

Ultrasonik Atomizasyon: Toz Üretiminde Alternatif Bir Yol

Yağız Akyıldız^{1*}, Serdar Sarı², Onur Furkan Kaya³, Rıdvan Ymanoğlu¹

^{1*}Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, Türkiye

²Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ankara, Türkiye

³İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İstanbul, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 01.05.2023

Kabul: 22.08.2023

Anahtar Kelimeler:

Toz metalurjii
Atomizasyon teknikleri
Ultrasonik atomizasyon
Eklemeli imalat

ÖZET

Metal tozlarının eklemeli imalatta kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Metal tozu, tüm bu proseslerin hammadde olup nihai ürünün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin yanı sıra boyut ve tolerans değerleri gibi özelliklerini belirlemektedir. Konvansiyonel atomizasyon prosesleri ile toz üretimi, seri üretime uygunluğu, yüksek kalitede metal tozu ve düşük maliyetli üretim imkanı ile dikkat çekmektedir. Ancak, partikül boyut dağılımı ve küreselliği, eklemeli imalat proseslerinde kullanılacak toz kalitesi ve son ürün maliyeti için belirleyici faktörlerdir. Atomizasyon sürecinde kullanılan başlangıç hammadde de üretilen tozun kalitesi ve fiyatını etkiler. Dolayısıyla, yüksek kalitede ve uygun maliyetli toz üretimi için atomizasyon proseslerinin parametreleri (ergimiş metalin sıcaklığı, atomizasyon atmosferi ve türü gibi) üretim öncesinde belirlenmelidir. Ultrasonik atomizasyon yöntemi, konvansiyonel yöntemlere göre daha düşük maliyetle yüksek kalitede toz üretilmekte ve özellikle eklemeli imalat alanında ihtiyaç duyulan partikül boyut dağılımı ve akışkanlığı karşılayabilmektedir. Bu çalışmada ultrasonik atomizasyon yönteminin çalışma mekanizmasının incelenmiş ve konvansiyonel atomizasyon teknikleri ile nihai ürün kalitesi açısından arada oluşan farklar karşılaştırılmıştır.

Ultrasonic Atomization: An Alternative Path to Powder Production

ARTICLE INFO

Received: 01.05.2023

Accepted: 22.08.2023

Keywords:

Powder metallurgy
Atomization techniques
Ultrasonic atomization
Additive manufacturing

ABSTRACT

The use of metal powders in additive manufacturing is increasing day by day. Metal powder is the raw material for all these processes and determines the properties of the final product, such as its physical, chemical, and mechanical characteristics, as well as its dimensions and tolerance values. Metal powder production using conventional atomization processes is noteworthy due to its suitability for mass production, high-quality metal powder, and low-cost production. However, particle size distribution and sphericity are crucial factors for the quality of the powder used in additive manufacturing processes and the cost of the final product. The raw material used in the atomization process also affects the quality and price of the produced powder. Therefore, the parameters of the atomization processes, such as the melting temperature of the metal, the atomization ambient, and the type should be determined before production to achieve high-quality and cost-effective powder production. The ultrasonic atomization method can produce high-quality powder at a lower cost compared to conventional methods and can meet the particle size distribution and fluidity required in the additive manufacturing field. This study examines the ultrasonic atomization method's operating mechanism and compares the final product quality differences between conventional atomization techniques.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda özellikle savunma, havacılık, uzay, medikal ve otomotiv sektörleri, son ürün olarak kullanılan parçaların üretiminde toz metalurjisi esaslı üretim yöntemlerini tercih etmektedir. Bu

*Sorumlu yazar, e-posta: ygzakyildiz@gmail.com

To cite this article: Y. Akyıldız, S. Sarı, O.F. Kaya, R. Ymanoğlu, Ultrasonik Atomizasyon: Toz Üretiminde Alternatif Bir Yol, Manufacturing Technologies and Applications, 4(2), 81-91, 2023.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1290558>, This paper is licensed under a CC BY-NC 4.0

yöntemler yüksek kaliteli parçaların net şekilli olarak üretilmesine olanak tanır [1, 2]. Döküm, dövme ve plastik şekil verme gibi üretim yöntemlerine göre üstün malzeme özellikleri, daha az ikincil işlemlere olan ihtiyaç gibi sağladığı avantajlarından dolayı birçok farklı toz metalurjik proses geliştirilmiş ve hala geliştirilmeye devam etmektedir. Toz metalurjik üretim yöntemi için başlangıç hammaddesi olan tozun farklı özelliklere sahip olması istenmektedir. Bu özelliklerin başında partikül şekli, boyutu, boyut dağılımı ve tozun saflığı gelmektedir [3].

Toz metalurjisi proseslerinde konvansiyonel olarak temelde presleme ve sinterleme alt yapısındaki sistemler kullanılsa da güncel teknolojiler ile geline son noktada eklemeli imalat prosesleri yaygınlaşmaktadır. Tüm bu toz metalurjik proseslerin hammaddesi olan metal tozu, nihai üründe istenilen fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerin yanı sıra boyut ve tolerans değerlerini ve en önemlisi maliyeti belirlediğinden, seçilecek hammaddenin özellikleri nihai ürün kalitesini doğrudan etkilemektedir [4-6].

Farklı toz özelliklerine yönelik değişen toz üretim teknikleri mevcuttur. Mekanik, kimyasal ve atomizasyon yöntemleri toz üretiminde kullanılan yöntemlere örnek olarak verilebilir. Üretim yöntemine bağlı olarak, tozun sahip olduğu fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler, nihai parçada elde edilecek özellikleri doğrudan etkilemektedir [4, 7]. Nihai parçada elde edilecek özelliklerin kontrol altına alınması için başlangıç hammaddesi olan tozun; homojenliği, kimyasal kompozisyonu, empürite varlığı, partikül morfolojisi, boyut dağılımı, akışkanlığı gibi parametrelerin kontrol edilmesi önem arz etmektedir [8-12]. Atomizasyon ile toz üretim yöntemi; seri üretime uygunluğu, yüksek kalitede metal tozu eldesi ve düşük maliyetli üretime olanak sağlaması ile dikkat çekmektedir. Bu yöntem ile demir-çelik, süper alaşım, titanyum, bakır, alüminyum alaşımları gibi farklı metal ve alaşımları üretilebilmektedir. Özellikle eklemeli imalat prosesleri için gerekli olan toz talebinin karşılanabilmesi ve istenilen özelliklerde üretilebilmesi için genellikle atomizasyon yöntemleri kullanılmaktadır [13-15].

