

YAPI ENDÜSTRİSİNDEKİ ÜRETİM BAŞARISININ SORGULANMASI: YENİLEŞİM, OTOMASYON, DİJİTAL DÖNÜŞÜM¹

Seçkin KORALAY², Fahriye Hilal HALICIOĞLU³

ÖZET

Amaç: Bir endüstrinin üretim başarısı, kaynaklarını ne kadar etkin bir biçimde dönüştürebildiği ve katılımcılarına maliyet, zaman, kalite ve kapsam gibi yönlerden ne kadar değer katabildiği ile ilişkilidir. Yapı endüstrisi, küresel düzeydeki önemine ve büyüklüğüne rağmen genel üretkenlik ortalamalarının altında kalmaktadır. Çalışmanın sorgu alanı bu durumun sebeplerini endüstrinin özgün özellikleri üzerinden değerlendirmektir. Bu kapsamda; yapı endüstrisinin üretimini diğer endüstrilere kıyasla ne kadar başarılı bir biçimde yürütebildiği, başarımlarını yükseltmeye yönelik son yüzyılda ne tür yenilikçi gelişmelerin yaşandığı ve bu gelişmelerin çözüm sağlamakta neden yetersiz kaldığı irdelenmektedir.

Yöntem: Çalışmada eleştirel bir inceleme yapılmaktadır.

Bulgular: Yapım sektörünün karmaşık ve özgün doğasından kaynaklı dağınık ve parçalı üretim mekanizması, robotik ve dijitalleşme gibi yenilikçi konseptlerin geliştirilmesini ve uyarlanmasını güçleştirmektedir. Başarımlarını yükseltmek için inşaat sektörüne özgü yenilikçi gelişmelerin radikal ve bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerekmektedir.

Özgünlük: Çalışma inşaat endüstrisi alanında inovasyon literatürüne katkıda bulunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapı Endüstrisi, Yenileşim (İnovasyon), Teknoloji, Otomasyon, Dijital Dönüşüm.

JEL Kodları: L23, L74, O32, Q55.

QUESTIONING the PRODUCTION SUCCESS in the CONSTRUCTION INDUSTRY: INNOVATION, AUTOMATION, DIGITAL TRANSFORMATION

ABSTRACT

Purpose: The production success of an industry is related to how efficiently it can transform its resources and add value to its participants in terms of cost, time, quality, and scope. Despite its global importance and scale, the construction industry underperforms in productivity compared to general averages. This study questions the reasons for this issue regarding the peculiarities of the industry. In this context; how successfully the construction industry can carry out its production compared to other industries, what kind of innovative developments have been experienced in the last century to increase the level of success, and why these developments are insufficient to provide solutions at the desired level are examined.

Methodology: A critical examination is conducted in this study.

Findings: Complex and unique nature of the construction industry results in a decentralized and fragmented production mechanism and also hinders the development and adaptation of innovative concepts such as robotics and digitalization. In order to increase the level of success, innovative developments specific to the construction industry should be handled with a radical and holistic approach.

Originality: The study contributes to the construction innovation literature.

Keywords: Construction Industry, Innovation, Technology, Automation, Digital Transformation.

JEL Codes: L23, L74, O32, Q55.

¹ Bu çalışma, Seçkin KORALAY tarafından Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Doç. Dr. Fahriye Hilal HALICIOĞLU danışmanlığında yürütülen "Yapı Projelerinde Karmaşıklık Üzerine Bir Araştırma" başlıklı Yüksek Lisans tezinden türetilmiştir.

² Yüksek Mimar, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye, seckinkoralay@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3965-6245.

³ Doç. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İzmir, Türkiye, hilal.halicioğlu@deu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8797-2595 (Sorumlu Yazar-Corresponding Author).

1. GİRİŞ

İnsanların en eski ve temel uğraşlarından birisi olan yapı üretim faaliyeti; barınma, eğitim, kültürel, tıbbi, dini, askeri ve altyapı gibi birçok amaca yönelik olarak yürütülen önemli bir endüstridir (Ngowi ve diğerleri, 2005). Günümüzde küresel düzeydeki iş gücü ve üretim miktarı açısından önemli bir paya sahip olan bu endüstri (Tablo 1), diğer taraftan ise ne kadar başarılı bir üretim sergileyebildiği konusunda eleştiri altında bulunmaktadır (Winch ve diğerleri, 1998; Saidi ve diğerleri, 2016). Bir endüstrinin üretim başarısı, kaynaklarını ne kadar etkin bir biçimde dönüştürebildiği ile ilişkilidir ve yapı endüstrisi bu konuda benzer büyüklükteki endüstrilere kıyasla verimlilik, kalite, maliyet ve hızlilik gibi yönlerden beklentileri karşılayabilmekte güçlük çekmektedir (Höök ve Stehn, 2008; Janipha ve diğerleri, 2015).

Tablo 1. Yapı endüstrisinin bölgesel büyüklükleri

	<i>Bölgeler (veri yılı)</i>			
	<i>ABD (2012)</i>	<i>AB (2009)</i>	<i>Japonya (2011)</i>	<i>Çin (2011)</i>
Yapı endüstrisinin üretilen milli değerdeki oranı (%)	5	7	10	7
Yapı endüstrisi iş gücünün sayısı (milyon)	5,6	19,25	6,3	39,2
Yapı endüstrisi iş gücünün toplam milli iş gücüne oranı (%)	5	11	10	5

Kaynak: Saidi ve diğerleri (2016: 1494)

Belirtilen soruna çözüm sağlayabilmeye yönelik modern çağ içerisinde üretim sürecini destekleyebilecek çeşitli teknolojiler ve bu teknolojilerin gelişmiş endüstrilerce etkin bir biçimde kullanıldığı üretim modelleri bulunsa da (Li ve He, 2013), yapı endüstrisi tüm bunlardan sınırlı düzeyde faydalanabilmektedir. Bu durum için gösterilen temel sebep, yapı endüstrisindeki üretim ağının kendisine özgü karmaşık doğasıdır. Endüstrinin kendisine özgü özellikleri yalnızca yapım faaliyetini zorlu bir sürece büründürmemekte, aynı zamanda bu sürecin iyileştirilebilmesi konusunda hem yenilikçi çözümlerin geliştirilebilmesini hem de diğer endüstrilerden doğrudan bir teknoloji veya üretim yaklaşımı aktarımını güçleştirmektedir (Jensen ve diğerleri, 2014). Endüstrinin doğasının kapsamlı ve derinlikli olarak anlaşılmasından kaynaklı olarak kendi gerekleri ile örtüşebilen ilerici çözümlerin elde edilememesi ise üretim biçiminin modernize alternatiflerine kıyasla daha verimsiz olan konvansiyonel yöntemlere bağlı kalmasına yol açmaktadır (Koskela ve diğerleri, 2002; Wood ve Gidado, 2008). Oysaki günümüz konvansiyonel yapım yöntemlerinin sağlayabileceği fayda açısından en üst limitlerine ulaştığı ve bu tür yöntemleri daha da geliştirmenin marjinal faydasının oldukça azaldığı belirtilmekte, dolayısıyla da yapım otomasyonuna doğru radikal bir değişimin kaçınılmaz olup bu tür sistemlerin de gelecekte daha yaygın olacağı öngörülmektedir (Delgado ve diğerleri, 2019; Chea ve diğerleri, 2020; de Soto ve Skibniewski, 2020). Aslında bu beklenti aynı zamanda sürdürülebilir bir gelişim ve daha yüksek kalitede bir yapı üretimi/kullanımı için gerekliliktir (Pan ve diğerleri, 2018).

Çalışma kapsamında yapı endüstrisinin üretim etkinliğinin bu düşünceler altında sorgulandığı bir literatür incelemesi yürütülmekte, mevcut sorunların sebepleri üzerine olan görüşleri saptayabilmek amaçlanmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde, üretim başarısı kavramı alt unsurları ile birlikte tanımlanmakta ve yapı sektörünün başarı düzeyi endüstri raporları üzerinden irdelenmektedir. Üçüncü bölümde, yapı endüstrisinin kendisine özgü özellikleri üzerinden mevcut üretim etkinliği sorununun sebepleri ve bu sorunun üstesinden gelmeye yönelik son yüzyıldaki teknolojik gelişmelerin neden yeterli ilerlemeyi sağlayamadığı tartışılmaktadır. Dördüncü ve son bölümde ise bir sonuç değerlendirmesi yapılmaktadır.

2. YAPI ENDÜSTRİSİNİN DİĞER ENDÜSTRİLERE KIYASLA ÜRETİM BAŞARISI DÜZEYİ

Üretimin başarısı hem üreticiye hem de tüketiciye ekonomiklik, hızlilik, kalite, estetik, fonksiyonellik, sürdürülebilirlik, verimlilik ve üretkenlik gibi yönlerden ne kadar değer katılabildiği ile ilişkilidir (Dvir ve diğerleri, 1998; Williams, 2016). Önem dereceleri ve ele alınış biçimleri farklı tür üretim alanları için değişiklik gösterebilen bu alt kavramlardan bazıları öznel yargılara dayanırken, verimlilik ve üretkenlik kavramları ise hesaplanabilirlik sağladıkları için üretimin başarı ve etkinlik düzeyini ölçebilme konusunda öne çıkmaktadır (Aparicio, 2016: 4-5). Bu açıdan, üretim olgusunun bu iki kavram ile birlikte tanımlanıp değerlendirilmesinde fayda bulunmaktadır.

Üretim, girdi olarak kullanılan insan, ekipman, malzeme ve zaman gibi kaynakların sonuç çıktılara dönüştürüldüğü bir süreçtir. Üretkenlik; bir çıktı ürünün miktarının bir girdi kaynağın miktarına oranıdır ve bu oran sermaye üretkenliği (yatırılan sermaye başına elde edilen parasal kazanç), malzeme üretkenliği

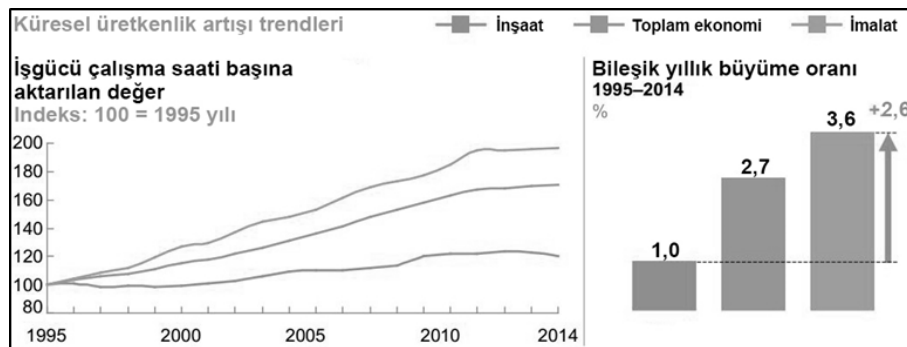
(girdi malzeme başına elde edilen ürün) ve iş gücü üretkenliği (çalışma miktarı başına elde edilen ürün) gibi birçok ekonomik ve tekniksel yönden ele alınabilir (Linner, 2013: 51). Verimlilik kavramı altında ise üretime ilişkin tüm girdiler ile elde edilen tüm sonuçlar arasında bir ilişkinin kurulduğu daha bütüncül bir yaklaşım izlenmekte (Coelli ve diğerleri, 2005: 2-6), bu doğrultuda da girdilere ve çıktılara ilişkin gözlenen değerler ile optimal olduğu düşünülen değerler karşılaştırılarak bir çıkarım yapılmaktadır (Fried ve diğerleri, 2008: 31-33).

Yapı endüstrisinin üretim etkinliği, belirtilen tüm bu niceliksel ve niteliksel alt kavramlar üzerinden endüstri raporlarınınca desteklenerek uzun bir dönemden bu yana eleştirilmektedir. Örneğin Latham Raporu (Latham, 1994), yapı endüstrisini "yetersiz, uzlaşa bulunmayan, parçalı ve üretim becerisi düşük" olarak tanımlamakta ve bu endüstrinin hem kaynaklarını savurgan kullandığını hem de paydaşları için yeterli değeri üretmediğini belirtmektedir. Egan Raporu (Egan, 1998) da sektörün düşük üretim performansına yönelik olarak radikal çözümler ile birlikte diğer endüstrilerde olduğu gibi modernleşmesi gerektiğini fakat bu noktada hem gelişime yönelik yatırımların az olduğunu hem de endüstrinin parçalı yapısından dolayı mevcut gelişmelerin yaygınlaşmadığını ifade etmektedir.

Modernleşmenin nasıl gerçekleştirilebileceğine yönelik olarak yapı üretim sürecinde ne tür teknolojilerin hangi amaçlarla kullanılabileceği hakkında da bazı raporlar bulunmaktadır. Örneğin "Modernising Construction" Raporu (National Audit Office, 2001) satın alma, tedarik ve teslimat safhalarına yoğunlaşmakta ve proje katılımcılarının bütünleşik bir biçimde hareket edebileceği bilgi teknolojilerini öne çıkarmaktadır. "ICT and Automation (ICTA) Scoping Study" Raporu (National Platform for the Built Environment, 2008), yapının tasarımından inşaatına tüm yaşam döngüsü boyunca gerekli olan bilgi, iletişim ve otomasyon teknolojilerini tanımlayarak bir yol haritası çizmektedir. Benzer biçimde, "Construction 2025" raporu da (HM Government, 2013) endüstrinin ileriye dönük başarısı için "verimli ve teknolojik olarak üstün" hedefini koymaktadır.

