

## Ekstrüzyon Tabanlı Metal Eklemeli İmalat (EBAM): Teknoloji, Avantajlar ve Kısıtlar

Mert Efe Ceylan<sup>1,\*</sup>, İsmail Şahin<sup>2</sup>, Neslihan Top<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği ABD, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 06.11.2024

Kabul: 11.12.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Eklemeli imalat,

Metal eklemeli imalat

3B baskı

Malzeme ekstrüzyonu

### ÖZET

Bu makale, Ekstrüzyon Tabanlı Metal Eklemeli İmalat (Extrusion-Based Metal Additive Manufacturing - EBAM) yöntemini ayrıntılı bir şekilde ele almaktadır. EBAM, metal bileşenlerin katman katman birleştirilmesi yoluyla üretilmesini sağlayan ve polimer-metal karışımı filamentler kullanan yenilikçi bir 3B baskı teknolojisidir. Makalede, EBAM'ın temel çalışma prensipleri, malzeme birleştirme mekanizmaları ve tam yoğunluklu metal parçaların elde edilmesi için gerekli sinterleme süreçleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Yöntemin düşük ekipman maliyeti ve karmaşık geometriler üretme kapasitesi gibi avantajları, Seçici Lazer Ergitme (SLM) ve Elektron Işını Eritme (EBM) gibi diğer metal eklemeli imalat teknikleriyle karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, EBAM yönteminin sınırlı malzeme seçenekleri, düşük mekanik özellikler ve porozite gibi zorlukları da analiz edilmiştir. Çalışma, EBAM'ın potansiyelini, üretim süreçlerine getirdiği yenilikleri ve gelecekteki araştırma alanlarını değerlendirmekte; bu yöntemin farklı sektörlerde daha yaygın ve etkili bir şekilde kullanımı için öneriler sunmaktadır. Sonuç olarak yapılan literatür taramasında EBAM yönteminin maliyet etkin bir alternatif olabilme potansiyeli taşımakta ancak üretim sürecinde ek zorluklar barındırmakta olduğu görülmüştür.

## Extrusion-Based Metal Additive Manufacturing (EBAM): Technology, Advantages and Limitations

### ARTICLE INFO

Received: 06.11.2024

Accepted: 11.12.2024

#### Keywords:

Additive manufacturing

Metal additive

manufacturing

3D printing

Material extrusion

### ABSTRACT

This article discusses Extrusion-Based Metal Additive Manufacturing (EBAM) in detail. EBAM is an innovative 3D printing technology that utilizes polymer-metal mixed filaments to produce metal components through layer-by-layer joining. The paper comprehensively examines the basic operating principles of EBAM, the material bonding mechanisms, and the sintering processes required to obtain full-density metal parts. The advantages of the method, such as low equipment cost and the capacity to produce complex geometries, are compared with other metal additive manufacturing techniques such as Selective Laser Melting (SLM) and Electron Beam Melting (EBM). In addition to that, the challenges of the EBAM method, such as limited material options, low mechanical properties, and porosity, are also analyzed. The study evaluates the potential of EBAM, the innovations that introduces to manufacturing processes and future research areas, and provides recommendations for its more widespread and effective use in different sectors. In conclusion, the literature review shows that the EBAM method has the potential to be a cost-effective substitute, but has additional challenges in the production process.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemeli İmalat (Eİ) terimi 1990'lerde katmanlar oluşturarak 3B bileşenlerin üretilmesine yönelik bir teknolojiyi tanımlamak için kullanılmaya başlanmıştır. Amerikan Test Malzemeleri Derneği - American Society for Testing Materials (ASTM) uluslararası standardına göre [1] Eİ, geleneksel işleme gibi çıkartmalı üretim yöntemlerinin aksine, 3B model verilerinden nesnelere oluşturmak için malzemelerin katman katman birleştirilmesi prensibine dayanır [2].

\* Corresponding author, e-mail: ceylanmertefe@gmail.com

To cite this article: M.E. Ceylan, İ. Şahin, N. Top, Extrusion-Based Metal Additive Manufacturing (EBAM): Technology, Advantages and Limitations, Manufacturing Technologies and Applications, 5(3), 264-275, 2024. <https://doi.org/10.52795/mateca.1580405>

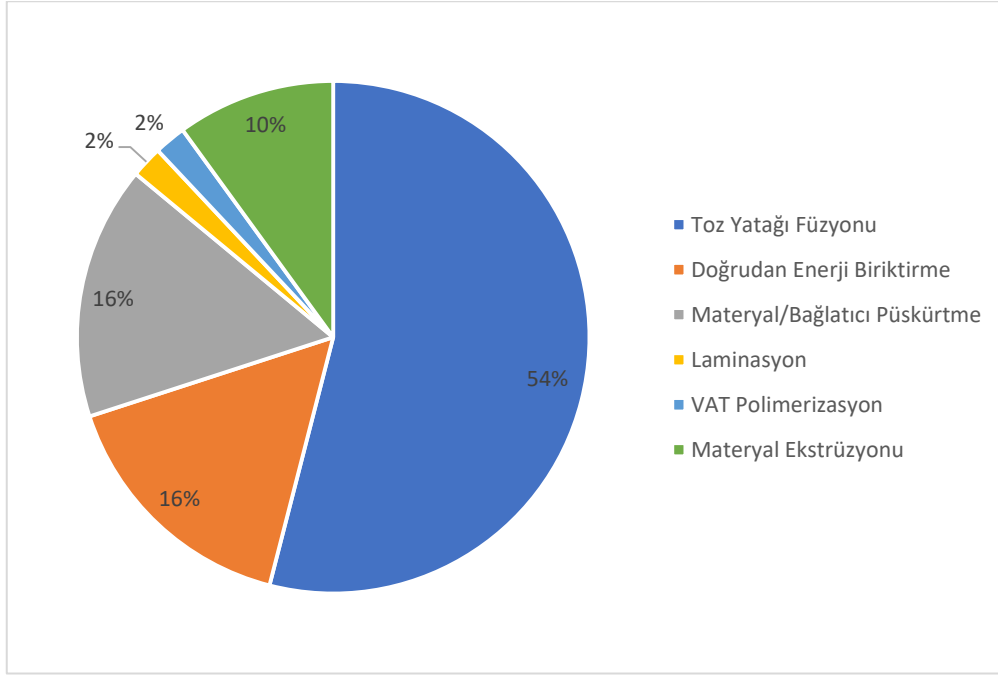
This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

Scott Crump tarafından patentle korunan Ergiyik Biriktirme Modelleme (FDM) patentinin [3] 2009 yılında sonlanması FDM teknolojisindeki gelişmeleri hızlandırmış, 2000'lerin başında prototiplemeye yönelik bir üretim teknolojisi olan Eİ'nin günümüzde standart üretim proseslerinden biri haline gelmesini tetiklemiştir. Sonuç olarak günümüzde, Eİ getirdiği esnek üretim yaklaşımı, karmaşık şekillere ve farklı malzemelere sahip nesnelere hızlı üretebilme yeteneği ile üretim fikrine yeni bir yaklaşım getirmiş, deyim yerinde ise imalat paradigmasını değiştirmiştir. Eİ günümüzde sadece araştırma kurumları ve büyük işletmelerin odağında değil özel kullanıcıların da ilgi alanına girmiş durumdadır [4]. En azından FDM özelinde Eİ teknolojilerine erişimin kolaylaşması, üretimin demokratikleştirilmesi fikrine katkıda bulunmaktadır [5]. Bunun yanında malzeme israfını azaltma, özelleştirilmiş imalat potansiyeli ile geleneksel üretim yöntemlerine göre daha sürdürülebilir bir üretim yöntemi ve bu yönüyle döngüsel ekonomi uygulamalarıyla uyumlu bir teknolojidir.