Günümüz mühendislik bileşenlerinin üretiminde eklemeli imalat yöntemlerinin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Farklı eklemeli imalat yöntemleri üretim prosesinin tarzına göre değişik özelliklerde hammadde gerektirir. Sıkça kullanılan eklemeli imalat yöntemlerine; SLE (Seçici Lazer Ergitme), EIE (Elektron Işın Ergitme), Seçici Lazer Sinterleme (SLS) ve Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) örnek verilebilir [16, 17]. Bu üretim yöntemlerinde kullanılan tozlar genel anlamda atomizasyon yöntemleriyle üretilmektedir. Gaz atomizasyonu yöntemi ise bu açıdan diğer yöntemler arasında (su atomizasyon, plazma atomizasyon, santrifüj atomizasyon) en sık tercih edilenidir [18-20].

Partikül boyutu ve küreselliği, eklemeli imalat proseslerinde kullanılacak toz için kısıtlayıcı ve maliyet belirleyici faktörlerdir. Bunların yanı sıra atomizasyon proseslerinde, başlangıç hammaddesinin ne kadarının istenilen özellikleri sağlayacak toza dönüştürülebileceği hem üretilen tozun hem de nihai ürün fiyatını doğrudan etkilemektedir. Tüm faktörler göz önüne alındığında, atomizasyon prosesleriyle üretilecek tozun, yüksek kalitede ve uygun maliyetli olarak temin edilmesi istenir. [21-25].

Atomizasyon prosesleri genel anlamda ergitilmiş metalin önceden belirlenmiş bir sıvı veya gaz yardımıyla değişen boyutlarda damlacıklara ayrılması ve bu ayrılan damlacıkların inert gaz veya normal atmosfer koşullarında katılaştırılması prensibine dayanmaktadır. Ergimiş metal partikülleri, ani soğuma ve inert gaz atmosferinin sağladığı ısı absorpsiyon etkisiyle yüksek soğuma hızlarında küreselleşerek katılırlar. Bu nedenle, ergimiş metalin sıcaklığı, atomizasyon atmosferi, yüzey gerilimini sağlayacak atomizasyon türü gibi parametreler, elde edilecek tozun fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini belirlemektedir [26-28]. Atomizasyon prosesleri kendi içinde konvansiyonel olarak; gaz, su, santrifüj ve plazma metotlarına ayrılmaktadır. Bu yöntemlere bağlı olarak elde edilecek tozun partikül boyut dağılımı, morfolojisi, yoğunluğu, akışkanlığı, üretim miktarı vb. özellikler değişiklik göstermektedir [29-31]. Farklı üretim yöntemleriyle üretilen bu tozların özellikleri, son ürün teminiyle toplam verimi doğrudan etkileyerek nihai ürünün maliyetini belirlemektedir. Geliştirilmiş farklı atomizasyon prosesleriyle özellikle eklemeli imalat teknolojisinde kullanılmak üzere uygun metal tozları üretimi yaygınlaşmıştır. Ancak, maliyet ve istenilen toz kalitesi dikkate alındığında, konvansiyonel prosesler yüksek verimde nihai ürüne

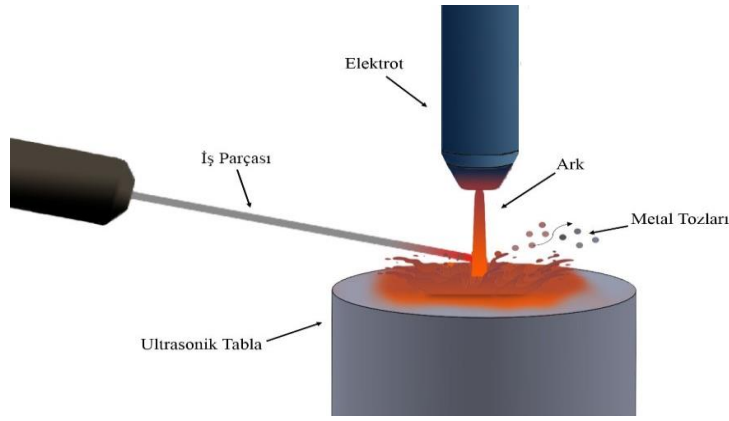
ulaşmak için gerekli yeterliliği sağlayamamaktadır. Özellikle eklemeli imalat alanında yüksek küresellik ve buna bağlı olarak akışkanlığa ihtiyaç duyulması durumunda, gaz atomizasyon yöntemlerinde de maliyetler artmaktadır. Buradan yola çıkarak, sektörel açıdan oluşan bu ihtiyacı ultrasonik atomizasyon yöntemiyle karşılama potansiyeli son yıllarda dikkat çeker hale gelmiştir [31-34].

Yüksek kalitede toz üretimini sağlayan ultrasonik atomizasyon, gaz atomizasyon toz üretim yöntemine göre partikül boyut dağılımı ve morfolojisinde istenilen kaliteye daha uygun ve düşük maliyetle toz eldesini sağlamaktadır. Gaz atomizasyon yöntemiyle 15-300 µm, ultrasonik atomizasyon yöntemiyle ise 15-150 µm partikül boyut dağılımına sahip toz üretimi mümkündür [35, 36]. Ultrasonik atomizasyon yöntemi, şarj edilen malzemenin alın yüzeyinin elektrik arkı ile ergitilmesi ve ergiyen metalin ultrasonik tabla üzerine düşmesiyle belirli frekans değerlerinde ultrasonik dalgalarının sağladığı titreşim hareketine maruz bırakılarak katılaşması prensibine dayanmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda, ultrasonik atomizasyon için çalışma sıcaklığı bir kısıt olarak kaldığından, nispeten daha düşük ergime sıcaklıklarına sahip Al, Pb ve Au gibi metallerin alaşımlarında uygulamalar yapılmıştır [37, 38]. Gelişen teknoloji, ultrasonik atomizasyon ile çalışan proseslerin gelişmesine de katkı sağlayarak daha yüksek ergime sıcaklıklarına sahip metal ve alaşım tozlarının üretilebilmesine imkân sunmuştur [37-39]. Bu çalışmada toz metalurjisi alanında yapılan çalışmalar sonucunda, özellikle eklemeli imalat alanında ihtiyaç duyulan miktar ve kalitede toz üretiminin yapılabilmesine olanak sağlayan ultrasonik atomizasyon metodu ele alınmıştır. Ultrasonik atomizasyon yöntemi diğer atomizasyon yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak incelenerek Türkçe literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Ultrasonik Atomizasyon Prosesinin Tanımlanması (Description of The Ultrasonic Atomization Process)

