

**NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ MAGNEZYUM
ESASLI NANOKOMPOZİT ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

ENGİN DİNCEL

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOTEKNOLOJİ VE İLERİ MALZEMELER
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MERSİN
HAZİRAN – 2014**

**NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ MAGNEZYUM
ESASLI NANOKOMPOZİT ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

ENGİN DİNCEL

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOTEKNOLOJİ VE İLERİ MALZEMELER
ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Danışman
Prof. Dr. Ahmet BALDAN**

**MERSİN
HAZİRAN – 2014**

Engin DİNCEL tarafından Prof. Dr. Ahmet BALDAN danışmanlığında hazırlanan "Nanopartikül Takviyeli Magnezyum Esaslı Nanokompozit Üretimi ve Karakterizasyonu" başlıklı bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. Ahmet BALDAN

Yrd.Doç.Dr. Güven YARKADAŞ

Yrd.Doç.Dr Hüseyin ŞEVİK

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 11/09/2014 tarih ve 2014.17/510 sayılı kararıyla onaylanmıştır.


Doç.Dr. Mehmet KÜÇÜKASLAN
Enstitü Müdürü

NANOPARTİKÜL TAKVİYELİ MAGNEZYUM ESASLI NANOKOMPOZİT MADDE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Engin DİNCEL

ÖZ

Nanokompozit malzemelerin yüksek elastik modül, mukavemet, aşınma dayanımı gibi üstün fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı son yıllarda üretimleri ve kullanımları yaygınlaşmıştır. Bu çalışmada, magnezyum esaslı matris alaşımı ve hacimce %0.5 nano- Al_2O_3 gravity döküm yöntemiyle kontrollü atmosferde üretilmiş ve konvansiyonel alaşımlara göre kıyaslanması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Magnezyum alaşımı, Nanokompozit, Nano-alümina

Danışman: Prof. Dr. Ahmet BALDAN, Mersin Üniversitesi, Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF MAGNESIUM BASED NANOCOMPOSITES REINFORCED BY NANOPARTICLES

Engin DİNCEL

ABSTRACT

Due to their superior physical and mechanical properties such as high elastic modulus, strength, wear resistance, the production and usage of the nanocomposite materials has become widespread in recent years. In this study, the magnesium-based alloy matrix and the nano- Al_2O_3 0.5% by volume produced by gravity casting method, in a controlled atmosphere and comparison is made according to conventional alloys.

Key Words: Magnesium Alloy, Nanocomposite, Nano-alumina

Advisor: Prof. Dr. Ahmet Baldan, Mersin University, Department of Nanotechnology and Advanced Materials

TEŞEKKÜR

Tez danışmanlığımı yapan çok değerli hocam Prof. Dr. Ahmet Baldan'a, yüksek lisans eğitimim boyunca hep yanımda olan Yard. Doç. Dr. Hüseyin Şevik'e, iyi ve kötü günlerimi paylaştığım aileme ve hayat arkadaşım, köpeğim Mayk'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI	4
2.1 MAGNEZYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	4
2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	8
2.2.1. Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	13
2.2.2. Magnezyum-Alüminyum Alaşımları	14
2.2.3. Magnezyum-Alüminyum-Çinko Alaşımları	17
2.2.4. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları.....	22
2.2.4.1.Havacılıkta magnezyum.....	27
2.2.4.2. Otomotiv sektöründe magnezyum	28
2.3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	32
2.3.1. Tanım	32
2.3.2. Metal Matriksli Kompozitler.....	33
2.3.3. Polimer Matriksli Kompozitler	37
2.3.4. Seramik Matriksli Kompozitler.....	38
2.3.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	38
2.3.5.1. Sıvı metal emdirmesi (İnfiltrasyon)	39
2.3.5.2. Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm tekniği.....	40
2.3.5.3. Basınçlı ve basınçsız infiltrasyon.....	41
2.3.5.4. Sıvı metal karıştırması.....	43
2.3.5.5. Yarı katı karıştırma	44
2.3.5.6. Toz metalurjisi tekniği	45
3. MATERYAL VE YÖNTEM	46
3.1. MEKANİK TESTLER.....	53
3.1.1. Sertlik deneyi	53
3.1.2. Çekme deneyi.....	53

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	55
4.1. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI.....	55
4.2. MEKANİK TESTLER	60
4.3. ÜRETİLEN MALZEMELERDE SERTLİK	60
4.4. ÜRETİLEN MALZEMELERDE ÇEKME MUKAVEMETİ	61
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Önemli metallerin yer kabuğundaki oranı	4
Çizelge 2.2. Saf magnezyumun (ağ.%99,9) fiziksel özellikleri	6
Çizelge 2.3. Saf magnezyumun (ağ.%99,9) mekanik özellikleri	7
Çizelge 2.4. Saf magnezyum ve alüminyumun fiziksel özellikleri	7
Çizelge 2.5. Magnezyum alaşımlarının avantaj ve dezavantajları	9
Çizelge 2.6. Alaşım elementleri ve kısaltmaları	10
Çizelge 2.7. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri	10
Çizelge 2.8. Önemli magnezyum alaşımlarından bazıları	11
Çizelge 2.9. Magnezyum alaşımlarında bazı üretim yöntemleri ve özellikleri	12
Çizelge 2.10. ASTM sisteminde magnezyum alaşımlarının, alaşım ve menevişleme gösterimlerinin standart dört bölümü	14
Çizelge 2.11. Katı fazlar ve sembolleri	20
Çizelge 2.12. Otomotiv sektöründe kullanılan magnezyum alaşımlarının özellikleri	28
Çizelge 2.13. Magnezyum alaşımlarından üretilmiş çeşitli parçalar	31
Çizelge 2.14. Alüminyum metal matrisli kompozit endüstrisinin hedefleri	35
Çizelge 4.1 Matris alaşımın EDS analiz sonucu	57
Çizelge 4.2. Kompozit EDS analiz sonucu	59
Çizelge 4.3. Üretilen alaşım ve kompozitin mekanik test sonuçları	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. Süreksiz karbon fiber ilaveli magnezyum alaşımları ile magnezyum ve alüminyum alaşımının sıcaklık-mukavemet değişimi	2
Şekil 2.1. Birim hücredeki ana düzlemler ve yönleri	6
Şekil 2.2 Magnezyum-Alüminyum ikili denge diyagramı	15
Şekil 2.3. Mg-Al sisteminin magnezyumca zengin olan bölümü	16
Şekil 2.4. Mg-Al alaşımının (AM60) tipik mikroyapı görüntüsü (α : Mg, β : Mg ₁₇ Al ₁₂ ve farklı şekillerdeki Al-Mn bileşenleri)	16
Şekil 2.5. Mg-Al-Zn alaşım sisteminin dökülebilirliğinin şematik resmi	18
Şekil 2.6. Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramı	19
Şekil 2.7. AZ91 alaşımının mikroyapısı	21
Şekil 2.8. AZ91 alaşımın mikroyapıda tane görünüşü	22
Şekil 2.9. Kesik halde Mg-Al kompozit motor bloğu	25
Şekil 2.10. AZ91 alaşımı döküm parçaları	25
Şekil 2.11. Li katkılı mg alaşımı döküm parçaları	26
Şekil 2.12. AM alaşımı döküm parçaları	26
Şekil 2.13. Araç ağırlığındaki azalmayla elde edilecek yakıt tasarrufu	29
Şekil 2.15. Otomobil parçalarında mg alaşımının kullanımı	31
Şekil 2.15. Fiber takviyeli kompozitlerin enine kesitinde arafaz ve ara-yüzeylerin görünümü	32
Şekil 2.16. Fiber takviye fazlarının yaygın çeşitleri	34
Şekil 2.17. Sıkıştırma döküm yöntemi	40
Şekil 2.18. Basınçlı infiltrasyon metodu	42
Şekil 3.1. Döküm fırını genel görünümü	46
Şekil 3.2. 50 nanometre altı alümina	48
Şekil 3.3. Döküm fırını	49
Şekil 3.4. Çelik kalıp	50
Şekil 3.5. Döküm sonrası malzemeleri	50
Şekil 3.6. Çekme deneyinde kullanılan çekme numunesi	51
Şekil 3.7. Kesme cihazı	52
Şekil 3.8. Zımpara ve parlatma cihazı	52
Şekil 3.9. Sertlik cihazı	53
Şekil 3.10. Çekme cihazı	54
Şekil 4.1. Matriks alaşımı SEM görüntüsü (100x)	55
Şekil 4.2. Matriks alaşımı SEM görüntüsü (500x)	56
Şekil 4.3. Matriks alaşımı SEM görüntüsü (1000x)	56
Şekil 4.4. Matriks alaşımı EDS analiz görüntüsü	57
Şekil 4.5. Nanokompozit SEM görüntüsü (100x)	58
Şekil 4.6. Nanokompozit SEM görüntüsü (1000x)	58
Şekil 4.7. Nanokompozit SEM görüntüsü (3500x)	59
Şekil 4.8. Nanokompozit EDS analiz görüntüsü	59
Şekil 4.9. Sertlik test sonuçları	60

Sayfa

Şekil 4.10. Matriks ve nano-kompozit malzemenin yüzde uzama, akma ve çekme mukavemet değerleri62

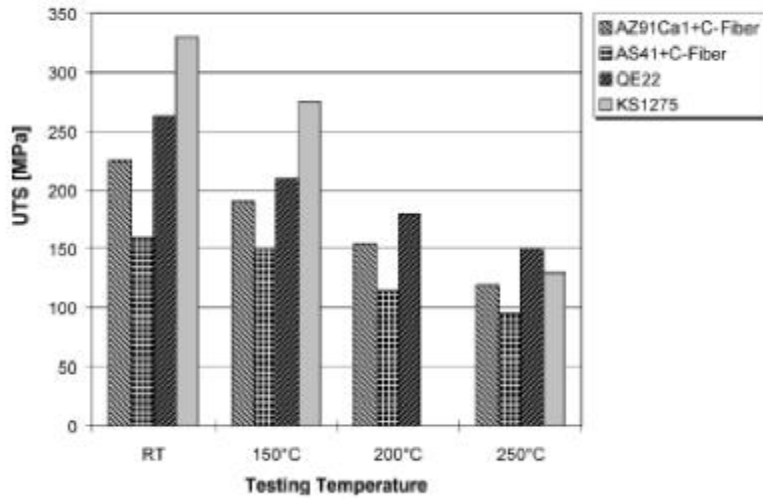
1. GİRİŞ

Gelecek yıllarda büyüyen çevresel tehlikeleri azaltmak için en önemli konu başlıklarından birisi CO₂ emisyonunun düşürülmesi olacaktır. Bu nedenle tüm yapı malzemeleri içinde hafif metaller önemini her gün arttırmaktadır. Magnezyum (Mg) alaşımları sahip olduğu düşük yoğunluğu ve iyi mukavemet/ağırlık oranı ile endüstriyel uygulama alanında kullanılabilirliği olan en hafif yapı malzemelerinden bir tanesidir. Bu özelliğiyle tüm alanlarda (elektronik, savunma, uzay sanayinde ve biyo-medikal uygulamalarda) özellikle de otomobil endüstrisindeki önemini her geçen gün arttırmaktadır. Öümüzdeki yıllarda binek otomobillerde ulaşılması planlanan yakıt tüketimi 3 litre/100 km gibi zorlu bir hedeftir ve bunun için otomobil ağırlığında yaklaşık %30'luk bir azalma gerekmektedir.