Son yıllarda Eİ teknolojileri üzerindeki ilerleme ile otomotiv, havacılık, mühendislik, ilaç, biyolojik sistemler ve hatta yemek zinciri de dahil olmak üzere pek çok sektörde özelleştirilip kullanılabilir hale gelmiştir [6]. Ürünleri minimum ek maliyetle özelleştirme yeteneği ile düşük hacimli üretim ve özel imalat uygulamalarında tercih edilen bir teknoloji haline gelmiştir. Malzeme bilimindeki gelişmeler polimerler, metaller, seramikler ve kompozitler gibi kullanılabilir malzeme yelpazesini daha da genişleterek teknolojinin çok yönlülüğünü artırmıştır. Ayrıca, Eİ'nin nesnelere interneti, dijital ikiz ve yapay zekâ gibi Endüstri 4.0 ilkeleriyle entegrasyonu, akıllı üretim için yeni fırsatları doğurmuştur.

Metal eklemeli imalat, karmaşık metal bileşenlerin yüksek doğruluk ve minimum malzeme israfı ile üretilmesine olanak tanıyan yenilikçi bir endüstriyel üretim yöntemidir. Bu yöntem, çeşitli metal tozları veya filamentler kullanarak doğrudan dijital modellerden elde edilen veriyi bileşenler oluşturmak için malzemenin katman katman birleştirilmesi tekniğine dayanır. Metal Eklemeli İmalat, havacılık, otomotiv, medikal ve diğer sektörlerde asırlardır süre gelen yontma/talaş kaldırma şeklindeki üretim yaklaşımından ayrılmaktadır. Bu özelliği ile önemli mühendislik malzemelerinden olan metallerin, daha önce üretimi zor veya imkansızla yakın olan geometrilerin üretimini sağlayabilen önemli bir üretim yaklaşımıdır. Bu teknoloji, çeşitli alanlarda yaratıcı çözümler ve gelişmiş performanslar sağlamaktadır. Metal Eklemeli İmalat yöntemleri incelendiğinde, kullanılan teknolojilerinin ağırlıklı olarak toz esaslı metotlar oldukları gözlenmektedir. Kullanımının göre sıraladığında Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting – SLM), Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering – SLS), Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (Direct Metal Laser Sintering – DMLS), Elektron Işını Eritme (Electron Beam Melting – EBM), Doğrudan Enerji Boşaltma (Direct Energy Deposition –DED) ve Malzeme/Bağlayıcı Püskürtme (Material/Binder Jetting) yöntemlerinin başı çektiği görülmektedir [1, 7, 8, 10]. Bu yöntemler arasında en çok kullanılan SLM olduğu görülmüştür. Ancak ekipman gerekliliği açısından yüksek maliyetli bir teknoloji durumundadır [9].

Şekil 1'de görülebileceği gibi metal eklemeli imalat pazarında en büyük pay toz yataklı füzyon teknolojisine aittir. Toz yataklı füzyon teknolojilerinde en yaygın kullanılan Eİ yöntemleri ise SLM ve EBM yöntemleridir. Bu iki yöntem şu anda endüstriyel uygulamalar için en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Ancak hem SLM hem de EBM yöntemleri günümüz teknolojisi için gerek kurulum gerekse de imalat maliyetleri açısından yüksektir [9]. Bu da kullanıcının teknolojiye erişimini kısıtlamaktadır. 2009 yılında FDM teknolojisi üzerindeki patent baskısının kalkmasıyla birlikte FDM teknolojisinin metal eklemeli imalatta kullanımı konusundaki araştırmaları tetiklemiş ve metal eklemeli imalat alanında FDM makineleri ile uyumlu metal dolgu filamentlerinin kullanılmaya başlanması önemli bir yenilik olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 1'de görülebileceği gibi bu çalışmalar olumlu sonuç vermiştir.



Şekil 1. 2020 yılındaki metal eklemeli imalat pazarı [7]

Ekstrüzyon tabanlı metal eklemeli imalat (EBAM), SLM ve EBM gibi metal eklemeli imalat yöntemlerine göre sunduğu düşük maliyetli ekipman fırsatı nedeniyle dikkat çekmektedir [11]. Ancak bağlayıcı uzaklaştırma (debinding) ve sinterleme gibi ek işlemleri içermesi, maliyet açısından bir dezavantaj olarak göze çarpmaktadır [12]. EBAM yöntemi, Ergiyik Biriktirme Modelleme (FDM) olarak bilinen polimer 3B baskı süreciyle benzerlik gösterdiği için daha fazla ilgi görmektedir. Bu durum akademik çalışmalara da yansımıştır. Özellikle, 2015'ten bu yana EBAM ile ilgili akademik çalışmaların hızla arttığı görülmektedir. Havacılıktan tıp sektörüne, kalıpcılık ve makine imalat sektörüne kadar pek çok alanda kullanımı yaygınlaşan bir teknolojidir [4, 13-15]. Günümüzde EBAM metal Eİ pazarının %10'unu oluşturmaktadır (Şekil 1) [16]. Ekstrüzyon tabanlı metal eklemeli imalat yöntemi literatürde Metal MEX (Metal Material Extrusion) [17] veya EBAM (Extrusion Based Additive Manufacturing) [4] gibi farklı şekillerde isimlendirildiği görülmektedir. Bu çalışmada yöntem EBAM kısaltması ile isimlendirilmiştir.

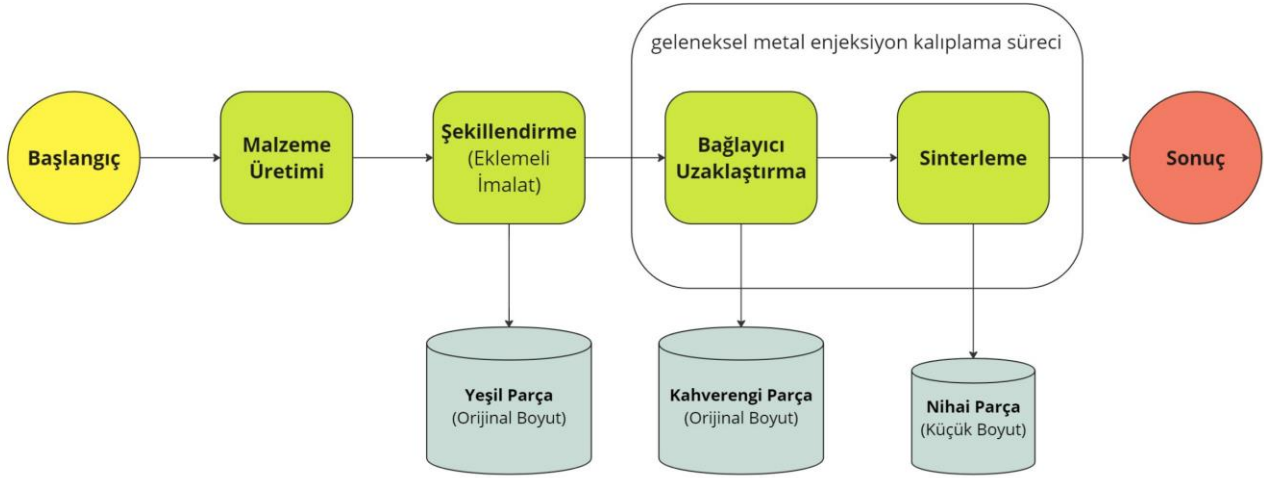
Bu çalışmanın amacı, EBAM teknolojisinin mevcut literatürdeki konumunu incelemek, yöntemin sunduğu avantajları, karşılaşılan zorlukları ve farklı sektörlerdeki uygulamalarını ortaya koymaktır. Çalışmada, EBAM yönteminin polimer tabanlı FDM süreciyle olan benzerliğinden doğan kullanım kolaylığı ve maliyet avantajı incelenmiş, aynı zamanda metal malzemelerin ekstrüzyon sürecindeki performansı üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürdeki önemli çalışmalar incelenerek EBAM'ın üretim süreçlerine getirdiği yenilikler, gelecekteki potansiyel araştırma alanları ve yöntemle ilgili eksiklikler değerlendirilmiştir. Bu çalışma, EBAM'ın gelişen metal eklemeli imalat pazarındaki rolünü anlamaya yönelik literatüre katkı sunmayı amaçlamakta ve ilgili sektörlerde daha etkin kullanımını teşvik edecek öneriler sunmaktadır.