Ultrasonik atomizasyon prosesi genel anlamıyla elektrik ark kullanılarak metal malzemenin ergitilmesi ve ergitilmiş metalin belirli frekans değerlerinde ultrasonik titreşime maruz bırakılarak katılaşmasıdır. Uygulanan frekans değerlerinde yapılabilen değişiklikler sayesinde diğer atomizasyon yöntemlerinden farklı özelliklere sahip metal tozları elde edilebilmektedir [40]. Şekil 1'de ultrasonik atomizasyon yönteminin şematik gösterimi verilmiştir. Atomizasyon prosesinde çubuk veya tel formunda olabilen tozu üretilecek malzeme, sistem içerisine beslenmektedir. İş parçası, ultrasonik tabla ve elektrot arasında konumlandırılarak elektrotta ark vasıtasıyla oluşan yüksek ısı sayesinde ergitme oluşturulur ve ultrasonik tabla üzerine düşürülür. Ultrasonik tablada oluşturulan frekans, ergimiş metale titreşim hareketleri olarak aktararak yüzey gerilimi ve viskozite etkisiyle ergimiş metalin damlacıklar halinde saçılmasını sağlar. Ultrasonik tablada üretilen dalgaların frekansı ile oluşacak tozun partikül boyutu arasında ters bir orantı bulunmaktadır. Ultrasonik tablanın titreşmesi ile mikron boyutunda damlacıklara dönüşen sıvı metal, inert gaz atmosferinde soğutulup morfolojik açıdan yüksek küreselliğe sahip partiküllere dönüşür [41].



Şekil 1. Ultrasonik atomizasyon şematik gösterimi (Schematic representation of ultrasonic atomization)

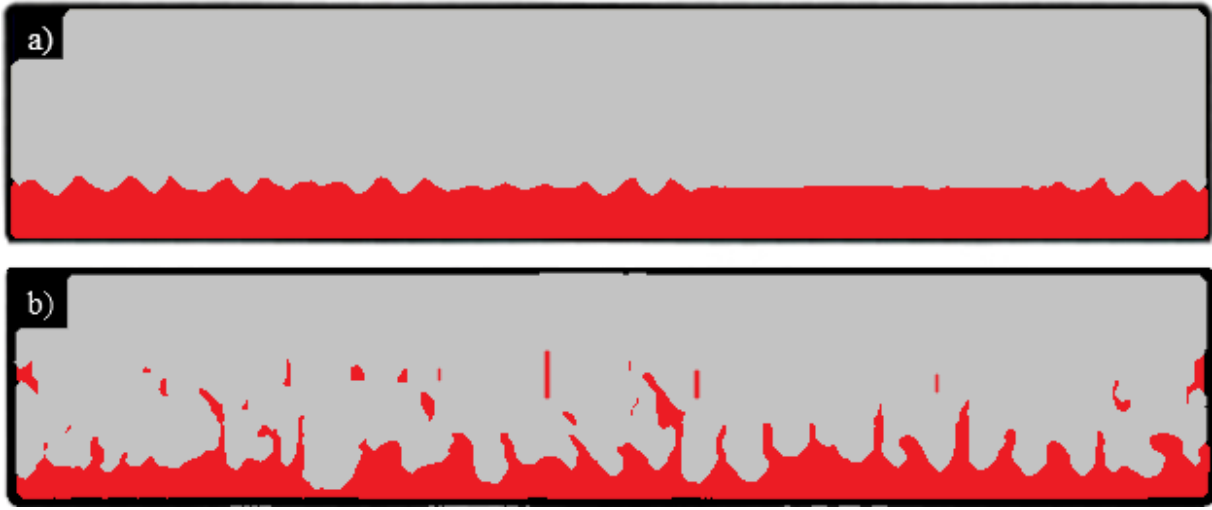
2.2. Ultrasonik Atomizasyon Prosesinde Toz Boyutunu Etkileyen Parametreler (Parameters Affecting Powder Size in Ultrasonic Atomization Process)

Ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen tozun boyutu, çeşitli proses parametrelerine bağlı olarak kontrol altına alınabilmektedir. Ortalama toz partikül boyutu; ultrason dalgasına ait frekans, ergiyik metalin yüzey gerilimi ve yoğunluk değerlerine göre belirlenmektedir. Tüm bu parametrelerin nihai toz boyutuna etkisinin incelenmesi için Lang eşitliği kullanılmaktadır [42]. Lang Eşitliği Formül 1’de verilmiştir.

$$d=a*\left(\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}\right) \quad (1)$$

Formül 1’de verilen Lang eşitliğindeki parametreler; d atomize edilmiş tozun ortalama partikül çapını, σ ergiyik metalin yüzey gerilimini, ρ ergiyik metalin yoğunluğunu, a prosese bağlı bir sabit katsayıyı ve f ergiyik metale aktarılan ultrasonik dalgaların frekansını göstermektedir. Yoğunluk ve yüzey gerilimi, ergiyik metalin sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak ergiyik metalin sıcaklığı da proses boyunca belirleyici bir parametre olduğu unutulmamalıdır. Ayrıca yüzey gerilimi ve yoğunluk özellikleri ile alaşımın kimyasal kompozisyon oranı, değişen parametreler ve malzemenin kendine has özellikleri ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen tozun boyutunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, ilgili parametrelerin optimizasyonunun doğru yapılmaması istenmeyen boyutta ve özelliklerde toz oluşumuna sebep olacaktır [43, 44]. Alaşımların kimyasal kompozisyonlarındaki değişime bağlı olarak ayrıca hesaplanması gereken bu malzeme özellikleri, Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği (HMM) yardımıyla sayısal modelleme ortamında güvenilir termodinamik veriler ile hesaplanabilmektedir [45-48]. HMM ile alaşım ve kimyasal kompozisyon oranına göre güvenilir olarak hesaplanan yüzey gerilimi ve viskozite değeri, ultrasonik tablada oluşturulacak dalga frekansının doğrudan belirlenmesi ve buna bağlı tozların nihai özelliklerinin öngörülerek prosesin istenilen doğrultuda gerçekleştirilip sonuçlanmasına olanak sağlamaktadır [49].

