



## Investigation of the effect of gas pressure on powder characterization of AM60 magnesium alloy powder produced by gas atomization method

Tayfun Çetin<sup>1</sup> , Mehmet Akkaş<sup>2\*</sup> , Mustafa Boz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Manufacturing Engineering, Karabük University, Karabük, 78050, Turkey

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Kastamonu University, Kastamonu, 37150, Turkey

### Highlights:

- Production of magnesium alloy AM60 Powder by gas atomization method
- The effect of gas pressure in powder production by gas atomization method
- Powder characterization of magnesium alloy AM60 powder

### Keywords:

- Gas atomization method
- AM60 alloy powder
- Gas pressure
- Powder characterization

### Graphical/Tabular Abstract

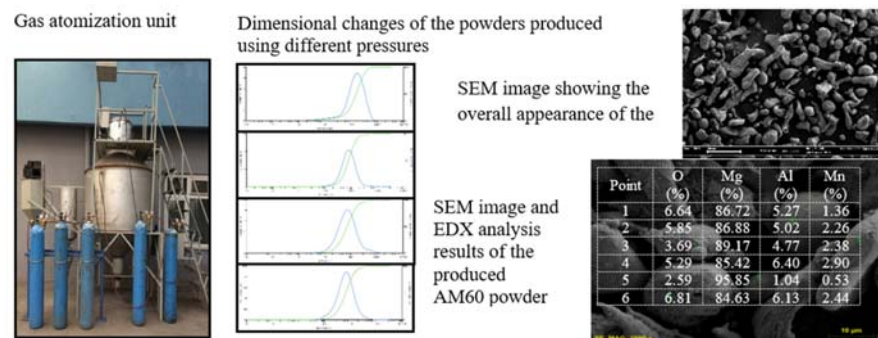


Figure A. Production process diagram and produced AM60 powder

### Article Info:

Research Article

Received: 15.12.2018

Accepted: 10.12.2019

### DOI:

10.17341/gazimmfd.497759

### Correspondence:

Author: Mehmet Akkaş

e-mail:

mehmetakkas@kastamonu.edu.tr

phone: +90 366 280 29 58

**Purpose:** In this study, AM60 magnesium alloy powder produced by gas atomization method is produced. As a result of the literature research, there is no study about the production of AM60 magnesium alloy powder by gas atomization method. For this purpose, AM60 magnesium alloy powder production was studied in order to fill this gap in literature.

### Theory and Methods:

Experimental studies were carried out in the gas atomization unit in Karabük University Technology Faculty Manufacturing Engineering Department. The experiments were carried out at a constant temperature of 820 °C with a 2 mm nozzle diameter and 4 different gas pressures (5, 15, 25, 35 bar). Argon gas was used to atomize the melt. In order to determine the shape of the AM60 powder produced, scanning electron microscope (SEM), XRD, XRF and SEM-EDX analysis were used to determine the phases formed in the internal structures of the powders and the % ratios of these phases, and laser measuring device was used for the powder size analysis. Hardness tests were performed to determine the mechanical properties of the powders produced.

### Results:

As a result of experimental studies, it was observed that the size of the powder decreased due to the increase of gas pressure. It has been found that gas pressure has a significant effect on powder size and shape in powder production by gas atomization method. Powder produced is generally observed in the form of ligament, droplet, acicular, flake and spherical shape. As a result of the XRD analysis,  $\alpha$  (Mg main matrix) phase,  $\beta$  phase  $Mg_{17}Al_{12}$  and very small amount of Mn were detected in the structure. The hardness of the powders produced is higher than the hardness of ingot material (67 HV<sub>0,025</sub>).

### Conclusion:

In the gas atomization unit, the production of magnesium alloy AM60 powder was carried out by the gas atomization method, which is widely used in the production of powders. In the production of gas atomized magnesium alloy AM60 powder, the smallest powder size was measured as 820 °C, 2 mm nozzle diameter and 35 bar pressure as 41.95  $\mu$ m. As a result of XRF analysis, it was determined that the AM60 powder produced and the chemical composition of the ingot material were close.



## Gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen AM60 magnezyum alaşım tozunun toz karakterizasyonu üzerine gaz basıncının etkisinin araştırılması

Tayfun Çetin<sup>1</sup> , Mehmet Aktaş<sup>2\*</sup> , Mustafa Boz<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye

<sup>2</sup>Kastamonu Üniversite, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 37150, Kastamonu, Türkiye

### Ö N E Ç I K A N L A R

- Gaz atomizasyon yöntemi ile magnezyum alaşımı AM60 Tozu üretimi
- Gaz atomizasyon yöntemi ile toz üretiminde gaz basıncının etkisi
- Magnezyum alaşımı AM60 tozunun toz karakterizasyonu

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 15.12.2018

Kabul: 10.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.497759

#### Anahtar Kelimeler:

Gaz atomizasyon yöntemi,  
AM60 alaşım tozu,  
gaz basıncı,  
toz karakterizasyonu

#### ÖZET

Bu çalışmada, gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen AM60 magnezyum alaşımı tozunun şekli ve boyutu üzerine gaz basıncının etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler 820°C sabit sıcaklıkta, 2 mm nozul çapında ve 4 farklı gaz basıncı (5, 15, 25, 35 bar) uygulanarak yapılmıştır. Eriyiği atomize etmek için argon gazı kullanılmıştır. Üretilen AM60 tozunun şeklini belirleyebilmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM), üretilen tozların iç-yapılarında oluşan fazları ve bu fazların % oranlarını belirleyebilmek için XRD, XRF ve SEM-EDX analizi, toz boyut analizi için ise lazer ölçüm cihazı kullanılmıştır. Üretilen tozların mekanik özelliklerini belirleyebilmek için sertlik testleri yapılmıştır. Üretilen AM60 alaşım tozlarının genel görünümünün ligamen, çubuksu, damlamsı, flake (pul) ve küresel şeklinde olduğu, fakat gaz basıncının artmasına bağlı olarak tozların şeklinin çoğunlukla flake ve küresel'e doğru değiştiği görülmüştür. Elde edilen en ince tozun 820°C sıcaklıkta, 2 mm nozul çapında 35 bar gaz basıncında oluştuğu ve tozların genelinin karmaşık şekilli olduğu tespit edilmiştir.

