T.C. ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ · SAMSUN

3 Boyutlu Yazıcılar ve Geleceğin Üretim Teknolojileri

Dönem ödevi raporu

İçindekiler

Sayfa numaraları, raporun PDF çıktısının altbilgisinde görünen numaralarla eşleşir.

1. Giriş	2. Tarihçe ve Temel Kavramlar	3. 3D Yazıcı Nasıl Çalışır: Üretim Akışı	4. Başlıca 3D Baskı Teknolojileri
5. Geleneksel Yazıcılar ile Farklar	6. Sektörel Kullanım Alanları	7. Gelecek: Ev Üretimi	8. Gelecek: Organ Üretimi
9. Sınırlılıklar, Maliyet ve Çevre	10. Sonuç ve Değerlendirme	Kaynakça	Ek: Kısaltmalar ve Tablo Listesi

Özet: Bu rapor, eklemeli üretim (additive manufacturing) olarak da adlandırılan 3 boyutlu baskı teknolojisini tarihsel gelişimi, çalışma ilkeleri, teknoloji çeşitleri, sektörel kullanımı ve gelecek senaryoları bakımından ele almaktadır. Çalışmada literatür taraması yöntemi kullanılmış; uluslararası yayınlar, standartlar ve sektör raporları incelenmiştir.

1. Giriş

1.1 Üretim Tarihine Kısa Bir Bakış

İnsanlığın üretim tarihi, temelde bir “şekil verme” tarihidir. Çok uzun bir dönem boyunca üretim, bir zanaatkârın eliyle, aletle ve deneyimle yaptığı bir iş olarak kaldı. Çömlekçinin çarkında dönen kile şekil vermesi, demircinin örste metali dövmesi, marangozun ağacı rendelemesi hep aynı mantığa dayanıyordu: malzemenin fazlası alınır, geriye istenen biçim kalırdı. Her parça tekti; ölçüleri ustaya, atölyeye ve o günün koşullarına göre küçük farklılıklar gösterirdi. Bir ürünün aynısını yapmak istendiğinde aynı emek yeniden harcanırdı.

Sanayi Devrimi bu tabloyu değiştirdi. On dokuzuncu yüzyılda makinelerin, buhar gücünün ve standart ölçülerin devreye girmesiyle seri üretim doğdu. Artık bir parça binlerce kez üretilebiliyor, her kopya birbirine neredeyse tıpatıp benziyordu. Ancak bu sistemin bir bedeli vardı: her yeni ürün için kalıp, zımba, tezgâh ve ayar gerekliydi. Kalıbın hazırlanması haftalar hatta aylar alabiliyor, bu yüzden bir tasarımın hatasını ancak üretime geçtikten sonra fark etmek pahalıya patlıyordu. Ford’un hareketli bant sistemi bu yaklaşımın simgesi oldu: tek bir modeli çok sayıda ve ucuza üretmek, kişiye özel üretimin tam karşısında duruyordu.

Yirminci yüzyılın ikinci yarısında bilgisayarların üretime girmesiyle üçüncü bir aşama başladı. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) ile parçalar önce ekranda modelleniyor, ardından bilgisayar destekli üretim (CAM) ile tezgâhlara aktarılıyordu. Bilgisayar kontrollü makineler (CNC) çok yüksek hassasiyette çalışıyor, fakat yine de malzemeyi kesip çıkararak, yani

eksilterek biçim veriyordu. Bu noktada şu soru ortaya çıktı: Bir parçayı kesmeden, malzemeyi katman katman ekleyerek üretmek mümkün olabilir miydi? Seksenli yıllarda bu soruya verilen yanıt, bugün 3 boyutlu baskı dediğimiz teknolojinin doğuşu oldu.

1.2 3 Boyutlu Baskı Nedir ve Neden Önemlidir?

3 boyutlu baskı, bilgisayar ortamında hazırlanan üç boyutlu bir modelin, malzemenin katman katman biriktirilmesiyle fiziksel bir nesneye dönüştürülmesidir. Teknik adı eklemeli üretimdir; çünkü malzeme "çıkarılmaz", "eklenir". ISO/ASTM 52900 standardı bu üretim biçimini, parçaların katmanlar hâlinde birleştirilmesiyle yapıldığı süreçlerin genel adı olarak tanımlar (ISO/ASTM, 2015). Bu tanım, teknolojinin özünü tek bir cümlede toplar: üretim artık bir kalıptan değil, doğrudan sayısal veriden doğar.

Bunun önemini anlamak için kalıp kavramını düşünmek gerekir. Geleneksel üretimde bir parçayı üretmek, önce onu üretecek aracı üretmek demektir. Kalıp, döküm modeli ya da özel tezgâh, üretilecek parçanın önüne geçen bir ön yatırımdır. 3 boyutlu baskıda bu ara adım büyük ölçüde ortadan kalkar: model dosyası makineye verilir, makine parçayı doğrudan basar. Bu, tek parça üretiminde büyük bir esneklik yaratır; aynı makinede sabah bir diş modeli, öğleden sonra bir makine yedek parçası, akşam bir mimari maket üretilebilir.

Teknolojinin önemli olduğu bir diğer nokta kişiselleştirmedir. Her insanın vücut ölçüleri, her hastanın anatomisi, her evin ölçüleri farklıdır. Seri üretim bu farklılıkları standart bedenlere sığdırmaya çalışırken eklemeli üretim her bir parçayı kendi verisine göre üretebilir. Diş hekimliğinde hastanın ağzından alınan dijital tarama ile üretilen bir model, ortopedide hastanın tomografisinden tasarlanan bir implant bunun somut örnekleridir.

Üçüncü olarak 3 boyutlu baskı tasarımın sınırlarını genişletir. Geleneksel yöntemlerde içi boş kanallar, birbirine geçmiş boşluklar veya çok karmaşık geometriler ya hiç üretilemez ya da çok pahalıya üretilir. Eklemeli üretimde karmaşıklığın maliyeti çoğu zaman hacimle ilişkilidir; geometrinin zorluğu tek başına maliyeti artırmaz (Gibson, Rosen ve Stucker, 2015). Bu özellik, hafifletme ve topoloji optimizasyonu gibi mühendislik yaklaşımlarını mümkün kılar.

Dördüncü nokta dağıtık üretimdir. Bir parçanın üretimi artık tek bir fabrikada toplanmak zorunda değildir; model dosyası bir sunucuya yüklenip dünyanın herhangi bir yerindeki bir yazıcıda üretilebilir. Bu, özellikle tedarik zinciri kesintilerinin yaşandığı dönemlerde ve kırsal bölgelerde anlamlı hâle gelmiştir. Bogue (2013), bu özelliği üretimin demokratikleşmesi olarak yorumlar; çünkü artık tasarım yapabilen herkes, büyük bir fabrikaya ihtiyaç duymadan üretim yapabilmektedir.

1.3 Ödevin Amacı, Kapsamı ve Yöntemi

Bu ödevin amacı, 3 boyutlu yazıcıları bir mühendislik aracı olarak değil, genel bir teknoloji okuryazarlığı çerçevesinde anlaşılır kılmaktır. Temel Bilgi Teknolojileri dersinin kapsamı göz önünde tutularak konu mümkün olduğunca teknik ayrıntıya boğulmadan, fakat doğruluktan da ödün vermeden anlatılmaya çalışılmıştır. Rapor, bir 3D yazıcının nasıl çalıştığını adım

adım açıklamanın yanında bu teknolojinin hangi sektörlerde ne ölçüde kullanıldığını ve gelecekte hangi alanlarda etkili olabileceğini değerlendirmektedir.

Kapsam bakımından rapor on ana bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde tarihsel gelişim ve temel terimler ele alınmış; ikinci bölümde bir 3D baskının tasarımdan son işleme kadar geçtiği akış anlatılmıştır. Daha sonra başlıca baskı teknolojileri karşılaştırılmış, geleneksel 2 boyutlu yazıcılardan ve CNC makinelerinden farkları ortaya konmuştur. Altıncı bölüm sağlık, otomotiv, mimarlık ve tarım gibi alanlardaki uygulamalara ayrılmıştır. Yedinci ve sekizinci bölümler konunun en çok tartışılan iki başlığına, yani bina baskısı ve organ üretimine odaklanır. Son bölümlerde sınırlılıklar, maliyet, çevre sorunları ve genel bir değerlendirme yer alır.

Yöntem olarak literatür taraması kullanılmıştır. Konuya ilişkin uluslararası dergilerde yayımlanmış derleme makaleler, standartlar, patent belgeleri ve sektör raporları incelenmiştir. Ngo ve arkadaşlarının (2018) malzeme ve yöntem odaklı kapsamlı derlemesi, Attaran'ın (2017) işletme perspektifinden değerlendirmesi, Tay ve arkadaşlarının (2017) inşaat sektörüne yönelik taraması bu çalışmanın omurgasını oluşturmuştur. Teknik terimlerde ISO/ASTM 52900 (2015) standardı esas alınmış; sektör verileri için Wohlers Report (2023) gibi yıllık endüstri raporlarından yararlanılmıştır. Sayısal bilgiler yalnızca kaynaklarda açıkça verilen yerlerde kullanılmış, tahmin içeren ifadelerden kaçınılmıştır.

Çalışmanın bir sınırlılığı, sektörel uygulamaların hızla değişmesidir. Bir yıl önce deneme aşamasında olan bir uygulama, bir yıl sonra seri üretime geçebilmektedir. Bu nedenle rapor, tarih belirterek konuşmaya özen göstermiş ve "bugün" ifadesini belirli bir tarih aralığına bağlamaya çalışmıştır.

1.4 Raporun Yapısı

Rapor on bölümden oluşmaktadır. İkinci bölüm teknolojinin tarihçesini ve temel kavramlarını, üçüncü bölüm bir parçanın tasarımdan son işleme kadar geçtiği üretim akışını, dördüncü bölüm ise başlıca baskı yöntemlerini ve bunların karşılaştırmasını ele almaktadır. Beşinci bölümde geleneksel yazıcılar ve CNC ile farklar ortaya konmakta, altıncı bölümde sağlık, otomotiv, mimarlık ve tarım sektörlerindeki kullanımlar ayrı başlıklar hâlinde incelenmektedir.

Yedinci ve sekizinci bölümler, çalışmanın en çok merak edilen kısmını oluşturan gelecek senaryolarına ayrılmıştır. Ev ve organ üretimi ayrı ayrı değerlendirilmiş; her başlıkta bugün gerçekleşmiş uygulamalar ile henüz araştırma aşamasında olan vaatler bilinçli olarak birbirinden ayrılmıştır. Dokuzuncu bölüm teknik, ekonomik ve çevresel sınırlılıkları, onuncu bölüm ise genel değerlendirmeyi ve çalışmanın kendi kısıtlarını içermektedir.

1.5 Kullanılan Temel Kavramlar ve Metin İçinde Nasıl Kullanıldıkları

Konunun teknik dili, günlük kullanımda birbirinin yerine geçen fakat aslında farklı anlamlar taşıyan kavramlarla doludur. Metnin ilerleyen bölümlerinde karışıklık doğmaması için bu kavramların baştan açıkça tanımlanması yararlı olacaktır. Öncelikle "3 boyutlu baskı", "eklemeli üretim" ve "hızlı prototipleme" ifadeleri aynı teknolojiyi gösterir; ancak vurguları

farklıdır. 3 boyutlu baskı halk arasında yaygın olan gündelik addır, eklemeli üretim ISO/ASTM 52900 standardının benimsediği resmî terimdir ve "hızlı prototipleme" ise doksanlı yıllarda teknolojinin yalnızca prototip üretmekle sınırlı olduğu dönemi anlatan tarihsel bir adlandırmadır. Bugün aynı makineyle son kullanıcı ürünü de üretilebildiği için üçüncü ifade teknik yazında giderek geri plana çekilmiştir.

İkinci olarak "model" ile "çıktı" arasındaki ayrım önemlidir. Model, bilgisayar ortamındaki sayısal temsildir; çıktı ise makineden çıkan fiziksel nesnedir. Raporda bir parçanın tasarımından söz edilirken "model", basılmış hâlinden söz edilirken "parça" ya da "çıktı" sözcükleri kullanılmıştır. Benzer şekilde "baskı" fiili, kâğıda mürekkep aktarma çağrışımı taşısa da bu metinde her zaman katman biriktirme anlamında kullanılmıştır. Hacim, katman, doluluk, destek yapısı ve son işlem gibi terimler ise üçüncü bölümde ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

Üçüncü bir ayrım, malzeme adlarında ortaya çıkar. PLA, PETG, ABS, TPU ve reçine ifadeleri birer marka değil, kimyasal malzeme sınıflarıdır; her birinin erime sıcaklığı, dayanımı, esnekliği ve dış ortam davranışı farklıdır. Metin boyunca bir malzeme adı geçtiğinde, o malzemenin hangi kullanım koşuluna uygun olduğu da belirtilmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşım, okuyucunun "hangi malzemeyle basmalıyım" sorusuna raporun bütününden yanıt bulabilmesini amaçlar.