Üretkenlik açısından endüstriler arası karşılaştırmalı bir inceleme üzerine ise raporlar içerisindeki iki tür bilgi göze çarpmaktadır; (1) hedeflenen üretkenlik düzeyi nedir, (2) üretkenliği artırmaya yönelik teknolojilerin yayılım düzeyi nedir? Karşılaştırma için genellikle imalat endüstrilerinin yakaladığı yüksek gelişmişlik düzeyi bir referans çizgisi olarak alınmaktadır. Yapı endüstrisinin üretim etkinliği değerlendirilirken ise özellikle imalat endüstrilerinden birisi olan otomotiv sektörü ile bir kıyaslama yapılmaktadır. Bu durumun sebebi olarak otomobil ve konut arasındaki bazı ürünel benzerlikler gösterilebilir. Otomobil; diğer imalat ürünlerine göre (örneğin elektronik cihazlar) daha yüksek fiyatlı ve büyük hacimlidir, ayrıca geniş kitlelerce talep edilir ve birçok çeşitlilikte piyasaya sürülür.

Üretkenlik düzeyi açısından Balaguer ve Abderrahim'in (2008: 3) Euroconstruct, Eurostat ve ACEA raporlarından derlediği Avrupa verilerine göre 1990-2000 yılları arasında otomotiv endüstrisi yaklaşık %37, yapı endüstrisi ise yalnızca %4 artış sağlamaktadır. ABD Ticaret Bakanlığının raporuna göre ise 1964-2004 yılları arasında tarım-dışı sanayinin iş gücü üretkenliği %100'den fazla artış gösterirken yapı endüstrisinin üretkenliğinde azalma dahi görülmektedir (Bock ve Linner, 2015a: 55). Benzer biçimde 2017 McKinsey Küresel Enstitü' nün 2017 yılında yayınladığı inşaat endüstrisindeki verimliliğe ilişkin raporundaki (MGI, 2017) küresel iş gücü üretkenliği artışı diyagramlarına göre (Şekil 1) 1995-2014 yılları arasında imalat endüstrisi genel ekonomi ortalamasının üzerinde, inşaat endüstrisi ise oldukça altında kalmaktadır.



Şekil 1. 1995-2014 yılları arası endüstrilere göre küresel üretkenlik artışı (MGI, 2017: 2)

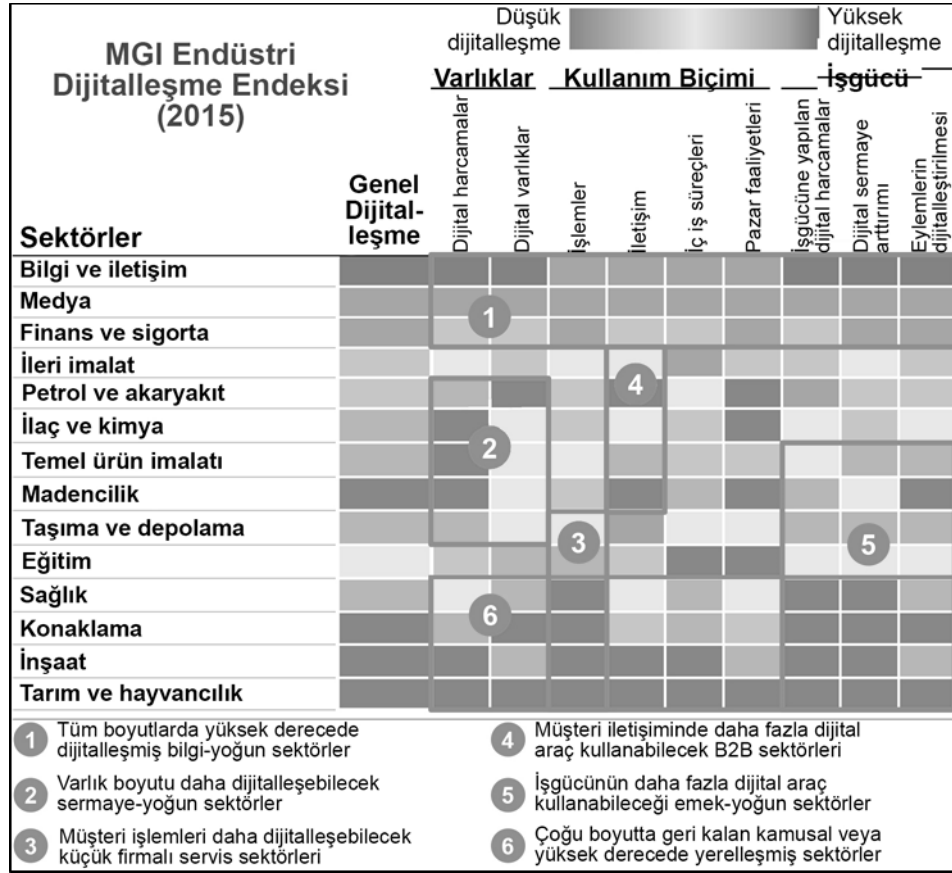
Teknoloji yayılım düzeyine ilişkin olarak dijitalleşme ve robotikleşme seviyeleri önemli göstergelerdir. McKinsey Küresel Enstitü' nün 2015 yılında yayınladığı Digital America Raporu'ndaki dijitalleşme endeksine göre (MGI, 2015) (Şekil 2) inşaat faaliyeti tüm endüstriler arasında dijitalleşme düzeyi en düşük sektörlerden birisidir ve iş gücünden müşteri işlemlerine her bir boyutta geride kalmış olarak gösterilmektedir. Benzer biçimde 2018 World Robotics idari raporuna göre (IFR, International Federation of Robotics, 2018) 2017 yılında otomotiv endüstrisindeki robot satış miktarı 125.700 birim iken (toplam yıl

içi endüstriyel robot satış miktarının %33'ü), bu miktar yapım ve yıkım faaliyetleri için yalnızca 900 birimdir. IFR (2021) mevcuttaki son yayımladığı raporunda ise Covid-19 pandemisinin endüstrilerin üretkenliği üzerindeki olumsuz etkilerine değinmekte, kısa vadede otomasyon sistemlerine ağırlık veren sektörlerin üretim biçimini belirsizliklerle dolu yeni koşullara daha hızlı ve esnek bir biçimde adapte edebildiğini (ilişkin sistemlerin faydalarının yanında üretim alanlarında insan iş gücüne ilişkin sosyal mesafe koşullarının daha kolay sağlanabiliyor olması da bu konuda bir etken), uzun vadede de bu durumun dijitalleşme ve robotikleşme doğrultusunda tetikleyici bir unsur olacağını belirtmektedir.

1994'ten 2021 yılına kadar olan tüm bu raporlar göz önünde bulundurulduğunda endüstrinin sorunlarına yönelik uzun süredir bir farkındalığın bulunduğu, çözüm önerilerinin sunulduğu, fakat gelinen noktada ise üretim etkinliğinin artırılmasından birçok yönden fayda sağlanabilecek olmasına rağmen ilerlemenin de sınırlı olduğu görülmektedir. Üretim etkinliği düzeyinin düşüklüğü ile üretim etkinliğini yükseltebilecek teknolojilerin yaygınlık düzeyinin düşüklüğü arasında bir bağıntı bulunmaktadır. Mevcut durumda yapı endüstrisi teknolojik ilerlemenin bir öncüsü değil takipçisi durumundadır ve bu durum da üretkenlik açısından imalat endüstrilerinin oldukça gerisinde kalınıyor olmasının doğal bir sonucudur (Van Gassel ve Maas, 2008; Aziz ve Hafez, 2013).

Endüstrinin bu sorunun üstesinden gelebilmek için çağın olanaklarını mekanikleşmeye, robotikleşmeye ve otomatikleşmeye yönelik olarak değerlendirmesi beklenirken, bu tür çabaların da yetersiz kaldığı görülmektedir. Buradan hareketle, yeterli düzeyde ilerleme sağlanamamasının sebeplerinin neler olduğuna ilişkin olarak temelde şu soruların cevaplarını aramak gereklidir:

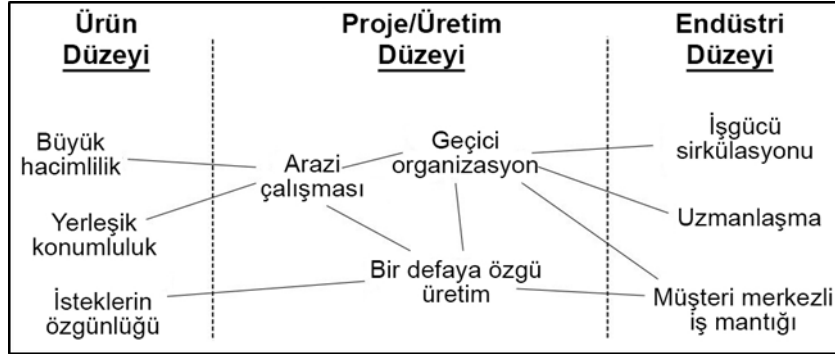
- Yapı endüstrisi, soruna yönelik olarak neden yenilikçi çözümler üretememektedir?
- Eğer kendi içerisinde yenilikçi çözümler üretiliyor ise neden bu konuda başarılı olan endüstrilerin (özellikle imalat endüstrilerinin) üretim modellerini kendisine uyarlayamamaktadır?
- Başarılı sonuçlar sağlayan yenilikçi çözümler veya uyarlamalar var ise, bunlar neden endüstri içerisinde yaygınlaşmamaktadır?



Şekil 2. MGI 2015 Endüstri Dijitalleşme Endeksi (MGI, 2015: 5)

3. YAPI ÜRETİM FAALİYETLERİNİN KENDİSİNE ÖZGÜ ÖZELLİKLERİ VE BU ÖZELLİKLERİN ÜRETİMİN BAŞARISINI İYİLEŞTİRME KONUSUNDAKİ SINIRLANDIRICI ETKİLERİ

Yapı endüstrisi, yerleşik bir fabrika ortamında üretim yapan imalat endüstrilerinden birçok yönden farklılıklar barındırır. Dolayısıyla üretim etkinliği sorununa ilişkin belirtilen soruları sağlıklı bir karşılaştırma ile cevaplandırabilmek için, öncelikle yapı üretiminin kendisine özgü özelliklerinin (construction peculiarities) tanımlanması gerekmektedir. Bu özellikleri Nam ve Tatum (1988) "hareketsizlik, karmaşıklık, sağlamlık, maliyetlilik, yüksek sosyal sorumluluk"; Koskela (1992) "bir defaya özgünlük, arazi çalışmasının varlığı, geçici organizasyon, düzenleyici kurumların müdahaleleri"; Ballard ve Howell (1998) "sabit konumlu imalat ve konumun yerleşikliği" şeklinde sıralamaktadır. Sıralanan bu kavramlardan bazıları oldukça göreceli olsa da, temel bir fikir oluşturmaktadır. Vrijhoef ve Koskela (2005) yapı üretimini "üretilebilir ürün, üretim biçimi ve endüstrinin yapısı" yönlerinden ele alarak bu özellikleri daha düzenli ve kapsamlı bir diyagram (Şekil 3) altında toparlamaktadır.



Şekil 3. Yapı üretiminin kendisine özgü özellikleri (Vrijhoef ve Koskela, 2005)

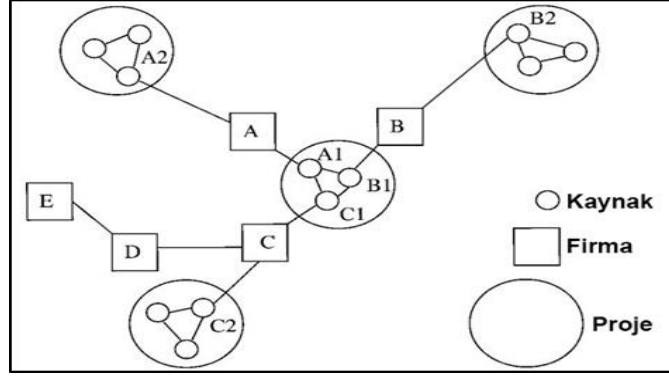
Bu özelliklerin her biri ile elbette ki yalnızca yapı endüstrisinde karşılaşmamaktadır. Bir defaya özgünlük özelleştirilmiş araçların imalatında, arazi çalışması tarım ve madencilik gibi alanlarda, büyük ve sabit bir ürün üzerinde çalışma ise gemi ve uçak üretiminde yer almaktadır. Yapı endüstrisindeki üretim biçimini özel kılan, tüm bu özelliklerin bir bileşimi olmasıdır (Ballard ve Howell, 1998), örneğin uçaklar ve gemiler devasa büyüklükte üretilmelerine rağmen sonradan bir bütün olarak hareket ettirebildikleri için araziye bağlı değildir. Dolayısıyla, endüstriye yönelik üretim yaklaşımlarının da bu kendine özgü özellikler bileşimi ile örtüşür biçimde olmalıdır.

Öncelikli olarak, yapım sürecini tariflemek ve üretim ihtiyacının endüstri düzeyinde nasıl karşılandığını ele almak gereklidir. Bir yapı üretimi oldukça dağınık noktalardan birçok çeşitlilikte ve büyüklükte malzemenin, bileşenin ve sistemin tedarikini gerektirir ve sağlanan kaynaklar da farklı mekânlarda ve farklı zamanlarda çalışıyor olabilen birçok farklı iş kolundan çok sayıda insanın iş birlikteliği dâhilinde çeşitli araçlarca işlenir, tüm bu karmaşık organizasyon planlanmasından tasarımına ve inşaatına kadar tüm safhaları boyunca yönetilmesi ve uygulanması zorlu bir süreçtir (Cox ve Goodman, 1956; Howard ve diğerleri, 1989; Wood ve Ashton, 2010). Üretimin etkin bir biçimde yürütülebilmesi karşısındaki başlıca sebeplerden birisi olan bu zorluluk, çağın ilerlemesiyle beliren yeni ihtiyaçlar, beklentiler ve talepler doğrultusunda giderek daha da artış göstermektedir (Williams, 1999). Gidado (1996) bu durumu sebepleri ile birlikte şu şekilde açıklamaktadır, "Sürekli bir hızlilik talebi, maliyete ve kaliteye yönelik kontroller, iş alanlarındaki güvenlik gereksinimleri ve ayrıca teknolojik gelişmeler, ekonomik serbestlik, küreselleşme, çevresel konular ile endüstri içerisindeki parçalılık bir sarmala ve yapım sürecinin karmaşıklığının artışına sebep olmaktadır."

