

YAPI ÜRETİMİNDE EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI DEĞERLENDİRMESİ

Cemal İrfan ÇALIŞKAN *^{ID}
Ümit ARPACIOĞLU **^{ID}

Alınma: 02.03.2020; düzeltme: 18.04.2020; kabul: 08.06.2020

Öz: Bu çalışma, mimarlık alanında kullanılan eklemeli imalat teknolojileri konusunda gerçekleştirilen bir derleme çalışmasıdır. Temel olarak, eklemeli imalatın mimarlık alanındaki uygulama alanlarını, belirli sistematik içerisinde ele alan araştırma, gerek literatürde yer alan örnekler, gerekse uygulamaları bulunan yeni teknolojiler hakkında bilgi vermeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, karşılaştırmalı olarak incelenen üretim teknolojilerinin güçlü ve zayıf yönleri, sistemlerin kullanım alanları, sistemlerde kullanılan malzemeler, mimari alan uygulamaları özelinde ele alınmıştır. Eklemeli imalat teknolojilerinin dezavantajlarından birisi olarak bilinen yüksek üretim ve malzeme maliyetinin, zaman içerisinde üretim yöntemlerinin yaygınlaşması ile çözümleneceği öngörülmektedir. Malzeme üretimi ve teknoloji konusunda halen gelişme sürecinde olan eklemeli imalat üretim sistemleri, gelecek endüstri uygulamalarında ve mimarisinde etkin olarak kullanılacağı düşünülmektedir. Yüksek maliyet sorununa çözüm olarak, eklemeli imalat yöntemi ile kalıp üretimlerinin ilerleyen yıllarda daha fazla gündemde olacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, İleri teknolojiler, Yapı üretimi.

A Review of Additive Manufacturing Technologies in Building Production

Abstract: This study is a review on additive manufacturing technologies used in the field of architecture. Basically, the research, which deals with the application fields of additive manufacturing in the field of architecture, within a certain systematic, aims to provide information on both the examples in the literature and new technologies with applications.

In the study, the strengths and weaknesses of the production technologies analyzed comparatively, the usage areas of the systems, the materials used in the systems, and architectural field applications are discussed. It is anticipated that the high production and material costs, known as one of the disadvantages of additive manufacturing technologies, will be developed over time with the spread of production methods. Additive manufacturing production systems, which are still in the development process in material production and technology, are thought to be used effectively in future industry applications and architecture. As a solution to the high cost problem, it is anticipated that mold production will be on the agenda in the coming years with additive manufacturing method.

Keywords: Additive manufacturing, Advanced technologies, Building production.

* Cemal İrfan Çalışkan, MSGSÜ, Yapı Fiziği ve Malzemesi, Meclis-i Mebusan Caddesi No: 24 Fındıklı 34427 İstanbul, cemalirfancaliskan@gmail.com.

** Ümit Arpacioğlu, MSGSÜ, Yapı Fiziği ve Malzemesi, Meclis-i Mebusan Caddesi No: 24 Fındıklı 34427 İstanbul, umitarpacioglu@gmail.com

İletişim Yazarı: Cemal İrfan Çalışkan (cemalirfancaliskan@gmail.com)

1. GİRİŞ

Milattan önce 7500 yılı uygulanan kerpiç üretim tekniklerinden, günümüz ileri teknolojilerine kadar mimari tasarım fikri, bu alanda geliştirilen üretim yöntemleri paralelinde gelişim göstermiştir (Oxman ve diğ., 2014). Günümüz yaşantısının tüm evrelerinde görülebilen dijital dönüşüm süreci, birçok üretim yönteminin gelişiminde de etkisini göstermektedir. Yapı bileşenlerinin üç boyutlu yazdırma teknolojisi ile üretimi, robotik teknolojilerin mimaride kullanımı, ETH Zurich tarafından geliştirilen “smart dynamic” beton döküm sistemi Craveiroa ve diğ. (2019), IACC tarafından geliştirilen “minibuilders” robotik uygulamaları, kerpiç malzemesinin uçangöz (drone) yardımı ile yapıda uygulanması Reed (2019), dijital ve ileri teknolojik uygulamalara örnek olarak verilebilir. Geliştirilen üretim yöntemleri, uygulama alanındaki birçok kısıtlamaya çözüm oluşturur iken, tasarım aşamasında da daha özgün fikirlerin yaratılmasına zemin hazırlamıştır. Son yıllar birçok akademik çalışmaya konu olan eklemeli imalat da tasarımda özgün formların oluşmasına zemin hazırlayan, yenilikçi üretim yöntemlerden birisi olarak literatürde yerini almıştır.

Bu çalışmada, yapı üretiminde kullanılan eklemeli imalat teknolojileri derlenerek güçlü, zayıf yönleri ile ele alınmıştır. Birçok sektör ve bilim, eklemeli imalatı, prototip üretiminde kullanılan bir yöntem olarak değerlendirir iken; son yıllarda eklemeli imalat teknolojisi, kullanılabilir son ürün üretimi yönünde de gelişme göstermiştir. Çalışmamızda, bu alanda yapılan araştırmalar ve teknoloji firmaları araştırılarak, geliştirilen sistemlerin, mimarlık kapsamında yapı üretim teknolojileri başlığında sınıflandırılması ve karşılaştırmalı olarak ele alınması amaçlanmıştır; bu sınıflandırmada eklemeli imalat üretim yöntemleri, bir yapı üretim teknolojisi olarak ele alınarak, bu disipline ait örnekler incelenmiştir. Mimari uygulama örnekleri olan teknolojiler, temel üç başlık içerisinde gruplandırılarak, çalışmanın sonuç bölümünde temel sekiz üretim yöntemi, bazı parametreler kapsamında karşılaştırmalı olarak Tablo 1 ve 2 içerisinde değerlendirilmiştir.

Derleme çalışmasında yöntem olarak, öncelikle yerli ve yabancı akademik arama motorlarından ulaşılan eklemeli imalat alanındaki makale, yüksek lisans, doktora tez çalışmaları; eklemeli imalat teknoloji firmalarına ait web siteleri ve bu teknolojiler hakkında hazırlanan videolar; eklemeli imalat konusunda uzmanlaşmış bazı yerli ve yabancı merkezler araştırılarak, eklemeli imalat konusunda yapılan birçok yerli ve yabancı araştırma içeriği, eklemeli imalat teknolojileri derleme, malzeme geliştirme, mühendislik çalışmaları, yapı üretimi, tasarım çalışmaları, simülasyon çalışmaları, topoloji optimizasyonu, cephe, yapı endüstrisi, çeşitli sektörel uygulamalar başlıklarında araştırılmıştır. Akademik çalışmalarda ve sektöre ait paylaşımlarda bulunamayan bazı teknoloji detayları konusunda, eklemeli imalat teknoloji üretici firmaları teknik birimlerinden doğrudan bilgi alınarak; içerik, mimaride yapı üretimi, yapı bileşen üretimi ve kalıp üretimi başlıklarında gruplanmıştır.

2. MİMARİDE EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİ

Çalışmanın bu bölümünde, eklemeli imalatın doğuşu, gelişme süreci, avantajlı yönleri, mimaride kullanılmakta olan eklemeli imalat uygulamalarına, bir derleme çalışması olarak yer verilmiştir.

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi

1984 yılında Fransız bilim adamı Alain Le Mehaute tarafından bulunan üç boyutlu yazdırma teknolojisi (Brischetto ve diğ., 2017); additive manufacturing (eklemeli imalat) olarak literatürde yer almakta olup; havacılık, uzay, otomotiv, biyomedikal alanlarında farklı teknik ve teknolojiler ile uygulama alanı bulmuştur. Bazı kaynaklar, eklemeli imalat teknolojilerinde ilk icadın 1980 yılı Japon araştırmacı Dr. Hideo Kodama tarafından geliştirilen SLA (Stereolithography Apparatus-Steryolitografi Cihazı) aparatı olduğunu ifade eder (Oliveira, 2019). Eklemeli imalat konusundaki ilk patentin ise Charles Hull tarafından Stereolithography sistemi için alındığı

kaynaklarda geçmektedir (Kidwell, 2017). Hull'un firması olan 3d System tarafından üretilen SLA-1 modelinin bu alanda üretilen ilk yazıcı sistemi olduğu bilinmektedir (Kidwell, 2017).

40 yıllık bir gelişme süreci yaşayan üç boyutlu yazdırma teknolojisi, zaman içerisinde birçok sektör ve disiplinde, klasik üretim tekniklerinde üretilmesi mümkün olmayan karmaşık geometrilerin üretilmesinde yeni bir boyut açmıştır (Alwoimi, 2018).

Üç boyutlu yazdırma alanında gelişme sürecindeki disiplinlerden birisi de mimarlıktır. Mimarlık eklemeli imalat alanında etkin kullanım alanları olan, ancak diğer sektörlerle göre kullanım oranlarının daha düşük seviyelerde olduğu bir disiplindir (Yalçın ve Ergene, 2017).

