

Ultrasonik atomizasyon yöntemi ile 316L tozu üretiminde frekansın etkisinin araştırılması

Investigation of the effect of frequency on 316L powder production using ultrasonic atomization

İnayet Burcu TOPRAK^{1*}

¹Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Kontrol ve Otomasyon Teknolojisi, Antalya, Türkiye.
ibmutlu@akdeniz.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 23.05.2024
Kabul Tarihi/Accepted: 10.12.2024

Düzeltilme Tarihi/Revision: 24.10.2024

doi: 10.5505/pajes.2024.27917
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmanın amacı, 316L tozu üretim ve karakterizasyon süreçlerini ultrasonik atomizasyon yöntemiyle deneysel olarak araştırmaktır. Üretilebilirlik parametreleri, ultrasonik atomizasyon cihazı üzerinde önerilen parametreler olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar, 20 kHz ve 35 kHz olmak üzere iki farklı frekansta gerçekleştirilmiştir. Üretilen 316L tozlarının şekli belirlemek için taramalı elektron mikroskopu kullanılmış, X-ışını Floresans Spektroskopisi ve Enerji Dağılımı X-ışını Spektroskopisi analizleriyle toz içindeki fazlar ve yüzdeleri belirlenmiştir. Araştırma, ultrasonik atomizasyon yönteminin yüksek küresellikte metal tozlarının üretiminde etkili bir teknik olduğunu göstermektedir. Bulgular, frekans artışının tozların ortalama partikül boyutunda belirgin bir küçülmeye neden olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle, 20 kHz frekansta üretilen metal tozlarının ortalama partikül boyutu 75,22 µm olarak belirlenirken, frekansın 35 kHz'e çıkarılmasıyla bu değer 55,3 µm'ye düşmüştür. Sonuçlar, daha yüksek frekansların ince toz üretiminde avantaj sağladığını ve atomizasyon sürecinin verimliliğini optimize etmek için kritik bir parametre olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Ultrasonik atomizasyon, 316L tozu, frekans, toz karakterizasyonu

Abstract

The aim of this study is to experimentally investigate the production and characterization processes of 316L powder using ultrasonic atomization method. The manufacturability parameters were determined as the suggested parameters on the ultrasonic atomization device. The experimental studies were conducted at two different frequencies, namely 20 kHz and 35 kHz. Scanning electron microscope was used to determine the shape of the produced 316L powders, while phases and percentages within the powder were identified through XRF and SEM-EDX analyses. The research demonstrates that the ultrasonic atomization method is an effective technique for producing highly spherical metal powders. The findings reveal that increasing the frequency leads to a significant reduction in the average particle size of the powders. Specifically, the average particle size of metal powders produced at a frequency of 20 kHz was determined to be 75.22 µm, while increasing the frequency to 35 kHz reduced this value to 55.3 µm. The results indicate that higher frequencies offer advantages for the production of finer powders and serve as a critical parameter for optimizing the efficiency of the atomization process.

Keywords: Ultrasonic atomization, 316L powder, frequency, powder characterization

1 Giriş

Ekleme imalat, endüstriyel üretimde giderek daha fazla önem kazanan yenilikçi bir teknolojidir. Bu teknolojiye, metal tozları temel malzeme olarak kullanılarak karmaşık parçalar katman katman oluşturulur. 316L paslanmaz çeliği, yüksek korozyon direnci, mekanik dayanımı ve biyoyumluluğu gibi özellikleri nedeniyle eklemeli imalat süreçlerinde tercih edilmektedir. Bu özellikler, malzemenin özellikle enerji, kimya ve sağlık sektörlerinde kritik uygulamalarda kullanımını mümkün kılmaktadır. Çalışmamızda, 316L paslanmaz çeliğinin eklemeli imalatta optimal performans sunabilecek bir malzeme olarak seçilmesi, bu alandaki uygulama potansiyelini artırma hedefiyle desteklenmiştir. Metal tozlarının seçimi ve işlenmesi, eklemeli imalat sürecindeki kalite, performans ve verimlilik açısından kritiktir. Metal tozları, farklı metal alaşımlarını içerebilir ve mühendislik gereksinimlerine göre çeşitlilik gösterebilir. Eklemeli imalat süreçlerinde kullanılan metal tozunun yüksek saflıkta, belirli bir partikül boyut aralığında ve küresel olması önemlidir [1]. Bu özellikler, genellikle gaz atomizasyonu tekniği ile elde edilebilir. Ancak, maliyet ve toz kalitesi göz önünde bulundurulduğunda, mevcut konvansiyonel prosesler genellikle istenilen verimi

