



Examining the Effect of Digital Manufacturing and Traditional Building Construction Techniques on the Building Production Process

Kübra Sümer Haydaraslan^{1,a,*}

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Isparta, Türkiye

*Corresponding author

Research Article

History

Received: 14/02/2024

Accepted: 06/05/2024

Copyright



This work is licensed under
Creative Commons Attribution 4.0
International License

ABSTRACT

Adapting new technologies to the construction industry is slower than in other sectors. Labor productivity has remained stable relative to other industries over the last two decades. Therefore, due to rapid population growth, more housing needs is needed. The industry needs to improve its performance against current and future demands. Building production with digital fabrication techniques has the potential to speed up the building construction process. In addition, this technique is important in that it allows production with on-site and sustainable materials. The most used digital production technique in buildings is additive manufacturing technology. This study aims to examine the advantages and disadvantages of using additive manufacturing technologies in building construction compared to traditional construction techniques. At the end of the study, it was concluded that although digital production techniques have great potential in building construction, problems still need to be solved. The need to develop standards in building construction, especially with digital production techniques, is seen as the biggest obstacle to its widespread use in building construction.

Keywords: Building construction, Digital fabrication techniques, Digital construction, Additive manufacturing, Construction technology

Bina İnşa Sürecinde Yeni İnşaat Teknolojileri Kullanımının İncelenmesi

Araştırma Makalesi

Süreç

Geliş: 14/02/2024

Kabul: 06/05/2024

ÖZ

Yeni teknolojilerin inşaat sektörüne adaptasyonu diğer sektörler göre daha yavaştır. İş gücü verimliliği ise diğer sektörler kıyasla son yirmi yılda sabit kalmıştır. Bu nedenle hızlı nüfus artışından kaynaklı barınma ihtiyacı karşılanamamaktadır. Sektörün şu anda ve gelecekte olan talepleri karşılayabilmesi için performansını artırması gerekmektedir. Dijital fabrikasyon teknikleri ile bina üretimi, bina inşa sürecini hızlandırma konusunda potansiyele sahiptir. Ayrıca yerinde ve sürdürülebilir malzemeler ile üretime imkan vermesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bina sektöründe kullanılan dijital fabrikasyon tekniklerinden binalarda en yaygın kullanılan teknoloji eklemeli imalat teknolojileridir. Bu çalışmada binaların daha hızlı inşa edilmesinde eklemeli imalat teknolojileri kullanımının geleneksel inşa yöntemlerine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumların incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, geleneksel inşa yöntemleri ile eklemeli imalat inşa yöntemleri; sürdürülebilirlik, statik, maliyet ve üretim esnekliği parametreleri açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonunda eklemeli imalat tekniklerinin, bina inşasında birçok potansiyele sahip olsa da henüz çözülmemiş sorunları bulunduğu ulaşılmıştır. Özellikle tekniğin bina inşası konusunda standartlarının gelişmemiş olması, bina inşasında yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel olarak görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bina inşası, Dijital fabrikasyon teknikleri, Dijital inşaat, Eklemeli imalat, İnşaat teknolojisi



kubrahaydaraslan@sdu.edu.tr



0000-0003-0663-6141

How to Cite: Sümer Haydaraslan K (2024) Examining the Effect of Digital Manufacturing and Traditional Building Construction Techniques on the Building Production Process, Journal of Science and Technology, 3(1): 1-13.

Giriş

Binaların ilk oluşum amacı korunaklı bir alan oluşturmaktır. Tarih boyunca teknolojinin gelişimi ile ihtiyaçlar çeşitlenmiştir. Bu durum binaların inşa tekniklerinde, boyutlarında, kullanım amacında değişimlere neden olmuştur. Bina inşası dönemlere göre farklı yapı teknolojileri kullanılarak yapılmıştır (Yergün, 2002). Bina inşasında kullanılan yapı teknolojileri genel olarak strüktür sistemi ile ilgilidir. Bu strüktür sistemleri çoğunlukla kullanılan malzemenin çeşidine, yapısal özelliğine, yapım ve üretim yöntemlerine göre sınıflandırılmaktadır. Bina inşa yöntemleri yapısal özelliğine göre sınıflandırıldığında yığma, iskelet, plak ve karma taşıyıcı sistem olarak sınıflandırılmaktadır (Yergün, 2002, Sümer Haydaraslan, 2023). Bugün bina inşa tekniğinde en yaygın kullanılan sistem iskelet sistemidir. Bu sistemde bina yatay ve düşey taşıyıcılar ile taşınmaktadır. Bu sistemde binaların inşa sahasında yerinde üretimi gerçekleştirilmektedir. Birçok farklı iş kaleminin bulunduğu bu inşa yöntemi günümüzde geleneksel inşa yöntemi olarak adlandırılmaktadır. İnşaat sektöründe kullanılan geleneksel inşaat yöntemleri, yüksek oranda kalıp ve işgücüne ihtiyaç duymaktadır (Khoshnevis, 2004). Bu durum binaların inşaat sürelerini uzatmaktadır. Özellikle barınma ihtiyacının karşılanmasında bu inşa yöntemi talebi karşılamakta yavaş kalmaktadır.

Birleşmiş Milletler tarafından yapılan çalışmaya göre dünya nüfusunun 2030 yılında 8,5 milyara, 2050 yılında ise 9,7 milyara ulaşması beklenmektedir (Şekil 1) (UN DESA, 2023). Nüfusta beklenen artış, konut ihtiyacında da ciddi artış yaşanacağına göstergesidir. Artan konut ihtiyacı talebine cevap verebilmek için, inşaat sektöründe üretimi hızlandırma konusunda çözüm arayışına gidilmektedir. Bu durum mevcut bina inşa yöntemlerinde yeni inşaat teknolojilerinin geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaştırılması konusunun önemini göstermektedir. Diğer bir yandan geleneksel inşa yönteminde bugün en yaygın kullanılan sistem betonarme iskelet sistemidir. Betonun inşa sahasına taşınması ve demir ile birleşimi sonucu binanın yatay ve düşey taşıyıcıları oluşturulmaktadır. Bu sistemde malzemelerin sahaya taşınması, binanın inşa edilmesi ve yıkım aşaması gibi parametreler inşaat sektörünün sanayi sektöründen sonra en fazla enerji tüketiminin ve CO₂ salınımının kaynağıdır. İklim değişikliğinin en büyük nedenlerinden biri olarak gösterilen CO₂ salınımının inşaat sektöründe azaltılması iklim değişikliği etkilerinin azaltılması için önemlidir (Sümer Haydaraslan ve Dikmen, 2023; Sümer Haydaraslan ve Yaşar, 2023). Yeni inşa teknolojilerinde sürdürülebilir malzeme kullanımı, yapım ve yıkım aşamasında CO₂ salınımının azaltılması konusunda çözüm önerileri bulunmaktadır.

Endüstri devrimleri (Endüstri 1.0 (1740-1840), Endüstri 2.0 (1840-1950), Endüstri 3.0 (1950-2011) ve Endüstri 4.0 (2011-)) inşaat sektörünün yanı sıra bütün sektörlerin üretim yöntemlerini yıllar içinde değiştirmiştir. Dünya şu an Endüstri 4.0 ile büyük bir dönüşüm içindedir. Bu dönem otomasyon ve yapay zeka çağı olarak adlandırılmaktadır. Dijital fabrikasyonun ve eklemeli imalat teknolojisinin

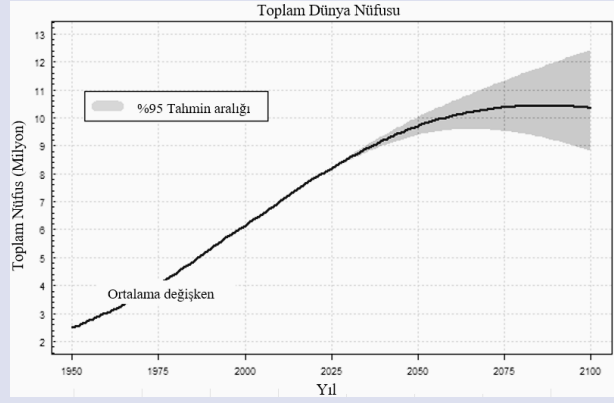
yaygınlaşması bu dönemin bütün üretim yöntemlerinin merkezinde yer almaktadır. İçinde otomasyon ve yapay zeka barındıran endüstriyel robotların inşaatlarda kullanımının yaygınlaşmasının üretim hızının artmasına büyük katkı sağlayacağı ön görülmektedir. İnşaat sektörünün de bu teknolojik gelişmelerin kullanılması açısından ciddi potansiyele sahip olduğu belirtilmektedir (Linner ve ark., 2020; Ghaffar ve ark., 2018; Brischetto ve ark., 2017).