## Investigation of the effect of gas pressure on powder characterization of AM60 magnesium alloy powder produced by gas atomization method

### H I G H L I G H T S

- Production of magnesium alloy AM60 Powder by gas atomization method
- The effect of gas pressure in powder production by gas atomization method
- Powder characterization of magnesium alloy AM60 powder

#### Article Info

Research Article

Received: 15.12.2018

Accepted: 10.12.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.497759

#### Keywords:

Gas atomization method,  
AM60 alloy powder,  
gas pressure,  
powder characterization

#### ABSTRACT

In this study, the effect of gas pressure on the shape and size of AM60 magnesium alloy powder produced by the gas atomization method has been experimentally investigated. The experiments were carried out at a constant temperature of 820°C with a 2 mm nozzle diameter and 4 different gas pressures (5, 15, 25, 35 bar). Argon gas was used to atomize the melt. In order to determine the shape of the AM60 powder produced, scanning electron microscope (SEM), XRD, XRF and SEM-EDX analysis were used to determine the phases formed in the internal structures of the powders and the % ratios of these phases, and laser measuring device was used for the powder size analysis. Hardness tests were performed to determine the mechanical properties of the powders produced. The general appearance of the AM60 alloy powders produced was ligament, acicular, droplet, flake and spherical in shape, but due to the increase of gas pressure, the shape of the powders changed mostly towards flake and spherical. It was determined that the finest powder was formed at 820°C, 35 bar gas pressure at 2 mm nozzle diameter and the powder was generally complex.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: tayfuncetin@outlook.com, mehmetakkas@kastamonu.edu.tr, mboz@karabuk.edu.tr /

Tel: +90 366 280 29 58

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Magnezyum alaşımları  $1,74 \text{ gr/cm}^3$  yoğunluk değeri ile hafiflik ve yüksek özgül mukavemet özelliklerinden dolayı savunma sanayi ve taşımacılık sektöründe iyi bir öneme sahiptir [1]. Alaşımsız olarak düşük mukavemet ve tokluk değerlerine sahip olduğundan dolayı genelde diğer elementlerle alaşım oluşturularak kullanılmaktadır. Magnezyum ayrıca yüksek ısı iletkenlik, iyi elektromanyetik koruma, yüksek boyutsal kararlılık, yüksek sönümlenme, kolay geri dönüşüm, iyi işlenebilme ve özelliklerine de sahiptir [2]. Bu özellikleri ile Mg alaşımları otomotiv, havacılık, bilgisayar, spor malzemeleri, mobil telefonlar gibi pek çok endüstride kullanılmaktadır. Düşük ağırlık ve metabolizmaya uyumlu olmasından dolayı implant malzemesi olarak da kullanılmaktadır [3].

Mg alaşımlarından AM serisi alaşımlar yüksek toklukları ve enerji absorblama özellikleri bakımından özellikle direksiyon, tekerlek, otomobil koltuk iskeleti yapısında kullanılır [4, 5]. AM60 alaşımları iyi uzama ve darbe dayanımlarına sahiptirler. Aynı zamanda, iyi dökülebilirliğe, iyi mekanik özelliğe ve korozyon direncine sahiptirler. Fakat bu alaşımlar  $120^\circ\text{C}$ ' nin üzerindeki sıcaklıklarda düşük sürünme direncine sahiptirler. AM60 alaşımlarının mikro yapısı genelde  $\alpha$ -Mg ile  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  fazlarından meydana gelmektedir [6].

Magnezyum, bilhassa Al, Zn ve Mn olmak üzere, toprak alkali metaller ve çok az miktarlardaki Si, Sn, Pb, Y, Ba, Sb, Ca, Sr ve Bi gibi elementlerle alaşım yapılarak, mekanik özellikleri iyileştirilmekte ve gösterdiği iyileştirme performansı ile kullanım alanını her geçen gün genişletmektedir. AM60 (Mg-Al-Mn) alaşımları genellikle otomobil parçalarının üretiminde kullanılır ve bu alaşımların dökülebilirlik özelliği iyidir [4]. Yüksek eğme direnci gerektiren kapı, kaput ve bagaj kapağı gibi dış yüzeyi geniş otomobil saclarında magnezyum alaşımlarının kullanımı çeliğe nazaran %50, alüminyuma nazaran %20 ağırlık avantajı sağlamaktadır. Magnezyum alaşımlarından Mg-Al-Mn alaşımları dayanım, hafiflik ve kısmen iyi korozyon direnci gibi özelliklerinden ötürü endüstriyel öneme sahip bir malzemedir. Mg alaşımlarında Al, Mg' un katı çökelti dayanımını, ergiyiğin dökülebilirliğini kolaylaştırır ve döküm işleminde mikro gözenekleri azaltır. Mg alaşımlarında Al' un varlığı alaşımların katılma süresini mukavemetini ve sertlik değerlerini arttırmaktadır. Fakat sünekliği düşürmektedir.  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  intermetalik yapı içerisinde ( $\leq 120^\circ\text{C}$ ) oluşur ve yapının mukavemetini artırır. Al' un fazla miktarda alaşımda bulunması yapıda mikro gözenek oluşmasına neden olduğu bilinmektedir.[5]. Alaşım içerisinde Mn'ın bulunması yapının korozyon ve sürtünme direncini arttırmaktadır. Lakin Mg alaşımlarının mukavemetinde Mn' ın etkisi azdır [6]. Mn, Mg içerisinde %3,4'e kadar sıcaklığa bağlı olarak katı eriyik oluşturabilmektedir. Son 20 yıldır gaz atomizasyonu ile metal tozu üretim tekniği kimyasal homojenlik ve düzgün mikroyapı gibi özelliklerden dolayı geniş kullanım alanına sahiptir [7]. Atomizasyon, sıvı metalin hava, azot, argon

veya helyum gibi bir gazla parçalanıp oluşan damlacıkların katılarak toz haline getirilmesi işlemine denir. Gaz atomizasyonunda toz tane büyüklüğü ve dağılımını etkileyen gaz basıncı, nozul çapı ve sıcaklık gibi işlem parametreleri vardır. Bu çalışmada, gaz basıncı, nozul çapı ve metal ergitme sıcaklığı gibi atomizasyon değişkenlerinin toz tane boyutu ve dağılımına, toz şekline ve mikroyapısına olan etkileri üzerine araştırmalar yapılmıştır [8-10].

Toz metalürjisi döküm, sıcak ve soğuk presleme, talaşlı imalat gibi üretim yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Döküm yöntemiyle kaba yapılı mikroyapılar üretildiğinden, toz metalürjisi daha ince bir mikro yapıyı teşvik etmek için etkili bir yol olarak görülmektedir [11-13]. Toz metalürjisi yöntemi ile kompozitler elde edilerek malzemelere yüksek sıcaklıkta yüzey aşınma direnci, yüzey sürtünmesi ve yüzey gerilemelerinin artırılması gibi özellikler kazandırılabilir [14]. Toz metalürjisi yöntemiyle toz üretme tekniği 4 farklı yöntemle yapılır. Bunlar; mekanik yöntemler, kimyasal yöntemler, elektroliz yöntemi ve atomizasyon yöntemidir. Bu üretim yöntemleri içerisinde ince ve küresel tozlar elde etmek için en yaygın olarak gaz atomizasyon yöntemi kullanılır.

Atomizasyon, ergitilmiş metalin su, hava ve gaz basıncı ile veya mekanik olarak çok küçük damlacıklara parçalanması ve katılması olarak tanımlanır [15]. Bu yüzden atomizasyon işlemi su atomizasyonu, gaz atomizasyonu, santrifüj atomizasyonu ve vakum atomizasyonu olmak üzere 4 farklı bölüme ayrılır. Fakat üretilen metal ve metal dışı tozların %60'ından fazlasının gaz atomizasyonu ile üretilmesi bu yöntemi üstün kılmaktadır [16, 17]. Gaz atomizasyon yöntemiyle ergitilebilen her türlü metal ve alaşım tozlarının üretimini gerçekleştirmek mümkündür [18]. Gaz atomizasyon yöntemiyle toz üretiminde; gazın cinsi, gaz basıncı, nozul çapı ve ergitme sıcaklığı gibi parametreler kullanılır. Gaz basıncının artmasıyla, ergitilmiş malzemenin sıcaklığı ve viskozitesi düşer bu da daha küçük boyutta toz üretilmesini sağlar [19, 20].