## 2. EKSTRÜZYON TABANLI EKLEMELİ İMALAT (EXTRUSION BASED ADDITIVE MANUFACTURING)

### 2.1. Yöntem (Method)

EBAM, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemine kıyasla daha basit ve görece düşük maliyetli bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır [18, 19]. Aynı zamanda, karmaşık geometrilere sahip yapıların üretimine olanak tanınması nedeniyle yenilikçi bir metal eklemeli imalat yöntemi olarak değerlendirilmektedir. EBAM, temel olarak FDM yöntemine dayanmaktadır. EBAM sürecindeki ilk aşama, bağlayıcı ve metalik tozdan oluşan bir hammadde üretmektir (Şekil 2). Bu hammadde çubuk, filament veya pelet halinde üretilebilir [20]. EBAM yönteminde ilk aşamada, metal tozları polimer ile karıştırılarak filament elde edilir ve bu filament, FDM yöntemi ile katman katman baskı

işlemi gerçekleştirilir. Filament içerisindeki metal polimer oranı genelde %50-60 aralığında olmaktadır [21, 22]. Filament içerisinde yer alan metal tozlarının partikül boyutu, boyutlar arasındaki tutarlılığı ve partiküllerin geometrik yapısının doğrudan nihai parçanın dayanımı üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir [23, 24]. EBAM yöntemindeki üretim süreçleri şematik olarak Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. EBAM şematik gösterimi (EBAM schematic representation) [25].

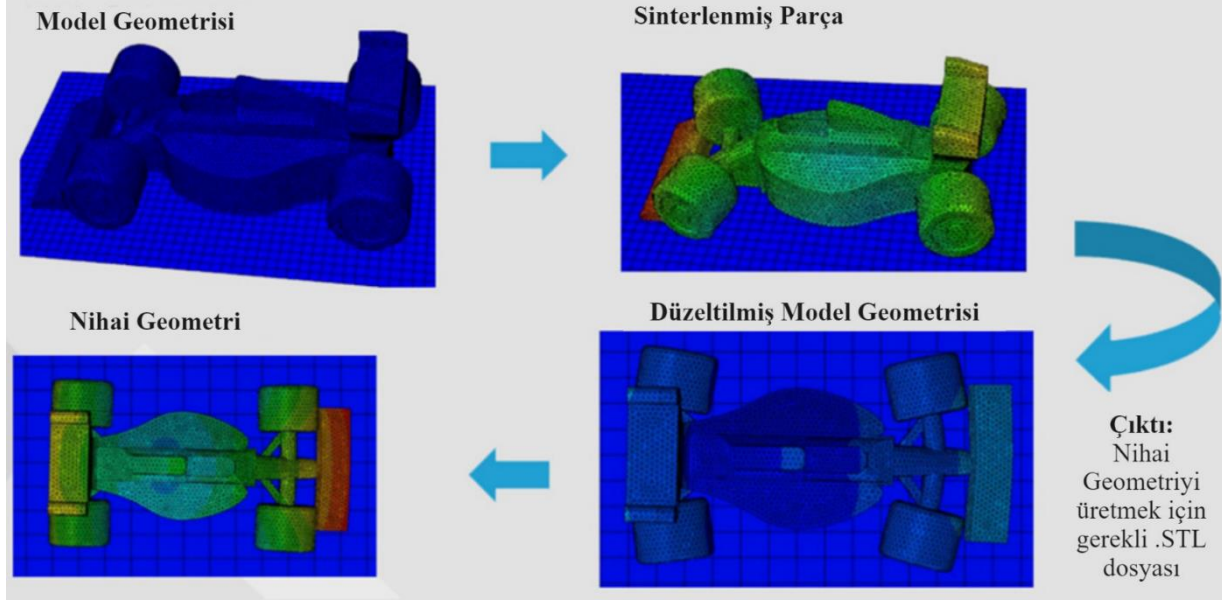
EBAM’da baskı işlemi sonrasında elde edilen parça, polimer bağlayıcı ve destek malzemesi içerdiği için “yeşil parça” (Green Part) olarak adlandırılır (Şekil 3). Yeşil parçalar, polimerin camsı geçiş sıcaklığında, ancak metalin erime sıcaklığından düşük bir sıcaklıkta üretilir ve bu nedenle nihai parçalara göre daha dayanıksızdır. Ayrıca, harici olarak kullanılabilen destek malzemeleri, sinterleme aşamasında nihai parçanın destek yapılarla birleşmesini engelleyerek üretim sürecini optimize eder. Baskı işleminin ardından, polimer bağlayıcıların kimyasal veya termal yöntemlerle uzaklaştırıldığı bağlayıcı uzaklaştırma işlemi uygulanır. Bağlayıcının uzaklaştırılmasının ardından gelen sinterleme aşamasında, metal partiküller yüksek sıcaklık altında atomik difüzyon yoluyla birleştirilir ve parça yoğunlaştırılarak mekanik mukavemeti artırılır. Bu iki aşamalı süreç, EBAM yöntemi ile dayanıklı ve hassas parçaların elde edilmesini sağlar.



Şekil 3. EBAM iş parçası isimlendirmeleri (EBAM workpiece naming) [26].