Dijital fabrikasyon bilgisayarda tasarımı yapılan bir ürünün büyük oranda makine kullanılarak üretilmesi sürecidir. Yerinde ve sürdürülebilir malzemeler ile üretime imkan vermesi açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca dijital fabrikasyon yöntemler, geleneksel inşa yöntemleri ile uygulanması zor olan bina tasarımlarının inşasını kolaylaştırmıştır. Her ne kadar günümüzde binaların dijital fabrikasyon teknolojileri üretimi çeşitli zorluklar içerse de ciddi bir potansiyeli de beraberinde getirmektedir. Yapılan çalışmalar bina üretiminin hızlandırılması için dijital fabrikasyon tekniklerini içeren eklemeli imalatın ya da 3D baskı yöntemlerinin inşaat sektöründe kullanımını önermektedir (Ma ve Wang, 2018; Weng ve ark., 2020). Bu kapsamda bu çalışmada binaların daha hızlı üretimine imkan veren eklemeli imalat teknolojileri kullanımının geleneksel inşa yöntemlerine göre avantajlı ya da dezavantajlı olduğu konuların incelenmesi amaçlanmıştır. Bir binanın inşasında sürdürülebilirlik, statik ve maliyet konusu inşaat yönteminin belirlenmesinde en önemli konulardır (Ma ve Wang, 2018). Çalışma için geleneksel inşa yöntemleri ve eklemeli imalat yöntemleri bu parametreler açısından karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada ayrıca eklemeli imalat yöntemlerinin esnek tasarım uygulama kolaylığı sağlamasından dolayı bu parametre açısından da karşılaştırılmıştır. Çalışma için binaların daha hızlı inşa edilmesinde yeni bina inşaat tekniklerinin kullanımı incelenmiştir. Daha sonra bina sektöründe kullanılan dijital fabrikasyon tekniklerinden binalarda en yaygın kullanılan eklemeli imalat teknolojileri hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmada son olarak geleneksel inşa yöntemleri ve 3D yazıcılarla bina yapımı avantaj ve dezavantajları açısından incelenmiştir.

2. BİNA SEKTÖRÜNDE KULLANILAN İNŞA TEKNİKLERİ

2.1. Geleneksel İnşa Teknikleri

Barınma ihtiyacı insanlığın var olduğu tarihten bu yana en temel ihtiyaçlardan biri olmuştur. Bilinen en eski barınma birimlerinden olan mağaralar inşa tekniği olarak oymanın geliştirildiği ilk birimdir. Daha sonra barınma ihtiyacının karşılanması için yaygın olarak toprak malzeme ile farklı teknikler kullanılarak barınma birimleri oluşturulmuştur (Jaquin, 2012). Bu birimler toprak ile kaplanarak, doldurularak, bloklar oluşturularak, sıkıştırılarak, doğrudan şekillendirilerek, yığılmış olarak, kalıplanmış olarak ve toprak ile diğer yerel malzemeler karıştırılarak farklı inşaat teknikleri ile oluşturulmuştur (Şekil 2) (Pica, 2017; Dirican ve Akyol, 2019). Binaları inşa etme teknikleri teknolojinin gelişmesine bağlı olarak değişim göstermiş ve geçmişte kullanılan oyma, kaplama, vb. yöntemler neredeyse hiç kullanılmamaktadır.



Resim 1. Dünya toplam nüfus artış tahmini
Figure 1. World total population growth forecast



Resim 2. Bina inşa teknikleri gelişimi
Figure 2. Development of building construction techniques

Bir binayı oluşturan strüktür ve malzemeler ilgili dönemin özelliklerini yansıtmaktadır. Binanın inşa tekniğini kullanılan strüktür sistemi belirlemektedir. Binanın strüktür sistemi bina yükünü binanın temeline daha sonra ise zeminine aktaran sistemdir (Ching, 2001). İnşaat yöntemlerinde yaşanan teknolojik gelişmeler ile binalarda kullanılan sistemler çoğunlukla malzemelerin cinsine, yapısal özelliğine, yapım tekniğine ve üretim yöntemine göre ayrılmaktadır. Bu sistemler yapısal özelliklerine göre incelendiğinde yığma sistem, iskelet sistem ve karma sistemler olarak ayrıldığı görülmektedir. Yığma sistem barınma ihtiyacının karşılanması için kullanılan en eski sistemlerden biridir. Bu inşaat tekniği taşıyıcı özelliğe sahip küçük boyutlardaki malzemelerin taşıyıcı olarak kullanılmasına dayanmaktadır. Bu malzemeler taş, tuğla ya da kerpiç olabilir ve blok halde kullanılmaktadır. Çoğunlukla ise harç ile birbirine yapıştırılmaktadır. İskelet sistem ise binaya ait yüklerin birbirine bağlanan yatay ve düşey taşıyıcılar ile zemine aktarıldığı sistemdir (Yergün, 2002). Bu sistem çelik, betonarme ya da ahşap malzeme ile oluşturulmaktadır. Bu sistemlere ek olarak iki sistemin bir arada kullanıldığı karma sistem ile de binalar inşa edilmektedir (Şekil 3) (Sümer Haydaraslan, 2023; Yergün, 2002).

Bina sektöründe bugün en yaygın kullanılan teknik betonarme iskelet sistemi ile binaların inşa edilmesidir. Şekil 3'te verilen taş yığma yapı örneğinde Türkiye'de yaygın olarak bulunan kövke, pomza, küfeki vb. olarak adlandırılan taş ile yığma binanın oluşturulduğu

görülmektedir. Kerpiç yığma tekniği görselinde bölgelere göre içeriği değişkenlik gösteren harcın güneşte kurutularak oluşturulduğu tuğla formundaki kerpiç ile binanın oluşturulduğu görülmektedir. Tuğla yığma görselinde pişmiş kil esaslı topraktan oluşturulan yığma yapı görülmektedir. Ahşap, çelik ve betonarme iskelet sistem görsellerinde taşıyıcı iskelet sisteminde malzeme değişikliği ile strüktürün oluşturulduğu görülmektedir. Farklı bina inşa tekniklerinin bir arada kullanıldığı karma sistem ile de binalar inşa edilmektedir.

Dijital Fabrikasyon İnşa Teknikleri

Bina inşa etme yöntemleri, yaşam şartlarının değişmesi ve teknolojinin gelişmesi ile geçmişten günümüze büyük değişim göstermiştir. Binalarda yaşanan köklü değişimler; yerleşik hayata geçilmesi (Tarım Devrimi) ve beton ve çeliğin binalarda kullanımı (Endüstri 1.0) ile olmuştur. Diğer beklenen köklü değişim ise bugünlerde sıklıkla gündeme gelen Endüstri 4.0 ile binaların dijital fabrikasyon ile inşa edilme potansiyelidir. Yapılan çalışmalar otomasyon alanında gerçekleşen hızlı ilerleme ile on yıl içinde inşa etme yöntemlerinde büyük değişimler yaşanacağını ön görmektedir. Ayrıca yeni teknolojiler ile bina inşaatında kullanılan yapı bileşenlerinin ve inşaat süreçlerinin olumlu anlamda gelişeceği ön görülmektedir (Dong ve Yu, 2021; Zhu ve ark., 2021; Gebhard ve ark., 2021).