Endüstri devrimi ile endüstriyel çözümlerin çoğalması, birçok yapı malzemesinin seri üretilebilirliği ve gelişen yapım teknikleri, mimari üretimde süre probleminin aşılmasına imkân tanımıştır. Seri olarak üretilebilen binalar, sanatsal, estetik yönlerini kaybetmiş, tek düze klasik formların dışına çıkılamamıştır. Geliştirilen üretim teknikleri gereği birbirlerine benzeyen ve estetik yönünü kaybeden yapıların, yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesi ile özgünlüğünü tekrar kazanacağı düşünülmektedir. Tasarım özgürlüğü ve uygulamadaki esneklikler sayesinde geliştirilebilecek organik formların, karmaşık iç geometrilerin veya parametrik çalışmaların bir yapı formunda üretilmesi, yeni üretim teknolojileri sayesinde mümkün olacaktır. Bu yenilikçi teknolojiler arasında bulunan üç boyutlu yazdırma teknolojisinin, özgün mimari çalışmaların üretilmesine imkân sağlayacağı düşünülmektedir (Mathur, 2016).

Eklemeli imalat teknolojileri, masa üstü yazıcılardan, robotik teknolojilere ve vinç benzeri ağır makinelere kadar birçok sistem ile uygulanmaktadır. Farklı amaçlar için geliştirilen 3d yazıcılar, ilgili alanlarda geliştirilen malzemeler ile kısa sürelerde üretim yapabilmektedir.

Eklemeli imalat yöntemi, yapı endüstrisinde %30'lara varan malzeme tasarrufu yanında, daha az CO₂ emisyon üretimi, enerji verimliliği ve tasarım özgürlüğü konularında avantaj sunmaktadır (Hamidi ve Aslani, 2019). Yapı endüstrisinin dünya kaynaklarının üçte birini tüketmekten sorumlu olduğu (Özer, 2020) düşünüldüğünde, verimlilik ve etkin inşaat stratejileri ile üç boyutlu yazdırma üretim sistemlerinin yapı üretiminde, avantaj sunacağı düşünülmektedir.

Üç boyutlu yazdırma üretim sistemleri konusunda yapılan literatür araştırmasında eklemeli imalatın, farklı disiplinlerde, farklı gruplamalar ile ele alındığı görülmüştür. Daha çok üretimin gerçekleşme şekli odağında yapılan gruplamalarda eklemeli imalat (Wong ve Hernandez, 2012) (Pollard, 2018); toz yatağı sistemleri (powder bed fusion), fotopolimerizasyon (photopolymerization), malzeme ekstrüzyon (material extrusion), tabaka laminasyon (sheet lamination), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), doğrudan enerji depolama (direct energy deposition) gibi başlıklarda ele alınmaktadır. Yapı alanında eklemeli imalat (Ma ve diğ., 2018), kontur üretimi (contour crafting), d-form (d-shape), beton baskı (concrete printing), olmak üzere temel üç grupta sıralanmaktadır. Bazı akademik çalışmalarda eklemeli imalat; likit, filament, toz, katı sac gibi başlıklarda, kullanılan malzeme özelinde gruplamalar ile de ele alınmaktadır (Guo ve Leu, 2013).

Bu çalışmada, günümüzde kullanılmakta olan eklemeli imalat yöntemleri, mimaride uygulama alanları kapsamında temel üç başlıkta gruplanmıştır (Şekil 1). Bu gruplamada teknolojiler, bir yapı üretim tekniği olarak değerlendirilerek, üretim teknolojisinin yapı üretiminde kullanım amacı kapsamında şu başlıklar ile ele alınacaktır:

- Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojileri ile Yapı Üretimi,
- Yapıda Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojisi ile Bileşen Üretimi,
- Yapıda Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojisi ile Kalıp Üretimi



Şekil 1:
Yapı üretiminde kullanılan eklemeli imalat teknolojileri.

2.1.1. Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojileri ile Yapı Üretimi (Kontur Üretimi)

Kerpiç ve beton türü yapı malzemeleri ile bina üretimi konusunda üç boyutlu yazdırma teknolojisi, kontur üretimi (contour crafting) başlığı ile ele alınmaktadır. Günümüzde gelişim süreci halen devam eden bu üretim teknolojisi, tasarlanan CAD (Computer Aided Design – Bilgisayar Destekli Tasarım) modelinin g-code (g-kodu) formatında kaydedilen katmanlarında malzemenin üst üste biriktirilmesi esasına dayanmaktadır (Lim ve diğ., 2009).

Dr. Behrokh Khoshnevis'in Nasa çalışmaları kapsamında, Güney Kaliforniya Üniversitesi'nde yaptığı araştırmalar sonucunda geliştirilen teknoloji (Leach, 2014), kısa sürede mimari yapıların yazdırılmasına imkân sağlamaktadır (Resim 1). Uzay'da yerleşme konusunda farklı araştırmalar içerisinde olan bilim adamları, literatürde kontur üretimi olarak geçen bu üretim teknolojisi ile uzayda, sadece üretim sisteminin taşınması ile doğal malzemelerin kullanımını ve yapı üretimini hedeflemektedir. Bu doğrultuda, Ay veya Mars'ta kurulacak bir kolonide barınma ihtiyacını karşılamak üzere, dünyadan tamamen üretimi sonuçlanmış çok işlevli olan yapı modüllerinin taşınması, ay toprağı kullanılarak yüzeyde yapı üretilmesi veya ay yüzeyi zemininin altına kazılarak bir yaşam alanı inşa etmek gibi öngörüler bilimsel araştırmalarda yer almaktadır (Ceccanti ve diğ., 2010). Ancak tek bir tuğlanın aya gönderilmesinin iki milyon dolarlık maliyetini de Leach (2014) göz önünde bulunduran bilim dünyası, kontur üretimi sistem tasarımının yerel, doğal ve işlenmemiş malzemeler ile yapı üretim düşüncesini daha gerçekçi bulmuştur.



Resim 1:
Kontur üretimi sistemi, vinç uygulaması (Gaget, 2018).

Kolonileşme fikrinde ve yeryüzündeki kullanım alanlarında, kontur üretimi sisteminin sürdürülebilir form ve malzeme tasarımları için kullanılması düşüncesi, zaman içerisinde gelişmiş

ve bu alanda çeşitli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Kolonileşme araştırmaları kapsamında; sinterleme, eriterek birleştirme (melting) gibi farklı üç boyutlu yazdırma işlemlerinin, uzay ortamında temin edilecek metaller ve doğal malzemeler ile yapılması, bilimsel araştırmalara konu olmuşsa da Khoshnevis ve diğ. (2012) çalışmamızın bu bölümü, beton benzeri yapı malzemeleri ile yapının üretim tekniğinin kullanıldığı kontur üretim sistemi hakkında olacaktır.

Günümüzde kontur üretimi konusunda çalışan otuz grubun varlığından bahsedilebilir (Buswell ve diğ., 2018). 2014 yılında Hollandalı tasarım firması Dus Mimarlık'ın dev yazıcı ile Amsterdam'da kanal evleri inşa etme kararı Hager ve diğ., (2016) bu alanda yapılan çalışmalara verilebilecek bir örnektir. Kontur üretimi yönteminin geliştirilmesinden günümüze, sistem birçok açıdan farklı gelişmeye tanık olmuş, farklı üniversite ve firma tarafından üç boyutlu yazdırılabilir malzemeler, kompozit karışımlar ve farklı teknolojik makineler ve nozul modelleri geliştirilmiştir. İtalya'da 23 Temmuz 2016'da gerçekleştirilen çalışmada 12 metre yüksekliğindeki bir yazıcı ile kerpiç bina üretim çalışması bir work shop etkinliği olarak sunulmuştur (Resim 2). İtalyan üretici tarafından geliştirilen pirinç ev, modern dönem teknolojilerinden üç boyutlu yazıcılar ile üretilebilir kerpiç yapılar için örnek olarak sunulabilir.



a.



b.

Resim 2:

a. İtalya'da teknoloji köyü, 12 metrelik yazıcı ile kerpiç yapı üretimi (Wasp, 2016).

b. Terra Performa - IAAC çalışmaları (Edouard, 2017).

Sürdürülebilirlik, düşük maliyet ve doğal iklimlendirme esaslarının ön planda olduğu kontur üretimi sisteminde, tamamen geri dönüştürülebilir doğal malzeme ve atıklardan üretilen yapı malzemesi kullanılabilir.