Son olarak sayısal değerlerin nasıl verildiği açıklanmalıdır. Metinde geçen sıcaklık, katman kalınlığı ve doluluk oranı gibi değerler, yaygın masaüstü makinelerde tipik olarak kullanılan aralıkları gösterir; makine ve malzeme üreticisinin önerileri bu aralıkların dışına çıkabilir. Bu nedenle değerler kesin sınırlar değil, başlangıç noktaları olarak okunmalıdır. Aynı şey ev ve organ üretimi bölümlerinde anılan tarihler için de geçerlidir: verilen yıllar, o alandaki ilk dikkat çekici tanıtımları gösterir; teknolojinin olgunlaşma tarihini değil.

Bu tanımlar ışığında raporun dili, mühendislik literatüründeki terimleri korurken bunları Temel Bilgi Teknolojileri dersinin düzeyine uyarlamayı hedefler. Teknik terimlerin Türkçe karşılığı yerleşik olduğunda Türkçesi, yerleşik olmadığında parantez içinde özgün biçimi kullanılmış; böylece okuyucu ileri okumalarda aynı kavramları kaynaklarda tanıyabilir.

2. 3D Yazıcının Tarihçesi ve Temel Kavramlar

2.1 İlk Adımlar: Kodama'nın Fotopolimer Çalışması

3 boyutlu baskının tarihi genellikle seksenli yılların ortasından başlatılır; ancak literatürde daha erken bir kilometre taşı vardır. Japon araştırmacı Hideo Kodama, ışığa duyarlı bir reçinenin (fotopolimer) ultraviyole ışıkla belirli bölgelerde sertleştirilmesiyle katman katman üç boyutlu nesne üretme fikrini yayımlamıştır. Kodama'nın yöntemi bugün stereolitografi dediğimiz sürecin temel mantığını içeriyordu: sıvı reçine yüzeyine seçici olarak ışık göndermek, sertleşen ince tabakanın üzerine yeni bir reçine tabakası çekmek ve işlemi tekrarlamak. Ne var ki bu çalışma ticari bir ürüne dönüşmemiş, patent süreci de

tamamlanmamıştır. Yine de Kodama'nın çalışması, teknolojinin bilimsel temelinin seksenlerin başında atıldığını göstermesi bakımından önemlidir.

Bu dönemde benzer fikirler farklı ülkelerde eş zamanlı olarak ortaya çıkmıştır. Fransa'da Alain Le Méhauté ve Olivier de Witte, Japonya'da Kodama, ABD'de Chuck Hull aynı probleme farklı açılardan yaklaşıyordu. Bu durum teknoloji tarihinde sık görülen bir olgudur: bilimsel ve teknolojik koşullar olgunlaştığında aynı buluş birbirinden bağımsız olarak birden fazla yerde ortaya çıkabilir. Farkı yaratan ise çoğu zaman buluşu ticarileştirme kararlılığıdır.

2.2 Chuck Hull, Stereolitografi ve 3D Systems

Chuck Hull, ultraviyole ışıkla sertleşen bir reçine kullanarak küçük bir nesneyi katman katman üretti, yöntemi geliştirdi ve 1986 yılında "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography" başlıklı patentini aldı (ABD Patenti No. 4.575.330) (Hull, 1986). Bu patent, eklemeli üretimin ticari temelini oluşturan belge olarak kabul edilir. Hull'un yönteminde bir tank içindeki sıvı reçine, ayna sistemiyle yönlendirilen lazer ışınıyla noktasal olarak sertleştiriliyor; her katmandan sonra platform hafifçe aşağı indirilerek yeni bir reçine filmi oluşturuluyordu.

Hull aynı dönemde kendi şirketini kurdu: 3D Systems. Şirketin geliştirdiği dosya biçimi olan STL de bugün hâlâ en yaygın kullanılan 3D baskı dosya formatıdır. Bu ayrıntı, teknolojinin gelişiminin yalnızca makine tarihi değil, aynı zamanda bir yazılım ve dosya standardı tarihi olduğunu gösterir. Patentin hemen ardından ilk ticari stereolitografi makinesi olan SLA-1 piyasaya çıktı. Makine pahalıydı ve ağırlıklı olarak otomotiv ile havacılık firmalarında prototip amacıyla kullanılıyordu; buna karşın sektörün doğuşu bu makineyle birlikte gerçekleşti.

Bu ilk dönemin temel özelliği, teknolojinin neredeyse tamamen "hızlı prototipleme" (rapid prototyping) adıyla anılmasıdır. Amaç, üretilecek parçanın önceden bir fiziksel kopyasını elde edip tasarımı doğrulamaktı. Nihai ürünün kendisinin basılması fikri henüz yaygın değildi (Gibson ve ark., 2015).

2.3 FDM, SLS ve Endüstriyel Dönem

Scott Crump, erimiş termoplastik filamenti bir nozuldan geçirerek katman katman biriktirme yöntemini geliştirdi. Bu yöntem Fused Deposition Modeling (FDM) adıyla patentlendi ve Crump'ın kurduğu Stratasys şirketinin temel teknolojisi oldu. FDM, stereolitografiye göre daha basit, daha ucuz ve daha güvenli bir yaklaşımdı; çünkü sıvı reçine ve lazer yerine sadece ısıtıcı, nozul ve plastik tel kullanılıyordu. Bu basitlik, ilerleyen yıllarda teknolojinin evlere girmesini sağlayacak olan anahtardı.

Aynı yıllarda DTM şirketi Seçici Lazer Sinterleme (SLS) teknolojisini ticarileştirdi. SLS'de toz hâlindeki polimer, lazerle noktasal olarak eritilip birbirine bağlanıyor ve katmanlar toz yatağı üzerinde oluşturuluyordu. Tozun destek görevi görmesi, karmaşık geometrilerin destek yapısı olmadan basılabilmesini sağladı. Yine bu dönemde metal parçalar için lazer sinterleme ve eritme yöntemleri geliştirilmeye başlandı; bu yöntemler zamanla havacılık ve tıp sektörlerinin vazgeçilmez araçları hâline geldi.

Doksanlı yıllarda ayrıca lamine nesne üretimi (LOM) ve üç boyutlu baskı (3DP) adıyla anılan bağlayıcı püskürtme yöntemleri de ticarileşti. Bu çeşitlilik, iki binli yıllara gelindiğinde eklemeli üretimin tek bir teknolojiden değil, bir teknoloji ailesinden oluştuğunu göstermektedir.

2.4 RepRap, Açık Kaynak ve Yaygınlaşma

Bath Üniversitesi'nde Adrian Bowyer'ın başlattığı RepRap projesi sektörde bir kırılma noktasıdır. Projenin amacı, kendi parçalarının önemli bir bölümünü kendisi basabilen, açık kaynaklı, düşük maliyetli bir 3D yazıcı tasarlamaktı. Tasarımlar kamuya açık olarak paylaşıldı; dünyanın farklı yerlerindeki meraklılar bu tasarımları geliştirerek kendi makinelerini kurdu. Böylece 3D baskı, birkaç büyük şirketin tekelindeki bir endüstriyel araçtan, topluluk eliyle geliştirilen bir hobi teknolojisine dönüştü (Bogue, 2013).

Bu dönemde FDM teknolojisinin temel patentlerinin süresi dolmaya başladı. Patent koruması kalktığında farklı üreticiler benzer makineler üretmeye başladı ve fiyatlar hızla düştü. Kısa süre sonra kurulan MakerBot bu açık kaynak kültürünün ticari bir yansıması oldu; şirketin Cupcake CNC ve Replicator modelleri masaüstü 3D baskının simgeleri hâline geldi. İki bin onlu yıllarda ise uygun fiyatlı makinelerin pazara girmesiyle birlikte bir 3D yazıcı, birçok ülkede bir bilgisayar kadar erişilebilir bir araç oldu.

Bu yıllar aynı zamanda yazılım tarafında da büyük bir dönüşüm getirdi. Açık kaynak dilimleyiciler, ücretsiz model paylaşım platformları ve çevrim içi topluluklar teknolojinin öğrenilmesini kolaylaştırdı. Bugün bir öğrenci ücretsiz bir CAD programında basit bir model tasarlayıp, ücretsiz bir dilimleyiciyle hazırlayıp, uygun fiyatlı bir masaüstü makinede birkaç saat içinde elinde tutabiliyor. Bu, otuz yıl önce yalnızca büyük firmaların laboratuvarlarında mümkündü.

2.5 Temel Terimler

Konuyu doğru anlamak için bazı terimlerin netleştirilmesi gerekir. Bu terimler ISO/ASTM 52900 standardının terminolojisine dayanmaktadır (ISO/ASTM, 2015) ve raporun ilerleyen bölümlerinde sıkça kullanılacaktır.

- **Eklemeli üretim:** Malzemenin katmanlar hâlinde birleştirilmesiyle parça üretimi; geleneksel eksilterek üretimin karşıtı.
- **Katman (layer):** Bir baskıda yatay olarak oluşturulan ince malzeme tabakası. Tüm parça bu tabakaların üst üste gelmesiyle oluşur.
- **Katman yüksekliği:** Her katmanın kalınlığı (örn. 0,2 mm). Küçük değerler daha ince yüzey ama daha uzun süre demektir.
- **Dilimleme (slicing):** Üç boyutlu modelin, yazıcının anlayacağı katmanlara ve hareket yollarına dönüştürülmesi.
- **G-code:** Dilimleyicinin ürettiği, yazıcıya "şu noktaya git, şu kadar malzeme sık, şu sıcaklıkta bekle" gibi komutlar veren metin tabanlı dil.

- **STL / OBJ:** Üç boyutlu yüzey geometrisini tanımlayan dosya biçimleri. STL yüzeyi üçgenlerle ifade eder; renk ve malzeme bilgisi içermez.
- **Nozul:** FDM yazıcılarda erimiş filamenti çıkaran uç; çapı genellikle 0,4 mm'dir.
- **Tabla (build plate):** Parçanın üzerine basıldığı platform; ısıtmalı olabilir.
- **Filament:** FDM yazıcıların kullandığı, makaraya sarılı termoplastik tel (genellikle 1,75 mm çapında).
- **Reçine:** Stereolitografi ve türevlerinde kullanılan, UV ışıkla sertleşen sıvı polimer.
- **Sinterleme:** Toz hâlindeki malzemenin eritilmeden, tanelerin birleşeceği kadar ısıtılması.
- **Destek yapısı:** Havada kalan bölümleri tutmak için eklenen ve baskıdan sonra kırılan yardımcı yapı.
- **Doluluk oranı (infill):** Parçanın içinin ne oranda malzemeyle doldurulduğu (örn. yüzde yirmi).
- **Raft, brim, skirt:** Tablaya yapışmayı artırmak veya nozulu hazırlamak için parçanın çevresine eklenen yardımcı taban çizgileri.

2.6 ISO/ASTM 52900 ve Yedi Temel Yöntem Sınıfı

Eklemeli üretim, birbirinden oldukça farklı makineleri kapsayan geniş bir ailedir. Bu nedenle uluslararası standart kuruluşları ortak bir dil oluşturmak amacıyla sınıflandırma çalışmaları yapmıştır. ISO/ASTM 52900, eklemeli üretim süreçlerini malzemenin nasıl birleştirildiğine göre yedi sınıfa ayırır:

1. **Malzeme ekstrüzyonu:** Erimiş malzemenin nozuldan çıkarılarak biriktirilmesi (FDM).
2. **Fotopolimerizasyon (küvette ışıkla sertleştirme):** Sıvı reçinenin ışıkla katman katman sertleştirilmesi (SLA, DLP, LCD).
3. **Toz yataklı birleştirme:** Tozun lazerle veya bağlayıcıyla seçici olarak birleştirilmesi (SLS, SLM, DMLS).
4. **Malzeme püskürtme:** Birden fazla malzemenin küçük damlalar hâlinde püskürtülüp UV ile sertleştirilmesi (PolyJet).
5. **Bağlayıcı püskürtme:** Toz yatağına bağlayıcı sıvı püskürtülerek yapıştırma (binder jetting).
6. **Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED):** Metal toz veya telin lazer ya da ark ile aynı anda eritilip biriktirilmesi.
7. **Tabaka lamine etme:** Kâğıt, plastik veya metal folyoların kesilip yapıştırılması (LOM).

Bu sınıflandırma yalnızca akademik bir düzenleme değildir; mühendislikte hangi yöntemin hangi malzemeye, hangi boyuta ve hangi yüzey kalitesine uygun olduğunu tartışırken ortak bir çerçeve sunar. Raporda incelenen yöntemler ağırlıklı olarak ilk üç sınıfa aittir; çünkü bu sınıflar hem endüstriyel hem de masaüstü kullanımda en yaygın olanlardır (Ngo ve ark., 2018).

