



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Toz yataklı/beslemeli eklemeli imalatta kullanılan partiküllerin uygunluk araştırması ve partikül imalat yöntemleri

*Investigation on the suitability of powder particulars used in powder bed/feed additive manufacturing and powder manufacturing methods*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Uçan KARAKILINÇ<sup>1</sup>, Bekir YALÇIN<sup>2</sup>, Berkay ERGENE<sup>3</sup>

*ORCID<sup>1</sup>:* 0000-0001-7782-3580

*ORCID<sup>2</sup>:* 0000-0002-3784-7251

*ORCID<sup>3</sup>:* 0000-0001-6145-1970

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Karakılınç U., Yalçın B. ve Ergene B., “Toz yataklı/beslemeli eklemeli imalatta kullanılan partiküllerin uygunluk araştırması ve partikül imalat yöntemleri”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 801-810, (2019).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.423707

# Toz Yataklı/Beslemeli Eklemeli İmalatta Kullanılan Partiküllerin Uygunluk Araştırması ve Partikül İmalat Yöntemleri

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Uçan KARAKILINÇ<sup>1</sup>, Bekir YALÇIN<sup>2\*</sup>, Berkay ERGENE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, YETEM Araş. ve Uyg. Merkezi, Tasarım ve İmalat Birimi, 32260, Isparta

<sup>2</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta

(Geliş/Received : 15.05.2018 ; Kabul/Accepted : 28.09.2018 )

## ÖZ

Toz metalürjisi (TM); seramik ve metal esaslı partiküllerin preslenmesi ve sinterlenmesi ile endüstriyel parça imalatı olarak bilinmekte ancak; lazer, makine, tasarım ve yazılım teknolojilerinin bir araya getirildiği eklemeli imalat yöntemi olarak adlandırılan yeni bir teknolojiyi bünyesine almıştır. Günümüz eklemeli imalat teknolojisi ile, polimer, seramik ve metal esaslı malzemelerin partikül (toz), tel, plaka/sac ve eriyik formları uygun şartlarda lazer, elektron ve ultraviyole ışınları kullanılarak katmanlı bir şekilde kullanışlı prototip ve/veya endüstriyel parça imalatı mümkün hale gelmiştir. Bu çalışmada, özellikle toz yataklı/beslemeli eklemeli imalat yöntemleri, bu yöntemlerde kullanılan partiküllerin karakterleri ve toz imalat yöntemleri ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Ayrıca yapılan bu literatür araştırmasında, partikül tane boyutunun, şeklinin, fiziksel özelliklerinin ve kimyasal saflığının, toz yataklı/beslemeli eklemeli imalat ile elde edilen ürünlerin özelliklerine etkisi ifade edilmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Toz Metalürjisi, eklemeli imalat, toz karakteri.

## Investigation on the Suitability of Powder Particulars Used in Powder Bed/Feed Additive Manufacturing and Powder Manufacturing Methods

### ABSTRACT

Powder metallurgy (P/M) is known as an industrial part manufacturing by powder pressing and sintering using ceramic and metal based particulars, but, P/M method has incorporated the additive manufacturing as a new method which is combined in technologies of laser, machine, design and software. The manufacturing of prototype and/or useful industrial parts has become possible as layer upon layer with today's additive manufacturing technology by using suitable laser, electron and ultraviolet beam in form of powder, wire, sheet and melt from polymer, ceramic and metal based materials. The literature survey has been done about the powder bed/feed additive manufacturing methods, the powder characterizations used in these methods and powder manufacturing methods in this study. In addition, the effect of dimension, shape, physical properties, and chemical purity of powders on the product properties manufactured by powder bed/feed additive manufacturing can be expressed with respect of investigations in the literature.

**Keywords:** Powder metallurgy, additive manufacturing, powder character.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel Toz Metalürjisi (TM), teknolojik malzemelerin seri olarak üretilmesine çok uygun ve nispeten küçük parçaların çok sayıda ve ekonomik üretimini sağlayan “son şekle yakın üretim” metodu olarak bilinmektedir. Bu yöntem, metal partiküllerin (tozların) imal edilmek istenen parçanın şekli verilmiş kalıp-zımba takımları ile sıkıştırılmasını ve daha sonra fırın ortamında sinterleme işlemlerini kapsamaktadır.

Tozun plastik deformasyon teknikleri; tek ve çift etkili soğuk/sıcak presleme, izostatik sıcak/soğuk presleme, toz enjeksiyon presleme olarak sıralanmakta olup ve bu uygulamaların özellikli, karmaşık şekilli, gözenekli ve

geniş alarım içeriğine sahip endüstriyel parçaların imalatı için sürekli geliştirilen bir imalat yöntemidir [1]. Geleneksel toz metalürjisinde kullanılan giriş malzemesi, metal ya da seramik tozlardır [2]. TM teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, makine, yazılım, tasarım, lazer ve toz üretim teknolojilerinin 1980’den sonra hızla gelişmesi sonucu, TM prototip üretim amaçlı dijital bir tasarımın plastik, metal ve seramik esaslı malzemelerden katmanlı imalat olarak adlandırılan bir teknolojiyi bünyesine almıştır. Ancak, çoğu araştırmacı, bu dinamik teknolojiyi eklemeli imalat yöntemi olarak değerlendirmekte ve üç boyutlu yazdırma/baskı (3-D Printing) olarak da nitelendirmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalara bakıldığında, başlangıçta prototip üretim amaçlı sektöre giren eklemeli imalatın özellikle medikal, havacılık, otomotiv, tüketici ürünleri, savunma

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : bekiryalcin@sdu.edu.tr

ve akademik sektörlere nüfuz ettiği anlaşılmakta olup, 2023 yılında da 21 milyar dolar pazar payına sahip olacağı ileri sürülmektedir [3]. Küresel bir danışmanlık şirketi olan Lux Research tarafından yürütülen bir araştırmada [4], otomotiv, medikal ve havacılık endüstrilerinde 3-B baskı kullanımının giderek arttığı ve buna bağlı olarak pazar payının %84 mertebesinde artacağı rapor edilmektedir. Bu bağlamda, sektörlerin imalat taleplerini karşılamak için değişik eklemeli imalat metotları geliştirilmiş ve çok geniş ürün yelpazesinin 3-B yazdırma olarak da adlandırılan bu teknolojiler ile imal edilebildiği ifade edilmektedir [5]. Bu gelişimlere bağlı olarak, ASTM tarafından eklemeli imalat teknolojileri araştırma grubu kurularak, eklemeli imalat yöntemleri ASTM F42' ye göre sınıflandırılmış ve standart altına alınmıştır. Bu standart incelendiğinde, eklemeli imalat genel olarak besleme malzemesinin formuna göre (toz, tel, sac ve eriyik), besleme malzemesine göre (plastik, metal, seramik, kağıt, mum, kompozit vs), kullanılan ışının tipine göre (lazer, ultraviyole, elektron gibi) ve yapılan işleme göre (ergitmeli/sinterlemeli/yapıştırıcı gibi) sınıflandırılarak yedi temel eklemeli imalat yönteminin ve bu yöntemlerin altında da toplam on beş eklemeli imalat metodun mevcut olduğu görülmektedir [6]. Ana yöntemler, fotopolimerizasyon, metal ekstrüzyon, malzeme püskürtme, yapıştırıcı imalat, toz destekli, direkt enerji depolama ve levha/sac laminasyon olarak sıralanmakta olup, bunlardan malzeme püskürtme, yapıştırıcı, toz destekli ve direkt enerji depolama yöntemlerinin metal esaslı ürünlerin imalatında tercih edildiği anlaşılmaktadır [6]. Şekil 1' de görüleceği üzere,