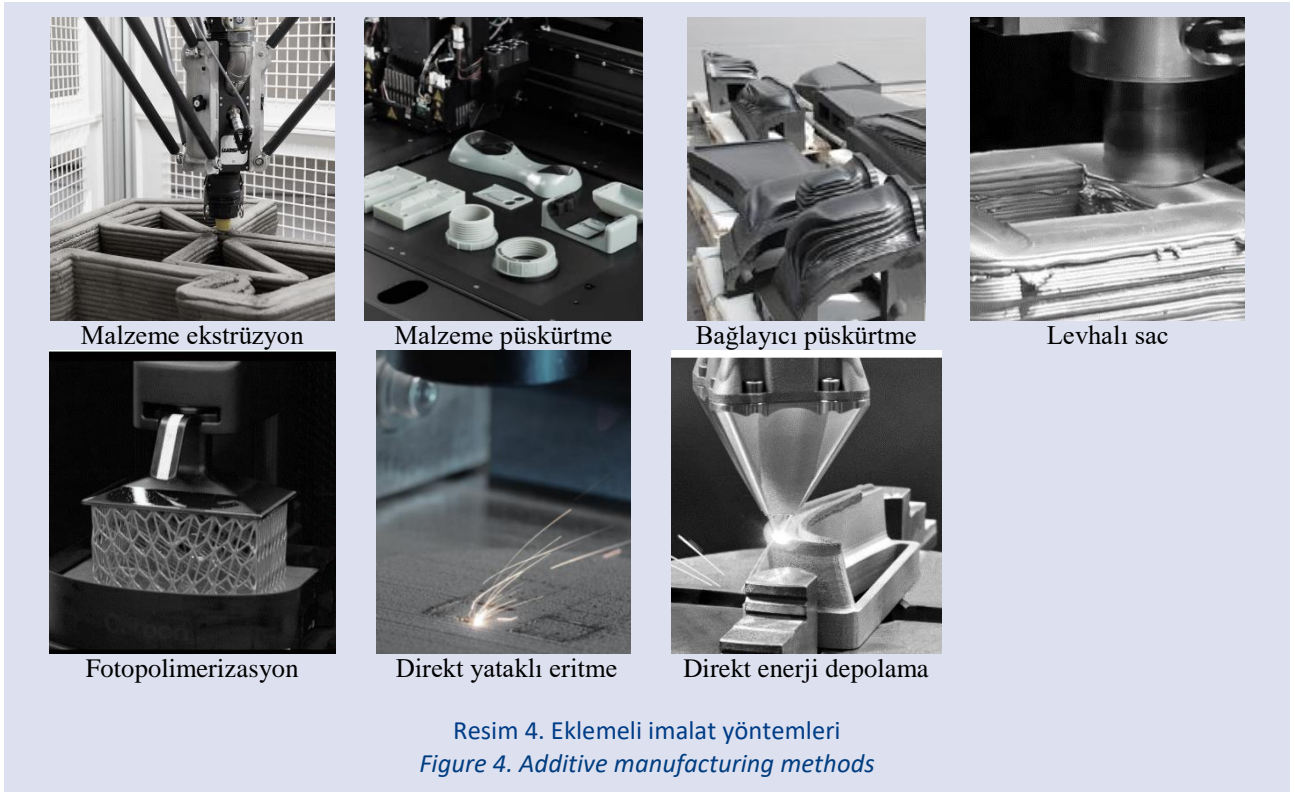
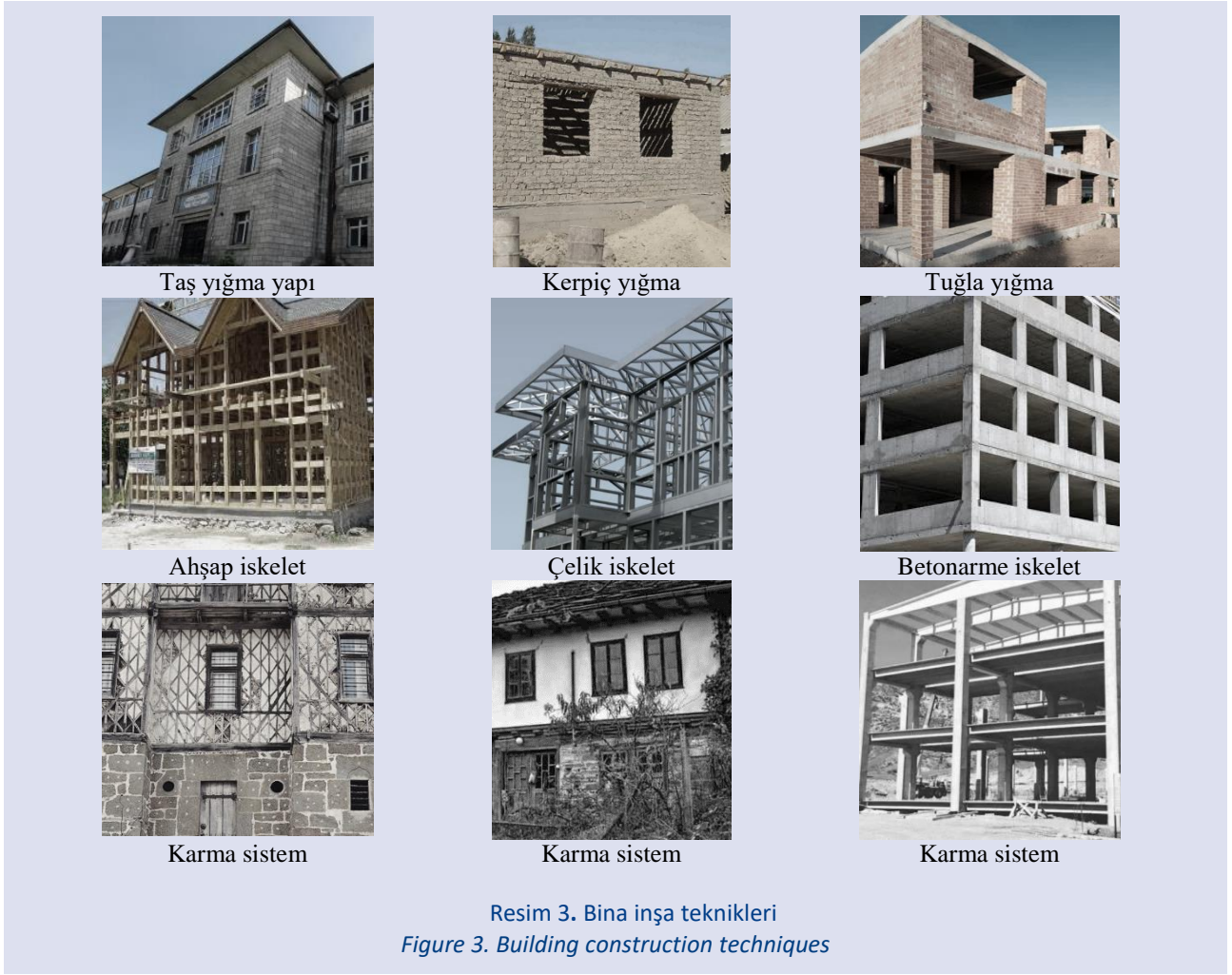
Dijital fabrikasyon en basit tanımı ile bilgisayar ortamında tasarlanan bir nesnenin bir makine kullanılarak üretilmesi temeline dayanmaktadır. Bu üretim yönteminin binalarda en yaygın kullanımı eklemeli imalat ile üretimdir. Eklemeli imalat yöntemleri ASTM International Committee F42 'Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies' e göre yedi kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoriler; malzeme ekstrüzyon, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, levhalı sac, fotopolimerizasyon, direkt yataklı eritme, direkt enerji depolama 'dır (ASTM, 2023). Yöntemlerin çalışma prensipleri şeması Şekil 4'te verilmiştir (Tofail ve ark., 2018; Gibson ve ark., 2010; Cesaretti ve ark., 2014; Will ve ark., 2008; Griffin ve ark., 1995; Wolf ve ark., 2022; Li ve ark., 2022).

Malzeme ekstrüzyon tekniği, eklemeli imalatta ekstrüzyon, erimiş bir parçanın katman katman yeniden dökülmesi ile oluşturulan işlemdir (Tofail ve ark., 2018; Gibson ve ark., 2010). Bu teknikte hammadde ısı ile sıvılaştırılmakta ve sıra halinde dökülmektedir (Crump, 1992). Bugün en yaygın kullanılan 3D baskı yöntemlerinden biridir. Bu yöntemin maliyeti diğer yöntemlere kıyasla azdır (Wolf ve ark., 2022). Malzeme püskürtme tekniği ise, sıvı ya da erimiş malzemenin püskürtülerek imalat yapılması esasına dayanan bir yöntemdir. Diğer bir eklemeli imalat tekniği bağlayıcı püskürtme tekniğidir. Bu teknikte toz bileşenler ısı ya da bağlayıcı ile birleştirilmektedir. Baskı alanında toz katmana bağlayıcılar uygulanarak nesne ortaya çıkartılır (Cesaretti ve ark., 2014; Will ve ark., 2008). Levhalı sac tekniği ise, eklemeli ve çıkarmalı imalat tekniğinin ara kesitindedir. İnce levha formundaki farklı malzeme özelliği gösteren folyoların işlenmesi tekniğine dayanmaktadır (Griffin ve ark., 1995). Fotopolimerizasyon tekniğinde, polimerize olabilen reçine özellikli malzemenin farklı özellikteki ışık kaynağının etkisi ile üretim yapılmaktadır (Hull, 1986). Yöntemin ölçeği büyük olan çözümlerde yavaş kalması inşaat sektöründe kullanımını kısıtlamaktadır (Wolf ve ark., 2022). Diğer bir teknik olan direkt yataklı eritme tekniğinde, toz formdaki çeşitli malzemeler (seramik, metal vb.) lazer, elektron ışını gibi bağlayıcı kullanılarak katman katman kaynaştırılmaktadır (Deckard, 1989). Son teknik olan direkt enerji depolama tekniği ise, kullanılan malzemenin püskürtülmesi ve enerji kaynağı ile eritilerek üretim yapılması esasına dayanır (Li ve ark., 2022).

Eklemeli imalat endüstriyel imalatın yapıldığı tüm sektörlerde kullanılmaktadır (Chua ve Leong, 2014; Mohsen, 2020). Endüstride kullanılan imalat teknikleri ile kıyaslandığında eklemeli imalat tekniğinde bir ürünün üretiminde atık miktarı azdır (Jiang ve ark., 2018). Ayrıca eklemeli imalat bir ürünün yerinde üretimine imkan vermesinden dolayı üretim için taşımacılığı azaltmaktadır. Bu sayede taşımacılık kaynaklı CO₂ salınımının azalması da ön görülmektedir (Jiang ve ark., 2017). Eklemeli imalat Endüstri 4.0 olarak adlandırılan çağın temelini oluşturmaktadır. Bu imalat tekniği tüm sektörlerin üretim hattını değiştirmektedir. İnşaat sektöründe de eklemeli imalat tekniğinin kullanıldığı birçok çalışma ve uygulama yapılmaktadır (Cesaretti ve ark., 2014). Barınma ihtiyacının en temel ihtiyaç olması, inşaat sürelerinin uzun ve çok aşamalı olmasından dolayı birçok ülke bu konuda çalışmalar yapmaktadır (Khajavi ve ark., 2021). Yapılan çalışmalar inşaat sektörünün yeni teknoloji ve tekniklerin kullanımında büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle 25

yıldan daha uzun süredir eklemeli imalat konusunda yapılan çalışmalar havacılık, otomobil gibi sektörlerde olduğu gibi yeni teknoloji girdileri ile büyümeye devam etmektedir (Chua ve Leong, 2014; Mohsen, 2020; Khoshnevis, 2004). Eklemeli imalatın daha çevreci ve düşük maliyetli olması konusundaki çalışmalar inşaat sektörü için önemlidir.