Ergiyik metal ultrasonik dalgalar ile temasa geçtiğinde, metal yüzeyinde kapiler dalgalar oluşmaktadır. Şekil 2’de ultrasonik tabla üzerindeki ergiyik metalin maruz kaldığı kapiler dalgaların, farklı frekans değerlerinin etkisiyle nasıl değiştiği şematik olarak gösterilmiştir. Buradan yola çıkarak atomizasyon sırasında artan dalga frekansı, ergiyik metalden daha küçük boyutlu ergiyik metal partikülleri saçılmasına ve bu partiküllerin soğuyup katılaşmasıyla daha küçük partikül boyut dağılımına sahip toz üretimi olabileceği görülmektedir. Daha küçük toz boyutları daha yüksek yüzey alanına sahip olduğundan daha fazla reaktivite gösterme potansiyeline sahip olacaklardır. Öte yandan, daha küçük toz boyutları daha homojen dağılım ve daha yüksek kalite sağlama potansiyeline sahiptirler. Ancak, dalga frekansının artması, sıvının veya malzemenin atomizasyon enerjisinin artmasına, dolayısıyla daha yüksek maliyetlere neden olabilir. Bu nedenle, dalga frekansının doğru seçimi, toz boyutunun yanı sıra maliyet ve kalite gibi faktörlere göre yapılmalıdır [50, 51].



Şekil 2.Kapiler dalgaların şematik gösterimi a) düşük vibrasyon ve b) yüksek vibrasyon (Schematic representation of capillary waves a) low vibration and b) high vibration)

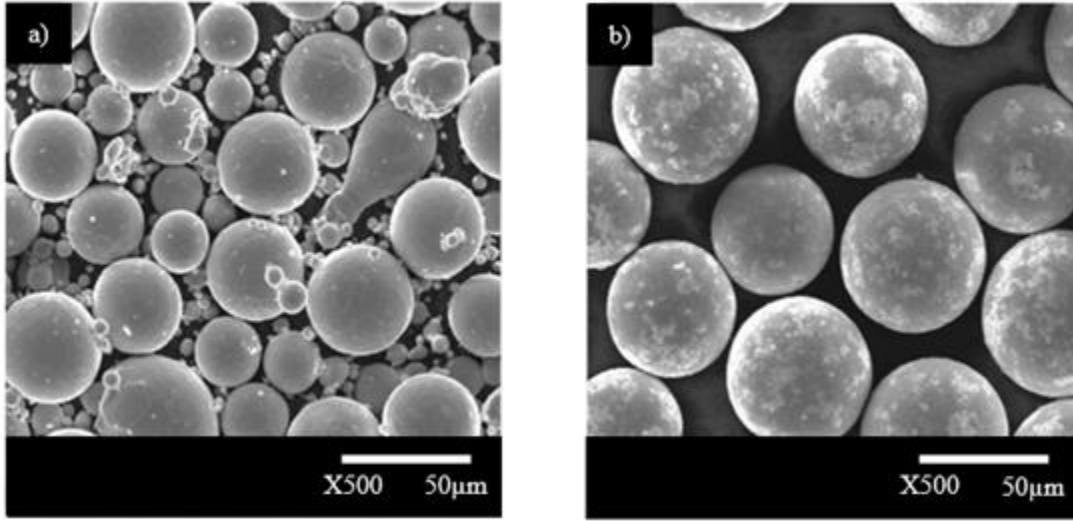
3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (TEST AND OPTIMIZATION RESULTS)

3.1 Ultrasonik ve Gaz Atomizasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Comparing The Ultrasonic Atomization and Gas Atomization Methods)

İki farklı atomizasyon prosesi sonucu elde edilecek olan toz özellikleri birbirinden farklı olmaktadır. Her iki atomizasyon yöntemi ile üretilen tozların öncelikli karşılaştırılabilecek özelliklerinden birisi partikül boyut dağılımıdır. Şekil 3'te hem ultrasonik hem de gaz atomizasyonu ile üretilen Ti6Al4V tozunun SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ultrasonik atomizasyon sonucu elde edilmiş olan tozların daha dar partikül boyut dağılımına sahip oldukları gözlemlenirken gaz atomizasyonunda ise bu durum tam tersidir. Partikül boyut dağılımının geniş olması presleme ve sinterleme proseslerinde daha yüksek sıkı paketlenme yoğunluğu sunarken, eklemeli imalat proseslerinde içyapıda çeşitli bölgelerde topaklaşma, birleşmeme ve yapı içinde porozitelere neden olabilmektedir. Eklemeli imalat prosesleri için gerekli düşük miktarlı tozların üretilmesi, yüksek tonajlı kapasiteye sahip olan gaz atomizasyonu yöntemi kullanılarak tozların eldesinin yüksek maliyetlerine göre avantaj sunmaktadır [52-55]. Şekil 3a'da verilen gaz atomizasyonu ile üretilen Ti6Al4V tozuna ait SEM görüntüsünde uydu oluşumları görülmektedir. Bu uydulu yapı, eklemeli imalat prosesinde akışı ve buna bağlı olarak prosesi olumsuz yönde etkilemektedir. Ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen ve Şekil 3b'de verilen SEM görüntüsünde ise, oluşan partiküller tamamen küresel olup akışı etkileyecek herhangi bir uydu oluşumu da söz konusu değildir. Tüm bu sebeplerden dolayı, eklemeli imalat proseslerinde ve yeni alaşım geliştirme çalışmalarında ultrasonik atomizasyon yöntemiyle üretilen tozların kullanılmasının, proses uygunluğu, istenilen mikro yapı ve mekanik özellikleri elde etmekte avantaj sağlayabileceği görülmektedir [56-58].