2.7 Türkiye'de Eklemeli Üretim

Türkiye'de 3 boyutlu baskı, 2010'lu yıllardan itibaren önce üniversite atölyelerinde ve hobi topluluklarında görünür hâle gelmiş, ardından küçük ve orta ölçekli işletmelerin prototip ihtiyacını karşılamaya başlamıştır. Bugün makine imalatı, beyaz eşya yan sanayi, medikal ürün üreticileri ve diş laboratuvarları bu teknolojiyi düzenli olarak kullanmaktadır. Savunma ve havacılık alanında ise metal toz yataklı sistemlere yönelik yatırımlar artmaktadır.

Buna karşın yaygınlaşmanın önünde iki engel bulunmaktadır: nitelikli eleman ve malzeme tedariki. Filament ve reçine büyük ölçüde ithal edildiği için maliyet dalgalanmalara açıktır. Tasarım bilgisi ise çoğu işletmede tek bir kişiye bağlıdır; bu da sürdürülebilirliği sınırlar. Meslek liselerinde ve üniversitelerde eklemeli üretim derslerinin yaygınlaşması, bu boşluğu kapatmanın en doğrudan yolu olarak görülmektedir (Wohlers, 2023).

3. 3D Yazıcı Nasıl Çalışır: Üretim Akışı

3.1 Tasarım: Fikirden Sayısal Modele

Bir 3D baskının başlangıç noktası her zaman bir dijital modeldir. Bu model ya sıfırdan tasarlanır ya da mevcut bir nesnenin taranmasıyla elde edilir. Tasarım sürecinde kullanılan yazılımlar, profesyonel CAD programlarından başlangıç seviyesindeki blok tabanlı araçlara kadar geniş bir yelpazeye yayılır. SolidWorks ve Fusion 360 gibi parametrik programlar, ölçülerin ve ilişkilerin tanımlandığı, değişiklik yapıldığında modelin otomatik güncellendiği bir yaklaşım sunar. Bu programlar mühendislik eğitiminde ve endüstriyel tasarımda standart hâle gelmiştir.

Başlangıç seviyesindeki kullanıcılar için Tinkercad gibi tarayıcı tabanlı araçlar önemli bir kolaylık sağlar. Bu tür araçlarda temel geometrik şekiller birleştirilir, çıkarılır ve ölçeklenir; modelleme, karmaşık menüler yerine görsel ve sezgisel bir mantıkla yapılır. Ortaokul ve lise düzeyinde teknoloji derslerinde, üniversitelerin temel bilgi teknolojileri derslerinde bu tür araçların tercih edilmesi şaşırtıcı değildir. Heykel ve organik formlar için Blender gibi yüzey modelleme programları, mühendislik analizi için ise CAD programlarının simülasyon modülleri kullanılır.

Tasarımın ikinci yolu taramadır. Üç boyutlu tarayıcılar, lazer veya yapılandırılmış ışık yardımıyla bir nesnenin yüzeyindeki noktaları ölçer ve bu nokta bulutunu bir yüzey ağına dönüştürür. Fotogrametri ise daha erişilebilir bir yöntemdir: nesnenin farklı açılardan çekilmiş çok sayıda fotoğrafı, yazılım tarafından analiz edilerek üç boyutlu modele dönüştürülür. Bu yöntem tarihi eserlerin dijital arşivlenmesinde, kırılmış bir parçanın kopyalanmasında ve ortopedik ölçü alımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Diş hekimliğinde ise ağız içi tarayıcılar, alçı ölçü kalıplarının yerini hızla almaktadır.

3.2 Dosya Hazırlığı: STL'nin Mantığı ve Sınırları

Tasarım tamamlandığında modelin, yazıcının okuyabileceği bir biçime dönüştürülmesi gerekir. En yaygın biçim STL'dir. STL dosyası, nesnenin yüzeyini binlerce küçük üçgenle tanımlar. Bu üçgenlerin her biri üç köşe koordinatı ve bir normal vektörle ifade edilir. Dolayısıyla STL, nesnenin yalnızca dış kabuğunu tanımlar; iç yapısı, rengi, malzemesi veya birim bilgisi dosyada yer almaz. Bu özellik hem bir kolaylık hem de bir sınırlılıktır.

STL'nin en bilinen sorunu, "su geçirmez" (watertight) olması gerekliliğidir. Baskı için modelin her noktada kapalı bir yüzey oluşturması, yani içi ile dışı arasında açıklık bulunmaması gerekir. Eğer modelde delik, ters yüzey veya üst üste binen geometri varsa dilimleyici hangi bölgenin katı olduğunu belirleyemez ve baskı hatalı sonuçlanır. Bu nedenle mesh repair (ağ onarımı) adı verilen işlemler uygulanır: delikler kapatılır, normal yönleri düzeltilir, gereksiz yüzeyler temizlenir. Dilimleyicilerin çoğu temel onarım araçları içerir; karmaşık durumlarda ise özel yazılımlar kullanılır.

STL'nin bir diğer sınırı, eğrisel yüzeylerin üçgenlerle yaklaşık olarak temsil edilmesidir. Bir küre gerçekte sonsuz sayıda noktadan oluşur; STL'de ise belirli sayıda üçgenle ifade edilir. Üçgen sayısı arttıkça model gerçeğe yaklaşır ama dosya boyutu ve işlem yükü artar. Bu nedenle yüzey çözünürlüğü (mesh density) ile dosya boyutu arasında bir denge kurulur. Daha yeni biçimler olan 3MF ve AMF, renk ve malzeme bilgisini taşıyabildiği için endüstriyel kullanımda giderek yaygınlaşmaktadır.

3.3 Dilimleme: Katmanlara Ayırma

Dilimleme, üç boyutlu modelin sanal olarak yatay katmanlara bölünmesi ve her katmanda nozulun izleyeceği yolların hesaplanması işlemidir. Bu işlemi yapan yazılımlara dilimleyici (slicer) denir. Ultimaker Cura ve PrusaSlicer, açık kaynak ve ücretsiz olmaları nedeniyle en yaygın kullanılan iki dilimleyicidir. Dilimleyici, kullanıcıdan alınan ayarlara göre G-code üretir ve bu dosya yazıcıya gönderilir.

Dilimlemede en kritik ayarlardan biri katman yüksekliğidir. 0,2 mm'lik bir katman yüksekliği çoğu kullanım için dengeli bir tercihtir. 0,1 mm'ye indirildiğinde yüzey daha pürüzsüz olur, ancak katman sayısı iki katına çıktığı için baskı süresi de yaklaşık olarak iki katına çıkar. 0,3 mm ise hızlı ama daha kaba bir sonuç verir. Katman yüksekliği nozul çapının yaklaşık dörtte biri ile dörtte üçü arasında seçilir; çok büyük değerler katmanların birbirine yeterince yapışmamasına yol açar.

Duvar kalınlığı (perimeter) parçanın dayanımını doğrudan etkiler. Çoğu baskıda iki veya üç duvar yeterlidir; yük taşıyan parçalarda duvar sayısı artırılır. Doluluk oranı ise iç yapıyı belirler: düşük doluluk görsel modeller için yeterliyken mekanik yük alan parçalarda yüksek doluluk tercih edilir. Dilimleyiciler ayrıca kafes (gyroid, cubic, grid) gibi farklı dolgu desenleri sunar; kafes desenleri aynı ağırlıkta daha yüksek dayanım sağlayabilir.

Destek yapıları havada kalan bölümlerin basılabilmesi için gereklidir. Dilimleyici, belirlenen açı eşiğinin (genellikle 45 derece) altındaki yüzeylere otomatik destek ekler. Desteklerin parçaya çok sıkı veya çok gevşek bağlanması ya yüzey hasarına ya da baskı hatasına yol açar.

Tablaya yapışma için üç temel yardımcı kullanılır: skirt (nozulun malzeme akışını kontrol etmek için parçanın çevresine çizilen tek çizgi), brim (parçanın tabanına eklenen geniş bir çerçeve) ve raft (parçanın altına eklenen kalın bir taban). Brim özellikle ince ve uzun parçalarda kenar kalkmasını önler.

3.4 Baskı: Erimiş Filamentin Yolculuğu

FDM yazıcıda filament, bir dişli mekanizmasıyla nozula itilir. Nozul ısıtıcı blok içinde erime sıcaklığına kadar ısıtılır. PLA için tipik sıcaklık 200–210 °C, ABS için 240 °C civarındadır. Malzeme nozuldan çıktığında yarı akışkan bir hâldedir ve bir önceki katmanın üzerine yapışarak soğur. Nozulun hareketi X-Y eksenlerinde motorlarla sağlanır; Z ekseni ise ya tabla ya da nozul kafası hareket ettirilerek katman yüksekliği kadar ilerletilir.

Tabla sıcaklığı da en az nozul sıcaklığı kadar önemlidir. PLA için 50–60 °C, ABS için 90–110 °C tabla sıcaklığı önerilir. ABS'nin büzülme eğilimi yüksektir; tabla ısıtılmazsa parça soğurken büzülür ve tabladan ayrılır. Bu nedenle ABS baskılarda kapalı bir kabin kullanımı yaygındır. Soğutma fanı ise erimiş malzemenin hızla katılaşmasını sağlar; ancak aşırı soğutma katmanlar arası yapışmayı zayıflatabilir. Dilimleyicilerde fan hızı katman sayısına göre kademeli olarak artırılacak şekilde ayarlanabilir.

Baskı sırasında karşılaşılan sorunların çoğu bu ayarların dengesiyle ilgilidir. Aşırı ekstrüzyon (over-extrusion) yüzeyde kabarmaya, yetersiz ekstrüzyon (under-extrusion) ise katmanlarda boşluklara yol açar. İlk katmanın tablaya çok yakın olması nozulun tıkanmasına, çok uzak olması ise yapışmamasına neden olur. Deneyimli kullanıcılar ilk katmanı izleyerek bu ayarları sezgisel olarak düzeltir. Bu durum, 3D baskının hâlâ bir ölçüde zanaat yönü olduğunu gösterir.

3.5 Son İşlem ve Katmanların Getirdiği Anizotropi

Baskı tamamlandığında iş bitmez. Destek yapıları temizlenir, yüzeydeki izler zımparalanır, gerekirse astar ve boya uygulanır. Bazı malzemelerde tavlama (annealing) işlemiyle parçanın dayanımı artırılabilir. Aseton buharı, ABS parçalarda yüzeyi eritip pürüzsüz hâle getirmek için kullanılır; ancak bu işlem ölçü hassasiyetini bir miktar bozar. Reçine baskılarda ise izopropil alkol (IPA) ile yıkama ve UV ışıkla son kürleme zorunludur.

3D baskının en temel mühendislik sorunu anizotropidir; yani parçanın özellikleri her yönde aynı değildir. Katmanlar arasındaki bağ, katman içindeki bağa göre daha zayıftır. Bu nedenle bir FDM parçası katmanlara paralel yönde çekildiğinde daha dayanıklı, katmanlara dik yönde çekildiğinde daha zayıftır. Uygulamada bu, yatay olarak basılmış bir çubuğun büküldüğünde katmanlar boyunca ayrılabileceği anlamına gelir.

Bu sorun, baskı yönünün (orientation) tasarımın bir parçası hâline gelmesine yol açar. Mühendisler parçanın hangi yönde kuvvet alacağını düşünerek tablaya hangi yüzünün oturacağına karar verir. Endüstriyel metal baskılarda ise anizotropi ısıl işlem (HIP – sıcak izostatik presleme) ve yüzey işlemleriyle azaltılmaya çalışılır. Bu konu, eklemeli üretimin mekanik tasarım açısından geleneksel üretimden farklı bir düşünme biçimi gerektirdiğini gösterir (Gibson ve ark., 2015).

Ayrıca son işlem süresi, toplam üretim süresinin göz ardı edilmemesi gereken bir bölümüdür. Bir diş modeli için yıkama ve kürleme birkaç dakika sürerken metal bir implantın gerilim giderme ısıl işlemi ve yüzey parlatması saatler alabilir. Bu nedenle "3D baskı hızlıdır" ifadesi her zaman "baskı makinesi hızlıdır" anlamına gelmez; tüm üretim zinciri düşünülmelidir.

4. Başlıca 3D Baskı Teknolojileri

4.1 FDM: Malzeme Ekstrüzyonu

FDM, en yaygın bilinen ve en erişilebilir 3D baskı teknolojisidir. Temel prensibi termoplastik filamenti ısıtıp nozuldan ekstrüde ederek katman katman biriktirmektir. Makine yapısı görece basittir: ısıtıcı, nozul, filament sürme mekanizması, hareket eksenleri ve tabla. Bu basitlik makinelerin ucuzlamasını ve onarılmasının kolaylaşmasını sağlar. FDM'nin bir diğer avantajı malzeme çeşitliliğidir: PLA, ABS, PETG, TPU, naylon ve karbon elyaf takviyeli kompozitler bu yöntemle basılabilir.