Eklemeli imalat tekniği, binaların yapımında 1997 yılından bu yana kullanılmaktadır (Pegna, 1997). Eklemeli imalatın binalarda kullanımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Eklemeli imalat konusunda yapılan bir çalışmada inşaat bu tekniğin kullanım potansiyelini incelenmiştir. Çalışma ile tekniğin çevresel sürdürülebilirlik açısından sağladığı yararları ulaşımlardır. Ayrıca açık kodlu üretim tekniklerinin mimari tasarımlarda özgür yaklaşıma katkı sağlayacağı belirtilmiştir (Ghaffar ve ark., 2018). Yapılan başka bir çalışmada eklemeli imalatta ekstrüzyon tekniğine dayanan 3D basım tekniği ile bina yapımında kullanılan harç ile ilgili çalışılmışlardır. Çalışmanın sonunda statik dayanımı yüksek bir harç elde etmişlerdir. Çalışmada geleneksel inşaat yöntemleri ile 3D basım tekniğinin bir arada kullanımının mümkün olduğunu belirtmişlerdir (Panda ve ark., 2017). Eklemeli imalatta ekstrüzyon tekniğine dayanan 3D basım tekniği en yaygın kullanılan tekniklerden biridir. Bu teknikte malzeme olarak inşaat en yaygın kullanılan beton malzeme tercih edilmektedir. Ekstrüzyon tekniğinde kullanılan harçların teknik özelliklerini ve uygulanma şekillerini inceleyen bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada harçların çekme, gerilim, viskozite vb. özelliklerinin baskıya etkileri incelenmiştir (Saruhan ve ark., 2022). Ekstrüzyon tekniği ile ilgili yapılan başka bir çalışmada değişken kalınlıktaki inşaat bileşenlerin üretimi için sabit genişlikte filaman kullanılmaması konusu üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada ekstrüzyonun kontrollü kullanımını öneren bir yöntem geliştirilmiştir (Yuan ve ark., 2022). Ekstrüzyon basım tekniği ile ilgili yapılan başka bir çalışmada bu tekniğin avantaj ve dezavantaj incelemiştir. Ayrıca tekniğin potansiyelleri anlatılmıştır (Kazemian ve Khoshnevis, 2021). Eklemeli imalat 3D basım tekniğinde diğer kullanılan yöntemlerden biri püskürtme tekniğidir. Bu teknikte bağlayıcı madde püskürtülerek basım yapılır. Bu konuda yapılan çalışmada kullanılan malzemenin oranlarında değişim yapılarak basınç dayanımının artırılması için çalışılmıştır. Çalışmanın sonunda basılan ürünün basınç dayanımı artmış ve binalar için kullanım olasılığı artırılmıştır (Park ve ark., 2021). Bağlayıcı kullanılarak yapılan başka bir çalışmada beton esaslı malzemenin yaygın kullanımının artırılması amaçlanmıştır. Çalışma ile malzemenin basınç dayanımı ve 3D baskı ile basılabilirliği artırılmıştır (Xia ve Sanjayan, 2016). Literatür incelendiğinde fotopolimerizasyon ve levha laminasyon alanındaki çalışmaların inşaat sektörü dışında kaldığına ulaşılmıştır. Bu alanda yapılan çalışmaların inşaatın ölçeğinin büyük olması nedeni ile bu tekniklerin kullanılmadığı belirtilmiştir (Camacho ve ark., 2018). Bir diğer eklemeli imalat tekniği olan toz yataklı füzyonun ise inşaatta kullanıldığı görülmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde bu tekniğin çelik strüktürde kullanıldığı görülmektedir (Rosenfield, 2023; Galjaard ve ark., 2014; Joosten, 2015). Direkt enerji depolama yönteminin inşaatta kullanımı incelendiğinde ise toz yataklı füzyonda olduğu gibi çelik parça üretimde kullanıldığı görülmektedir (Şekil 5) (Jayathilakage ve ark., 2020; Kruger ve ark., 2020; XtreeE, 2023; Ye ve ark., 2021; Feucht ve ark., 2022).





Ekstrüzyon tekniğine dayanan 3D basım örnekleri (a)



Toz yataklı füzyon tekniğine dayanan 3D basım örnekleri (b)

Resim 5. Ekstrüzyon tekniğine ve Toz yataklı füzyon tekniğine dayanan 3D basım örnekleri
Figure 5. 3D printing examples based on extrusion technique and powder bed fusion technique



(a)



(b)

Resim 6. Ekstrüzyon tekniği ile bina 3D basım örnekleri
Figure 6. Creating 3D printing samples with extrusion technique

Ekstrüzyon tekniğine ve Toz yataklı füzyon tekniğine dayanan 3D basım örnekleri incelendiğinde binalarda kullanımı konusunda birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Ekstrüzyon tekniğinde yapılan 3D basımlarda çoğunlukla çimento esaslı malzemeler kullanılmıştır. Çalışmalarda basılan ürünlerin statik, ısıl ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Toz yataklı füzyon tekniğine ait çalışmaların son yıllarda hızlandığı

görülmektedir. Ekstrüzyon tekniğine göre daha kapsamlı olan bu teknikte binaların ara eleman parçaları, çelik köprüler ve taşıyıcı özelliği olan elemanlar üretildiği görülmektedir.

Geleneksel ve Dijital Fabrikasyon Tekniğiyle Bina İnşasının Karşılaştırılması Olarak İncelenmesi

Binaların inşasında bugün en yaygın kullanılan teknik geleneksel inşa tekniklerinden betonarme iskelet sistemdir. Dijital fabrikasyon teknikleri ile bina inşası incelendiğinde ise en yaygın teknik, ekstrüzyon yöntemi ile 3D baskı yapılmasıdır. 3D baskı ile evlerin basılması süreci 1997 yılında geliştirilmiştir (Khoshnevis ve Dutton, 1998). Daha sonra 2007 yılında geliştirilen yöntem ile 2014 yılında 200 m² taban alanına sahip bir ev basılmıştır (Şekil 6 (a)) (Kira, 2023). Bu basımı gerçekleştiren firma 1100 m² taban alanına sahip 5 katlı bir apartmanın 3D yazıcı ile basımını gerçekleştirmiştir (Şekil 6 (b)) (Kira, 2023). 2015 yılında tasarlanan büyük ölçekli bir 3D yazıcı ile kale basımı gerçekleştirilmiştir (Rudenko, 2023). İnşaat alanında kullanımının ciddi potansiyeller taşıdığına belgelenmesi bu alandaki çalışmaları hızlandırmıştır (Ma ve Wang, 2018). İnşaat sektörünün diğer sektörlerle kıyasla nihai ürününü ortaya çıkarması daha yavaş kalmaktadır. Bu nedenle mevcut yöntemlerle binaların inşa edilme hızı barınma ihtiyacının karşılanması için yeterli değildir. 3D Baskı teknolojisi ile binaların daha hızlı inşa edilmesinin mümkün olması bu teknolojiye olan talebi artırmıştır (Zhang ve ark., 2019). Yapılan çalışmalar geleneksel inşaat yöntemine göre dörtte biri kadar zamanda bu teknoloji ile bina üretiminin gerçekleştirilebileceğini ortaya koymuştur (Ma ve Wang, 2018; Batikha ve ark., 2022). İnşaat sektöründe 3D baskı konusunda çalışmaların hızlanmasının en önemli nedenlerinden birinin hızlı inşaat süreçleri olduğu belirtilmektedir (Zhang ve ark., 2019). Ayrıca geleneksel inşa yöntemlerine göre daha hızlı üretime izin vermesi, afetlerden etkilenenlerin kısa sürede barınma birimlerinin kullanılmasına olanak sağlayabilmektedir (Robayo-Salazar ve ark., 2023). 3D baskı teknolojisi ile bir bina bütünüyle inşa edilmese bile prefabrik modüllerin inşası da zaman açısından kazanç sağlamaktadır. Çalışmada binaların geleneksel inşa teknikleri ve dijital fabrikasyon teknikleri ile üretimi sürdürülebilirlik, statik, maliyet ve üretim esnekliği açısından incelenmiştir.

Sürdürülebilirlik

İnşaat sektörü toplamda tüketilen enerjinin %40'ını tüketmektedir. Avrupa genelinde yapılan çalışmalara göre ise inşaat sektöründe tüketilen enerji oranının %60 olduğu ve bu oranın %50'sinin binaların ısıtma ve soğutması için kullanıldığına ulaşılmıştır (IEA, 2023). Ayrıca atmosfere salınan CO₂ miktarının %38'i inşaat sektörü kaynaklıdır (De Schutter ve ark., 2018). 3D baskıya uygun geliştirilen malzemeler ve dijital fabrikasyon yöntemleri geleneksel inşaat tekniklerine göre enerji tüketimi daha az ve sürdürülebilir olabilmektedir. Yapılan bir çalışmada cüruf, silikat bazlı aktivatör ve ince kumdan oluşan bir malzeme geliştirilmiştir. Çalışmada bu malzemenin bina yapımına uygun sürdürülebilir bir malzeme olduğuna ulaşılmıştır (Xia ve Sanjayan, 2016). 3D baskıya uygun geliştirilen harçlar, binaların enerji tüketimini azaltacak karışımlar ile ısı transferi azaltılıp geleneksel inşa yönteminde kullanılan ısı yalıtımı gibi davranış sergileyebilmektedir (Pessoa ve ark.,

2021). Yapılan başka bir çalışmada bir banyo biriminin prefabrik olarak inşa edilmesi ve 3D baskı ile basılmasının etkileri karşılaştırılmıştır. 3D ile basım yapıldığında maliyetin %34.1 daha düşük olduğuna, CO₂ salınımının prefabrik inşaya göre %85.9 daha az olduğuna ve enerji tüketiminin de %87.1 daha az olduğuna ulaşılmıştır (Weng ve ark., 2020). İnşaat katı atık üretiminde de önde olan sektörlerden biridir (Marzouk ve Azab; 2014). Çevreye verilen zararın azaltılması sektör açısından önemlidir. Artan nüfus, kentleşme oranı ve sanayinin büyümesi ile katı atık ciddi bir sorun haline gelmiştir (Hoornweg ve Bhada-Tata, 2012). Yapılan çalışmalar atık miktarı konusunda önlem alınmazsa bu atık miktarının 2050 yılına kadar %70 oranında artış göstereceğini tahmin etmektedir (World Bank, 2018). 3D yazıcılar ile bina üretiminde yaygın olarak harcın direkt basılması tekniğine dayanması, daha az atık oluşturmaktadır. Ayrıca ömrünü tamamlayan binaların yapı söküm süreçlerine ilişkin atık miktarları incelendiğinde 3D yazıcı ile basılan binaların Agenda 2030'a göre Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine uygun olduğu belirtilmiştir (UN, 2023).