Tablo 1'de ultrasonik ve gaz atomizasyonu teknikleri ile üretilen östenitik paslanmaz çelik 316L ve Ti6Al4V tozlarının fiziksel özelliklerinin karşılaştırması yapılmıştır. Tozların küresellik değeri, ideal küre yapısı ile orantılandığında 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. Bu değer 1'e yaklaştıkça ideal küreye daha yakın bir morfolojide toza sahip olduğu anlaşılmaktadır. Her iki yöntem ile üretilen tozların küresellik değeri incelendiğinde, ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen tozların morfolojisinin gaz atomizasyon ile üretilen tozlara göre daha iyi olduğu görülmektedir. Küresellik özelliğine bağlı olarak akışkanlık özelliği de doğru orantıyla gelişmektedir [59, 60]. Yüksek küreselliğe sahip olan ultrasonik atomizasyon ile üretilen tozların akışkanlık özelliği gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen tozlara göre daha yüksektir. Akışkanlık özelliğini ayrıca katılaşmadaki uydu oluşumu da etkilemektedir. Şekil 3'te her iki atomizasyon yöntemi ile üretilen

Ti6Al4V tozundan anlaşılacağı gibi uydu oluşumu, tozun akışını engelleyerek proses uygunluğunu azaltmaktadır [61].



Şekil 3. Ti6Al4V alaşımına ait farklı yöntemler ile üretilen tozların SEM mikroyapı görselleri; Gaz atomizasyonu, b) Ultrasonik atomizasyonu (SEM microstructure images of powders produced by different methods of Ti6Al4V alloy; a) Gas atomization, b) Ultrasonic atomization) [59].

Tablo 1. Ultrasonik ve gaz atomizasyonu ile üretilen tozlarının özelliklerinin karşılaştırılması (Comparison of the properties of powders produced by ultrasonic and gas atomization) [51].

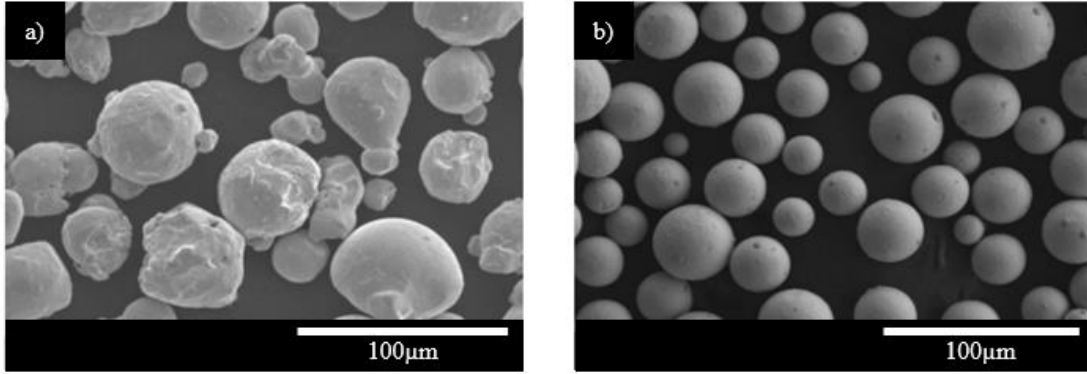
Atomizasyon Metodu	Gaz (EIGA)	Ultrasonik (35kHz)	Gaz (EIGA)	Ultrasonik (35kHz)
Alaşım	AISI 316L		Ti6Al4V	
D10 [μm]	27.3	40.9	29.0	45.4
D50 [μm]	45.8	49.7	47.3	55.0
D90 [μm]	73.1	58.2	77.8	62.4
Küresellik	0.75	0.89	0.76	0.90
Tap Yoğunluğu (g/cm^3)	4.67	4.72	2.6	2.86
Görünür Yoğunluk (g/cm^3)	4.29	4.40	2.4	2.62
Akışkanlık (s/50 g)	18.7	14.8	40.8	26.43

3.2 Ultrasonik Atomizasyon ile Üretilen Tozların Eklemeli İmalat Proseslerine Sağladığı Avantajlar (Advantages of Powders Produced by Ultrasonic Atomization to Additive Manufacturing Processes)

Ultrasonik atomizasyon ile elde edilecek ve geliştirilecek yeni alaşımların kullanılacağı en önemli alan şüphesiz ki eklemeli imalat yöntemleridir. Her geçen gün gelişmekte olan yeni mühendislik teknolojileri ile mühendislik bileşenlerinden beklenen servis özellikleri değişmekte ve kullanıcıların üründen beklentileri yükselmektedir. Buna bağlı olarak, Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği'nin sağlamış olduğu güvenilir termodinamik ve termokinetik veriler ile yeni alaşımlar ve bu alaşımların proses parametreleri ile gereken veriler sayısal ortamda hesaplanabilmektedir [62, 63]. Birçok yeni alaşımın geliştirilmesi sürecinde prototip üretimlerin yapılması elzem olup, Ar-Ge, Ür-Ge çalışmaları ve seri üretim gibi farklı proses basamakları eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak yapılabilmektedir. Nihai üründe istenilen kalite düzeyine ulaşılabilmesi adına, kullanılacak olan metal tozları belirli bir geometriye ve fiziksel özelliklere sahip olmalıdır. Bu özellikler, nihai ürüne ulaşmadan önce üretim yönteminin gerekliliklerine göre belirlenmelidir.

Bunun anlamı, eklemeli imalatta kullanılacak olan metal tozlarının eklemeli imalat proseslerindeki tüm proses parametrelerine uygunluğun göz önünde bulundurulması gerektiğidir [64-66].

Bu kapsamda sinterleme bazlı üretim yöntemleri olan toz yataklı sinterleme yöntemleri (Seçici Lazer Sinterleme, Direkt Metal Lazer Sinterleme) ele alındığında, toz morfolojisi ve tozun boyutu proses uygunluğu için en önemli parametrelerdir. Sinterlemede maksimum proses veriminin alınabilmesi için metal tozlarının yüksek küreselliğe ve ince boyutlara sahip olması gerekmektedir. Tozların sahip olduğu küreselliğin derecesi, proses uygunluğunu yani parça üretim hızı ve süresiyle oluşacak maliyeti belirlemektedir. Aynı zamanda sinterleme için gerekli olan itici güç daha düşük partikül boyutlarında maksimum olmaktadır [67, 68]. Bu kapsamda, ultrasonik atomizasyon yönteminde uygulanacak frekans değeri ile tozların boyutu belirlenirken katılaşma yaklaşımı ile uydu ve morfolojik özellikleriyle tozun akış karakteristiği iyileştirilebilmektedir. Şekil 4'te, ultrasonik ve gaz atomizasyonu ile üretilen AISI 304 paslanmaz çeliği tozunun SEM görüntüleri verilmiştir. Gaz atomizasyonu ile üretilen tozların küresellik oranının ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen tozlara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca katılaşma yaklaşımları ile küreselliğe ek olarak uydu oluşumu da görülmekte olup, tozların akışını etkileyen diğer bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Her iki yöntem ile üretilen tozların boyutları sırasıyla gaz atomizasyonu için 40-55 µm, ultrasonik atomizasyonu için ise 15-30 µm arasındadır. Daha küçük boyutlu tozların kullanımı, eklemeli imalat yöntemleri için önem arz ederken, ultrasonik atomizasyon yöntemi ile üretilen tozların, gaz atomizasyonu ile elde edilenlere göre daha avantajlı olabileceği görülmektedir [69].