Metal Matrisli Kompozit malzemelerin yüksek elastik modül, mukavemet, aşınma dayanımı gibi üstün fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı son yıllarda üretimleri ve kullanımları yaygınlaşmıştır. Sahip oldukları iyi özelliklere rağmen, kompozit malzemeler, üretim maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı kullanımları endüstriyel olarak istenen seviyelere henüz ulaşamamıştır. Metal matrisli kompozit malzemelerin elde edilmesinde en önemli adım üretim aşamasıdır. Bu durumda, kompozit malzemenin nihai özelliklerini düşürmeyecek matris ve takviye fazlarının seçiminin bilinçli yapılması gerekmektedir.

Literatür incelendiği zaman başlıca Mg/Al sistemi (AZ91 ve AM60) döküm alaşımları magnezyum kompozitleri için matriks malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir. Alüminyum içeren magnezyum alaşımlar 1950'li yıllardan beri çalışılmakta ve bu nedenle ticari kullanımı mevcuttur. Fakat kullanım alanlarını genişletmek için günümüzde bu alaşımlar magnezyum esaslı kompozitler için matriks malzemesi olarak kullanılmaktadır. Takviyesi için Karbon fiber, oksitler (Al₂O₃), nitritler (BN, TiN) veya karbidler (SiC, B₄C) gibi seramiklerden yapılan çeşitli malzemeler partikül veya fiber şeklinde kullanılmaktadır. Kompozit için kullanılacak üretim metoduna bağlı olarak %5 ile %30 arasında partikül takviyesi yapılabilir [1,2,3]. Örneğin; bir çalışmada AZ91+Ca (ağırlıkça %1 Kalsiyum) ve AS41 (Mg-4Al-1Si) alaşımlarına Karbon fiber ilavesi gerçekleştirilmiş ve QE22

(Mg-2Ag-2RE) alaşımıyla KS1275 (Al-Si-Cu) alüminyum piston alaşımının sıcaklık-mukavemet değişimi üretilen kompozitler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 1). Oda sıcaklığında fiber takviyeli standart magnezyum alaşımları alüminyum alaşımından daha düşük mukavemetler sergilemesine rağmen, ısıl direnç yüksek sıcaklıklarda kabul edilebilir değerlere ulaşır [2].



Şekil 1. Süreksiz karbon fiber ilaveli magnezyum alaşımları ile magnezyum ve alüminyum alaşımının sıcaklık-mukavemet değişimi

Araştırmacılar tarafından Al_2O_3 , SiC, TiC veya B_4C gibi seramik malzemeler kısa fiber veya partikül olarak magnezyum alaşımlarına ilave edilmekte ve çeşitli özellikleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Jakalakshmi ve arkadaşları sıkıştırma döküm yöntemiyle AM100 alaşımına farklı hacim oranlarında Al_2O_3 süreksiz fiber takviyesi gerçekleştirmiş ve farklı sıcaklıklarda çekme mukavemetine etkisini incelemiştir. Yüksek sıcaklıkta alaşımın çekme mukavemetinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir [4]. B_4C seramik parçacığı, çok sert, güçlü ve gergin bir malzeme olup, düşük yoğunluğa sahiptir. Bu nedenle, metal matriks ile B_4C seramik fazı kombinasyonu son derece ilginçtir. Badini ve arkadaşları yapay yaşlanma ile çökleme olaylarındaki B_4C takviyeli magnezyum esaslı kompozitleri araştırmıştır. Seramik takviye $Mg_{17}Al_{12}$ 'nin heterojen çöktürme mekanizmasını korumuş, takviye-matris arayüzeyinde çekirdeklenmeyi geliştirmiş olduğu tespit edilmiştir [5]. Bir başka çalışmada, infiltrasyon yöntemiyle B_4C takviyeli kompozit malzemeler

üretilmiştir. Kompozitin mikro yapısı, yeni oluşmuş MgB_2 ve başlangıçtaki B_4C partikülleri ve bir miktar metal ile birleşmiş üç atomlu karbür MgB_2C_2 'den oluştuğu tespit edilmiştir [6]. Bir diğer çalışmada, AZ91 alaşımına %8 SiC ilavesi gerçekleştirilmiş ve alaşımın aşınma direncinin belli şartlarda iyileştiği görülmüştür [7]. Sonuç olarak iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen henüz ticari olarak kullanıma sahip magnezyum esaslı kompozit malzemeler çok fazla bulunmamakta olduğu görülmektedir. Bu nedenle araştırmacılar yoğun olarak magnezyum esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirmektedir. Bu çalışmalar incelendiği zaman, genel olarak aşınma dirençleri ve yüksek sıcaklıkta mukavemet değerlerinin belirlenmesi ana çalışma konuları olmuştur. Ayrıca magnezyum esaslı kompozit malzeme üretiminde birçok aşamanın önemli olduğu da gözlenmiştir [4-13];

- Alaşım ve takviye malzemesi seçilirken birbiri ile uyumu (ıslatılabilirlik gibi)
- Üretim yönteminin belirlenmesi.

Bu nedenle literatür kısmında, kullanılacak alaşım sistemleri ve üretim yöntemlerine de değinilmiştir.

Magnezyum esaslı metalik kompozit malzemeler gravity döküm, kum kalıba döküm ve basınçlı döküm gibi çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir. Bu yöntemler, üretilecek kompozitlerin mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını önemli ölçüde etkilediğinden yöntem seçimi oldukça önemlidir. Bu çalışma da kolay dökülebilmesi, işlenebilmesi ve mekanik özellikleri nedeniyle basınçlı döküm proseslerinde sıkça kullanılan en popüler magnezyum döküm alaşımlarından AM60 (Mg-6Al-0.3Mn) alaşımı gravity döküm yöntemi ile üretilecek ve %0.5 hacim oranında nano boyutta Al_2O_3 (<50nm) partikülleri ilave edilerek kompozit oluşturulacaktır. Bu üretim metodunun, kompozit üretimine uygulanabilirliğini belirlemek amacıyla, üretilen kompozitlerin partikül dağılımı ve döküm kalitesini tespit etmek için metalografik çalışmalar yapılacaktır. Üretilen numunelerde çekme ve sertlik deneyleri uygulanacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

2.1. MAGNEZYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ

Magnezyumun, alüminyumdan %36 demirden %78 daha hafif olması modern teknoloji olan uzay, uçak ve otomotiv parçalarında kullanımını kaçınılmaz kılmaktadır. Bütün yapı malzemelerine kıyasla en yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. Uzun zamandır süre gelen yakıt krizinden beri, düşük emisyon ve düşük yakıt tüketimi için araçların ağırlıkları düşürülmeye çalışılmaktadır. Yeni dizaynlar ile boyut küçültme veya bunların kombinasyonu ile modern teknoloji olan uzay, uçak ve otomotivlerin ağırlıkları azaltılmaktadır.

Çizelge 2.1. Önemli metallerin yer kabuğundaki oranı

Element	Al	Fe	Mg	Ti	Zn	Ni	Cu	Pb
% oran	7,5	4,7	1,9	0,58	0,02	0,018	0,01	0,002

Çizelge 2.1'den görüldüğü gibi magnezyum yer kabuğunda yaklaşık %2 oranında bulunmaktadır. Çeşitli ham maddelerden magnezyum metali üretilmektedir. Metalik magnezyum elementi şu anda dünyada kullanılabilir en düşük yoğunluğa sahip metaldir. Ekonomik olarak kazanılabilir magnezyum minerali 11 ülkede 38 önemli yatakta 380 milyon ton olarak çıkarılmaktadır. Magnezyumun kazanıldığı üç temel kaynak bulunmaktadır. Deniz suyu, mineral kayaçlar ve asbest. Dünya'daki en büyük magnezyum yatakları şu şekilde dağılmıştır [14].

Kuzey Amerika: ABD, Kanada

Güney Amerika: Brezilya

Avrupa: Norveç, Avusturya, Çekoslovakya, Yunanistan, Türkiye, Rusya,

Yugoslavya

Asya: Çin, Hindistan, K. Kore

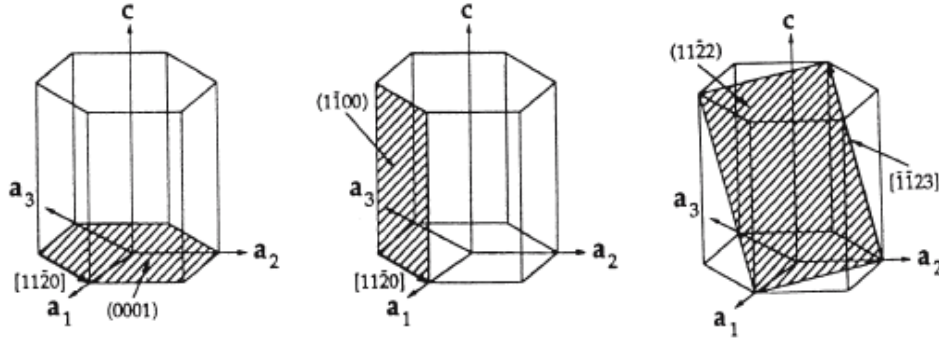
Okyanusya: Avustralya

Magnezyum, yapısal uygulamalarda kullanılabilen en hafif metaldir. Element ilk olarak Sir Humphrey Davey tarafından 1808 yılında keşfedilmiştir. Yerkabuğunun %2'sinde ve okyanusların %0,13'ünde bulunması sebebiyle yer kabuğunda yaygın olarak bulunan ve periyodik tabloda IIA grubunda yer alan toprak alkali elementtir [29].