Tariflenen yapım süreci, endüstri içerisinde birçok uzmanlık alanından bağımsız firmanın geçici olarak bir araya gelip sanki tek bir firmaymış gibi çalıştığı bir faaliyet ağı dâhilinde yürütülmektedir (Winch, 1989; Austin ve diğerleri, 2002). Dubois ve Gadde (2002), oluşan bu faaliyet ağını "gevşekçe bağlı bir sistem" (a loosely coupled system) şeklinde tanımlamaktadır (Şekil 4). Firmalar ağ içerisinde belirli bir proje için geçici sıkı bağlar kurmakta, fakat üretim tamamlandığında ise belki de bir daha hiçbir araya gelmemek üzere birbirlerinden ayrılmaktadır.

Björnfot ve Sardén (2006), bu gevşek ağ yapısının sebebini üretimin "araziye bağlı" ve "bir defaya özgün" olma niteliklerinden dolayı merkezi bir mekanizmanın olanaksızlığına bağlamaktadır. Her bir yeni proje; doğal ve beşerî çevre, arazi durumu, malzeme tedariki, sosyo-kültürel yapı, yerel yönetmelikler gibi bölgesel koşullara ve özgün ihtiyaçlara uygun olarak üretime geçirilmek durumundadır. Ayrıca, üretimde gerekli olan uzmanlık alanlarının kapsamı ve çeşitliliği farklı tipteki veya büyüklükteki projeler için de değişebilmektedir. Tüm bu esnekliği sağlayabilmek için ise gerekli olan karmaşık üretim organizasyonu projeyi gerçekleştirmek üzere davet edilmiş olan, kendi alanlarında yetkin, küçük ve yerel çalışma gruplarına bölüştürülmektedir. Proje

tamamlandığında da bu gruplar kendilerine uygun olan başka organizasyonlara dağılmaktadır. Bu durum, endüstri içerisinde yüksek düzeyde parçalılığa ve dağınık bir üretim mekanizmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4. Gevşekçe bağlı bir sistem olarak yapı endüstrisi (Dubois ve Gadde, 2002)

Endüstrinin belirtilen yapısı üretimin gereklerine yönelik olarak kısa vadede fayda sağlarken, diğer taraftan ise yenilikçi çözümlerin geliştirilmesini güçleştirmektedir. Gelişimin biçimi genellikle köklü (radikal) değil artımsaldır (inkremental) ve bu durumun sebeplerinden bazıları şunlardır (Memari ve diğerleri, 2014; Bertelsen ve diğerleri, 2007):

- Üretimin birbiriyle iletişimi zayıf çalışma gruplarına bölüştürülmüş olması, projenin bütünü yerine parçalarına odaklanılmasına sebep olmaktadır. Çünkü her bir grup kendi iş bölümünden sorumludur ve dolayısıyla yalnızca o bölümün iyileştirilmesi için çaba göstermektedir.
- Endüstrinin parçalı yapısı, büyük araştırma yatırımları yapabilecek düzeyde firmaları olanaklı kılmamaktadır. Yapı, yaşam döngüsü uzun olan bir üründür ve bu yüzden bir yatırımın geri dönüşü ciddi zaman almaktadır. Dolayısıyla küçük firmalar da yalnızca kısa dönemli kârlarını düşünmektedir.
- Firmaların geçici olarak bir araya geliyor olmaları, yenileşim için gerekli olan deneyimden öğrenmeyi desteklememektedir. Bu yüzden, projenin bütününe yönelik olarak yürütülen faaliyetten edinilen bilgi, bir sonraki projeye taşınmamakta ve kaybolmaktadır.

Endüstrideki üretim biçiminin özgü özellikleri, kendi içerisindeki gelişimini sınırlandırmasının ötesinde gelişmiş endüstrilerin üretim modellerinin veya teknolojilerinin birebir kopyalanmasını da zorlaştırmaktadır (Höök ve Stehn, 2008; Björnfort ve Sardén, 2006). İmalat endüstrilerinin üretim etkinliğindeki başarısı, modern çağın olanaklarını değerlendirebilmesi ile ilişkilendirilmektedir (Balaguer ve Abderrahim, 2008) ve dolayısıyla yapı endüstrisinin neden görece geride kaldığını anlayabilmek için bu olanakların endüstri içerisindeki yansımalarının da ele alınması gerekmektedir. Bu noktada, özellikle 20.yy'ın başından bu yana olan gelişmelere odaklanılmalıdır. Bu dönemin önemi, hem bir ürünün endüstriyel olarak nasıl üretilebileceğine ilişkin düşüncelerin geliştirildiği hem de teknolojik açıdan devrimsel ilerlemelerin kaydedildiği bir zaman aralığı olmasıdır.

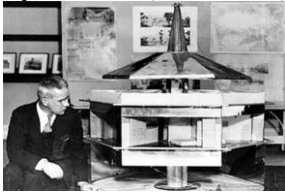
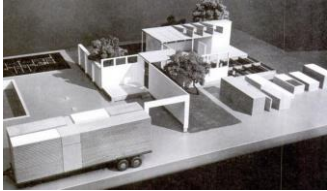

Modern çağın endüstriyel üretime yönelik ana yaklaşımı "otomasyon"dur, dolayısıyla ilişkin teknolojik gelişmelerin bu yaklaşım üzerinden ele alınmasında fayda vardır. Castro-Lacouture (2009) otomasyon kavramını kapsamlı bir tanım ile şöyle açıklamaktadır, "iş gücünü ve üretim süresini azaltmak, üretkenliği artırmak, çalışma ortamını iyileştirmek ve iş kazalarını önlemek amacıyla üretimin işletilmesi ve kontrolü sırasında kullanılan üretim teknikleri ve ekipmanları ile yürütülen eylem." Yapı endüstrisinin insan faaliyetlerinin yoğun olarak kullanıldığı, tehlikeli eylemler barındıran ve verimliliğin de düşük olduğu bir sektör olduğu göz önünde bulundurulursa, bu tür bir yaklaşımın akılcı bir çözüm olabileceği söylenebilir.

Otomasyona yönelik 20.yy'daki ilk önemli gelişme, Henry Ford'un T-Model arabaları ile öncülüğünü yaptığı kitlesel üretim devrimidir (Caneparo, 2014: 12-16). Üretimin ileri iş gücü deneyimi gerektirmeyen basit aşamalara bölünerek montaj hatları üzerinde sürekli tekrarına dayanan yöntemin getirdiği başarı, dönemin mimarlarına da esin kaynağı oldu. Öncesinde mimari bir çalışmanın değeri el emeği ile orantılı iken, modernist düşüncenin en büyük hayali yapı üretimini önceki yüzyıllardan kalma geleneksel yöntemlerden makina ile üretime geçirebilmek oldu (Kieran ve Timberlake, 2004: 5-9).

Dönem içerisindeki dünya savaşlarının yarattığı konut talebi de ayrıca bir tetikleyici unsur oldu ve yapıların nasıl sistematik olarak üretilebileceği üzerine imalat endüstrilerinin tekniklerini referans alan birçok denemelerde bulunuldu. Amaç fabrika ortamında kitlesel olarak üretilmeye elverişli, kolaylıkla yerine taşınıp kurulabilecek prefabrike konutlar tasarlamaktı. Bu doğrultuda öne çıkan çalışmalardan bazıları ve

karşılaştıkları güçlükler, Tablo 2’de sıralanmaktadır. Her ne kadar belirtilen çalışmalarca yenilikçi çözümler sunulmuş olsa da bulunulan dönem içerisindeki teknik imkânların kısıtlılığının ve mali engellerin başarısızlıklara sebep olduğu görülmektedir. Çağın devamında bu tür sorunlar daha aşılabilir hale gelmekte, benzer bir üretim modelinin devamı olarak 1960-70’lerde Habitat-67 ve Nakagin Kapsül Kulesi gibi eş hacimsel modüllerin üst üste yığılmasından meydana gelen ikonik tasarımlar ortaya çıkmaktadır (Lin, 2011). Fakat yine de kitlesel olarak üretilen konutların yarattığı monotonluk izlenimi, prefabrike üretim yaklaşımının yapı endüstrisinde yaygınlaşabilmesinin önünde büyük bir engel teşkil etmektedir. Ayrıca estetik kaygıların ötesinde, her yapı üretimi işverenlerin veya kullanıcıların farklı ihtiyaçlarına ve önceliklerine uygun olarak bir defaya özgü üretilir. Bu çeşitlilik talebi de kitlesel üretimin tektip standart üretim modeli ile çelişmektedir. Dolayısıyla ekonomik ve teknolojik faktörlere ek olarak sosyal açıdan bu tür sistemlere yönelik toplum tavrı ve kullanıcı kabulleri de olumsuz yönde etkilenmektedir (Lu ve diğerleri, 2018).

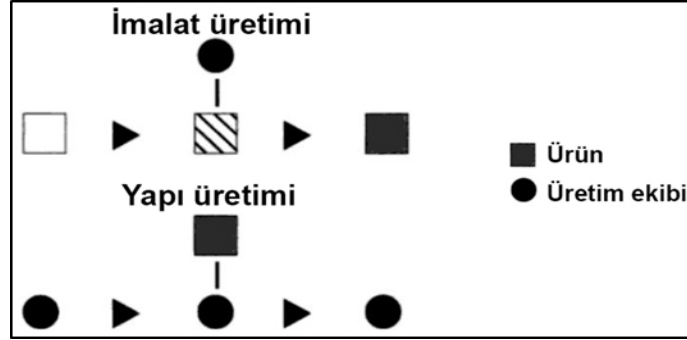
Tablo 2. Kitlesel yapı üretimini hedefleyen öncül çalışmalardan bazıları

<i>Proje İsmi/Sürdürüldüğü Tarih/Tasarımcı/ Resim Kaynağı</i>	<i>Tasarım-Üretim İlkeleri ve Karşılaşılan Güçlükler</i>
<p>Dymaxion Evi, 1928-1945, Buckminster Fuller</p>  <p>(Bergdoll ve diğerleri, 2008: 58)</p>	<p>Verimli strüktür ve geometri ilkelerine dayanan, korozyon dayanımlı alüminyum paneller ve ıslak hacim modülleri gibi modern malzemeler ve teknolojiler barındıran yapı, uçak üretim hangarlarında imal edilmek üzere tasarlandı (Fuller, 1999: 84). Yapının çağının ötesinde sistemler gerektirmesinin gerektirdiği ilk yatırım maliyetleri ve farklı ihtiyaçları karşılayabilme esnekliğini sağlayamayan dairesel formu başarısızlığın ana sebepleri oldu (Baldwin, 1997: 23-24).</p>
<p>Paket Ev, 1940-1952, Gropius ve Wachsmann</p>  <p>(Bergdoll ve diğerleri, 2008: 80)</p>	<p>Temel fikir; tek tür bir ahşap panel birim ve bu birimleri birbirine istenildiği gibi bağlayabilen tek bir ara eleman ile yapının tüm ana sistemlerini (iç ve dış duvarlar, döşemeler ve çatı) oluşturabilmek, böylelikle de tasarım esnekliği ve üretim kolaylığı sağlamaktı (Imperiale, 2012). Teknik imkânsızlıklar sebebiyle paneller yeterli ölçü toleransları dâhilinde üretilmedi ve maliyetler de beklenen düzeye indirilemedi (Bergdoll ve diğerleri, 2008).</p>
<p>Lustron Evi, 1947-1950, Carl Strandlund</p>  <p>(Inhabitat, 2018)</p>	<p>Çelik kiriş ve makaslar ile oluşturulan bir strüktür üzerine iç ve dış panellerin monte edilmesi prensibine dayanan ve ABD hükümetince de savaştan dönen askerlere yönelik olarak desteklenen proje; üretimdeki zaman ve maliyet aşmaları, üretilen yapıların tedarikindeki sorunlar, yerel yasalar ve ihtiyaçlar için gerekli olan esnekliğin karşılanamaması gibi sebepler ile başarısızlıkla sonuçlandı (Wolfe ve Garfield, 1989).</p>

Tüm bu sebepler prefabrike yapı üretim sistemlerinin yaygınlaşmamasına ve tekrardan konvansiyonel yöntemlere ağırlık verilmesine sebep oldu, dolayısıyla da endüstriyel üretimin bu sektörde konvansiyonel üretim ile baş edemeyeceği algısı oluşmaya başladı. Bu noktada, dönemsel kitlesel üretim eğilimlerini göz önünde bulundurmak da bazı ek fikirler sağlayabilir. Turner'a (2008: 1) göre firmalar 1960'larda kaliteden ödün vererek yüksek üretim oranlarını, 1970'lerde ürün çeşitliliğini azaltarak yine yüksek miktarlarca fakat kaliteli ürünleri, 1980'lerde fark yaratmak adına esnek imalat sistemleri geliştirerek çeşitliliği, 1990'larda ürün geliştirme sürelerini kısaltarak yenileşimi ve günümüzde ise farklı işlevleri tek bir üründe sunarak fonksiyonelliği hedeflediler. Kalite, çeşitlilik ve fonksiyonellik gibi unsurlar özellikle yapı üretimi konusunda vazgeçilmezdir ve bu unsurların kitlesel üretimde henüz yeterli seviyede yakalanamadığı dönem ile yapı endüstrisinde bu tür bir yaklaşıma olan ilginin azaldığı dönem birbiri ile örtüşmektedir.