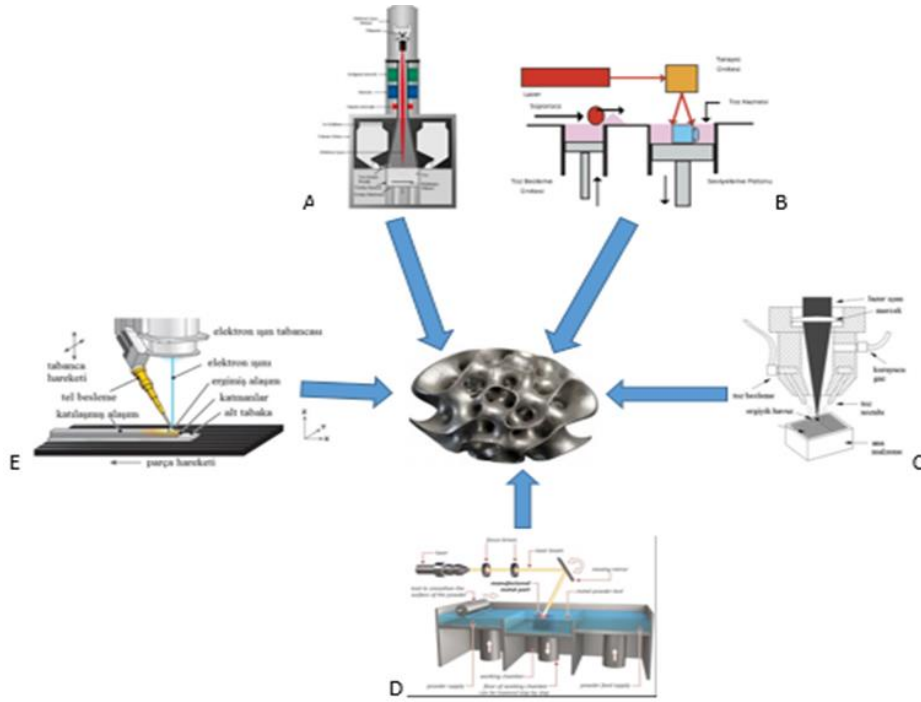
giriş malzemesi formuna göre sınıflandırılan eklemeli imalat yöntemlerinden, özellikle giriş malzemesi toz formunda olan metotlar bu çalışmada ele alınmıştır.

## 2. TOZ YATAKLI/BESLEMELİ VE PÜSKÜRTMELİ EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ (POWDER BED/FEED and SPRAY ADDITIVE MANUFACTURING METHODS)

Toz yataklı lazer ergitmeli ve/veya sinterlemeli sistemlerde; toz malzemeyi eritmek veya sinterlemek için lazer veya elektron ışını kullanılmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan ışınların çapı genellikle 20 ile 200 µm aralığında olup, 20-80 µm aralığındaki tozlar imalat platformuna serildikten sonra bu ışınların marifetiyle üretilmek istenen üç boyutlu tasarım taranarak ilk katman ya da tabaka oluşturma prensibine dayanır. İlk katmanın imalatından sonra imalat platformu tek bir katman kalınlığı kadar aşağıya indirilir ve toz serme pabucu ilk katmanın üzerine yeni toz tabakasını serer ve üretilmek istenen üç boyutlu cisim elde edilinceye kadar bu işlem tekrarlanmaktadır. Toz yataklı ve püskürtmeli eklemeli imalat yöntemlerinden yaygın olanları, Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Seçici Lazer Ergitme (SLM), Elektron Işın Ergitme (EBM), Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS), Lazer Geliştirilmiş Net Şekillendirme (LENS), Elektron Işın Eklemeli İmalat (EBAM) olarak bilinmekte ve Şekil 2'de gösterilmiş olup aşağıda bu yöntemler şematize edilmiştir.

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ														
İşlem	Lazer Kaynaklı Eklemeli İmalat Yöntemi						Sıcak Extrüzyon	Malzeme Püskürtme	Malzeme Yapıştırma	Elektron Işını				
	Lazer Ergitme			Lazer Polymerization										
İşleme Şekli														
ÜRETİM YÖNTEMLERİ		(M)		(M)		(M)		(M)		(M)		(M)		
	SLS	Metal/Plastik	DMD	Metal	SLA	Plastik	FDM	Komp. + Kağıt	3DP	Metal + Plastik	LOM	Kompozit + Kağıt	EBM	Metal
	SLM	Metal	LENS	Metal	SGC	Plastik	Robo-casting	Komp. + Kağıt	LJP	Plastik	SFP	Kompozit + Kağıt		
	DMLS	Metal	SLC	Metal	LTP	Plastik			MJP	Plastik				
			LPD	Metal	BIS	Plastik			BPM	Plastik				
				HIS	Plastik			Termo-jet	Plastik					
Kullanılan metaryal cinsi	Toz		Sıvı		Katı									
(M) Malzeme	Metal		Plastik		Kompozit/Kağıt									

Şekil 1. Eklemeli imalat yöntemlerinin işlemlerine göre sınıflandırılması (Classification of additive manufacturing methods according to their operations) [7]



**Şekil 2.** Toz yataklı ve püskürtmeli eklemeli imalat yöntemlerinden bazıları, (Some of the additive manufacturing methods from powder bed and spray additive manufacturing) a) EBM, b) SLM, c) LENS, d) DMLS, e) EBAM

**SLS (Selective Laser Sintering)**' de; haznenin içine konulan toz haldeki malzeme, lazer ışını yardımıyla, önceden belirlenmiş bir geometri dâhilinde sinterlemeye tabi tutulur. Bu yöntemde, imalat platformundaki toz katmanını sinterlemek için lazer ışını prosesteki hareketli aynaya gönderilir. İmalat platformuna yansıtılan lazer ışını ile katmanın sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra, alt kademeye geçilerek imalat döngüsü parça üretilene kadar devam eder. Bu yöntemde, toz platformda yığılı olduğu ve ürünü desteklediği için destek malzemesinin kullanımına gerek duyulmamaktadır. Bu sayede, hem yüzeyde pürüzlülüklerin oluşması minimize edilirken, hem de malzeme israfı en aza indirgenebilmektedir. Orta düzeyde yüzey kalitesine sahip SLS yönteminin, nispeten hızlı bir yöntem olması ve bazı metalik tozlar, naylon, poliamid, polyester ve çeşitli elastomer esaslı tozlar ile ürün elde edilebilmektedir. Gibson [8] yaptığı bir çalışmada; her bir malzeme için uygun SLS parametresinin seçilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Mercelis vd.[9], bu yöntemin dezavantajını ise, kalıntı gerilmelerin çok yüksek değerlere ulaştığını ve üretilen parçaların uç noktalarında çeki, ortalarında ise bası gerilmelerinin meydana geldiğini rapor etmektedirler. Ayrıca aynı çalışmada, üretilen malzemenin şekli, türü, sinterleme biçimi/yönü gibi parametrelerin, kalıntı gerilmelerini değiştirdiği de vurgulanmaktadır.