Literatür araştırmaları sonucu, gaz atomizasyon yöntemi ile AM60 magnezyum alaşımı tozunun üretilebilirliği ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu amaçla, literatürdeki bu boşluğu doldurabilmek amacıyla AM60 magnezyum alaşımı tozu üretimi çalışılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

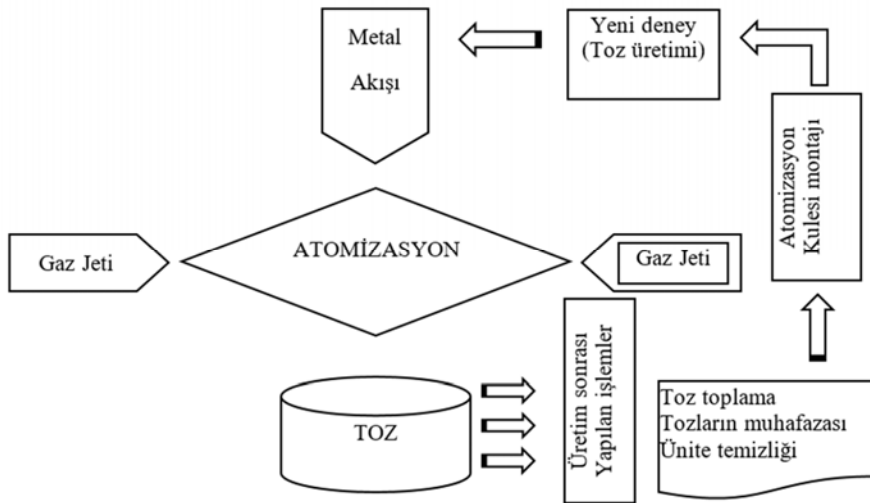
Bu çalışmada, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan gaz atomizasyon ünitesinde yapılmıştır. Gaz atomizasyonu ünitesinde, metal tozu üretim yöntemlerinden gaz atomizasyon yöntemi ile magnezyum alaşımı olan AM60 tozunun üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de görülen Gaz Atomizasyon Ünitesi sekiz temel bölümden oluşmaktadır. Bunlar; Ergitme fırını, atomizasyon kulesi, nozul ve nozul tutucu, toz toplama ünitesi, gaz basınç rampası, siklonlar, kontrol paneli, toz emiş fanı olarak ifade edilebilir.

Toz toplama ünitesi, siklonlar ve atomizasyon kulesi bir sonraki deney için temizlenmiştir. Ünitenin montajı tekrar yapılarak, yeni bir deney için aşağıdaki sıralanan işlemler

tekrar edilmiştir. Gaz atomizasyonu ile toz üretiminin temel prensibi, Şekil 2’de verilmiştir. Deneysel çalışmalar 820°C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 5, 15, 25 ve 35 bar uygulanarak



Şekil 1. Gaz atomizasyon ünitesi (Gas atomization unit)



Şekil 2. Gaz atomizasyon akış şeması (Gas atomization flow chart)

yapılmıştır. Sıvı metal eriyiği atomize etmek ve koruyucu gaz atmosferi oluşturmak için argon gazı kullanılmıştır.

Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen AM60 tozlarının deneyde kullanılan atomizasyon parametreleri, Tablo 1’ de verilmiştir.

**Tablo 1.** Atomizasyon parametreleri (Atomization parameters)

Numune No	Sıvı Metal Sıcaklığı (°C)	Nozul Çapı (mm)	Gaz Basıncı (bar)
1			5
2	820	2	15
3			25
4			35

Toz boyut analizleri, Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan Mastersizer 3000 model cihaz ile yapılmıştır. Cihazın çalışma prensibi, numune üzerine kırmızı ve mavi lazer ışığı gönderilir. Numuneden yansıyan ve kırılan lazer ışığı detektörler ile incelenir. Saçılan ışığın açısı ve şiddeti numunenin parçacık boyut dağılımını belirler. Ölçümler sırasında taşıyıcı ortam olarak saf su kullanılmıştır. Parçacık içerisinden geçen lazer ışığının saçılma açısı parçacık boyutuna bağlıdır. Parçacık boyutu küçüldükçe saçılma açısı logaritmik olarak artar. Büyük parçacıkların saçılma açıları düşük, saçılan lazer ışığının şiddeti yüksektir. Küçük parçacıklarda ise saçılma açısı yüksek, saçılan lazer ışığının şiddeti düşüktür.

Üretilen AM60 alaşım tozlarının SEM görüntüleri ve EDX analizleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Araştırma Laboratuvarlarında bulunan “Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem” marka cihazdan alınmıştır. SEM’de alınan görüntüler için tozlar, ‘carbon tape’ üzerine dökülmüş ve altın ile kaplanmıştır. Tozların XRD ölçümleri RIGAKU - Ultima IV modeli cihaz ile yapılmıştır. XRF ölçümleri ise RIGAKU ZSX Primus II modeli cihaz yardımıyla alınmıştır. Ölçümler, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Araştırma Laboratuvarlarında yapılmıştır. X-ışını

difraksiyonu (XRD), kristalin atomik ve moleküler yapısını incelemek için kullanılan bir yöntemdir. X-ışınları Floresans (XRF) spektroskopisi elementel kompozisyonu belirleme imkânı sağlar.

820°C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve farklı gaz basınçlarında (5, 15, 25, 35) üretilen AM60 tozların sertlik ölçümleri, HV<sub>0,025</sub> kg yük altında SHIMADZU marka HMV-G21 model mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bunun nedeni ise çok küçük toz boyutlarının makro sertlik cihazı kullanılarak sertlik ölçüm işleminin uygun bir şekilde yapılamayacağından, mikro sertlik ölçüm yöntemine başvurulmuştur. Üretilen tozlardan sertlik alınmasındaki amaç, tozun sertliğine atomizasyon gaz basıncının etkisini kıyaslamaktır.

Bu amaçla, sertlik ölçümü için farklı gaz basınçlarında (5, 15, 25 ve 35 bar) üretilen tozlar soğuk bakalite alınmıştır. Temin edilen AM60 alaşımı ve bakalite alınan tozlar Şekil 3’te verilmiştir.

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Araştırmalar sonucunda üretilen AM60 tozlarının toz boyut dağılımı, toz tane şekli, tozların içerdiği fazlar ve bu fazların konsantrasyonu, tozların elementel ve kimyasal kompozisyonu ve üretilen parçacıkların mekanik dayanım değerleri tespit edilmiştir.