sağlayamamaktadır. Özellikle eklemeli imalat alanında, yüksek küresellik ve akışkanlık gereksinimlerinin artması, gaz atomizasyon yöntemlerinde maliyetleri artırmaktadır. Bu nedenle, mevcut çalışmalar, daha etkin ve verimli gaz atomizasyonu prosesleri geliştirmek için parametrelerin optimize edilmesi üzerine odaklanmaktadır [2]-[5]. Bu bağlamda, son yıllarda ultrasonik atomizasyon (UA) yöntemi, sektörel ihtiyacı karşılama potansiyeline sahip önemli bir alternatif olarak dikkat çekmektedir [6]-[8]. Bu yöntem, ultrasonik frekanstaki kapiler dalgaları kullanarak erimiş metalin ince damlacıklara ayrılmasını sağlar. UA, eklemeli imalat ve kaplama için toz üretimine yönelik en umut verici teknolojilerden biridir ve özellikle özelleştirilmiş bileşimlerde (özel uygulama çelikleri, nikel/kobalt süper alaşımları, titanyum-alüminid ara metalikler, hafıza şekilli alaşımlar, kitle metalik camlar, yüksek entropi alaşımları, soylu metaller ve diğerleri) küçük miktarlarda tozların üretiminde düşük maliyetle kullanılır [9]. Ultrasonik atomizasyonun, metal tozlarının yüksek saflıkta, belirli bir partikül boyutunda ve küresel olması gibi gereksinimlerini karşılamada etkili olduğunu gösteren araştırmalar bulunmaktadır. [7], [10]-[11]. Ancak, ultrasonik atomizasyon sürecinde gaz atomizasyonunda olduğu gibi üretim parametrelerinin etkisinin detaylı bir

*Yazışılan yazar/Corresponding author

şekilde araştırılmadığını belirtmek gerekmektedir. Kustron ve diğerleri [12], metal tozu üretimine yönelik geliştirilen ultrasonik atomizasyon teknolojisinin ilk aşamasını tanıttıkları çalışmalarında, üretilen damlaların özelliklerini etkileyen önemli parametreler arasında sonotrot titreşim frekansı ve çalışma levhasının titreşim genliğinin bulunduğunu belirtmişlerdir.

316L paslanmaz çelik, nükleer santrallerde yüksek basınçlı boru hatları ve ısı eşanjörleri gibi kritik mühendislik uygulamalarında, kimya endüstrisinde agresif kimyasallara dayanıklı reaktör tankları üretiminde ve sağlık sektöründe cerrahi implantların imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık dayanımı ve üstün korozyon direnci özellikleri sayesinde, bu çelik türü mühendislik alanında vazgeçilmez bir malzeme olarak önemli bir rol oynamaktadır [13]. Bu makalede, ultrasonik atomizasyon yöntemiyle üretilen 316L tozlarının özellikleri, bu yöntemin kullanıldığı frekansın değişimine bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, tozlara SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu), EDX (Enerji Dağılımı X-ışını Spektroskopisi), XRF (X-ışını Floresans Spektroskopisi) ve BET (Brunauer-Emmett-Teller) analizleri uygulanmıştır. Ayrıca, parçacık boyut dağılımları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

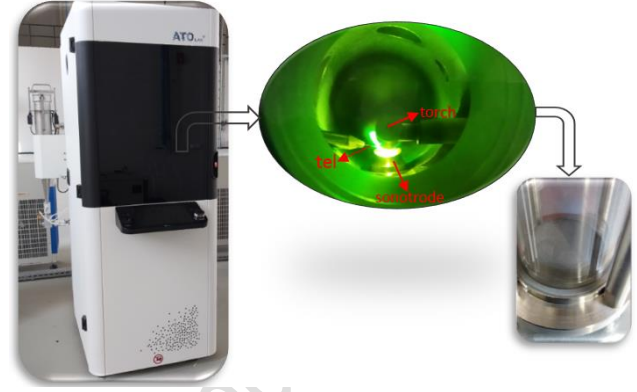
Tozların küresel yapıda olması ve belirli bir boyut aralığında üretilmesi, toz yatağında düzgün bir dağılım sağlamayı ve katmanlar arası güçlü bağlanmayı hedeflemektedir. Böylece, nihai parçalarda yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ve mekanik performansın artırılması amaçlanmıştır.

