknolojilerin inşaat sektöründeki uygulamaları, sektörde köklü değişimlere ve önemli iyileşmelere yol açmaktadır. Bu teknolojiler, inşaat projelerinin maliyetlerini düşürme, sürelerini kısaltma ve kaliteyi artırma potansiyeline sahiptir. Yapay zekâ, proje planlamasından inşaat sürecine kadar pek çok aşamada karar destek sistemleri, veri analizi ve tahminleme gibi işlevlerle etkili bir rol oynamaktadır. Öte yandan, robotik teknolojiler, otomasyon ve hassasiyet gerektiren işlerde insan gücünün yerini alarak güvenliği artırmakta ve verimliliği optimize etmektedir.

Ancak, bu teknolojilerin potansiyelinden tam anlamıyla faydalanabilmek için çeşitli zorlukların aşılması gerekmektedir. İlk olarak, bu teknolojilerin maliyetlerinin yüksek olması ve entegrasyon süreçlerinin karmaşıklığı, küçük ve orta ölçekli inşaat firmaları için bir engel teşkil etmektedir. Ayrıca, sektördeki iş gücünün bu yeni teknolojilere adaptasyonu ve gereken becerilere sahip olması da önemli bir faktördür.

Teknolojilerin etkin bir şekilde kullanılabilmesi için şu politika önerileri sunulabilir:

Yatırım Teşvikleri ve Vergi İndirimleri: Devletler, yapay zekâ ve robotik teknolojilere yatırım yapan inşaat şirketlerine vergi indirimleri ve finansal teşvikler sunarak bu teknolojilerin benimsenmesini desteklemelidir. Bu teşvikler, teknolojilerin mali yükünü hafifletip sektörde daha geniş bir kullanım alanı sağlarken; yapay zekâ kullanımı, işsizliğe yol açma riski ve belirli etik kuralların eksikliği nedeniyle etik açıdan tartışmalı bir konu olmaya devam etmektedir. Bu nedenle, devlet teşviklerinin etik boyutunun da dikkate alınması önemlidir.

Araştırma ve Geliştirme Destekleri: Üniversiteler, araştırma kurumları ve özel sektör iş birliğiyle yapay zekâ ve robotik teknolojilerin inşaat sektöründeki uygulamalarını araştıran projelere finansal destek sağlanmalıdır. Bu destekler, yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine ve sektördeki teknoloji seviyesinin yükseltilmesine katkıda bulunacaktır.

Standart ve Sertifikasyon Geliştirme: Ulusal ve uluslararası düzeyde, yapay zekâ ve robotik teknolojilerin güvenli ve etkili bir şekilde kullanılmasını sağlamak için standartlar ve sertifikasyon sistemleri oluşturulmalıdır. Bu, teknolojilerin kalitesini ve güvenliğini artırarak sektördeki genel standartları yükseltecektir.

Eğitim ve Beceri Gelişimi Programları: İş gücünün yapay zekâ ve robotik teknolojilerle ilgili bilgi ve becerilerinin artırılması için eğitim programları düzenlenmelidir. Bu programlar, inşaat sektöründeki profesyonellerin teknolojilere uyum sağlamasını ve etkili bir şekilde kullanmasını destekleyecektir.

Pilot Projeler ve Kamu-Özel Sektör İş Birlikleri: Kamu sektöründe yapay zekâ ve robotik teknolojilerin pilot projelerle test edilmesi ve başarılı projelerin genişletilmesi teşvik edilmelidir. Kamu-özel sektör iş birlikleri, bu teknolojilerin uygulamada nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek ve daha geniş çapta benimsenmesini sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Sürdürülebilirlik ve Çevre Düzenlemeleri: Yapay zekâ ve robotik teknolojilerin sürdürülebilirlik hedeflerine katkıda bulunacak şekilde tasarlanması ve uygulanması için çevre dostu politikalar geliştirilmelidir. Enerji verimliliği ve malzeme tasarrufu gibi çevresel etkileri azaltacak önlemler, teknolojilerin çevresel ayak izini küçültmeye yardımcı olacaktır.