Magnezyum, toprak alkali metalleri (2A) grubuna dahildir ve 3. periyotta yer alır. Atom numarası 12, atom ağırlığı 24,3050 g/mol olup; Mg sembolü ile gösterilir. Be (Berilyum), Ca (Kalsiyum), Sr (Stronsiyum), Ba (Baryum) ve Ra (Radyum) elementleriyle benzer elektron yapısına sahiptir. Elektron dizilimi $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ şeklindedir. En dış enerji seviyesindeki 2 elektrondan dolayı, daima 2 değerlik alır. Atom çapı 0,32 nm ve atomik hacmi $14 \text{ cm}^3/\text{mol}$ 'dür. Kristal yapısı hegzagonal sıkı pakettir (HSP). Şekil 2.1 birim hücredeki temel düzlemleri göstermektedir. Saf magnezyumun oda sıcaklığında hesaplanan kafes parametreleri; $a = 0,3202 \text{ nm}$ ve $c = 0,5199 \text{ nm}$ 'dir. 1,6236 olan c/a oranı, ideal değere (1,633) oldukça yakındır. Bu nedenle magnezyumun, mükemmel sıkı paket yapıya sahip bir metal olarak düşünülebilir [30].

Günümüzde konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılan metalik malzemeler arasında en hafif olanı magnezyumdur. Otomobil üretiminde daha yoğun olan çelik, dökme demir ve bakır esaslı alaşımlar ve hatta magnezyum esaslı alüminyum alaşımlarının yerini almasına sebep olan da bu özelliğidir. Avrupa Birliğine uyum çerçevesinde yasal sınırlamaların getirilmesinin bir sonucu olarak, araç parçalarının ağırlığını azaltma gereksinimi magnezyuma yeni bir ilgi oluşmasına sebep olmuştur. Magnezyum esaslı alaşımların daha geniş kullanımı paralel uygulamaları da gerektirmektedir. Hafiflik bakımından en büyük rakibi alüminyumdur. Magnezyum, hafifliği ve buharlaşma özellikleri bakımından plastiklere benzetilirken, bu malzeme bir metalin mekanik özelliklerine sahiptir. Ayrıca Mg, mühendislik plastiklerine göre çok daha rijit ve çok daha fazla geri dönüşümü mümkün bir malzemedir. Saf magnezyumun fiziksel ve mekanik özellikleri çizelge 2.2 ve 2.3'de verilmiştir. En

önemli rakibi alüminyum ile fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması ise çizelge 2.4'de yapılmıştır.



Şekil 2.1. Birim hücredeki ana düzlemler ve yönleri

Çizelge 2.2. Saf magnezyumun (ağ.%99,9) fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Ergime Noktası	650°C ± 2
Kaynama Noktası	1107°C ± 10
Ergime Gizli Isısı	0,37 MJ/kg
Buharlaştırma Gizli Isısı	5,25 MJ/kg
Yanma Isısı	25,1 MJ/kg
Özgül Isısı	
20°C'de	1030 J/(kg K)
600°C'de	1178 J/(kg K)
Elektriksel Direnci 20°C'de	4,45 µΩ cm
Isıl İletkenliği 25°C'de	155 W/(kg K)
Isıl Genleşme Katsayısı (Lineer) 20°C'de	25,2 * 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Yoğunluk	
20°C'de	1,738 g/cm ³
600°C'de	1,622 g/cm ³
650°C'de (katı)	1,65 g/cm ³
650°C'de (sıvı)	1,58 g/cm ³
Katılaşma Sırasında Hacimsel Değişim	% 4,2
Soğuma Sırasında Hacimsel Değişim (650–20°C)	% 5

Çizelge 2.3. Saf magnezyumun (ağ.%99,9) mekanik özellikleri

	Çekme Dayanımı	Çekmede Akma Dayanımı	Basmada Akma Dayanımı	Uzama % 50 mm	Brinell Sertliği
	MPa	MPa	MPa	–	500 kp/10 mm
Kum döküm, Kalınlık 13 mm	90	21	21	2–6	30
Ekstrüzyon, Kalınlık 13 mm	165–205	69–105	34–55	5–8	35
Haddelenmiş levha	180–220	115–140	105–115	2–10	45–47
Tavllanmış levha	160–195	90–105	69–83	3–15	40–41

Çizelge 2.4. Saf magnezyum ve alüminyumun fiziksel özellikleri

Özellik (20°C)	Magnezyum	Alüminyum
Atom numarası	12	13
Atom ağırlığı	24,3	26,98
Kafes tipi	SDH	YMK
Ergime noktası	650 °C	659 °C
Kaynama noktası	1103 ± 8 °C	2447 °C
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,738	2,699
Elektrik iletkenliği (m/ΩK)	22,2	37,6
Termal iletkenlik (W/m.K)	154	222
Özgül Isı Kapasitesi (J/kg.K)	1047	930
Hacimsel Isı Kapasitesi (J/m ³ .K)	1783	2430
Ort. Isıl Gen. Kat (10 ⁻⁶ m/m.K)	26 (0-100°C)	23,86 (0-100°C)
Elastisite modülü (10 ³ N/mm ²)	44,5	69,6

2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

1930'lu yılların başında magnezyum metalinin önemini anlayan Almanya saf magnezyum metaline çeşitli elementler ilave ederek alaşımlandırma yapmış ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için ilk adımları atmıştır.

Magnezyum alaşımları mükemmel işlenebilirliği ile düşük ağırlıklı malzemeler için istenen boşluğu doldurmasına rağmen hala alüminyum ve plastikler ile yarışmamaktadır. Ana faktörü düşük ve sabit maliyetlerde dünya pazarına sunulamaması ve tatmin edici mekanik özelliklerin sağlanamaması oluşturmaktadır. Bu nedenle hala araştırmacılar magnezyum alaşımları üzerinde çalışmalarını sürdürmektedir ve ana konuları aşağıdaki başlıklar oluşturmaktadır [14]:

- Alaşım geliştirme
- Hızlı soğuma
- Üretim teknolojileri
- Kompozitler
- Korozyondan koruma
- Geri dönüşüm

bu konu başlıkların takibinde araştırmacıların amacını da aşağıdaki maddeler oluşturmaktadır:

- Birincil malzemelerin düşük maliyette üretilebilmesi
- Alaşım çeşitlerinin genişletilebilmesi ki bu sürünme davranışının geliştirilmesi ve spesifik ağırlığın düşürülmesi için gerekmektedir.
- Yenilikçi üretim metotları geliştirmek
- Geliştirilmiş kaplama teknikleri ile korozyon direncini arttırmak
- Hızlı soğuma proseslerinden faydalanabilme
- En iyi şekilde magnezyum matriksli kompozitlerin kullanım alanlarının geliştirilmesi

- İkincil geri dönüşüm tesislerinin kurulması ile geri dönüşüm kavramını genişletmek

Magnezyum parçaların sahip olduğu avantajlara rağmen hala dünya pazarında yerini tam olarak alamamıştır ki avantajları ve kullanım sınırlamaları Çizelge 2.5’de sunulmuştur [14-16,31-35].

Çizelge 2.5. Magnezyum alaşımlarının avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
<ul style="list-style-type: none">- Bütün metalik malzemelerin arasında en düşük yoğunluğa sahip- Yüksek spesifik mukavemet- Basıçlı döküm için iyi dökülebilirlik ve kullanım- Yüksek kesme hızında kolay işlenebilirlik- İnert gaz altında iyi kaynaklanabilirlik- Geliştirilmiş korozyon direnci- Plastikler ile karşılaştırıldığında iyi mekanik özellik, daha iyi elektrik ve termal iletkenlik, geri dönüşüm	<ul style="list-style-type: none">- Birkaç alaşıma sahip olması- Oda sıcaklığında düşük süneklilik ve tokluğa sahip- Yüksek sıcaklıkta limitli özellikler sürünme direnci gibi- Yüksek kimyasal reaksiyon- Yüksek döküm çekilmesi- Yüksek üretim maliyetleri

Magnezyum alaşımları için birçok değişik döküm yöntemi uygulanmaktadır. Farklı magnezyum alaşımları için farklı yöntemler uygulanmakta ve bu alaşımlar farklı mekanik özellikler göstermektedir. Genellikle magnezyum alaşımları otomobil parçalarında, savunma ve uzay sanayinde, dizüstü bilgisayarlarda, kamera cep telefonu gibi elektronik aletlerin aksamlarında kullanılmak üzere basınçlı döküm tekniği ile üretilirler [14,36,37].

Mg alaşımları ASTM (A275) standart sistemi tarafından belirlenmiştir. Yöntem iki harfle birlikte iki rakamı kapsamaktadır. İki harf; iki en büyük elemanına

verilmiş olan harf kısaltması; rakamlar ise bu alaşımların en yakın tam sayıya yuvarlanmış yüzdelerdir. Çizelge 2.6'da yaygın bir şekilde kullanılan alaşım elementleri tek harfle listelenmiş şekilde verilmiştir [35,38].

Çizelge 2.6. Alaşım elementleri ve kısaltmaları

Harf	A	B	C	D	E	H	J	K	L	M	Q	S	W	X	Z
Element	Al	Bi	Cu	Cd	RE	Tr	Sr	Zr	Li	Mn	Ag	Si	Yi	Ca	Zn

Örnek AZ91 alaşımının açıklaması aşağıda verilmektedir [19,42,43]

A - Al'yi yani Mg'den sonra alaşımdaki en fazla elementi ifade eder.

Z - Zn'yi yani 2. olarak en fazla kullanılan elementi ifade eder.

9 - Alaşımdaki Al oranının yaklaşık 8,6-9,4 arasında olacağını ifade eder.

1 - Alaşımdaki Zn oranının yaklaşık 0,6-1,2 arasında olacağını ifade eder.

Mg alaşımları ASTM B 93/B 93M ve ASTM B94'e göre standartları Çizelge 2.7'de gösterilmiştir [19,42,43].