Ultrasonik atomizasyon, gaz atomizasyonu, su atomizasyonu ve mekanik öğütme gibi yöntemlerle karşılaştırıldığında çeşitli avantajlar sunar. Gaz atomizasyonu, yüksek kaliteli tozlar üretmekle birlikte maliyetlidir. Su atomizasyonu daha düşük maliyetlidir ancak küresel partikül üretiminde sınırlıdır. Mekanik öğütme yöntemi ise partikül boyutunun homojenliğini sağlamakta yetersiz kalır. Ultrasonik atomizasyon yöntemi, daha düşük maliyetle yüksek küresellikte ve akışkan tozlar üretme imkânı sunarken, küçük miktardaki özelleştirilmiş alaşımların üretimi için de uygun bir seçenek oluşturmaktadır. Çalışmanın önemini artıran bir faktör ise, kullanılan teknolojinin Türkiye'de sadece belirli bir merkezde bulunmasıdır. Türk araştırmacılar ve endüstri profesyonelleri için, ultrasonik atomizasyonun potansiyelini anlamak ve toz üretimi üzerindeki etkilerini değerlendirmek önemli bir fırsat sunabilir. Ayrıca, bu teknolojinin eklemeli imalat ve diğer endüstriyel uygulamalardaki etkinliğini artırabilir.

2 Materyal ve metot

Deneysel çalışmalar, Gazi Üniversitesi Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezinde (EKTAM) bulunan, ultrasonik atomizasyon ile metal tozu üreten ATO Lab+ cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Bu cihaz, elektrik arkıyla ham maddeyi ergiterek, yüksek frekansta titreşen ultrasonik dalgaların yardımıyla ergiyik metal malzemeleri ince partiküllere dönüştürmektedir (bk. [14]). Toz, ticari olarak temin edilebilir 1.2 mm çapındaki 316L telinin kullanılmasıyla elde edilmiştir. 20 kHz ve 35 kHz frekansta ultrasonik atomizasyon yöntemiyle üretilen 316L tozlarının atomizasyon parametreleri Tablo 1' de verilmiştir. Parametreler, 316L paslanmaz çelik tozlarının üretimi için cihazda sağlanan default (varsayılan) üretim ayarları esas alınarak belirlenmiştir. Atomizasyon sürecinde ultrasonik titreşim genliği %75 olarak ayarlanmıştır, bu da ultrasonik sistemin maksimum kapasitesinin %75 oranında kullanıldığını göstermektedir. Pompa akışı ise %65 olarak belirlenmiştir; bu, pompanın

maksimum kapasitesinin %65' inde çalıştığı anlamına gelir. Çalışmada kullanılan toz üretim cihazı, başlangıçta 35 kHz frekansında çalışmak üzere tasarlanmıştır. Daha sonra, üretici firma tarafından cihazın ilgili ünitesi değiştirilerek 20 kHz frekansında da testler gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında koruyucu gaz olarak argon kullanılmış ve gaz akışı 20L/dak olarak sabit tutulmuştur.



Şekil 1. ATO Lab+ ve toz üretimi.

Figure 1. ATO Lab+ and Powder Production.

Tablo 1. Ultrasonik Atomizasyon parametre değerleri.

Table 1. Ultrasonic Atomization Parameter Values.

Faktörler	Birim	Değerler
Elektrik akımı	A	120
Ultrasonik titreşim genliği	%	75
Pompa akışı	%	65

316L tozlarının SEM görüntüleri ve EDX analizi, ZEISS Gemini 500 FESEM' den elde edilmiştir. XRF ölçümleri, PANALYTICAL Axios Advanced ile yapılmıştır. BET analizi sonuçları, MICROMERITICS Gemini VII Surface Area And Porosity cihazından alınmıştır. Ölçümler, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Parçacık boyut dağılımı için, Gazi Üniversitesi EKTAM bünyesindeki, MICROTRAC MRB SYNC toz partikül boyut ve şekil analizi cihazı kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Deneyler sonucunda üretilen 316L tozlarının boyut dağılımı, tane şekli, içerdikleri fazlar ve bu fazların konsantrasyonları ile kimyasal bileşimi analiz edilmiştir.

Üretilen tozların Dv (10), Dv (50) ve Dv (90) boyutları (atomizasyon cihazından alındığı şekliyle) ve spesifik yüzey alanlarının frekansla değişimleri Tablo 2' de gösterilmiştir. Şekil 2' de, tozların parçacık boyut dağılımlarını karşılaştıran bir grafik sunulmuştur. Tablo 2 incelendiğinde üretilen tozların 40.5 ile 107 µm aralığında ve en düşük ortalama toz boyutunun (Dv50) 35 KHz frekansta 55.3 µm olduğu görülmektedir. 35 kHz' de üretilen tozun %10' u 40.5 µm' nin altında, %90' ı ise 83.65 µm' nin altında tozdan oluşmaktadır. 20 kHz frekansta üretilen tozun ortalama toz boyutu (Dv50) 75.22 µm iken, frekans 35 kHz' e çıkarıldığında ortalama toz boyutu (Dv50) 55.3 µm' ye düşmektedir. Tablo 2'deki sonuçlara göre, frekans arttıkça toz boyutunun küçüldüğü gözlemlenmiştir. Toz boyutu

küçüldükçe spesifik yüzey alanı artmıştır. Tozun kalitesini değerlendirmek için kullanılan yardımcı metriklerden biri olan Span değeri, toz partiküllerinin boyut dağılımının genişliğini ifade eder. Daha dar bir boyut dağılımı, daha küçük bir Span değeri ile karakterizedir.