EBAM’ı diğer metal eklemeli imalat yöntemlerinden ayıran bir diğer özellik toz içeriğindeki değişimin sinterleme sonunda parçanın çekmeye uğraması ve nihai yeşil parça üzerinde ölçüsel değişiklik oluşturmasıdır. Bu nedenle parça tasarımı sırasında bu değişiklik dikkate alınmalıdır. Sinterleme sürecinin, malzemenin boyutlarında küçülme ile sonuçlandığı bilinmektedir. Ancak, bu küçülme oranı kullanılan malzeme türüne ve sinterleme parametrelerine bağlı olarak farklılık gösterebilir (Şekil 4). Bu nedenle, istenen boyutsal doğruluğun sağlanması için işlem parametrelerinin titizlikle optimize edilmesi gereklidir. Katalog değerlerine göre küçülme oranları baskı yönünde %16,6 ve katman yönünde %19,3 olarak gözlemlenebilir [27]. Ancak akademik çalışmalarda bu oranlarda farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılıklarda malzemelerin farklı çekme karakteristiklerinin yanı sıra [28] sinterleme ortamı, sinterleme süresi, baskı parametreleri ve

fırın atmosferi etkilidir. Örneğin Gonzalez-Gutierrez vd. uzunlukta %20,3, uç genişlikte %18,7, orta genişlikte %15,9 ve kalınlıkta %15,2 azalma olduğunu tespit etmişlerken [29], Thompson vd. küçülme oranlarını parça boyutundan bağımsız olarak baskı yönü doğrultusunda %16,3 katman doğrultusunda %17,4 olarak tespit etmişlerdir [29, 24]. Bütün bu sonuçlar sinterlenmiş parçaların boyutsal doğruluğunu ve mekanik performansını optimize etmek için malzeme özelliklerinin ve işlem koşullarının dikkatlice değerlendirilmesinin önemini göstermektedir. Şekil 4'te boyutsal doğruluğu sağlamak adına yapılan bir analiz örneği gösterilmiştir.



Şekil 4. Sinterleme işlemi için geometri düzeltme analizi örneği [30]

Sinterleme aşaması eklemeli imalat yönteminden bağımsız olarak bir üretim tekniği olan sinterleme ile çok büyük oranda benzerlik göstermektedir. Bu özelliği ile polimer bağlayıcı ile karıştırılarak üretilen filamentler sayesinde diğer metal eklemeli imalat yöntemlerinde olduğu gibi alüminyum, çelik ve titanyum alaşımları başta olmak üzere, sinterlenebilir hemen hemen tüm metal alaşımları EBAM ile üretilebilmektedir [32].

### 3. EBAM'DA KULLANILAN 3B YAZICILAR VE BASKI YÖNTEMLERİ

#### 3.1. 3B Yazıcılar (3D Printers)

Literatürde EBAM yönteminde kullanılan yazıcılar, vida tabanlı, piston tabanlı ve filament tabanlı sistemler olarak sınıflandırılmıştır [11, 33]. Bunların arasında en yaygın kullanılanlar filament tabanlı sistemlerdir. Bu tür yazıcılar hem kolay erişilebilirlikleri hem de düşük maliyetli yapılarıyla öne çıkmaktadır. Filament tabanlı yazıcılarda genellikle Prusa i3 Mk2, Mk3, Mk3sve Ultimaker 2, 3, S5 modelleri sıklıkla tercih edilmiştir [24, 34, 35]. Ayrıca, Duplicator i3 [36] ve Markforged MetalX [37, 38] gibi modeller de baskı süreçlerinde yer bulmaktadır [12].

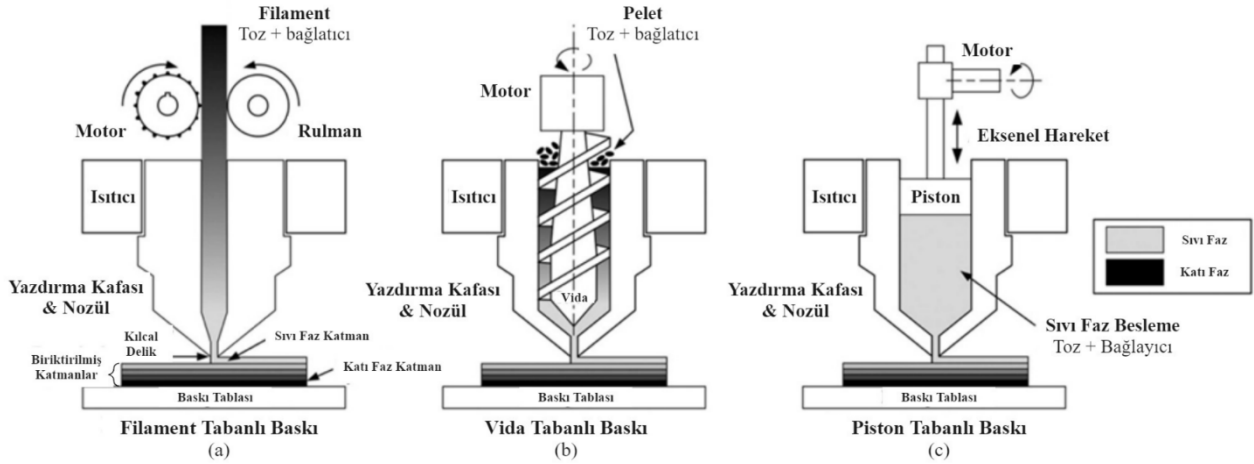
Prusa ve Ultimaker yazıcıları, esneklikleri ve yaygın kullanımları nedeniyle araştırmalarda önemli bir yere sahiptir. Prusa modelleri birçok farklı projede tercih edilirken [39, 40], Ultimaker 2, 3 ve 5 modelleri, farklı filamentlerle uyumluluğu ve baskı kararlılığıyla dikkat çekmiştir [41-43]. Bu yazıcılar, metal filament kullanarak endüstriyel prototiplemeden küçük ölçekli üretimlere kadar geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır.

Filament tabanlı ticari yazıcılar, düşük maliyetli ve erişilebilir olmaları nedeniyle en çok tercih edilen sistemler olmuştur. Ancak, daha iyi mekanik özellikler ve baskı kalitesi elde etmek için özel yazıcı sistemlerinin daha etkili olduğu gözlenmiştir. Bu durum, her iki sistemin de kullanım amacına göre avantaj sunduğunu göstermektedir. Filament tabanlı yazıcılar araştırma ve prototipleme için yaygın olarak kullanılırken, yüksek hassasiyet gerektiren endüstriyel uygulamalarda kapalı sistem yazıcılar ön plana çıkmaktadır. Bunun yanında vida ve piston tabanlı yazıcı sistemlerini kullanan az sayıda çalışma vardır. AIM3D'nin ExAM 255 yazıcısı (vida tabanlı

yazıcı) ve Desktop Metal Studio+ sistemi (piston tabanlı yazıcı) gibi ticari olarak temin edilebilen yazıcılar olmasına rağmen, bazı şirketlerin her iki yazıcı sistemini de kullandığı görülmektedir.

### 3.2. 3B Baskı Yöntemleri (3D Printing Methods)

EBAM süreci besleme sistemlerine göre vida, piston ve filament tabanlı baskı sistemleri olmak üzere üç tipe sınıflandırılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. EBAM'da besleme sistemleri: (a) Filament tabanlı, (b) Vida tabanlı, (c) Piston tabanlı (Feeding systems: (a) filament-based (b) screw-based (c) plunger-based [33])

#### 3.2.1. Filament tabanlı baskı sistemi (Filament-based printing system)

EBAM'da en çok kullanılan 3B baskı yöntemi filament tabanlı baskı sistemidir. Filament tabanlı 3B baskı (FFF veya FDM), akademik çalışmalar ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan en popüler 3B baskı yöntemlerindedir. Yöntemin basitliği, güvenilir olması, düşük maliyeti ve bilinirliği tercih edilmesinin en önemli sebeplerindedir [11]. Ayrıca, metal filamentlerin standart masaüstü polimer 3B yazıcılarla uyumlu olması, EBAM'ı daha erişilebilir ve ekonomik bir teknoloji haline getirerek çeşitli uygulamalarda tercih edilen bir yöntem yapmıştır.