Üretilen tozların (atomizasyon ünitesinden alındığı şekliyle) Dv (10), Dv (50) ve Dv (90) boyutları ve spesifik yüzey alanları, atomizasyon sıcaklığı, atomizasyon gaz basıncına göre değişimleri Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’ de verilen sonuçlara göre gaz basıncının artışına bağlı olarak toz boyutunun küçüldüğü görülmektedir. Ayrıca değişkenlere bağlı olarak toz şeklinin tespiti amacıyla da spesifik yüzey alanı Tablo 2’de verilmiştir.

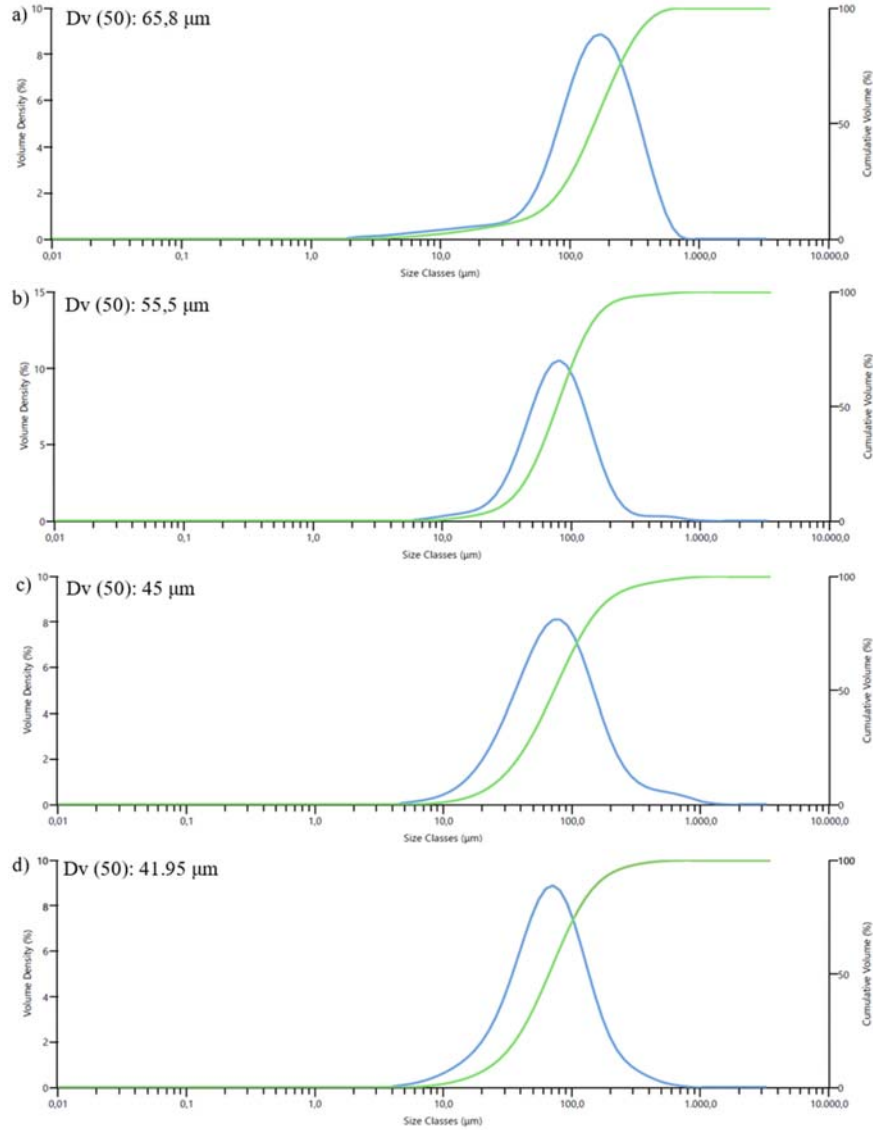
Şekil 4’den de anlaşıldığı üzere, yeşil çizgi ile toz boyutlarının kümülatif eğrisi ve mavi çizgi ile frekans



**Şekil 3.** Külçe AM60 malzemesi ve bakalite alınan tozlar (Material of ingot AM60 and powders taken to the bakalite)

**Tablo 2.** Üretilen AM60 tozlarının toz boyut değerleri (Powder size values of the produced AM60 powders)

Sıcaklık (°C)	Nozul Çapı (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Dv (10) µm	Dv (50) µm	Dv (90) µm	Spesifik Yüzey Alanı (m <sup>2</sup> /kg)
		5	32,6	65,8	251,5	178,8
820	2	15	22,5	55,55	198,1	150,2
		25	14,35	45	147	131,8
		35	12,05	41,95	128,5	124,2



**Şekil 4.** Farklı basınçlar kullanılarak üretilen tozların boyutsal değişimleri a) 5 bar b) 15 bar c) 25 bar d) 35 bar (Dimensional changes of the powders produced using different pressures. a) 5 bar b) 15 bar c) 25 bar d) 35 bar)

değerleri verilmektedir. 820°C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 5 bar basınçta üretilen tozların ortalama toz boyutu  $D_v(50)$  65,8  $\mu\text{m}$ , 15 bar basınçta üretilen tozların  $D_v(50)$  değeri 55,5  $\mu\text{m}$ , 25 bar basınçta üretilen tozların  $D_v(50)$  değeri 45  $\mu\text{m}$  ve 35 bar basınçta üretilen tozların  $D_v(50)$  değeri 41,95  $\mu\text{m}$  olarak tespit edilmiştir.

Gaz atomizasyon yöntemiyle toz üretiminde gaz basıncının toz boyutu ve şekli üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Deneysel çalışmalarda en yüksek gaz basıncı değeri 35 bar olarak alınmıştır. Bu basıncın üzerinde nozula şarj edilen gazın, nozul içerisinden sıvı metalin akış yönüne doğru ters basınç (pozitif basınç) oluşturmasından dolayı toz üretimi gerçekleştirilememiştir. Aydın ve Ünal [21] üretim değişkenlerinin metal tozu üretimine etkisi ile ilgili çalışmalarında atomizasyon işlemi sırasında akış borusunun ucunda oluşan basınç değerlerinin pozitif olması durumunda sıvı metal akışını yavaşlattığını, Gökmeşe ve Bostan [22] ise

benzer bir çalışmada, bazı durumlarda sıvı akışının durduğunu ya da ters yönde akış özelliği gösterdiğini vurgulamışlardır. Fakat 35 bar gaz basıncının altında bu durumun olmadığı gözlemlenmiştir. Baram vd.'nin AM60 alaşımının katılaşması boyunca Pb'un etkisi ile ilgili çalışmalarında 30 bar gaz basıncının altında nozul da hiçbir zaman geri basınç olmadığını vurgulamışlardır [23]. Gaz basıncının artmasıyla toz boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir. 820°C sabit sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve farklı gaz basınçlarında en küçük ortalama toz boyutu 41,95  $\mu\text{m}$  ile 2 mm nozul çapı ve 35 bar gaz basıncında elde edilmiştir. Genel olarak bu değişkenler için üretilen tozların %10'unun boyutu 24,1  $\mu\text{m}$  altı iken, %90'ının boyutu ise 297  $\mu\text{m}$  altıdır. Üretilen tozların en az %10'unun ise 12,05  $\mu\text{m}$  altı tozlardan oluştuğu tespit edilmiştir. Ancak bu tozlar gerek atomizasyon kulesi ve siklonlara gerekse tozların depolandığı kaplara sıvı olduğu için toz boyutu ölçümleri mümkün olmamıştır.