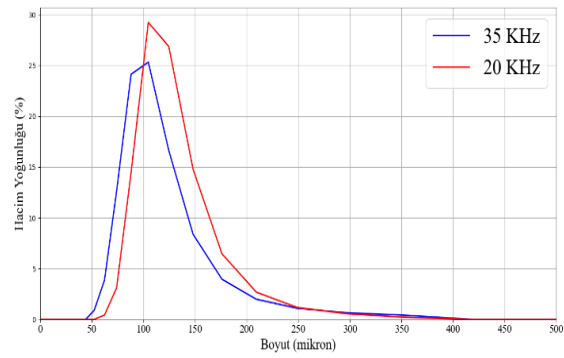
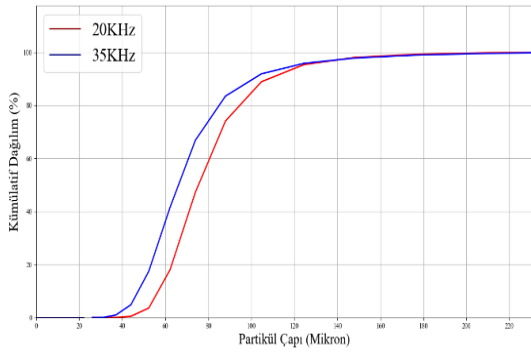
20 kHz' de üretilen tozun ortalama küresellik değeri 0.975 ve küreselliği 0.90' dan büyük olan partiküllerin toplam hacmi %95.07 olarak belirlenmiştir. 35 kHz' de üretilen tozların ortalama küresellik değeri de 0.975' tir ve küreselliği 0.90' dan büyük olan partiküllerin toplam hacmi %90.99 olarak tespit edilmiştir.

BET analizi sonuçlarına göre, adsorpsiyon gözenek hacmi 20 kHz frekansında 0,000444 cm³/g, 35 kHz frekansında ise 0,005496 cm³/g olarak ölçülmüştür. Bu düşük değerler, malzemenin gözenekli yapıda olmadığını göstermektedir. Bulunan gözenek hacimlerinin, partiküller arasındaki boşluklardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Table 2. Size measurements of the produced 316L powders.

Frekans [kHz]	D _v (10) [μm]	D _v (50) [μm]	D _v (90) [μm]	Span (D _v (90)-D _v (10))/D _v (50)	Spesifik yüzey alanı [m ² /g]	Standart sapma[μm]
20	57.72	75.22	107	0.655144908	0.0942	18.13
35	40.5	55.3	83.65	0.780289331	1.1000	15.62

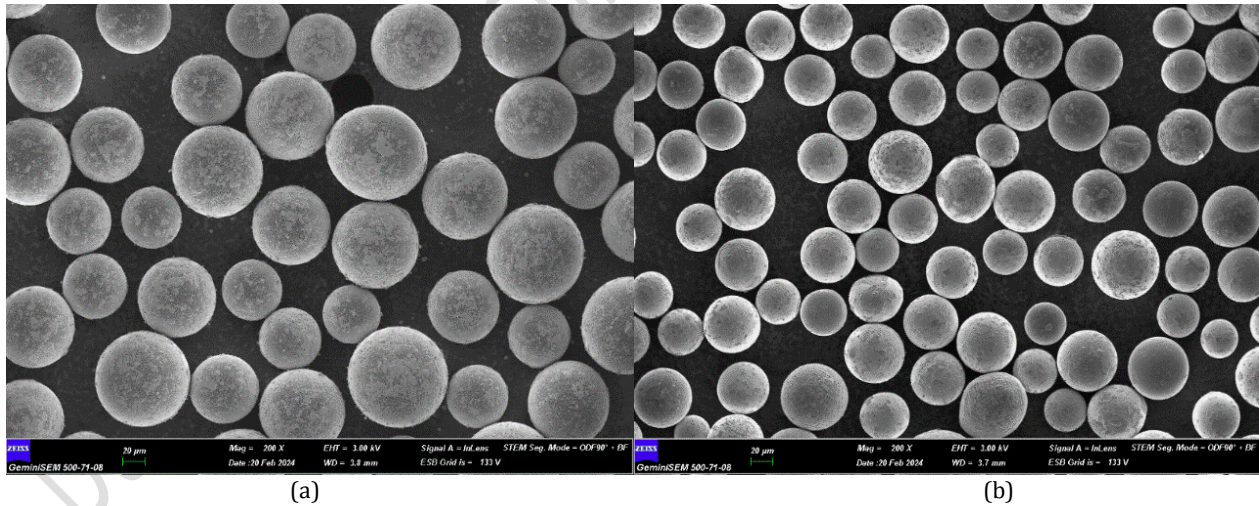
Partiküllerin gözenekli olmaması, her iki örnekte de yüzey alanı değerlerinin oldukça düşük çıkmasına neden olmaktadır. Ancak, 35 kHz frekansta üretilen partiküller daha küçük boyutlarda olduğu için dış yüzey alanı değerinin de daha yüksek olması beklenmektedir. Elde edilen yüzey alanı sonuçları, 20 kHz için 0.0942 m²/g, 35 kHz için ise 1.1 m²/g olarak belirlenmiştir. Bu veriler, partikül boyutunun yüzey alanına etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır.