**SLM/DMLS (Selective Laser Melting/Direct Metal Laser Sintering)**; her iki eklemeli imalat yönteminde, SLS' ye benzer bir prensiple parça üretilmektedir. DMLS, tozun kimyasal olarak kaynaşana kadar ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa ısıtılarak sinterlenmesi ve

SLM' de ise tozun tam ergitilmesi ile imalat gerçekleşmektedir. Ayrıca, DMLS yönteminde alaşımların, SLM' de ise alüminyum gibi tek bileşenli metallerin kullanıldığı ifade edilmektedir [10]. SLS' nin aksine, SLM ve DMLS yöntemlerinde, imalat sürecinde oluşan yüksek kalıntı gerilmelerini en aza indirmek için toz destek elemanına (support) ve iç gerilme giderme tavlamasına ihtiyaç duyulmaktadır. Strano [11] yaptığı çalışmada; lazer ergitmenin sinterlemeye göre, daha iyi yüzeyler üretilmesine imkân sağladığını ve bu yöntem ile sinterlemede elde edilemeyen sıcaklık değerlerine ulaşılabileceğini, böylece yüzey tanımlamasının daha iyi yapılarak nispeten daha iyi yüzey kalitesine sahip ve aynı zamanda mekanik özelliklerin de sinterlemeye göre daha başarılı olduğunu belirtmektedir.

**EBM (Electron Beam Melting)**' de; toz partiküllerini eritmek için lazer yerine yüksek enerjili bir elektron ışını kullanılmaktadır. Odaklanan elektron ışını, istenen geometrik şekli esas alarak serilen ince toz katmanını tarar ve bu kesit alan üzerinde lokal eritmeyi sağladıktan sonra eriyiğin katılaşması ile katman oluşumu sağlanmaktadır. Yapı olarak SLM' deki gibi, tozların eritilmesi ve eriyik havuzunda soğuyarak katılaşması ve böylece katmanın oluşturulması, üretim haznesinin yüksekliğinin değiştirilmesi ile de katmanların üst üste üretimi yapılmaktadır. EBM' in, yüksek mukavemetli veya yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulan uygulamalar için ideal olduğu, bu yöntem ile %95 toz geri kazanımının sağlandığı, dövme ile elde edilen titanyum parça ile kıyaslanabilir olduğu ve döküm titanyum parçadan ise daha nitelikli parçaların üretilbildiği ifade edilmektedir [12]. EBM' de güç kaynağı olarak

kullanılan elektron ışınının, 3500 °C mertebesinde yüksek sıcaklıklara ulaşabilmesi ile daha yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin de eklemeli imalatla üretilmesi mümkün olabilmektedir [13]. Çeşitli titanyum alaşımları, refrakter metaller ve çeşitli süper alaşımlar kullanılarak tasarlanmış ürünler, EBM yöntemi ile karmaşık geometrilerin elde edilebilmektedir. Hiemenz' in yaptığı çalışmada [13], bu yöntemle parçaların ayrı ayrı imal edilmesinden ziyade, karmaşık yapıların yekpare bir şekilde imalatının mümkün olduğu belirtilmektedir. Böylece, hem işçilik süresinin azaltılması hem de montaj süresinin ortadan kaldırılması ile maliyetlerde bir iyileştirmelerin yapılabildiği vurgulanmaktadır. Redwood çalışmasında [10], EBM yönteminde, SLS' ye göre daha az enerji sarf edildiği ve daha hızlı bir imalat yöntemi olduğu ifade etmekte olup, ayrıca SLS ye göre EBM yönteminde kullanılan toz partikül boyutunun daha kaba olduğu, bu yüzden daha fazla katman kalınlığı ile imalat gerçekleştiği ileri sürülmektedir. Bununla birlikte, EBM ile imal edilen parçalarda daha az kalıntı gerilme ve distorsiyon oluşurken, destek yapılarının kullanımına nadiren ihtiyaç duyulduğu, diğer bir yandan ise, imal edilen yüzey kalitesi bakımından EBM' in, SLM ve DMLS ürünlerinden daha düşük olduğu ortaya konulmaktadır [10].

**LENS (Laser Engineered Net Shaping)** ile eklemeli imalatla, tozun bir ağızdan (nozül) püskürtülerek ergitilmesi esasına dayanır. Bu metotta, tozun püskürtülmesi için nozul, tozun ergitilmesi için lazer kafası ve katmanın oksitlenmesini önlemek için de gaz borusuna sahip bir biriktirme kafası kullanılmaktadır. Nozuldan toz partikülleri ve gaz borusundan da koruyucu inert gaz püskürtülür ve püskürtülen tozlar lazer ile ergitilerek lokal eriyik havuzu oluşturulur. Ergiyik havuzun katılaşmasından sonra aynı imalat döngüsü ile katman katman üretim devam edilmektedir. Bu nedenle, bu yönteme "üflenmiş toz" eklemeli imalat da denilmektedir [11]. Yöntem oldukça hassas olup, 0,1 mm ile birkaç milimetre arasında değişen kalınlığa sahip bir malzeme katmanının otomatik olarak biriktirilmesi, kaplama malzemesinin ana malzemesine iyi bir kayma direnci ile tutunması ve düşük ısı girdisinin alt tabakaya nüfuz etmesi nedeniyle diğer kaynak tekniklerine benzemediği ileri sürülmektedir [12]. Diğer eklemeli imalat yöntemlerinde yaşanan kalıntı gerilmeler, birleşme yüzey çatlakları ve gözenek oluşumu gibi mukavemet azaltıcı sorunların, LENS yöntemi ile en aza indirilebildiği de anlaşılmaktadır [13]. Ayrıca, LENS' de, hammaddenin ikincil işlemetabi tutulmadan imalatın elverişli bir şekilde gerçekleştirilebildiği ve özellikle titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum ve inconel alaşımlar ile parça imalatının yapılabildiği belirtilmektedir [10].

**EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing)** yönteminde; istenen üç boyutlu metal parçaları, tel veya toz formundaki malzemenin elektron ışını ile ergitilip birleştirilmesiyle imal edilmektedir. Bu eklemeli imalat yöntemi, LENS 'e benzemekte olup, kullanılan elektron

ışınlarının, LENS' te kullanılan lazerlere göre daha etkili olduğu ifade edilmektedir [10]. Ayrıca, EBAM ile, 6 m'den daha uzun ve geniş parçaların düşük malzeme sarfiyatıyla yüksek kalitede üretilebilmesinden dolayı bu yöntemin diğer eklemeli imalat yöntemlerine göre önemli bir avantaja sahip olduğu ileri sürülmektedir [14].

### 3. TOZ ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE TOZLARIN KARAKTERİZASYONU (POWDER MANUFACTURING METHODS and CHARACTERISTICS OF POWDERS)

Toz üretim teknikleri mekanik, kimyasal, elektrolitik ve atomizasyon olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. Bir araştırmaya göre, elektrolitik ve atomizasyon yöntemlerinin, fiziksel metot olarak nitelendirildiği görülmüştür [15]. Partikül esaslı parça imalatında, imal edilecek ürününden beklenen özellikler göz önüne alınarak, uygun toz malzemenin seçimi, seçilecek toz şekli, boyutu, akış karakteri, görünür yoğunluğu gibi özelliklerine bağlı olarak toz üretim yönteminin seçimi, imalat yönteminin seçimi (konvansiyonel TM yöntemleri ve eklemeli imalat) olarak yol izlenmektedir. Çizelge 1'de eklemeli imalatla kullanılan bazı tozların üretim yöntemleri görülmektedir.