Veri Güvenliği ve Gizlilik Yönetmelikleri: Yapay zekâ sistemlerinin ve robotların topladığı verilerin güvenliğini sağlamak için veri güvenliği ve gizlilik yönetmelikleri oluşturulmalıdır. Bu yönetmelikler, kişisel ve ticari verilerin korunmasını ve teknolojilerin güvenli kullanımını temin edecektir.

Sonuç olarak, yapay zekâ ve robotik teknolojilerin inşaat sektöründe başarılı bir şekilde entegre edilmesi, sektördeki verimliliği artırmakla kalmayıp, maliyetleri düşürerek projelerin kalitesini ve güvenliğini de iyileştirecektir. Ancak, bu teknolojilerin etkili bir şekilde benimsenmesi ve yaygınlaştırılması için yukarıda belirtilen politika önerilerinin dikkate alınması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Abioye, S. O., Oyedele, L. O., Akanbi, L., Ajayi, A., Davila Delgado, J. M., Bilal, M., Akinade, O. O., & Ahmed, E. (2021). Artificial Intelligence In The Construction Industry: A Review Of Present Status, Opportunities And Future Challenges. *Journal of Building Engineering*, 44, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299>
- Akbay, RB, Balaban, Ö. B. & Arıcı Ü. Y. (2023). Şantiyelerde Bilgi Modellemesi ve Dijital Teknolojilerin Kullanımı. *AJIT-E: Akademik Bilgi Teknolojileri Dergisi*, 14(54), 298-319. <https://doi.org/10.5824/ajite.2023.03.007.x>
- Aladağ, H. (2022). Türk İnşaat Sektöründe Dijital Dönüşüm Uygulamaları Üzerine Bir Araştırma. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 10(3), 973-986. <https://doi.org/10.21923/jesd.1085516>
- Aladağ, H. (2022). Türk İnşaat Sektöründe Dijital Dönüşüm Uygulamaları Üzerine Bir Araştırma. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 10(3), 973-986. <https://doi.org/10.21923/jesd.1085516>
- Aladağ, H., Güven, İ., & Ballı, O. (2024). Contribution Of Artificial Intelligence (AI) To Construction Project Management Processes: State Of The Art With Scoping Review Method. *SIGMA*, 42(5), 1654–1669.
- Ali, Z., Saad, S., Rasheed, K., & Ammad, S. (2024). AI Future Perspectives And Trends In Construction. In *AI In Material Science* (1st Ed., Pp. 1-23). CRC Press. <https://doi.org/10.9781003438489>
- Atahan, D. (2024). İnşaat Sektöründe Sanal Gerçeklik Uygulamalarının Kullanımı. Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi <https://hdl.handle.net/20.500.12462/14702>
- Balzan, A., Aparicio, C. C., & Trabucco, D. (2020). Robotics In Construction: State-Of-Art Of On-Site Advanced Devices. *International Journal of High-Rise Buildings*, 9(2), 95–104.
- Baubot. (2023). The Future Of Construction Is Here. Erişim Tarihi:30 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://www.baubot.com/>
- Bingöl, K., Er Akan, A., Örmecioğlu, H. T., & Er, A. (2020). Depreme Dayanıklı Mimari Tasarımda Yapay Zekâ Uygulamaları: Derin Öğrenme ve Görüntü İşleme Yöntemi Düzenli Taşıyıcı Sistem Belirleme. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 2197-2210. <https://doi.org/10.17341/gazimmd.647981>
- Bobcat. (2024) Bobcat To Show RogueX2 Autonomous Loader Concept For The First Time At Intermat 2024. Erişim Tarihi: 25 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://www.bobcat.com/eu/en/company/news-and-media/press-release/bobcat-to-show-rogueX2-autonomous-loader-concept-for-the-first-time-at-intermat-2024>
- Bogue, R. (2018). What Are The Prospects For Robots In The Construction Industry?. *Industrial Robot: An International Journal*, 45(1), 1–6. <https://doi.org/10.1108/IR-11-2017-0194>
- Brokk. (2024). Attachment Spotlight: The Brokk Vacuum Excavator. Erişim Tarihi:25 Haziran 2024, Erişim Adresi: <https://www.brokk.com/news/articles/attachment-spotlight-the-brokk-vacuum-excavator/>
- Brosque, C., & Fischer, M. (2022). Safety, Quality, Schedule, And Cost Impacts Of Ten Construction