Çizelge 2.7. Mg alaşımları standartları ve bileşimleri

Alaşım Elementi	Mg Alaşımları								
	AM50	AM60	AS21	AS41	AZ31	AZ80	AZ91	ZE10	ZK60
Al	4.5-5.3	5.6-6.4	1.9-2.5	3.7-4.8	2.5-3.5	7.8-9.2	8.5-9.5	0.05 max	0.05 max
Zn	0.20 max.	0.20 max.	0.15-0.25	0.10 max.	0.7-1.3	0.2-0.8	0.45-0.90	1.0-1.5	4.8-6.2
Mn	0.28-0.50	0.26-0.50	0.20 min.	0.35-0.60	0.20 min.	0.15-0.5	0.17-0.40	0.1 max.	0.1 max.
Si	0.05 max	0.05 max	0.70-1.2	0.60-1.4	0.05 max	0.10 max	0.05 max	0.05 max	0.05 max
Fe	0.004 max	0.004 max	0.004 max	0.035 max	0.005 max	0.05 max	0.004 max	0.03 max	0.03 max
Cu	0.008 max	0.008 max	0.008 max	0.015 max	0.05 max	0.05 max	0.025 max	0.025 max	0.05 max
Ni	0.001 max	0.001 max	0.001 max	0.001 max	0.005 max	0.005 max	0.001 max	0.005 max	0.005 max
Be	-	-	-	-	-	0.002	-	0.002	0.002
Ce	-	-	-	-	-	-	-	0.12-0.25	-
Zr	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3-0.9
Diğer	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	0.01	-	-
Mg	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan	Kalan

Standart ASTM magnezyum alaşımları, içerilen elementin yüzdesine göre harf semboller ile gösterilmiştir. Alüminyum için A, manganez için M, silisyum için S, zirkonyum için Z, toryum için H, gümüş için Q, ve nadir toprak elementleri için E

kullanılmaktadır [44]. Rakamlar ise içerilen alaşım elementinin sırasıyla yüzdesini ifade etmektedir. En eski ticari alaşım elementleri alüminyum, çinko ve manganezdır ve Mg-Al-Zn dökümleri II. Dünya savaşı sırasında Almanya da geniş ölçüde kullanılmıştır. Bu alaşımlarda ıslak ve rutubetli ortamlarda korozyon problemi ortaya çıkmış ve 1925 yılında küçük miktarlarda manganez ilavesi ile (% 0,2) bu problem azaltılmıştır. Bu ilavenin sıvıdan demiri ve zararsız intermetalik bileşikler içerisindeki diğer kalıntıları uzaklaştırdığı belirlenmiştir. Mg-Al-Zn sistemine dayanan alaşımlar ortam sıcaklıklarında kullanılmak üzere magnezyum döküm alaşımları için temel malzemeler olarak kalmıştır. En eski dövme alaşımı Mg-1,5Mn alaşımıdır ve levha, ekstrüzyon ve dövme ürünler olarak kullanılmıştır. Çizelge 2.8’de önemli magnezyum alaşımlarından bazıları verilmektedir.

Çizelge 2.8. Önemli magnezyum alaşımlarından bazıları

Alaşım adı	Alaşım ilaveleri	Kullanımları	Kullanım nedenleri
AZ91	% 9.0 Al, % 0.7 Zn, % 0.13 Mn	Genel döküm alaşımı	Dökülebilirliğinin iyi olması, T<150°C’de iyi mekanik özellikler göstermektedir.
AM60	% 6.0 Al, % 0.15 Mn	Yüksek basınçlı metal kalıp alaşımı	AZ91’den daha fazla tokluk ve şekil değiştirebilme (haddelenme), bir miktar mukavemeti düşürür. Sık sık otomotivlerde yapısal uygulamalar için tercih edilirler.
AZ31	% 3.0 Al, % 1.0 Zn, % 0.2 Mn	Dövme magnezyum ürünleri	İyi ekstrüzyon alaşımıdır.
ZE41	% 4.2 Zn, % 1.2 Re, % 0.7 Zr	Özel döküm alaşımı	Nadir toprak element ilavesi, yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımı sağlar.
AS41	% 4.2 Al, % 1.0 Si	Genel döküm alaşımı	Yüksek sıcaklıklarda AZ91’den daha iyi sürünme direnci sergiler, fakat düşük dayanıma sahiptir.

İki dünya savaşı arasındaki dönemde, magnezyum döküm alaşımlarında sık sık zayıf mekanik özelliklerle sonuçlanan büyük ve değişken tane boyutu ve mikro gözeneklilik (mikroporozite) nedeniyle zorluklarla karşılaşmıştır. 1937’de Almanya da zirkonyumun magnezyumda tane inceltme üzerine oldukça etkili olduğu bulunmuştur. Ancak zirkonyumun hem alüminyumla hem de manganez ile kararlı bileşikler oluşturmasıyla ergiyikten uzaklaşması ve görevini yerine getirmemesi

mevcut ticari alaşımlarda kullanımını sınırlamıştır. Bu durum hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda gelişmiş mekanik özelliklere sahip zirkonyum içeren yeni döküm ve dövme alaşım serisinin gelişmesine yol açmıştır. Mevcut zirkonyum içeren hem dövme hem de döküm alaşımlarında alüminyum ve manganez bulunmamaktadır. Bu alaşımlar şu anda uzay araçları endüstrisinde geniş ölçüde kullanılmaktadır [14].

Magnezyum alaşımlarının üretiminde birçok değişik döküm ve dövme yöntemi uygulanmaktadır. Döküm alaşımları, soğuk ve sıcak kamaralı basınçlı döküm, yarı-katı döküm (thixocasting), savurma döküm, sürekli döküm ve kum döküm yöntemleri ile üretilmektedir. Normal döküm ürünlerine göre daha yüksek mekanik özelliklere, düşük maliyet, yüksek dayanım ve iyi süneklığe sahip dövme ürünler genellikle levha, plaka ve ekstrüzyon alaşımları olarak kullanılmaktadır. Çizelge 2.9’da bazı üretim yöntemlerinin özellikleri verilmektedir. Genellikle makine veya metal yapı elemanları olarak tasarlanan magnezyum alaşım elemanları basınçlı döküm yöntemiyle üretilmektedir. Magnezyum döküm alaşımlarında döküm sıcaklığı yaklaşık olarak AZ91 alaşımı için 650-680°C, AM60 alaşımı için 670-685°C ve AS41 alaşımı için 665-680°C civarındadır.

Çizelge 2.9. Magnezyum alaşımlarında bazı üretim yöntemleri ve özellikleri

Ana Grup	Alt Grup	Özellikler
Döküm	Kum Döküm	Grift şekiller, düşük hacime uygun, iyi kalite, yüksek maliyet, büyük parça üretimi mümkündür.
	Kokil Döküm	Yüksek üretim hızı, iyi yüzey, düşük porozite, yüksek maliyet
	Kabuk Kalıp	Grift şekiller, yüksek hacime uygun, iyi kalite, yüksek maliyet, büyük parça üretimi mümkündür.
	Düşük-Basınçlı Döküm	Grift şekiller, yüksek kalite, orta boy parça dökümü, düşük maliyet özelliklerine sahiptir.
	Yüksek- Basınçlı Döküm	Nihai boyutlar,gerektiği kadar yüksek hacim ortalama büyüklükte parçalar, orta kalite, düşük maliyet özelliklerine sahiptir.
Hassas Döküm	En hassas nihai boyut, yüksek kalite, çok grift parça üretimi, yüksek maliyet özelliklerine sahiptir.	
Dövme	Levha	Düşük özellikler, yüksek maliyet
	Plaka	Düşük özellikler, düşük maliyet, iyi boyut kararlılığı
	Ekstrüzyon	Yüksek mekanik özellikler, düşük maliyet, grift parçalar
	Dövme	Yüksek kalite,ortalama özellik,ortalama maliyet

En önemli basınçlı döküm magnezyum alaşım grubu magnezyum-alüminyum sistemidir. Alüminyum bu sisteme yüksek dayanım ve iyi dökülebilirlik kazandırır. Pres dökümün kolaylıkla yapılabilmesi için %3'ün üzerinde alüminyum ilave edilmesi gereklidir [14].

2.2.1. Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Genel olarak magnezyum alaşımları döküm ve dövme alaşımlar olmak üzere ikiye ayrılır. Döküm alaşımlar kendi aralarında basınçlı, kum ve kalıcı kalıba döküm alaşımları olarak ayrılırken; dövme alaşımlarda sac, levha, ekstrüzyon ve dövme alaşımlar olarak alt bölümlere ayrılmaktadır. Sistemin çalışması ile ilgili bir örnek vermek için AZ91E alaşımını ele alabiliriz. Gösterimdeki ilk kısım, AZ, alüminyum ve çinkonun iki ana alaşım elementi olduğu anlamına gelir. Gösterimdeki ikinci kısım, 91, alüminyum ve çinkonun alaşım içindeki yuvarlatılmış yüzdelerini verir (sırasıyla %9 ve %1). Üçüncü kısım, E, %9 Al ve %1 Zn içeren standartlaştırılmış alaşımlar içinde, beşinci alaşım olduğunu ve yüksek korozyon direnci gösterdiğini belirtir. Çizelge 2.10'da ASTM sisteminde magnezyum alaşımlarının, alaşım ve menevişleme gösterimlerinin standart dört bölümü gösterilmektedir.

Çizelge 2.10. ASTM sisteminde magnezyum alaşımlarının, alaşım ve menevişleme gösterimlerinin standart dört bölümü

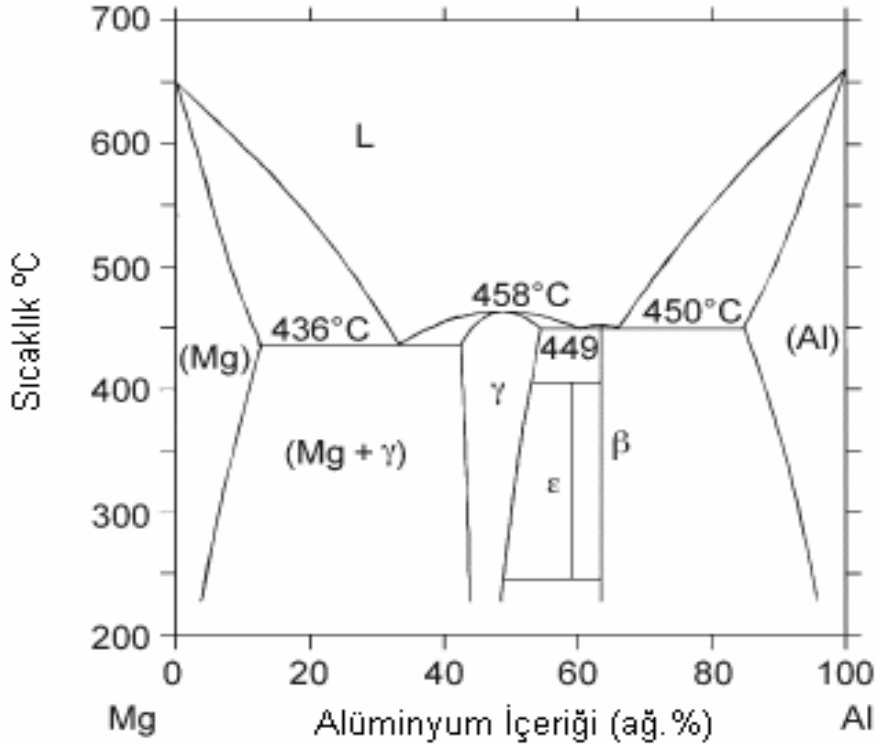
Birinci Kısım	İkinci Kısım	Üçüncü Kısım	Dördüncü Kısım
İki temel alaşım elementini belirtir	İki ana alaşım elementinin miktarını belirtir	Temel alaşım elementi miktarları aynı olan alaşımlar arasındaki farkı belirtir	Menevişleme koşullarını belirtir
Azalan yüzde miktarlarına göre düzenlenmiş iki ana alaşım elementini ifade eden, iki harften meydana gelir (eğer miktarlar eşitse alfabetik olarak sıralanır)	İki ana alaşım elementinin yuvarlatılmış yüzdelerini gösteren iki rakamdan meydana gelir ve birinci kısımdaki gösterim sırasına göre düzenlenir	ASTM standardına göre belirlenmiş bir alfabetik harften oluşur (I ve O hariç) A: Birinci Bileşim B: İkinci Bileşim C: Üçüncü Bileşim D: Yüksek Safılıkta (HP) E: Yüksek Korozyon Direnci	Bir harfi izleyen bir numaradan meydana gelir (üçüncü kısımdan tire işaretiyle ayrılmıştır)

