

AZ Serisi Döküm Magnezyum Alaşımlarının Termal Özellikleri

Thermal properties of AZ series cast Magnesium alloys

Birol Akyüz^{1*}

Geliş / Received: 24/02/2022

Revize / Revised: 29/05/2022

Kabul / Accepted: 29/05/2022

ÖZ

Bu çalışmada, AZ serisi döküm magnezyum alaşımlarının ısı davranışları (ısı yayılma ve ısı iletkenlik) üzerine deneysel bir araştırma sunulmaktadır. Deneyde kullanılan alaşım bileşenlerinden Al'nin değişimi (ağırlıkça % 1-9 arasında) alaşımların ısı yayılma ve ısı iletkenliklerini nasıl etkilediğini, yoğunluk ve sertlik üzerindeki değişimler incelenmiştir. Alaşımların mikroyapı değişimlerinin ve mikroyapıda görülen intermetalik fazın (Mg₁₇Al₁₂) alaşımların ısı yayılımı, ısı iletkenlik, yoğunluk ve sertlik üzerine etkisi olduğu görülmüştür. Alaşımın ısı özellikleri, alaşımdaki Al içeriğine bağlı olarak değişmiştir. Alaşımların termal özellikleri sıcaklık artışına bağlı olarak (sıcaklık değişimi 25 °C- 400 °C arası) artmıştır. En yüksek termal yayılma AZ61 alaşımında gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- *AZ Serisi Magnezyum Alaşımları, Termal Yayılma, Termal İletkenlik, Yoğunluk, Sertlik*

ABSTRACT

In this study, an experimental research on the thermal behavior (thermal diffusion and thermal conductivity) of cast magnesium alloys of the AZ series is presented. How the variation of Al, one of the alloy components used in the experiment, affects the thermal expansion and thermal conductivity of the alloys (1-9 Al % weight), and the changes on density and hardness were investigated. It has been observed that the microstructure changes of the alloys and the intermetallic phase (Mg₁₇Al₁₂) seen in the microstructure have an effect on the thermal diffusivity, thermal conductivity, density, and hardness of the alloys. The thermal properties of the alloy changed depending on the Al content in the alloy. The thermal properties of the alloys increased depending on the temperature increase (temperature change between 25 °C and 400 °C). The highest thermal dissipation was observed in AZ61 alloy.

Keywords- *AZ Series Magnesium Alloys, Thermal Diffusivity, Thermal Conductivity, Density, Hardness*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: birol.akyuz@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0003-4462-3288>)
Makine Mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilecik, Türkiye.

I. GİRİŞ

Magnezyum alaşımlarının sahip oldukları özellikler nedeniyle özellikle otomotiv, tıp, savunma, elektronik, uzay ve havacılık sektörleri başta olmak üzere tekstil ve gıda endüstrileri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır [1-8]. Bu alaşımların özellikle düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek aşınma ve yüksek korozyon direnci özelliklerine sahip olmalarının yanında, en hafif yapı metalleri arasında bulunmaları, ayrıca ağırlık-dayanım ve ağırlık-sertlik özellikleri ile özellikle tıp ve savunma sanayisi, uzay, havacılık, otomotiv ve taşımacılık sektörlerinde kullanım alanı bulmasını sağlamıştır [1-10].

Bu sektörlerde magnezyum alaşımlarının kullanılmasına bazı örnekler şunlardır: Uzay, havacılık, otomotiv ve taşıma sektörlerinde ağırlık azaltılması ile yakıt tasarrufu sağlanması ve çevreye zararlı atık emisyonların (SO_x, CO₂, ve NO_x) düşürülmesi ve enerji kaynaklarının verimli kullanılması sayılabilir [2-12]. Tıp alanında ise; mikro ameliyat aletleri/cihazları, implant malzemeleri, damar tıkanıklarının açılmasında kullanılan ve vücutta eriyebilen stentler, biyosensörler ve bazı yapay organların yapımı sayılabilir [9].

Günümüzde magnezyum alaşımlarına olan en büyük ilgi özellikle otomotiv sektörü, uzay-hava araçları ve taşıma sektörlerinde görülmektedir [1-8]. Bu amaçla en yaygın kullanılan AZ, AS, AM, AJ, ZK serisi gibi magnezyum alaşımları örneğin; AZ31, AZ91, AM40, AM60, AS21, AS41, AJ51, ZK60 sayılabilir [1-12].