PLA, mısır nişastası gibi bitkisel kaynaklardan elde edilen, kokusuz ve basımı kolay bir malzemedir; bu nedenle eğitimde ve hobi kullanımında ilk tercihtir. Ancak ısıya dayanımı düşüktür ve güneş altında zamanla deformasyona uğrayabilir. ABS dayanım ve ısı direnci bakımından daha iyidir, fakat baskı sırasında zararlı buhar salgılar ve büzülme eğilimi gösterir. PETG, PLA'nın kolaylığı ile ABS'nin dayanımı arasında bir denge sunar. TPU esnek parçalar için kullanılır; naylon ise yüksek dayanım gerektiren işlevsel parçalarda tercih edilir (Ngo ve ark., 2018).

FDM'nin başlıca dezavantajları yüzey kalitesi ve çözünürlüktür. Katman izleri her zaman görünür kalır, ince ayrıntılar sınırlıdır, anizotropi belirgindir. Buna karşın geniş parçalar, işlevsel prototipler, aparatlar, kalıp ve düzenek parçaları için hâlâ en pratik çözümdür. Endüstride jig ve fixture adı verilen montaj aparatlarının üretiminde FDM yaygın biçimde kullanılmaktadır.

4.2 SLA, DLP ve LCD: Fotopolimerizasyon

Fotopolimerizasyon yöntemlerinde sıvı reçine ışıkla seçici olarak sertleştirilir. SLA'da lazer noktasal olarak yüzeyi tarar; DLP'de bir projeksiyon cihazı tüm katmanı tek seferde yansıtır; LCD yönteminde ise maske görevi gören bir ekran kullanılır. Bu yöntemlerin ortak üstünlüğü yüksek detay çözünürlüğüdür. Katman kalınlıkları mikron ölçeğinde, yani bir milimetrenin çok küçük bir bölümü düzeyinde değişir; bu da FDM'de ulaşılamayan bir yüzey kalitesi anlamına gelir.

Bu teknoloji diş hekimliğinde ve kuyumculukta yaygın olarak kullanılır. Diş laboratuvarlarında ağız içi tarayıcıyla alınan dijital ölçü reçine model olarak basılır; bu model üzerinde kron ve köprüler hazırlanır. Kuyumculukta ise reçine model, kayıp mum döküm yönteminde mum modelin yerini alır. Bu, teknolojinin bir ara adım olarak nasıl işlev gördüğünü gösterir: 3D baskı nihai ürünü değil, onu üretmenin aracını üretir.

Reçine baskının kendine özgü zorlukları vardır. Sertleşmemiş reçine cilt ile temas ettiğinde tahriş edicidir; eldiven ve havalandırma gereklidir. Baskı sonrasında parça IPA ile yıkanmalı ve UV kabininde son kürlemeye tabi tutulmalıdır. Ayrıca reçine, ışığa maruz kaldığında zamanla sertleşip bozulduğu için opak şişelerde ve serin ortamda saklanmalıdır. Çevre açısından reçine atıkları filament atıklarına göre daha sorunlu bir kategoridir; bu konu dokuzuncu bölümde ayrıca ele alınacaktır.

4.3 SLS ve Metal Toz Yataklı Yöntemler

SLS'de bir toz yatağı üzerine ince bir polimer tozu serilir, lazer bu tozun belirli bölgelerini sinterler, ardından yeni bir toz tabakası eklenir. Süreç sonunda basılmamış toz, parçayı çevreleyen bir destek gibi davranır; bu nedenle destek yapısı gerekmez. Bu özellik, iç içe geçmiş kanallar ve serbest hareketli parçalar içeren geometrilerin tek seferde basılabilmesini sağlar. Yaygın malzeme, güçlü ve esnek parçalar veren naylon (PA12) tozudur.

Metal toz yataklı yöntemler (SLM ve DMLS) lazerle metal tozunu tamamen eriterek yoğun metal parçalar üretir. Titanyum, alüminyum, paslanmaz çelik ve nikel alaşımları bu yöntemlerle işlenebilir. Havacılıkta hafif ve karmaşık geometrili parçalar, tıpta ise kişiye özel implantlar bu yöntemle üretilmektedir. Bu makinelerin maliyeti yüksektir ve operatör eğitimi gerektirir; ancak üretilen parçaların mekanik özellikleri döküm parçalara yaklaşabilir.

Metal baskının en önemli avantajlarından biri topoloji optimizasyonudur. Bir parçanın yalnızca yük taşıyan bölümlerinin bırakılmasıyla önemli ölçüde ağırlık azalması sağlanabilir; literatürde bu azalmanın parçanın üçte birine kadar çıkabildiği belirtilmektedir. Otomotiv ve havacılıkta bu, yakıt tüketimini doğrudan etkileyen bir kazançtır. Ancak metal baskıda ısıl gerilmeler nedeniyle çarpılma, destek yapısının yoğun kullanımı ve sonrasında ısıl işlem gerekliliği gibi konular ciddi mühendislik bilgisi gerektirir (Ngo ve ark., 2018).

4.4 Diğer Yöntemler

PolyJet malzeme püskürtme sınıfına girer ve birden fazla malzemeyi aynı baskıda birleştirebilir. Bu yöntemle farklı sertlikte, farklı renkte ve hatta şeffaf malzemeler bir arada üretilebilir; bu nedenle ürün tasarımında görsel prototipler ve tıbbi modellemeler için tercih edilir. Bağlayıcı püskürtme ise toz yatağına bağlayıcı sıvı püskürtülerek yapılır ve özellikle kum döküm kalıplarında ve seramik parçalarda kullanılır; inşaat sektöründeki beton baskı denemelerinde de bu mantıktan yararlanılmıştır.

DED (yönlendirilmiş enerji biriktirme) özellikle büyük metal parçaların onarımı ve üretiminde kullanılır. Lazer veya ark kaynağı ile metal tel ya da toz eritilerek biriktirilir. Bu yöntem toz yataklı sistemlere göre çok daha büyük parçalar üretebilir; buna karşılık yüzey kalitesi daha düşüktür ve işleme payı bırakılması gerekir. LOM (lamine nesne üretimi) ise kâğıt veya folyo tabakalarının kesilip yapıştırılmasıyla çalışır; bugün endüstriyel kullanımı sınırlıdır.

4.5 Teknolojilerin Karşılaştırılması

Aşağıdaki tablo, bu bölümde ele alınan başlıca yöntemleri temel özellikler bakımından karşılaştırmaktadır. Değerler literatürde yaygın olarak belirtilen aralıkları yansıtır ve üreticiden üreticiye değişebilir.

YÖNTEM	MALZEME	KATMAN KALINLIĞI	YÜZEY KALİTESİ	HIZ	MALİYET	TİPİK KULLANIM
FDM	PLA, ABS, PETG, TPU, naylon	milimetrenin onda biri ölçeğinde	Orta (katman izleri görünür)	Orta	Düşük	Prototip, aparat, eğitim, ev kullanımı
SLA / DLP	Fotopolimer reçine	mikron ölçeğinde, çok ince	Çok yüksek	Yavaş–orta	Orta	Diş, kuyum, ince detaylı model
SLS	Naylon tozu (PA12)	milimetrenin onda biri ölçeğinde	Yüksek	Orta	Orta–yüksek	İşlevsel parça, karmaşık geometri
SLM / DMLS	Metal tozları	en ince (mikron altı–mikron)	Yüksek (işlem sonrası iyileşir)	Yavaş	Yüksek	İmplant, havacılık, otomotiv parçası
PolyJet	Çoklu fotopolimer	mikron ölçeğinde	Çok yüksek	Orta	Yüksek	Çok malzemeli prototip
DED	Metal tel / toz	milimetre ölçeğinde	Düşük–orta	Hızlı (büyük hacim)	Yüksek	Büyük metal parça, onarım

5. Geleneksel Yazıcılar ile 3D Yazıcılar Arasındaki Farklar

3 boyutlu baskı çoğu zaman “yazıcı” sözcüğü üzerinden anlatıldığı için, ofisteki kâğıt yazıcısının gelişmiş bir versiyonu sanılır. Bu benzetme ilk adımda anlaşılmayı kolaylaştırsa da teknolojinin mantığını yanlış yere oturtur. İki cihaz arasındaki fark, aynı işi daha iyi yapan iki makine arasındaki fark değil, farklı işler yapan iki teknoloji arasındaki farktır. Bu bölümde farklar önce kavramsal düzeyde, sonra dosya, donanım, süre ve maliyet boyutlarında ele alınmakta; sonunda 3D baskının gerçek rakibi olan CNC ile karşılaştırma yapılmaktadır.

5.1 İki Boyut ile Üç Boyut Arasındaki Kavramsal Fark

Geleneksel yazıcı, mürekkep veya toner aracılığıyla kâğıt üzerinde iki boyutlu bir görüntü oluşturur. Çıktı bir yüzeydir: kâğıdın üzerine aktarılmış bir bilgi katmanı. 3D yazıcı ise malzemeyi katman katman biriktirerek hacimli bir nesne üretir. Çıktı, elde tutulabilen, tartılabilen ve bir işlevi olan bir parçadır. Bu nedenle iki cihazın çıktıları arasında yalnızca nitelik değil, tür farkı vardır: biri bilgi taşır, diğeri iş görür.

Bu fark üretim mantığını da değiştirir. Geleneksel yazıcıda kâğıt taşıyıcı bir ortamdır ve görüntü ile kâğıt birbirinden bağımsız iki unsurdur; aynı görüntü farklı kâğıtlara basılabilir. 3D baskıda ise malzemenin kendisi ürünün gövdesidir. Dolayısıyla malzemenin dayanımı, ısıya davranışı ve yüzey özellikleri doğrudan ürünün işlevini belirler. Bir kâğıt çıktıda yazı silinirse sorun olur; 3D baskıda katmanlar birbirinden ayrılırsa parça iş görmez. Bu yüzden 3D baskıda malzeme seçimi, tasarımın ayrılmaz bir parçasıdır.

Bir başka kavramsal fark da hata toleransıdır. İki boyutlu baskıda küçük bir renk kayması veya hafif bir kırışma genellikle kabul edilebilir. Eklemeli üretimde ise bir milimetrenin onda biri ölçeğindeki sapma, iki parçanın birbirine geçmesini engelleyebilir. Bu nedenle 3D baskıda kalibrasyon, ölçü doğrulama ve tekrar edilebilirlik, geleneksel baskıya göre çok daha kritik konulardır.

5.2 Kullanılan Dosyalar ve Veri Yapısı

Geleneksel baskıda kullanılan dosyalar metin ve görüntü odaklıdır: PDF, DOCX, JPG, PNG gibi biçimler sayfa düzenini ve renk bilgisini taşır. Yazıcı sürücüsü bu veriyi raster hâle getirir ve kâğıt üzerinde nokta nokta basar. 3D baskıda ise dosya geometri taşır. STL, OBJ veya 3MF gibi biçimler nesnenin yüzeyini ve hacmini tanımlar. Dilimleyici bu geometriyi katmanlara ayırıp makine hareketlerine, yani G-code'a dönüştürür.

Bu fark hata türlerini de değiştirir. Bir PDF'de yazı tipi eksik olabilir, bir görselin çözünürlüğü düşük olabilir; bu hatalar gözle görülür ve genellikle zararsızdır. Bir STL dosyasındaki kapalı olmayan yüzey ise dilimleyici tarafından hata olarak algılanır; kapalı olmayan bir hacim, makinenin içini ve dışını ayırt edemediği anlamına gelir. Bu nedenle 3D baskıda dosya hazırlığı, geleneksel baskıya göre çok daha fazla teknik dikkat gerektirir.

Ayrıca 3D dosyaların telif ve fikri mülkiyet boyutu farklıdır. Bir metni kopyalamak görece belirgin bir eylemken bir fiziksel parçanın geometrisini paylaşmak ve çoğaltmak daha karmaşık hukuki tartışmaları beraberinde getirir. Tasarım dosyalarının korunması, lisanslanması ve taklit ürün sorunu bu teknolojinin yarattığı yeni hukuki alanlardandır.

5.3 Donanım Farkları

Geleneksel bir yazıcının temel bileşenleri kâğıt besleme mekanizması, mürekkep kartuşu veya toner ünitesi ve baskı kafasıdır. Hareket, kâğıdın ve kafanın ileri-geri hareketiyle sınırlıdır; ısıtma genellikle yalnızca toner sabitleme ünitesinde vardır. 3D yazıcıda ise en az üç hareket ekseni (X, Y, Z), adım motorları, ısıtıcı, sıcaklık sensörü, soğutma fanı ve tabla bulunur. Makinenin bir kısmı hareket ederken diğer kısmı sabittir; hangi kısmın hareket ettiği makine tasarımına göre değişir.