2.2.2. Magnezyum-Alüminyum Alaşımları

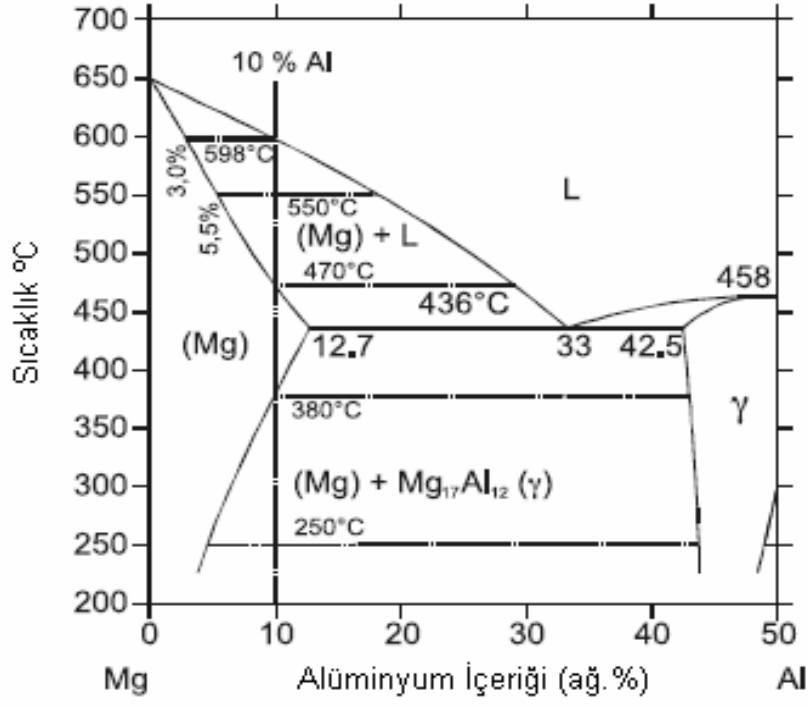
Magnezyum alaşımlarında en yaygın olarak Mg-Al sistemi kullanılmaktadır. Şekil 2.2 de Mg-Al ikili denge diyagramı görülmektedir. Denge diyagramından da görüldüğü gibi 436°C gibi çok düşük sıcaklıkta ötektik reaksiyon gerçekleşmektedir. Ötektik reaksiyon, $L \leftrightarrow Mg_{17}Al_{12} + \alpha(Mg)$, düşük sıcaklıkta meydana gelir (437°C). Bu ötektik sıcaklıkta alüminyumun maksimum çözünürlüğü %12,7 ve azalan sıcaklık ile alüminyumun çözünürlüğü de keskin bir şekilde azalır. Buradaki karakteristikler Mg-Al alaşım sisteminin alaşımlarının iyi dökülebilirlik, katı eriyik sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi sağlayabileceğini göstermektedir [45-48].

Şekil 2.3.'de görüldüğü gibi Mg-Al alaşım sistemleri % 2 den daha fazla alüminyum içerdiği zaman döküm mikroyapısında $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalitiği görülür. Eğer alaşımlarda alüminyum içeriği % 8'in üzerinde ise ağ yapısını tamamlamamış

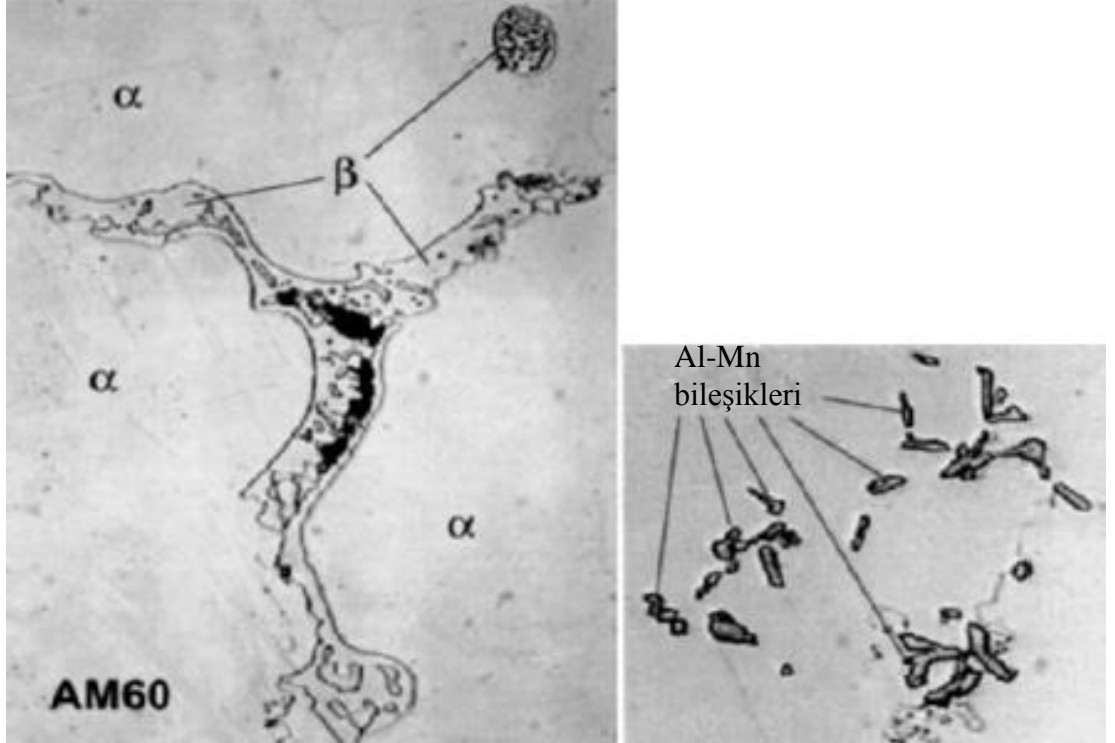
Mg₁₇Al₁₂ intermetalik tane sınırları boyunca dağılım gösterir ve bu durum sünekliliğin hızlı bir şekilde düşmesine neden olur. Yaklaşık 420°C de çözelti işlemi Mg₁₇Al₁₂ intermetalikinin çözünmesine sebep olur, katı eriyik sertleşmesi meydana gelir ve her iki durumda çekme mukavemeti ve sünekliliği artırmaktadır. 150°C ile 250°C aralığında Mg₁₇Al₁₂ intermetalik çökebilir ve bu çökelti partikülleri çekme mukavemetinin artmasını sağlar. Buna karşın Mg-Al alaşımları yapısal malzemeler olarak kullanılmak için gerekli özellikleri taşımamaktadır. Çinko, manganez, silisyum, nadir elementler gibi elementler Mg-Al alaşım sistemine ilave edilerek özelliklerin geliştirilmesi sağlamaktadır [46, 49-54].



Şekil 2.2. Magnezyum-Alüminyum ikili denge diyagramı



Şekil 2.3. Mg-Al sisteminin magnezyumca zengin olan bölümü



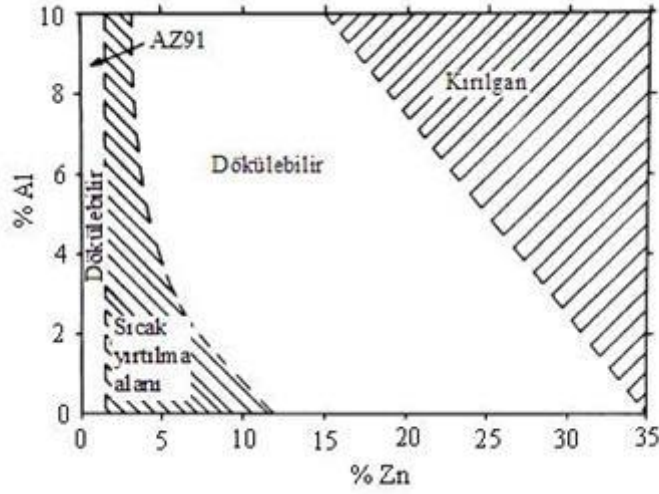
Şekil 2.4. Mg-Al alaşımının (AM60) tipik mikroyapı görüntüsü (α : Mg, β : $Mg_{17}Al_{12}$ ve farklı şekillerdeki Al-Mn bileşikleri)

AM60 (Mg-6Al-Mn) alaşımı Mg-Al sisteminde en yaygın kullanılan alaşımdır. Şekil 2.4’de tipik AM60 alaşımının mikroyapısı görülmektedir. Mg-Al alaşım sistemine üçüncü alaşım elementi olarak manganez ilavesi, Fe-Mn çökelti bileşeni vasıtası ile magnezyum eriyiğindeki demir içeriğini kontrol etmekte kullanılır. Bu nedenle manganez ilavesinin birincil nedeni demir kontrolü ile korozyon direnci geliştirmektir. Ergitme esnasında bu partiküllerin bir kısmı potanın altında çökeler, geri kalanı da katılaşma esnasında döküm içerisinde kalır. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi oluşan partiküller yapıda aynı anda iğnemsiz, keskin köşeli, küresel veya çiçeksi şekilde oluşabilir [48, 57-59]. Barbagallo ve arkadaşları yaptığı çalışmada, oluşan bu partiküllerin hem tane içinde hem de tane sınırında bulunabileceğini göstermiştir [58, 60]. Bu partiküller alaşım içerisinde muhtemelen Al_6Mn , Al_4Mn , Al_8Mn_5 ve çok az Fe içeren veya içermeyen AlMn fazlarında bulunabilir. Bu fazlar Mg-Al alaşımlarının yüksek sıcaklık mukavemetini de geliştirebilir. Bu alaşım AZ91 (Mg-9Al-1Zn) alaşımından daha yüksek süneklilik gösterir ve direksiyon simidi, araç koltuğu ve yüksek performans beklenen arabaların tekerleklerinin üretiminde kullanılır [48, 58-61].