**Çizelge 1.** Eklemeli imalatla kullanılan bazı tozların üretim yöntemleri (Manufacturing methods of some powders used in additive manufacturing) [16]

Malzeme	Yöntem
Takım çelikleri	Su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, santrifüj yöntemi
Alüminyum	Vakum atomizasyonu
WC-Co	Mekanik öğütme
Kompozitler	Mekanik alaşımlama, Plazma atomizasyon
Bakır	Elektrolitik, su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, kimyasal yöntemler
Bakır, Pirinç ve Nikel alaşımları	Su atomizasyonu, gaz atomizasyonu
Altın	Elektrolitik, su atomizasyonu, kimyasal yöntemler
Çelik	Su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, santrifüj yöntemi
Gümüş	Su atomizasyonu, elektrolitik, kimyasal yöntemler
Titanyum	Kimyasal yöntemler, santrifüj yöntemi, gaz atomizasyonu
Süperalaşımlar	Mekanik alaşımlama, gaz atomizasyon, santrifüj yöntemi

Gaz atomizasyonu ile, toz akıcılığı yüksek ve küresel tozlar imal edilebildiğinden dolayı, eklemeli imalatla kullanılacak tozların eldesi için bu yöntem daha çok tercih edilmektedir. Bununla birlikte, gaz atomizasyonu ile çeşitli alaşımların toz formlarının üretilebildiği,

homojen tane boyut dağılımı sayesinde iyi bir toz yoğunluğuna sahip olduğu ve nispeten tozların tekrar kullanılabilir özellikte olduğu vurgulanmaktadır [17-21]. Ayrıca, eklemeli imalatta su atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozların da kullanıldığı rapor edilmektedir. Ancak, su atomizasyonu ile elde edilen tozların genellikle düzensiz şekilli olmalarından dolayı partikül içi yoğunluklarının düşük olması sonucu toz akış kabiliyeti, gaz atomize küresel tozlara göre daha düşüktür. Eklemeli imalat yöntemlerinin kendine özgü çalışma prensiplerinden dolayı, seçilen toz partiküllerin dağılımı ve boyutlarında da farklılıkların olabileceği, örneğin, SLM' de 15 µm ila 63 µm arasında toz boyutu önerilirken, EBM için ise toz boyut dağılımının 45 µm ila 105 µm arasında olması gerektiği ifade edilmektedir [18-20]. Çizelge 2'de, eklemeli imalata uygun toz seçimi için, farklı imalat yöntemleri ile üretilen tozların karakterizasyonları ile birlikte avantaj ve dezavantajları verilmektedir.

**Gaz atomizasyonu yönteminde;** Şekil 3-a'da görülebileceği üzere, pota içerisindeki ergimiş metalin bir nozuldan şerit halinde akarken, uygun jetler ile azot ve argon gibi nötr gazların belli basınç ve hızla püskürtülerek ergimiş metalin çok küçük damlacıklar halinde atomize edilmesi ve soğuyup sertleşmesi ile katılaşmış partiküller elde edilmektedir. Bu yöntem,

parametrelerinin etkilediği ifade edilmekte ve sıvı metali atomize etmek için basınçlı akışkan olarak hava, azot, argon ve helyum gibi gazlar kullanılabilir [23].

**Plazma döner elektrot (santrifüj atomizasyon)** yönteminde; tozun elde edilmesi için, istenilen toz malzemesinin elektrot çubuk formu (ergiyen) ile ergimeyen tungsten elektrot arasında ark oluşturulur. Ergiyen elektrotun belli bir hızda döndürülmesiyle, elektrik arkı altında oluşan damlacıklar santrifüj etkisi ile savrulur ve parçalanır ve katılarak sistemin toz toplama tankına dolar.

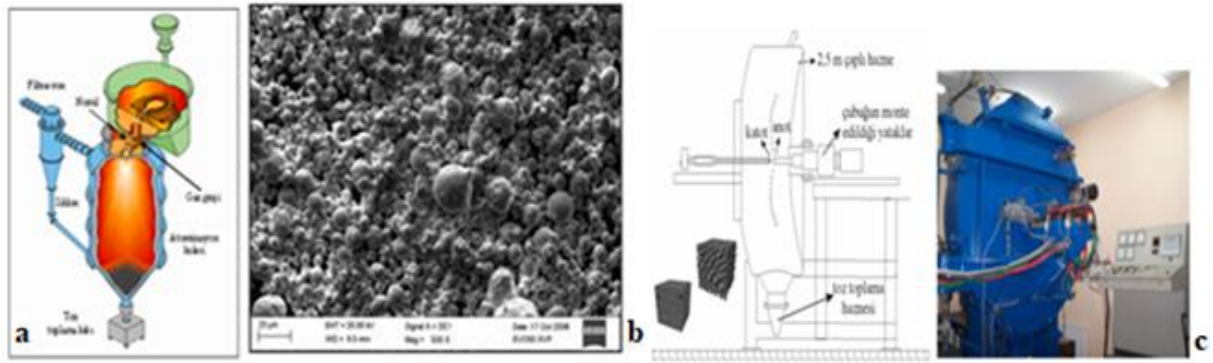
Oksidasyonu önlemek için toz toplama tankı belli bir vakum ile helyum, argon gibi asal gazlarla korunmakta [27] ve bu yöntemle kobalt, krom ve titanyum tozlarının elde edilebildiği anlaşılmaktadır. Şekil 3-c'de döner plazma elektrot toz üretim ünitesi verilmiştir. Eklemeli imalatla üretimi gerçekleştirilen metallerin özellikleri bazı araştırmacılar tarafından analiz edilmiş ve Spierings ve Levy' in yoğunluk çalışması [28]'nin, Kruth vd. ve Simchi' nin mikroyapı çalışmaları [29]; Spierings vd. [30] statik mekanik deneyleri üzerine yaptığı çalışmaları irdelenmiş olup, bu çalışmalarda parça yapım yönünün anizotropikliği etkilediği ve statik mekanik özelliklerin geleneksel dövme ile benzer aralıkta olduğu ileri sürülmektedir.

**Çizelge 2.** Eklemeli imalatta kullanılan bazı tozların özellikleri (Properties of some powders used in additive manufacturing) [21]

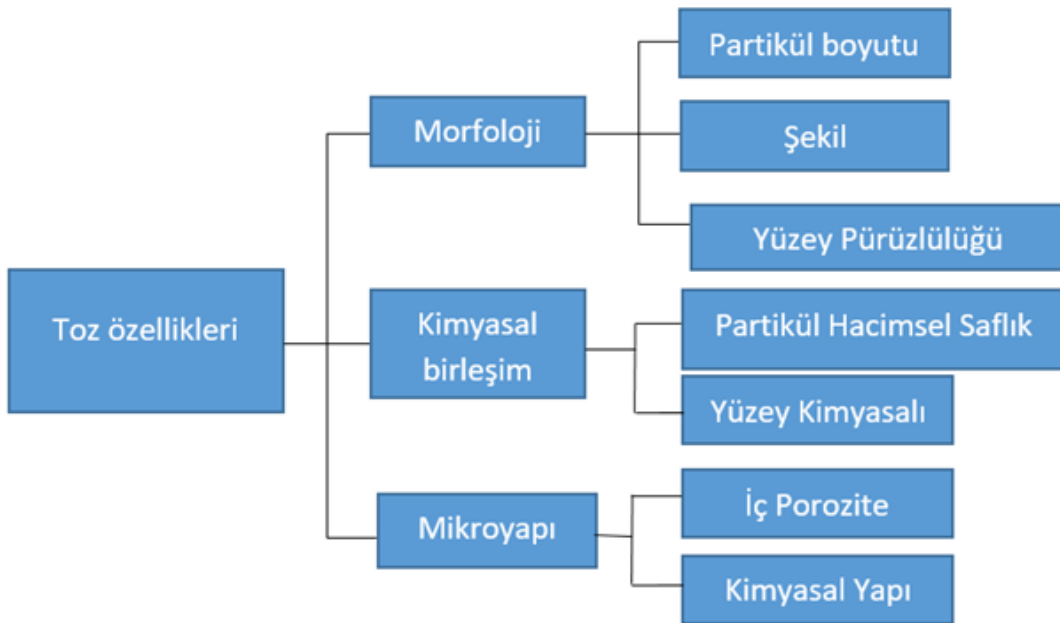
Toz İmalat İşlemi Tablosu			
İmalat İşlemi	Partikül boyut aralığı	Avantajları	Dezavantajları
Su atomizasyon	0-500 µm	Yüksek üretim oranı, büyük partikül boyut aralığı, ingot şeklinde hammadde	Suyun taşınımı için ön işlemler, düzensiz partikül şekli, geniş partikül boyutu dağılımı
Gaz atomizasyon	0-500 µm	İngot şeklinde hammadde, geniş aralıkta alaşımlar elde edilebilir, yüksek verim, büyük partikül boyutu aralığı, küresel partiküller	Dağılımda geniş parçacık boyutu
Plazma atomizasyon	0-200 µm	Çok küresel partiküller	Hammadde tel veya toz halinde olmalıdır, yüksek fiyat
Plazma döner elektrot işlemi	0-100 µm	Yüksek saflıkta tozlar, çok küresel partiküller	Düşük üretilebilirlik, yüksek fiyat
Santrifüj atomizasyon	0-600 µm	Büyük partikül boyutu aralığı, dar parçacık boyutu	Son derece ince toz yapmada zorluk
Hibrit- dehibrit işlemi	45-500 µm	Düşük fiyat	Düzensiz partikül şekli, kırılmalı bir hidrür oluşturan metallerle sınırlı