Magnezyum alaşımlarının kullanımına olan ilginin önemli bir nedeni, hafif Magnezyum alaşımlarının kullanımı ile araç ağırlığında yapılan azalmanın yakıt ekonomisi sağlanması (örneğin otomobillerde 100 km de ortalama 0.5 lt yakıt tasarrufu sağlanması) ve bunun sonucu olarak gaz emisyonlarının azaltılabilecek olmasıdır. Örneğin, günümüzde otomobillerde Euro 6'ya göre CO₂ emisyonları ~130g/Km iken, 2023 yılında ise ~95g/Km olması hedeflenmektedir [2,8,10,11]. Otomotiv sektöründe hafif metalik malzemelere yönelmenin nedeni sadece günümüzün otomobilleri ile sınırlı değildir. Geleceğin otomobilleri için de (yeni nesil otomobiller) hafiflik bugünküne kıyasla çok daha önemli bir gereksinimdir. (Yeni nesil otomobiller; Güneş, elektrik veya hidrojen gibi alternatif enerji kaynakları ile çalışacağı öngörülen otomobillerdir.) Önümüzdeki yıllarda binek otomobillerde ulaşılmaya planlanan yakıt tüketimi zorlu bir hedeftir (3 litre/100 Km) ve bu durum otomobil ağırlığında yaklaşık %30'luk bir azalmayı zorunlu kılmaktadır [8,10,11]. Bu nedenle magnezyum alaşımlarının önemi daha da artmaktadır [2,8,10,11].

Magnezyum alaşımlarının yukarıda sıralanan çok önemli özelliklerinden dolayı bu alaşımlar üzerine son yıllarda yapılan araştırmaların arttığı görülmektedir. Bu amaçla magnezyum alaşımlarının bazı özelliklerinin geliştirilmesi (mekanik özellikler, sürtünme, yorulma ve aşınma direnci ve termal özellikler vb.) amacıyla farklı alaşımlar elde edilmeye çalışılmakta ve bu alaşımlar üzerinde çok çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [3,6,7,12-20]. Bu çalışmaların özellikle magnezyum alaşımlarının malzeme özelliklerinin geliştirilmesi ve (mekanik özellikleri) ve şekillendirme/işleme özellikleri kazandırılması üzerine yoğunlaştığı görülmektedir [3-23].

Literatürde magnezyum alaşımlarının termal özellikleri/termal davranışları üzerine çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Lee ve arkadaşlarının [21] yaptıkları araştırmada AZ31, AZ61 magnezyum alaşımlarını, Rudajevová ve Lukáč'ın [22] yaptıkları araştırmada ise AM20, AS21 magnezyum alaşımlarını Al içeriğinin bir fonksiyonu olarak bu alaşımların termal özelliklerini/termal davranışlarını karşılaştırarak inceledikleri görülmüştür. Bu çalışmalarda [21,22] kullanılan AZ31, AZ61, AS21 ve AM20 alaşımlarının farklı alaşım bileşimlerine ve farklı mikro yapılara sahip olması nedeniyle bu karşılaştırmalar tartışılabilir. Bu nedenle, bu çalışmada, kullanılan, AZ serisi döküm magnezyum alaşımlarına sistematik olarak Al ilave edilerek oluşan alaşımın (ağırlıkça %1-9 Al ilave edilmiştir ve 1 Zn sabit) termal özellikleri/termal davranışları (termal yayılım, termal iletkenlik, yoğunluk ve ayrıca sertlik) üzerindeki etkisinin araştırılması oldukça önemlidir. Literatürde, AZ serisi magnezyum alaşımlarında Al miktarındaki değişimin alaşımın termal özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmaya rastlanılamamıştır. %Al miktarındaki değişimin alaşımların mikroyapı, yoğunluk ve termal özellikleri ile ilişkisinin ortaya konulması gerekir. Bu bağlamda bu çalışma özgün nitelik taşımaktadır.

II. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada kullanılan AZ serisi magnezyum alaşımları atmosfer kontrollü ergitme fırınlarında (CO₂ + SF₆ koruyucu gaz ortamında, 750°C de) ergitildikten sonra metal kalıplara (ön ısıtma yapılarak 260°C) dökülerek elde edilmiştir. Magnezyum alaşımlarının ergitilmesi ve metal kalıplara döküm işlemlerini kapsayan iş ve işlem aşamaları ile numunelerin elde edilmesi işlemleri Akyüz'ün [6,7] ve Ünal'ın [5] daha önceki çalışmalarında detaylı olarak açıklanmıştır. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerin iş ve işlem aşamaları ile numune hazırlama işlemleri ve test prosedürlerinin detayları (mikro yapı numunelerinin zımparalanması ve parlatılması işlemleri, dağlama işlemleri ve dağlama çözeltileri vb.) yazarın önceki çalışmalarında açıklanmıştır [6,7].

Her numune üzerinde mikroyapı ve XRD analizleri yapılmıştır. X-ışını kırınım (XRD) analizleri (Panalitık-Empyrean), 2°lik bir geliş ışın açısı ile Cu K α radyasyonu altında gerçekleştirilmiştir. Sertlik testleri (0,5N ve 10N yükler kullanılarak) (Shimadzu HVM) gerçekleştirilmiştir (her numunede 6 ölçüm). AZ serisi döküm magnezyum alaşımlarının (Spectrolab M8 Optik Emisyon Spektrometrisi) test numunelerinin alaşım bileşimleri Tablo 1'de sunulmaktadır.

Tablo 1. AZ serisi Magnezyum Alaşım Bileşenleri
(“A” Alüminyum (Al) ve “Z” Çinko (Zn), % Ağırlıkça)

Alloys	% Al	% Zn	% Fe	% Mg
AZ01	0.1	1.2	0.024	Kalan
AZ21	2.1	1.3	0.026	Kalan
AZ41	4.2	1.2	0.025	Kalan
AZ61	6.3	1.1	0.028	Kalan
AZ91	9.3	1.2	0.022	Kalan

AZ serisi magnezyum alaşımlarının yoğunluk ölçümleri Arşimet metodu ile (Archimedes method) yapılmıştır. Alaşımların yoğunluk değerleri, He gaz ortamında 22 psi/1.5 bar basınç altında 10 cm³ numune hacimli kap kullanılarak (AccuPycII 1340 Pycnometer, Micromeritics Instrument Corp. U.S.A.) elde edilmiştir. Yoğunluk ölçümleri için her alaşımdan 3'er adet numune hazırlanmıştır (çapı 15 mm, uzunluğu 35mm olan). Her alaşım için hazırlanan bu numunelerde yoğunluk ölçümleri yapılarak bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Yoğunluk ölçüm cihazına yerleştirilen her numunede cihazın 10 tekrarlı ölçümünün ortalaması alınarak o numuneye ait yoğunluk değeri elde edilmiştir.

AZ serisi döküm magnezyum alaşımlarının termal yayılım ölçümleri yapılmıştır. Termal yayılım ölçümleri 25°C ile 400°C aralığında (12.5 mm çapında, 5 mm kalınlığında ve yüzeyleri grafit kaplanmış numuneler üzerinde, NETZSCH model LFA 457 Lazer Flaş Cihazında ve N₂ atmosfer ortamında 100.00 ml/dk gaz akışında, izotermal koşullar altında 10 dakikadan daha uzun süre) gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan alaşımların termal iletkenlik değerleri Eşitlik (1) kullanılarak hesaplanmıştır [24-26]:

$$\lambda = \alpha \rho c_p \quad (1)$$

Kullanılan formüle; λ , termal iletkenlik değerini (λ : W · m⁻¹ K⁻¹), α , termal yayılımı (α : m² s⁻¹), ρ yoğunluğu (ρ : g cm⁻³) ve c_p özgül ısı kapasitesini (c_p : J g⁻¹ K⁻¹ sabit) ifade etmektedir [25,26].