2.1.2. Yapıda Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojisi ile Bileşen Üretimi

Mimari alanda, eklemeli imalat teknolojilerinin bir bölümü, yapıda bileşen üretiminde kullanılabilir. Bu sistemlerin bazılarında, beton, kerpiç gibi yapı malzemeleri; bazılarında polimer esaslı veya metal malzemeler ile üretim yapılabilir. Yapıdaki kullanım amacının, bileşen üretimi olması kapsamında ele alınacak bu üretim yöntemlerinde, bugüne kadar yapılmış örnekler üzerinden veya literatürdeki sistem tanımlarından yola çıkılarak bilgi paylaşılmıştır. Bu bölümde yer verilen yedi temel üretim yöntemi dışında, aynı gruba girebilecek birçok üretim sisteminden bahsetmek mümkündür (Valamanesh, 2012). Ancak bu çalışmada mimari alanda kullanım örnekleri olan veya olabilecek sistemlere yer verilmiştir.

2.1.2.1 Beton Baskı (Concrete Printing)

Beton baskı (concrete printing) kontur üretimi sistemine benzemekle beraber, daha küçük kapasitedeki üretimler için uygun, karmaşık geometrilerde Schipper ve diğ. (2017) daha iyi kontrol edilebilir bir sistem olarak, özel yapı bileşenlerinin üretiminde ideal bir yöntem olarak bilinmektedir (Lim ve diğ., 2012). Klasik üç boyutlu yazdırma sistemlerinden FDM'e (Fused

Deposition Modeling-Eriyik Yığıma Modelleme) benzemekte ve yapı bileşen üretiminde kullanılmaktadır.

İngiltere Loughborough Üniversitesi araştırması olarak 2004 yılı icat edilen sistemin ilk üretimi 2006 yılı gerçekleştirilmiştir; ilk dönemler, “freeform construction” olarak ifade edilen sistem, 2006 sonrası beton baskı (concrete printing) adı ile literatüre geçmiştir (Gardiner, 2011). Kontur üretimi sistemine çok benzer olan bu üretim yöntemi, nozul tasarımı konusunda ve üretim kapasitesi anlamında farklılaşmaktadır. Daha detaylı üretilere imkân veren sistem, macun kıvamına getirilmiş harç ve alçı gibi malzemelerden bileşen üretiminde kullanılmaktadır (Resim 3). Sistemde kullanılan nozulun hassas çalışma kabiliyeti sayesinde, daha karmaşık geometrilere beton formları oluşturulabilmektedir.



Resim 3:

Beton baskı üretim sistemi (SanJose, 2019).

2.1.2.2 D-Form (D-Shape)

D-Form, magnezyum esaslı bağlayıcılar kullanılarak beton objeler üretebilen, SLS (Selective Laser Sintering-Seçici Lazer Sinterleme) sistemi benzeri yazdırma teknolojisidir (Ma ve diğ., 2018). İtalyan bilim adamı Enrico Dini tarafından geliştirilen teknoloji (Resim 4), doğal yapı malzemeleri ile mimari ölçekte üretilere imkân tanımakta (Rael ve diğ., 2011) ve döneminin en büyük yazıcısı özelliğini taşımaktadır (Castaneda ve diğ., 2015). 2006 yılında patent altına alınan sistemin, kontur üretimi ve beton baskı sisteminden çok farklı bir üretim yöntemi olduğu ifade edilebilir (Gardiner, 2011). Bahsedilen bu iki sistemde yığıma tekniği (deposition techniques) ile üretim yapılır iken, d-form sisteminde seçici katman birleştirme yöntemi (selective state change) kullanılmaktadır. Sistem bağlayıcı püskürtme (binder-jetting) alt yapısını kullanarak deniz suyu ve magnezyum esaslı bağlayıcı yardımı ile taş esaslı organik malzemelerden büyük ölçekte mimari bileşen üretiminde kullanılmaktadır.



Resim 4:

Enrico Dini tarafından geliştirilen D-Form 3d üretim sistemi (Sher, 2019).

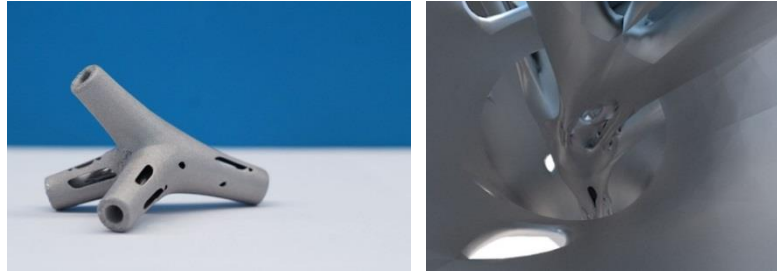
2.1.2.3 Toz Yatağı Sistemleri (Powder Bed Fusion)

Toz yatağı sistemlerinde polimer ve metal malzemeler kullanılabilir. Temel olarak toz malzemenin sinterlenmesi veya farklı güç kaynakları kullanılarak bağlanması esasına dayanan üretim teknolojisidir. 1990'lı yıllar ve sonrasında gelişme gösteren Wohlers ve Gornet (2014) toz yatağı sistemleri, temel olarak SLS (Selective Laser Sintering-Seçici Lazer Sinterleme), DMLS (Direct Metal Laser Sintering-Doğrudan Metal Lazer Sinterleme) veya SLM (Selective Laser Melting-Seçici Lazer Ergitme), EBM (Electron Beam Melting-Elektron Işını Ergitme), MJF (Multi Jet Fusion-Hızlı Püskürtme) gibi isimlerle bilinmektedir. Bu sistemlerden en yaygın kullanılan SLS sisteminin, 1980'lerde plastik malzeme ile üretim konusunda Texas Üniversitesi'nde geliştirildiği kaynaklarda geçmektedir (Wroe, 2015). 1990'lı yıllar, sistemin metal sinterleme sürümlerinin geliştirildiği ifade edilebilir. Gerek üretimde kullanılan malzeme ve parametreler, gerekse üretimde kullanılan güç kaynağı anlamında bu üretim yöntemleri birbirinden farklılaşmaktadır. Toz yatağı sistemlerinde üretim temel olarak şu şekilde gelişmektedir:

Üretim sisteminde, üretimin gerçekleştirileceği alana, kullanılacak toz durumundaki malzeme, bıçak yardımı ile istenen katman kalınlığında yayılarak birleştirici güç yardımı ile o katmana ait kesitlerin birleştirildiği üretim yönteminde, güç kaynağı olarak lazer, elektron ışını veya UV lambalar kullanılmaktadır. Bu şekilde ilk katmana ait kesitlerin birleştirildiği üretim, platformun istenen katman kalınlığında aşağıya inmesi ve ardından ikinci toz serme ve birleştirme şeklinde katmanlar boyu devam etmektedir.

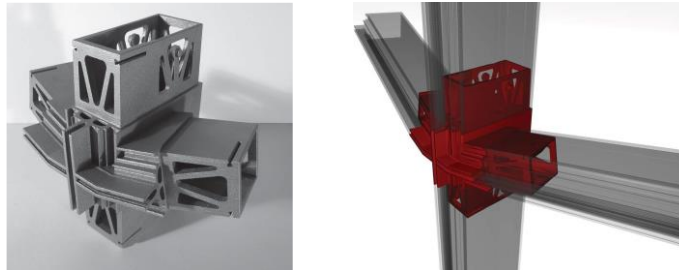
Bu sistemlerden SLS ve DMLS, SLM sistemlerinde güç kaynağı olarak lazer kullanılır iken, EBM sisteminde elektron ışını, MJF sisteminde infraret lambalar kullanılmaktadır.

Bazı cephe bileşenleri üretimi konusunda SLS ve DMLS üretim yönteminin, araştırmalara konu olduğu bilinmektedir (Resim 5 ve 6). Yapılan çalışmalarda daha çok organik yapılar şeklinde tasarlanmış, hafifletilmiş alüminyum ve polimer uygulamalarına rastlanmaktadır (Strauss, 2008). Klasik yöntemlerde üretilmesi mümkün olmayan iç geometrilerin üretilebilirliği kapsamında ön plana çıkan üretim teknolojisinin, ilerleyen dönemlerde maliyet probleminin çözülmesi ile daha yaygın kullanım alanı bulacağı öngörülmektedir.



Resim 5:

Parametric nodes, metal toz yatağı sistemlerinde üretilebilir örnek (Knaack ve diğ., 2018).



Resim 6 :

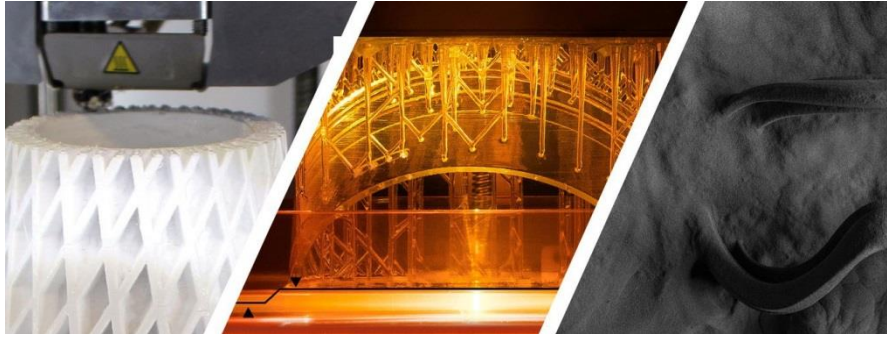
DMLS ile üretilmiş cephe bileşeni (Strauss ve Knaack, 2015).