Tablo 2. Üretilen 316L tozlarının boyut ölçümleri.

Şekil 2. Farklı frekanslarda üretilen tozların parçacık boyut dağılımı.

Figure 2. Particle Size Distribution of Powders Produced at Different Frequencies.

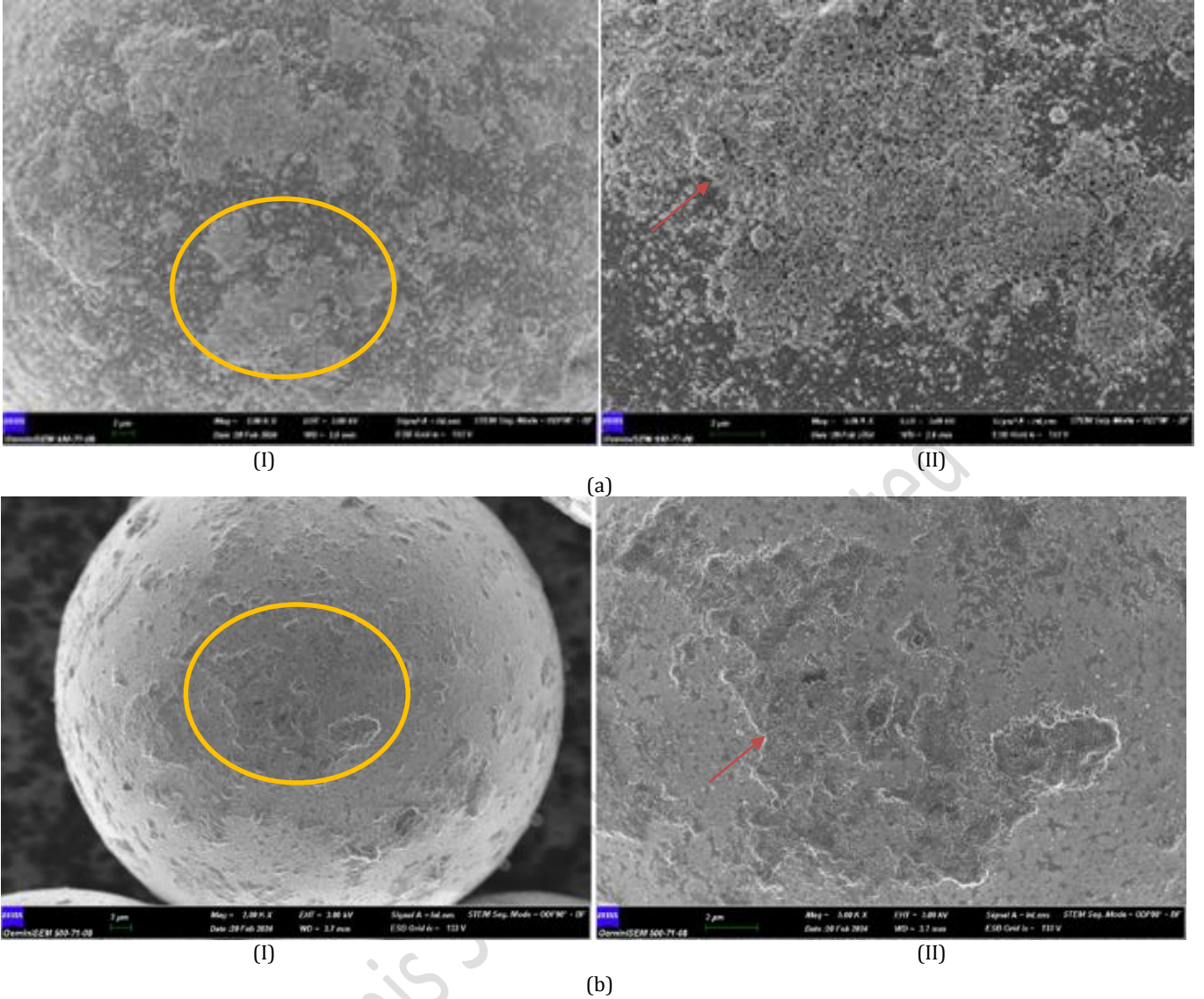


Şekil 3. Farklı frekanslarda üretilen 316L tozlarının SEM görüntüleri a) 20 kHz b) 35 kHz.

Figure 3. SEM Images of 316L Powders Produced at Different Frequencies a) 20 kHz b) 35 kHz.