eklemeli imalata uygun, ince ve küresel metal tozlarının üretilmesinde en yaygın kullanılan metot olup, özellikle çelik türleri, alüminyum alaşımları, değerli metaller vb. için yaygın olarak tercih edilmektedir [22]. Bu yöntemde toz karakterini, gazın cinsi, gaz basıncı, gaz ve sıvı metal akış debileri ile nozul geometrisi gibi üretim

Eklemeli imalat için tozun imalatı gerçekleştirildikten sonra, tozun morfolojisi, kimyasal bileşimi ve mikro yapısının karakterize edilmesi gerektiği bilinmekte olup toz karakterizasyonu ile ilgili özellikler Şekil 4'de verilmiştir.



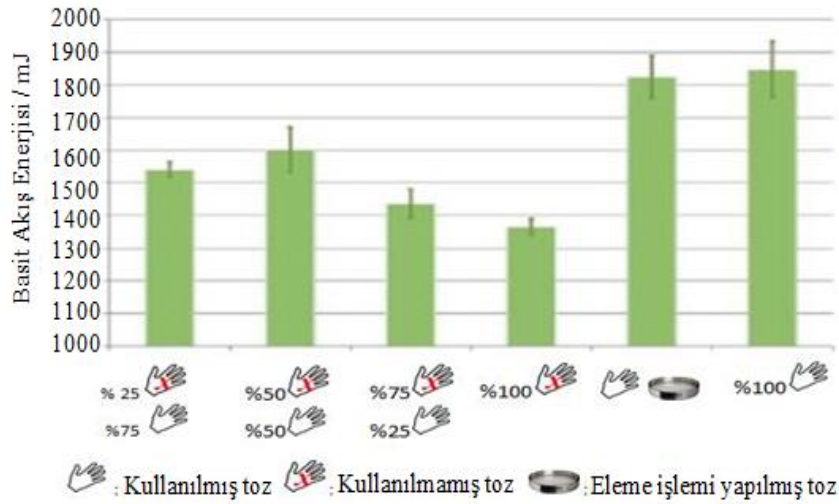
Şekil 3. a) Gaz atomizasyonun şekli (The shape of gas atomization) [24], b) Gaz atomizasyonu uygulanmış <20 µm 17-4PH tozunun SEM görüntüsü (SEM image of gas atomized <20 µm 17-4PH powder) [25], c) Döner plazma elektrot toz üretim ünitesi (Rotary plasma electrode powder production unit) [26]



Şekil 4. Toz özelliklerinin sınıflandırılması (Classification of powder properties) [31]

**İlk olarak tozun morfolojik yapısı;** tozun partikül boyutu, tozun şekli ve partikülün yüzey pürüzlülüğü ile tanımlanmaktadır. Bu belirlemelerin eklemeli imalatın minimum parça katman kalınlığı ve hedeflenen yoğunluğu elde etmede önemli olduğu ve ayrıca partiküllerin akış ve paketleme özelliklerini belirleyen önemli parametrelerdir. Yapılan bir çalışmada [29]; toz yataklı proseslerde tozun platforma serildikten sonra, ilgili parametrelerin toz yoğunluğunu etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, üretilen eklemeli imalat ürünlerinde hedeflenen boyutsal ve yüzey kalitesini sağlamak adına toz özelliklerinin incelenmesi ve kontrol edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Hawkins [32], toz parçacıklarının morfolojisini karakterize eden birçok metodu kapsamlı bir şekilde gözden geçirmiş, imal edilen toz büyüklüğünün homojen olmasının platforma serim sırasında homojen tabaka kalınlığı elde edilmesine katkıda bulunduğunu ve tozun akışkanlığının da, tozların platformuna yayılmasında önemli bir role sahip olduğu

ileri sürmektedir. Ayrıca, partiküllerin üretimi sırasında çeşitli toz şekillerinin meydana gelebileceği (düzensiz, açısız, küresel, gözenekli, çubuksu gibi) ve düzensiz toz partiküllerinin diğer toz parçacıklarıyla temas alanlarının minimum olması nedeniyle, yalnızca küresel şekilli parçacıklar en yüksek akıcılığı sağlayabileceği de ifade edilmektedir. Böylece, küresel morfolojiye sahip tozların serilmesi sırasında, daha az taneler arası sürtünme kuvvetinin sağlanabileceği ve bu sayede iyi bir toz akış karakterinin elde edilebileceği vurgulanmaktadır. Herbir eklemeli imalat yöntemi, kendi gereksinimlerini karşılayacak özelliklere sahip tozun belirlenmesinde, tozların partikül boyutunun tayin edilmesi gerektiği de belirtilmektedir [32]. Diğer yandan Freeman [33], tozların akış karakteri üzerine yaptığı çalışmada, daha önce kullanılmış tozların akış yeteneğinin, kullanılmamış tozlara göre düşük olduğunu belirtmektedir ve Şekil 5’de daha önce kullanılan ve yeni tozların akış enerjileri verilmektedir.



Şekil 5. Tozların akış karakteri (Flow character of powders) [36]

Bu bağlamda Lyckfeldt [34]; eklemeli imalatla kullanılan tozların özelliklerini daha iyi ölçmek için bir çalışma yapmıştır. Yaptığı çalışmada, toz partiküllerinin benzer boyut dağılımlarına sahip olmasına rağmen, boyut dağılımındaki değişimlerin farklı toz akışına sebep olabileceğini ve eklemeli imalatla üretilen parçanın özelliklerini etkileyebileceğini rapor edilmektedir. Bu bağlamda, metal tozu karakterizasyonunu belirlemede Hall akış metodunun yaygın olarak kullanıldığı ve çevresel koşulların sonuçları etkilediği ileri sürülmektedir. Spierings vd. [30] yaptıkları çalışmada, 7.12  $\mu\text{m}$  ila 24.17  $\mu\text{m}$ , 19.84  $\mu\text{m}$  ila 41.13  $\mu\text{m}$  ve 15.26  $\mu\text{m}$  ila 55.54  $\mu\text{m}$  arasındaki partikül boyut dağılımına sahip üç farklı toz karakteri ile mekanik test numunelerini eklemeli imal etmişler ve yapılan testlerin sonucunda mekanik dayanım ve yüzey kalitesinin düşük partikül boyut aralığı ile arttığını deneysel olarak ortaya koymuşlardır. Hoegesa vd. [35] yaptıkları çalışmada ise, yüksek yoğunluklu parça imalatı için partikül boyutu ve küresellik özelliklerinin ön plana çıktığını ve yine yüksek toz akış karakterinin önemli olduğunu ve akışkanlığın da tozun şekline ve boyutuna bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