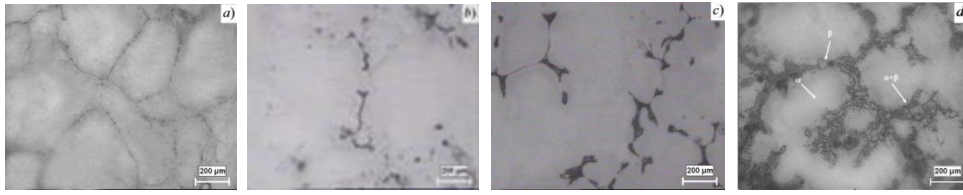
Lee ve arkadaşlarının çalışmasında [21], alüminyum miktarları arasında çok önemli fark olmadığından AZ31 ve AZ61'in özgül ısı kapasitelerinde önemli bir fark olmadığı bildirilmiştir. Lee ve arkadaşları (2013) magnezyum (1.0241 J g⁻¹K⁻¹) ve alüminyumun (0.9025 J g⁻¹K⁻¹) özgül ısı kapasitesinin oda sıcaklığında çok az farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir [21]. Bu nedenle, farklı oranlarda alüminyum eklenmesinin neden olduğu magnezyum alaşımlarının özgül ısı (c_p) kapasitelerindeki değişim sabit kabul edilmiştir. Bu çalışmada, özgül ısı kapasitesi (c_p) sabit olarak kabul edilmiştir.

Saf metallerin termal iletkenlikleri vardır ve metal alaşımlarının ise daha yüksek iletkenliğe sahip olması gerektiği düşünülebilir. Isı iletkenliği λ_1 ve λ_2 olan iki metalden yapılmış bir alaşımın termal iletkenliğinin (λ) λ_1 ve λ_2 arasında bir iletkenliğe sahip olması beklenir. Ancak durumun böyle olmadığı araştırmalar ile ortaya çıkmıştır. İki metalden oluşan bir alaşımın ısı iletkenliği genellikle her iki metalinkinden çok daha düşük olduğu görülmüştür [24].

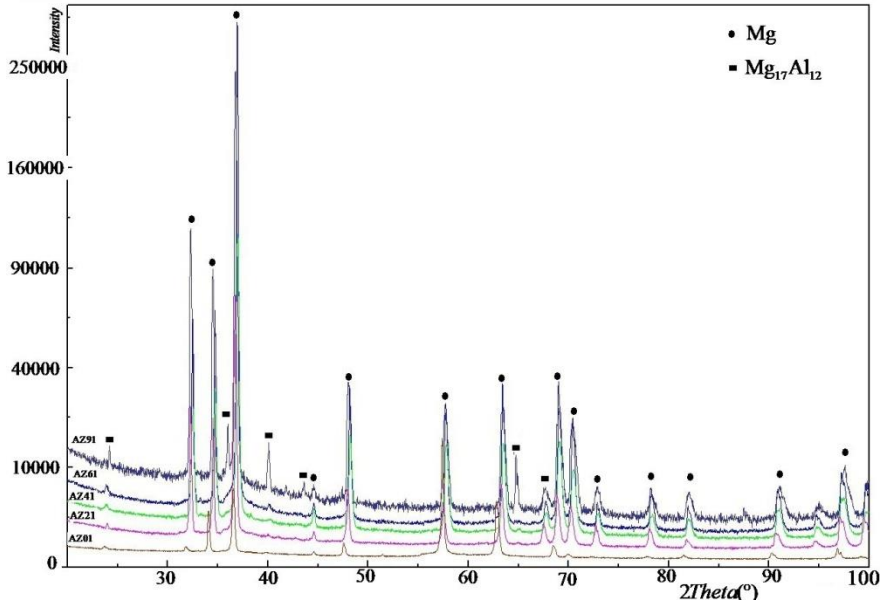
III. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