- Robots. *Construction Robotics*, 6(3), 163–186. <https://doi.org/10.1007/s41693-022-00072-5>
- Brosque, C., Skeie, G., Orn, J., Jacobson, J., Lau, T., & Fischer, M. (2020). Comparison Of Construction Robots And Traditional Methods For Drilling, Drywall, And Layout Tasks. In 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA) (pp. 1–14).
- Calp, MH., & Akçayol, MA. (2020). Yazılım Projeleri İçin Yapay Sinir Ağlarına Dayalı Web Tabanlı Risk Yönetim Sistemi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi: WEBRISKIT. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(5), 993-1014.
- Can, R. S. (2021). İnşaat Sektörünün Geleceği. İstanbul: MEF Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Proje Yönetimi Yüksek Lisans Programı. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. <https://hdl.handle.net/20.500.11779/1692>
- Canvas. (2023). Revolutionizing Drywall Finishing. Erişim Tarihi: 29 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://www.canvas.build/>
- Constructionbriefing. (2023). How Far Are We Into Construction's Autonomous Pathway?. Erişim Tarihi: 27 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://www.constructionbriefing.com/news/how-far-are-we-into-construction-s-autonomous-pathway-/8031595.article>
- Dezeen. (2018). Einride Reveals Driverless All-Electric Logging Truck. Erişim Tarihi: 25 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://www.dezeen.com/2018/07/17/einride-autonomous-driverless-all-electric-log-logging-truck-transport/>
- Dodoo JE, Al-Samarraie H, Alzahrani AI, Lonsdale M, Alalwan N. Digital Innovations for Occupational Safety: Empowering Workers in Hazardous Environments. *Workplace Health & Safety*. 2024;72(3):84-95. doi:10.1177/21650799231215811
- Doğaner, A. (2021). Türkiye’de Sektörel Teknolojik Gelişmelerin Makroekonomi Üzerindeki Etkisi: İnşaat Sektöründe Yapay zekâ Kullanımına Yönelik Bir İnceleme. *Kırklareli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5(2), 55-76. <https://doi.org/10.47140/kusbder.998410>
- Eltaweel, A., & Su, Y. (2017). Parametric design and daylighting: A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73 , 1086-1103
- Enterpriseappstoday. (2023). Construction Robot Market to Hit USD 2,398.7 Mn by 2032. Erişim Tarihi: 25 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://www.enterpriseappstoday.com/news/construction-robot-market-to-hit-usd-2398-7-mn-by-2032.html>
- Equipmentworld. (2022). Shantui Launches World's First Autonomous, Unmanned Bulldozer. Erişim Tarihi: 16 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://equipmentindia.com/construction-machinery-news/top-equipment-news/webexclusive/Shantui-launches-world-s-first-autonomous-unmanned-bulldozer/128249>
- Erdal, H. (2015). Contribution of Machine Learning Methods to the Construction Industry: Prediction of Compressive Strength. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 109-114. <https://doi.org/10.5505/pajes.2014.26121>
- Eryaman, H., & Akün, E. (2023). Yapılarda Yüksekte Çalışma İş Güvenliği Denetimini Kolaylaştırmak

İçin Genişletilmiş Gerçeklik ve Yapay Zekânın Entegrasyonu Modeli. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 34(4), 71-104. <https://doi.org/10.18400/tjce.1291960>