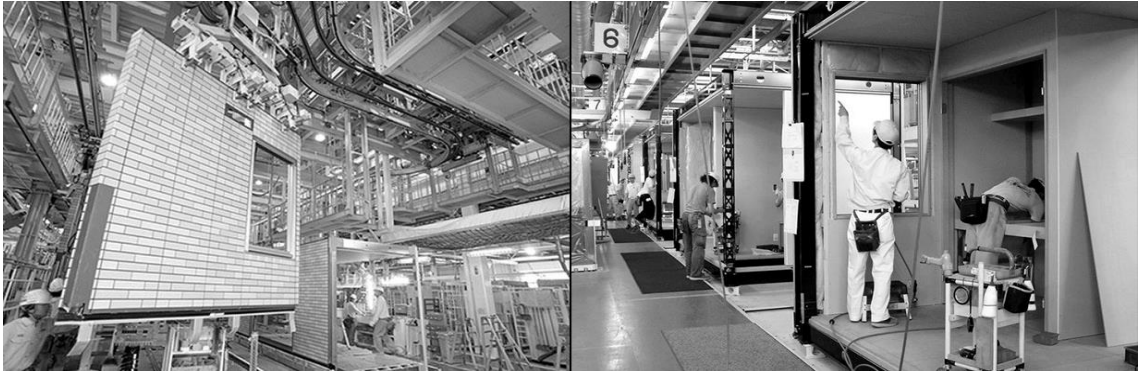
Yapı üretimini tıpkı bir imalat üretimi gibi bütünüyle fabrika ortamında gerçekleştirilebilmesini zorlaştıran diğer ana etmenler, yapı ürününün diğerlerinden farklı olarak büyük hacimli ve yerleşik konumlu olmasıdır. Bir ürün büyüdükçe hareket ettirilmesi güçleştiğinden, bütünü üretim istasyonlarında hareket ettirilmesi yerine üretim istasyonlarının bütünü içerisinde hareket ettirilmesi tercih edilir. Şekil 5’de gösterildiği gibi imalatta ürün üretim birimlerini ziyaret ederken yapımda ise tam tersidir (Cousineau ve Miura, 1998: 6) ve bu durum ekipler arası zaman ve mekân koordinasyonunu tamamıyla farklılaştırır. Ayrıca üretim ne kadar prefabrike olursa olsun, son aşama muhakkak arazi üzerinde gerçekleştirilmek durumundadır (Salem ve diğerleri, 2006). Genellikle yapının inşasına uygun olarak yapılandırılması gereken bu arazi içerisindeki

çalışma da belirsizlikler ile doludur. Çünkü bu dış ortam hem jeolojik yapı, eğim ve bitki örtüsü gibi nedenlerle bölgeden bölgeye değişiklik gösterebilmektedir hem de güneş, rüzgâr ve yağış gibi çevresel etmenlere maruz kalmaktadır. Dolayısıyla bu belirsizlikleri aşabilmek için yine insan iş gücüne ihtiyaç duyulmakta ve saha dışı üretim otomasyonu konusunda sınırlı bir fayda sağlanabilmektedir.



Şekil 5. İmalat ve yapı üretiminde ürün ile üretim ekibi arasındaki ilişki (Cousineau ve Miura, 1998: 6)

Günümüzde modüler prefabrikasyon/konstrüksiyon (Bertram ve diğerleri, 2019; Gharehbaghi ve diğerleri, 2021) ve kitlesel özelleştirilebilirlik (mass customization) (Larsen ve diğerleri, 2019) gibi konseptler ile birlikte ele alınan yapı endüstrisindeki prefabrikasyon (saha-dışı yapım otomasyonu) sistemleri için şu tür amaçlar da güdülmektedir; sürdürülebilirlik için atık ve karbon ayak izi azaltımı (Hao ve diğerleri, 2020, Lu ve diğerleri, 2021; Yuan ve diğerleri, 2021), saha içinde üretimi zor karmaşık geometri bileşenlerin imalatı (Mostafa ve diğerleri, 2020; Anton ve diğerleri, 2021) ve yüksek teknoloji bileşenlerinin üretimi (Alim ve diğerleri, 2019; Sivaram ve diğerleri, 2020; Attia ve diğerleri, 2020). Prefabrikasyon sistemleri başlıca iki alanda sınıflandırılabilir (Delgado ve diğerleri, 2019); (1) Yapı bileşenlerinin imalatı (Building Component Manufacturing), (2) Büyük ölçekli prefabrikasyon (Large Scale Prefabrication). İlk tür dâhilinde düşük-seviye bileşenler (çimento, toprak, ahşap, çelik gibi ham maddeler) yüksek-seviye yapı bileşenlerine (betonarme prefabrik bileşenler, çelik kafesler, ahşap strüktürel elemanlar, kaplamalar vb.) dönüştürülmektedir, konvansiyonel yöntemler ile birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır. İkinci türde yüksek-seviye bileşenler bitirilmiş bütün yapı modüllerine (banyo, mutfak modülleri vb.) dönüştürülmektedir, yüzeysel ve hacimsel sistemlerin imal edildiği bu tür ise prefabrikasyona ilişkin belirtilen sebeplerden dolayı daha az yaygındır. Sonuncu türe ilişkin bilinen örnekler bakıldığında (Şekil 6), bu tür faaliyetlerin daha çok yüksek teknolojiye rağbet gösteren bir toplumda (Japonya) imalat tecrübesi olan firmalarca (Sekisui - petrokimya; Toyota - otomotiv) yürütüldüğü görülmektedir.



Şekil 6. Sırasıyla; Sekisui Heim duvar sistemi ve Toyota Home yapı modülü imalatı (Abd Rashid ve diğerleri, 2019)

Otomasyona yönelik bir başka ilerleme alanı, 1940'larda ilk bilgisayarların geliştirilmeye başlanması ile birlikte ortaya çıkan dijital sistemlerdir (Gibson ve diğerleri, 2014: 36). Bu tür sistemlerin zamanla işlem güçlerinin ve erişilebilirliklerinin artması, başlıca iki alanda fayda sağladı. Bunlardan ilki bilgi ve iletişim teknolojileridir, ikincisi ise bu teknolojilerin siberetik alanındaki çalışmalara eklenmesiyle geliştirilen robotik sistemlerdir (Maurer, 2017).

Öncelikle, arazi üzerinde ihtiyaç duyulan insan iş gücünü ikame ederek otomasyonun saha dışından saha içine olan devamlılığını sağlayabilme potansiyeline sahip olan robotik sistemleri ele almakta fayda vardır. Robotik sistemler; yeniden programlanabilirlik, otonomluk, esneklik, durumsal farkındalık gibi

yeteneklere sahip olan ve çeşitli görevleri üretkenlikle yerine getirebilen ileri düzeyde gelişmiş makinalardır (Gupta ve Arora, 2009: 309; Bock ve Linner, 2015b: 7). Uluslararası Robot Federasyonu (IFR, 2012), bu özellikleriyle robotik sistemleri üretken, esnek ve kaliteli bir üretim için otomasyonun anahtar bileşeni olarak tanımlamaktadır. İnsan iş gücü ile karşılaştırılacak olursa, Linner (2013: 3) şu ifadelerle yer vermektedir, "İnsan iş gücünün aksine, makina teknolojisi (otomasyon ve robotik teknolojileri de içeren modern versiyonları ile birlikte) hesaplanabilir ve zaman, maliyet, kalite garantisi veren bir üretim biçimi sunmaktadır. Ayrıca yine insanların aksine, üretim kapasitesinin geliştirilmesi konusundaki potansiyeli sınırsızdır."

Yapı endüstrisinde robotik sistemler saha-dışı otomasyonda (robotik prefabrikasyon) imalat benzeri kontrollü bir çevre dâhilinde kullanılmakla birlikte (Kasperzyk ve diğerleri, 2017) saha-içi otomasyona yönelik ilk ciddi çalışmalar ise 1978 yılından itibaren Japonya'da başladı (Linner, 2013: 131). Amaç, ülkedeki genç nesilce "zorlu, kirli ve tehlikeli" olarak tanımlanıp artık tercih edilmeyen bu sektörün imajını ve çalışma koşullarını iyileştirmektir (Cousineau ve Miura, 1998: 7). Ülkedeki robot sektörüne olan kültürel eğilim ve Ar-Ge çalışmalarına yatırım yapan büyük inşaat firmalarının ("büyük beşli" olarak tanımlanan Shimizu, Taisei, Kajima, Obayashi ve Takenaki) varlığı, bu tür öncü çalışmaları olanaklı kıldı (Yoshida, 2006). Fakat yine de dünya üzerinde geliştirilen ilk robotun 1959 yılında üretilen Unimate olduğu düşünülürse, aradaki 20 yıllık süre aralığı yapı endüstrisinin teknolojiyi ne kadar geriden takip ettiğinin önemli bir göstergesidir.

Yapımda robotikleşmeye yönelik ilk yaklaşım, inşaat esnasındaki belirli eylemlerde insanları ikâme etmeyi hedefleyen "tek görevli yapım robotları" (single task construction robots) oldu (Bock ve Linner, 2016a: 14) (Şekil 7). Bu tür eylemlerin bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- Strüktürel işlemler; betonarme demirinin işlenmesi ve yerleştirilmesi, betonun dağıtılması, yayılması, seviyelendirilmesi ve sıkıştırılması, çelik bileşenlerin kaynaklanması vb.,
- İç ve dış mekân işlemleri; tuğla ve fayans döşenmesi, yangın koruyucu malzeme kaplanması, cephe elemanlarının kurulumu, cephe kaplama ve boyama vb.,
- Yapım öncesinde ve esnasında destek-kontrol işlemleri; otomatik saha ölçümü ve süreç takibi, arazi düzenlemesi, saha-içi lojistik faaliyetler vb.



Şekil 7. Sırasıyla; Taisei cephe kaplama ve boyama robotu, RIEGL Ricopter saha gözlem robotu ve Beton seviyeleme robotu (Bock, 2015: 115; Bock ve Linner, 2016a: 21, 96)

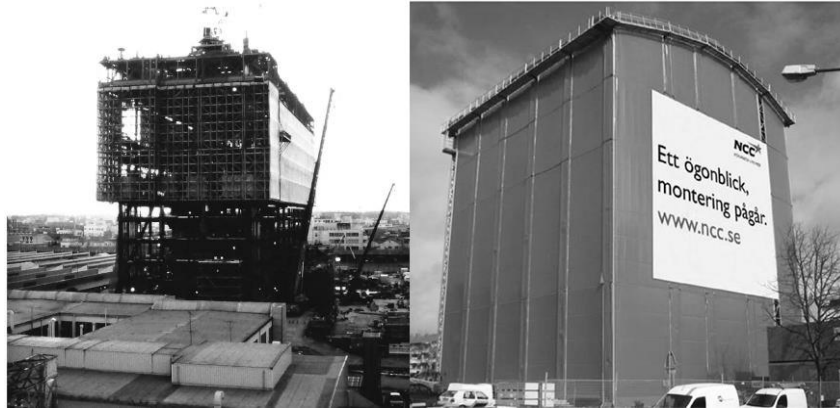
Bu tür sistemler, tamamıyla spesifik bir eylem için tasarlandıkları için yüksek verimlilik ve kalite sunabilmektedirler. Yalnızca belirli bir işin iyileştirilmesi için kullanıldıkları için tüm inşaat sahasının robotlara uygun olarak yapılandırılması gerekmemekte ve konvansiyonel yöntemler ile birlikte kullanılabilirler. Bu durum hem esneklik sağlamakta hem de ilk yatırım maliyetlerinin aşırı yükselmesini önlemektedir (Saidi ve diğerleri, 2016). Bu noktada yalnızca tuğla yerleştirmek için geliştirilen SAM100 robotunun satış fiyatının 500.000 dolar olduğu düşünülürse (Bogue, 2018), tüm faaliyetlerin otonom hale getirilmesinin maliyeti daha iyi anlaşılabilir. Diğer taraftan ise sahanın parçalı ve dağınık bir biçimde robotikleştirilmeye çalışılması, verimlilik açısından bazı olumsuzluklara da yol açmaktadır (Bock ve Linner, 2016a: 291). Robotlar, ek güvenlik önlemleri gerektirmekte ve aynı ortamda insanların eş zamanlı olarak başka bir işi yürütmesi tehlikeli olabilmektedir. Ayrıca robotların bir yerden diğerine taşınımı ve kurulumu işi karmaşıklığa katmakta, ek zaman ve yeni tür kalifiye elemanlar gerektirmektedir.

İlk yaklaşımın olumsuz yönlerinin ana sebebi, sahanın bütününe kapsamlı bir biçimde ele alınmamasıdır. Buradan hareketle ikinci tür bir yaklaşım olarak 1980'li yıllardan itibaren geliştirilen "saha içi

bütünleşik oto-yapım sistemleri" (integrated site automation) (SMART, ABCS, Big Canopy vb. Şekil 8) ise tıpkı bir fabrika ortamının olanaklarını sunmaktadır (Bock ve Linner, 2016b: 11, 119, 205). Bu tür bir yaklaşım dâhilinde birçok tek görevli yapım robotu koordineli bir biçimde tam yapılandırılmış bir ortamda tam otomasyonu sağlamak üzere çalışmaktadır. Dışa kapalı bir ortam sağlandığı için hem üretimi aksatabilecek yağış, rüzgâr ve güneş gibi çevresel faktörlerden daha az etkilenilmekte hem de çevreye gürültü ve kirlilik açısından daha az etkide bulunmaktadır (Maeda, 1994; Pachon, 2012).