Üretilen tozların genellikle ligamet, damlamsı, çubuksu, pulsu ve küresel şekilde olduğu Şekil 5'ten anlaşılmaktadır.

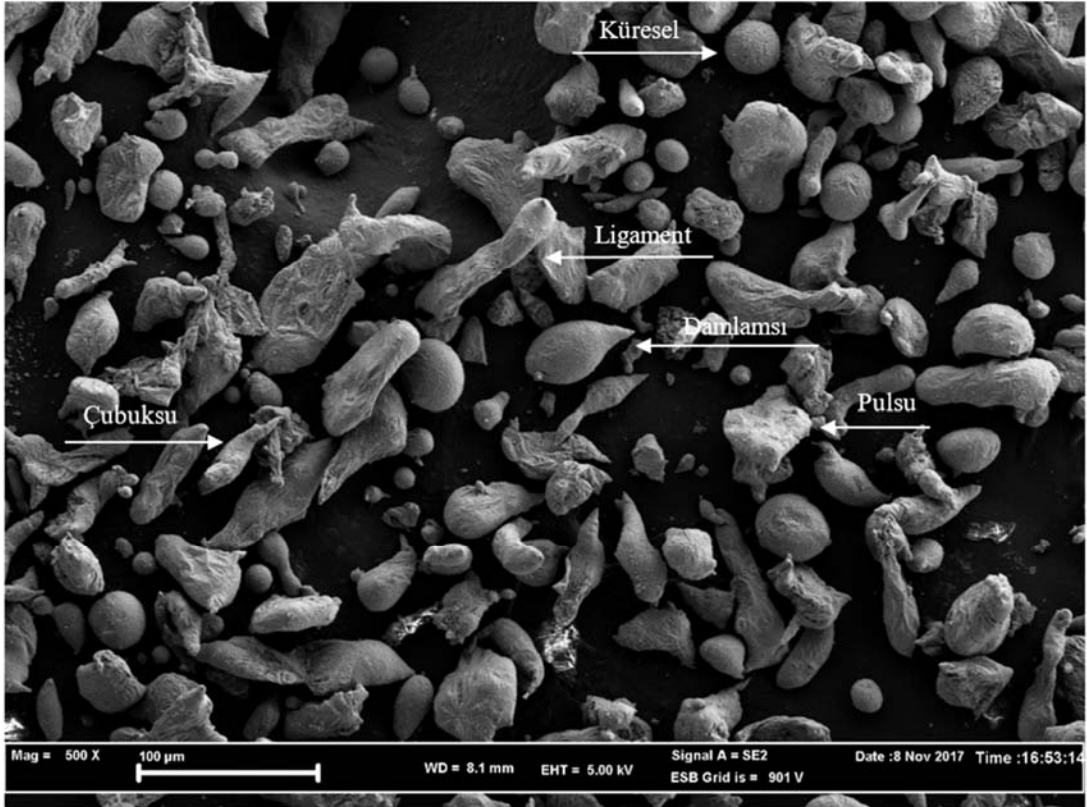
Şekil 6'da verilen SEM görüntülerinden ise gaz basıncının artmasına bağlı olarak toz şeklinin ligament, çubuksu ve karmaşık şekilden, pulsu, damlamsı ve küresel'e doğru değiştiği görülmektedir.

Özellikle 35 bar gaz basıncında üretilen ve Şekil 6 d' de SEM görüntüsü verilen tozların ciddi anlamda küçüldüğü, şeklinin ise damlamsı ve küresel olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir. Fischmeister vd.[24] gaz atomize yüksek hız çeliklerinin katılaşması üzerine yaptıkları çalışmada bir sıvı damlacığını küreselleşmeye zorlayan en önemli parametrenin yüzey gerilimi olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 6 a incelendiğinde tozların az bir kısmının küresel olduğu görülmektedir. Bunun en önemli sebebinin atomizasyon gaz basıncının düşük olması ve atomizasyon kulesinin yeterli yükseklikte olmaması olarak düşünülmektedir. Zira toz parçacıkları küreselleşebilecek zamanı bulmadan atomizasyon kulesinin tabanına çarparak katılaşmışlardır.

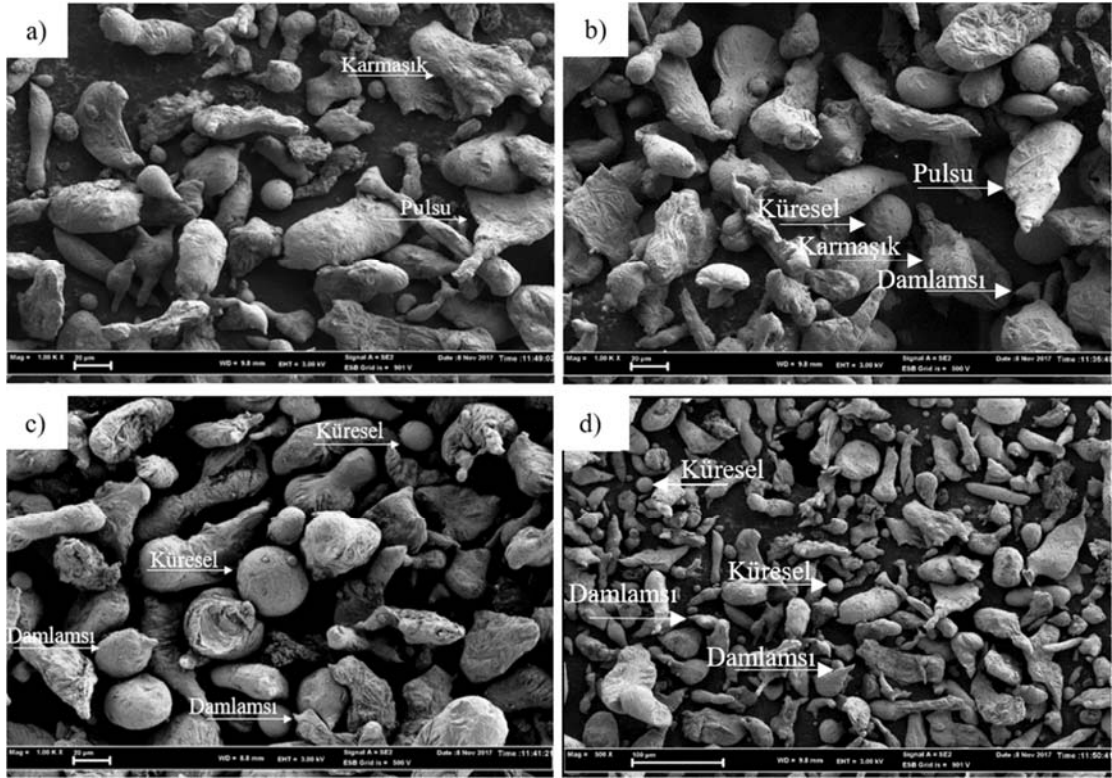
Şekil 7'de verilen SEM görüntülerinde toz yüzeylerinin gözenekli olduğu ve gaz basıncına bağlı olarak gözenek miktarının azaldığı açıkça görülmektedir. Ayrıca yüzeyler dikkatli bir şekilde incelendiğinde, bir toz tanesinin (katılaşmada olduğu gibi) alt tanelerden oluştuğu ve gaz