2.1.2.4 Fotopolimerizasyon (Photopolymerization)

Kürlenmenin lazer ile gerçekleştirildiği SLA (Stereolithography), kürlenmenin UV ışık ile sağlandığı DLP (Digital Light Processing-Dijital Işık İşleme), Zolfaghari (2018) oksijen ve ışık ile kürlenme sağlayan CDLP (Continuous Digital Light Processing-Sürekli Dijital Işık İşleme) sistemleri bu kapsamda ele alınabilir. Fotopolimerizasyon sistemlerinden SLA'nın üretilen ilk eklemeli imalat teknolojisi olduğu bilinmektedir (Wohlers ve Gornet, 2014). Bu gruptaki diğer sistemlerin (DLP, CDLP) SLA'nın farklı kürlenme ile üretim yapılan benzerleri olduğu ifade edilebilir (Oliveira, 2019).

Işığa duyarlı akrilik veya epoksi akışkan reçine içerisinde, farklı enerji kaynakları ile katman katman kürlenen tasarım, birçok üretim sistemine göre daha detaylı olarak üretilebilmektedir (Strauss, 2013). Üretim esnasında, tasarımı taşıyacak desteklere ihtiyaç duyulmaktadır (Resim 7).

Yapılan literatür araştırmasında, SLA sisteminde üretilmiş mimari uygulama, bitmiş ürün örneklerine rastlanmamış olup; hassas detayların üretilebildiği üretim teknolojisinin, kafes yapı ve organik form örneklerinin üretiminde detay konusunda iyi sonuç verdiği bilinmektedir. Küçük ölçekli yapı bileşenleri üretiminde veya mimari model üretimlerinde kullanılabilecek üretim teknolojisi, tüm sistemlere öncülük etmiş olması nedeniyle araştırmamızda yer verilmiştir. Sistemin 300*300 mm ölçeğinde üretim yapabilen örnekleri bulunmaktadır.



Resim 7:

SLA üretim teknolojisi ve üretim örneği (Formlabs, 2020).

2.1.2.5 Malzeme Ekstrüzyon (Material Extrusion)

FDM (Fused Deposition Modeling-Eriyik Yığılma Modelleme) olarak tanımlanan sistemde farklı polimer, ahşap, seramik katkılı kompozitler üretilebilmektedir. FFF (Fused Filament Fabrication-Eriyik Filament Üretimi) olarak da bilinen yöntem, 1988 yılı Scott Crump tarafından geliştirilmiştir (Adikari, 2018). Üretim sisteminde, temel olarak nozuldan enjekte edilen bir malzemenin genellikle ısıtılarak daha sonra donması esasıyla malzeme birleşimi gerçekleştirilir. Masaüstü 3d yazıcıların birçoğunda bu sistem kullanılmaktadır. Sistem, 1991 yılı ticari bir ürün olarak sunulmuş olup Wohlers ve Gornet (2014) günümüzde birçok firma tarafından üretilen, basit prototip üretimleri amacıyla kullanılan bir üretim teknolojisidir. FDM sistemleri, robotik teknolojilerle entegre edilerek mimari çalışmalarda kullanılabilen, "mesh-mould" Grassi (2019) adı ile anılan, termoplastik malzemelerin ekstrüde olarak kullanıldığı ileri teknolojik üretim sistemlerine de dönüşebilmektedir. FDM üretim sistemlerinde, üretim esnasında, destek yapıları (support) kullanıldığı için parça konumlandırması üretim kalitesi açısından önem taşımaktadır (Livesu ve diğ., 2017).

Basit ve ucuz bir üretim teknolojisi olmasına karşın, bu üretim tekniği ile gerçekleştirilen birçok mimari araştırma dikkat çekmektedir. FDM sistemi, kolay malzeme değişimi ve ekonomik üretim imkânı sunmaktadır (Elhoone, 2018). Yapı cephelerinde kullanılması öngörülen şeffaf plastik panellerin FDM sistemleri ile üretilebilir olarak tasarlandığı bilinmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda, karmaşık iç geometriye sahip panellerin (Resim 8) ve profil çalışmalarının, ısı

yalıtımı sağlaması, ısı köprüsü problemine çözüm (Resim 9) üretmesi amaçlanmaktadır (Richardson, 2019). İç geometride tasarlanan su kanalları Sarakinioti ve diğ. (2018), ısı depolama amaçlı kullanılmakta ve cephenin farklı çevre koşullarına entegre edilebilir ısı performansı Abdel-Rahman (2018) açısından önem taşımaktadır (Sarakinioti ve diğ., 2017).

Seramik malzemeden üretim yapılabilen “robocasting” olarak ifade edilen FDM yöntemi farklı malzeme kullanımı konusunda örnek olarak verilebilir (Guo ve Leu, 2013). Sistemin beton benzeri malzeme kullanımı ile yapı bileşen üretiminde kullanımına yönelik bazı deneysel çalışmaların yapıldığı da bilinmektedir (Gosselin ve diğ., 2016).

Sistemin basit bileşenlerden oluşması, farklı alanlarda kullanım imkânı, çok çeşitli malzemelerden oluşan kompozit malzeme kullanılabilirliği gibi avantajları sayesinde, gerek teknolojik gelişimi, gerekse araştırma çalışmalarının çok yoğun olarak sürdürdüğü bir üretim sistemidir (Drotman, 2015).



Resim 8:

FDM sisteminde üretilen cephe paneli (Mungenast, 2020).



Resim 9:

Eklemeli imalat ile üretilmiş, enerji verimliliği amaçlı tasarlanan cephe bileşeni (Richardson, 2019).

2.1.2.6 Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting)

Granül formundaki metal, kum ve seramik malzemelerin kullanılabilirdiği üretim yönteminde, oda büyüklüklerinde mimari objeler veya yapı bileşenleri üretilebilmektedir. Temel olarak toz malzemenin bağlayıcı yardımı ile birleştirilmesi esasına dayanmaktadır (Pollard, 2018). 1993 yılı Massachusetts Institute of Technology’de, Ely Sachs ve Mike Cima tarafından geliştirilen üretim sisteminde Rahman ve diğ. (2018) üretim, temel olarak şu şekilde gelişmektedir: SLS ve DMLS’ye benzer şekilde toz katmanının üretim alanına yayılması ile süreç başlamaktadır. Ardından bağlayıcı likit sıvının o katmanda yer alan kesitler üzerinden geçmesi ile katman birleştirilmesi sağlanır. Bu işlemin tüm katmanlarda devamı ile tamamlanan üretim, bir süre sertleşmeye, güç kazanmaya bırakılarak etraftaki toz temizlenir (Rael ve San Fratello, 2011).

Mimari alanda çeşitli bileşen üretiminde kullanım örneklerine rastlanan üretim sistemi, d-form sistemine üretim altyapısı oluşturmaktadır. Bu üretim yöntemi, metal cephe bileşen üretimlerinde de kullanılmaktadır (Resim 10).



Resim 10:

- a. Bağlayıcı püskürtme sisteminde üretilen geometrik form (Varotsis, 2020).
b. Bağlayıcı püskürtme sisteminde üretilen çelik bileşen (Mohsen, 2016).

2.1.2.7 Doğrudan Enerji Depolama (Direct Energy Deposition)

Lazer ile kaynaşma sağlayan LENS (Laser Engineering Net Shape-Lazer Mühendisliği Ağ Formu) ve elektron ışını ile kaynaşma sağlayan EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing-Elektron Işını Eklemeli İmalat) sistemleri bu kapsamda ele alınabilir. Sistem, LDM (Laser Metal Deposition-Lazer Metal Biriktirme) olarak ta bilinmektedir (Strauss, 2013). 1995'te Sandia National Laboratories'de LENS adı ile geliştirilen Trumpf (2020), metal toz durumundaki malzemenin püskürtülerek, lazer güç kaynağı yardımı ile birleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu üretim sisteminde, lazer ucu çok eksenli robotik kola monte edilerek daha karmaşık geometrilerde kullanım imkânı oluşmaktadır. Toz malzemenin püskürtülmesi yanında, WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing-Tel Ark Eklemeli İmalat) olarak da bilinen metal tel eritilerek üretim yapan sistemlerden bahsetmek mümkündür (Çelik ve Özkan, 2017) . Eklemeli imalat yöntemi ile Hollanda'da üretilen metal köprü, bu üretim sistemi uygulamalarına örnek olarak verilebilir (Resim 11).



Resim 11:

WAAM eklemeli imalat sisteminde üretilen metal köprü (MX3D, 2018).