**Tozun kimyası;** toz partikülünün temel bileşimini belirtir ve imalatı yapılan parçanın özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği için bilinmesi gereken önemli bir özelliktir. Toz kimyası, toz yüzey kimyası ve partikül hacimsel saflık kimyası olmak üzere iki şekilde tanımlanmaktadır [29]. Toz yüzeyleri aynı malzemenin yığın halindeki yüzeylerinde de büyük ölçüde farklılık gösterebilir. Örneğin, paslanmaz çeliklerde yaklaşık 1-3 nm kalınlığında koruyucu  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  filmi oluşma eğiliminin olduğu ve bu oksit film tabakanın yüzey saflığını değiştirdiği bilinmektedir [37]. Ayrıca, toz imalat sürecinde, toz partikülünün iç yapısında beklenen kimyasal içerikten farklı impüriteler oluşabilir. Gerek toz yüzeyinde gerekse iç yapısında oluşan bu istenmeyen oksitler, eklemeli imalatla ürünün kalitesinde değişime neden olmaktadır. Bu yüzden, eklemeli imalatla kullanılan tozların kimyasal özelliklerini belirlemek için,

X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi, Auger Elektron Spektroskopisi, Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi, İndüktif Olarak Birleştirilmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi ve İnert Gaz Füzyonu gibi teknikler kullanılmaktadır. Simchi [29] yaptığı çalışmada, tozun ihtiva ettiği oksit miktarının elde edilen nihai ürün üzerindeki etkilerini incelemiş ve tozdaki oksijen içeriğindeki artışın SLS ile imal edilen parçaların gözenekliliğinde artışa neden olduğunu ve bunun ise istenmeyen bir durum olduğunu ifade etmektedir. Tang vd'de [38], tozun tekrar kullanımından dolayı, EBM ile Ti-6Al-4V ürününün oksijen içeriğinde artışa sebep olduğu, kullanılmış tozlarla eklemeli imalatın, artan oksijen miktarından dolayı tozun dörtten fazla kullanılamayacağı vurgulamaktadırlar. Ardila vd. [39]; geri dönüşümle elde edilmiş IN718 tozunu SLM ile imalatla kullanmışlar ve imal edilen numunelerde kimyasal içerik değişimini izlemek için Enerji Dağılımlı Röntgen Spektroskopisi (EDS) tekniğini kullanarak, kimyasal içeriğin her defasında değiştiğini ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak, bu kimyasal kararsızlıktan dolayı, üretilen parçaların kırılma tokluğunda belirgin bir değişiklik gözlemlenmediğini ileri sürmektedirler.

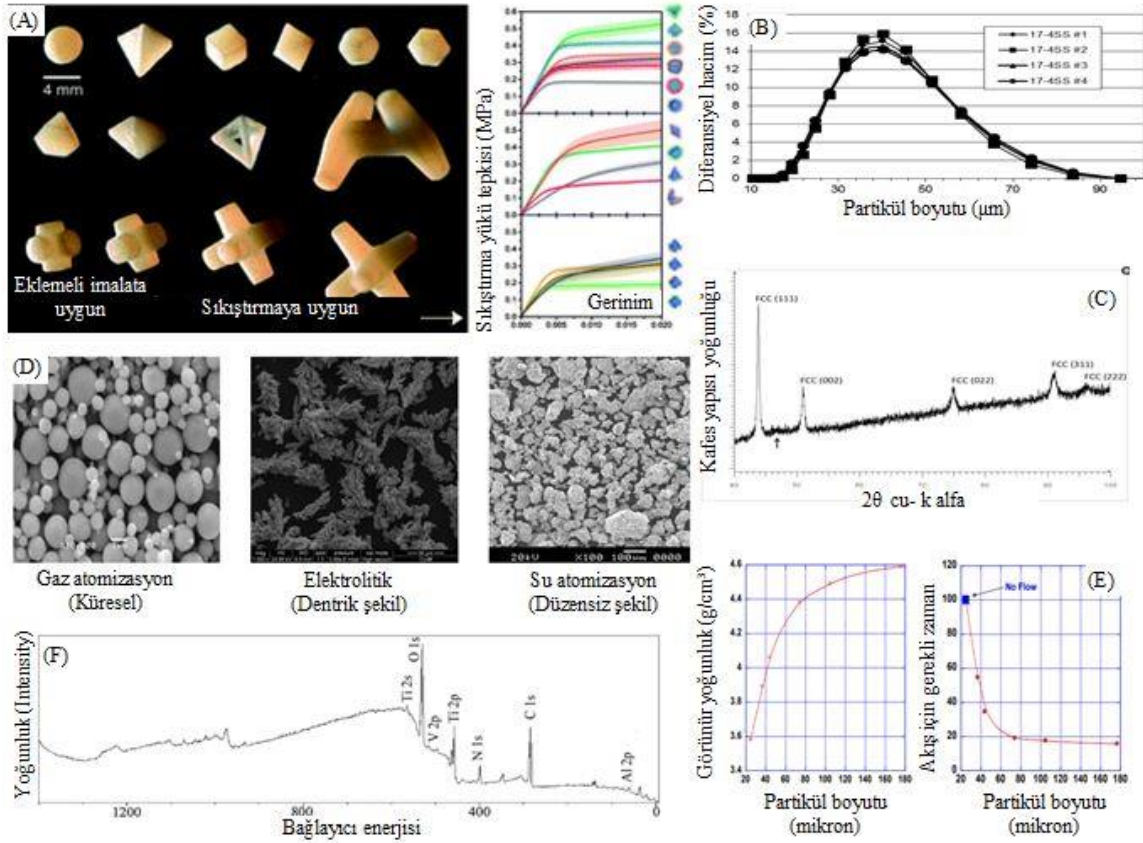
**Tozun mikroyapısı;** toz partiküllerin gözenekliliği (porozite) ve kristal yapısı ile karakterize edilmektedir. Eklemeli imalatla kullanılacak tozun uygunluk araştırmasında, partikülün bünyesindeki gözenekliliğinin kristal yapı oluşumunu etkilemesinden dolayı, Metallografi, Taramalı Elektron Mikroskopu (TEM), X-ışını kırınımı (XRD), Termal Analiz (TA) yöntemleri ile tozun mikroyapısı incelenmektedir. Starr vd. yaptıkları çalışmada [40], azot ve argon atmosferinde atomize edilen iki farklı toz tipini XRD ile incelemişler ve azot ile atomize edilen tozun östenitik yapıya sahip olduğunu, argon ile atomize edilen tozun ise çoğunlukla martenzit yapıya sahip olduğunu deneysel olarak tayin etmişlerdir. Murr vd. [41], argon ve azot gazı ortamlarında, oluşan faz üzerine 17-4 PH'un muhtemel etkisini belirlemek için XRD yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında, argon



gazının martenzitik yapıya dönüşümü sağladığını, diğer yandan azot gazının ise bir faz dönüşümüne sebep olduğu ile ilgili analiz sonucuna raslanıldığını rapor etmektedirler. Bu önemli farklılığın, eklemeli imalat sürecinde kullanılan gazın ısı iletkenliğindeki farklılıktan kaynaklanabileceği ileri sürülmektedir. En önemlisi de, partikül bünyesindeki gözenekliliğinin uzun mikroyapısını ve partikül yoğunluğunu değiştirdiğini ve dolayısıyla gözeneklilikten doğan düşük yoğunluğun dezavantaj olduğu vurgulanmaktadır. Maskery vd. [42], EBM ile üretilen AlSi10Mg alaşımındaki porozite oluşumunu incelemişler ve ısı işlem şartlarının mikroyapı ve sertliği değiştirdiğini, ancak gözenek şekli, miktarı ve boyutu üzerine ölçülebilir etkisinin olmadığını deneysel olarak belirlemişlerdir. Ayrıca, düz ve disk şekline sahip büyük gözeneklerin yapım yönüne dik yönde geliştiğini ortaya koymuşlardır. Toz karakterizasyonu ile ilgili yapılan bazı analiz çalışmaları Şekil 6' da verilmiştir [43-47].