Statik

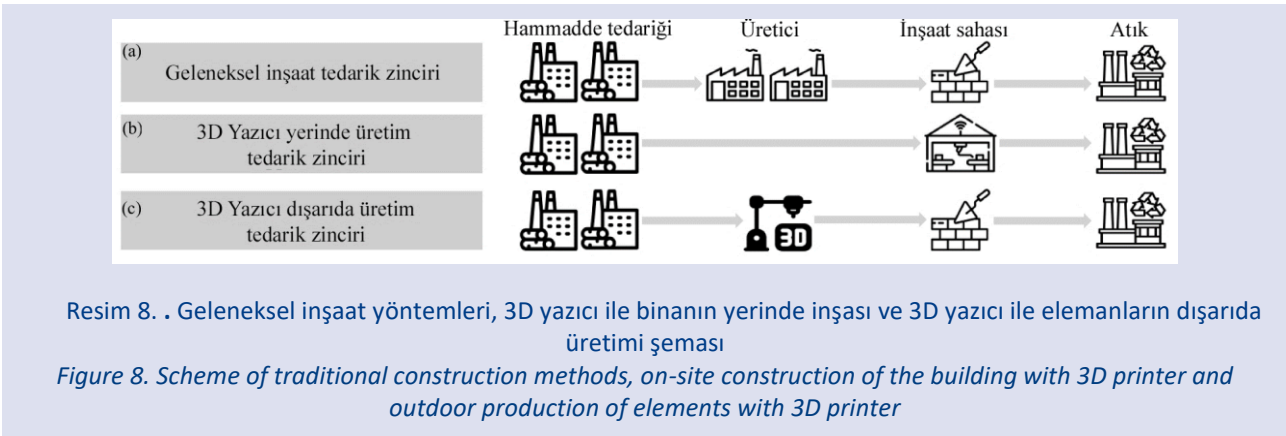
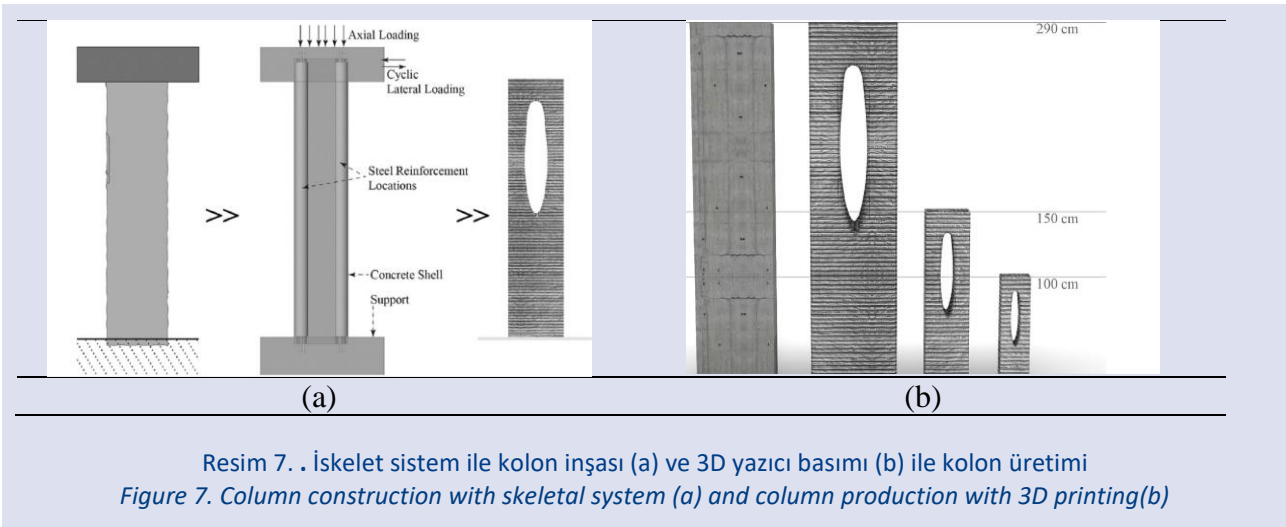
Binaların 3D yazıcı ile üretiminde uyumlu malzeme karışımlarının oluşturulması basım ve statik dayanım için en önemli parametrelerden biridir. Baskıda kullanılacak malzemelerin içerik özelliklerinin optimize edilmesi gerekir. Özellikle büyük ölçekli binalar için 3D basıma uygun malzeme içeriğinin hazırlanması karmaşık bir süreçtir (Ma ve Wang, 2018). 3D baskı için farklı özellikteki birçok malzeme ve bu malzemelerin bir araya getirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Nerella ve ark., 2016; Lim ve ark., 2012; Feng ve ark., 2015; Gosselin ve ark., 2016). Ancak 3D baskıda malzeme seçimi, tasarımı ve bileşenleri açısından evrensel bir standart bulunmamaktadır. Standartın bulunmaması harç içeriği belirlenmesinde ve döküm sonucu statik sorunların oluşmasına neden olmaktadır (Yuan ve ark., 2022). Binada kullanılan kolonların iskelet sistem ve 3D baskı ile üretiminin karşılaştırıldığı bir çalışma yapılmıştır (Şekil 7) (Alabbasi ve ark., 2023). Çalışmanın sonunda 3D basım teknolojisi ile daha az malzeme kullanılarak yapısal sağlamlığı daha güçlü olan kolonların üretilebileceğine ulaşılmıştır (Alabbasi ve ark., 2023). Ancak 3D basım teknolojisi ile daha fazla çalışmanın yapılması ve testlerin geliştirilmesi vurgusu yapılmıştır.

Maliyet

Bina inşaatında bugün en yaygın kullanılan malzeme betondur. Beton maliyeti yüksek bir malzemedir. Bina inşaatında kullanılan malzeme miktarı konusunda yapılan çalışmalar geleneksel yöntem ve 3D baskıda kullanılan malzeme miktarlarını incelemiştir (Weng ve ark., 2020; Alabbasi ve ark., 2023). 3D yazıcı ile basılan duvarın maliyet açısından %78 daha avantajlı olduğuna ulaşılmıştır. Ayrıca bir konut maliyetinin %20 oranında düşülmesinin mümkün olabileceğine ulaşılmıştır (Ma ve Wang, 2018). İnşaat sektörüne 3D yazıcıların kullanımının girmesi ile inşa sahasına ekipmanın taşınması konusu gündeme gelmiştir. Lojistik 3D yazıcıların kullanımında en

zayıf noktalardan biri olarak gösterilmektedir. İnşaat sektöründe lojistik maliyetlerinin analizi için farklı bileşen kombinasyonları bulunmaktadır (Munir ve Karki, 2021; Said ve El-Rayes, 2011; Engblom ve ark., 2012). Çalışmalar çoğunlukla lojistik süreç simülasyonları (Vidalakis ve Tookey, 2006), lojistik maliyetini oluşturan parametreler (Amornsawadwatana, 2005) ve tedarik zincirinin lojistiği (El Moussaoui ve ark., 2021) konularını incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda inşaatta kullanılan malzeme maliyetinin %14,7'sinin lojistik maliyeti olduğuna ulaşılmıştır (Besklubova ve ark., 2023). Bu çalışmalarda bina inşasında kullanılacak malzemelerin inşaat alanına taşınması konusunda çalışılmıştır. Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde çalışmalarda yerinde baskı yapılan 3D yazıcıların boyutlarının küçülmesi ve inşası yapılan binanın da küçülmesinin nedeninin 3D yazıcıların

lojistiği olduğu belirtilmiştir (Chen, 2016; El-Sayegh ve ark., 2020). Diğer bir yandan geleneksel inşa tekniklerinde atık girdilerinin lojistiği dikkate alındığında 3D baskı teknolojilerinin bu konuda öne çıktığı görülmektedir. Yapılan bir çalışmada aynı uzaklıktaki hammadde ile bir binanın inşa süreci geleneksel inşaat yöntemleri, 3D yazıcı ile binanın yerinde inşası ve 3D yazıcı ile elemanların dışarıda üretimi maliyet açısından incelemesi yapılmıştır (Şekil 8) (Besklubova ve ark., 2023). Çalışma sonucunda tek katlı bina üretimi için 3D yazıcı ile yerinde üretimin daha avantajlı olduğuna ulaşılmıştır (Besklubova ve ark., 2023). Bu alanda yapılan çalışmalar 3D yazıcılarının lojistiğinin iyileşme potansiyelinin yüksek olduğunu ve geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir (Craveiroa ve ark., 2019; Despeisse ve ark., 2017; Kietzmann ve ark., 2015).