Farklı frekanslarda üretilen 316L tozlarının SEM görüntüleri (200X) Şekil 3' te verilmiştir. Tozların küresel şekilde olduğu ve 35 kHz' de üretilen tozların küçüldüğü görülmektedir. Şekil 4'

te verilen SEM görüntülerinde toz yüzeyleri incelendiğinde, bir toz tanesinin alt tanelerden oluştuğu ve frekansın artmasıyla alt tanelerin boyutunun küçüldüğü gözlenmiştir.

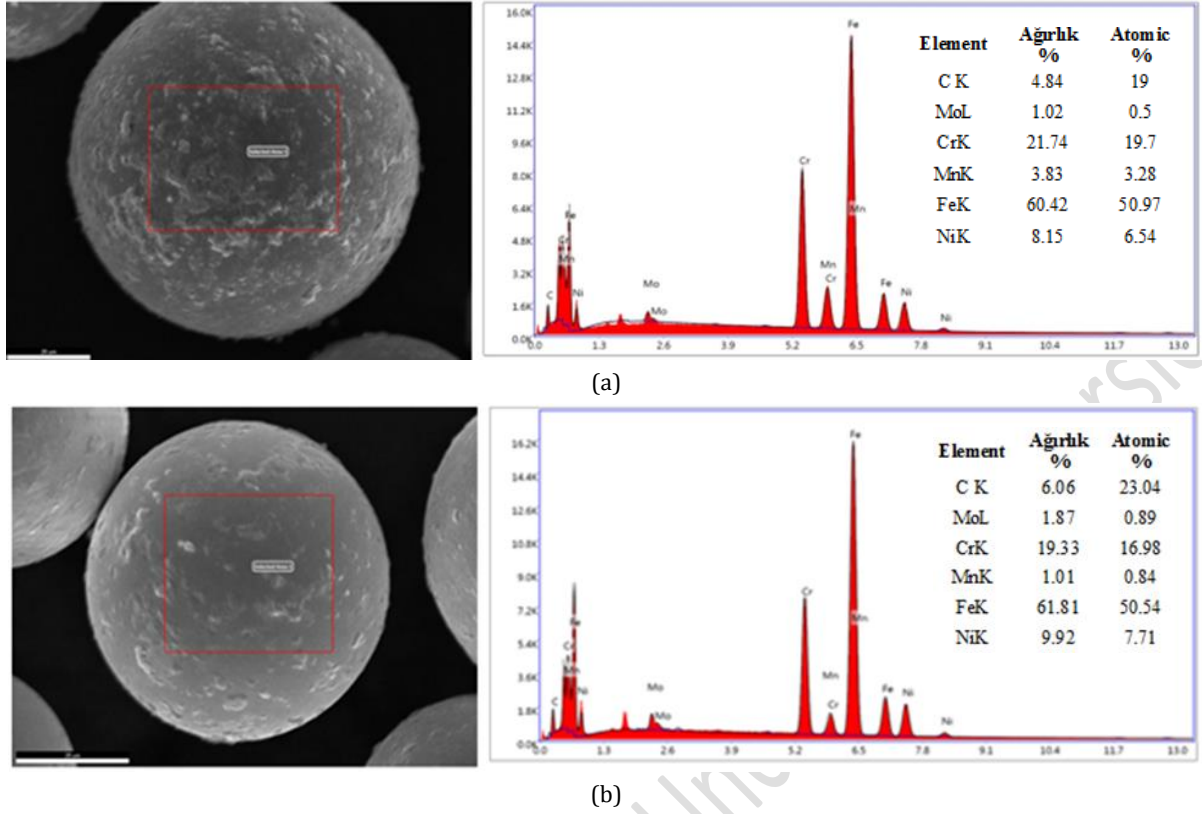


Şekil 4. Farklı frekanslarda üretilen 316L tozlarının SEM görüntüleri (I. Görüntüler 2000X büyütme, II. görüntüler ise 5000X büyütme ile elde edilmiştir.) a) 20 kHz b) 35 kHz.