EBAM, diğer FDM işlemlerine benzer şekilde çalışsa da (malzemenin sürekli olarak beslenmesi ve sabit basınçta bir nozul aracılığıyla ekstrüde edilmesi), metal filament kullanımı kendine özgü bir işlemi ve yapısal hususları beraberinde getirir [44]. Metal filament tabanlı FDM, genellikle nihai mekanik özelliklere ulaşmak için bağlayıcı uzaklaştırma (debinding) ve sinterleme gibi son işlem adımlarını gerektirir. Bu adımlar, geleneksel yöntemlerle üretilmiş metal parçalara kıyasla yüksek gözenekliliğe ve daha düşük yoğunluğa sahip olan 3B baskılı parçanın mukavemetini ve dayanıklılığını artırmak için gereklidir.

Bu sürecin temel dezavantajı, filament üretimi için tek veya çift dişli ekstrüderlere ihtiyaç duyulmasıdır [24]. Ayrıca, uygun bağlayıcı türlerinin seçimi ve uygun karıştırma prosedürlerinin belirlenmesi kritik önem arz etmektedir. EBAM'da kullanılan metal filamentteki hacimsel olarak yüksek metal/bağlayıcı oranı, nozulun aşınmasını kolaylaştırır bu da düzenli filament akışına engel olabilir. Hem akış stabilitesini sağlamak hem de nozulun ömrünü uzatmak için standart FDM yazıcılarda kullanılan pirinç nozul yerine çelik nozul kullanmak gereklidir [45].

#### 3.2.2. Vida tabanlı baskı sistemi (Screw-based printing system)

Vida tabanlı ekstrüzyon geleneksel ekstrüzyon üretim yaklaşımına benzeyen bir yöntemdir. Bu yöntemde, daha yüksek ekstrüzyon hızı elde etmek ve daha fazla malzeme akışı sağlamak için filament yerine katı peletler kullanılır [33]. Yazdırma yaklaşımı filament tabanlı sistemlerle aynıdır ancak üretim için kullanılan malzeme filament halinde değil katı pelet halindedir. Vida tabanlı üretimde, katı peletlerden oluşan malzeme besleme haznesi yardımı ile eritme bölgesine taşınır. Isıtılmış ekstrüzyon kabı olarak da isimlendirilebilecek bölgede gerçekleşen eritme sonucu

sıvılaştıran peletler ekstrüder içindeki helisel vida ile nozul deliğinden ileriye doğru hareket ettirilerek 3B baskı gerçekleştirilir [46]. Vida tabanlı üretimde pelet boyutu ürünün kalitesini sağlamak ve tutarlı bir ekstrüzyon gerçekleştirmek için önemlidir [33].

Pelet tabanlı sistem, filament formunda malzeme gerektirmediğinden daha düşük bir baskı maliyetine sahiptir [47]. Daha düşük malzeme maliyeti ve daha kısa baskı süresi sağladığı için baskı maliyetleri de düşüktür. Ancak, baskı için daha büyük pelet nozulları kullanıldığında, çıkarılan boncuğun yeterince ısı tuttuğu ve bu nedenle bir sonraki katmanı sürdürmek için tamamen soğumadığı ve katılaşmadığı tespit edilmiştir. Bu durum sarkmaya ve baskı hatalarına yol açmaktadır [48].

### 3.2.3. Piston tabanlı baskı sistemi (Plunger-based printing system)

Piston tabanlı EBAM'da, termoplastik bir bağlayıcı ile metal tozundan oluşan çubuklar kartuşlara yerleştirilir ve daha sonra ısıtıcı içinde tamamen veya yarı ergiyik hale gelene kadar bekletilir [14]. Yumuşak malzeme bir haznede birikir ve son olarak pistonun oluşturduğu aksenal hareketle nozuldan dışarı itilerek 3B baskı gerçekleştirilir. Sistemin ana bileşenleri aktüatör, piston, ısıtıcı, nozul ve taşıyıcıdır (Şekil 4).

Piston tabanlı yöntem, geniş bir metal hammadde yelpazesi sunarak, macun ve pelet formları gibi geleneksel filament sistemleriyle uyumsuz malzemeleri kullanabilme esnekliği sağlar. Bu durum, özellikle sinterleme gibi son işlemlerden sonra, filament tabanlı FDM'e kıyasla daha yüksek yoğunluk ve mekanik mukavemet elde edilmesine katkı sağlar. Ekstrüzyonun doğrudan pistonla yapılması, filament kopması gibi sorunları azaltarak daha güvenilir bir katman birikimi sağlar. Ancak, piston tabanlı yöntem, hassas piston kontrolü ve ısıtılmalı odalar gibi maliyetli ekipman gerektirir. Bu özel gereksinimler kurulum maliyetlerini artırır. Ayrıca pistonun hız ve kuvvetinin kontrolü her zaman mümkün olmayabilir.

## 4. KULLANILAN MALZEMELER (MATERIALS USED)

EBAM'de polimer teknolojisinin de gelişmesi ile beraber alüminyum ve alaşımları, pirinç, titanyum ve alaşımları, platin, paslanmaz çelik, gümüş, altın, bronz, nikel bazlı alaşımlar gibi farklı malzemeler eklemeli imalat yöntemleri ile üretilebilmektedir. EBAM için kullanılan malzemeler 17-4PH, 316L paslanmaz çelik ve H13 takım çeliği ile sınırlıdır. Ancak son yıllarda titanyum alaşımları ve alüminyum alaşımları gibi yeni malzemelerin EBAM odaklı çalışmalarda kullanıldığı görülmektedir [49, 50]. Benzer şekilde yüksek karbonlu çelik ve 316L paslanmaz çeliğin alaşımlanarak EBAM baskıda kullanımına yönelik bazı çalışmalar bulunmaktadır. Ancak malzemelerin farklı çekme karakteristiklerinden dolayı sinterleme sonucunda asimetrik çekmeler meydana gelmiştir [28].

316L ve 17-4PH malzemelerin yanında Ti-6Al-4V ile polyoefin bağlayıcı kullanılarak yapılan filamentlerde yüksek tutarlılık ve üretim kolaylığı izlendiği kaydedilmiştir [51]. Ancak burada da sinterleme sıcaklığı arttıkça kalıntı gerilmelerin arttığı görülmüştür. Ti-6Al-4V alaşımları ile üretimde görülen bir diğer sorun ise yüksek dolgu oranlarında filament akışı ve baskı kalitesinin negatif yönde etkilenmesidir [46].