A. Mikroyapı, XRD ve Sertlik

Deneyde kullanılan alaşımların mikroyapı görüntüleri (optik mikroskop-OM) ve XRD grafikleri Şekil 1 ve Şekil 2'de görülmektedir. Çalışmada incelenen AZ serisi magnezyum alaşımlarının mikroyapısının α -Mg matrisi ile β (Mg₁₇Al₁₂) intermetalik fazı ve α + β ötektik fazından oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 1). Bu alaşımlarda, % Al miktarındaki artışa bağlı olarak mikro yapıda bulunan intermetalik fazların yerlerinin ve biçimlerinin değiştiği, literatüre uygun olarak tespit edilmiştir (Şek. 1a–d). İncelenen alaşımlar arasında AZ91 alaşımının önemli ölçüde intermetalik faza (Mg₁₇Al₁₂) sahip olduğu gözlenmiştir (Şekil 1d). AZ91 alaşımında (Mg₁₇Al₁₂) intermetalik fazının mikro yapı içerisinde α -Mg matrisi etrafında bir ağ şeklinde (ağa benzer) oluştuğu gözlenmiştir [6,7]. AZ21 alaşımının α -Mg tane sınırlarında ağ benzeri intermetalik fazın henüz oluşmadığı görülmektedir [6,7]. AZ serisi magnezyum alaşımı deney numunelerinin XRD grafikleri (X-ışını difraksiyonu; alaşımların kristalografik özellikleri ve içerdikleri fazlar) Şekil 2'de gösterilmiştir.

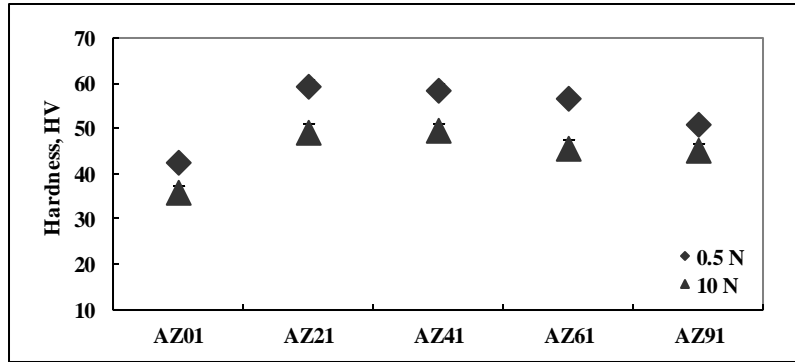


Şekil 1. AZ Serisi Magnezyum Alaşımları Mikroyapı Görüntüleri (OM) [6,7]. (a) AZ21, b) AZ41, c) AZ61 ve d) AZ91



Şekil 2. AZ Serisi Magnezyum Alaşımları XRD Grafikleri [7]

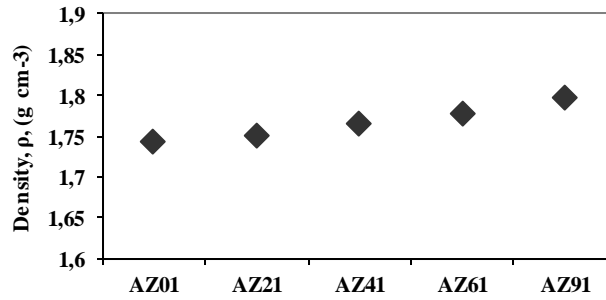
Deneyde kullanılan alaşımların sertlik değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Alaşımların sertlik değerleri incelendiğinde en yüksek AZ21 alaşımından başlayarak (49,38 HV₁₀) AZ91 alaşımına doğru (45,9 HV₁₀) sıralandığı gözlenmiştir. En yüksek sertlik AZ21 alaşımından elde edilmiştir.