2.2.3. Magnezyum-Alüminyum-Çinko Alaşımları

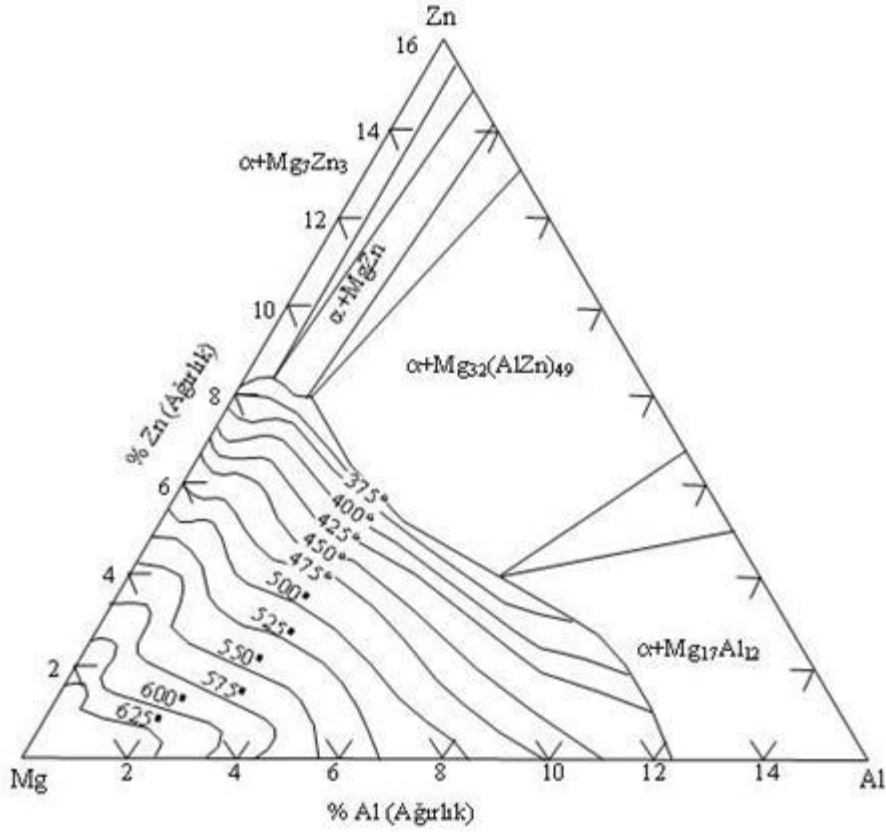
Mg-Al-Zn alaşım sistemi, Mg döküm alaşımları içinde çok önemli bir yere sahiptir. Bu alaşım sistemi ilk olarak 1913 yılında deneysel olarak keşfedilmiş ve daha sonra birçok araştırmacı tarafından araştırılıp geliştirilmiştir [46].

Şekil 2.5’de Mg-Al-Zn esaslı döküm alaşımlarının dökülebilirlik aralıkları verilmiştir.



Şekil 2.5. Mg-Al-Zn alaşım sisteminin dökülebilirliğinin şematik resmi

Şekil 2.5’de gösterilen diyagramda görüldüğü gibi sistem dört bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölge, düşük Zn’da dökülebilir bölgedir. Bu bölgede α (Mg) ve $Mg_{17}Al_{12}$ fazları vardır ve AZ alaşımı bu bölgededir. İkinci bölge, sıcak yırtılma bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Üçüncü bölge, yüksek Zn’da dökülebilir bölgedir. Yani yüksek çinkolu alaşımın dökülebilirliğini gösterir ve $Mg_{32}(AlZn)_{49}$ intermetalik bileşiği bu bölgededir. Dördüncü bölge ise kırılgan bölgedir.



Şekil 2.6. Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramı

Şekil 2.6'da gösterilen Mg-Al-Zn alaşım sisteminin üçlü faz diyagramında Al'ca zengin bölge incelendiğinde, üç temel metalik faz olduğu görülmektedir. Bunlar; MgZn , $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}$ ve $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 'dir. Bazı durumlarda $\text{Al}_2\text{Mg}_5\text{Zn}_2$ fazı 393°C 'den yüksek sıcaklıklarda ortadan kaybolur. $\text{Mg}_{32}(\text{Al,Zn})_{49}$ fazının oluşma sıcaklığı 535°C 'dir. $\alpha + \text{MgZn}$ ve $\alpha + \text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ ötektik fazlarının ergime sıcaklıkları sırasıyla 347°C ve 460°C 'dir[46,62]. Aşağıda bu katı fazlar ve sembolleri çizelge olarak gösterilmiştir.

Çizelge 2.11. Katı fazlar ve sembolleri

Faz	Sembol	Sıcaklık Aralığı (°C)	Faz	Sembol	Sıcaklık Aralığı (°C)
(Al)	-	<660.5	Mg₇Al₃	δ	342-325
(Mg)	-	<650	MgZn	ε	<347
Zn	-	<419.6	Mg₃Al₃	ζ	<416
Mg₂Al₃	β	<453	MgZn₂	η	<590
Mg₂₃Al₃₀	x	450-428	Mg₂Zn₁₁	θ	<381
Mg₁₈Al₅₂	y	-	Mg₃₂(AlZn)₄₉	τ	<535
Mg₁₇Al₁₂	γ	<460	Al₂Mg₅Zn₂	φ	393-?

Mg-Al-Zn sisteminde sıvı bölgesindeki en yüksek sıcaklık Al'un ergime sıcaklığı olan 650 °C'dir. Üçlü ötektik reaksiyon sıcaklığı olan 338°C en düşük sıcaklık noktasıdır. (sıvı \leftrightarrow ε+(Mg)+τ). Bu intermetalik fazlar içinde en yüksek çözünme sıcaklığına sahip iki faz Mg₃₂(AlZn)₄₉ (τ) ve MgZn₂ (η) fazlarıdır ve sıcaklıklarında sırasıyla τ =535°C ve η=590°C'dir.[46,62].

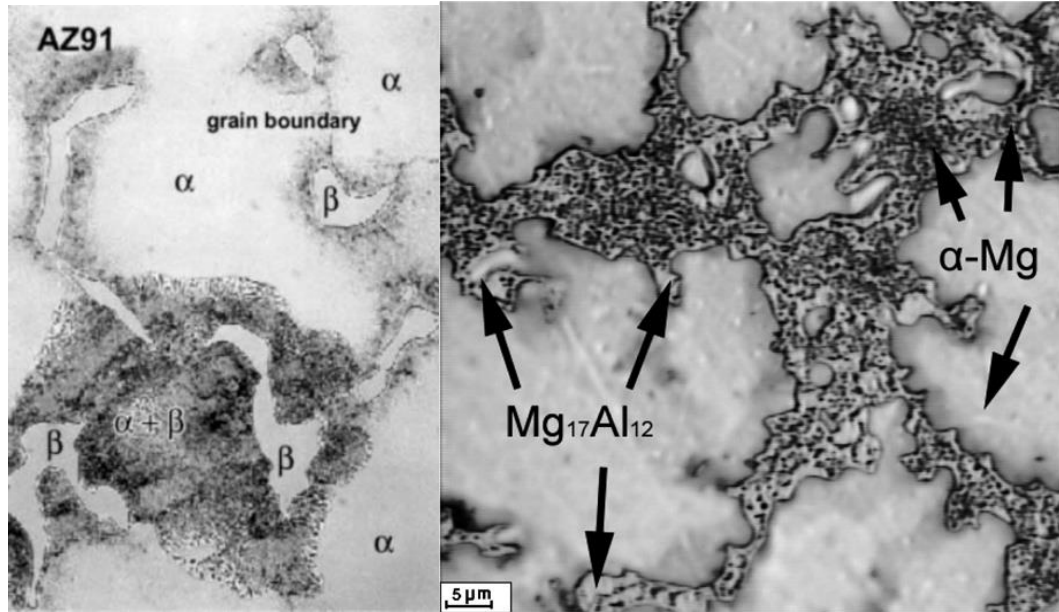
Mg-Al-Zn sistemlerinde AZ91 serisi iyi döküm özelliği ve mekanik özelliği olmasından dolayı en çok kullanılan ticari, yapısal Mg alaşımıdır. AZ91 alaşımı otomotiv endüstrisinde kokil kalıp döküm olarak kullanıldığından son yıllarda incelenmek için ilgi çekmektedir.

Alaşımın özelliklerini ve mikroyapılarını geliştirmek için değişik alaşımlamalar uygulanmaktadır. Örneğin; bu alaşım elementlerinden biri olan Ca'un oksidasyonu azalttığı, sızıntı emniyetini artırdığı, sıcak uygulamalara (130 -150°C) olan yeteneği artırdığı fakat %0.2 den fazla olduğu zaman, alaşımı kırılganlaştırdığı ve sıcak yırtılma eğilimini artırdığı gözlenmiştir [46]. Bununla birlikte AZ91 için en iyi sürünme direncinin oda sıcaklığında gerçekleştiği rapor edilmiştir [46].

Mg-Al alaşımlarında Zn/Al oranı 1/3 oranını aştığında mikroyapıda üçlü Mg-Al-Zn fazı görülür. Böylece faz oluşumu ve alaşımın denge katılma karakteristikleri ikili Mg-Al faz diyagramı ile anlaşılabilir (Şekil 2.3). AZ91'in dengeli katılması, birincil Mg olan α (Mg) katı eriyik çekirdeklenmesi ile yaklaşık 600°C 'de başlar.

Bu çekirdekler büyür ve katılma 470°C 'de son bulur [46]. α (Mg) ve $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazından oluşmuş ayrık bir ötektik oluşumu mikroyapıda görülür. Böylece denge dışı AZ91'in mikroyapısı α (Mg) ve bir intermetalik faz olan $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 'den oluştuğu anlaşılır.

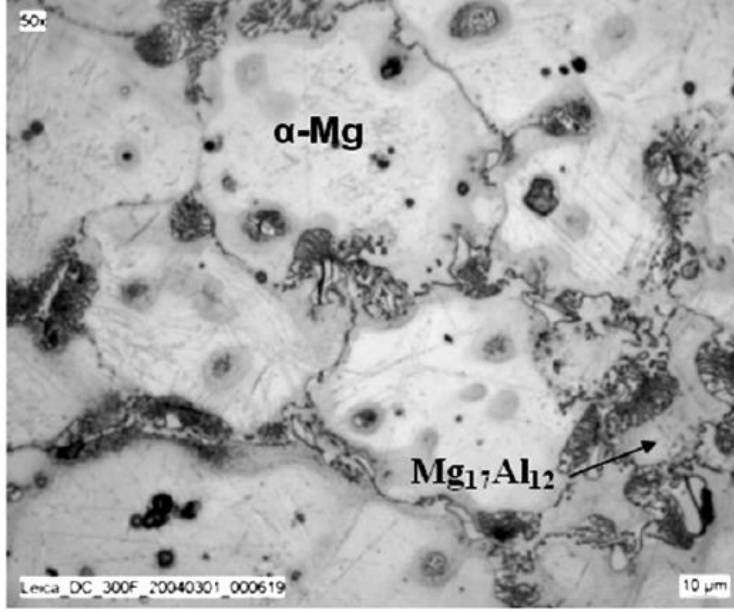
Şekil 2.7'de AZ91 alaşımının mikroyapıları görülmektedir.