FFF için filamentler sert metal (WC-10Co) ve sermet tozu (Ti(C,N)-Co/Ni-bazlı) ve organik bağlayıcı ile üretilen bazı filamentler ile baskı alan çalışmalar literatürde mevcuttur ancak baskı parametreleri henüz optimize edilmediğinden ve baskı işleminden kaynaklanan boşluklar olduğundan tam yoğunluk elde edilememiştir [52]. EBAM yönteminde kullanılan bazı malzeme türleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. EBAM yönteminde kullanılan bazı toz-balayıcı ikilileri [53] (Some powder-blasters couples used in the EBAM method)

Toz	Bağlayıcı Sistemi	Ref
Bakır	Parafin mumu, düşük yoğunluklu polietilen, stearik asit	[54]
Bakır	Polivinil karboksi polimer, polivinil alkol	[55]
Bronz	Polilaktik asit (PLA)	[56]
Gümüş	Poli-4-vinil fenol	[57]
SS 17-4PH	Termoplastik bir elastomer olan aşılınmış poliolefin	[58]
SS 316L	Parafin mumu, yüksek yoğunluklu polietilen, asetik asit-vinil asetat kopolimeri, stearik asit	[59]
SS 316L	Polioksümetilen, parafin mumundan oluşan organik bağlayıcı	[60]
SS 316L	Poliformaldehit ve polipropilen, dioktil ftalat, dibütül ftalat ve ZnO gibi katkı maddeleri	[26]
Ti6AL4V	Metilselüloz, stearik asit	[61]

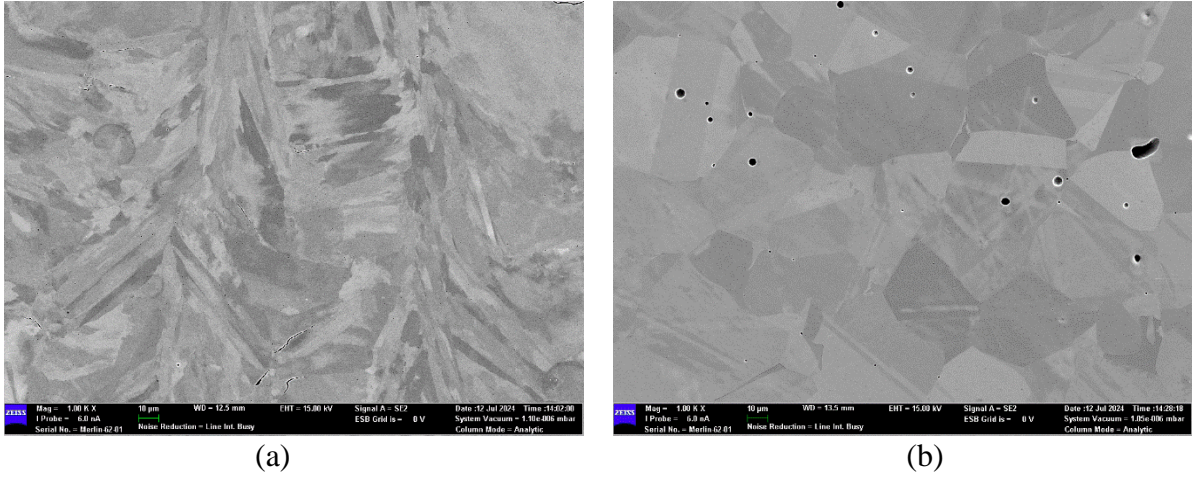
Bu zorlukların yanı sıra, EBAM teknolojisinin potansiyeli, malzeme çeşitliliğinin artırılması ve yeni filament formülasyonlarının geliştirilmesiyle genişlemektedir. Örneğin, bakır ve nikel bazlı alaşımların eklemeli üretimde kullanımı, yüksek termal ve elektrik iletkenliği nedeniyle elektronik ve havacılık uygulamaları için önemlidir. Ancak, bu malzemelerin yüksek ısı iletkenliği, baskı sürecinde homojen sıcaklık dağılımını zorlaştırmakta ve sinterleme sonrası kalıntı gerilmelerin artmasına neden olmaktadır. Polimer bağlayıcıların optimize edilmesi ve sinterleme parametrelerinin hassas ayarlanması, bu sorunların üstesinden gelinmesi için önemli bir adım olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmalar, EBAM teknolojisinin endüstriyel uygulamalarda daha yaygın ve etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamak için önemli bir temel oluşturmaktadır.

## 5. SONUÇLAR VE TARIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

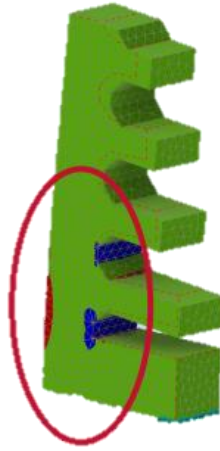
EBAM, üretim aşamaları açısından düşük alım maliyetine sahip bir metal 3B baskı yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Baskı işleminin gerçekleştirildiği yazıcıların FDM teknolojisi ile ortak olmasından dolayı yedek parça, servis ve model olarak geniş bir ürün ağı mevcuttur. Bunun yanında bağlayıcı uzaklaştırma ve sinterleme aşamalarında kullanılan fırınlar geleneksel sinter fırınlarıdır. Bu bağlamda incelendiğinde SLM, EBM gibi yüksek teknoloji gerektirmeden metal eklemeli imalat yapımına izin veren özel bir yöntem olarak sektörde yer almaktadır. Bu literatür araştırmasında, EBAM'ın temel süreçleri, baskı yöntemleri, kullanılan malzemeler ve baskı sonrası işlemler ele alınmıştır. Çalışmalar incelendiğinde EBAM'nin, SLM ve EBM gibi diğer metal eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla maliyet etkin bir alternatif olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, EBAM'nin nihai ürünlerin mekanik özellikleri ve gözeneklilik gibi bazı kısıtları bulunmaktadır. Aşağıdaki görüntülerde SLM ve EBAM yöntemlerinin gözenekliliklerindeki fark açıkça görülmektedir (Şekil 6).

EBAM'nin dezavantajları arasında, sinterleme ve bağlayıcı uzaklaştırma aşamalarının zorluğu ile bu süreçlerin boyutsal doğruluğu ve nihai ürün performansını olumsuz etkileyebilecek çekme oranlarına neden olması öne çıkmaktadır. EBAM ile üretilen parçaların iç yapısında bulunan bağlayıcının uzaklaştırılması, özellikle büyük parçalarda istenen geometrinin elde edilmesini zorlaştırmaktadır (Şekil 7). Ayrıca malzemenin filament formunda olması toz yataklı sistemlerden farklı olarak, baskı sırasında nozulun aşınması, filament üretimi sırasında oluşabilecek heterojenlik, filamentin depolama koşullarından olumsuz etkilenmesi gibi sebeplerden kaynaklı üretimin kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır.





Şekil 6. 1000 kat büyütmede numune kesitleri elektron mikroskopu görüntüsü (a) SLM, (b) EBAM (1000 times magnification electron microscope image of sample sections (a) SLM, (b) EBAM)



Şekil 7. EBAM yönteminde bağlayıcı uzaklaştırma sırasında parça geometrisine bağlı potansiyel problem bölgeleri (Potential problem areas due to part geometry during binder removal in the EBAM method) [62]

Nihai parça üretiminde kullanılan toplam enerji kıyaslandığında ise EBAM yöntemi, toz esaslı eklemeli imalat yöntemlerine (SLM ve EBM gibi) göre daha az enerji tüketmektedir. Ancak üretim sırasında gerekli olan ek aşamalar hata ihtimalini artırarak parçayı işlevsiz bırakabilmektedir. Bu özelliği dolayısı ile tekil olarak daha az enerji ihtiyacı duymasına karşın, imalat süreci hataya daha açıktır.