- Exactitudeconsultancy. (2023). Global Construction Robot Market by Automation (Fully Autonomous, Semi-Autonomous), by Function (3D Printing Robots, Bricklaying Robots, Demolition Robots, Concrete Structural Erection), by Application (Public Infrastructure, Commercial Buildings, Residential Buildings, Nuclear Dismantling and Demolition) and Region, Global trends and forecast from 2022 to 2029. Erişim Tarihi: 25 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://exactitudeconsultancy.com/reports/20750/construction-robot-market/>
- Forconstructionpros. (2020). BOMAG Exhibits ROBOMAG Fully Autonomous Tandem Roller at CONEXPO 2020. Erişim Tarihi: 18 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://www.forconstructionpros.com/equipment/compaction/press-release/21121517/bomag-americas-inc-bomag-exhibits-robomag-fully-autonomous-tandem-roller-at-conexpo-2020>
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, P. (2016). Large-Scale 3D Printing Of Ultra-High Performance Concrete—A New Processing Route For Architects And Builders. *Materials & Design*, 100, 102–109.
- Görçün, Ö. F. (2018). Lojistikte Teknoloji Kullanımı ve Robotik Sistemler - Technology Utilization In Logistics And Robotics Systems. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 10(24), 351-368. <https://doi.org/10.20875/makusobed.397373>
- Gültekin, B., & Dogan, G. (2021). İnşaat Mühendisliğinde Yapay zekâ Çalışmaları. İleri Mühendislik Çalışmaları Ve Teknolojileri Dergisi, 2(2), 117-138.
- Gürsel, D. I., & Abbas, G. M. (2020). Gelecek, teknoloji ve mimarlık. In İ. Gürsel Dino & G. M. Abbas (Eds.), *TMMOB Mimarlar Odası Ankara Şubesi* (pp. 1-5). Ankara. <https://hdl.handle.net/11511/85752>
- Hamamcıoğlu, T. M. (2013). Mimari Fotogrametri Alanındaki Çağdaş Gelişmelerin Değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(1).
- Hilti. (2020). Hunveils Bim-Enabled Construction Jobsite Robot. Erişim Tarihi: 25 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://www.hilti.com/content/hilti/W1/US/en/company/news/press-releases/2020-construction-jobsite-robot.html>
- Hitachi. (2024). Developing an Autonomous Compaction System using a Vibratory Roller for Earthwork. Erişim Tarihi: 25 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://www.hitachicm.com/global/en/innovations/innovations03/>
- Ifrs. (2023). World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and The Americas. Erişim Tarihi: 8 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://robotics.ee/author/international-federation-of-robotics-ifr/>
- Immad, A. S., & Mishra, S. D. (2024). Artificial Intelligence In Advancing Occupational Health And Safety: An Encapsulation Of Developments. *Journal of Occupational Health*, 66(1), 1-10. <https://doi.org/10.1093/joccu/uiad017>
- Kangaloader. (2023). Remote Control Mını Loader. Erişim Tarihi: 30 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://www.kangaloader.com/product/remote-loader/>

- Kaya, S. (2016). Atıksu Arıtma Tesisi İnşaatında Yapı Bilgi Modelleme Sisteminin Uygulanması Üzerine Bir Araştırma. İstanbul: Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yayınlanmamış Yüksek lisans Tezi.
- Keleş, A., & Keleş, M., K. (2018). İnşaat Sektöründe Kullanımı Artan Bilgisayar Yazılımları ve Bilgi Teknolojilerinin İrdelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5(2), s. 610–617. doi: 10.31202/ecjse.386469.
- Koreatimes. (2024). HD Hyundai Confident Of Selling Unmanned Earthmovers To Saudi Arabia. Erişim Tarihi: 25 Nisan 2024, Erişim Adresi: https://www.koreatimes.co.kr/www/tech/2024/07/129_359760.html
- Li, Y., & Liu, C. (2019). Applications Of Multicopter Drone Technologies İn Construction Management. *International Journal of Construction Management*, 19(5), 401–412.
- LinkedIn. (2024). Breaking Ground in Mining Technology!. Erişim Tarihi: 25 Haziran 2024, Erişim Adresi: https://www.linkedin.com/posts/xcmg-australia_xcmgaustralia-xcmggroup-xcmgzkn95-activity-7112574048651378689-s2ML/
- Linner, T., Pan, W., Hu, R., Zhao, C., Iturralde, K., Taghavi, M., Trummer, J., Schlandt, M., & Bock, T. (2020). A Technology Management System For The Development Of Single-Task Construction Robots. *Construction Innovation*. <https://doi.org/10.1108/CI-06-2019-0053>
- Machinerytrader. (2021). Komatsu Unveils Fully Electric, Remote-Controlled Mini-Excavator Concept. Erişim Tarihi: 5 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://www.machinerytrader.co.uk/blog/plant-equipment-news/2021/07/komatsu-unveils-fully-electric-remote-controlled-mini-excavator-concept>
- Mai, T. G., Nguyen, M., Ghobakhlou, A., Yan, W. Q., Chhun, B., & Nguyen, H. (2024). Decoding A Decade: The Evolution Of Artificial Intelligence İn Security, Communication, And Maintenance Within The Construction Industry. *Automation in Construction*, 165, 105522. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105522>
- Mattsonloader. (2023). ML526SLR Remote Control Mini Skid Steer Loader. Erişim Tarihi: 20 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://www.mattsonloader.com/skid-steer-loader/remote-control-skid-steer/ml526slr-remote-control-mini-skid-steer.html>
- Mattsonloader. (2024). Skid-Steer Loader. Erişim Tarihi: 25 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://www.mattsonloader.com/skid-steer-loader/skid-steer-loaders.html>
- Mobilehydraulictips. (2023). A Glimpse At The Future Of Unmanned Machines. Erişim Tarihi: 30 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://www.mobilehydraulictips.com/a-glimpse-at-the-future-of-unmanned-machines/>
- Nadour, M., Boumehraz, M., Cherroun, L., & Puig Cayuela, V. (2019). Hybrid Type-2 Fuzzy Logic Obstacle Avoidance System Based On Horn-Schunck Method. *Electrotehnică, Electronică, Automatica*, 67(1), 45–51.
- Oemoffhighway. (2021) Volvo CE Develops Autonomous, Battery-Electric Wheel Loader Prototype from LEGO Model. Erişim Tarihi: 25 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://www.oemoffhighway.com/engineering-manufacturing/press-release/21796889/volvo-construction-equipment-volvo>