Bu donanım farkı bakım ihtiyacını da farklılaştırır. Geleneksel yazıcıda bakım esas olarak kartuş değişimi ve kâğıt sıkışması gidermedir. 3D yazıcıda ise nozul tıkanması, tabla seviyesi, kayış gerginliği, filament nemi ve yatak aşınması gibi düzenli kontrol gerektiren bileşenler vardır. Nozul zamanla aşınır ve değiştirilmesi gerekir. Filament nem çektiğinde baskı kalitesi bozulur; bu nedenle kuru saklama önerilir. Bu bakım yükü, 3D yazıcının bir "cihaz" değil, küçük bir üretim tezgâhı olduğunu gösterir.

Yazılım tarafında da fark belirgindir. Geleneksel baskıda sürücü, işletim sisteminin bir parçası olarak çalışır ve kullanıcıdan çok az ayar ister. 3D baskıda ise ayrı bir dilimleme yazılımı kullanılır; katman yüksekliği, doluluk, destek, sıcaklık ve hız gibi onlarca parametre kullanıcı tarafından belirlenir. Bu parametrelerin her biri sonucu doğrudan etkilediği için 3D baskıda yazılım bilgisi, donanım bilgisi kadar önemlidir.

5.4 Süre ve Maliyet

Geleneksel bir yazıcı bir sayfayı saniyeler içinde basar. 3D yazıcı ise küçük bir parçayı bile dakikalar, orta büyüklükte bir parçayı saatler içinde üretir. Süre parçanın hacmine, katman yüksekliğine, doluluk oranına ve makine hızına bağlıdır. Katman yüksekliğini yarıya indirmek yüzey kalitesini belirgin biçimde artırırken baskı süresini kabaca iki katına çıkarır. Bu, kullanıcının her baskıda kalite ile zaman arasında bir tercih yapması gerektiği anlamına gelir.

Maliyet hesabı da farklıdır. Geleneksel baskıda maliyet kâğıt ve mürekkep tüketimine göre sayfa başına hesaplanır. 3D baskıda ise malzeme maliyeti gram cinsinden hesaplanır. Dilimleyiciler baskının kaç gram malzeme kullanacağını ve yaklaşık süresini önceden gösterir. Tipik bir PLA makarası bir kilogram ağırlığındadır; buna göre bir parçanın malzeme maliyeti kullanılan gram ile kilogram fiyatının oranıdır. Elektrik tüketimi, makine amortismanı, nozul gibi sarf parçalar ve işçilik de toplam maliyete eklenmelidir.

Gizli maliyetler konusunda dikkatli olmak gerekir. Başarısız bir baskı, harcanan malzemeyi ve zamanı boşa çıkarır; ilk baskılarda bu oran yüksek olabilir. Destek yapılarının temizlenmesi, yüzey işlemleri ve boya gibi son işlemler de işçilik maliyeti doğurur. Bu nedenle 3D baskının birim maliyeti, yalnızca filament fiyatına bakılarak hesaplanamaz.

5.5 Eklemeli ve Çıkarımsal Üretim: CNC ile Karşılaştırma

3D baskının asıl rakibi geleneksel yazıcı değil, CNC makineleridir. CNC torna, freze ve benzeri makineler bir malzeme bloğundan talaş kaldırarak parça üretir. Bu yöntem eksilterek üretim olarak adlandırılır. Eklemeli üretim ise malzemeyi yalnızca gereken yerlere ekler. Sonuçta CNC'de bir miktar malzeme israf edilirken 3D baskıda israf esas olarak destek yapıları ve bozulan baskılarla sınırlıdır.

Buna karşılık CNC yüzey kalitesi, ölçü hassasiyeti ve malzeme çeşitliliği bakımından hâlâ üstündür. Büyük metal parçalar, yüksek tolerans gerektiren yüzeyler ve sert malzemeler CNC ile işlenir. 3D baskı ise karmaşık iç geometriler, hafif yapılar ve tek parça üretiminde avantajlıdır. Seri üretimde ise 3D baskının birim maliyeti kalıp yatırımı yapılmadığı için küçük partilerde avantajlı, büyük partilerde dezavantajlıdır. Bu nedenle eklemeli üretim seri

üretimin yerini almaktan çok onu tamamlayan bir araç olarak değerlendirilmelidir (Attaran, 2017).

İki yöntemin birlikte kullanıldığı hibrit yaklaşımlar da yaygındır. Metal bir parça 3D baskı ile yaklaşık ölçülerde üretilip kritik yüzeyleri CNC ile işlenebilir; bu, hem malzeme tasarrufu hem de hassasiyet sağlar. Benzer biçimde bir prototip 3D baskı ile doğrulanıp seri üretime enjeksiyon kalıbıyla geçilebilir. Bu geçiş mantığı, teknolojilerin birbirinin alternatifi değil, üretim zincirinin farklı halkaları olduğunu gösterir.

Aşağıdaki tablo üç üretim yaklaşımını temel ölçütler bakımından özetlemektedir.

ÖLÇÜT	GELENEKSEL YAZICI (2D)	3D YAZICI	CNC (EKSİLTEREK ÜRETİM)
Çıktı türü	Görüntü (yüzey)	Fiziksel nesne (hacim)	Fiziksel parça
Malzeme	Mürekkep, toner, kâğıt	Filament, reçine, toz, metal	Metal, ahşap, plastik blok
Veri biçimi	PDF, JPG, DOCX	STL, OBJ, 3MF, G-code	CAD, CAM, G-code
Süre	Saniyeler	Dakikalar–saatler	Dakikalar–saatler
Malzeme israfı	Az	Destek ve hatalı baskı kadar	Talaş kadar (yüksek)
Kalıp / aparat gereksinimi	Yok	Yok	Genellikle aparat gerekir
Kişiselleştirme	Metin düzeyinde	Çok yüksek	Program değişikliğiyle sınırlı
Seri üretimde birim maliyet	Çok düşük	Görece yüksek	Düşük
Tek parça üretimine uygunluk	—	Yüksek	Orta

5.6 Kavram Yanılgıları

3 boyutlu baskı hakkında yaygın birkaç yanlış inanış, konunun doğru anlaşılmasını güçleştirmektedir. Birincisi, “3D yazıcı her şeyi basar” düşüncesidir. Gerçekte her malzeme basılamaz; her geometri de destek gerektirmeden üretilemez. Bir parçanın basılabilirliği, makinenin hacmi, nozul çapı, katman kalınlığı ve malzemenin akış özellikleriyle sınırlıdır. Dolayısıyla tasarım aşamasında bu sınırların bilinmesi gerekir.

İkincisi, “3D baskı geleneksel üretimi bitirecek” beklentisidir. Bugünkü veriler bu beklentiyi desteklemez. Seri üretimde kalıp yatırımı bir kez yapıldığında birim maliyet çok düşer; eklemeli üretimde ise her parça tek tek üretildiği için bu düşüş yaşanmaz. Bu nedenle 3D baskının geleceği, seri üretimin yerini almak değil, onunla birlikte çalışmaktır (Attaran, 2017).

Üçüncüsü, “basılan parça her zaman zayıftır” yargısıdır. FDM parçaları katman yönünde zayıf olsa da doğru yön seçimi, uygun doluluk oranı ve duvar kalınlığıyla yeterli dayanım elde edilebilir. Endüstriyel toz ve metal sistemlerinde ise parçalar döküm parçalara yakın özellik gösterebilir. Bu nedenle “zayıf” ifadesi yönteme değil, yöntemin doğru kullanılıp kullanılmadığına bağlıdır.

Dördüncüsü, maliyet yanılgısıdır. Masaüstü bir yazıcının fiyatı erişilebilir görünse de toplam maliyet; malzeme, yedek parça, bakım, başarısız baskılar ve öğrenme süresini kapsar. Bu nedenle bir yazıcı satın almadan önce hangi iş için kullanılacağı netleştirilmelidir. Aksi hâlde cihaz, birkaç denemeden sonra rafta bekleyen bir eşyaya dönüşür.

6. Sektörel Kullanım Alanları

3 boyutlu baskının bugünkü değerini anlamanın en sağlıklı yolu, teknolojiyi sektörlerin gerçek problemleri üzerinden okumaktır. Aynı makine sağlıkta bir implantın üretiminde, otomotivde bir test parçasının doğrulanmasında, mimarlıkta bir maketin hazırlanmasında ve tarımda bir yedek parçanın yerine konmasında kullanılabilir. Teknoloji aynı, çözülen problem farklıdır. Bu bölümde dört sektör ayrı ayrı ele alınmış; her birinde hangi işlerin bugün rutin olarak yapıldığı, hangi işlerin ise hâlâ deneme aşamasında olduğu ayrıştırılmaya çalışılmıştır (Ngo vd., 2018).

Sektörleri değerlendirirken üç ölçüt kullanılabilir: parçanın kişiye özel olup olmadığı, üretim adedinin düşük olup olmadığı ve geometrinin karmaşıklığı. Bu üç koşuldan ikisi sağlandığında 3 boyutlu baskı neredeyse her zaman avantajlı hâle gelir. Buna karşılık parça standart, adet yüksek ve geometri basitse geleneksel üretim yöntemleri daha ekonomiktir. Aşağıdaki başlıklar bu ölçütler ışığında okunmalıdır.

6.1 Sağlık

Sağlık, 3 boyutlu baskının en erken ve en derin biçimde yerleştiği alanlardan biridir. Bunun temel nedeni, tıbbın doğası gereği kişiye özel olmasıdır. Her hastanın kafatası, kalça kemiği veya diş yapısı farklıdır. Geleneksel üretimde bu farklılık kalıp, ölçü ve el işçiliğiyle yönetilirken, eklemeli üretimde hasta görüntüsünden doğrudan sayısal model üretilip tek parça basılabilmektedir. Bu, hem süreyi kısaltır hem de ameliyat sırasında uyum sorunlarını azaltır (Murphy ve Atala, 2014).

Bugün hastanelerde en yaygın kullanım cerrahi planlama modelleridir. Bilgisayarlı tomografi görüntülerinden üretilen anatomik modeller, cerrahın ameliyat öncesinde kemik kırığını, tümörü veya damar yapısını elle tutarak incelemesini sağlar. Özellikle çene-yüz cerrahisinde ve ortopedide bu modeller ameliyat süresini ve deneme sayısını azaltır. Aynı görüntülerden üretilen kesme kılavuzları ise kemiğin hangi açıyla kesileceğini belirleyerek cerrahın işini mekanik olarak kolaylaştırır.

Kişiye özel implantlar bir sonraki adımdır. Titanyum alaşımlarıyla çalışan toz yataklı lazer sistemleri, kafatası plakları ve kalça bileşenleri gibi parçaların doğrudan üretilmesine imkân

verir. Bu implantların yüzeyi gözenekli olacak şekilde tasarlanabilir; gözenekli yüzey, kemik hücrelerinin implantın içine doğru büyümesini destekler ve zamanla daha sağlam bir bağlanma sağlar. Bu tür bir yüzey geometrisi geleneksel talaşlı imalatla elde edilemez.

Protez ve ortezlerde de benzer bir dönüşüm yaşanmaktadır. El, kol ve bacak protezlerinin gövde kısmı, hastanın güdük ölçülerine göre tarama yoluyla modellenip basılabilmektedir. Bu yaklaşım hem maliyeti düşürür hem de özellikle çocuk hastalarda hızlı büyüme nedeniyle sık değişim gerektiren durumlarda pratik bir çözüm sunar. Ortezlerde ise bilek ve ayak destekleri, hastanın anatomisine tam oturacak şekilde üretilebilir.

Diş hekimliği, sağlık alanındaki en olgun uygulamalardan biridir. Ağız içi tarayıcılarla alınan dijital ölçüler, reçine esaslı yazıcılarda model, geçici kron ve cerrahi kılavuz üretiminde kullanılır. Reçine yöntemlerinin katman kalınlığının 25–100 mikrometre aralığına inebilmesi, diş hekimliğinin gerektirdiği hassasiyete uygundur. Bu nedenle laboratuvarlarda alçı model ve el işçiliği giderek azalmaktadır.

Biyoyazıcılar ise sağlığın bir başka katmanında yer alır ve henüz klinik rutine girmemiştir. Hücre yüklü biyomürekkeplerle doku iskeleleri üretilmekte, laboratuvar ortamında deri, kıkırdak ve küçük damar yapıları üzerinde çalışılmaktadır. Bu konu sekizinci bölümde ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Burada vurgulanması gereken nokta, doku mühendisliğinin bugün araştırma aşamasında olduğu, implant ve model üretiminin ise günlük uygulamaya girdiğidir.