Çalışmalar, gelecekte EBAM'nin daha geniş bir malzeme yelpazesi ve yeni filament formülasyonları geliştirilerek genişleyeceğini göstermektedir. Elektronik ve havacılık gibi sektörlerde kullanılabilir yüksek termal ve elektrik iletkenliğine sahip alaşımların üretimi, bu teknolojinin endüstrideki uygulama alanlarını artırabilir. Bunun yanı sıra, polimer bağlayıcıların optimize edilmesi ve sinterleme parametrelerinin hassas bir şekilde ayarlanması, mekanik özellikleri ve yoğunluğu artırmak için önemli adımlar olarak görülmektedir. EBAM'nin gelecekteki araştırma ve geliştirme çalışmaları, malzeme çeşitliliğini ve üretim sürecinin verimliliğini artırmayı hedeflemelidir. Ek olarak, teknolojinin sürdürülebilir üretim uygulamalarıyla uyumunu artırmak için çevresel etkileri ve enerji verimliliği üzerine çalışmalar önem arz etmektedir.

EBAM yeni gelişen bir teknoloji olarak bazı sınırlamalara sahip olsa da gelişmekte olan teknoloji ve araştırmalar, malzeme seçeneklerindeki iyileştirmeler, maliyet etkinliği ve karmaşık tasarımlarla uyumluluğu sayesinde araştırma ve endüstriyel uygulamaların ön saflarında yer alacaktır. Sonuç olarak EBAM, seramik, metal ya da kompozit parçaların üretimi konusunda geleneksel yöntemlerin alternatifi veya tamamlayıcısı olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda EBAM'ın konumunu güçlendirmek için daha fazla çalışma yapılması gereklidir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: FYL-2023-8603).

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. ASTM ISO/ASTM 52900, Standard terminology for additive manufacturing – general principles – terminology, ASTM International, 2015.
2. K. Rane, M. Strano, A comprehensive review of extrusion based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts, *Additive Manufacturing*, 7: 155–173, 2019.
3. S.S. Crump, Apparatus and method for creating three-dimensional objects, US5121329A, 1992.
4. C. Lieberwirth, A. Harder, H. Seitz, Extrusion based additive manufacturing of metal parts, *Journal of Mechanics and Automation* 7(2): 79-83, 2017.
5. N. Top, I. Sahin, S.C. Mangla, M.D. Sezer, Y. Kazancoglu, Towards sustainable production for transition to additive manufacturing: a case study in the manufacturing industry, *International Journal of Production Research*, 61(13): 4450-4471, 2023.
6. W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, P.D. Zavattieri, The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Computer-Aided Design*, 69: 65-89, 2015
7. A. Vafadar, F. Guzzomi, A. Rassau, K. Hayward, Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges, *Applied Sciences*, 11(3): 1213, 2021.
8. T. Duda, L.V. Raghavan, 3D metal printing technology: the need to re-invent design practice, *AI & Society*, 33(2): 241-252, 2018.
9. S.I. Roshchupkin, V.I. Golovin, A.G. Kolesov, A.Y. Tarakhovskiy, Extruder for the production of metal-polymer filament for additive Technologies, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 971(2): 022009, 2020.
10. R.C. Pack, B.G. Compton, Material extrusion additive manufacturing of metal powder-based inks enabled by Carrageenan rheology modifier, *Advanced Engineering Materials*, 23(2): 2000880, 2021.
11. C. Suwanprecha, A. Manonukul, A Review on Material Extrusion Additive Manufacturing of Metal and How It Compares with Metal Injection Moulding, *Metals*, 12(3): 4293, 2022 doi:10.3390/met12030429.
12. B. Deboer, F. Diba, S.A. Hosseini, Design and development of a cost calculator for additive manufacturing, *Proceedings of the Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress, Charlottetown, Kanada, 27-30/06.2021*.
13. G. Wu, N.A. Langrana, R. Sadanji, S. Danforth, Solid freeform fabrication of metal components using fused deposition of metals, *Materials & Design*, 23(1): 97–105, 2002.
14. J. Gonzalez-Gutierrez, D. Cano, S. Schuschnigg, C. Kukla, J. Sapkota, C. Holzer, Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives, *Materials*, 11(5): 840, 2018.
15. M. Quarto, C. Giardini, Additive manufacturing of metal filament: when it can replace metal injection moulding, *Progress in Additive Manufacturing*, 8(3): 561-570, 2023.
16. L. Cherdo, The Best Metal 3D Printers in 2020, <https://www.aniwaa.com/best-of/3d-printers/best-metal-3d-printer/>, 08.01.2021
17. M. Sæterbø, W. D. Solvang, Evaluating the cost competitiveness of metal additive manufacturing – A case study with metal material extrusion, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 45: 113-124, 2023.
18. T. Rosnitschek, F. Hueter, B. Alber-Laukant, FEM-based modelling of elastic properties and anisotropic sinter Shrinkage of metal EAM, *International Journal of Simulation Modelling*, 19(2): 197-208, 2020.
19. M. Strano, K. Rane, F. Briatico Vangosa, L. Di Landro, Extrusion of metal powder-polymer mixtures: Melt rheology and process stability, *Journal of Materials Processing Technology*, 273: 116250, 2019.
20. T. Wohlers, Desktop metal: a rising star of metal AM targets speed, cost and high-volume production, *Metal AM*, 3(2): 89–94, 2017.
21. M. Strano, K. Rane, M.A. Farid, V. Mussi, V. Zaragoza, M. Monno, Extrusion-based additive manufacturing of forming and molding tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(7): 2059-2071, 2021. doi:10.1007/s00170-021-07162-8