Şekil 3. AZ Serisi Magnezyum Alaşımları Sertlik Grafikleri

B. Yoğunluk ve Termal Özellikler

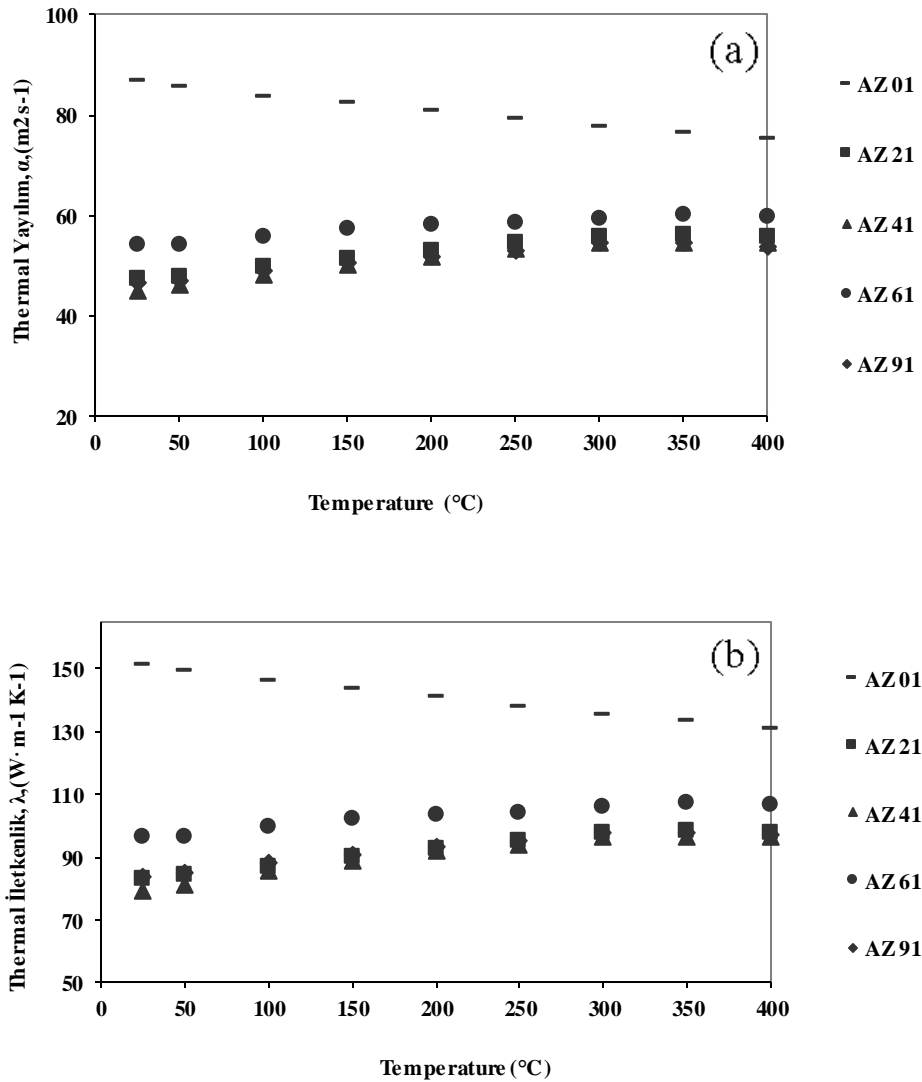
Deneyde kullanılan alaşımların yoğunluk değerleri Şekil 4'te görülmektedir. Alaşımların yoğunlukları, alaşım bileşenlerine bağlı olarak (%Al içeriğine göre) değişmektedir. Alaşımdaki Al içeriğinin artmasıyla alaşımların yoğunlukları da artmıştır. En yüksek yoğunluk AZ91 alaşımında (1.798 g cm^{-3}), en düşük yoğunluk AZ21'de (1.752 g cm^{-3}) ölçülmüştür.



Şekil 4. AZ Serisi Magnezyum Alaşımlarının Yoğunluk Grafikleri

Deneyde kullanılan AZ serisi magnezyum alaşımlarında (Şekil 5a-b), alaşım içeriğinin bir fonksiyonu olarak mikro yapı değişikliklerinin alaşımların termal özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Deneyde kullanılan magnezyum alaşımlarının ısı yayılımının ve ısı iletkenliğinin, alaşımdaki Al içeriğinin (% ağırlıkça) artmasına bağlı olarak değişimler gözlemlenmiştir (Şekil 5a-b). Deney numunelerinde sıcaklık artışına bağlı olarak ise termal özelliklerde artış (AZ01 referans numune hariç) gözlenmiştir. Literatürden bilindiği gibi saf metallerin termal özellikleri alaşımlara göre daha yüksektir [24]. Bu alaşımlarda sıcaklık artışına (25°C 'den 400°C 'ye) bağlı olarak ısı yayılımının ve ısı iletkenliğinin arttığı gözlenmiştir (Şekil 5a-b).