basıncının artması ile de alt tanelerin küçüldüğü fark edilebilir. Bunun sebebinin, sıvı metalin katılaşmasında olduğu gibi, katılaşma hızına bağlı olarak alt taneleri oluşturan çekirdeklenmenin soğuma hızına bağlı olarak artması ve yapının daha küçük tanelerden oluşması olarak yorumlanabilir. Diğer taraftan artan gaz basıncının birim yüzeydeki basıncı artırdığı ve yüzeyin daha hızlı soğumasından dolayı da, daha yoğun bir yüzey oluştuğu SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.

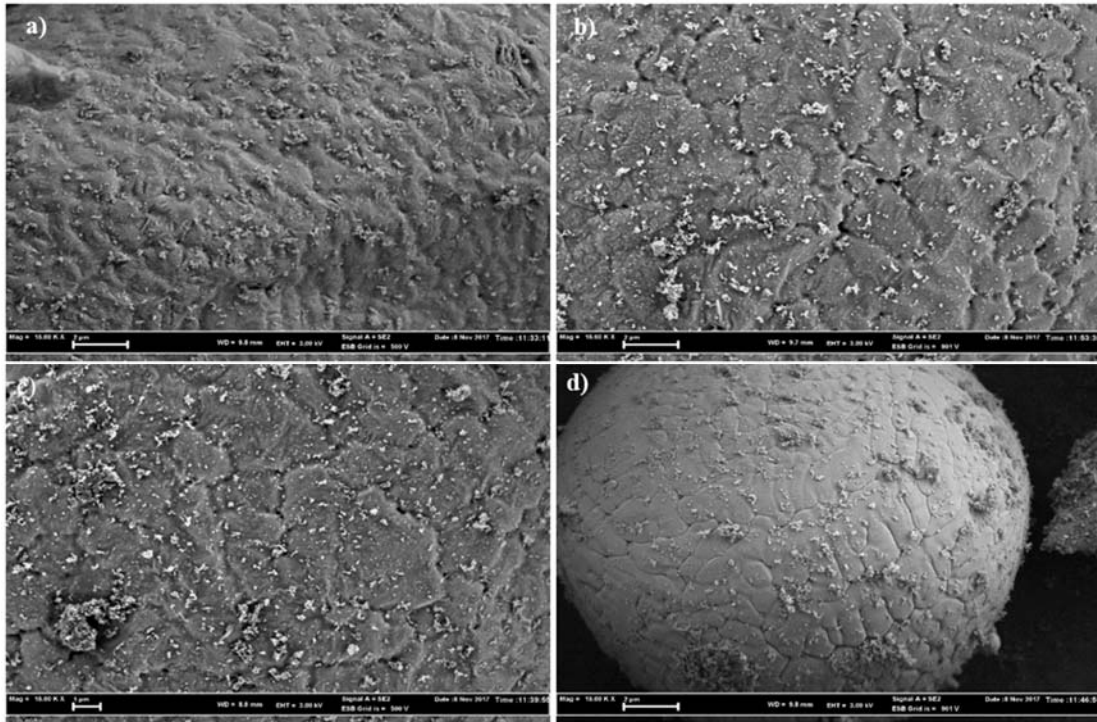
Şekil 8' de 35 bar gaz basıncı ile üretilen AM60 tozunun 6 farklı noktasından alınan SEM-EDX analizleri sonucunda mikroyapıda  $\alpha$ -Mg ana matris fazı gözlemlenmektedir. Şekil 9'da AM60 alaşım tozunun XRD sonucu verilmiştir. XRD sonucu incelendiğinde, yapıda  $\alpha$  (Mg ana matris) fazı,  $\beta$  fazı olan  $Mg_{17}Al_{12}$  ve çok az miktarda da Mn görülmektedir. Çökelti, katılaşma yoluna bağlı olarak  $Mg_{17}Al_{12}$  bileşiğini oluşturmaktadır [25].  $Mg_{17}Al_{12}$  çökeltilerinin, AM60 alaşımı için, süneklik pahasına mekanik bir güçlendirme sağladığı bilinmektedir. Alaşımın mekanik davranışı, çökelti miktarına, morfolojisine ve boyutuna bağlıdır. AM60 alaşımında, 120°C'nin üzerinde  $Mg_{17}Al_{12}$  fazının yumuşaması nedeniyle mukavemet ve sürtünme direnci özelliklerini kaybeder. AM60, hexagonal sıkı paket  $\alpha$ -Mg ve ötektik  $\alpha + \beta$  ( $\beta$  fazı, hacim merkezli kübik  $\beta$ - $Mg_{17}Al_{12}$  fazı olarak adlandırılır.) fazlarından oluşur.  $\beta$  fazının çökmesi sürekli ve süreksiz çökelti olarak iki şekilde meydana gelir [26, 27].



Şekil 5. Üretilen AM60 tozunun genel görünümünü gösteren SEM görüntüsü  
(SEM image showing the overall appearance of the produced AM60 powder)

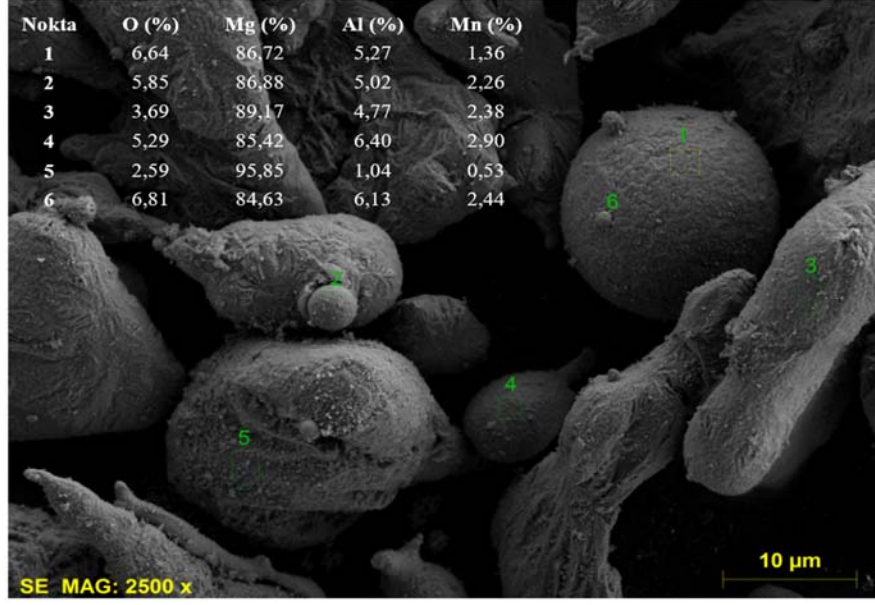


Şekil 6. Farklı basınçlarda üretilen AM60 tozlarının SEM görüntüleri a) 5 bar b) 15 bar c) 25 bar d) 35 bar (SEM images of the produced AM60 powders at different pressures a) 5 bar b) 15 bar c) 25 bar d) 35 bar)