22. P. Singh, V.K. Balla, A. Tofangchi, S.V. Atre, K. H. Kate, Printability studies of Ti-6Al-4V by metal fused filament fabrication (MF3), *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 91: 15249, 2020.
23. D.Y. Park, G.M. Lee, Y.S. Kwon, Y.J. Oh, S. Lee, M.S. Jeong, S.J. Park, Investigation of powder size effects on sintering of powder injection moulded 17-4PH stainless steel, *Powder Metallurgy*, 60(2): 139–148, 2017
24. Y. Thompson, J. Gonzalez-Gutierrez, C. Kukla, P. Felfer, Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel, *Additive Manufacturing*, 30: 100861, 2019.
25. T. Rosnitschek, An automated open-source approach for debinding simulation in metal extrusion additive manufacturing, *Designs*, (5)1: 2, 2021.
26. B. Liu, Y.X. Wang, Z.W. Lin, T. Zhang, Creating metal parts by fused deposition modeling and sintering, *Materials Letters*, 263: 127252, 2020.
27. BASF, User Guidelines for 3D Printing Metal Parts, [https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Metal%20Filaments/Ultrafuse\\_metal\\_User\\_Guideline.pdf](https://move.forward-am.com/hubfs/AES%20Documentation/Metal%20Filaments/Ultrafuse_metal_User_Guideline.pdf), 03.11.2024
28. M. Mousapour, M. Salmi, L. Klemettinen, J. Partanen, Feasibility study of producing multi-metal parts by fused filament fabrication (FFF) technique, *Journal of Manufacturing Processes*, 61: 438-446, 2021.
29. J. Gonzalez-Gutierrez, F. Arbeiter, T. Schlauf, C. Kukla, C. Holzer, Tensile properties of sintered 17 4PH stainless steel fabricated by material extrusion additive manufacturing, *Materials Letters*, 248: 165-168, 2019.
30. BASF, Debinding Simulation Guidelines for 3D Printed Parts using Ultrafuse® 316L, <https://forward-am.com/wp-content/uploads/2021/01/Debinding-and-Simulation-Guidelines.pdf>, 03.11.2024
31. J. Capus, Making steel powders for PM and AM, *Metal Powder Report*, 75(3): 148–150, 2020.
32. S.C. Altıparmak, V.A. Yardley, Z. Shi, J. Lin, Extrusion-based additive manufacturing Technologies: State of Art and future perspectives, *Journal of Manufacturing Processes*, 83: 607-539, 2022.
33. O. Miclette, R. Côté, V. Demers, V. Brailovski, Material extrusion additive manufacturing of low-viscosity metallic feedstocks: Performances of the plunger-based approach, *Additive Manufacturing*, 60, 103252, 2022.
34. F. Cerejo, D. Gatões, M. Vieira, Optimization of metallic powder filaments for additive manufacturing extrusion (MEX), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(7): 2449-2464, 2021
35. E. Moritzer, C. L. Elsner, C. Schumacher, Investigation of metal-polymer composites manufactured by fused deposition modeling with regard to process parameters, *Polymer Composites*, 42: 6065–6079, 2021.
36. F. Meng, M. Beretta, A. Selema, P. Sergeant, J. Vleugels, F. Desplentere, E. Ferraris, Production and characterisation of filament-based Material Extrusion (MEX) additively manufactured copper parts, *Procedia CIRP*, 121: 234-239, 2023. doi:10.1016/j.procir.2023.09.253
37. A.D. Akessa, W.M. Tucho, H.G. Lemu, J. Grønsund, Investigations of the Microstructure and Mechanical Properties of 17-4 PH ss Printed Using a Mark Forged Metal X, *Materials*, 15(19): 6898, 2022. doi:10.3390/ma15196898
38. J. Jones, A. Vafadar, R. Hashemi, A Review of the Mechanical Properties of 17-4PH Stainless Steel Produced by Bound Powder Extrusion, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7(5): 162, 2023. doi:10.3390/jmmp7050162
39. R. Singh, H.K. Garg, Fused deposition modeling-A state of art review and future applications, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1-20, 2016. doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.04037-6
40. C.J.L. Perez, Analysis of the surface roughness and dimensional accuracy capability of fused deposition modelling processes, *International Journal of Production Research*, 40(12): 2865–2881, 2002.
41. M.Á. Caminero, A. Romero, J.M. Chacón, P.J. Núñez, E. García-Plaza, G.P. Rodríguez, Additive manufacturing of 316L stainless-steel structures using fused filament fabrication technology: Mechanical and geometric properties, *Rapid Prototyping Journal*, 27(3): 583–591, 2021.
42. S. Terry, I. Fidan, K. Tantawi, Preliminary investigation into metal-material extrusion, *Progress in Additive Manufacturing*, 6: 133–141, 2021.
43. M. Mohammadzadeh, H. Lu, I. Fidan, K. Tantawi, A. Gupta, S. Hasanov, Z. Zhang, F. Alifui-Segbaya, A. Rennie, Mechanical and thermal analyses of Metal-PLA components fabricated by metal material extrusion, *Inventions*, 5(3): 44, 2020.

44. B.N. Turner, R. Strong, S.A. Gold, A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling, *Rapid Prototyping Journal*, 20(3): 192–204, 2014.doi:10.1108/RPJ-01-2013-0012
45. C.L. Chen, R.C. Thomson, Study on thermal expansion of intermetallics in multicomponent Al–Si alloys by high temperature X-ray diffraction, *Intermetallics*, 18(9): 1750–1757, 2010.
46. M. Sadaf, M. Bragaglia, L. Slemenik Perše, F. Nanni, Advancements in metal additive manufacturing: a comprehensive review of material extrusion with highly filled polymers, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(1): 14, 2024.
47. B.V. Reddy, N.V. Reddy, A. Ghosh, Fused deposition modelling using direct extrusion, *Virtual and Physical Prototyping*, 2(1): 51–60, 2007.
48. A. Patel, M. Taufik, Extrusion-based technology in additive manufacturing: A comprehensive review, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(2): 1309–1342, 2024. doi:10.1007/s13369-022-07539-1
49. I. Campbell, T. Wohlers, *Markforged: taking a different approach to metal additive manufacturing Metal AM*, 3: 113-116, 2017.
50. M. Armstrong, H. Mehrabi, N. Naveed, An overview of modern metal additive manufacturing technology, *Journal of Manufacturing Processes*, 84: 1001-1029, 2022. doi:10.1016/j.jmapro.2022.10.060
51. Y. Z. Zhang, S. Bai, M. Riede, E. Garratt. A. Roch, A comprehensive study on fused filament fabrication of Ti-6Al-4V structures, *Additive Manufacturing*, 34: 101256, 2020.
52. W. Lengauer, I. Duretek, V. Schwarz, C. Kukla, M. Kitzmantel, E. Neubauer, V. Morrison, Preparation and properties of extrusion-based 3D-printed hardmetal and cermet parts, *Euro PM2018 Congress & Exhibition Euro PM2018 Proceedings*, 14-18.10.2018, Bilbao, Spain.
53. H. Ramazani, A. Kami, A. Metal FDM, a new extrusion-based additive manufacturing technology for manufacturing of metallic parts: A review, *Progress in Additive Manufacturing*, 7(4): 609-626, 2022. doi:10.1007/s40964-021-00250-x
54. L. Ren, X. Zhou, Z. Song, C. Zhao, Q. Liu, J. Xue, X. Li, Process parameter optimization of extrusion-based 3D metal printing utilizing PW–LDPE–SA binder system, *Materials*, 10(3): 305, 2017.
55. S. Hong, C. Sanchez, H. Du, N. Kim, Fabrication of 3D printed metal structures by use of high-viscosity cu paste and a screw extruder, *Journal of Electronic Materials*, 44:836-841, 2015.
56. E. García Plaza, P.J. N. López, M A. C. Torija, J. M. C. Muñoz, Analysis of PLA geometric properties processed by FFF additive manufacturing: Effects of process parameters and plate-extruder precision motion, *Polymers*, 11(10): 1581, 2019.
57. H. Kang, R. Kitsomboonloha, J. Jang, V. Subramanian, High-performance printed transistors realized using femtoliter gravure-printed sub-10 µm metallic nanoparticle patterns and highly uniform polymer dielectric and semiconductor layers, *Advanced Materials*, 24(22): 3065, 2012.
58. D. Godec, S. Cano, C. Holzer, J. Gonzalez-Gutierrez, Optimization of the 3D printing parameters for tensile properties of specimens produced by fused filament fabrication of 17-4PH stainless steel, *Materials*, 13(3): 774, 2020.
59. J.B. Li, Z.G. Xie, X.H. Zhang, Q.G. Zeng, H.J. Liu, Study of metal powder extrusion and accumulating rapid prototyping, *Key Engineering Materials*, 443: 81-86, 2010.
60. T. Kurose, Y. Abe, M.V. Santos, Y. Kanaya, A. Ishigami, S. Tanaka, H. Ito, Influence of the layer directions on the properties of 316l stainless steel parts fabricated through fused deposition of metals, *Materials*, 13(11): 2493, 2020.
61. J.P. Li, J.R. de Wijn, C.A. Van Blitterswijk, K. de Groot, Porous Ti6Al4V scaffold directly fabricating by rapid prototyping: preparation and in vitro experiment, *Biomaterials*, 27(8): 1223-1235, 2006.
62. BASF, User Guidelines for 3D Printing Metal Parts, [https://forward-am.com/wp-content/uploads/2021/04/UserGuidelines\\_2021\\_03\\_29.pdf](https://forward-am.com/wp-content/uploads/2021/04/UserGuidelines_2021_03_29.pdf), 03.11.2024.