ce-develops-autonomous-batteryelectric-wheel-loader-prototype-from-lego-model

- Okibo. (2023). Our Robot Smart Robotics For Construction Sites. Erişim Tarihi: 28 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://okibo.com/our-robot/>
- Park, S., Jung, Y., & Bae, J. (2018). An Interactive And Intuitive Control Interface For A Tele-Operated Robot (AVATAR) System. *Mechatronics*, 54, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.08.011>
- Phys. (2017). A Dual-arm Construction Robot With Remote-Control Function. Erişim Tarihi: 25 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://phys.org/news/2017-06-dual-arm-robot-remote-control-function.html>
- Precedenceresearch. (2024). Artificial Intelligence (AI) in Construction Market Size, Share, and Trends 2024 to 2033. Erişim Tarihi: 25 Haziran 2024, Erişim Adresi: <https://www.precedenceresearch.com/artificial-intelligence-in-construction-market>
- Precedenceresearch.(2023).Robotics Technology Market Size, Share, and Trends 2024 to 2034. Erişim Tarihi: 22 Ocak 2024, Erişim Adresi:<https://www.precedenceresearch.com/robotics-technology-market>
- Price, D. (2020, September 27). Lidar inspections improve construction safety. *Construction Today*.
- Rasheed, K., Saad, S., Ammad, S., & Bashir, M. T. (2024). Industry 4.0 And Construction. In *AI İn Material Science* (1st ed., pp. 1-23). CRC Press. <https://doi.org/10.9781003438489>
- Ren, L., Wang, W., & Du, Z. (2012). A New Fuzzy Intelligent Obstacle Avoidance Control Strategy For Wheeled Mobile Robot. In *Proceedings Of The 2012 IEEE International Conference On Mechatronics And Automation*, Chengdu, China, August 5–8, 2012 (pp. 1732–1737). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMA.2012.6283467>
- Researchandmarkets. (2024). Autonomous Construction Equipment Global Market Opportunities and Strategies to 2033. Erişim Tarihi: 25 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://www.researchandmarkets.com/report/robotic-construction>
- Robo. (2023). Autonomous Solutions. Erişim Tarihi: 25 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://robo-us.com/>
- Robo-us. (2023). Autonomous Solutions. Erişim Tarihi: 3 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://robo-us.com/index.html>
- Sabur, HB ., & Arslan, S. S. (2018). Mimari Tektoniğin Evrimi: Dijital Tektonik Üzerine Bir Değerlendirme. *Ejons International Journal* , 2 (3), 75–87. <https://ejons.org/index.php/ejons/article/view/13>
- Saidi, K. S., Bock, T., & Georgoulas, C. (2016). Robotics İn Construction. In B. Siciliano & O. Khatib (Eds.), *Springer Handbook of Robotics* (pp. 1493–1520). Springer.
- Salmi, T., Ahola, J. M., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., & Malm, T. (2018). Human-Robot Collaboration And Sensor-Based Robots İn Industrial Applications And Construction. In H. Bier (Ed.), *Robotic Building* (pp. 1–10). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70866-9_2
- Shayesteh, S., & Jebelli, H. (2021). Investigating The Impact Of Construction Robots' Autonomy Level On Workers' Cognitive Load. In *Canadian Society Of Civil Engineering Annual Conference*,