Diğer taraftan ise ilk robotik yaklaşımın aksine projenin bütününün (tasarımdan planlamaya ve yapıma kadar tüm faaliyetlerin ve bunlar için gerekli olan uzman iş gücü ve araçların) tam otomasyona yönelik yapılandırılması gerekmektedir. Bu durum zorlu bir adaptasyon sürecine yol açmakta ve ilk yatırım maliyetlerinin oldukça yükselmesinden dolayı konvansiyonel yöntemler ile olan rekabeti güçleştirmektedir. Dolayısıyla otomotiv veya elektronikteki gibi büyük, köklü ve kurumsal firmaların ve uzun vadeli yatırımların görece az olduğu yapı endüstrisinde bilindik yöntemlerin yerine hem maliyetli hem de sektör içerisinde yaygınlığı olmadığı için uyum sorunları yaşanabilecek bir sisteme geçiş yapmak riskli bir tercih olabilmektedir. Sonuç olarak tek görevli yapım robotları bile yaygınlık kazanmamışken (yukarıda belirtilen IFR (2018) raporundan da anlaşılacağı üzere), bu tür sistemler de Japonya'daki yüksek katlı yapıların inşası dışında dünya genelinde oldukça nadir kullanım alanı bulabilmektedir. Cai ve diğerleri (2019) bu duruma yönelik üç boşluk alanı tanımlamaktadır:

- Akademik araştırmalar ve ürünler arasındaki boşluk; önerilen otomasyon çözümlerinin bazıları konsept veya erken gelişim aşamasındadır ve yapımın tüm süreçlerini etkileyen bu tür inovasyonların doğrudan uygulamada kabul görececek bir ürüne dönüştürülmesi güçtür.
- Ürünler ve saha-içi uygulama arasındaki boşluk; robotik sistemlerin yüksek yatırım maliyetlerinin ötesinde pazardaki ilişkin bilgi asimetrisi de mevcut uygulamaların geliştirici büyük firmaların yer aldığı belirli ülkelerde yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Yeterli büyüklüğe, finansa veya bilgiye sahip olmayan firmalarca yürütülen bölgelerin bu sistemlere erişimi sınırlı kalmaktadır.
- İnşaat endüstrisi ile robotik endüstrisi arasındaki boşluk; yapı sektörü dağınık durumdaki çeşitli disiplinlerden oluşmasından ve bunlar arasındaki iletişimin de güçlü olmamasından dolayı endüstriye ilişkin bilgi toplayıp robotik sistemleri geliştirmek ve yaygınlaştırmak güçleşmekte ve iki endüstri arasındaki geçişkenlik zorlaşmaktadır.

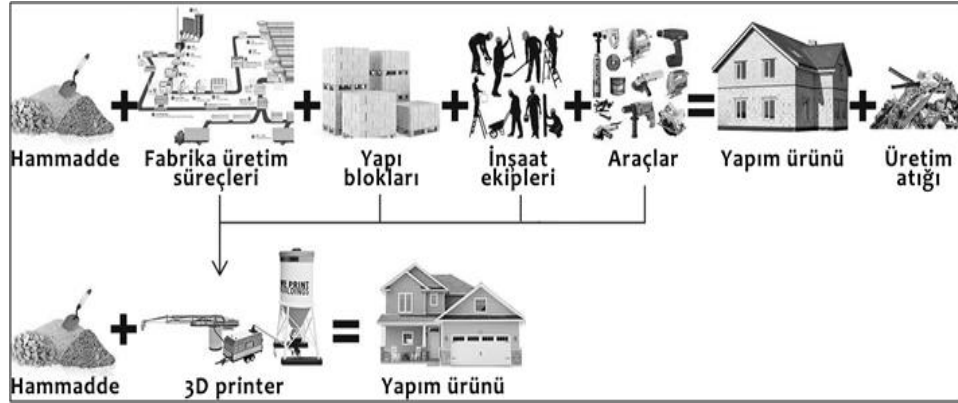


Şekil 8. Sırasıyla; Obayashi ABCS ve NCC-Komplett bütünleşik oto-yapım sistemleri (Bock ve Linner, 2016b: 11, 205)

Bir başka robotik yaklaşım, yapı endüstrisinde ilk olarak Khoshnevis'in (1996) "Contour Crafting" metodu ile ortaya çıkan ve son dönemlerde ilişkin patentlerin sürelerinin dolmasıyla da daha fazla firmanın yatırım yaptığı eklemeli üretim (additive manufacturing) yöntemidir (Gibson ve diğerleri, 2014: 36; Kietzmann ve diğerleri, 2015). 3-boyutlu baskı (3d-printing) olarak da bilinen bu yöntem, kitlesel üretimin aksine bir defaya özgü üretimlerde daha etkindir (De Beer, 2006; Campbell ve diğerleri, 2012) ve bu niteliğiyle de yapı endüstrisinde kullanım için oldukça elverişlidir (Halicioglu ve Koralay, 2019).

Eklemeli üretim, verimlilik artışı sağlayabilecek radikal bir üretim anlayışı sunmaktadır (Berman, 2012; Halicioglu ve Koralay, 2020). Pegna (1997), oto-yapım sistemlerinin yalnızca konvansiyonel yöntemlerin yeni teknolojilerce taklit edilmesinden ibaret olduğu şeklinde bir eleştiride bulunmakta ve eklemeli üretimi şu şekilde öne çıkarmaktadır; "devasa yapım makinalarıyla devasa yapı bileşenlerini bir araya getirmenin karmaşasındansa, her defasında bir kum tanesi yerleştiren karıncaların yaptığı gibi basit ve temel eylemleri art arda eklemek daha akılcıdır." Eklemeli üretim, Şekil 9' da gösterildiği gibi ham maddenin daha kısa bir üretim zincirinden geçerek atıksız bir biçimde ürüne dönüştürülmesini ve böylelikle malzeme, enerji, zaman ve işçilik gibi yönlerden daha az kaynak tüketilmesini sağlamakta (Apis Cor, 2018), bu yönüyle de yalın,

verimli ve sürdürülebilir bir yapım alternatifi sunmaktadır (Tay ve diğerleri, 2017). Farklı bir üretim konseptinin ortaya koyuluyor olmasının dışında ölçek olarak da eklemeli yapı üretimi alanındaki çalışmaların yapı katı büyüklüğündeki baskı makinelerinden daha mobil ve daha küçük olanlarına (örneğin Minibuilders (IAAC, 2018) gibi swarm sistemlere) doğru evriliyor olması, Pegna'nın bu düşüncelerini kısmen doğrulamaktadır. Eklemeli üretim, uzay çalışmalarında Ay ve Mars yüzeyindeki regolit malzemesi ile yapı inşasında kullanılabilmesi düşünülen bir yaklaşımdır (Cesaretti ve diğerleri, 2014; Liu ve diğerleri, 2021) ve bu yaklaşım dâhilinde sürü böceklerinin yuva yapımından ilham alınarak geliştirilen otonom (kendiliğinden organize olabilen) swarm robotik sistemler sağladıkları esneklik ve çok yönlülük ile öne çıkmaktadır (Gerling ve Von Mammen, 2016; Irawan ve diğerleri, 2019). Bir başka gelişme alanı, akıllı malzemelerin baskısı ile yapı bileşenlerine uyarın altında nasıl davranış göstermesi gerektiği bilgisini ekleyerek zaman boyutu kazandıran 4-boyutlu baskı yöntemleridir (Zhang ve diğerleri, 2019), bu sayede örneğin kendiliğinden kurulabilen çatı sistemleri üretilebilmektedir.



Şekil 9. Eklemeli üretim ve konvansiyonel üretim biçimlerinin karşılaştırılması (Apis Cor, 2018)

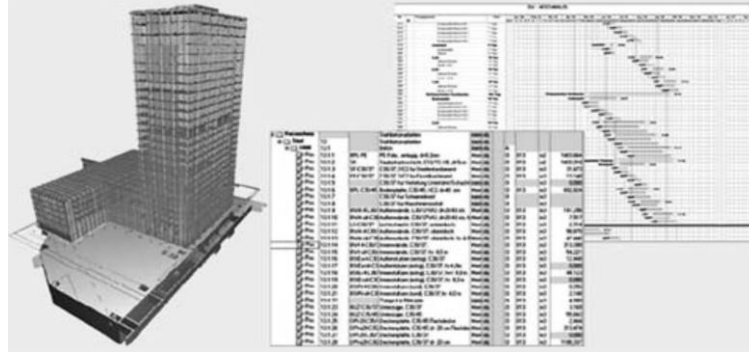
Tüm bu olumlu yönlerine karşın, eklemeli yapı üretimi prefabrikasyonun ve oto-yapım sistemlerinin tam bir ikamesi de değildir. Her ne kadar giderek daha fazla baskı yönteminin yapı endüstrisine adapte edilip geliştirilmesi ile birlikte metal (Buchanan ve Gardner, 2019), geopolimer (Xia ve diğerleri, 2019) ve köpük (Bedarf ve diğerleri, 2021) gibi malzemelerin de kullanılmaya başlanmasına rağmen günümüzde daha çok iç ve dış duvarların beton benzeri malzemeler ile üretiminde kullanılmaktadır (Bogue, 2013; Holt ve diğerleri, 2019: 349; Mechtcherine ve diğerleri, 2019). Malzemenin basılabilirliği, inşanın strüktürel dayanımı ve ölçeklendirilebilirlik gibi mevcut tekniksel sınırlılıklar aşılrsa dahi her tür materyal tipi, ürün tipi, büyüklüğü veya miktarı için bu yöntem alternatiflerinden daha pratik ve ekonomik olmayabilmektedir. Bu nedenle her bir üretim metodunun kendi avantajlarının öne çıkarılıp birlikte kullanıldığı bütünleşik bir yaklaşım, daha gerçekçi bir hedef olarak görülmektedir (Khoshnevis, 2004; Perkins ve Skitmore, 2015). Diğer bir önemli nokta, eklemeli üretimin radikal bir yöntem olmasının aynı zamanda yayılımını da zorlaştırıyor olmasıdır. Yapı endüstrisindeki üretim standartlarını belirleyen yasa düzenleyici kurumlar, sektör içerisindeki yenileşim düzeyinin düşük olmasından da dolayı konvansiyonel yöntemlerin dışında kalan ve belirli prosedürlerden geçmemiş metotlara kuşkuyla yaklaşabilmektedir (El-Sayegh ve diğerleri, 2020). Bu durumdan kaynaklı onaylama süreçlerine ilişkin belirsizlikler, firmaların yenilikçi teknolojilere yönelmesinde caydırıcı bir unsur olabilmektedir.

Son olarak dijital sistemlere ilişkin diğer alan olan bilgi ve iletişim sistemleri ise saha-içi ve saha-dışı üretimde gerekli olan bilginin daha kolay, hızlı ve isabetli bir biçimde işlenip aktarılabilmesini sağlayan teknolojilerdir. Bu tür sistemler, yapım otomasyonunun bir uzantısı olarak gösterilen ve fiziksel inşa süreçleri ile dijital teknolojiler arasındaki bağlantıyı tariflemek için kullanılan 'dijital üretim' (dijital fabrication – dfab) altında öne çıkmaktadır (de Soto ve diğerleri, 2018; Gramazio ve Kohler, 2014: 22). Son dönemlerdeki çalışmaların robotik alanındaki araştırma/geliştirme faaliyetlerindeki maliyet ve performans sorunları sebebiyle otonom makina sistemlerinden (hard robotics) algısal veri toplama/işleme ve çip tabanlı süreç kontrolü gibi sistemlere (soft robotics) doğru kaydığı belirtilmektedir (Kim ve diğerleri, 2021).

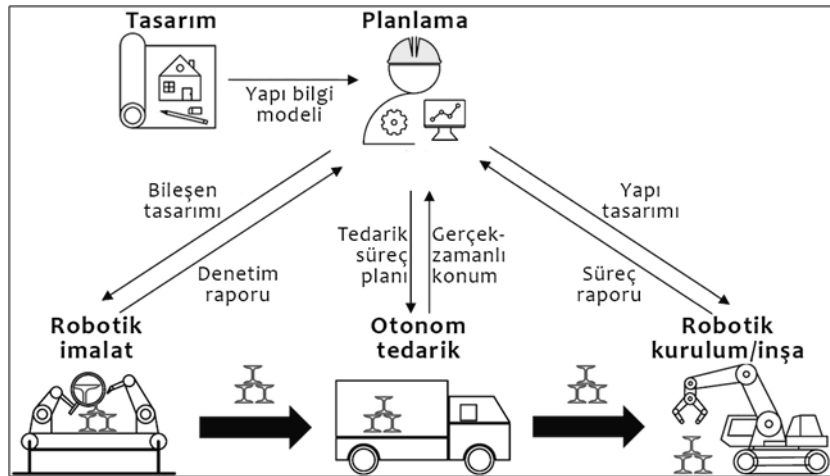
Tasarım bilgisi işlemeye yönelik olarak 1950'lerde geliştirilen Pronto ve Sketchpad ile başlayıp sonrasında giderek daha kapsamlı yazılımlara evrilen CAD teknolojileri; fiziksel üretime geçmeden önce hem tasarımcıların hem de mühendislerin ürünü iki veya üç boyutlu olarak modelleyip görselleştirebilmelerini sağlamakta, karmaşık analizleri ve hesaplamaları da olanaklı kılmaktadır (Castro-Lacouture, 2009: 1074; Kensek ve Noble, 2014: 29-42). Bu tür teknolojilerin endüstrisindeki kullanımına yönelik ilk dönemlerdeki eleştiriler, Pegna'nın (1996) oto-yapım sistemlerine yönelttiği eleştiriler ile benzerdir. William (1986), üretimi bir bütün olarak sorgulamak ve yeni konseptler geliştirmek yerine

konvansiyonel bir tasarım sürecindeki eylemler dizisini insanlardan bilgisayarlara devretmeyi hedeflemenin gelişimi sınırladığını, bu durumun yalnızca aynı karmaşık süreci daha üstün olduğu düşünülen bir sisteme aktarmaktan ibaret olduğunu ve dolayısıyla problemi çözmediğini belirtmektedir, örneğin el ile üretilen bir çizim yine aynı mantık dâhilinde bilgisayar ortamında üretilmektedir.