Figure 4. SEM Images of 316L Powders Produced at Different Frequencies (I. The images were obtained at a magnification of 2000X, while II. the images were obtained at a magnification of 5000X.) a) 20 kHz b) 35 kHz

Şekil 5'te, 20 kHz ve 35 kHz frekansta üretilen 316L tozlarının belirli bir bölgeden alınan SEM-EDX analizleri sonucunda mikro yapıda Fe ana matris fazı gözlemlenmiştir. Üretilen tozların kimyasal analizini belirleyebilmek amacıyla XRF analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları Tablo 3' te verilmiştir. Her iki analizin sonuçları, EDX' in yüzeysel analiz sunarken XRF' in derinlik analizi gerçekleştirdiğini göstermektedir. Bu durum,

üretilen tozların analizinde elementlerin konsantrasyonlarında farklılıklara yol açmıştır. Elde edilen veriler, malzemenin AISI 316L standardına uygunluğunu her iki yöntemle de desteklemekte ve bu standardın belirlediği bileşim aralıklarına yakın değerler sunmaktadır. Farklılıkların, analiz yöntemlerinin doğasından ve örnekleme derinliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla, her iki yöntemin sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.



Şekil 5. 316L tozunun EDX spektrumu a) 20 kHz b) 35 kHz.
Figure 5. EDX Spectrum of 316L Powder a) 20 kHz b) 35 kHz.

Tablo 3. Farklı frekanslarda üretilen 316L tozlarının kimyasal Bileşimi (XRF)
Table 3. Chemical Composition of 316L Powders Produced at Different Frequencies (XRF)

Element	Değer % (20 kHz)	Değer % (35 kHz)	AISI 316L (%) [9]
C	0.000	0.000	<0.030
Al	0.000	0.011	
Si	0.396	0.521	<0.75
P	0.009	0.021	<0.045
S	0.048	0.017	<0.03
Ti	0.000	0.007	
V	0.044	0.031	
Cr	16.391	16.387	16.0–18.0
Mn	1.135	0.834	<2.0
Fe	66.354	65.704	Kalan
Co	0.517	0.535	
Ni	11.625	12.048	10.0–14.0
Cu	0.088	0.051	-
Mo	3.380	3.797	2.0–3.0
Sn	0.007	0.010	

Analiz sonuçları, üretilen 316L tozlarındaki kobalt, bakır ve vanadyum elementlerinin varlığını göstermektedir. Bu elementlerin varlığı, hammadde telinin kimyasal bileşimi ile ultrasonik atomizasyon sürecinde meydana gelebilecek olası kontaminasyon ile ilişkilendirilmektedir. Ancak, bu elementlerin iz miktarlarındaki varlığının, malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemeyecek düzeyde olduğu değerlendirilmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, ultrasonik atomizasyon yöntemiyle farklı frekanslarda üretilen 316L tozlarının karakterizasyonu yapılmıştır. Deneysel, Türkiye'de tek bir merkezde bulunan (EKTAM) ATO Lab + metal tozu üretim cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

Ergiyik metale gönderilen ultrasonik dalgaların frekans değerinin artışı tozun partikül boyutunu küçültmüştür. 20 kHz' de ortalama toz boyutu 75.22 μm iken 35 kHz' de 55.3 μm ' dir. SEM görüntüleri incelendiğinde, oluşan partiküllerin küresel olduğu ve herhangi bir uydu oluşumunun bulunmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 3a ve 3b).

SEM-EDX ve XRF analizlerinde mikro yapıda Fe ana matris fazı gözlenmiş ve frekans değişimine bağlı olarak bileşimdeki değişkenliklerin oldukça küçük olduğu belirlenmiştir.

Üretilen partiküllerin gözenekliliğe sahip olmaması, elde edilen düşük yüzey alanı değerlerinin temel nedeni olarak öne çıkmaktadır. Bu yüzey alanı değerleri, parçacıkların dış yüzeylerinden kaynaklanmakta olup, gözenekli olmayan mikroböyütlü partiküller için mevcut literatürle tutarlı bir şekilde sonuç vermektedir.

Sonuç olarak, bu bulgular, frekansın metal tozlarının özellikleri üzerindeki kritik rolünü vurgulayarak ultrasonik atomizasyonun metal tozu üretiminde uygulanabilirliğini desteklemektedir.