Üretim Esnekliği

3D ile basılan binalarda geleneksel inşa tekniğine göre daha az nitelikli iş gücüne ihtiyaç duyulmaktadır (Zhang ve ark., 2019). Bu durum insan kaynağına olan ihtiyacı azaltmasının yanı sıra iş kazalarının önüne de geçmektedir (Şekil 9). Böylelikle geleneksel inşaat tekniklerine göre daha güvenli bir üretim yöntemi olarak görülmektedir (Graser ve ark., 2023). Ancak 3D basımın uygulanmasında kullanılacak yazıcının nozul boyutları, ekstrüzyon basıncı,

basımın hızı gibi parametrelerin bir standardının olmaması her ne kadar geleneksel inşaat yöntemlerine göre iş gücü açısından kolaylık potansiyeli de olsa da daha fazla deneysel çalışmanın yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Geleneksel inşa yönteminde kalıba ve iş gücüne ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 9 (a)) (Liv d., 2022). Bu durum inşaatta üretimin zorlaşmasına, iş gücü ve kalıp ihtiyacı kaynaklı maliyet artışına neden olmaktadır. Kalıbın seçimi, tasarım, statik ve istenilen görsel tasarım

açısından önemlidir. Özellikle kompleks tasarıma sahip geometrilerde halihazırda kullanılan kalıp sistemlerinden sonuç alma süreci zor ve uzun olmaktadır. Mevcut kalıp sistemlerinin esnek tasarıma uyumluluğu azdır. Bu konuda yapılan bir çalışmada dijital fabrikasyon tekniklerinin kalıp imalatı konusunda oldukça yararlı olduğuna ulaşılmıştır. Özellikle kompleks geometrilerde zaman, iş gücü ve maliyet açısından dijital fabrikasyon teknikleri öne çıkmaktadır (Şekil 9 (b)) (Liv d., 2022). Örneğin Şekil 10'da kompleks tasarıma sahip bir çatı formu için ahşap kalıp oluşturulması ile çatı formu inşa edilmekte iken (Bösiger, 2011) dijital fabrikasyon tekniği ile geliştirilmiş polistiren sert köpük (eps) oyularak (Dombernowsky ve Sandergaard, 2012) kalıp oluşturması görülmektedir. Şekil

10 (a)' da beton kompleks çatı formunun betona aktarılabilmesi için oluşturulan ahşap kalıbı ve çatı üzerinde en az 3 kişinin çalıştığı görülmektedir. Şekil 10 (b)'de ise dijital fabrikasyon teknikleri ile eps'in oyularak üzerine beton dökümü için hazırlandığı ve insan gücü olmadığı görülmektedir (Dombernowsky ve Sandergaard, 2012). Oyulan köpük kalıba harç dökümü yapıp nihai form elde edilebilmektedir. Daha sonra inşa alanına taşınması ve montajı yapılmaktadır. Bu durum dijital fabrikasyon tekniğinin üretim esnekliği konusunda avantajını ortaya koymaktadır.



Resim 9. (a) Geleneksel betonarme sistem bina inşası ve (b) 3D Baskı ile bina üretimi
Figure 9. (a) Traditional reinforced concrete system building construction and (b) building production with 3D Printing



Resim 10. (a) Kompleks çatı formu ahşap kalıp oluşturulması, (b) EPS köpüğün oyularak kalıp oluşturulması
Figure 10. (a) Creating a complex roof form wooden mold, (b) Creating a mold by carving EPS foam

Araştırma Bulguları

Bu çalışmada binaların inşasında yeni inşaat teknolojilerinin kullanımı incelenmiştir. Bu kapsamda geleneksel inşa teknikleri ve dijital fabrikasyon inşa tekniklerinin avantaj ve dezavantajları sürdürülebilirlik, statik, maliyet ve üretim esnekliği açısından ele alınmıştır (Tablo 1). Sürdürülebilirlik; CO₂ salınımı, ısı yalıtımı, katı atık ve yapı söküm olarak değerlendirilmiştir. Dijital fabrikasyon teknikleri

sürdürülebilir malzeme kullanımına olanak sağlaması ve yerinde üretim tekniği ile daha az atık çıkarmasından dolayı CO₂ salınımı açısından avantajlıdır. Geleneksel inşa tekniklerinde yaygın olarak betonarme sistem ile binaların inşa edilmesi ve ısı bölgelerine göre üzerine ısı yalıtım uygulanması yapılmaktadır. Dijital fabrikasyon tekniğinde ise harcın ısı yalıtım özelliği artırılarak ayrıca bir yalıtım uygulamasına gerek kalmadan uygulama yapılabilmektedir (Pessoa ve ark., 2021). Dijital fabrikasyon tekniklerinde bina yapımında kullanılan en

yaygın teknik olan 3D basım tekniği ile binaların yerinde üretimi yapılmaktadır. Bu yöntemde malzemenin tamamı kullanılmakta ve atık miktarı minimum olmaktadır. Ayrıca sürdürülebilir malzeme kullanımı yapı söküm yapıldığında geri dönüşüme olanak vermektedir. Ancak geleneksel inşaat yönteminde standartların gelişmiş olması, bu yöntem sürdürülebilirlik açısından dezavantajlı olsa bile uygulama kolaylığı ile öne çıkmaktadır.

Geleneksel inşaat teknikleri statik açıdan incelendiğinde dijital fabrikasyon tekniğine göre avantajlıdır. Betonarme iskelet sistem çok katlı binaların depreme dayanımı yüksek olarak inşa edilmesine imkan vermektedir. 3D basım tekniğinde ise yaygın olarak tek kat inşaatı gerçekleştirilmektedir. Ancak betonarme sistemde kalıp kullanımı gerekliliği malzeme ve iş gücü ihtiyacını artırmaktadır. Diğer bir yandan geleneksel inşaat yöntemi için statik açıdan da standartların geliştirilmiş olması uygulayıcı açısından tercih

sebebi olmaktadır. Geleneksel inşaat yöntemlerinin ekipman ihtiyacı fazladır. Ayrıca kalıp kullanımı maliyeti artırmaktadır. Diğer bir yandan nitelikli insan gücüne olan ihtiyaç geleneksel inşaat tekniklerinde maliyeti artırmaktadır. Ancak geleneksel inşaat yöntemleri uzun yıllardır kullanılıyor olmasından dolayı az gelişmiş ekipmanlar kullanılarak da bina inşaatı yapılabilmektedir. Dijital fabrikasyon teknikleri ise yüksek ar-ge kapsamındadır. Dijital fabrikasyonda ar-ge'nin tamamlanması ile işlerin maliyeti azalır uygulama kolaylığı artıyor olsa da ilk yatırım maliyeti yüksektir. Geleneksel inşaat tekniklerinde rasyonel formların dışında kalan formların üretimi çeşitli zorluklar barındırmaktadır. Bu zorlukların başında esnek kalıp oluşturulmasının zor olması gelmektedir. Esnek kalıp oluşturulması tasarımcıların bina inşaat aşamasını planlamalarını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca dijital fabrikasyon teknikleri kalıba ihtiyaç duyulmadan da 3D basım ile binaların üretilmesi avantaj sağlamaktadır.

Tablo 1. Geleneksel ve dijital fabrikasyon tekniği ile bina inşaat yöntemlerinin karşılaştırılması

Table 1. Comparison of construction method with traditional and digital manufacturing techniques

		Geleneksel İnşaat Teknikleri	Dijital Fabrikasyon İnşaat Teknikleri
Sürdürülebilirlik	CO ₂ Salınım	<ul style="list-style-type: none"> Yenilenemez malzeme, Daha fazla enerji tüketimi, Atık miktarının fazla olması. 	<ul style="list-style-type: none"> Sürdürülebilir malzeme kullanım imkanı, Daha az enerji tüketimi, Atık miktarının az olması.
	Isı Yalıtımı	<ul style="list-style-type: none"> Ek ısı yalıtım köpüğü uygulanması, Standart ürünlerin geliştirilmiş olması, Ürünler ulaşımın kolay olması. 	<ul style="list-style-type: none"> Malzeme içinde ısı yalıtım karışımı ve boşluklu yapı ile ek yalıtıma ihtiyaç olmaması, Daha fazla deneysel çalışma ihtiyacı, Standart ürün olmaması.
	Katı Atık	<ul style="list-style-type: none"> Atık miktarı fazla, Doğal çevreye daha fazla zarar vermesi. 	<ul style="list-style-type: none"> Malzemenin tamamı kullanılıyor daha az atık miktarı, Doğal çevreye zararı daha az olması.
	Yapı Söküm	<ul style="list-style-type: none"> Geri dönüşüm oranı az, Doğal çevreye zararı fazla. 	<ul style="list-style-type: none"> Geri dönüştürülebilir malzeme kullanım imkanı fazla, Doğal çevreye zararı daha az olması.
Statik	Dayanım	<ul style="list-style-type: none"> Harç karışımı standardı var, Statik dayanımı fazla. 	<ul style="list-style-type: none"> Harç karışımı standardı yok, Statik dayanımı fazla, Daha fazla deneysel çalışma ihtiyacı.
	Ekipman	<ul style="list-style-type: none"> Ekipmana ulaşmak kolay, Ekipman ihtiyacı fazla. 	<ul style="list-style-type: none"> Ekipmana ulaşmak zor, Ekipman ihtiyacı az.
	Kalıp	<ul style="list-style-type: none"> Kalıp ihtiyacı fazla, Esnek tasarıma uygun kalıp yok, Nitelikli insan ihtiyacı fazla. 	<ul style="list-style-type: none"> Kalıp gerekli değil, Esnek tasarıma uygun kalıp yapılabilir, Nitelikli insan ihtiyacı az.
	Kat sayısı	<ul style="list-style-type: none"> Çok katlı bina inşasına uygun. Standartların gelişmiş olması. 	<ul style="list-style-type: none"> En fazla 5 kata kadar bina inşa edilebilir, Daha fazla deneysel çalışma ihtiyacı,
	Standart	<ul style="list-style-type: none"> Standart var. 	<ul style="list-style-type: none"> Standart yok.
Maliyet	Ekipman	<ul style="list-style-type: none"> Çok fazla ekipman ihtiyacı. ArGe ihtiyacı az. 	<ul style="list-style-type: none"> Az sayıda ekipman ihtiyacı, Yüksek ArGe ihtiyacı fazla.
	Kalıp	<ul style="list-style-type: none"> Kalıp maliyeti fazla. 	<ul style="list-style-type: none"> Kalıp gerekli değil.
	Lojistik	<ul style="list-style-type: none"> Lojistik maliyeti fazla. 	<ul style="list-style-type: none"> Lojistik maliyeti fazla.
	İş gücü	<ul style="list-style-type: none"> Nitelikli insan gücü ihtiyacı fazla. 	<ul style="list-style-type: none"> Nitelikli insan gücü ihtiyacı az.
	Malzeme	<ul style="list-style-type: none"> Malzeme kullanımı fazla. 	<ul style="list-style-type: none"> Malzeme kullanımı az.