yöntemleri ve imal edilen tozların karakterizasyonu ile ilgili bilgiler derlenmiştir. Özellikle, literatür araştırması sırasında eklemeli imalatın önemi, ülkemiz endüstrisinde hangi sektörlere girebileceği ve yaygınlaşması, ülkemizin polimer esaslı eklemeli imalatla nispeten mesafe kattığı ancak metal eklemeli imalat makinelerinin ve titanyum, inconel, paslanmaz çelik gibi tozların üretiminde dışa bağıllığın giderilmesi gerektiği ile ilgili sonuca ulaşılmıştır. Bu araştırma ile aşağıda sıralanan bazı sonuçlara da ulaşılmıştır:

- Toz partiküllerinin kullanıldığı temel eklemeli imalat yöntemlerinin, SLS, SLM, EBM, DMLS, LENS ve EBAM olduğu görülmüştür. Toz beslemeli/yataklı bu eklemeli imalat yöntemlerinin kendine özgü çalışma prensiplerinden dolayı, seçilen toz partiküllerin dağılımı ve boyutlarında farklılıkların olabileceği, örneğin, SLM' de 15 µm ile 63 µm arasında toz boyutu önerilirken, EBM için ise toz boyut



**Şekil 6.** Eklemeli imalata uygunluk araştırması,(Additive manufacturing conformity survey) a) Eklemeli imalata ve geleneksel presleme ile yüksek yoğunluklu TM parça imalatına uygun tozlar,( Powders suitable for the manufacture of high density TM parts by additive manufacturing and conventional pressing) b) Lazer difraksiyonu ile partikül boyut dağılımının tayini,( The particle size distribution with laser diffraction) c) XRD ile partikül kafes parametresinin araştırılması,( Investigation of the particle lattice parameter with XRD) d) SEM ile toz üretimine göre partikül oluşumlarının araştırılması,( Investigation of particle formation according to powder manufacturing method by SEM) e) Hall akış analizi ile akış karakterinin tayini,(Determination of flow character by Hall flow analysis) f) Toz partikülünde spektral analiz (Spectral analysis in powder particle) [43-47]

#### 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Çok sayıda ulusal ve uluslararası çalışmanın irdelenerek hazırlandığı bu makalede, toz beslemeli/yataklı eklemeli imalat yöntemleri, bu yöntemlere toz sağlayan toz imalat

dağılımının 45 µm ile 105 µm arasında tozların tercih edildiği görülmüştür.

- Toz partiküllerin imalatında, su/gaz atomizasyon, plazma atomizasyon, plazma döner elektrot ve

santrifüj atomizasyon yöntemlerinin kullanıldığı; bunlardan gaz atomizasyon yönteminin eklemeli imalata toz sağlamada daha elverişli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, eklemeli imalat sonrası tozların geri dönüşümünün mümkün olduğu ve geri dönüştürülen tozların sınırlı tekrarlama ile kullanılabilirliği anlaşılmaktadır.

- Eklemeli imalat ürününün kalitesini etkileyen uygun toz seçimi ve karakterizasyonunda, tozun morfolojik yapısı, şekli, yüzey pürüzlülüğü, partikül yüzey ve hacimsel saflığı, iç porozitesi ve kimyasal içeriğinin analiz edilmesi gerektiği vurgulanmış olup, yüksek akış karakteri, küresel partikül şekli ve daha az iç porozite, yüksek kimyasal saflık, iyi partikül yüzey kalitesi ve düzgünlüğü göz önüne alınarak, bu özelliklere sahip partiküllerin toz sermede yüksek performanslarından dolayı seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Eklemeli imalat ile parça üretimi için partikül boyutu ve küresellik özelliklerinin ön plana çıktığı, toz akışkanlığının tozun şekline ve boyutuna bağlı olduğu görülmüştür. Şekil 6-e' ye göre, partikül boyutunun azalmasıyla toz akış hızının düştüğü, metal eklemeli imalata uygun olan toz boyutlarının, hall akış eğrisinin yatıklaşmaya başladığı 60-80 mikron aralığında olduğu anlaşılmaktadır.
- Bu bağlamda, eklemeli imalatta kullanılacak tozun uygunluk araştırmasında, partikülün bünyesindeki gözenekliliğinin parça yoğunluğu ve kristal yapısını etkilemesinden dolayı, imalata başlamadan önce seçilen tozların mikroyapısının TEM, XRD ve TA analizleri ile incelenmesi tavsiye edilmektedir. Ayrıca, tozların kimyasal karakterizasyonu için, X-ışını fotoelektron spektroskopisi, auger elektron spektroskopisi, enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi, indüktif olarak birleştirilmiş plazma optik emisyon spektroskopisi ve inert gaz füzyonu gibi tekniklerin kullanılabilirliği görülmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] TTMD – Türk Toz Metalurjisi Derneği Online Yayını “Toz Metalurjisi”, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, [www.turktoz.gazi.edu.tr](http://www.turktoz.gazi.edu.tr), Ankara, 2003.
- [2] Öveçoğlu, M. L. “Toz Metalurjisi: Tarihsel Gelişim, Üretim Aşamaları ve Yeni Eğilimler”, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, **TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Yayını**, İstanbul, 449475, 1997.
- [3] Yalçın B., Ergene B., “Endüstriyel Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemeli İmalat Teknolojisi ve Metalurjisi”, **SDÜ. Uluslararası Teknolojik Araştırmalar Dergisi.**, 9,3: 65-88, (2017).
- [4] Lux Research Building the future: Assessing 3-D printing's opportunities and challenges. 2013. Boston: Lux Research Inc.
- <http://www.luxresearchinc.com/research>. Erişim tarihi: 20 Ocak 2018.
- [5] Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları, Sektör Değerlendirme Raporu, STM Mühendislik Teknoloji Danışmanlık, 1-22, Ankara, (2015). [https://www.stm.com.tr/documents/file/Pdf/1.katmanli\\_imalat\\_teknolojileri\\_raporu](https://www.stm.com.tr/documents/file/Pdf/1.katmanli_imalat_teknolojileri_raporu).
- [6] Additive Manufacturing Research Group; About Additive Manufacturing. <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/> (2017)
- [7] Sunpreet S., Seeram R., Rupinder S., “Material Issues in Additive Manufacturing: A review”; **Journal of Manufacturing Processes**, 25:185-200, (2017).
- [8] Gibson I., Shi D., “Material Properties and Fabrication Parameters in Selective Laser Sintering Process”, **Rapid Prototyping Journal**, 3-4: 129-136, (1997).
- [9] Mercelis P., Kruth J.P., “Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting”, **Rapid Prototyping Journal**, 12-5: 254-265, (2006).
- [10] Redwood B., Additive manufacturing technologies overview, (2017). <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview>,
- [11] Strano, G. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting, **Journal of Materials Processing Technology**, 213-4: 589-597, (2013).
- [12] Metal AM; "Metal Katkı Üretim Süreçleri" başlıklı makale [http://www.metal-am.com/introduction\\_to\\_metal-additive\\_manufacturing/processes](http://www.metal-am.com/introduction_to_metal-additive_manufacturing/processes).
- [13] Hiemenz J., “Electron beam melting”, **Advanced Materials & Processes**, 165-3: 45-46, (2007).
- [14] <http://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages-of-wire-am-vs-powder-am/>
- [15] Upadhyaya, G.S. “Powder Metallurgy Technology”, **Cambridge International Science Publishing**, 1996.
- [16] Kurt A.O., 2004-2010 [www.aokurt.sakarya.edu.tr/dersler/dersler.htm](http://www.aokurt.sakarya.edu.tr/dersler/dersler.htm).
- [17] Toz Metalurjisi, Toz Üretim Teknikleri Ders Notları. [http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder\\_product.html](http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html). Erişim tarihi: 4 Ocak 2018.
- [18] Sadowski M, Ladani L, Brindley W, Romano J., “Optimizing quality of additively manufactured Inconel 718 using powder bed laser melting process”, **Additive Manufacturing**, 11:60–70, (2016).
- [19] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., “Additive manufacturing of metals”, **Acta Mater**, 117:371–92, (2016).
- [20] Helmer H., Bauerei A., Singer R.F., Körner C., “Grain structure evolution in Inconel 718 during selective electron beam melting”, **Mater Sci Eng A**; 668: 180-7, (2016).
- [21] Dawes B.J., Bowerman R., “Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain”, **Johnson Matthey Technol. Rev.**, 59:243–256, (2015). doi:http://dx.doi.org/10.1595/205651315X688686.
- [22] <http://eklemeliimalat.info.tr/3-eklemeli-imalat-icin-metal-tozlari/#3.1.2>. Erişim tarihi: 10 Ocak 2018.