Singapore (Vol. 239). Springer.

Sheikhi, M. (2022). Yapay zekâ Kullanımının İş Piyasasına Etkisi. *Journal of Economics and Political Sciences*, 2(1), 102-111.

Statista. (2022). Global Heavy Construction Equipment Market Size Between 2020 And 2030. Erişim Tarihi: 20 Eylül. 2023, Erişim Adresi: <https://www.statista.com/statistics/1220897/heavy-construction-equipment-market-size-worldwide/>

Tatineni, S., & Raviteja Boppana, V. (2021). AI-Powered DevOps and MLOps Frameworks: Enhancing Collaboration, Automation, and Scalability in Machine Learning Pipelines. *Journal of Artificial Intelligence Research and Applications*, 1(2), 58-88. <https://aimlstudies.co.uk/index.php/jaira/article/view/103>

Towardsautomotive. (2023). Global Electric Vehicle Motor Market Size - Report 2032. <https://www.towardsautomotive.com/insights/electric-vehicle-motor-market-size>

Turkmenportal. (2023). “KAMAZ” Presented an Unmanned Dump Truck Nicknamed “Robocop”. Erişim Tarihi: 17 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://turkmenportal.com/en/blog/69851/kamaz-presented-an-unmanned-dump-truck-nicknamed-robocop>

Univdatos. (2023). Construction Robotics. Erişim Tarihi: 20 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://univdatos.com/construction-robot-market/>

Unmannedsystemstechnology. (2015). XCMG Launches Fully Remote-Controlled Intelligent Excavator. Erişim Tarihi: 13 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2015/09/xcmg-launches-fully-remote-controlled-intelligent-excavator/>

Uygunoğlu, T., Özgüven, S., & Topçu, İ. B. (2019). 3D Teknolojisi ile Yapı Malzemesi Üretimindeki Gelişmeler. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(3), 279-288.

Wienerberger. (2021). The Robots Revolutionizing The Construction Industry. Erişim Tarihi: 25 Aralık 2023, Erişim Adresi: <https://www.wienerberger.com/en/stories/2021/20211117-robotics-czech-republic.html>

Xcmgpng. (2024). Marketplace for Mechanical & Electrical Industry. Erişim Tarihi: 25 Nisan 2024, Erişim Adresi: <https://xcmgpng.machmall.com/index.php/goodsDetails/XCMG-new-autonomous-single-drum-road-rollers-XS265AI-26-ton-vibrating-roller-compactor-machine-price-6795>, <https://bauma.bomag.com/en/feel-what-compaction-is-all-about>

Yüksel, G. (2022). Açık Maden Sahalarında İnsansız Hava Araçlarının Kullanımı. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(1), 29-37. <https://doi.org/10.51534/tiha.1124260>

Zaland, A., Saad, S., Rasheed, K., & Ammad, S. (2024). *Automation İn Construction İndustry* (1st ed.). CRC Press.

Zhang, M., Xu, R., Wu, H., Pan, J., & Luo, X. (2023). Human–Robot Collaboration For On-Site Construction. *Automation in Construction*, 150, Article 104812. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104812>

Zimmermann, S., Poranne, R., & Coros, S. (2021). Go fetch! - Dynamic grasps using Boston Dynamics Spot with external robotic arm. In 2021 IEEE International Conference on Robotics and

Automation (ICRA) (pp. 4488-4494). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021.9561835>