2.1.3 Yapıda Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojisi ile Kalıp Üretimi

Eklemeli imalat, karmaşık geometrilerin üretilmesi, forma çeşitli ek fonksiyonlar kazandırılması noktalarında avantaj sağlayan bir üretim yöntemi olmakla birlikte, yüksek maliyetli bir üretim tekniği olarak da bilinmektedir. Toz hammadde maliyetlerinin istenen düzeyde olmaması, teknolojilerin halen geliştirilme sürecinde oluşu, çok yaygın kullanılan sistemler olmaması, teknoloji ve hammadde üreten çok fazla üreticinin bulunmaması gibi

nedenlere bağlı olarak eklemeli imalat ile ilgili maliyet dezavantajından bahsetmek doğru olacaktır.

Yapı ölçeğinde olmayan bazı endüstriyel üretimlerde, toz yatağı sistemleri ile primecast malzemesinin kalıp üretimlerinde kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca eklemeli imalat ile üretilen bazı prototiplerin, silikon kalıp alınmasında kullanıldığı uygulamalara da rastlanmaktadır (Caliskan, 2019). Yapıda üç boyutlu üretim teknolojisi ile üretilen kalıp konusunda, literatürde bulabildiğimiz ilk örneğin, ETH Zürih’te gerçekleştirilen derin cephe isimli çalışma olduğu ifade edilebilir. Derin cephe projesinde altı metre yükseklikte ve dört metre genişlikte üretilen metal cephe parçaları, eklemeli imalat ile üretilmiş kalıplara dökülerek üretilmiştir (Resim 12). Eklemeli imalatın verdiği geometrik özgürlük çerçevesinde üretilen birbirine geçmeli 26 adet parçanın birleştirilmesi ile üretilen cephe panelinde, alüminyum malzeme kullanılmıştır (Mania ve diğ., 2017).

Döküm işlemi yapılacak kum kalıp üretimlerinde bağlayıcı püskürtme, d-form ve beton baskı üretim teknolojileri kullanılabilir.



Resim 12:

Eklemeli İmalat ile üretilen kalıba dökülerek üretilmiş mimari cephe parçası (Mania ve diğ., 2017).

3. MİMARİDE EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ KARŞILAŞTIRMASI

Eklemeli imalat teknolojileri konusunda yapılan bu çalışmada, mimaride kullanılan teknolojiler sistematik bir şekilde ele alınmış; temel olarak üç ana başlıkta incelenen üretim teknolojileri, mimaride kullanım özelliklerine göre; yapı üretiminde, yapı bileşen üretiminde ve yapı için kalıp üretiminde kullanılan teknolojiler olmak üzere gruplanmıştır. Bu üç grupta incelenen sekiz üretim teknolojisi; avantaj ve dezavantajları, güçlü ve zayıf yönleri, kullanılan malzemeler, mimari alan kapsamında değerlendirilerek karşılaştırma tablosu olarak sunulmuştur (Tablo 1 ve 2).

Yapı üretimi kapsamında gruplanan eklemeli imalat teknolojileri, Tablo 1 karşılaştırmasında, bu teknolojilerin, ilgili kriterlerdeki kullanım örnekleri dikkate alınmış; Tablo 1’de değerlendirmeye tabi tutulan parametrelerde (yapı üretimi, karmaşık geometri, proses zorluğu, gibi) 01 ile 08 aralığında rakamlar ile ifade edilen üretim teknolojilerinin, bu parametreler ile ilgili literatür ve reel sektör örneklerinin bulunmaması durumu, (-) ile belirtilir iken, örneklerin bulunması durumu (+) ile gösterilmiştir.

Bazı parametre karşılaştırmalarında (-,+) var/yok, değerlendirmesinin yetersiz kalması nedeniyle ilgili kriter değerlendirmesinde sıklık analizi yapılarak (Tablo 2) bu belirlemede, ilgili alanda çalışma ve örnek bulunması durumu (+) artı ile temsil edilir iken; daha fazla örnek bulunması, çift artı (++), çok fazla örnek bulunmaktadır ifadesi için üç artı (+++) ile ifade edilmiştir. Tablo 1 ve 2’de karşılaştırma ve sıklık analizinde, önemli bir bölümü 2015-2019 yıllarına ait olmak üzere toplam 165 kaynaktan faydalanılmış, söz konusu teknoloji ve

çalışmaların büyük oranda son yıllar gelişme göstermesi nedeniyle yapılan çalışmaların son yıllar ağırlık kazanması doğrultusunda bu döneme odaklanılmıştır. Doğrudan bilgi alınan 61 kaynak, referans olarak paylaşılmış olup; sıklık analizinde faydalanılan kaynaklar; akademik çalışmalar, firma web siteleri, tanıtım videoları, çeşitli web haber kaynakları, firma broşür ve tanıtım bültenleri, fotoğraflar, firma temsilcileri ile yapılan görüşme notları olarak tanımlanabilir.

Tablo 1: Üretim sistemleri karşılaştırma.

	01	02	03	04	05	06	07	08
01: Kontur Üretimi								
02: Beton Baskı								
03: D-Form								
04: Toz Yatağı								
05: Fotopolimerizasyon								
06: Malzeme Ekstrüzyon								
07: Bağlayıcı Püskürtme								
08: Doğrudan Enerji Depolama								
Yapı Üretimi	+	-	-	-	-	-	-	+
Bileşen Üretimi	+	+	+	+	+	+	+	+
Kalıp Üretimi	-	+	+	+	-	-	+	-
Prototip Üretimi	-	+	+	+	+	+	+	+
Yerel Malzeme Kullanımı	+	+	+	-	-	+	+	-
Mlzm. Üretim Kolaylığı	+	+	+	-	-	+	+	+
Mlzm. Maliyet Avantajı	+	+	+	-	-	+	+	-
Metal Üretim	-	-	-	+	-	-	+	+
Beton Malzeme	+	+	+	-	-	+	+	-
Plastik Üretim	-	-	-	+	+	+	-	-
Sürdürülebilirlik (Mlzm)	+	+	+	-	-	+	-	-
Enerji, Yalıtım, Verimlilik	+	+	+	+	-	+	+	-
Karmaşık Geometri	+	+	+	+	+	+	+	+
Üretimde Destek Yapı	-	-	-	+	+	+	-	-
Topoloji Optimizasyonu	+	+	+	+	+	+	+	+
Sistem Teknik Detay	+	+	+	+	+	-	+	+
Proses Zorluğu	+	+	+	+	+	-	+	+
Üretim Hassasiyeti	+	+	+	+	+	-	+	+
Özel Ortam Gerekliliği	+	+	+	+	-	-	+	+
Doğal Şartlardan Etki	+	-	-	+	-	-	-	-
Sistem Maliyet Avantajı	-	+	-	-	+	+	-	-
Kullanım Yoğunluğu	-	-	-	+	+	+	-	-
Sistem Bilinirlik	+	+	-	+	+	+	+	+
Yetiştirilmiş İşgücü	-	-	-	+	+	+	-	-
Teknoloji Geliştirme	+	+	+	+	+	+	+	+
Form, Tasarım Geliştirme	+	+	+	+	+	+	+	+
Malzeme Geliştirme	+	+	-	+	-	+	+	-

Tablo 2: Üretim sistemleri kriterler, sıklık analizi.

	01	02	03	04	05	06	07	08
01: Kontur Üretimi								
02: Beton Baskı								
03: D-Form								
04: Toz Yatağı								
05: Fotopolimerizasyon								
06: Malzeme Ekstrüzyon								
07: Bağlayıcı Püskürtme								
08: Doğrudan Enerji Depolama								
	01	02	03	04	05	06	07	08
Yapı Üretimi	+++							+
Bileşen Üretimi	+	+++	++	+++	+	++	+++	+++
Kalıp Üretimi		+	+	+			+++	
Prototip Üretimi		++	++	++	+	+++	+++	++
Yerel Malzeme Kullanımı	+++	+++	+++			+	++	
Mlzm. Üretim Kolaylığı	+++	+++	+++			+	++	+
Mlzm. Maliyet Avantajı	++	++	++			+++	+	
Metal Üretim				++			++	+++
Beton Malzeme	+++	+++	+++			+	++	
Plastik Üretim				++	++	+++		
Sürdürülebilirlik (Mlzm)	+++	+++	+++			+		
Enerji, Yalıtım, Verimlilik	+	+	+	++		+	+	
Karmaşık Geometri	+	+	+	+++	+++	+	++	++
Üretimde Destek Yapı				+	+	+		
Topoloji Optimizasyonu	+	+	+	+++	+	+	++	++
Sistem Teknik Detay	+++	++	++	+++	+		++	+++
Proses Zorluğu	++	++	++	+++	+		++	+++
Üretim Hassasiyeti	+	++	+	+++	++		++	++
Özel Ortam Gerekliliği	+	+	+	+++			+	+
Doğal Şartlardan Etki	+++			++				
Sistem Maliyet Avantajı		++			+	+++		
Kullanım Yoğunluğu				+	+	+++		
Sistem Bilinirlik	+	+		+++	++	+++	+++	+
Yetişmiş İşgücü				+	+	++		
Teknoloji Geliştirme	++	++	+	+++	+	+++	+	+
Form, Tasarım Geliştirme	++	++	+	+++	+	+++	+	+
Malzeme Geliştirme	+	+		+		+	+	