Sağlık alanındaki en önemli kısıt malzeme ve mevzuattır. Vücutla temas eden bir parçanın biyouyumlu olması, sterilize edilebilmesi ve ilgili standartlara (örneğin ISO 10993 biyolojik değerlendirme serisi) uygunluğunun belgelenmesi gerekir. Bu nedenle hastane atölyelerinde basılan modeller genellikle cerrahi planlama amaçlıdır; vücuda yerleştirilecek implantlar ise sertifikalı üretim süreçlerini gerektirir. 2020 yılındaki salgın döneminde yüz siperi çerçevesi ve solunum ekipmanı parçalarının yerel olarak basılması, teknolojinin kriz anlarındaki esnekliğini göstermiştir; ancak bu üretimler de tıbbi cihaz mevzuatının dışında, destek niteliğinde kalmıştır.

6.2 Otomotiv

Otomotiv sektörü, 3 boyutlu baskının ticari olarak ilk benimsendiği endüstrilerden biridir. Sektörün 3 boyutlu baskıyı sevmesinin nedeni, üretim öncesi süreçlerin uzun ve pahalı olmasıdır. Yeni bir modelin geliştirilmesinde yüzlerce prototip parça denenir; her deneme için kalıp yapılması hem maliyetli hem de yavaştır. Eklemeli üretim, kalıp aşamasını atlayarak birkaç gün içinde test edilebilir parça sağlar. Bu nedenle hızlı prototipleme, sektördeki en yerleşik kullanımdır (Bogue, 2013).

Prototip aşamasının ötesinde fonksiyonel test parçaları da basılmaktadır. Kablo kanalı, tutamak, kapak, ısı kalkanı gibi parçaların gerçek malzemeyle üretilip araç üzerinde test edilmesi, tasarım hatalarının erken yakalanmasını sağlar. Isıya dayanıklı mühendislik plastikleri ve karbon elyaf takviyeli filamentler, bu testlerde kullanılabilir hâle gelmiştir.

Üretim hattında ise 3 boyutlu baskının asıl katkısı aparat ve bağlama elemanlarıdır. Montaj hattında bir parçayı doğru açıyla tutan, ölçü kontrolü yapan veya işçinin erişimini kolaylaştıran aparatlar (jig ve fixture) sık sık değişir. Bu aparatların basılarak hattın yanında üretilmesi, tedarik bekleme süresini ortadan kaldırır. Otomotiv fabrikalarında bu tür aparatların sayısı binlerle ifade edilir ve her biri küçük, özel ve tekrar etmeyen bir parçadır.

Metal baskı, otomotivde ikinci ve daha ileri bir aşamadır. Toz yataklı lazer eritme yöntemiyle üretilen fren kaliperleri, egzoz parçaları ve motor bileşenleri, hem hafiflik hem de geometri serbestliği sağlar. Topoloji optimizasyonu ile tasarlanan bir parça, yalnızca yük taşıyan bölgelerde malzeme bırakacak şekilde şekillendirilir; böylece ağırlık azalırken dayanım korunur. Motorsporlarında bu yaklaşım yaygındır çünkü her kilogramın tur süresine etkisi vardır. Ancak seri üretimde metal baskının birim maliyeti hâlâ yüksektir; bu nedenle kullanım üst segment, düşük adetli ve performans odaklı parçalarla sınırlıdır.

Yedek parça tarafında ise özellikle klasik araçlar ve üretimi sona ermiş modeller öne çıkar. Yıllar önce üretimden kalkan bir parçanın kalıbı artık mevcut değildir; parçanın taranması ve basılması, stok bulunmayan durumlarda pratik bir çözüm sunar. Bu kullanım, stok tutma maliyetini azaltan bir dağıtık üretim modelinin ilk örnekleri olarak değerlendirilmektedir.

Otomotivdeki sınırlılıklar da açıktır. Seri üretimde dakikalar değil saniyeler önemlidir; bu nedenle yüksek adetli plastik parçalar enjeksiyonla üretilmeye devam edecektir. Ayrıca güvenlikle ilgili parçaların sertifikasyonu, malzeme özelliklerinin her partide tekrarlanabilirliğini gerektirir. Eklemeli üretimde bu tekrarlanabilirlik, toz veya filament kalitesine ve makine parametrelerine duyarlıdır. Bu nedenle sektörde 3 boyutlu baskı, çoğunlukla üretim öncesi ve üretim destek süreçlerinde konumlanmaktadır.

6.3 Mimarlık ve İnşaat

Mimarlıkta 3 boyutlu baskının ilk ve en yaygın kullanımı maket üretimidir. Geleneksel maket, karton ve ahşapla el işçiliği gerektirir; bir tasarımın birkaç alternatifini aynı hafta içinde görmek zordur. Sayısal modelin doğrudan basılması, tasarımcının ölçekli bir fiziksel nesneyi hızla incelemesini sağlar. Bu, özellikle kütle ve cephe çalışmalarında tasarım kararlarını hızlandırır.

İnşaat ölçeğinde ise beton ekstrüzyonu öne çıkar. Bu yöntemde pompa ile taşınan beton, hareketli bir kafa ya da robot kol tarafından katmanlar hâlinde yatay olarak dökülür. Kalıp kullanılmadığı için duvar geometrisi serbestleşir; eğrisel duvarlar, boşluklu yüzeyler ve iç boşluklu yapılar tek geçişte üretilebilir. Kalıp atığının ortadan kalkması, inşaatın en büyük atık kalemlerinden birini azaltır (Tay vd., 2017).

Mimarlıkta bir başka kullanım kalıp üretimidir. Karmaşık geometrili bir beton veya kompozit parçanın kalıbı, 3 boyutlu basılarak hazırlanabilir. Restorasyon alanında ise tarihî bir süslemenin rölyefi taranıp kopyası basılabilir; bu kopya hem sergileme hem de kalıp çıkarma amacıyla kullanılır. Bu uygulama, orijinal esere dokunmadan çoğaltma yapılmasına imkân verdiği için koruma açısından değerlidir.

Mimarlıktaki en önemli kısıt yapısal güvenliktir. Beton baskıda donatı yerleştirmek henüz standart bir çözüme kavuşmamıştır; katmanlar arası yapışma, yatay yükler altındaki davranışı belirsizleştirir. Türkiye gibi deprem riski yüksek bir ülkede bu konu, estetik tartışmalardan önce gelir. Ayrıca yüzey kalitesi, ölçü toleransı ve yönetmeliklere uygunluk konularında yerleşik standartlar sınırlıdır. Bu nedenle mimarlıkta 3 boyutlu baskı, bugün ağırlıklı olarak tasarım ve temsil aracı olarak, inşaatta ise deneysel projeler düzeyinde değerlendirilmelidir.

6.4 Tarım

Tarım, 3 boyutlu baskının en az konuşulan ama pratikte en hızlı yayılabileceği sektörlerden biridir. Kırsalda bir makinenin küçük bir parçası kırıldığında tedarik süresi günler, bazen haftalar alır. Bu süre, hasat döneminde doğrudan ürün kaybı anlamına gelir. Küçük bir masaüstü yazıcı ve temel bir CAD bilgisi, bu tür basit parçaların yerinde üretilmesine imkân verir.

En yaygın kullanım yedek parça ve bağlantı elemanlarıdır: sulama hattı bağlantı parçaları, sensör yuvası, kablo klipsi, traktör kabini içi tutamak, sera bağlantı kelepçesi. Bu parçaların çoğu yüksek dayanım gerektirmez; ancak hızlı temin edilmesi gerekir. Bu nedenle eklemeli üretimin "hız" avantajı, tarımda "dayanım" avantajından daha belirleyicidir.

Akıllı tarım uygulamalarında ise elektronik muhafazaları öne çıkar. Toprak nemi, sıcaklık ve yaprak ıslaklığı ölçen sensörlerin su geçirmez kutuları, sahadaki koşullara göre basılabilir. İnsansız hava araçlarının pervaneden kamera yuvasına kadar birçok parçası da prototip aşamasında 3 boyutlu basılmaktadır. Bu, küçük işletmelerin pahalı ekipman yatırımı yapmadan deneme yapmasını kolaylaştırır.

Hayvancılıkta da sınırlı ama dikkat çekici uygulamalar vardır. Yürüme güçlüğü çeken hayvanlar için basılan hafif ortezler, nal koruyucular ve yara koruma aparatları bunlara örnektir. Gıda alanında ise 3 boyutlu gıda baskısı hâlâ deneysel düzeydedir; püre kıvamındaki malzemelerin katmanlar hâlinde şekillendirilmesiyle kişiselleştirilmiş porsiyonlar ve dekoratif ürünler denenmektedir. Tohum ve fide kabı üretimi de araştırma projelerinde görülmektedir.

Tarımdaki sınırlılıklar malzeme ve çevre koşullarıyla ilgilidir. PLA, güneş altında ve dış ortamda zamanla bozunur; bu nedenle açık alanda kullanılacak parçalarda ASA veya PETG gibi UV dayanımı daha yüksek malzemeler tercih edilir. Sürekli yük altında çalışan parçalarda katmanlar arası yapışma zayıf nokta olabilir. Bu nedenle basılan parçalar, kritik yük taşıyan yerlerde değil, yardımcı ve tamamlayıcı işlevlerde kullanılmalıdır.

6.5 Sektörler Arası Ortak Örüntü

Dört sektör yan yana okunduğunda ortak bir örüntü ortaya çıkar. 3 boyutlu baskının değer ürettiği yerler, parçanın kişiye özel olduğu, adedin düşük olduğu ve geometrinin karmaşık olduğu durumlardır. Bu üç koşuldan ikisi sağlandığında teknoloji kendini hızla haklı çıkarır: bir hastanın kafatası modeli hem kişiye özeldir hem tektir; bir montaj aparatı hem

karmaşıktır hem birkaç adet üretilir. Buna karşılık standart, yüksek adetli ve basit geometrili parçalarda geleneksel yöntemler hâlâ daha ekonomiktir.

İkinci ortak nokta, 3 boyutlu baskının çoğu zaman nihai ürünü değil, nihai ürünün yolundaki bir aracı üretmesidir. Diş hekimliğinde basılan model, otomotivde basılan aparat, mimarlıkta basılan maket, tarımda basılan sensör yuvası — hepsi bir süreci kolaylaştıran yardımcı unsurlardır. Bu, teknolojinin değerini azaltmaz; tersine, üretim zincirinin görünmeyen halkalarında büyük zaman tasarrufu sağladığını gösterir.

Üçüncü ortak nokta bilgi ve eğitim ihtiyacıdır. Her sektörde aynı soru ortaya çıkmaktadır: parçayı kim tasarlayacak, hangi malzemeyle basılacak ve basılan parçanın yeterliliği nasıl doğrulanacak? Bu nedenle 3 boyutlu baskının yaygınlaşması, makine satın almaktan çok daha fazlasını, yani tasarım okuryazarlığını ve malzeme bilgisini gerektirir. Sektörlerdeki yavaşlama çoğu zaman teknolojiden değil, bu bilgi boşluğundan kaynaklanmaktadır.

7. Gelecek: 3D Yazıcılarla Ev Üretimi

3 boyutlu baskının en görünür vaatlerinden biri binaların basılmasıdır. Bu fikir ilk bakışta abartılı görünse de arkasında anlaşılır bir mantık vardır: bir duvar, aslında üst üste yerleştirilmiş yatay malzeme katmanlarından oluşur. Beton, uygun kıvamda pompa ile taşınabilir ve bir kafa tarafından katman hâlinde dökülebilir. Yani inşaat, eklemeli üretimin mantığına sanıldığından çok daha yakındır. Fark, katmanların mikron değil santimetre ölçeğinde olmasıdır (Tay vd., 2017).

Bu alanda kullanılan terim beton ekstrüzyonu ya da kontur zanaatı (contour crafting) olarak anılır. Sistemin temel bileşenleri bir beton pompası, bir hortum hattı, hareketli bir kafa ve bir kontrol yazılımıdır. Kafa, sayısal modelden üretilen yol boyunca ilerlerken betonu yatay şeritler hâlinde bırakır. Bir katman tamamlandığında kafa bir üst seviyeye çıkar ve işlem tekrarlanır. Bu nedenle yöntemin başarısı, büyük ölçüde betonun taze hâldeki davranışına bağlıdır.

Büyük ölçekli beton yazıcılar iki temel mimaride kurulur. Gantry tipi sistemlerde yazıcı, yapının üzerine kurulan bir köprü üzerinde hareket eder; bu yaklaşım büyük ve düzgün taban alanlarında verimlidir, ancak kurulum ağır ve zahmetlidir. Robot kol tipi sistemlerde ise kol sabit bir noktadan uzanarak çalışır; daha esnek ve taşınabilir ama daha küçük bir çalışma hacmi sunar. Her iki durumda da betonun pompa hattında prizini kaybetmemesi, katmanların birbirine yeterince bağlanması ve üst üste gelen katmanların kendi ağırlığını taşıması gerekir. Bu, malzeme reolojisi ile makine hareketinin birlikte çözülmesini gerektiren bir mühendislik problemidir.