En yüksek termal yayılım ve termal iletkenlik (tüm sıcaklıklarda) AZ21 alaşımında meydana gelirken, en düşük termal özellikler (tüm sıcaklıklarda) AZ91 alaşımında gözlenmiştir (Şekil 5a-b'de). Alaşımların (AZ21'den AZ91'a kadar) 25°C 'deki ısı yayılım verileri dikkate alındığında, bu alaşımların ısı yayılım değerleri sırasıyla $47.63 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, $45.08 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, $54.23 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ ve $46.86 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ (referans numune AZ01 $86.92 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$) olduğu görülmüştür (Şekil 5a'da görülmüyor). Sıcaklık 400°C ye yükseltildiğinde, termal yayılım değerleri sırasıyla $55.87 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, $54.61 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, $60.09 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ ve $54.08 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ olarak (referans numune AZ01 $75.24 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$) ölçülmüştür (Şekil 5a). Bu alaşımların ısı iletkenlik değerleri 25°C 'de sırasıyla $83.44 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $79.65 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $96.42 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ve $84.25 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (referans numune AZ01 $151.52 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) hesaplanmıştır (Şekil 5b). Sıcaklık 400°C ye çıkarıldığında ısı iletkenlik değerleri $97.88 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $96.49 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $106.84 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ve $97.23 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ olarak (referans numune AZ01 $131.16 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) hesaplanmıştır (Şekil 5b). AZ serisi döküm magnezyum alaşımlarının termal özellikleri sıcaklığa bağlı olarak artmıştır (25°C 'den 400°C 'ye kadar) (Şekil 5a-b).



Şekil (5.) AZ Serisi Magnezyum Alaşımlarının (a) Termal yayılımı (Thermal diffusivity) ve (b) Termal iletkenlik (thermal conductivity) Grafikleri

Bu deneysel çalışmada, alaşım bileşenlerine bağlı olarak değişen mikroyapı özelliklerinin, AZ serisi döküm magnezyum alaşımlarının mikro yapısında bulunan intermetalik fazın ($Mg_{17}Al_{12}$) alaşımların termal özellikleri üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur [6-26].

IV. SONUÇLAR

Deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Denede kullanılan AZ serisi magnezyum alaşımlarında, alaşım içeriğinin (% Al artışının) bir fonksiyonu olarak mikroyapı değişikliklerinin olduğu ve bunun alaşımların termal özellikleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. % Al artışının alaşımların mikroyapısını etkilediği ($Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazı) ve alaşımların mikroyapısında görülen intermetalik fazın alaşımların yoğunluk, sertlik ve termal özellikleri/termal davranışları üzerinde etkili olduğu görülmüştür.
- Alaşımların yoğunlukları, alaşım bileşenlerine bağlı olarak değişmiştir. Alaşımdaki Al içeriğinin artmasıyla alaşımların yoğunlukları da artmıştır. En yüksek yoğunluk AZ91 alaşımında (1.798 g cm^{-3}), en düşük yoğunluk AZ21'de (1.752 g cm^{-3}) ölçülmüştür.

- Denejde kullanılan alaşımların ısı yayılımının ve ısı iletkenliğinin, alaşımdaki Al içeriğinin (% ağırlıkça) artmasına bağılı olarak azaldığı gözlemlenmiştir.
- Denej numunelerinde sıcaklık artışına bağılı olarak termal özelliklerde artış (referans numune hariç) gözlenmiştir. Alaşımlarda sıcaklık artışına bağılı olarak (25°C'den 400°C'ye) ısı yayılımı ve ısı iletkenliğin arttığı gözlenmiştir. En yüksek termal yayılım ve termal iletkenlik (tüm sıcaklıklarda) AZ61 alaşımında gözlenmiştir. Literatürden bilindiği gibi saf metallerin termal özellikleri alaşımlarına göre daha yüksektir (AZ01).