Şekil 4. AISI 304 paslanmaz çeliğine ait farklı yöntemler ile üretilen metal tozların SEM görüntüleri, a) Gaz atomizasyonu, b) Ultrasonik atomizasyon (SEM images of metal powders produced by different methods of AISI 304 stainless steel (Gas atomization, b) Ultrasonic atomization (SEM images of metal powders produced by different methods of AISI 304 stainless steel) a) Gas atomization, b) Ultrasonic atomization) [40].

Yüksek küreselliğe sahip tozların daha yüksek verim sağlamanın en önemli sebebi, tozun küreselliği ve porozite miktarı arasındaki ilişkidir. Tozun sahip olduğu ortalama küresellik değeri artarken, tozun ihtiva ettiği porozite miktarı azalmaktadır [70, 71]. Ayrıca, metal içinde bulunacak olan poroziteler ürün içinde çentik etkisi yaratacaktır. Bu sebeple eklemeli imalat süreci sonucu elde edilecek üründe yüksek mekanik özellikler istendiği şartlarda yüksek küreselliğe sahip tozların tercih edilmesi gerekmektedir. Sinterlemenin verimini arttırabilecek bir diğer faktör de partikül boyutudur. Partikül boyutunun azalması atomik mobilitiyi arttıracak aynı zamanda yüzey alanında da ters oranlı bir artışa sebebiyet vereceğinden sinterlemeyi tetikleyen itici güce de pozitif etkisi olacaktır [70, 72]. Ultrasonik atomizasyon süreci daha düşük sıcaklıklarda frekans değişimiyle daha küçük partikül boyutuna sahip tozlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı, ultrasonik atomizasyon ile elde edilecek tozların sinterleme bazlı eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılması, elde edilecek ürünün yüksek mekanik değerlere sahip olması açısından önem arz etmektedir. Ti6Al4V, Inconel süper alaşımları, yüksek entropi alaşımları ve daha birçok yeni nesil malzemeler ile üstün mekanik değerlere sahip mühendislik parçaları,

eklemeli imalat yöntemleriyle yüksek kalitede üretilmeye çalışılmaktadır. Bu ve diğer tüm mühendislik ürünlerinin eklemeli imalat ile üretimi için istenilen fiziksel ve geometrik özelliklere sahip toz üretimi, ultrasonik atomizasyon ile kolaylıkla üretilip kullanıma hazır hale getirilebilecektir.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada toz metalurjisi alanında atomizasyon teknikleri için önemli bir alternatif yol olan ultrasonik atomizasyon yöntemi incelenmiştir. Literatür verileri ultrasonik atomizasyonun gaz atomizasyonu gibi yaygın tekniklere göre birçok avantajı olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar ultrasonik atomizasyonu ile elde edilen tozlarla üretilen malzemelerin daha yüksek mekanik özellik değerlerine sahip olabileceğini ortaya koymaktadır. Yapılan çalışma, Türkçe literatüre katkı sağlamaya yönelik olarak hazırlanmıştır. Elde edilen veriler kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Ultrasonik atomizasyon ergiyik metale gönderilen ultrasonik dalgaların frekans değerlerinin değiştirilmesiyle elde edilecek metal tozunun ortalama partikül boyunun belirlenebilmesine olanak sağlamaktadır.
- Lang eşitliği esas alındığında, sabit bir sıcaklık girdisi durumunda frekans değerinin artışı nihai tozun partikül boyutunun küçülmesi ile sonuçlanmaktadır.
- Ultrasonik atomizasyon tozları gaz atomizasyonu ile elde edilen tozlarla karşılaştırıldığında daha dar partikül boyut dağılımı aralığına sahip olmaktadır.
- Ultrasonik atomizasyon tekniği ile üretilen tozlar gaz atomizasyon tozlarına göre daha yüksek küresellik özelliğine sahiptir. Bu özellik tozların akışkanlık değerlerinde artışa sebep olmaktadır. Ayrıca tozların yüksek küresellikteki geometrileri ulaşabilecekleri en yüksek yüzey alanı değerlerine sahip olmalarına yol açmaktadır. Bu sayede tozların eklemeli imalat uygulamalarında daha iyi ısı absorpsiyonu sağlamasının yolunu açıp enerji kullanımındaki verimin yükselmesine olanak sağlayacaktır.
- Tap ve görünür yoğunluk karşılaştırmasında da ultrasonik atomizasyon tozlarının daha yüksek değerlere ulaşabildikleri bu sayede morfolojilerinde daha az miktarda poroziteye sahip oldukları görülmüş ve yapıdaki porozite miktarının azalması nihai ürünün mukavemet değerlerinde artışa yol açacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. J. M. Torralba, Powder Metallurgy: A New Open Section in Metals, Metals, 11(10):1519, 2021.
2. P.C. Angelo, R. Subramanian, B. Ravisankar, Powder metallurgy: science, technology and applications, 2022
3. M. Powders, H. Flowmeter, F. Spectrometry, Standard guide for characterizing properties of metal powders used for additive manufacturing processes, ASTM Int: F-14. ASTM International, 2014.
4. A. Lawley, Preparation of metal powders, Annual Review of Materials Science, 8(1):49-71, 1978.
5. F.V. Lenel, G.S. Ansell, The State of the Science and Art of Powder Metallurgy, Journal of Metals, 34(2):17-29, 1982.
6. G.S. Upadhyaya, Powder metallurgy technology, Cambridge Int Science Publishing, 2002.
7. A.B. Spierings, N. Herres, G. Levy, Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts, Rapid Prototyping Journal, 17(3):195-202, 2011.
8. P. Samal, J. Newkirk, Powder metallurgy methods and applications, ASM handbook of powder metallurgy, 2015.
9. I. Chang, Y. Zhao, Advances in powder metallurgy: properties, processing and applications, Elsevier, 2013.
10. M. Krantz, H. Zhang, J. Zhu, Characterization of powder flow: Static and dynamic testing, Powder Technology, 194(3): 239-245, 2009.