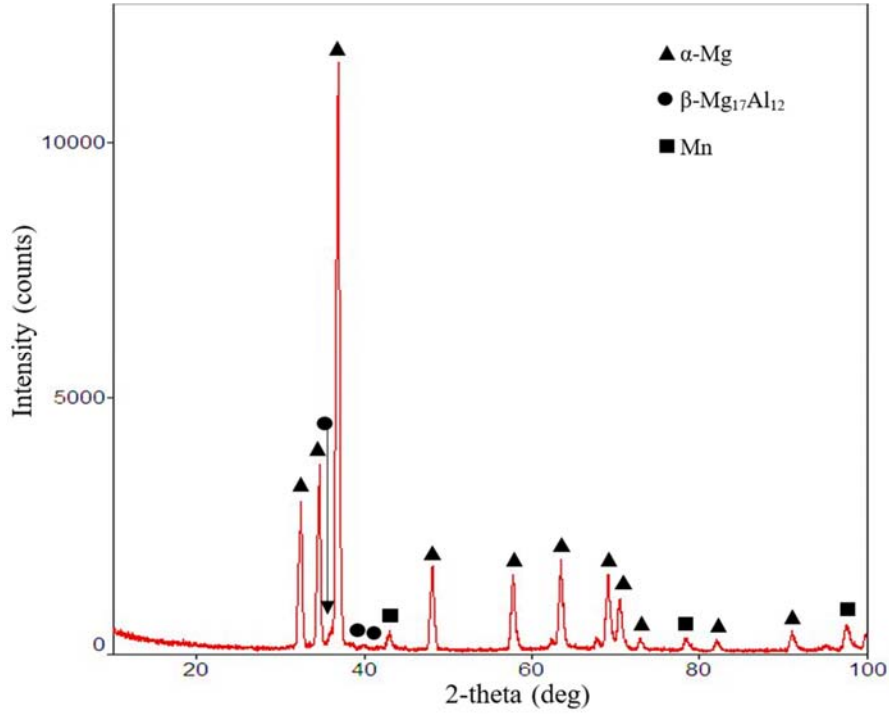


Şekil 7. Farklı basınçlarda üretilen AM60 tozlarının SEM görüntüleri. a) 5 bar b) 15 bar c) 25 bar c) 35 bar (SEM images of the produced AM60 powders at different pressures a) 5 bar b) 15 bar c) 25 bar d) 35 bar)





Şekil 8. 35 bar gaz basıncında üretilen AM60 tozunun SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları (SEM image and EDX analysis results of the produced AM60 powder)



Şekil 9. Üretilen AM60 tozunun XRD analiz sonucu (XRD analysis of the produced AM60 powders)

Şekil 9’da verilen XRD sonuçlarında, gaz atomizasyon yöntemi ile toz üretiminde farklı gaz basınçlarında üretilen tozların, tozun kimyasal bileşimine bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır. Külçe halinde temin edilen AM60 malzemesinin kimyasal bileşim analizi Tablo 3’te verilmiştir. Buna ek olarak Tablo 4’te ise gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen AM60 alaşım tozunun XRF kimyasal analiz sonuçları verilmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4 incelendiğinde gaz atomizasyonu ile toz haline getirilen

AM60 malzemesinin kimyasal bileşiminin neredeyse aynı olduğu tespit edilmiştir. Kimyasal bileşimin bu şekilde kalması, gaz atomizasyon sistemi ile toz üretiminin, ne derece önemli olduğunu göstermektedir. Bakalite alınan AM60 gaz atomize tozların mikro sertlik değerlerinin tespit edilebilmesi amacıyla beş farklı noktadan ölçüm yapılarak ortalama sertlik değerleri hesaplanmıştır. AM60 ana malzemesi ve üretilen tozların ortalama sertlik değerleri üzerine gaz basıncının etkisi, Tablo 5’te verilmiştir.

**Tablo 3.** AM60 külçesinin kimyasal bileşimi  
(Chemical composition of AM60 ingots)

Element	Al	Mn	Si	S	Ca	Mg
İçerik (%)	6,35	0,31	0,03	0,01	0,01	Kalan

**Tablo 4.** Üretilen AM60 tozunun kimyasal (XRF) analiz sonuçları  
(Chemical (XRF) analysis of the produced AM60 powders)

Element	Al	Mn	Si	S	Ca	Mg
İçerik (%)	6,18	0,23	0,02	0,007	0,005	Kalan

**Tablo 5.** Üretilen AM60 tozların mikrosertlik analiz sonuçları  
(Microhardness analysis of the produced AM60 powders)

Gaz Basıncı (bar)	5	15	25	35	AM60 Külçe
Mikrosertlik (HV <sub>0,025</sub> )	68	69	71	73	67

Tablo 5 incelendiğinde, üretilen tozların sertliklerinin külçe malzemenin sertliğinden (67 HV<sub>0,025</sub>) daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin döküm yöntemi ile üretilen malzemenin gaz atomize tozlara göre daha yavaş katılaşmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Diğer taraftan, üretilen tozların sertliğinin gaz basıncının artmasına bağlı olarak arttığı Tablo 5'te görülebilir. 5 bar gaz basıncında toz sertliği ortalama 68 HV<sub>0,025</sub>, 15 bar gaz basıncında 69 HV<sub>0,025</sub>, 25 bar gaz basıncında 71 ve 35 bar gaz basıncında ise 73 HV<sub>0,025</sub> olarak ölçülmüştür. Bunun sebebi hızlı katılaşmadır. Tablo 5 incelendiğinde gaz basıncının artmasıyla sertlik değerinin de arttığı görülmektedir. Tane boyutu küçüldükçe spesifik yüzey alanı artmış ve daha fazla β (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) fazı oluşmuştur, buda sertliğin artmasına neden olmuştur. Klasik katılaşma modelinde olduğu gibi hızlı katılaşan malzemelerin sertliği daha yüksek olur. Gökmeşe vd.[28] gaz atomizasyonu ile AA 2014 tozu üretimi ve karakterizasyonu üzerine yaptıkları bir çalışmada, daha küçük tozların erken katılaşacağını ve sertliklerinin iri tozlara göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmanın sertlik sonuçları da literatürle paralellik göstermektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: KBÜ-BAP-16/1-DR-170

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Farklı parametrelerin uygulandığı, gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen AM60 tozunun karakterizasyonu üzerine yapılan bu çalışmada, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Gaz atomizasyonu ünitesinde, tozların üretiminde yaygın olarak kullanılan gaz atomizasyonu yöntemiyle

magnezyum alaşımı AM60 tozunun üretimi gerçekleştirilmiştir.