Sonuç

Dünya nüfusunun artışı barınma ihtiyacının artmasına neden olmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanmasında inşaat sektörü yetersiz kalmaktadır. Geleneksel inşaat yöntemleri ile bina inşasında binaların inşaat süreleri uzundur. Diğer bir yandan tüketilen toplam enerjinin yüksek oranda binalarda kullanılıyor olması ve enerji kaynağı olarak çoğunlukla

yenilenemez kaynakların kullanımı bu konudaki çalışmaları zorunlu kılmaktadır. Binaların yeni inşaat teknikleri ile inşaatı sürdürülebilirlik, zaman ve maliyet açısından olumlu gelişmeler sunmaktadır. Bu çalışmada binaların daha hızlı inşaat edilmesinde eklemeli imalat teknolojileri kullanımının geleneksel inşaat yöntemlerine göre avantajlı ve dezavantajlı olduğu durumların incelenmesi amaçlanmıştır. Binaların inşaatında yeni inşaat tekniklerinin kullanımı incelenmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Geleneksel inşa yöntemleri son yüzyılda yaygın kullanımda olmasından dolayı bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar bu yöntemin uzun dönem kullanımından kaynaklı üzerine çalışılmış ve yöntemin geliştirilmiş olmasıdır.
- Dijital fabrikasyon teknikleri, binaların geleneksel inşaat yöntemlerine göre daha düşük maliyetli olması, daha az iş gücü ihtiyacı, iş kazalarını azaltması, sürdürülebilirliğe katkı sağlaması, kompleks formlardaki mimari tasarımların uygulanmasına olanak sağlaması açısından inşaat sektörü açısından umut vericidir.
- Dijital fabrikasyon teknikleri inşaat sektöründe ekonomik ve sürdürülebilirlik açısından avantaj sağlamaktadır.
- Dijital fabrikasyon teknikleri ile bina inşasında birçok potansiyele sahip olsa da henüz çözülmemiş sorunları bulunmaktadır. Basımda kullanılacak malzemelerin bir standardının olmaması tercih edilebilirliğini zorlaştırmaktadır. Kullanılacak malzemenin içeriği, dayanımı, erişilebilirliği gibi konuların tekniğin yaygınlaşması için daha fazla akademik ve endüstriyel ölçekte araştırılması gerekmektedir.

Sonuç olarak dijital fabrikasyon ile bina inşaat tekniklerinde malzeme, ekipman ve standartların geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmaların farklı disiplinlerin ortak çalışması ile gelişime ihtiyacı vardır. Yöntem gelişiminin olumlu yönde ilerlemesi ile kullanımının yaygınlaşması konut ihtiyacının azaltılmasında umut vadecidir. Çalışma yeni inşaat teknolojilerinin gelişimi ve kullanım potansiyelinin ortaya koyulması açısından yol gösterici olmuştur.

Kaynaklar

Alabbasi, M., Agkathidis, A., Chen, H. 2023. Robotic 3D printing of concrete building components for residential buildings in Saudi Arabia. *Automation in Construction*, 148: 104751, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104751>.

Amornsawadwatana, S. 2005. Logistics costs evaluation in building construction Project. 5th Industrial-Academic Annual Conference on Supply Chain and Logistics Management, June 24, 2005, Bangkok, Thailand, Book of Proceedings, 77-82.

ASTM International Committee F42. 2023. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. <https://www.astm.org/committee-f42> (Erişim Tarihi: 01.11.2023).

Batikha, M., Jotangia, R., Baaj, M. Y., Mousleh, I. 2022. 3D concrete printing for sustainable and economical construction: a comparative study. *Automation in Construction*, 134: 104087, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104087>.

Besklubova, S., Tan, B. Q., Zhong, R. Y., Spicak, N. 2023. Logistic cost analysis for 3D printing construction projects using a multi-stage network-based approach. *Automation in Construction*, 151: 104863, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104863>.

Bösiger H. 2011. The building of Isler shells. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Madrid.

Brischetto, S., Maggiore, P., Ferro, C. G. 2017. Special issue on additive manufacturing technologies and applications. *Technologies*, 5(3): 58, DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies5030058>.

Camacho, D. D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., Salamone, S. 2018. Applications of additive manufacturing in the construction industry - A forward-looking review. *Automation in Construction*, 89, DOI: 110-119, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>.

Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., Pambaguian, L. 2014.

Building components for an outpost on the lunar soil by means of a novel 3D printing Technology. *Acta Astronautica*, 93: 430-450, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>.

Chen, Z. 2016. Research on the impact of 3D printing on the international supply chain. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016: 1-16, DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/4173873>.

Ching, F.D.K. (2001). Çizimlerle bina yapım rehberi. Yapı Yayın. ISBN 9758599720.

Chua, C.K., Leong, K. F. 2014. 3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications (With Companion Media Pack) of Rapid Prototyping. World Scientific Publishing Co Inc. ISBN: 978-981-4571-40-1.

Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., Bartolod, P. J. 2019. Additive manufacturing as an enabling Technology for digital construction: a perspective on construction 4.0. *Automation in Construction*, 103: 251-267, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011>.

Crump, S.S. 1992. Apparatus and method for creating three dimensional objects. U.S. Patent 5121329.

Deckard, C.R. 1989. Method and apparatus for producing parts by selective sintering, US Patent 4863538A.

De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., Agusti-Juan, I. 2018. Vision of 3d printing with concrete technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, 112: 25-36, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>.

Despeisse, M., Baumers, M., Brown, P., Charnley, F., Ford, S.J., Garmulewicz, A., Knowles, S., Minshall, T., Mortara, L., Reed-Tsochas, F. 2017. Unlocking value for a circular economy through 3D printing: a research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, 115: 75-84, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.09.021>.

Dirican, T., Akyol, A. A. 2019. Anadolu'da Kerpiç Duvar Yapımı Yöntemlerine Ait Bir Derleme Çalışması. *Sanat ve Tasarım Dergisi*, 23: 117-126, DOI: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sanatvetasarim/issue/46013/578632>.

Dombrowsky, P., Søndergaard, A. 2012. Design, analysis and realisation of topology optimized concrete structures. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 53(4): 209-216, DOI: 10.1007/978-3-319-92294-2_36.

Dong, S., Yu Y. 2021. Numerical and experimental studies on capturing behaviors of the inflatable manipulator inspired by fluidic origami structures. *Engineering Structures*, 245: 112840, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112840>.

El Moussaoui, S., Lafhaj, Z., Leite, F., Fl'echard, J., Lin'eatte, B. 2021. Construction logistics centres proposing kitting service: organization analysis and cost mapping. *Buildings*, 11(3): 105, DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11030105>.

El-Sayegh, S., Romdhane, L., Manjikian, S. 2020. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(2): 1-25, DOI: 10.1007/s43452-020-00038-w.

Engblom, J., Solakivi, T., Töyli, J., Ojala, L. 2012. Multiple-method analysis of logistics costs. *International Journal of Production Economics*, 137(1): 29-35, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.007>.

Feng, P., Meng, X., Chen, J. F., Ye, L. 2015. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. *Construction & Building Materials*, 93: 486-497, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132>.

Feucht, T., Waldschmitt, B., Lange, J., Erven, M. 2022. Additive manufacturing of a bridge in situ. *Steel Construction*, 15(2): 100-110, DOI: 10.1002/stco.202100045.

Galjaard, S., Hofman, S., Ren, S. 2014. New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing. In: *Advances in Architectural Geometry*. Block, P., Knippers, J., Mitra, N. J., Wang, W. (eds.), Springer, Berlin, 79-93.