11. Ş. Karagöz, R. Yamaoğlu, Ş.H. Atapek, Metalik toz işleme teknolojisi ve proselme kademeleri açısından parametrik ilişkiler, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(3): 77-87, 2009.
12. G. S Upadhyaya, Powder Metallurgy Methods and Design, Vol.7. ASM Metals Handbook, 1997.
13. S.H. Saheb, V.K. Durgam, A. Chandrashekhar, A review on metal powders in additive manufacturing, AIP Publishing LLC. in AIP Conference Proceedings, 2020.
14. K.K., A. Perveen, Atomization processes of metal powders for 3D printing, Materials today: proceedings, 26:1727-1733, 2020.
15. F. Lemoisson, L. Froyen, Understanding and improving powder metallurgical processes, 2005.
16. A. Popovich, V. Sufiiarov, Metal powder additive manufacturing, in New trends in 3D printing, IntechOpen, 2016,
17. K.V. Wong, A. Hernandez, A review of additive manufacturing, International scholarly research notices, 2012.
18. J. Clayton, Optimising metal powders for additive manufacturing, Metal Powder Report, 69(5): 14-17, 2014.
19. Z. Snow, R. Martukanitz, S. Joshi, On the development of powder spreadability metrics and feedstock requirements for powder bed fusion additive manufacturing, Additive Manufacturing, 28:78-86, 2019.
20. A.B. Spierings, M. Voegtlin, T.U. Bauer, K. Wegener, Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing, Progress in Additive Manufacturing, 1:9-20, 2016.
21. A.T. Sutton, C.S. Kriewall, M.C. Leu, J. William Newkirk, Powders for additive manufacturing processes: Characterization techniques and effects on part properties, in Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2016.
22. J.A. Slotwinski, E.J. Garboczi, P.E. Stutzman, C.F. Ferraris, S.S. Watson, Max.A. Peltz, Characterization of metal powders used for additive manufacturing, Journal of research of the National Institute of Standards Technology, 119: 460, 2014.
23. S. Hoeges, A. Zwiren, C. Schade, Additive manufacturing using water atomized steel powders, Metal Powder Report, 72(2):111-117, 2017.
24. M.Z. Gao, B. Ludwig, T.A. Palmer, Impact of atomization gas on characteristics of austenitic stainless steel powder feedstocks for additive manufacturing, Powder Technology, 383:30-42, 2021.
25. A. Martín, C.M. Cepeda-Jiménez, M.T. Pérez-Prado, Gas atomization of γ -TiAl alloy powder for additive manufacturing, Advanced Engineering Materials, 22(1): 1900594, 2020.
26. A.J. Yule, J.J. Dunkley, Atomization of melts: for powder production and spray deposition, Oxford University Press, USA, 1994.
27. R.Boom, F.R. De Boer, Energy effects in bulk metals, in Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Elsevier, 1-7, 2006.
28. J.J. Dunkley, Advances in atomisation techniques for the formation of metal powders, in Advances in Powder Metallurgy, Elsevier, 3-18 ,2013.
29. M. Entezarian, F. Allaire, P. Tsantrizos, R.A.L. Drew, Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders, Journal of Metals, 48:53-55, 1996.
30. A. Lawley, Atomization of specialty alloy powders, Journal of Metals, 33:13-18, 1981.
31. P. S., Z.Z. Fang, Y. Zhang ve Y. Xia, Review of the methods for production of spherical Ti and Ti alloy powder, Journal Of Metals, 69: 1853-1860, 2017.
32. L.V.M. Antony, R.G. Reddy, Processes for production of high-purity metal powders, Journal of Metals, 55: 14-18, 2003.
33. L.A. Dobrzański, L.B. Dobrzański, A.D. Dobrzańska-Danikiewicz, M. Kraszewska, Manufacturing powders of metals, their alloys and ceramics and the importance of conventional and additive technologies for products manufacturing in Industry 4.0 stage, Archives of Materials Science Engineering, 102(1), 2020.
34. I. Anderson, J. Rieken, J. Meyer, D. Byrd, A. Heidloff, visualization of atomization gas flow and melt break-up effects in response to nozzle design, Ames Lab., Ames, IA (United States), 2011.
35. D. Singh, S. Dangwal, Effects of process parameters on surface morphology of metal powders produced by free fall gas atomization, Journal of materials science, 41: 3853-3860, 2006.
36. K. Grzelak, M. Bielecki, J. Kluczyński, I. Szachogłuchowicz, L. Śnieżek, J. Torzewski, J. Łuszczek, Ł. Słoboda, M. Wachowski, Z. Komorek, A comparative study on laser powder bed fusion of differently atomized 316L stainless steel, Materials, 15(14): 4938, 2022.