5 Conclusions

In this study, the characterization of 316L powders produced at different frequencies using the ultrasonic atomization method was conducted. The experiments were carried out using the ATO Lab + metal powder production device, which is located at a single center in Turkey (EKTAM).

The results obtained are as follows: The increase in the frequency of ultrasonic waves sent to the molten metal reduced the particle size of the powder. At 20 kHz, the average particle size was 75.22 μm , while at 35 kHz, it was 55.3 μm .

SEM images revealed that the formed particles were spherical, with no satellite formations observed (Figures 3a and 3b). SEM-EDX and XRF analyses indicated the presence of the Fe matrix phase in the microstructure, and it was determined that the variability in composition was quite small, depending on frequency changes.

The lack of porosity in the produced particles is identified as the primary reason for the low surface area values obtained. These surface area values are derived from the outer surfaces of the particles and are consistent with existing literature for non-porous micro-sized particles.

In conclusion, these findings emphasize the crucial role of frequency in determining the properties of metal powders, supporting the applicability of ultrasonic atomization in metal powder production.

6 Teşekkür

7 Yazar katkı beyanı

Yapılan çalışmada, fikir oluşturma, planlama, literatür taraması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, makalenin yazımı ve kontrolü Yazar 1 tarafından gerçekleştirilmiştir.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”
“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

9 Kaynaklar

- [1] Basci UG, Yamanoglu R. “Eklemeli metal imalat teknolojileri için metal tozu üretim yöntemleri”. Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi, Kocaeli, Türkiye, 26-28 Nisan 2019.
- [2] Çetin T, Akkaş M, Boz M. “Gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen AM60 magnezyum alaşım tozunun toz karakterizasyonu üzerine gaz basıncının etkisinin araştırılması”. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(2), 967-978, 2019.

- [3] Akkaş M, Akra KMEM, Çetin T, BOZ M. “Gaz Atomizasyon Yöntemi ile AZ31 Mg Tozu Üretiminde Gaz Basıncının Etkisinin Araştırılması”. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 215-221, 2019.
- [4] Mathias LET, Andreoli AF, Gargarella P. “Gas atomization of A2 tool steel: effect of process parameters on powders’ physical properties”. Journal of Alloys and Compounds, 960, 2023.
- [5] Akkaş M, Akra KMEM, Çetin T, Boz M. “Investigation of Gas Pressure Effect on Powder Characterization of AZ31 Alloy Produced By Gas Atomization Method”. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences 37 (2), 373-380, 2019.
- [6] Akyıldız Y, Sarı S, Kaya OF, Yamanoglu R. “Ultrasonik Atomizasyon: Toz Üretiminde Alternatif Bir Yol”. Manufacturing Technologies and Applications, 4(2), 81-91, 2023.
- [7] Monti C, Turani M, Papis K, Bambach M. “A new Al-Cu alloy for LPBF developed via ultrasonic atomization”. Materials and Design, 229, 2023.
- [8] Halápi D, Varga L. “Ultrasonic Powder Atomization for Additive Manufacturing”. International Journal of Engineering and Management Sciences, 8 (2), 2023.
- [9] Grzelak K, Bielecki M, Kluczyński J, Szachogłuchowicz I, S’niez’ek L, Torzewski J, Łuszczek J, Słoboda Ł, Wachowski M, Komorek Z, et al. “A Comparative Study on Laser Powder Bed Fusion of Differently Atomized 316L Stainless Steel”. Materials, 15, 2022.
- [10] Bielecki M, Kluczyński J, Słoboda Ł. “Manufacturing of metallic powders for AM market by ultrasonic atomization method”. Proceedings of the Metal Additive Manufacturing Conference (MAMC 2021), Vienna, Austria, 3- 5 November 2021.
- [11] Bałasz B, Bielecki M, Gulbiński W, Słoboda Ł. “Comparison of ultrasonic and other atomization methods in metal powder production”. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 116(1), 11-24, 2023.
- [12] Kustron P, Korzeniowski M, Sajbura A, Piwowarczyk T, Kaczynski P, Sokolowski P. “Development of High-Power Ultrasonic System Dedicated to Metal Powder Atomization”. Applied Sciences, 13 (15), 2023.
- [13] Yürük, A. “TIG Kaynak Parametrelerinin AISI 316L Paslanmaz çeliğinin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisi”. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(1), 76-85, 2023.
- [14] Toprak İB. “Yeni bir teknoloji: metal tozu atomizeri, ATO”. 1. Bilsel International Korykos Scientific Researches and Innovation Congress, Mersin, Türkiye, 27-28 Ocak 2024.