Şekil 2.7. AZ91 alaşımının mikroyapısı

Normal dökülen AZ91'deki tane sınırları baskın bir şekilde $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ intermetalik fazı ile çevrili olduğu için ısıtma işlemi sonucu tane sınırları kolayca görülmektedir [65].

Şekil 2.8'de AZ91 numunelerinin mikroyapıda tanelerinin resmi görülmektedir.



Şekil 2.8. AZ91 alaşımının mikroyapıda tane görünüşü

Kokil kalıba döküm numunelerinin kaba tane boyutu, basınçlı dökümün yaklaşık olarak 10 katı kadardır. Bu hızlı katılaşma hızlı soğumadan dolayı olur ve ergiyik birçok çekirdeklenme oluşturur. Ayrıca tane artışı, kalıp dolumu sırasında ince tanelerin oluşumuna katkıda bulunur. Enjekte edilmiş ergiyiğin yüksek hızı ergiyikte türbilans oluşturur. Bu türbilans, kalıp yüzeyinde henüz çekirdeklenmemiş dendritlerin kırılmasına neden olur ve sonunda tane sayısı artmaktadır. Bundan başka, kalıp boşluğu bazı döküm teknikleri ile hızlı bir şekilde doldurulduğu zaman oluşan damlacıklar yeni çekirdeklenme yüzeyleri oluşturabilmektedirler[46].

2.2.4. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Yer kabuğunda bulunan minerallerin %2'si magnezyum içermektedir. Bununla beraber deniz suyunda % 0,13 oranında magnezyum bulunmaktadır. 1 mil küp deniz suyu 6 milyon ton magnezyum içerir ve Amerikan Araştırma Enstitüsüne göre ise dünya üzerinde 330 milyon mil küp deniz suyu bulunmaktadır. Bugünkü kullanım miktarları üzerinden hesap yapıldığında, sadece İsrail'deki Ölü Deniz'de dünyaya yaklaşık 20.000 yıl yetecek kadar magnezyum vardır. Magnezyum bol miktarda bulunan bir metal olmasına rağmen az miktarlarda üretilmektedir. Yıllık

magnezyum üretimi 2006 sonu itibariyle 726.000 ton olmasına karşın alüminyum üretimi yaklaşık 33.000.000 tondur [67].

Tüm konstrüksiyon metalleri içinde en hafif olan metal magnezyumdur. Bu malzeme bir plastik kadar hafif fakat bir metal kadar da dayanıklıdır. Çelik ve çinkodan %75, alüminyumdan ise %33 daha hafif olması, birçok sektörde yapı malzemesi olarak kullanımına olanak sağlamaktadır. Magnezyum doğada en çok bulunan 8. elementtir, ayrıca alüminyum ve demirden sonra en çok bulunan yapı metalidir. Tuzlu su tortuları, tuz gölleri ve okyanusları baz alıp düşündüğümüzde ise magnezyum büyük bir farkla en çok bulunan metal haline gelir [68].

Magnezyum metalinin saf halde kullanılması çoğu diğer metallerde olduğu gibi dayanımının düşük olmasından dolayı mümkün değildir. Bu durum, değişik alaşımların üretilmesini gerektirmiştir. Mg alaşımlarının da en önemli özelliği hafifliktir. Bu açıdan bazı Mg alaşımlarının özgül çekme dayanımı, Al ve çeliğin özgül çekme dayanımından daha büyüktür. Bundan dolayı bugün elektronik, savunma, havacılık ve uzay sanayinde yaygın olarak Mg alaşımları kullanılmaktadır [69].

Magnezyumun $1,74 \text{ g/cm}^3$ 'lük yoğunluğu ve 650°C 'lik ergime sıcaklığı, çelik ve alüminyum gibi diğer konstrüksiyon metallerine göre dökümde ve talaşlı imalatta önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Örneğin magnezyum metalini alüminyumdan iki kat daha hızlı dökülebilmekte ve işlenebilmektedir. Magnezyumun düşük yoğunluğundan kaynaklanan düşük eylemsizliği, hızlı hareket eden parçalar için bir avantajdır. Hafiflik aynı zamanda, imalat sırasında parçanın daha kolay taşınması ve bitmiş ürünün daha ucuza sevk edilmesi demektir [70].

Magnezyum uygun karakteristikleri sayesinde birçok sektörde kullanılabilir bir metaldir. Özellikle otomotiv ve havacılık sektöründe hafifliği dolayısıyla tercih edilmektedir. Ancak bu koşulların sağlanabilmesi kolay olmamış, alüminyuma göre daha pahalı olmasından dolayı magnezyumun kabul görmesi uzun zaman almıştır.

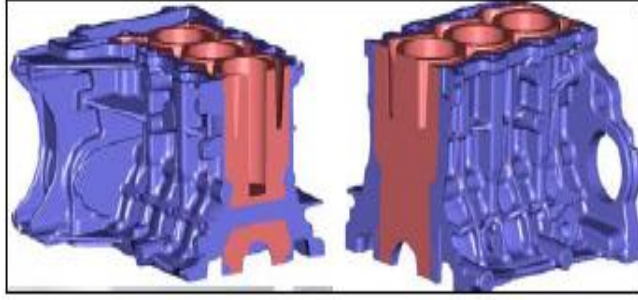
Düşen maliyetler neticesinde magnezyumda endüstride kendine yer bulmaya başlamıştır [71].

Otomotiv ve uzay-uçak sanayilerindeki ağırlık tasarrufuna yönelik arayışlarda Mg metali düşük yoğunluğu ile mühendislik uygulamaları açısından en hafif yapısal metal olarak ön plana çıkar. Günümüzde de Mg alaşımlarına olan en büyük ilgi otomotiv sektöründen gelmektedir. Bunun başlıca nedeni, hafif Mg alaşımlarının kullanımı ile araç ağırlığında yapılan azalmanın yakıt ekonomisi sağlaması ve bunun sonucu olarak gaz emisyonlarının da azaltılabilecek olmasıdır. Özellikle otomotivde hafif metalik malzemelere yönelik sadece günümüzün otomobilleri ile ilgili değildir. Güneş enerjisi, elektrik veya hidrojen gibi alternatif enerji kaynakları ile çalışacağı öngörülen geleceğin otomobillerinde hafiflik bugünküne kıyasla çok daha önemli bir gereksinimdir. Önümüzdeki yıllarda binek otomobillerde ulaşılması planlanan yakıt tüketimi 3 litre/100 Km gibi zorlu bir hedeftir ve bunun için otomobil ağırlığında yaklaşık %30'luk bir azalma gerekmektedir [72].

Mg'un Al ve çelikle karşılaştırıldığında yüksek fiyatlı olmasına rağmen, net şekle yakın döküm parçalar üretildiğinden otomobillerde kullanımı giderek artmaktadır. 2011 yılına kadar Mg alaşımlarının otomotiv ve elektronik endüstrisinde kullanımı %350 artması beklenmektedir [73].

Mg-Al-Zn (AZ91) alaşımları, çoğunlukla otomobil parçalarının dökümü için kullanılır. Diğer Mg alaşımlarıyla karşılaştırıldığında; AZ91 Mg alaşımı daha iyi döküm, daha iyi akma dayanımı özellikleri göstermektedir.

Mg döküm alaşımlarının gelecekte daha geniş kapsamlı kullanılabilmesine dair en iyi örneklerden biri de BMW firmasının yeni ürettiği Mg-Al kompozit motor bloğudur. Bu, Mg alaşımlarının yüksek sıcaklık motor uygulamasındaki ilk kullanımındır [74]. Şekil 2.9'de kesik halde Mg-Al motor bloğu görülmektedir.



Şekil 2.9. Kesik halde Mg-Al kompozit motor bloğu

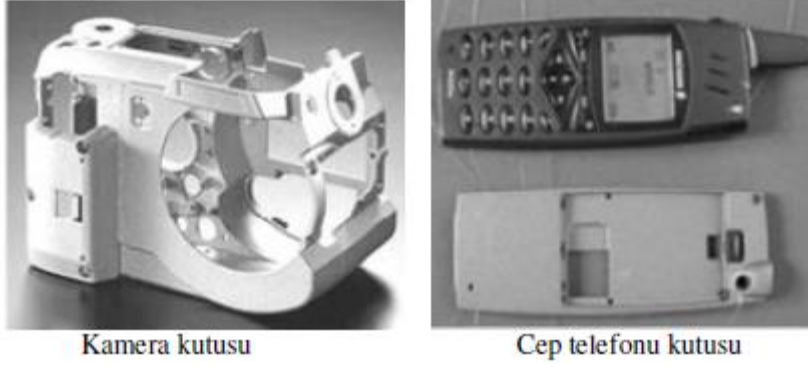
Mg-Al-Mn esaslı alaşımlar (AM20, AM50, AM60) iyi uzama ve darbe dayanımlarına sahiptirler [76]. Toprak elementleri içeren AS41, AS21 (Mg-Al-Si-Mn) ve AE42 (Mg-Al-Re) alaşımları artan sıklıkla, Mg-Al-Mn ve Mg-Al-Zn-Mn alaşımlarından daha yüksek sürünme dayanımıyla karakterize edilen aktarma parçaları imali için kullanılır [77].

AZ serisi alaşımlar otomobil, havacılık, bilgisayar, kamera ve mobil telefonlarda kullanılır. Şekil 2.10'de AZ91 alaşımından üretilmiş döküm parçalar görülmektedir [78].



Şekil 2.10. AZ91 alaşımı döküm parçaları

Şekil 2.11'de Li esaslı mg alaşımından dökülmüş kamera ve cep telefon kutusu görülmektedir.



Şekil 2.11. Li katkılı Mg alaşımı döküm parçaları

Mg alaşımlarından AM serisi alaşımlar yüksek toklukları ve enerji absorblama özellikleri bakımından özellikle direksiyon, tekerlek, otomobil koltuk iskeleti yapımında kullanılır [79]. Şekil 2.12’de AM alaşımından dökülmüş parçalar görülmektedir [79-82].