KAYNAKLAR

- [1] Friedrich, H. E. & Mordike, B. L. (2006). *Magnesium Technology* (Vol.12). Springer-Verlag. Berlin.
- [2] Mehta, D. S., Masood, S. H. & Song, W. Q. (2004). Investigation of wear properties of magnesium and aluminum alloys for automotive applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 155, 1526-1531.
- [3] Tönshoff, H. K., Denkena, B., Winkler, R. J. & Podolsky, C. (2006). *Machining, magnesium technology, metallurgy, design data, applications. Verlag Berlin Heidelberg: Springer*, 398.
- [4] Mordike, B. L. & Ebert, T. (2001). Magnesium: properties-applications-potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302(1), 37-45.
- [5] Unal, M. (2008). *An Investigation of Casting Properties of Magnesium Alloys*. PhD Thesis. Ankara, Gazi University, Institute of Science and Technology.
- [6] Akyüz, B. (2014). Comparison of the machinability and wear properties of magnesium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(9), 1735-1742.
- [7] Akyüz, B. (2018). Influence of Al content on machinability of AZ series Mg alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(8), 2243-2249.
- [8] Jambor, A. & Beyer, M. (1997). New cars - new materials. *Materials & Design*, 18, 4-6, 203-209.
- [9] Li, Y., Wen, C., Mushahary, D., Sravanthi, R., Harishankar, N., Pande, G., & Hodgson, P. (2012). Mg-Zr-Sr alloys as biodegradable implant materials. *Acta biomaterialia*, 8(8), 3177-3188.
- [10] Musfirah, A. H., & Jaharah, A. G. (2012). Magnesium and aluminum alloys in automotive industry. *J. Appl. Sci. Res*, 8(9), 4865-4875.
- [11] Mutua, J., JM, K., Rading, G. O., & Kimotho, J. K. (2011). Use of magnesium alloys in optimizing the weight of automobile: Current trends and opportunities.
- [12] Tomac, N., Tønnesen, K. & Mikac, T. (2008). Study of influence of aluminum content on machinability of magnesium alloys, *Strojarstvo*, 50(6), 363-367.
- [13] Tönshoff, H. K. & Winkler, J. (1997). The influence of tool coatings in machining of magnesium. *Surface and Coating Technology*, 94-95, 610-616.
- [14] Uhríček, M., Dresslerová, Z., Palček, P., Chalupová, M., Trojanová, Z., & Hanusová, P. (2020). Amplitude Dependent Internal Friction in Strained Magnesium Alloys of AZ Series. *Crystals*, 10(7), 608.
- [15] Kuczmazewski, J., Zagorski, I., Gziut, O., Legutko, S. & Krolczyk, G. M. (2017). Chip fragmentation in the milling of AZ91HP magnesium alloy. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 63(11), 628-642.
- [16] Zagórski, I. & Kuczmazewski, J. (2016). Study of chip ignition and chip morphology after milling of magnesium alloys. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(32).
- [17] Hou, J., Zhao, N. & Zhu, S. (2011). Influence of cutting speed on flank temperature during face milling of magnesium alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 26(8), 1059-1063.
- [18] Danish, M., Ginta, T. L., Habib, K., Carou, D., Rani, A. M. A. & Saha, B. B. (2017). Thermal analysis during turning of AZ31 magnesium alloy under dry and cryogenic conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5), 2855-2868.

- [19] Liu, K., Li, X. P. & Liang, S. Y. (2007). The mechanism of ductile chip formation in cutting of brittle materials. *Int J Adv. Manuf. Technology*, 33, 875-884.
- [20] Tekumalla, S. & Gupta, M. (2017). An insight into ignition factors and mechanisms of magnesium based materials: A review. *Materials & Design*, 113, 84-98.
- [21] Lee, S., Ham, H. J., Kwon, S. Y., Kim, S. W. & Suh C. M. (2013). Thermal conductivity of magnesium alloys in the temperature range from 125 °C to 400 °C. *International Journal of Thermophysics*, 34(12), 2343-2350.
- [22] Rudajevová, A. & Lukáč, P. (2005). Comparison of the thermal properties of AM20 and AS21 magnesium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 397(1-2), 16-21.
- [23] Yamasaki, M., & Kawamura, Y. (2009). Thermal diffusivity and thermal conductivity of Mg–Zn–rare earth element alloys with long-period stacking ordered phase. *Scripta Materialia*, 60(4), 264-267.
- [24] Cengel, Y. A. & Ghajar, A. J. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (Fifth Edition), Mc Graw Hill, New York.
- [25] Chunming, W., Yungui, C., Sufen, X., Wucheng, D. & Xia, L. (2013). Thermal Conductivity and Mechanical Properties of as-Cast Mg-3Zn-(0.5~ 3.5) Sn Alloys. *Rare Metal Materials and Engineering*, 42(10), 2019-2022.
- [26] Tritt, T.M. (2005). *Thermal conductivity: theory, properties, and applications*. Springer Science & Business Media, 290.