Tablo 1 değerlendirme içeriğini detaylandırmak gerekir ise; üretim sistemleri karşılaştırmasında ele alınan ilk ölçüt; sistemlerin yapı, bileşen, kalıp veya prototip üretimlerinde kullanım durumlarının belirlenmesidir. Bu kapsamda değerlendirilen üretim yöntemleri, ilgili alandaki kullanım yoğunlukları ile Tablo2’de derecelendirilerek verilmiştir. Tablo 1 ve 2 sonuçlarına göre, kontur üretimi teknolojisinin yapı üretiminde kullanılan bir teknoloji olduğu, metal malzemedan üretim yapılan doğrudan enerji depolama teknolojisinin de metal köprü üretim örnekleri nedeniyle yapı üretiminde kısmen kullanılan bir yöntem olduğu görülmektedir. Sekiz üretim sisteminin tamamının farklı yoğunluklarda olmak üzere, bileşen üretimlerinde kullanıldığı ifade edilebilir. Mimari alandaki kum kalıpların üretimlerinde bağlayıcı püskürtme sisteminin kullanıldığı bilinmektedir. Literatür araştırmasında, fotopolimerizasyon, kontur üretimi, malzeme ekstrüzyon ve doğrudan enerji depolama sistemlerinde üretilen kalıp örneklerine rastlanmamıştır. Ancak beton baskı, d-form sistemlerinin döküm amaçlı olarak, kum kalıp üretimlerinde kullanılabileceği öngörülmektedir. Ayrıca toz yatağı sistemlerinde bileşen üretimleri için kalıp

üretimleri de yapılabilir. Kontur üretim sisteminin, yapı üretim amacı ile tasarlanmış büyük sistemler olması nedeniyle prototip üretiminde kullanılmadığı ifade edilebilir. Diğer tüm sistemlerin prototip üretimleri için farklı yoğunluklarda kullanıldığı Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 1 karşılaştırmasında ele alınan bir diğer kapsam malzemedir. Yerel malzeme kullanımı, kullanılan malzeme türleri, sürdürülebilir malzeme gibi konuların incelendiği bölümde üretim yöntemleri, zayıf ve güçlü yönleri ile ele alınmıştır. Kontur üretimi, beton baskı ve d-form olarak geçen beton sistemlerinde yerel ve sürdürülebilir malzeme kullanımı dikkat çeker iken; polimer ve metal üretimi yapılan sistemlerde malzemenin zor üretildiği, sürdürülebilir olmadığı görülmektedir.

Tablo 1 değerlendirmesinde ele alınan bir diğer konu, tasarımdır. Karşılaştırması yapılan eklemeli imalat teknolojilerinin tasarım başlığında, enerji, yalıtım, verimlilik; karmaşık geometriler; üretimde destek yapı; topoloji optimizasyonu gibi kriterler değerlendirilmiştir.

Enerji, yalıtım ve verimlilik kapsamında, bu sistemlerde ilgili başlıkta yapılan akademik ve sektörel çıktılar dikkate alınmıştır. Toz yatağı sistemlerinden DMLS’de tasarlanan enerji etkin ısı eşanjörü çalışmaları, karmaşık geometriler ve enerji etkin, verimlilik esaslı tasarımlara örnek olarak verilebilir. Ayrıca kontur üretimi sisteminde duvar içi yalıtım uygulamaları yine bu başlık altında ele alınmıştır. Yapılan değerlendirmede, ilgili üretim teknolojilerinin, belirlenen başlıklarda yapılmış çalışmalar dikkate alınarak Tablo 2’de puanlama yapılmıştır. Bu alanda en etkin yöntemin, toz yatağı sistemleri olduğu görülür iken; beton yazdırma sistemleri konusunda yapılan çeşitli akademik çalışmalarda, enerji ve yalıtım konularında bu sistemlerin yeterli seviyelerde olmadığı değerlendirmelerine rastlanmıştır (Savytskyi ve Ozhyshchenko, 2016).

Eklemeli imalat teknolojilerinin en önemli avantajlarından birisi de, karmaşık iç geometrilerin üretimi olarak bilinmektedir. Karşılaştırması yapılan tüm sistemler, bu tarz geometrilerin üretimine izin vermektedir. Ancak üretim hassasiyetleri daha yüksek olan, toz yatağı sistemleri ve fotopolimerizasyon sisteminde daha detaylı iç geometri üretim imkânı bulunmaktadır.

Tasarım başlığında ele alınan kriterlerden birisi de üretimde destek yapılar konusudur. Eklemeli imalat sistemlerinde katman katman eklenerek biriktirilen malzeme, tasarımın oluşma sürecini ifade etmektedir. Bu, üst üste biriktirme işlemi esnasında, katmanın taşınabilmesi için, metal malzemeli üretimlerde ısı aktarımı amacı ile tasarımın ana unsurları dışında, taşıyıcı zayıf örgü yapıları, üretime yazılım tarafından eklenmektedir. Destek yapı (support) olarak bilinen bu yapılar, üretim sonrası farklı yöntemler ile temizlenmektedir. Tablo 1’de değerlendirilen üretim sistemleri, destek yapı kullanıp kullanmadıkları kapsamında sınıflandırılmıştır.

Değerlendirme kriterlerinden bir diğeri topoloji optimizasyonu başlığıdır. Daha çok hafifletme amaçlı olarak tasarımın bazı yazılımlar aracılığı ile revizyona tabi tutulduğu süreçte, organik formlarda gelişen tasarım, klasik forma göre daha hafif olabilmektedir. Eklemeli imalat teknolojisi ile üretilmeleri mümkün olan organik formdaki bu tasarımlar, bazı üretim teknolojilerinde daha yoğun olarak çalışılmaktadır. Tablo 1’deki değerlendirmede, üretim sistemlerinde geliştirilen topoloji optimizasyonu çalışmaları, tasarım üretim örnekleri değerlendirilmiştir.

Tablo 1 ve 2’de eklemeli imalat teknolojileri karşılaştırmasında ele alınan bir diğer kriter, üretim sistemi ve ortam özelliklerini içermektedir. Bu başlık içerisinde; sistem teknik detay bölümü, kullanılan sistemin teknolojik durumunu ele almakta olup; malzeme ekstrüzyon sisteminin yüksek bir teknoloji gerekmeksizin kolayca imal edilebilir olduğu, diğer üretim sistemlerinin farklı oranları ile karmaşık teknolojik detaylara sahip oldukları değerlendirilmektedir. Proses zorluğu kapsamında, üretim süreci ve sonrası ardıl işlemler dikkate alınarak mimari uygulama örnekleri kapsamında değerlendirme yapılmıştır. Üretim hassasiyeti bölümünde, üretim katman kalınlığı, sistem ile üretilebilir geometri detayları ve yapılan çalışmalar dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Özel ortam gerekliliği değerlendirmesinde, bazı sistemlerin masa üstü yazıcı durumunda olması ve özel ortam gerekmemesi, bazı sistemler için özel iklimlendirme ve gaz ortamı gerekmesi gibi şartlar dikkate alınmıştır. Bu

değerlendirmede toz yatağı sistemlerinin özel ortam gerektirdiği, malzeme ekstrüzyon sistemlerinin ise basit sistemler olduğu görülmektedir. Metal üretimi yapılan sistemlerde (toz yatağı ve bağlayıcı püskürtme) kullanılan metale göre tercih edilen ortam gazı kullanımı veya sonradan ardıl işlem gereklilikleri dikkat çekmektedir. Bağlayıcı püskürtme sistemlerinde sonradan kurlenme veya sinterlenme amaçlı ısıtım işlem uygulaması, toz yatağı sistemlerinde üretim esnasında kullanılan argon, nitrojen gibi ortam gazları kullanımları bu değerlendirmede dikkate alınmıştır. Doğal şartlardan etkilenme başlığında yapılan değerlendirmede, açık alanlarda yapı üretimi yapılan kontur üretimi teknolojisi, iklim ve sıcaklık farklarında etkilenen bir sistem olup; toz yatağı sistemlerinde ortam iklimlendirmesi gerekliliği dikkate alınmıştır. Sistem maliyet avantajı kapsamında, sistem kurulumu için gerekli maliyet değerlendirmesi yapılarak, ev ortamında dahi kurulumu mümkün olan masa üstü kullanımına yönelik malzeme ekstrüzyon sistemleri en ekonomik çözüm olarak yer almaktadır. Tablo 2’de tüm sistemler içerisinde kullanım yoğunluğu kriterinde en başarılı sistemin malzeme ekstrüzyon sistemleri olmasında, sistemin kolay kurulum maliyeti ve basit çözüm tekniğinin etkin olduğu ifade edilebilir. Üretim sistemlerinin bilinirliği başlığında yapılan değerlendirmede, d-form sisteminin fazla tanınmadığı ifade edilebilir. Bazı akademik çalışmalarda yer verilen sistemin yeni olması nedeniyle fazla tanınmadığı söylenebilir. Beton sistemlerinin, toz yatağı, ekstrüzyon ve bağlayıcı püskürtme sistemleri kadar bilinir olmadıkları görülmektedir. Eklemeli imalat sistemleri konusunda, genel olarak yetişmiş işgücü eksikliğinden bahsedilebilir. Ancak özellikle ekstrüzyon sistemlerinden FDM konusunda yoğun bilgi birikiminin bulunduğu ifade edilebilir. Gerek yapılan akademik çalışmalar, gerekse sistem üreticileri yanında bireysel olarak FDM sistemi kurulumunun öğrenciler tarafından yapılabildiği bilinmektedir. Üretilen ilk dönem eklemeli imalat teknolojileri olarak fotopolimerizasyon ve sonrasında toz yatağı sistemleri konusunda birçok akademik çalışmanın yapılmakta olduğu görülmektedir.