- Gaz basıncı artırıldığında toz boyutunun küçüldüğü ve toz şeklinin ise karmaşık, ligament, pulsu ve çubuksu yapıdan damlamsı ve küresele doğru değiştiği görülmüştür. Bunun yanısıra, basınç artışı ergiyiğe daha fazla enerjinin aktarılmasını sağladığı için, üretilen tozlar daha küçük ortalama toz boyutuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Yapılan gaz atomize magnezyum alaşımı AM60 tozu üretiminde en küçük toz boyutu 820°C sıcaklık, 2 mm nozul çapı ve 35 bar basınçta 41,95 µm olarak ölçülmüştür.
- Üretilen tozların yüzeylerinin gaz basıncına bağlı olarak değiştiği ve dentritik veya hücreli dentritik yapıda olduğu görülmüştür.
- Yapılan XRD analizleri sonucunda mikroyapıda α (Mg ana matris) fazı β (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) fazı gözlemlenmiştir.
- XRF analizleri sonucunda, üretilen AM60 tozunun ve külçe (ana malzeme) malzemenin kimyasal bileşiminin yakın değerlerde olduğu tespit edilmiştir.
- Üretilen tozların sertliğinin gaz basıncının artmasına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Üretilen AM60 tozunun en yüksek sertlik değeri 35 bar gaz basıncında 73 HV<sub>0,025</sub> olarak ölçülmüştür.

#### 5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Schaper, J. G., Wolff, M., Wiese, B., Ebel, T., Willumeit-Römer, R., Powder Metal Injection Moulding and Heat Treatment of AZ81 Mg Alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 2018.
2. Mindivan, H., Eş kalıp ekstrüzyon yöntemi ile alüminyum-magnezyum makrokompozit imalatı ve karakterizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (1), 12-14, 2017.
3. Zeng, R., Cui, L., Ke, W., Biomedical magnesium alloys: composition, microstructure and corrosion. *Acta Metall Sin*, 54 (9), 1215-1235, 2018.
4. Kondori, B., Mahmudi, R., Effect of Ca additions on the microstructure, thermal stability and mechanical properties of a cast AM60 magnesium alloy, *Materials Science and Engineering A*, 527, 2014-2021, 2010.
5. Sun, Y., Aydın, N. U., Turen, Y., Ahlatci, H., Zengin, H., Effect of Ti Addition on Corrosion Properties of As-Cast and Hot-Rolled AM60 Magnesium Alloys. In *Key Engineering Materials*, 750, 113-117. Trans Tech Publications, 2017.
6. Sevik, H., Açıkgöz, S., Can Kurnaz, S., The effect of tin addition on the microstructure and mechanical properties of squeeze cast AM60 alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 508, 110-114 2010.
7. Ateş, H., Bahçeci, E., Nano Malzemeler İçin Üretim Yöntemleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 3 (2), 483-499, 2015.
8. Jia, P., Wu, M., Zhang, J., Hu, X., Teng, X., Zhao, D., Wang, Y., Effects of Mg-Zn-Y quasicrystal addition on the microstructures, mechanical performances and corrosion behaviors of as-cast AM60 magnesium alloy. *Materials Research Express*, 5 (10), 106512, 2018.

9. Lampa, A., Fritsching, U., Hot Gas Atomization of Complex Liquids for Powder Production. In *Process-Spray*, 751-794, Springer, Cham, 2016.
10. Gray J.E., Luan B., Protective Coatings on Magnesium and its Alloys—A Critical Review, *J. Alloys Compd.*, 336, 88-113, 2002.
11. Kaya R.A., Çavuşoğlu H., Tanık C., Kaya A. A., Duygulu Ö, Mutlu Z., Zengin E., Aydın Y., The Effects of Magnesium Particles on Posterolateral Spinal Fusion: An Experimental in Vivo Study in a Sheep Model, *J.Neurosurg-Spine*, 6, 141-149, 2007.
12. German, R.M., *Powder metallurgy science*, 2nd edition, Metal Powder Industries Federation, USA, 1994.
13. Lawley, A., *Atomization: The production of metal powders*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, USA, 1992.
14. Klar, E., Fesko, J.W., Production of metal powders, *Metals Handbook*, 9th ed., Powder Metallurgy, 7, 25-51, Ohio, 1984.
15. Kayalı Y.E., Ünal R., Determination of metal powder particle size by numerical modeling in gas atomization, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 1135-1144, 2018.
16. Uslan İ., Küçükarslan S., An investigation on the effect of gas atomisation parameters on tin powder production, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (1), 1-8, 2010.
17. Akkaş, M., Çetin, T., Boz, M. The Effect of Gas Pressure on Powder Size and Morphology in The Production of AZ91 Powder by Gas Atomization Method, *Archives of Metallurgy and Materials*, 63 (4), 1587-1594, 2018.
18. Akkaş, M., Boz, M. Investigation of the compressibility and sinterability of AZ91 powder production and particle production by gas atomisation method, *Journal of Magnesium and Alloys*, 7 (3), 400-413, 2019.
19. Akkaş, M., Çetin, T., Boz, M. Gaz atomizasyonu yöntemi ile Al<sub>2</sub>Si tozu üretimi ve karakterizasyonu, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9 (2), 795-804, 2018.
20. Akkaş, M., Em Kara, K.M., Çetin, T., Boz, M. Investigation Of Gas Pressure Effect on Powder Characterization of AZ31 Alloy Produced by Gas Atomization Method, *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 37 (2), 373-380, 2019.
21. Aydın, M., Ünal, R., Laval tipi yeni bir nozul tasarımı ile metal tozu üretimi ve üretim değişkenlerinin etkisinin incelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (1): 69-76, 2007.
22. Gökmeşe, H., Bostan B., Fabrication and characterization of nanoparticle MgO/B4C composite by mechanochemical method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 0954408916629106, 2016.
23. Baram, J., Pressure Characteristics at The Pour- Tube Orifice in Ultrasonic Gas Atomization, *Materials Science And Engineering*, 98, 65-69, 1988.
24. Fischmeister, H. F., Ozerskii, A. D., Olsson, L., Solidification structure of gas atomized high speed steel powders, *Powder Metallurgy*, 25 (1), 1 – 9, 1982.
25. Rajan, T. P. D., Jayakumar, E., Pai. B. C., Developments in solidification processing of functionally graded aluminium alloys and composites by centrifugal casting technique, *Transactions of the Indian Institute of Metals* 65 (6), 531-537, 2012.
26. Pai, B. C., Pillai, U. T. S., Manikandan, P. and Srinivasan, A., Modification of AZ91 Mg alloys for high temperature applications, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 65 (6), 601-606, 2012.
27. Zhang, J. M., Jiang, B. L., Wang, Z. H., Yuan, S., Nan, H. Q., Luo, H. B., Influence of aging modes on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy, *Research & Development*, 2007.
28. Gokmese, H., Ozdemir, M., Bostan, B., The Characterization and Production by Gas Atomization Method of Pre-alloyed AA 2014 Powder Metal Aluminum, *International Journal of Scientific and Technological Research*, 1 (1), 26-38, 2015.