Radikal bir gelişim gereği otomasyon kapsamında saha içerisindeki ve dışarısındaki yapım faaliyetlerinin projenin tüm yaşam döngüsü boyunca bir bütün olarak bilgi ve iletişim sistemlerince desteklediği bir üretim modeli gereklidir (Howard ve diğerleri, 1989; Alfares ve Seireg, 1996) ve bu bağlamda da bilgisayarlaştırılmış yapım (William, 1986), bilgisayarla bütünleşik yapım (Jung ve Gibson, 1999), zeki yapım (Bulbul ve diğerleri, 2009), yapımda Endüstri 4.0 (Oesterreich ve Teuteberg, 2016; Jäger ve diğerleri, 2016), akıllı yapım (Wu ve Cai, 2017) ve yapım 4.0 (Sawhney ve diğerleri, 2020: 3-22) gibi konseptler ortaya koyulmaktadır. Bu tür konseptlerin yapı endüstrisinde gerçekliğe dönüştürülebilmesini sağlama potansiyeli ile günümüzde ön plana çıkan bilgi işleme platformu ise BIM (Building Information Modelling) sistemidir (Eastman ve diğerleri, 2011: 19). Tüm proje katılımcılarının iş birliği içerisinde hareket edebilmesini sağlayan BIM sistemleri (Şekil 10), yalnızca biçim bilgisi taşımanın ötesinde tasarlanan yapının performansına ilişkin simülasyonların oluşturulabilmesini (Sacks ve diğerleri, 2010), yapım faaliyetlerinin optimum biçimde planlanabilmesini (malzeme seçimi, robotik faaliyetler, süreç planlaması vb.) (Abrishami, 2016; Davtalab ve diğerleri, 2018), tüm bunların yanı sıra mevcut iletişim ve bilgi-işlem sistemleri (mobil cihazlar, internet, Wi-Fi, bulut sistemleri, büyük veri, simülasyonlar, yapay zeka, derin öğrenme vb.) (Bokor ve diğerleri, 2019; Bello ve diğerleri, 2021) aracılığıyla tedarik ve yapım sürecinin eş zamanlı takibini sağlayabilmektedir (Navon ve Goldschmidt, 2003; Babič ve diğerleri, 2010; Chu ve diğerleri, 2018). Şekil 11'de gösterildiği gibi üretim çerçevesi bu tür bir otonom sürece ilişkin basit bir örnek oluşturmaktadır; yapıya ilişkin bilgi modellemesi altında tasarım ve planlama oluşturulmakta, bu bilgi saha dışındaki (robotik imalat) ve içindeki (robotik kurulum) otomasyon sistemleri ile aralarındaki otonom tedarik zincirine aktarılıp gerçek-zamanlı olarak kontrol edilmektedir. Tüm fiziksel üretim sürecinin bilgisayar tabanlı bir algoritma tarafından yönetilip kontrol edildiği bu tür bir yaklaşım siber-fiziksel sistemler olarak da ele alınmaktadır (Volkov ve Shilova, 2020).



Şekil 10. Bir yapının dijital modeli ve ilişkin maliyet-zaman hesaplamaları (Castro-Lacouture, 2009: 1074)

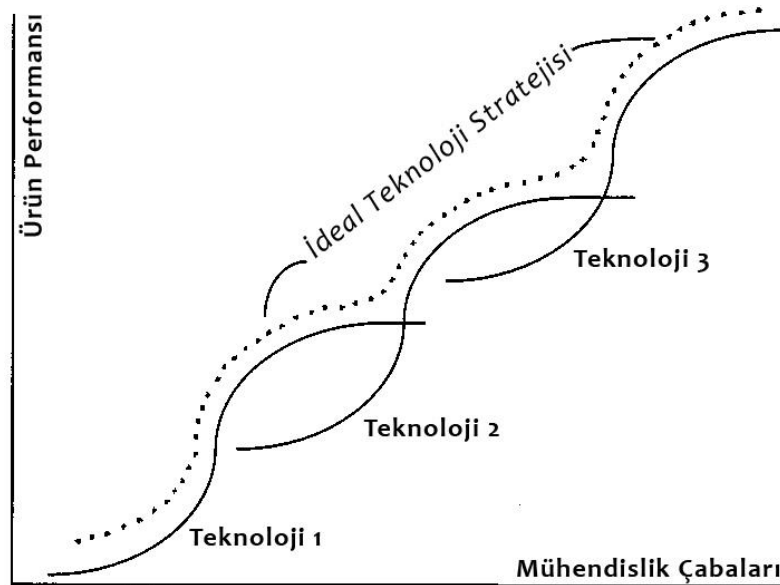


Şekil 11. Yapım otomasyonu için bir süreç çerçevesi (Chea ve diğerleri, 2020)

BIM sistemlerinin yapım otomasyonunu desteklemeye ve sektörün parçalılığı içerisinde daha sıkı iş birliklikleri oluşturmaya yönelik sağladığı fırsat alanları aynı zamanda sistemin karşısında sınırlandırıcı etmenler de oluşturabilmektedir. Her şeyden önce sistemden en üst düzeyde faydalanabilmek için yoğun insan iş gücü kullanımından ziyade robotik sistemlerin yaygınlaşması gerekmektedir. Tam bir iş birliklik için ise tüm ayrıık iş gruplarının BIM sistemini kullanıyor olması gerekmektedir, kullanılıyor olsa dahi farklı grupların farklı tür bir yazılımı tercih ediyor olması uyumsuzluklar doğurabilmektedir (Oh ve diğerleri, 2015). Ayrıca bu sistemlerin endüstriyelleşme ve dijitalleşme kapsamında bir devlet politikası olarak desteklenmesi, yasa düzenleyici ve uygulayıcı kurumların bu doğrultuda hareket etmesi gerekmektedir (Zhang ve diğerleri, 2016; Leviäkangas ve diğerleri, 2017).

Otomasyon sistemlerine yönelik ele alınan tüm bu görüşlerden ve ilişkin gelişmelerden hareketle bir değerlendirme yapılacaktır; yapı üretimi ürün, süreç ve endüstri düzeylerinde kendisine özgü özellikler barındıran karmaşık bir üretim ağıdır ve bu durum daha etkin bir üretime yönelik gelişmelerin ortaya çıkmasını ve yayılımını sınırlandırmaktadır. Elbette ki çağın getirdiği olanaklardan belirli bir ölçüde faydalanılmaktadır (örneğin yapı bileşenleri büyük oranda kitlesel olarak üretilmekte veya tasarım süreci dijital sistemler aracılığı ile yürütülmektedir), fakat bunlar genellikle sürecin bütününe değil belirli parçalarının iyileştirilmesine yöneliktir. Bu bakımdan kapsamlı ve köklü bir üretim konseptinin geliştirilebilmesi, geliştirilse dahi sektörün parçalılığı içerisinde yaygınlaşabilmesi güçtür. Bir endüstri içerisindeki üretim modelinin veya teknolojilerin zaman içerisinde sürekli olarak daha etkin olanları ile S-Eğrileri (Şekil 12) altında ikame edilmesi beklenirken (Christensen, 1999: 3.Bölüm, 4), yapı endüstrisi ise konvansiyonel üretim yöntemlerinde ısrarcı bir sektör olduğu için bir teknoloji daha yaygınlaşmadan diğer endüstrilerde ikamesi bile ortaya çıkabilmektedir.

Çözüm odaklı olarak endüstrinin parçalılığını ve dağınıklığını göz önünde bulundurarak tüm katılımcıları (işveren, tasarımcılar ve mühendisler, tedarikçiler, ürün-teknoloji geliştiricileri, düzenleyici kurumlar vs.) kapsayan bir düşünce değişimi gerekmektedir (Memari ve diğerleri, 2017) ve bu bağlamda yapım faaliyetinin gerekliliklerini hem yönetsel hem de tekniksel yönlerden kapsamlı bir biçimde ele alınmasını sağlayacak bütüncül bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmaktadır (Saurin ve diğerleri, 2013; Shadid, 2018). Yapı üretiminin özgü karmaşık doğasının daha derinlikli olarak anlaşılabilmesi üzerinden ele alınacak olan bu tür bir yaklaşım, mevcut teknolojik gelişmelerin doğru bir yönetim ile daha etkin bir biçimde kullanılabilmesini ve yapı üretim sürecinin bütününe yönelik radikal çözümlerin üretilmesini sağlayacaktır (Bertelsen ve Sacks, 2007).



Şekil 12. Bir endüstri içerisindeki yenilikçi teknolojilerin gelişiminin S-eğrisi ile gösterimi (Christensen, 1999)

4. SONUÇ

Yapı endüstrisi kalite, kapsam, hızlilik, maliyet ve verimlilik gibi niceliksel ve niteliksel yönlerden yeterli üretim etkinliğini sağlayamadığı gerekçesiyle uzun bir süredir eleştirilmektedir. Bu eleştirel görüşü destekleyen endüstri raporlarındaki veriler göstermektedir ki; sektör hem üretkenlik değerleri hem de üretkenliğini artıracak robotik ve dijital sistemler gibi yenilikçi teknolojilerin yayılımı açısından küresel ortalamaların altında yer almaktadır. Sorunun sebebi olarak endüstrinin kendi karmaşık doğasından

kaynaklı ürün, süreç ve endüstri düzeylerindeki özgü özellikler bileşimi gösterilmektedir. Yapı; araziye bağlı, büyük hacimli ve bir defaya özgü bir üründür ve üretimi de yüksek miktarda ve çeşitlilikte iş gücünün geçici iş birliklikleri dâhilindeki zorlu ve karmaşık bir süreci gerektirir. Endüstri içerisinde küçük bölgesel firmalardan veya iş gruplarından oluşan, merkezi olmayan, dağınık ve parçalı bir üretim mekanizması tarafından yürütülen yapım süreci, bir taraftan gerekli olan bireysel ve yerel ihtiyaçları karşılamak için gerekli olan esnekliği yakalayabilmekte başarı sağlarken diğer taraftan ise radikal yenileşim için gerekli olan sermaye ve düşünce birikimini sınırlandırdığı için insan iş gücüne ve konvansiyonel tekniklere bağlı, modern çağı geriden takip eden bir üretim anlayışına sebep olmaktadır.

İmalat endüstrilerinin 20. yüzyılın başından bu yana otomasyona ilişkin öncülüğü sayesinde sürekli bir sıçrama halinde olması üretim başarısında belirgin bir farkın oluşmasını sağlamaktadır. Buna bağlı olarak çağın gerisinde kaldığının farkına varmaya başlayan yapı endüstrisi, kendi yenilikçi çözümlerini de üretmediği için yüzyıl boyunca takipçisi olduğu imalat endüstrilerinin üretim modellerini kendisine taşımaya çalışmakta fakat bu tür bir aktarımdan kendi doğasının gerekleri ile örtüşmediği için sınırlı düzeyde faydalanabilmektedir. Uygulamaya geçirilmiş başarılı çözümler bulunsa dahi çeşitli sebeplerle (yeni bir üretim modeline geçişin getirdiği yüksek ilk yatırım maliyetleri, yeterli uygun uzman iş gücünün bulunamama ihtimali, yerel yasa düzenleyici kurumların yeni tür yöntemleri destekleyici olmaması, kalite, kapsam ve estetik gibi yönlerden kişiye ve bölgeye göre değişebilen talepleri karşılayabilecek kadar esnek olamama vb.) bunların yerine daha verimsiz fakat hâlihazırda deneyim sahibi olunan, sektör içerisinde bilinirliği olan ve dolayısıyla risk faktörü düşük konvansiyonel yöntemler tercih edilebilmektedir.

Her ne kadar yapım otomasyonu konusunda istenilen düzeyler yakalanamamış olsa da, hem akademik çevrelerce konuya ilişkin sahip olunan farkındalık doğrultusunda çalışmalar yürütülmekte hem de tarihsel süreçte yapım sürecinin birçok safhasına yönelik araştırma geliştirme deneyimi bulunmaktadır. İlk olarak 1900'lerin başından itibaren geliştirilen saha dışı ve sonrasında 1970'lerden itibaren geliştirilen saha içi otomasyon sistemlerine ek olarak son dönemde tüm bunları kesintisiz ve kusursuz bir biçimde bağlayacak olan bilgi-iletişim sistemlerinin geliştirilmesi ağırlık kazanmaktadır.