Literatürde adı geçen öncü projeler konuyu somutlaştırır. Çin'de WinSun firması 2014 yılında, geri dönüştürülmüş malzeme karışımıyla üretilen ve bir gün içinde tamamlandığı belirtilen prototip evlerle gündeme gelmiştir. Rusya'da Apis Cor, 2017'de Moskova yakınlarında yaklaşık 38 metrekarelik bir evi yerinde basarak tamamlamıştır. ABD'de ICON firması 2018'de

Austin'de ilk evini basmış, sonraki yıllarda sosyal konut ve afet konutu projelerine yönelmiştir. Hollanda'da Eindhoven kentinde beton baskı ile konut üretimi üzerine yürütülen proje ise tasarım özgürlüğünü öne çıkaran örnekler arasındadır. Bu projelerin ortak özelliği, çoğunlukla tek katlı, standart planlı ve deneysel nitelikli yapılar olmalarıdır.

Avantajlar gerçektir ve sayılabilir. Kalıp kullanılmadığı için kalıp ahşabı ve atığı ortadan kalkar; duvar geometrisi serbestleşir, eğrisel ve boşluklu yüzeyler tek geçişte üretilebilir; işçilik ihtiyacı azalır ve şantiye süresi kısalır. Afet sonrası hızlı barınma ihtiyacında bu hız hayati olabilir. Ayrıca duvar içine boşluk bırakılarak yalıtım veya tesisat kanalı oluşturulabilir; bu, geleneksel duvarda sonradan yapılan kırma ve tamir işlemlerini azaltır. Malzeme tarafında ise atık beton ve geri dönüştürülmüş agrega kullanımına açık olması, çevresel açıdan ayrı bir katkı sunar.

Sınırlılıklar ise avantajlardan daha ağırdır. Birincisi donatıdır: betonarme davranışını sağlayan çelik donatının katmanlar arasına yerleştirilmesi henüz standartlaşmamıştır; donatı sonradan yerleştirildiğinde iki malzeme arasındaki aderans tartışmalıdır. İkincisi katmanlar arası yapışma ve sismik davranıştır; yatay yükler altında katman arayüzlerinin nasıl davrandığı hâlâ araştırma konusudur ve Türkiye'de yapı güvenliği tartışması deprem üzerinden yürüdüğü için bu konu belirleyicidir. Üçüncüsü mevzuattır: ruhsat, denetim ve standartlara uygunluk süreçleri bu teknolojiyi henüz tanımamaktadır. Dördüncüsü yüzey kalitesidir; görünen beton yüzeyde katman izleri kabul edilebilir olmalı, gerekirse kaplama ile gizlenmelidir. Beşincisi ölçek ekonomisidir: makine kurulumu ve malzeme tedariki, tek bir ev için henüz geleneksel yöntemden pahalı olabilir.

Bu tabloya bakarak gerçekçi bir değerlendirme yapılabilir. Yakın vadede 3 boyutlu baskı ile ev üretimi; tek veya iki katlı, standart planlı, sosyal konut ve afet konutu niteliğindeki yapılarda anlamlıdır. Yüksek katlı, karmaşık taşıyıcı sistemli ve yoğun kentsel yapılarda ise bugünkü hâliyle uygulanabilir değildir. Teknolojinin geleceği, donatı entegrasyonu ve standardizasyon alanındaki çözümlere bağlıdır. Bu nedenle ev basımını bir reklam vaadi olarak değil, malzeme bilimi ve yapı mühendisliğinin kesiştiği bir araştırma alanı olarak görmek daha doğrudur.

7.7 Ev Basımının Ekonomisi

Bir yapının basılması, makinenin kurulumundan başlayan bir süreçtir. Gantry tipi bir sistemin kurulumu günler alabilir; bu nedenle yöntem, aynı şantiyede birden fazla yapı üretileceğinde anlamlıdır. Tek bir ev için kurulum maliyeti, toplam maliyetin önemli bir bölümünü oluşturur. Bu, teknolojinin henüz küçük ölçekli tek konutlarda ekonomik olmadığını, daha çok toplu konut ve afet konutu projelerinde anlam kazandığını gösterir.

Malzeme tarafında ise beton karışımının maliyeti belirleyicidir. Basılabilir beton, normal yapı betonundan farklı bir reoloji gerektirir; akıcılığı korurken katmanların çökmemesi gerekir. Bu dengeyi sağlamak için katkı malzemeleri ve lif takviyesi kullanılır; bunlar birim maliyeti artırır. Buna karşılık kalıp, iskele ve yoğun işçilik giderlerinin azalması toplam maliyeti düşürür. Hangi tarafın ağır basacağı, projenin ölçeğine ve yerel işçilik maliyetlerine bağlıdır.

İşçilik açısından da bir yeniden dağılım söz konusudur. Geleneksel inşaatta duvar örme, sıva ve kalıp işleri yoğun emek gerektirir. Basım yönteminde bu işler azalırken makine operatörlüğü, malzeme hazırlama ve kalite kontrolü gibi yeni görevler ortaya çıkar. Bu, inşaat işgücünün niteliğini değiştiren bir dönüşümdür ve mesleki eğitim açısından dikkate alınması gerekir.

8. Gelecek: 3D Yazıcılarla Organ Üretimi

Organ üretimi, 3 boyutlu baskının en iddialı ve en çok yanlış anlaşılan vaadidir. Konuya doğru yaklaşmak için iki kavramı ayırmak gerekir: doku ve organ. Doku, belirli bir işlevi yerine getiren hücre topluluğudur; deri, kıkırdak ve damar bu kapsamdadır. Organ ise birden çok dokunun, damar ağı ve sinir bağlantılarıyla birlikte çalıştığı karmaşık bir yapıdır. Bugün 3 boyutlu baskı birinci grupta yol almış, ikinci grupta ise henüz başlangıç aşamasındadır (Murphy ve Atala, 2014).

Biyoyazıcı, canlı hücrelerle karıştırılmış bir malzemeyi (biyomürekkep) kontrollü biçimde katmanlar hâlinde biriktiren cihazdır. Biyomürekkep genellikle hidrojel adı verilen su tutan bir taşıyıcı ile hücrelerden oluşur. Taşıyıcı, hücrelerin yaşaması ve çoğalması için uygun bir ortam sağlar; sonraki aşamada kısmen uzaklaştırılabilir veya yapı içinde kalabilir. Üç temel yaklaşım vardır: damlacık esaslı (inkjet benzeri), ekstrüzyon esaslı (FDM'e benzer) ve lazer destekli (hücreleri ışıkla yönlendirme). Her birinin hücre canlılığı, çözünürlük ve hız arasında farklı dengeleri vardır; damlacık yöntemi yüksek çözünürlük verirken hücre kaybı fazla, ekstrüzyon yöntemi daha yoğun hücre yüklemesine izin verirken çözünürlüğü sınırlıdır.

Doku iskelesi (scaffold) kavramı bu alanın merkezindedir. Hücreler tek başına basıldığında üç boyutlu bir şekli koruyamaz; bu nedenle önce gözenekli bir iskele üretilir, hücreler bu iskeleye ekilir ve zamanla iskele içinde çoğalır. İskelenin gözenek boyutu, hücrelerin içeri göç etmesine ve besin taşınmasına izin verecek şekilde tasarlanmalıdır. İdeal durumda iskele zamanla vücutta çözünür ve yerini hastanın kendi dokusuna bırakır. Bu nedenle biyobozunur polimerler ve hidrojeller yaygın olarak kullanılır.

Literatürdeki en bilinen örnekler konunun nerede durduğunu gösterir. 2006 yılında Wake Forest Üniversitesi'nde yürütülen çalışmada, hastanın kendi hücreleriyle basılan mesane dokusu yedi hastaya nakledilmiş ve uzun vadeli sonuçlar bildirilmiştir. 2019'da Tel Aviv Üniversitesi'nde araştırmacılar, hastanın kendi hücreleri ve biyomürekkepten küçük bir kalp basmışlardır; ancak bu yapı birkaç santimetre boyutunda ve pompalama işlevi olmayan bir modeldi, damar ağı da bulunmuyordu. Kıkırdak, deri ve kulak gibi daha ince yapılar üzerinde çalışmalar sürmektedir. Ayrıca ilaç testlerinde kullanılan organ çipleri, bu teknolojinin bir başka pratik çıktısıdır.

Bugün gerçek olan şudur: hastaya ait görüntülerden implant ve kılavuz üretimi, laboratuvar ortamında doku iskelesi üretimi, ilaç araştırmalarında kullanılan doku modelleri ve cerrahi

planlama. Henüz olmayan ise tam fonksiyonel bir organın nakli için üretilmesidir. Bu ayrımı yapmadan konuşmak, beklentiyi gerçekdışı bir yere taşır ve teknolojinin bugünkü gerçek değerini gölgeler.

Aşılması gereken sorunların başında damarlanma gelir. Bir doku 100–200 mikrometreden kalın olduğunda, besin ve oksijenin difüzyonla taşınması yetersiz kalır; iç kısımdaki hücreler ölür. Bu nedenle böbrek veya karaciğer gibi yoğun damar ağına sahip organlarda, hücrelerle birlikte damar yatağının da basılması gerekir. Damar ağının mikron ölçeğinde üretilmesi, bugünkü biyoyazıcıların çözünürlük sınırlarını zorlamaktadır. İkinci sorun olgunlaşmadır: basılan yapının laboratuvarda bir biyoreaktörde günlerce, haftalarca işlev kazanması gerekir. Üçüncü sorun bağışıklık ve güvenliktir; nakledilen dokunun reddedilmemesi ve uzun vadede tümörleşmemesi gerekmektedir. Dördüncü sorun ise etik ve mevzuattır: canlı hücrelerle üretilen yapıların düzenlenmesi, rıza süreçleri ve maliyet tartışmaları henüz başlangıç aşamasındadır.

Temkinli bir zaman öngörüsü yapılabilir. Kıkırdak, deri ve mesane gibi ince ve damar ağı gerektirmeyen dokularda klinik kullanım önümüzdeki beş-on yıl içinde yaygınlaşabilir. Basit içi boşluklu organlarda on-yirmi yıllık bir ufuk gerçekçidir. Kalp, böbrek ve karaciğer gibi yoğun damarlı organlarda ise süre belirsizdir; çünkü sorun yalnızca baskı teknolojisi değil, biyolojik olgunlaşma problemidir. Bu nedenle organ basımını bir mühendislik projesi olarak değil, tıp, biyoloji, malzeme ve mühendisliğin ortak çalışmasını gerektiren uzun soluklu bir araştırma alanı olarak görmek daha doğrudur.

8.9 Organ Basımının Düzenleyici Boyutu

Biyoyazıcı ile üretilen bir yapının hastaya uygulanması, yalnızca teknik bir başarı değil, aynı zamanda hukuki bir süreçtir. Klinik araştırmalar, etik kurul onayları, hasta rızası ve uzun vadeli takip gereklilikleri devreye girer. Bugün birçok ülkede bu alan, tıbbi cihaz ve doku nakli mevzuatının kesişiminde yer alır ve kesin sınıflandırma konusunda tartışmalar sürmektedir.

Maliyet ve erişilebilirlik de ayrı bir sorudur. Hastanın kendi hücrelerinden üretilen bir doku, bağışıklık baskılamasını azaltabilir; ancak hücre üretimi, biyoreaktör bakımı ve uzman işgücü maliyeti yüksektir. Bu nedenle ilk klinik uygulamaların, yaygın hastalıklardan çok seçili ve yüksek maliyetli tedavilerde görülmesi beklenebilir. Zamanla maliyetlerin düşmesi, teknolojinin yaygınlaşmasıyla ilgili en belirleyici değişken olacaktır.

Etik açıdan ise üç soru öne çıkmaktadır: laboratuvarda üretilen doku kimin malıdır, hasta hücrelerinin kullanımı nasıl denetlenecektir ve erişim eşitsizliği nasıl önlenecektir? Bu sorular teknolojik ilerlemeden bağımsız değildir; çünkü düzenleme biçimi, araştırmanın yönünü ve hızını belirler. Bu nedenle organ basımı tartışması, mühendislik ve tıbbın yanında hukuk ve etiğin de masada olduğu bir alandır.

9. Sınırlılıklar, Maliyet ve Çevre

3 boyutlu baskı her sorunu çözen bir teknoloji değildir. En temel sınırlılık hızdır: FDM yönteminde bir parçanın basılması saatler sürebilir ve bu süre parça hacmiyle doğru orantılı artar. Seri üretimde bu süre rekabet edilemez. İkinci sınırlılık malzeme çeşididir; enjeksiyon kalıplamada kullanılan binlerce mühendislik plastiğinin yalnızca bir kısmı baskıya uygundur. Üçüncü sınırlılık tekrarlanabilirliktir: aynı dosya, aynı makine ve aynı malzemeyle bile ortam sıcaklığına ve nemine bağlı olarak farklı sonuç verebilir.