37. R. Pohlman, K. Heisler, M. Cichos, Powdering aluminium and aluminium alloys by ultrasound, *Ultrasonics*, 12(1): 11-15, 1974.
38. A.J. Yule, Y. Al-Suleimani, On droplet formation from capillary waves on a vibrating surface, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical Engineering Sciences*, 456(1997):1069-1085, 2000.
39. S.H. Alavi, S.P. Harimkar, Effect of vibration frequency and displacement on melt expulsion characteristics and geometric parameters for ultrasonic vibration-assisted laser drilling of steel, *Ultrasonics*, 94:305-313, 2019.
40. Ł. Źrodowski, R. Wróblewski, T. Choma, B. Morończyk, Ma. Ostrysz, M. Leonowicz, W. Łacisz, P. Błyskun, J.S. Wróbel, G. Cieślak, Novel cold crucible ultrasonic atomization powder production method for 3D printing, *Materials*, 14(10): 2541, 2021.
41. M. Bielecki, R. Ralowicz, L. Sloboda, Method and device for producing heavy metal powders by ultrasonic atomization, *Google Patents*, 2022.
42. R.J. Lang, Ultrasonic atomization of liquids, *The journal of the acoustical society of America*, 34(1): 6-8, 1962.
43. S. Wisutmethangoon, T. Plookphol, P. Sungkhaphaitoon, Production of SAC305 powder by ultrasonic atomization, *Powder Technology*, 209(1-3):105-111, 2011.
44. A. Endo, T. Asami, T. Ono, H. Miura, Particle size of non-contact atomization of low surface tension liquid by powerful aerial ultrasonic, in *2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, IEEE, 2015.
45. Y. Akyıldız, O. Öztürk, B. Simsar, Al-10Si-xMg Alaşımının CALPHAD Metodolojisi ile Termodinamik Karakterizasyonu, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(3): 699-704, 2021.
46. Y. Akyıldız, A. Akman, B. Horasan, R. Yamanoğlu, H. Aydın, Investigating the effect of quenching media and agitation conditions on the microstructure, hardness, and stress distribution of AISI 4140 steel by using FEM, *16. Mas International European Conference On Mathematics, Engineering, Natural and Medical Sciences*, 156-163, 2022.
47. Y. Akyıldız, Y. Arslan, H. Aydın, R. Yamanoğlu, Fe-Mn-C Çeliğinin Calphad Metodolojisi ile Hesaplanan Sinterleme Sıcaklığının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi, *16. Mas International European Conference On Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 164-174, 2022.
48. R. Yamanoğlu, Y. Akyıldız, O. Öztürk, AlSi10Mg alaşımının toz metalurjisi ile üretimi: basınç destekli sinterleme ve calphad metodolojisi, *International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies*, Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, 2021.
49. K. Yasuda, H. Honma, Z. Xu, Y. Asakura, S. Koda, Ultrasonic atomization amount for different frequencies. *Japanese Journal of Applied Physics*, 50(7S):07HE23, 2011.
50. S.H. Alavi, S.P. Harimkar, Ultrasonic vibration-assisted laser atomization of stainless steel, *Powder Technology*, 321:89-93, 2017.
51. M. Bielecki, J. Kluczyński, Ł. Sloboda, Manufacturing of metallic powders for AM market by ultrasonic atomization method, *Proceedings of the Metal Additive Manufacturing Conference (MAMC 2021)*, Vienna, Austria, 2021.
52. X.G. Li, Q. Zhu, S. Shu, J.Z. Fan, S.M. Zhang, Fine spherical powder production during gas atomization of pressurized melts through melt nozzles with a small inner diameter, *Powder Technology*, 356:759-768, 2019.
53. A.S. Jabur, Effect of powder metallurgy conditions on the properties of porous bronze, *Powder Technology*, 237:477-483, 2013.
54. B. Verlee, T. Dormal, J. Lecomte-Beckers, Density and porosity control of sintered 316L stainless steel parts produced by additive manufacturing, *Powder Metallurgy*, 55(4): 260-267, 2012.
55. A. Simchi, The role of particle size on the laser sintering of iron powder, *Metallurgical Materials Transactions B*, 35:937-948, 2004.
56. G. Rai, E. Lavernia, N.J., Grant, Powder size and distribution in ultrasonic gas atomization, *Journal of Metals*, 37(8): 22-26, 1985.
57. D. Božić, J.M. Stašić, V.M. Rajković, Microstructures and mechanical properties of ZA27-Al₂O₃ composites obtained by powder metallurgy process, *Science of Sintering*, 43(1):63-70, 2011
58. A. Strondl, O. Lyckfeldt, H. Brodin, U. Ackelid, Characterization and control of powder properties for additive manufacturing, *Journal of Metals*, 67:549-554, 2015.

59. B. Błażej, M. Bielecki, W. Gulbiński, Ł. Słoboda, R. Rałowicz, J. Rozpendowski, Ultrasonic and other atomization methods comparison in metal powder production, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineer*, 116:11-24, 2023.
60. N. Bekoz, E. Oktay, Effects of carbamide shape and content on processing and properties of steel foams, *Journal of Materials Processing Technology*, 212(10):2109-2116, 2012.
61. N. Bekoz, E. Oktay, High temperature mechanical properties of low alloy steel foams produced by powder metallurgy, *Materials Design*, 53:482-489, 2014.
62. T. Yağcı, Ü. Cöcen, O. Çulha, A. Korkmaz, Bütünleşik Hesaplamalı Malzeme Mühendisliğinin Alüminyum Jant Üretiminde Kullanılabilirliği, 4.Ulusal Üniversite-Sanayi İş birliği Ar-Ge ve İnovasyon Kongresi, 269-277, 2021.
63. K.G.F. Janssens, D. Raabe, E. Kozeschnik, M.A. Miodownik, B. Nestler, *Computational materials engineering: an introduction to microstructure evolution*, Academic Press, 2010.
64. T.J. Horn, O.L.A. Harrysson, Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications, *Science progress*, 95(3):255-282, 2012.
65. S. Negi, S. Dhiman, R.K. Sharma, Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review, *Journal of Manufacturing Technology Research*, 5(1/2):75, 2013.
66. B. Schoinochoritis, D. Chantzis, K. Salonitis, Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(1):96-117, 2017.
67. J. Ma, L.C. Lim, Effect of particle size distribution on sintering of agglomerate-free submicron alumina powder compacts, *Journal of the European Ceramic Society*, 22(13): 2197-2208, 2002.
68. W.H. Rhodes, Agglomerate and particle size effects on sintering yttria-stabilized zirconia, *Journal of the American Ceramic Society*, 64(1):19-22, 1981.
69. Y. Zhao, Y. Cui, Y. Hasebe, H. Bian, K. Yamanaka, K. Aoyagi, T. Hagsawa, A. Chiba, Controlling factors determining flowability of powders for additive manufacturing: A combined experimental and simulation study, *Powder Technology*, 393:482-493, 2021.
70. N.B. Üllen, G. Karabulut, Gözenekli metalik malzeme üretiminde gözenek oranı ve küresellik arası ilişkinin incelenmesi,, 2nd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, 467-472, 2020.
71. Z. Zhang, X.X. Yao, P. Ge, Phase-field-model-based analysis of the effects of powder particle on porosities and densities in selective laser sintering additive manufacturing, *International Journal of Mechanical Sciences*, 166:105230, 2020.
72. G.E. Dieter, D. Bacon, *Mechanical metallurgy*, Vol. 3. McGraw-hill New York, 1976.