Sistemlerin karşılaştırılması kapsamında hazırlanan Tablo 1 ve Tablo 2’de ele alınan son başlık, bu teknolojilerde yapılan bazı çalışmaların incelemesinden oluşmaktadır. İlgili bölümde, eklemeli imalat teknolojilerinde yapılan araştırmalar temel üç grupta değerlendirilmiştir. Teknolojinin geliştirilmesi kapsamında yapılan araştırmalar, ilk grup inceleme kapsamını oluşturmaktadır. Teknoloji geliştirme çalışmalarında toz yatağı sistemleri ve malzeme ekstrüzyon sistemleri, bağlayıcı püskürtme sistemleri daha detaylı çalışmaların yapıldığı üretim sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Beton üreten sistemler, diğer sistemlere göre daha az çalışma ile literatürde yer almaktadır. Eklemeli imalat sistemlerine uyumlu tasarım ve form geliştirme konularında tüm üretim sistemlerinde araştırmalar yapılmaktadır. Ancak FDM (malzeme ekstrüzyon), DMLS, SLS (toz yatağı sistemleri) bu alanda daha detaylı çalışmaların olduğu üretim teknolojileridir. Malzeme geliştirme konusunda; d-form, fotopolimerizasyon ve doğrudan enerji depolama sistemlerinde herhangi bir akademik çalışmaya rastlanmamış olup; diğer sistemlerde malzeme konusunda yapılan akademik ve sektörel birçok örnek bulunmaktadır.

4. SONUÇ

Eklemeli imalat teknolojileri konusunda yapılan birçok akademik çalışmada üretim sistemleri, farklı özellikleri ile gruplandırılarak ele alınmıştır. Çalışmamızda üretim sistemleri, mimari uygulama alanı kapsamında ele alınarak temel üç grupta incelenmiş ve son bölümde bu üretim sistemleri, bazı kriterler kapsamında karşılaştırılmıştır. a

İlgili bölümlerde ele alınan gruplamaya göre; yapı üretimi, bileşenlerin üretimi ve kalıp üretiminde kullanılan sistemler olarak incelenen üretim sistemlerinin, güçlü ve zayıf yönleri çalışma kapsamında ele alınmıştır.

Eklemeli imalat teknolojilerinin en büyük dezavantajı olarak bilinen yüksek üretim ve malzeme maliyetinin zaman içerisinde üretim yöntemlerinin yaygınlaşması ile çözümleneceği öngörülmektedir. Malzeme üretimi ve teknoloji konusunda halen gelişme sürecinde olan üretim sistemleri, klasik üretim tekniklerinde üretilemeyen tasarımların üretilebilirliği kapsamında ön plana çıkmaktadır. Gelecek endüstri uygulamalarında ve mimarisinde etkin olarak kullanılacağı

görülmekte olan eklemeli imalat teknolojilerinin, ilerleyen yıllarda kalıp üretimlerinde de daha etkin olacağı düşünülmektedir. Tasarımların maliyet gereği bu sistemlerde üretilmediği durumlarda, alternatif çözüm olarak gündeme gelen kalıp üretimi, maliyet problemine karşı bir çözüm sunabilir. SLS teknolojisinde kullanılan primecast malzemesinden kalıp, DMLS ve SLS sistemlerinde üretilen mikro soğutuculu enerji etkin kalıp tasarımları, bağlayıcı püskürtme sisteminde kullanılan kum kalıp üretimleri, günümüzdeki bazı kalıp üretimlerine örnek olarak çalışmada daha önce ele alınmış idi. Zaman içerisinde özellikle yapı bileşen üretiminde, eklemeli imalat teknolojileri ile üretilen kalıpların daha etkin kullanılacağı öngörülmektedir. Yapılacak akademik ve sektörel çalışmalarda bu doğrultudaki gelişmelerin ilerleyen yıllarda daha ön planda olacağı düşünülmektedir. Mimari alanda, yapı bileşenlerinin üretimi konusunda deneysel ve akademik olarak ele alınan bazı örneklerin, ilerleyen dönemde malzeme ve sistem maliyetlerinin daha kabul edilebilir seviyelere ulaşması ile doğrudan seri yapı bileşeni üretimine zemin hazırlayacağı ifade edilebilir.

Bu gelişme sürecinde aşılması gereken en önemli sorunlardan birisi de kullanılacak eklemeli imalat sistemi parametrelerine uyumlu tasarım çözümlerinin geliştirilmesidir. Günümüzde klasik üretim yöntemlerine göre yapılan tasarımların, eklemeli imalat teknolojilerinde üretilmek istendiğinde, birçok revizyona gerek duyulduğu bilinmektedir. Ürün hafifletme amaçlı olarak kullanılan topoloji optimizasyonunun genel tasarım mantığında da, bu durum görülmektedir. Klasik yöntem için geliştirilen bir tasarımın, topolojiye tabi tutularak, hafifletilmesi, eklemeli imalat ile üretilen organik formlara dönüştürülmesi yerine tamamen üretim parametrelerine uygun olarak geliştirilen organik formların, ilerleyen yılların tasarım trendi olacağı öngörülebilir.

TEŞEKKÜR

Çalışma sürecinde değerli katkılarından dolayı, FSMVÜ eklemeli imalat araştırma merkezi Aluteam merkez müdürü, Dr. Ebubekir Koç ve mesai arkadaşım Mert Coşkun'a; eklemeli imalat teknoloji üretici firmalarının teknik yetkililerine yardımları için teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

1. Abdel-Rahman, A. ve Elnaz, T. (2018) Heat-Actuated Auxetic Facades, *In Facade Techtonics 2018 World Congress Los Angeles*, Los Angeles: Facade Techtonics 2018 World Congress, Los Angeles.
2. Adikari, A. (2018). New 3D Printable Polymeric Materials for Fused Filament Fabrication (FFF), *PhD Thesis*. The University of Texas, Texas.
3. Alwoimi, B. (2018). Development of a Framework for Design for Additive Manufacturing, *PhD Thesis*. North Carolina A&T State University, Greensboro.
And Archaeological Sciences 1 (1), 17. doi:10.32474/JAAS.2019.01.000102
4. Brischetto ve diğ. (2017) Special Issue on Additive Manufacturing Technologies and Applications, *Technologies MDPI* 5(3), 58. doi.org/10.3390/technologies5030058
5. Buswell, R. ve diğ. (2018) 3D Printing Using Concrete Extrusion: A Roadmap for Research, *Cement ve Concrete Research*, 112, 37–49. doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006
6. Çalışkan, C.İ. (2019) Historical Silahtaraga Power Plant-Black Sea Decovil Line Research, Double Military Decovil Photogrammetry Study, *Journal Of Anthropological*
7. Castaneda, E. ve diğ. (2015) Free-Form Architectural Envelopes: Digital Processes Opportunities of Industrial Production at a Reasonable Price, *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(1), 1–13. doi: 10.3233/FDE-150031