9.1 Teknik Sınırlılıklar

Hız sınırı, eklemeli üretimin en görünür kısıtıdır. FDM yönteminde baskı süresi parçanın hacmiyle doğru orantılı artar; büyük bir parça tek başına bir günü doldurabilir. Bu nedenle 3D baskı, teslim süresi saniyelerle ölçülen seri üretim ortamlarına uygun değildir. Reçine ve toz yataklı sistemlerde katman tüm yüzeye aynı anda uygulandığı için hız görece yüksektir, ancak bu sistemlerin kurulum ve temizlik süreleri toplam süreyi yine uzatır.

Ölçü hassasiyeti ve tekrarlanabilirlik ikinci kısıttır. Aynı dosya, aynı makine ve aynı malzemeyle bile ortam sıcaklığına, neme ve nozul aşınmasına bağlı olarak farklı sonuç verebilir. Bu sapma, montaj ilişkisi olan parçalarda sorun yaratır. Bu nedenle kritik parçalarda ya tolerans payı bırakılır ya da baskı sonrası işleme yapılır.

Yüzey kalitesi ve anizotropi üçüncü kısıttır. FDM'de katman izleri görünür kalır ve katmanlar arası yapışma, katman içi dayanımdan düşüktür. Parçanın yük altında hangi yönde zorlanacağı bilinmeden baskı yönü seçilirse parça beklenenden erken kopabilir. Bu, tasarımın makine parametreleriyle birlikte düşünülmesini gerektirir (Gibson ve ark., 2015).

Ölçek sınırı ise dördüncü kısıttır. Masaüstü makinelerin baskı hacmi genellikle birkaç on santimetreyle sınırlıdır; daha büyük parçalar bölünerek basılır ve birleştirilir. Birleştirme, hem ek yerlerinde zayıflık hem de işçilik anlamına gelir. Bu nedenle büyük parçalarda eklemeli üretim, çoğu zaman geleneksel yöntemlerle rekabet edemez.

9.2 Malzeme ve Sertifikasyon

Malzeme çeşitliliği, enjeksiyon kalıplamada kullanılan binlerce mühendislik plastiğine kıyasla hâlâ dardır. Basılabilir malzemelerin bir kısmı ise nem, UV ve sıcaklığa karşı duyarlıdır. Örneğin PLA, 60 °C civarında yumuşamaya başlar; bu nedenle sıcak ortamda çalışacak parçalarda uygun değildir. Malzeme seçimi, parçanın kullanım koşullarıyla birlikte değerlendirilmelidir.

Sertifikasyon, endüstriyel kullanımın önündeki en büyük engeldir. Bir parçanın uçakta veya tıbbi cihazda kullanılabilmesi için malzeme özelliklerinin, üretim sürecinin ve denetim yöntemlerinin belgelenmesi gerekir. Eklemeli üretimde her baskı yönü ve her katman kalınlığı malzeme davranışını değiştirdiği için bu belgeleme, geleneksel yöntemlerden daha karmaşıktır. Bu nedenle havacılık gibi alanlarda sertifikasyon süreçleri yıllar alabilmektedir (Wohlers, 2023).

Fikri mülkiyet konusu da bu başlık altında değerlendirilebilir. Sayısal dosyaların kolayca çoğaltılabilmesi, taklit ürün ve telif ihlali riskini artırır. Aynı kolaylık, silah ve kısıtlı parça üretimi gibi sorunlu kullanımlara da kapı açar. Bu nedenle birçok ülkede dosya paylaşımı ve baskı hizmeti sunan platformlar için düzenlemeler geliştirilmektedir. Kullanıcı açısından bu, indirilen bir dosyanın lisansını okumanın artık bir formalite olmadığı anlamına gelir.

9.3 Çevresel Etki

Çevresel boyut iki yönlüdür. Olumlu tarafı, kalıpsız üretim ve yerinde üretim sayesinde lojistik kaynaklı emisyonların azalması, malzeme israfının düşmesi ve yedek parçanın uzak ülkelerden getirilmesi yerine yerelde basılabilmesidir. Bir parçanın stokta bekletilmesi yerine ihtiyaç anında üretilmesi, depo ve nakliye kaynaklı kayıpları da azaltır.

Olumsuz tarafı, yaygın kullanılan filamentlerin büyük kısmının geri dönüştürülebilirliğinin sınırlı olmasıdır. PLA bitkisel kaynaklı olduğu için çevre dostu sanılır; ancak doğada kısa sürede çözünmez, endüstriyel kompost koşulları gerektirir. Bu koşullar Türkiye'de yaygın olmadığı için PLA atığı pratikte evsel atık hâline gelmektedir. ABS ise hem geri dönüşümü sınırlı hem de baskı sırasında uçucu bileşikler salgılar.

Reçine sistemlerinde ise kullanılmış reçine, yıkama sıvısı ve artık kürlenmiş parçalar kimyasal atık niteliğindedir ve usulünce bertaraf edilmelidir. Enerji tüketimi de küçümsenmemelidir: ısıtılmış tabla ve nozul saatlerce çalışır, metal sistemlerinde ise lazer güçleri yüksektir. Bu nedenle bir parçanın çevresel hesabı yapılırken yalnızca malzeme değil, enerji ve atık bertarafı da hesaba katılmalıdır.

Olumlu gelişmeler de vardır. Filament kırıntılarının yeniden ekstrüde edilerek kullanıldığı geri dönüşüm atölyeleri, atık tozun yeniden kullanıldığı endüstriyel sistemler ve daha düşük sıcaklıkta çalışan malzemeler bu alandaki çabalar arasındadır. Ancak bugün için en etkili çevresel strateji, başarısız baskıyı azaltmak ve doğru malzemeyi doğru işte kullanmaktır.

Bu sınırlılıklar, teknolojinin nerede kullanılacağı sorusunu daha da önemli kılar. Doğru kullanım, eklemeli üretimin güçlü olduğu alanlarda —kişiselleştirme, karmaşık geometri, düşük adet, hızlı prototip— yoğunlaşmak; zayıf olduğu alanlarda ise geleneksel yöntemlere bırakmaktır. Bu denge, hem ekonomik hem çevresel açıdan en akılcı yaklaşımdır.

10. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada 3 boyutlu baskı teknolojisi; tarihsel gelişimi, çalışma ilkeleri, yöntem çeşitleri, sektörel kullanımı ve gelecek senaryoları bakımından ele alınmıştır. Ulaşılan ilk sonuç, teknolojinin artık bir merak nesnesi olmadığıdır. 1980'lerde yalnızca büyük firmaların erişebildiği stereolitografi makineleriyle başlayan süreç, açık kaynak hareketi ve patentlerin sona ermesiyle masaüstüne inmiş; bugün bir üniversite öğrencisinin erişebileceği maliyete kadar gerilemiştir. Bu yaygınlaşma, teknolojinin ne olduğunu değil, kimin kullanabildiğini değiştirmiştir.

İkinci sonuç, 3 boyutlu baskının geleneksel yazıcıların üç boyutlu versiyonu olmadığıdır. İki boyutlu baskı bir görüntüyü yüzeye aktarırken, eklemeli üretim bir nesneyi hacimsel olarak inşa eder. Bu nedenle asıl karşılaştırma 2D yazıcılarla değil, CNC ve enjeksiyon gibi geleneksel üretim yöntemleriyle yapılmalıdır. Bu karşılaştırmada eklemeli üretim; kalıpsız üretim, geometri serbestliği ve kişiselleştirme alanlarında üstün, hız, yüzey kalitesi ve birim maliyet açısından ise seri üretimde geridedir.

Sektörler bazında bugün gerçek olan kullanımlar ile gelecek vaadi birbirinden ayrılmalıdır. Sağlıkta cerrahi modeller, kılavuzlar ve kişiye özel implantlar; otomotivde prototipler, aparatlar ve sınırlı sayıda metal performans parçası; mimarlıkta maketler ve kalıplar; tarımda ise yedek parça ve muhafazalar bugün fiilen kullanılmaktadır. Buna karşılık tamamen basılmış bir evin yaygınlaşması yapısal ve hukuki çözümlere, tam fonksiyonel bir organın üretilmesi ise biyolojik sorunların çözülmesine bağlıdır. Bu iki başlık, teknolojinin en görünür ama en az olgunlaşmış vaatleridir.

Genel bir değerlendirme olarak 3 boyutlu baskının seri üretimin yerini almayacağı, onu tamamlayan bir araç olarak konumlanacağı söylenebilir. Teknolojinin gelecekteki yönünü üç eğilim belirleyecektir: malzeme çeşitliliğinin artması, baskı hızının yükselmesi ve otomasyonun (baskı sonrası işlemlerin makineleşmesi) gelişmesi. Bu üç alanda ilerleme sağlandıkça eklemeli üretim, prototip ve tek parça üretim alanından çıkarak daha geniş bir üretim payına sahip olacaktır.

Bu çalışmanın sınırlılıkları da belirtilmelidir. Rapor yalnızca yazılı kaynaklara dayanmaktadır; kapsam içinde deneysel bir baskı çalışması yapılmamış, maliyet ve dayanım ölçümleri alınmamıştır. Ayrıca sektörel örneklerin bir kısmı firma duyurularına dayandığı için sayısal veriler sınırlı tutulmuş, doğrulanamayan iddialar ayrıca belirtilmiştir. İleride yapılacak bir çalışmada aynı parçanın farklı yöntemlerle basılıp dayanım ve maliyet açısından karşılaştırılması, konuyu daha somut bir zemine taşıyabilir.

Öğrenci açısından bu çalışmanın en öğretici yanı, bir teknolojinin "ne yapabildiği" ile "ne için ekonomik olduğu" arasındaki farkı görmek olmuştur. 3 boyutlu baskı, tasarımı demokratikleştiren, üretimi yerelleştiren ve öğrenmeyi kolaylaştıran bir araçtır. Ancak her yeni teknolojide olduğu gibi, sınırlarını bilmek onu doğru kullanmanın ilk koşuludur. Bu nedenle eklemeli üretim eğitiminin mühendislik, sağlık, mimarlık ve ziraat gibi farklı disiplinlerde temel düzeyde verilmesi, geleceğin üretim kültürü açısından anlamlı olacaktır.

Kaynakça

Atama ve kaynakça düzeni APA (7. baskı) biçimine göre yapılmıştır. Metin içinde (Yazar, yıl) biçiminde verilen atıflar aşağıdaki kaynaklara karşılık gelir.

aran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons, 60*(5), 677–688.

ɣue, R. (2013). 3D printing: The dawn of a new era in manufacturing? *Assembly Automation, 33*(4), 307–311.

ɔson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (2. baskı). Springer.

ll, C. W. (1986). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography* (ABD Patenti No. 4.575.330). U.S. Patent and Trademark Office.

)/ASTM. (2015). *ISO/ASTM 52900:2015 — Additive manufacturing: General principles — Terminology*. International Organization for Standardization.

rphy, S. V., & Atala, A. (2014). 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology, 32*(8), 773–785.

ɔ, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering, 143*, 172–196.

ɾ, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: A review. *Virtual and Physical Prototyping, 12*(3), 261–276.

hlers, T. (2023). *Wohlers report 2023: 3D printing and additive manufacturing global state of the industry*. Wohlers Associates.

ng, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering, 2012*, 1–10.

Ek: Kısaltmalar ve Tablo Listesi

Kısaltmalar

KISALTMA	AÇIKLAMASI
3D	Üç boyutlu (three-dimensional)
CAD	Bilgisayar destekli tasarım (computer-aided design)
CAM	Bilgisayar destekli üretim (computer-aided manufacturing)
CNC	Bilgisayar sayısal denetimli tezgâh (computer numerical control)
FDM	Erimiş filament ile biriktirme (fused deposition modeling)
SLA	Stereolitografi
DLP	Dijital ışık işleme (digital light processing)

SLS	Seçici lazer sinterleme (selective laser sintering)
SLM / DMLS	Seçici lazer eritme / doğrudan metal lazer sinterleme
STL	Üçgen yüzey ağı biçiminde 3D dosya formatı
PLA	Poliaktik asit
PETG	Polietilen tereftalat glikol katkılı
TPU	Termoplastik poliüretan
UV	Morötesi (ultraviyole)

Tablo Listesi

Tablo 1. Başlıca 3D baskı teknolojilerinin karşılaştırılması (Bölüm 4.5).

Tablo 2. Geleneksel yazıcı, 3D yazıcı ve CNC karşılaştırması (Bölüm 5.5).

Tablo 3. Raporda kullanılan kısaltmalar ve açıklamaları (Ek).