Daha etkin bir üretim sağlayabilmek için, yapım faaliyet ağının bir bütün olarak kapsamlı bir biçimde ele alınması gerekmektedir (örneğin tasarım ekibi sahip olduğu bilgi ve iletişim sistemleri ile tam-otomasyon potansiyeline sahip iken saha içerisindeki üretim ekibinin insan iş gücüne dayalı yöntemler kullanıyor olması hem iş grupları hem de süreçler arasında düşünsel ve tekniksel kopukluklara sebep olmaktadır ve ilerleme konusunda birbirlerini sınırlandırmaktadır). Dolayısıyla endüstrinin başarısı için tüm proje katılımcılarının tüm proje süreci boyunca ortak bir paydada buluşabildikleri bir yenilikçi üretim konseptine ve bu tür bir konseptin de yaygın ve ortak kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunu sağlayabilecek yenilikçi teknolojik olanaklar giderek artmaktadır ve bunların uygun yenilikçi yönetimsel yaklaşımlar ile birlikte yapı üretim ağının doğasına uygun olarak şekillendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Abd Rashid, M.N., Abdullah, M.R., Ismail, D. ve Saberi, M.H. (2019). "Automation and Robotics in Industrialized Building System (IBS): The Potential Criteria for Measurement", *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 9(7), 1020-1034.
- Abrishami, S. (2016). "Conceptual Design Automation: Consideration of Building Materials Impact at Early Stages of AEC Design", *Advances in Civil, Architectural, Structural and Constructional Engineering*, Editörler: Kim, D.K., Jung, J. ve Seo, J., *Proceedings of the International Conference on Civil, Architectural, Structural and Constructional Engineering*, Dong-A University, Busan, South Korea, August 21-23, 2015, CRC Press, London, UK, 263-268.
- Alfares, M. ve Seireg, A. (1996). "An Integrated System for Computer-Aided Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings Using Modular Forms", *Automation in Construction*, 5(4), 323-341.
- Alim, M.A., Tao, Z., Hassan, M.K., Rahman, A., Wang, B., Zhang, C. ve Samali, B. (2019). "Is It Time to Embrace Building Integrated Photovoltaics? A Review With Particular Focus on Australia", *Solar Energy*, 188, 1118-1133.
- Anton, A., Reiter, L., Wangler, T., Frangez, V., Flatt, R.J. ve Dillenburger, B. (2021). "A 3D Concrete Printing Prefabrication Platform for Bespoke Columns", *Automation in Construction*, 122, 103467.
- Aparicio, J., Lovell, C.K. ve Pastor, J.T. (2016). "Advances in Efficiency and Productivity", Springer International Publishing, Cham.
- Apis Cor (2018). "Company Presentation: Technical report", http://apis-cor.com/files/ApisCor_presentation.pdf (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Attia, S., Lioure, R. ve Declaude, Q. (2020). "Future Trends and Main Concepts of Adaptive Facade Systems", *Energy Science & Engineering*, 8(9), 3255-3272.
- Austin, S., Newton, A., Steele, J. ve Waskett, P. (2002). "Modelling and Managing Project Complexity", *International Journal of Project Management*, 20(3), 191-198.
- Aziz, R.F. ve Hafez, S.M. (2013). "Applying Lean Thinking in Construction and Performance Improvement", *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 679-695.
- Babič, N.Č., Podbreznik, P. ve Rebolj, D. (2010). "Integrating Resource Production and Construction Using BIM", *Automation in Construction*, 19(5), 539-543.
- Balaguer, C. ve Abderrahim, M. (2008). "Trends in Robotics and Automation in Construction", *Robotics and Automation in Construction*, <https://www.intechopen.com>, (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Baldwin, J. (1997). "BuckyWorks: Buckminster Fuller's Ideas for Today", John Wiley & Sons, New York.
- Ballard, G. ve Howell, G. (1998). "What Kind of Production is Construction", *Proceedings of 6th Annual Conf. Int'l. Group for Lean Construction*, 13-15.
- Bedarf, P., Dutto, A., Zanini, M. ve Dillenburger, B. (2021). "Foam 3D Printing for Construction: A Review of Applications, Materials, and Processes", *Automation in Construction*, 130, 103861.
- Bello, S.A., Oyedele, L.O., Akinade, O.O., Bilal, M., Davila Delgado, J.M., Akanbi, L.A., Ajayi, A.O. ve Owolabi, H.A., (2021). "Cloud Computing in Construction Industry: Use Cases, Benefits and Challenges", *Automation in Construction*, 122, 103441.
- Bergdoll, B., Christensen, P., Christensen, P.H. ve Oshima, K. (2008). "Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling", The Museum of Modern Art, New York.
- Berman, B. (2012). "3-D Printing: The New Industrial Revolution", *Business Horizons*, 55(2), 155-162.
- Bertelsen, S. ve Sacks, R. (2007). "Towards a New Understanding of the Construction Industry and the Nature of its Production", *15th Conference of the International Group for Lean Construction*, Michigan State University, East Lansing, Michigan, 46-56.
- Bertelsen, S., Henrich, G., Koskela, L. ve Rooke, J. (2007). "Construction Physics", *15th Annual Conference of the International Group for Lean Construction IGLC*, 15 Temmuz 2007, Michigan State University, East Lansing.
- Bertram, N., Fuchs, S., Mischke, J., Palter, R., Strube, G. ve Woetzel, J. (2019). "Modular Construction: From Projects to Products", *Capital Projects & Infrastructure*, McKinsey & Company. 1-34.
- Björnfort, A. ve Sardén, Y. (2006). "Prefabrication: A Lean Strategy for Value Generation in Construction", *Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, Catholic University of Chile, School of Engineering, 25-27 July, 265-277.
- Bock, T. (2015). "The Future of Construction Automation: Technological Disruption and the Upcoming Ubiquity of Robotics", *Automation in Construction*, 59, 113-121.
- Bock, T. ve Linner, T. (2015a). "Robot Oriented Design", Cambridge University Press, New York.
- Bock, T. ve Linner, T. (2015b). "Robotic Industrialization", Cambridge University Press, New York.

- Bock, T. ve Linner, T. (2016a). "Construction Robots (3): Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots", Cambridge University Press, New York.
- Bock, T. ve Linner, T. (2016b). "Site Automation", Cambridge University Press, New York.
- Bogue, R. (2013). "3D Printing: The Dawn of a New Era in Manufacturing?", *Assembly Automation*, 33(4), 307-311.
- Bogue, R. (2018). "What are the Prospects for Robots in the Construction Industry?", *Industrial Robot*, 45 (1), 1-6.
- Bokor, O., Florez, L., Osborne, A. ve Gledson, B.J. (2019). "Overview of Construction Simulation Approaches to Model Construction Processes", *Organization, Technology & Management in Construction: An International Journal*, 11(1), 1853-1861.
- Buchanan, C. ve Gardner, L. (2019). "Metal 3D Printing in Construction: A Review of Methods, Research, Applications, Opportunities and Challenges", *Engineering Structures*, 180, 332-348.
- Bulbul, T., Anumba, C.J. ve Messner, J. (2009). "A System of Systems Approach to Intelligent Construction Systems", *Computing in Civil Engineering*, 2(4), 22-32.
- Cai, S., Ma, Z., Skibniewski, M.J. ve Bao, S. (2019). "Construction Automation and Robotics for High-Rise Buildings Over the Past Decades: A Comprehensive Review", *Advanced Engineering Informatics*, 42, 100989.
- Campbell, I., Bourell, D. ve Gibson, I. (2012). "Additive Manufacturing: Rapid Prototyping Comes of Age", *Rapid Prototyping Journal*, 18(4), 255-258.
- Caneparo, L. (2014). "Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction", Editor: Cerrato, A., Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Castro-Lacouture, D. (2009). "Construction Automation", *Springer Handbook of Automation*, Editor: Nof S. Y., Berlin Heidelberg: Springer, 1063-1078.
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V. ve 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.
- Chea, C.P., Bai, Y., Pan, X., Arashpour, M. ve Xie, Y. (2020). "An Integrated Review of Automation and Robotic Technologies for Structural Prefabrication and Construction", *Transportation Safety and Environment*, 2(2), 81-96.
- Christensen C.M. (1999). "Innovation and Change: The Evolution of Innovation", *The Technology Management Handbook*, Editor: Dorf, R.C., CRC Press & IEEE Press, Florida, USA.
- Chu, M., Matthews, J. ve Love, P.E. (2018). "Integrating Mobile Building Information Modelling and Augmented Reality Systems: An Experimental Study", *Automation in Construction*, 85, 305-316.
- Coelli, T.J., Rao, D.S.P., O'Donnell, C.J. ve Battese, G.E. (2005). "An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis", Springer Science & Business Media, Berlin Heidelberg.
- Cousineau, L. ve Miura, N. (1998). "Construction Robots: The Search for New Building Technology in Japan", ASCE Publications, Reston, Virginia.
- Cox, R. ve Goodman, C.S. (1956). "Marketing of Housebuilding Materials", *Journal of Marketing*, 21(1), 36-61.
- Davtalab, O., Kazemian, A. ve Khoshnevis, B. (2018). "Perspectives on a BIM-Integrated Software Platform for Robotic Construction Through Contour Crafting", *Automation in Construction*, 89, 13-23.
- De Beer, N. (2006). "Advances in Three Dimensional Printing-State of the Art and Future Perspectives", *Journal for New Generation Sciences*, 4(1), 21-49.
- De Soto, B.G. ve Skibniewski, M.J. (2020). "Future of Robotics and Automation in Construction", *Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment*, Editors: Sawhney, A., Riley, M., & Irizarry, J., 1st Edition, Routledge, London, 289-306.
- De Soto, B.G., Agustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G. ve Adey, B.T. (2018). "Productivity of Digital Fabrication in Construction: Cost and Time Analysis of a Robotically Built Wall", *Automation in Construction*, 92, 297-311.
- Delgado, J.M.D., Oyedele, L., Ajayi, A., Akanbi, L., Akinade, O., Bilal, M. ve Owolabi, H. (2019). "Robotics and Automated Systems in Construction: Understanding Industry-Specific Challenges for Adoption", *Journal of Building Engineering*, 26, 100868.
- Dubois, A. ve Gadde, L.E. (2002). "The Construction Industry as a Loosely Coupled System: Implications for Productivity and Innovation", *Construction Management & Economics*, 20(7), 621-631.
- Dvir, D., Lipovetsky, S., Shenhar, A. ve Tishler, A. (1998). "In Search of Project Classification: A Non-Universal Approach to Project Success Factors", *Research Policy*, 27(9), 915-935.
- Eastman, C.M., Eastman, C., Teicholz, P. ve Sacks, R. (2011). "BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors", John Wiley & Sons, New Jersey.
- Egan J. (1994). "Rethinking Construction", <http://constructingexcellence.org.uk>, (Erişim Tarihi: 01.12.2018).

- El-Sayegh, S., Romdhane, L. ve 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.
- Fried, H.O., Lovell, C.K. ve Schmidt, S.S. (2008). "The Measurement of Productive Efficiency and Productivity Growth", Oxford University Press, Oxford.
- Fuller, R.B. (1999). "Your Private Sky: R. Buckminster Fuller: The Art of Design Science", Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg.
- Gerling, V. ve Von Mammen, S. (2016). "Robotics for Self-Organised Construction", *2016 IEEE 1st International Workshops on Foundations and Applications of Self Systems (FASW)*, 12-16 September, Augsburg, Germany, IEEE, 162-167.
- Gharehbaghi, K., Mulowayi, E., Rahmani, F. ve Paterno, D. (2021). "Case Studies in Modular Prefabrication: Comparative Analysis and Discoveries", *Journal of Physics: Conference Series*, 1780, 1, 012009.
- Gibson, I. Stucker, B. ve Rosen, D. (2014). "Additive Manufacturing Technologies", Springer, New York.
- Gidado, K.I. (1996). "Project Complexity: The Focal Point of Construction Production Planning", *Construction Management & Economics*, 14(3), 213-225.
- Gramazio, F. ve Kohler, M. (Eds.), (2014). "Made by Robots: Challenging Architecture at a Larger Scale", John Wiley & Sons.
- Gupta, A.K. ve Arora, S.K. (2009). "Industrial Automation and Robotics", Laxmi Publications, New Delhi.
- Halicioğlu, F.H. ve Koralay, S. (2019). "Innovative Approaches to Automated Construction: Recent Advances and Future Visions on Three dimensional Printing", *Proceedings of CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction) World Building Congress (CIB WBC 2019), CIB World Building Congress 2019: Constructing Smart Cities*, 17-21 June, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China.
- Halicioğlu, F.H. ve Koralay, S. (2020). "Applicability Analysis of Additive Manufacturing Methods in Construction Projects", *Gradevinar*, 72(4), 335-349.
- Hao, J.L., Cheng, B., Lu, W., Xu, J., Wang, J., Bu, W. ve Guo, Z. (2020). "Carbon Emission Reduction in Prefabrication Construction during Materialization Stage: A BIM-Based Life-Cycle Assessment Approach", *Science of the Total Environment*, 723, 137870.
- HM Government (2013). "Construction 2025: Industrial Strategy: Government and Industry in Partnership", https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/210099/bis-13-955-construction-2025-industrial-strategy.pdf (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Holt, C., Edwards, L., Keyte, L., Moghaddam, F. ve Townsend, B. (2019). "Construction 3D Printing", Chapter 17, *3D Concrete Printing Technology*, Editors: Sanjayan, J.G., Ali Nazari, A. ve Nematollahi, B., Butterworth-Heinemann, 349-370.
- Howard, H.C., Levitt, R., Paulson, B.C., Pohl, J.G. ve Tatum, C.B. (1989). "Computer Integration: Reducing Fragmentation in AEC Industry", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 3(1), 18-32.
- Höök, M. ve Stehn, L. (2008). "Applicability of Lean Principles and Practices in Industrialized Housing Production", *Construction Management and Economics*, 26(10), 1091-1100.
- IAAC, (2018). "Minibuilders", Institute for Advanced Architecture of Catalonia, <http://robots.iaac.net>, (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- IFR, International Federation of Robotics (2012). "History of Industrial Robots", <https://ifr.org/robot-history>, (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- IFR, International Federation of Robotics (2018). "Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots", https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf, (Erişim Tarihi: 01.09.2021).
- IFR, International Federation of Robotics (2021). "Executive Summary World Robotics 2021 Industrial Robots", https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2021.pdf, (Erişim Tarihi: 01.09.2021).
- Imperiale, A. (2012). "An American Wartime Dream: The Packaged House System of Konrad Wachsmann and Walter Gropius", *Offsite: Theory and practice of Architectural Production, Association of Collegiate Schools of Architecture (ACSA) 2012 Fall Conference Proceedings*, 39-43.
- Inhabitat, (2018). "Get a Free Vintage Prefab", <https://inhabitat.com/get-a-free-vintage-prefab-deadline-april-12/> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Irawan, J., De Kestelier, X., Argyros, N., Lewis, B. ve Gregson, S. (2019). "A Reconfigurable Modular Swarm Robotic System for ISRU (In-Situ Resource Utilisation) Autonomous 3D Printing in Extreme Environments", *Proceedings of the Design Modelling Symposium, Berlin*, In: Gengnagel C., Baverel O., Burry J., Ramsgaard Thomsen M., Weinzierl S. (eds) *Impact: Design With All Senses*, Springer, Cham, 685-698.