8. Ceccanti, F. ve diğ. (2010) 3D Printing Technology for a Moon Outpost Exploiting Lunar Soil, *Int. 61st International Astronautical Congress*, Prague, CZ, IAC-10-D3, 1–9.
9. Chang, H. ve diğ. (1998) Computer models as support for complex negotiations, *International Conference of the Society for General System Research*, Hungarian Academy of Science, Budapest, 40-48. doi:11.3267/2553/8911.324.260.
10. Craveiroa, F. ve diğ. (2019) Additive Manufacturing as an Enabling Technology for Digital Construction: A Perspective on Construction 4.0., *Sustainable Development*, 4, 6. doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.011
11. Çelik, K. ve Özkan A. (2017) Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 107–21.
12. Drotman, D. (2015). Design of a Screw Extruder for Additive Manufacturing, *Master Thesis*, University of California, San Diego.
13. Edouard C. (2017) TerraPerforma Is the Last Stage of the Open Thesis Fabrication Program in 2016-2017. Erişim Adresi: <http://www.iaacblog.com/programs/terra-performa/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
14. Elhoone, H. (2018). Smart Decision Support for Cyber Additive Design and Manufacturing, *PhD Thesis*, North Carolina Agricultural and Technical State University, Greensboro.
15. Formlabs (2020). 3D Printing Technology Comparison: FDM vs. SLA vs. SLS. Erişim Adresi: <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
16. Gaget, L. (2020). 3D Printing for Construction: What Is Contour Crafting?. Erişim Adresi: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/06/27/3d-printing-for-construction-what-is-contour-crafting/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
17. Gardiner, J. (2011). Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing Project Led Architectural Research, *PhD Thesis*, RMIT University, Melbourne.
18. Gosselin, C. ve diğ. (2016) Large-Scale 3D Printing of Ultra-High Performance Concrete—a New Processing Route for Architects and Builders, *Materials & Design*, 100, 102–9. doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097
19. Grassi, G. (2019) Fabrication and Durability Testing of a 3D Printed Façade for Desert Climates, *Additive Manufacturing*, 28, 439–44. doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.023
20. Guo, N. ve diğ. (2013) Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs, *Frontiers of Mechanical Eng.*, 8(3), 215–43. doi: 10.1007/s11465-013-0248-8
21. Hager, I. ve diğ. (2016) 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction, *Procedia Engineering*, 151, 292–99. doi: : 10.1016/j.proeng.2016.07.357
22. Hamidi, F. ve diğ. (2019.) Additive Manufacturing of Cementitious Composites: Materials, Methods, Potentials, and Challenges, *Construction and Building Materials*, 218, 582–609. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.140
23. Khoshnevis, B. ve diğ. (2012) Contour Crafting Simulation Plan for Lunar Settlement Infrastructure Buildup In Earth and Space 2012, *Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*,1458–67. doi: 10.1061/9780784412190.155
24. Kidwell, J. (2017) Best Practices and Applications of 3D Printing in the Construction Industry, *Construction Management*,79. <https://digitalcommons.calpoly.edu/cmisp/79>

25. Knaack, U. ve diğ. (2018) Parametric Nodes from Idea to Realization, Facade 2018-Adaptive. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:9edf6faa-d3de-410d-97b1-0fa563ac9192>
26. Leach, N. (2014) 3D Printing in Space, *Architectural Design*, 84(6), 108–13. doi.org/10.1002/ad.1840
27. Lim, S. ve diğ. (2009) Fabricating Construction Components Using Layered Manufacturing Technology, *In Global Innovation in Construction Conference*, 512–20.
28. Livesu, M. ve diğ. (2017) From 3D Models to 3D Prints: An Overview of the Processing Pipeline, *Computer Graphics Forum*, Wiley Online Library, 537–64. doi.org/10.1111/cgf.13147
29. Ma, G. ve diğ. (2018) State-of-the-Art of 3D Printing Technology of Cementitious Material An Emerging Technique for Construction, *Science China Technological Sciences*, 61(4), 475–95. doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7
30. Mania A. ve diğ. (2017) Dbt-Digital Building Technologies Deep Facade, Erişim Adresi: <http://dbt.arch.ethz.ch/project/digital-metal-deep-facade/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
31. Mathur, R. (2016) 3D Printing in Architecture, *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(7), 583.
32. Mohsen, A. (2016) Next Generation Printed Steel Knots, Erişim Adresi: <https://facadeworld.com/2016/07/08/3f3dnext-generation-printed-steel-knots/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
33. Mungenast, M. Light In, Erişim Adresi: <https://3dprint.com/187220/3d-printed-building-facades/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
34. MX3D, (2018). MX3D Printed Bridge, Erişim Adresi: <https://mx3d.com/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
35. Oliveira, G. (2019). Accuracy and Precision of 3D Printed Dental Models Produced by Different Additive Manufacturing Technologies, *PhD Thesis*, University of North Carolina, Chapel Hill.
36. Oxman, N. ve diğ. (2014) Towards Robotic Swarm Printing, *Architectural Design*, 84(3), 108–15. doi.org/10.1002/ad.1764
37. Özer, G. (2020) ‘Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606–621. doi.org/10.28948/ngumuh.626011
38. Pollard, M. (2018). Additive Manufacturing for Composite Fabrication: A Study on the Porosity Reduction of Printed Components for Tooling Applications, *Master Thesis*, Florida Agricultural and Mechanical University, Tallahassee.
39. Rael, R. ve diğ. (2011) Developing Concrete Polymer Building Components for 3D Printing, *Computer Aided Design in Architecture*, 157.
40. Rahman, Z. ve diğ. (2018) Additive Manufacturing with 3D Printing: Progress from Bench to Bedside, *The AAPS Journal*, 20(6), 101. doi:10.1208/s12248-018-0225-6
41. Reed, N. (2019). MuDD Architects Uses Drone Spraying to Build ‘terramia’ Housing Prototypes, Erişim Adresi: <https://www.designboom.com/technology/mudd-architects-drone-spraying-terramia-milan-design-week-05-30-2019/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
42. Richardson, A. (2019). 3D Printing Energy-Efficient Facades, Erişim Adresi: <https://aquicore.com/blog/3d-printing-energy-efficient-facades/> Erişim Tarihi:02.06.2020.

43. S. Lim, R. A. ve diğ. (2012) Developments in construction-scale additive manufacturing processes, *Autom. Constr.*, vol. 21, 262–268. doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010
44. SanJose (2019) 3D Concrete Printing Market: Growing Interest in Green Construction Has Increased the Demand, Erişim Adresi: <http://www.credenceturbine.com/3d-concrete-printing-market-growing-interest-in-green-construction-has-increased-the-demand/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
45. Sarakinioti, M. ve diğ. (2018) Development and Prototyping of an Integrated 3D-Printed Façade for Thermal Regulation in Complex Geometries, *Journal of Facade Design and Engineering*, 6(2), 29–40. doi.org/10.7480/jfde.2018.2.2081
46. Sarakinioti, M. ve diğ. (2017) Spong3d: 3D Printed Façade System Enabling Movable Fluid Heat Storage, *Spool*, 4(2), 57–60. doi.org/10.7480/spool.2017.2.1929
47. Savytskyi, M. ve diğ. (2016) 3D-Printing of Build Objects, *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, (3 (216)).
48. Schipper, R. ve diğ. (2017) Double Curved Concrete Printing: Printing on Non-Planar S
49. Sher, D. (2019). One-to-One with Enrico Dini, the Italian Who Invented Binder Jetting for Construction. Erişim Adresi: <https://www.3dprintingmedia.network/one-to-one-with-enrico-dini-the-italian-who-invented-binder-jetting-for-constructions/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
50. Strauss H. (2013) *AM Envelope: The Potential of Additive Manufacturing for facade constructions*, vol. 1, TU Delft.
51. Strauss, H. (2008). Rapid Prototyping in Facades, Erişim Adresi: <https://facadeworld.com/2014/01/12/rapid-prototyping-in-facades/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
52. Strauss, H. ve diğ. (2015) Additive Manufacturing for Future Facades: The Potential of 3D Printed Parts for the Building Envelope, *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(3–4), 225–35. doi: 10.3233/FDE-150042
53. Valamanesh, R. (2012). Design Inspired by Digital Fabrication, *Master Thesis*, Arizona State University.
54. Varotsis, A. (2020). Introduction to Binder Jetting 3D Printing, Erişim Adresi: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing/#what> Erişim Tarihi:02.06.2020.
55. Wasp (2016). Giant 3d Printer for Building 3d Printed House, Erişim Adresi: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printing-architecture/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
56. What Is Direct Energy Deposition, Erişim Adresi: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/direct-energy-deposition/> Erişim Tarihi:02.06.2020.
57. Wohlers, T. ve Gornet T. (2014) History of Additive Manufacturing, *Wohlers report* 24, 118.
58. Wong, K. ve Hernandez A. (2012) A Review of Additive Manufacturing, *ISRN Mechanical Engineering*, 4–5. doi.org/10.5402/2012/208760
59. Wroe, W. (2015) Improvements and Effects of Thermal History on Mechanical Properties for Polymer Selective Laser Sintering (SLS), *Master Thesis*, The University of Texas, Austin.
60. Yalçın, B. ve Berkay E. (2017) Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-d Eklemeli İmalat Yöntemi ve Metalurjisi, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65–88.

Çalışkan C. İ.,Arpacıoğlu Ü.: Yapı Üretiminde Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Deđerlend.

61. Zolfaghari, A. (2018) Study on Multi Directional Additive Manufacturing, *Master Thesis*,Tennessee Technological University.