- Gebhard, L., Mata-Falcón, J., Anton, A., Dillenburger, B., Kaufmann, W. 2021. Structural behaviour of 3D printed concrete beams with various reinforcement strategies. *Engineering Structures*, 240: 112380, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112380>.
- Ghaffar, S.H., Corker, J., Fan, M. 2018. Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution. *Automation in Construction*, 93: 1-11, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. 2010. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer, ISBN 978-1493921126.
- 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, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>.
- Graser, K., Walzer, A. N., Hunhevicz, J., Jähne, R., Seiler, F., Wüst, R., Hall, D. M. 2023. Qualitative technology evaluation of digital fabrication with concrete: Conceptual framework and scoreboard. *Automation in Construction*, 154: 104964, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104964>.
- Griffin, C., Daufenbach, J., McMillin, S. 1995. Solid freeform fabrication of functional ceramic components using a laminated object manufacturing technique. *International Solid Freeform Fabrication Symposium, 1995, Texas, USA, Book of Proceedings*, 17-25.
- Hoorweg, D., Bhada-Tata, P. 2012. *What a waste: A global review of solid waste management*. World Bank, ISBN **978-1464813290**.
- Hull, C.W., UVP, Inc. 1986. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, US Patent 4575330. 46.
- International Energy Agency (IEA) 2023. *Energy Technology Perspectives 2023*. www.iea.org/reports/ (Erişim Tarihi: 20.12.2023).
- Jayathilakage, R., Rajeev, P., Sanjayan, J. 2020. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing. *Construction and Building Materials*, 240: 117989, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117989>.
- Jaquin, P. 2012. History of earth building techniques. In: *Woodhead Publishing Series in Energy*, Hall, M.R., Lindsay, R., Krayenhoff, M. (eds.), Woodhead Publishing, Sawston, UK, 307-323, DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.307>.
- Jiang, R., Kleer, R., Piller, F.T. 2017. Predicting the future of additive manufacturing: a Delphi study on economic and Societal implications of 3d printing to 2030. *Technological Forecasting & Social Change*, 117: 84-97, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.01.006>.
- Jiang, J., Xu, X., Stringer, J. (2018). Support structures for additive manufacturing: a review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4): 64, DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>.
- Joosten, S. 2015. *Printing a stainless steel bridge: an exploration of structural properties of stainless steel additive manufactures for civil engineering purposes*. MSc Thesis, Delft University of Technology, Delft.
- Kazemian, A., Khoshnevis, B. 2021. Real-time extrusion quality monitoring techniques for construction 3d printing. *Construction and Building Materials*, 303: 124520, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124520>.
- Khajavi, S.H., Tetik, M., Mohite, A., Peltokorpi, A., Li, M., Weng, Y., Holmstrom, J. 2021. Additive manufacturing in the construction industry: the comparative competitiveness of 3d concrete printing. *Applied Sciences*, 11 (9): 3865, DOI: <https://doi.org/10.3390/app11093865>.
- Khoshnevis, B., Dutton, R. 1998. Innovative rapid prototyping process makes large sized, smooth surfaced complex shapes in a wide variety of materials. *Materials Technology*, 13(2): 53-63, DOI: <https://doi.org/10.1080/10667857.1998.11752766>.
- Khoshnevis, B. 2004. Automated construction by contour crafting - related robotics and information Technologies. *Automation in Construction*, 13 (1): 5-19, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>.
- Kietzmann, J., Pitt, L., Berthon, P. 2015. Disruptions, decisions, and destinations: enter the age of 3-D printing and additive manufacturing. *Business Horizons*, 58(2): 209-215, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2014.11.005>.
- Kira, B. 2023. WinSun China builds world's first 3d printed villa and tallest 3d printed apartment building. *3d-expo.ru/en/article* (Erişim Tarihi: 02.06.2023).
- Kruger, J., Cho, S., Zeranka, S., Viljoen, C., Zijl, G. V. 2020. 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse. *Composites Part B: Engineering*, 183: 107660, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107660>.
- Li, W., Lin, X., Bao, D. W., Xie, Y. M. 2022. A review of formwork systems for modern concrete construction, *Structures*, 38: 52-63, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.089>.
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., Thorpe, T. 2012. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21: 262-268, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>.
- 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*, 20: 96-111, DOI: <https://doi.org/10.1108/CI-06-2019-0053>.
- Ma, G., Wang, L. 2018. A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12: 382-400, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11709-017-0430-x>.
- Marzouk, M., Azab, S. 2014. Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system Dynamics. *Resources, Conservation and Recycling*, 82: 41-49, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.015>.
- Mohsen, A. 2020. *Design to manufacture of complex building envelopes*. Springer, ISBN 978-3-658-30203-0.
- Munir, Q., Karki, T. 2021. Cost analysis of various factors for geopolymer 3d printing of construction products in factories and on construction sites. *Recycling*, 6(3): 60, DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling6030060>.
- Nerella, V. N., Krause M., Nather M. 2016. Studying printability of fresh concrete for formwork free concrete on-site 3D printing Technology (CONPrint3D). In: *3D Concrete Printing Technology*. Sanjayan, J. G., Nazari, A., Nematollahi, B. (eds.), Springer. Berlin, 13-24.
- Panda, B., Paul, S., Hui, L.J., Tay, Y.W.D., Tan, M.J. 2017. Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. *Journal of Cleaner Production*, 167: 281-288, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.165>.
- Park, K., Min, K., Lee, B., Roh, Y. 2021. Proposal for enhancing the compressive strength of alkali-activated materials-based binder jetting 3D printed outputs. *Construction and Building Materials*, 303: 124377, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124377>.
- Pegna, J. 1997. Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, 5 (5): 427-437, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(96\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(96)00166-5).
- Pessoa, S., Guimaraes, A. S., Lucas, S. S., Simoes, N. 2021. 3D printing in the construction industry - a systematic review of the thermal performance in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141: 110794, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110794>.
- Pica, V. 2017. *Traditional Earth Architecture in the Euro-Mediterranean Region. From Conservation to Knowledge for Sustainable Use*.

- Proceedings of 5th INTBAU International Annual Event, 2004, Milano, Italy, Book of Proceedings, 1241–1252.
- Robayo-Salazar, R., de Gutiérrez, R. M., Villaquirán-Cacedo, M. A., Arjona, S. D. 2023. 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in Construction*, 146: 104693, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>.
- Rosenfield, K. 2023. Skanska and Foster + Partners Collaborate on World's First 3D Concrete Printing Robot. www.archdaily.com/572156 (Erişim Tarihi: 06.09.2023).
- Rudenko, A. 2023. 3d printed concrete castle is complete, 3d concrete house printer. www.designboom.com/technology/ (Erişim Tarihi: 06.09.2023).
- Said, H., El-Rayes, K. 2011. Optimising material procurement and storage on construction sites. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(6): 421-431, DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000307](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000307).
- Saruhan, V., Keskinates, M., Felekoğlu, B. 2022. A comprehensive review on fresh state rheological properties of extrusion mortars designed for 3D printing applications. *Construction and Building Materials*, 337: 127629, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127629>.
- Sümer Haydaraslan, K., Dikmen, N. 2023. Binalarda giydirmeye cephe açısının enerji tüketimine etkilerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(1): 315-326, DOI: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1089497>.
- Sümer Haydaraslan, K., Yaşar, Y. 2023. Evaluation of building design strategies according to the effects of climate change by simulation-based optimisation: a case study for housing in different climate regions. *International Journal of Global Warming*, 30(1): 33-59, DOI: <https://doi.org/10.1504/IJGW.2023.130492>.
- Sümer Haydaraslan, K. 2023. Isparta'nın çağdaş yapılarında strüktür ve malzeme. In: Isparta'nın 1950 Sonrası Çağdaş Yapıları. Şimşek, S., Gökarslan, A.B., Çelik, Ş., Çetin, S. (eds), Isparta'nın 1950 Sonrası Çağdaş Yapıları, Akademisyen Yayınevi, Ankara, 561-570, ISBN 9786253992644.
- Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., Odoghue, L., Charitidis, C. 2018. Additive Manufacturing: Scientific and Technological Challenges, Market Uptake and Opportunities. *Materials Today*, 21(1): 22-37, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
- United Nations (UN), 2023. 2030 agenda for sustainable development of the united nations general assembly. www.un.org/sustainabledevelopment (Erişim Tarihi: 12.10.2023).
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA). 2022. World Population Prospects 2022: Summary of Results. <https://population.un.org/wpp/Publications/> (Erişim Tarihi: 03.06.2023).
- Vidalakis, C., Tookey, J. E. 2006. Conceptual functions of a simulation model for construction logistics. *Joint International Conference on Computing and Decision Making Civil and Building Engineering*, June 14, 2006, Montreal, France, Book of Proceedings, 906-915.
- Weng, Y., Li, M., Ruan, S., Wong, T.N., Tan, M.J., Ow Yeong, K.L., Qian, S. (2020). Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. *Journal of Cleaner Production*, 261: 121245, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121245>.
- Will, J., Melcher, R., Treul, C., Travitzky, N., Kneser, U., Polykandriotis, E., Horch, R., Greil, P. 2008. Porous ceramic bone scaffolds for vascularized bone tissue regeneration. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 19: 2781-2790, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10856-007-3346-5>.
- Wolf, A., Rosendahl, P. L., Knaack, U. 2022. Additive manufacturing of clay and ceramic building components. *Automation in Construction*, 133: 103956, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103956>.
- World Bank 2018. What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. openknowledge.worldbank.org (Erişim Tarihi: 04.12.2023).
- Xia, M., Sanjayan, J., 2016. Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications. *Materials & Design*, 110: 382-390, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.136>.
- XtreeE 2023. 3D printed wall with integrated window frame. vimeo.com/248368954 (Erişim Tarihi: 15.04.2023).
- Ye, J., Kyvelou, P., Gilardi, F., Lu, H., Gilbert, M., Gardner, L. 2021. An end-to-end framework for the additive manufacture of optimized tubular structures. *IEEE Access*, 9: 165476-165489, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3132797.
- Yergün, U. 2002. Batılılaşma dönemi mimarisinde, yapım teknolojisindeki değişim ve gelişim. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
- Yuan, P. F., Zhan, Q., Wu, H., Beh, H. S., Zhang, L. 2022. Real-time toolpath planning and extrusion control (RTPEC) method for variable-width 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering*, 46: 103716, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103716>.
- Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., Han, B. 2019. A review of the current progress and application of 3d printed concrete. *Composites Part A*, 125: 105533, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105533>.
- Zhu, Z., Dutta, A., Dai F. 2021. Exoskeletons for manual material handling – A review and implication for construction applications. *Automation in Construction*, 122: 103493, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103493>.