- Jäger, J., Schöllhammer, O., Lickefett, M. ve Bauernhansl, T. (2016). "Advanced Complexity Management Strategic Recommendations of Handling the "Industrie 4.0" Complexity for Small and Medium Enterprises", *Procedia CIRP*, 57, 116-121.
- Janipha, N.A.I., Ahmad, N. ve Ismail, F. (2015), "Clients' Involvement in Purchasing Process for Quality Construction Environment", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 168, 30-40.
- Jensen, T.C., Bekdik, B. ve Thuesen, C. (2014). "Understanding Complex Construction Systems through Modularity", *Proceedings of the 7th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation (MCPC 2014)*, Aalborg, Denmark, Şubat 4-7, 541-555.
- Jung, Y. ve Gibson, G.E. (1999). "Planning for Computer Integrated Construction", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 13(4), 217-225.
- Kasperzyk, C., Kim, M.K. ve Brilakis, I. (2017). "Automated Re-Prefabrication System for Buildings Using Robotics", *Automation in Construction*, 83, 184-195.
- Kensek, K. ve Noble, D. (2014). "Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice", John Wiley & Sons.
- Khoshnevis, B. (1996). "U.S. Patent No. 5,529,471", Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Khoshnevis, B. (2004). "Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies", *Automation in Construction*, 13(1), 5-19.
- Kieran, S. ve Timberlake, J. (2004). "Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction", McGraw-Hill, New York.
- Kietzmann, J., Pitt, L. ve Berthon, P. (2015). "Disruptions, Decisions, and Destinations: Enter the Age of 3-D Printing and Additive Manufacturing", *Business Horizons*, 58(2), 209-215.
- Kim, T., Lee, D., Lim, H., Lee, U.K., Cho, H. ve Cho, K. (2021). "Exploring Research Trends and Network Characteristics in Construction Automation and Robotics Based on Keyword Network Analysis", *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 20(4), 442-457.
- Koskela, L. (1992). "Application of the New Production Philosophy to Construction (72)", Stanford University, Stanford, CA.
- Koskela, L., Howell, G., Ballard, G. ve Tommelein, I. (2002). "The Foundations of Lean Construction", *Design and Construction: Building in Value*, 211-226.
- Larsen, M.S.S., Lindhard, S.M., Brunoe, T.D., Nielsen, K. ve Larsen, J.K. (2019). "Mass Customization in the House Building Industry: Literature Review and Research Directions", *Frontiers in Built Environment*, 5, 115.
- Latham S.M. (1994). "Constructing the Team", Final Report, July 1994, <https://constructingexcellence.org.uk/wp-content/uploads/2014/10/Constructing-the-team-The-Latham-Report.pdf> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Leviäkangas, P., Paik, S. M. ve Moon, S. (2017). "Keeping up with the Pace of Digitization: The Case of the Australian Construction Industry", *Technology in Society*, 50, 33-43.
- Li, Z. ve He, D. (2013). "Discussion of a Method of Collaborative Construction Project Information Management Based on BIM", *ICCREM 2013: Construction and Operation in the Context of Sustainability*, 492-498.
- Lin, Z. (2011). "Nakagin Capsule Tower: Revisiting the Future of the Recent Past", *Journal of Architectural Education*, 65(1), 13-32.
- Linner, T. (2013). "Automated and Robotic Construction: Integrated Automated Construction Sites", Doktora Tezi, Technische Universität München, Münih.
- Liu, J., Li, H., Sun, L., Guo, Z., Harvey, J., Lu, H. ve Jia, M. (2021). "In-Situ Resources for Infrastructure Construction on Mars: A Review", *International Journal of Transportation Science and Technology*, DOI: 10.1016/j.ijtst.2021.02.001.
- Lu, W., Chen, K., Xue, F. ve Pan, W. (2018). "Searching for an Optimal Level of Prefabrication in Construction: An Analytical Framework", *Journal of Cleaner Production*, 201, 236-245.
- Lu, W., Lee, W.M., Xue, F. ve Xu, J. (2021). "Revisiting the Effects of Prefabrication on Construction Waste Minimization: A Quantitative Study Using Bigger Data", *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105579.
- Luo, L., He, Q., Jaselskis, E.J. ve Xie, J. (2017). "Construction Project Complexity: Research Trends and Implications", *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(7), 04017019.
- Maeda, J. (1994). "Development and Application of the SMART System", *Automation and Robotics in Construction XI*, 457-464.
- Maurer, M. (2017). "Complexity Management in Engineering Design—a Primer", <https://www.springer.com> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).

- Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Will, F., Näther, M., Otto, J. ve Krause, M. (2019). "Large-Scale Digital Concrete Construction–CONPrint3D Concept for On-Site, Monolithic 3D-Printing", *Automation in Construction*, 107, 102933, 1-16.
- Memari, A.M., Huelman, P.H., Iulo, L.D., Laquatra, J., Martin, C., McCoy, A., Nahmens, I., ve Williamson, T. (2014). "Residential building construction: State-of-the-art review", *Journal of Architectural Engineering*, 20(4), [B4014005], 1-38.
- MGI, McKinsey Global Institute (2015). "Digital America: A Tale of the Haves and Have-Mores" , Industry Report, December 2015, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/technology%20media%20and%20telecommunications/high%20tech/our%20insights/digital%20america%20a%20tale%20of%20the%20haves%20and%20have%20mores/digital%20america%20full%20report%20december%202015.pdf> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- MGI, McKinsey Global Institute (2017). "Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity", Construction Industry Report, February 2017, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/mgi-reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity-full-report.pdf> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Mostafa, S., Kim, K.P., Tam, V.W.Y. ve Rahnamayiezekavat, P. (2020). "Exploring the Status, Benefits, Barriers and Opportunities of Using BIM for Advancing Prefabrication Practice", *International Journal of Construction Management*, 20(2), 146-156.
- Nam, C.H. ve Tatum, C.B. (1988). "Major Characteristics of Constructed Products and Resulting Limitations of Construction Technology", *Construction Management and Economics*, 6(2), 133-147.
- National Audit Office, (2001). "Modernising Construction", Report by the comptroller and auditor general, HC 87 Session 2000-2001: 11 January 2001, London, <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20170207052351/https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2001/01/000187.pdf> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- National Platform for the Built Environment, (2008). "ICT and Automation (ICTA) Scoping Study Report", <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/ict-and-automation-icta-scoping-study-research-reports> (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Navon, R. ve Goldschmidt, E. (2003). "Monitoring Labor Inputs: Automated-Data-Collection Model and Enabling Technologies", *Automation in Construction*, 12(2), 185-199.
- Ngowi, A.B., Pienaar, E., Talukhaba, A. ve Mbachu, J. (2005). "The Globalisation of the Construction Industry-A Review", *Building and Environment*, 40(1), 135-141.
- Oesterreich, T.D. ve Teuteberg, F. (2016). "Understanding the Implications of Digitisation and Automation in the Context of Industry 4.0: A Triangulation Approach and Elements of a Research Agenda for the Construction Industry", *Computers in Industry*, 83, 121-139.
- Oh, M., Lee, J., Hong, S.W. ve Jeong, Y. (2015). "Integrated System for BIM-Based Collaborative Design", *Automation in Construction*, 58, 196-206.
- Pachon, A.G. (2012). "Construction Site Automation: Guidelines for Analyzing its Feasibility, Benefits and Drawbacks", *Advanced Construction and Building Technology for Society*, 38.
- Pan, M., Linner, T., Pan, W., Cheng, H. ve Bock, T. (2018). "A Framework of Indicators for Assessing Construction Automation and Robotics in the Sustainability Context", *Journal of Cleaner Production*, 182, 82-95.
- Pegna, J. (1997). "Exploratory Investigation of Solid Freeform Construction", *Automation in Construction*, 5(5), 427-437.
- Perkins, I. ve Skitmore, M. (2015). "Three-Dimensional Printing in the Construction Industry: A Review", *International Journal of Construction Management*, 15(1), 1-9.
- Sacks, R., Koskela, L., Dave, B.A. ve Owen, R. (2010). "Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction", *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 968-980.
- Saidi, K.S., Bock, T. ve Georgoulas, C. (2016). "Robotics in Construction", Springer Handbook of Robotics, Springer, 1493-1519.
- Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A. ve Minkarah, I. (2006). "Lean Construction: From Theory to Implementation", *Journal of Management in Engineering*, 22(4), 168-175.
- Saurin, T.A., Rooke, J. ve Koskela, L. (2013). "A Complex Systems Theory Perspective of Lean Production", *International Journal of Production Research*, 51(19), 5824-5838.
- Sawhney, A., Riley, M. ve Irizarry, J. (2020). "Construction 4.0: Introduction and Overview", Construction 4.0, 1st Edition, Routledge: London, UK, 3-22.

- Shadid, W.K. (2018). "A Framework for Managing Organizations in Complex Environments", *Construction Management and Economics*, 36(4), 182-202.
- Sivaram, P.M., Mande, A.B., Premalatha, M. ve Arunagiri, A. (2020). "Investigation on a Building-Integrated Passive Solar Energy Technology for Air Ventilation, Clean Water and Power", *Energy Conversion and Management*, 211, 112739.
- Tay, Y.W.D., Panda, B., Paul, S.C., Noor Mohamed, N.A., Tan, M.J. ve Leong, K.F. (2017). "3D Printing Trends in Building and Construction Industry: A Review", *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261-276.
- Turner, J.R. (2008). "The Handbook of Project-Based Management: Leading Strategic Change in Organizations", Third Edition, McGraw-Hill eBooks, https://books.google.com.tr/books?id=Sqqem7PDnMIC&pg=PP1&dq=Handbook+of+Project-Based+Management&hl=tr&sa=X&ved=2ahUKEwj2pKOAqan0AhX9S_EDHeEVCCwQ6AF6BAgFEAl#v=onepage&q=Handbook%20of%20Project-Based%20Management&f=false (Erişim Tarihi: 01.12.2018).
- Van Gassel, F. ve Maas, G. (2008). "Mechanising, Robotising and Automating Construction Processes", *Robotics and Automation in Construction*, InTech.
- Volkov, A. ve Shilova, L. (2020). "Cyber-Physical Systems in Construction for Sustainable Urban Development", *2nd International Symposium on Architecture Research Frontiers and Ecological Environment*, E3S Web of Conferences, 143, 01019, EDP Sciences.
- Vrijhoef, R. ve Koskela, L. (2005). "Revisiting the Three Peculiarities of Production in Construction", *Proceedings of 13th International Group for Lean Construction Conference*, 19-27.
- William C.I. (1986). "Future Directions for Computerized Construction Research", *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(3), 326-345.
- Williams, T. (2016). "Identifying Success Factors in Construction Projects: A Case Study", *Project Management Journal*, 47(1), 97-112.
- Williams, T.M. (1999). "The Need for New Paradigms for Complex Projects", *International Journal of Project Management*, 17(5), 269-273.
- Winch, G. (1989). "The Construction Firm and the Construction Project: A Transaction Cost Approach", *Construction Management and Economics*, 7(4), 331-345.
- Winch, G., Usmani, A. ve Edkins, A. (1998). "Towards Total Project Quality: A Gap Analysis Approach", *Construction Management & Economics*, 16(2), 193-207.
- Wolfe, T. ve Garfield, L. (1989). "A New Standard for Living: The Lustron House, 1946-1950", *Perspectives in Vernacular Architecture*, 3, 51-61.
- Wood, H. ve Ashton, P. (2010). "Modeling Project Complexity", *Proceedings of the 26th Annual ARCOM Conference*, 6-8 September, Leeds, UK, Association of Researchers in Construction Management, 1111-1120.
- Wood, H.L. ve Gidado, K. (2008). "An Overview of Complexity Theory and Its Application to the Construction Industry", *Proceedings of the 24th Annual ARCOM Conference*, 1-3 September, Cardiff, UK, Association of Researchers in Construction Management, 677-686.
- Wu, Y. ve Cai, J. (2017). "Research on New-Type Smart City in China Based on Smart Construction Theory", *ICCREM 2017-International Conference on Construction and Real Estate Management*, November 10-12, Guangzhou, China, ASCE, 347-354.
- Xia, M., Nematollahi, B. ve Sanjayan, J. (2019). "Printability, Accuracy and Strength of Geopolymer Made Using Powder-Based 3D Printing for Construction Applications", *Automation in Construction*, 101, 179-189.
- Yoshida, T. (2006). "A Short History of Construction Robots Research & Development in a Japanese Company", *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 188-193.
- Yuan, R., Guo, F., Qian, Y., Cheng, B., Li, J., Tang, X. ve Peng, X. (2021). "A System Dynamic Model for Simulating the Potential of Prefabrication on Construction Waste Reduction", *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12.
- Zhang, J., Long, Y., Lv, S. ve Xiang, Y. (2016). "BIM-Enabled Modular and Industrialized Construction in China", *Procedia Engineering*, 145, 1456-1461.
- Zhang, Z., Demir, K.G. ve Gu, G.X. (2019). "Developments in 4D-Printing: A Review on Current Smart Materials, Technologies, and Applications", *International Journal of Smart and Nano Materials*, 10(3), 205-224.