- [23] Uslan, İ., Küçükarslan, S., “Kalay Tozu Üretimine Gaz Atomizasyonu Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25-1: 1-8, (2010).
- [24][http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder\\_product.html](http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html) . Erişim tarihi: 28 Aralık 2017.
- [25]<http://eklemeliimalat.info.tr/3-eklemeli-imalat-icin-metal-tozlari/#3.1>. Erişim tarihi: 12 Ocak 2018.
- [26] Yamanoglu R., Kocaeli Üniversitesi, Toz Üretim Yöntemleri Ders Notları, <http://docplayer.biz.tr/32188483-Toz-uretim-yontemleri-yrd-doc-dr-ridvan-yamanoglu.html>.
- [27] Evcin A., Afyon Kocatepe Üniversitesi; Toz Üretim Teknikleri Ders Notları, 2007 <http://www.kimmuh.com/evcin/toz/toz1a.pdf>.
- [28] Metal Eklemeli İmalat(M.E.I.) Teknolojileri, Destek Yapılar ve Hücreli Yapılar Ders Notları, Dumlupınar Üniversitesi Açık Ders Notları Sistemi. <http://www.adn.dpu.edu.tr/pluginfile.php>. Erişim tarihi: 20 Ocak 2018.
- [29] Simchi A., “The role of particle size on the laser sintering of iron powder”, *Metall. Mater. Trans. B.*, 35:937–948, 2004. doi:10.1007/s11663-004-0088-3.
- [30] Spierings A.B., Herres N., Levy G., “Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts”, *Rapid Prototyping J*:17-3:195–202, (2011).
- [31] Austin T. Sutton, Caitlin S. Kriewall , Ming C. Leu, Joseph W. Newkirk, “Powders For Additive Manufacturing Processes Characterization Techniques And Effects On Part Properties”, *Solid Freeform Fabrication, Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper*, 1004-1030, (2016).
- [32] A.E. Hawkins, “The Shape of Powder-Particle Outlines”, *Research Studies Press Ltd.*, England, (1993).
- [33] Freeman R. “Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders – A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell”, *Powder Technology*, 174:25–33, (2007).
- [34] Lyckfeldt, O., *Euro PM 2013 Kongresi ve Sergisi Bildirileri Kitabı* , Cilt. 2, Sayfa: 225-230, Avrupa Toz Metalürjisi Derneği, Shrewsbury-İngiltere, (2013).
- [35] Hoegesa S., Zwirenb A., Schadeb C., “Additive manufacturing using water”, *Metal Powder Report*, 72, (2017).
- [36] Clayton, J. “Optimising metal powders for additive manufacturing”, *Metal Powder Report*, 69-5:14-17 (2014), [https://doi.org/10.1016/S0026-0657\(14\)70223-1](https://doi.org/10.1016/S0026-0657(14)70223-1)
- [37] S.J. Kerber, J. “*Tverberg, Stainless Steel, Adv. Mater. Process*”. 33–36, (2000).
- [38] Tang H.P., Qian M., Liu N., Zhang X.Z., Yang G.Y., Wang J., “Effect of Powder Reuse Times on Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V by Selective Electron Beam Melting”, *The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 67: 555–563, (2015). doi:10.1007/s11837-015-1300-4.
- [39] Ardila L.C., Garciandia F., González-Díaz J.B., Álvarez P., Echeverria A., Petite M.M., Deffley R., Ochoa J., “Effect of IN718 Recycled Powder Reuse on Properties of Parts Manufactured by Means of Selective Laser Melting”, *Phys. Procedia.*, 56: 99–107, (2014). doi:10.1016/j.phpro.2014.08.152.
- [40] Starr T., Rafi K., Stucker B., Scherzer C., “Controlling phase composition in selective laser melted stainless steels”, *Proc. Solid Free. Fabr. Symp.*; 439–446, (2012).
- [41] Murr L.E., Martinez E., Hernandez J., Collins S., Amato K.N., Gaytan S.M., Shindo P.W., “Microstructures and properties of 17-4 PH stainless steel fabricated by selective laser melting”, *J. Mater. Res. Technol.*, 1: 167–17, (2012). doi:10.1016/S2238-7854(12)70029-7.
- [42] Maskery I, Aboulkhair N.T., Corfield M.R., Tuck C., Clare A.T., Leach R.K., Wildman R.D., Ashcroft I.A., Hague R.J.M., “Quantification and characterisation of porosity in selectively laser melted Al-Si10-Mg using X-ray computed tomography”, *Mater Charact.*, 111:193–204, (2016).
- [43] Heim K, Bernier F, Pelletier R, Lefebvre L., “High resolution pore size analysis in metallic powders by X-ray tomography”, *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 6: 45–52, (2016)
- [44] Athanassiadis A.G., Miskin M.Z., Paul K., Rodenberg N., Lee S.H., Merritt J., Brown E., Amend J., Lipsonb H., Jaeger H.M., “Particle shape effects on the stress response of granular packings”, *Soft Matter*, 10: 48–59, (2014).
- [45] Slotwinski J.A., Garboczi E.J., Stutzman P.E., Ferraris C.F., Watson S.S, Peltz M.A., “Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing”, *J Res Natl Inst Stand Technol.*; 119: 460–493, (2014).
- [46] GKN. Powder Metallurgy, (2018). [http://www.gkngroup.com/hoeganaes/media/Tech%20Library/SchadeAtomized%20Powders%20for%20Additive%20Manufacturing%20\(I\).pdf](http://www.gkngroup.com/hoeganaes/media/Tech%20Library/SchadeAtomized%20Powders%20for%20Additive%20Manufacturing%20(I).pdf)
- [47] Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J., “Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder”, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Issue 12, 2013, Pages 2109–2118 (2017)