Şekil 2.12. AM alaşımı döküm parçaları

2.2.4.1. Havacılıkta magnezyum

Hava aracı sistemleri yapılarının üretiminde kullanılan metallerde istenilen temel özellikler; hafiflik, dayanıklılık ve korozyona karşı dirençtir. Ayrıca bazı özel kullanım alanları için metallerin diğer özellikleri de önemlidir. Hava aracı sistemleri yapılarının üretiminde yaygınla kullanılan metallere; Alüminyum, Çelik, Titanyum, Magnezyum ve Bakırdır. Özel ihtiyaçların, düşük mukavemetleri nedeniyle saf metallere karşılanması neredeyse olanaksız hale gelmiştir. Bu durumda yapısal olarak daha kullanışlı malzemeler elde etmek için alaşımlar geliştirilmiştir. Alaşımlar çoğunlukla metaller arası bileşikler halindedir. Buna karşılık bazı alaşımlar metal olmayan elementlerin de yer aldığı bileşikler şeklinde olabilmektedir. Magnezyumun havacılık sektöründeki durumu şu şekildedir:

- Mukavemet, hafif ağırlık, şok ve titreşim dirençleri
- Yanıcı olması ve kolayca korozyona uğraması dezavantajdır.
- Buna karşılık magnezyumun ağırlığı, aynı hacimdeki alüminyumun ağırlığının üçte ikisi kadar, demirinkinin beşte biri kadardır.
- Yüzeyine herhangi bir koruyucu kaplama uygulanmamış magnezyum alaşımları koroziv bir ortamda beyaz renkte kümecikler veya noktalar şeklinde korozyona uğramaktadırlar.
- Magnezyum alaşımlarının yüzeylerinde oluşan oksit-karbonat filmi koroziv olmayan ortamlarda dahi yeteri derecede korozyondan korunma sağlayamamaktadır.
- Bu alaşımların korozyonu uygun koruyucu kaplama uygulandığında önemli ölçüde azaltılır.

Havacılık malzemesi üretiminde kullanılan malzemeler seçilirken çalışma özelliğine göre metal seçimi yapılır. Özellikle koroziv ortamda çalışan parçaların üretimi esnasında korozyona daha az meyilli metal veya alaşımların kullanılması gerekmektedir [83].

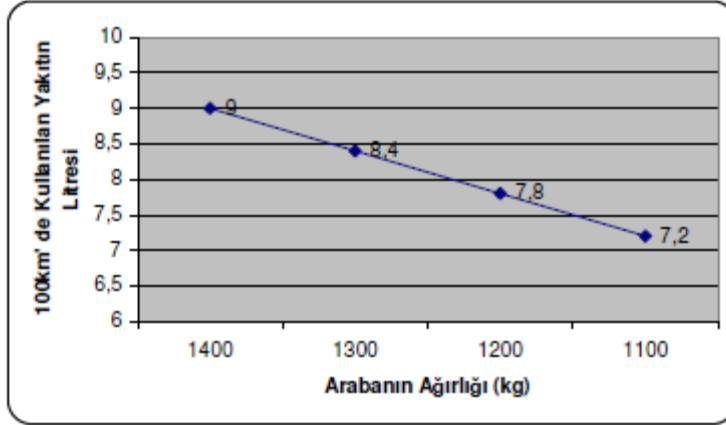
2.2.4.2. Otomotiv sektöründe magnezyum

Otomobil üreticileri de üstün ve tercih edilebilir özelliklerinden dolayı magnezyum alaşımlı parçalar üretmeye başlamışlardır. BMW firması AZ91 alaşımlı motor bloğu üretmiş ve ticari olarak kullanıma başlamıştır. R6 adını verdikleri motorda, krank kutusu, kam kapağı magnezyum ve alüminyum alaşımlı magnezyumdan imal edilmiş olup, emsal motora göre 10 kg daha hafiflik sağlamaktadır [83]. Sektörde sık olarak kullanılan alaşımlar ve özellikleri çizelge 2.12’de verilmiştir.

Çizelge 2.12. Otomotiv sektöründe kullanılan magnezyum alaşımlarının özellikleri

ALAŞIM	AZ91D	AM50A	AM60B	
Alüminyum (%)	8,5-9,5	4,5-5,3	5,6-6,4	
Manganez (%)	0,17-0,3	0,28-0,50	0,26-0,50	
Çinko (Zn) (%)	0,45-0,9	0,20 max	0,20 max	
Silikon (%)	0,05 max	0,05max	0,05max	
Bakır (%)	0,025 max	0,008max	0,008max	
Nikel (%)	0,001 max	0,001max	0,001max	
Demir (%)	0,004 max	0,004max	0,004max	
Berilyum (%)	0,0005-0,0015	0,0005-0,0015	0,0005-0,0015	
Diğer (%)	0,01max	0,01max	0,01max	
FİZİKSEL ÖZELLİKLER				
Yoğunluk ($\text{kg/m}^3 \times 10^3$)	1,81	1,79	1,78	
Termal Genleşme Sabiti $\mu\text{m/m}^\circ\text{K}$	25	26	25,625	
Isıl İletkenlik ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	72	62	62	
Özgül Isı ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	1050	1050	1050	
Rijitlik Modülü (Kayma ve burulma 10^6 psi)	2,4	-	-	
Elastite Modülü (GPa)	45	45	45	
Ergime oranı ($^\circ\text{C}$)	470-595	543-620	540-615	
Brinell Sertliği (100mm bilya, 500 kgf yük)	75	57	62	
Ortam Sıcaklığında	ÇEKME ÖZELLİKLERİ			
	%0,2 Akma Mukavemeti (MPa)	150	120	130
	Kopma Mukavemeti (MPa)	230	220	220
	% Uzama	3	6-10	6-8
	BASMA ÖZELLİKLERİ			
	%0,1 Akma Mukavemeti (MPa)	165	-	130
	Kopma Mukavemeti (MPa)	400	-	-
	KAYMA ÖZELLİKLERİ			
	Kayma Mukavemeti (MPa)	140	-	-
	DARBE ÖZELLİKLERİ			
	1/4" Çentiksiz Charpy (j)	2,2	9,5	6,1
	YORULMA ÖZELLİKLERİ			
	Dönel Eğme Testi (5×10^7 devir)	70	70	70

Şekil 2.13’de görüldüğü gibi günümüzde kullanılan orta üst sınıftaki bir sedan arabada hafif malzemelerin kullanımıyla yakıttan elde edilen tasarruf 100km. de 0,6 litredir. Dolayısıyla emisyonunda da % 20’ lik bir azalma olacaktır.



Şekil 2.13. Araç ağırlığındaki azalmayla elde edilecek yakıt tasarrufu

Günümüzde magnezyum alaşımlarının otomotiv sektöründe kullanıma girdiği veya potansiyel kullanım alanı olarak görülebilecek iki ana grup vardır. Bunlardan birincisi magnezyum alaşımlarının halen kabul gördüğü yapısal elemanlar olup (şase elemanları, dahili parçalar ve kaporta elemanları); bu uygulamalarda magnezyum alaşımları mukavemet, süneklik, yorulma ve darbe dirençlerinin yeterli olmaları nedeniyle iş görebilirler. Örnek olarak koltuk iskeleti, direksiyon ve direksiyon kolunu bileşenleri, ayna yuvaları, jantlar, süspansiyon kolları, iç konsol, bagaj kapağı, gösterge paneli, fren ve debriyaj pedalları verilebilir.

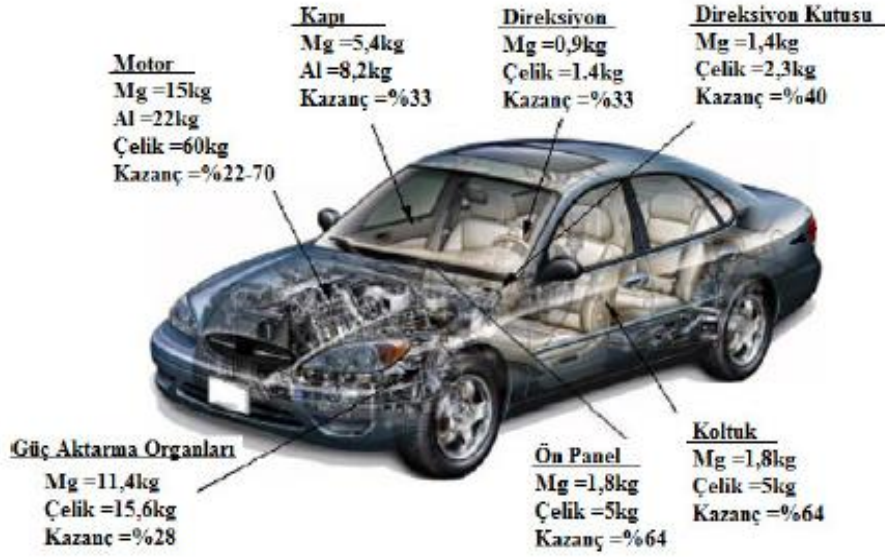
İkinci bir grup uygulama da, motor grubu ve transmisyon komponentlerinden oluşur. Birinci grubun özelliklerinin yanında, yüksek sıcaklıklar için sürünme ve korozyon dayanımı da gerektiren bu parçaların mevcut uygulamaları olmasına rağmen, alaşımları da gelişme sürecine devam etmektedir [63].

Otomobillerde magnezyumun kullanıldığı diğer parçaları listelersek:

- Tekerlekler

- ABS fren destek ve tutma braketi
- Geçme hava yastığı tutucuları
- Debriyaj gövdesi
- Koltuk yükselticisi
- Koltuk kızıakları
- Orta konsol
- Kapı içi koruyucu kirişler
- Tekerlek göbeği
- İç kapı kolları
- Kol dayama yerleri
- Kapı kilidi gövdeleri
- Motor destek braketleri
- Endüksiyon sistemi yuvası
- Karter taban kısmı
- Silindir kapağı
- Yanma odaları
- Gösterge paneli destek kirişi
- Şanzıman gövdesi
- Emme manifoldu
- Far mesnedi
- Açılır tavan iskeleti
- Ventil
- Hava filtresi
- Soğutma peteği
- Araç ön paneli
- Travers
- Kaporta

Şekil 2.14’de otomobil parçalarında Mg alaşımının kullanımı gösterilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü üzere Mg alaşımları otomobillerin hemen her kısmında kullanılmaktadır.



Şekil 2.14. Otomobil parçalarında Mg alaşımının kullanımı

Magnezyum alaşımlarından üretilmiş çeşitli parçalar araç ve alaşımları çizelge 2.13’de görülmektedir.

Çizelge 2.13. Magnezyum alaşımlarından üretilmiş çeşitli parçalar

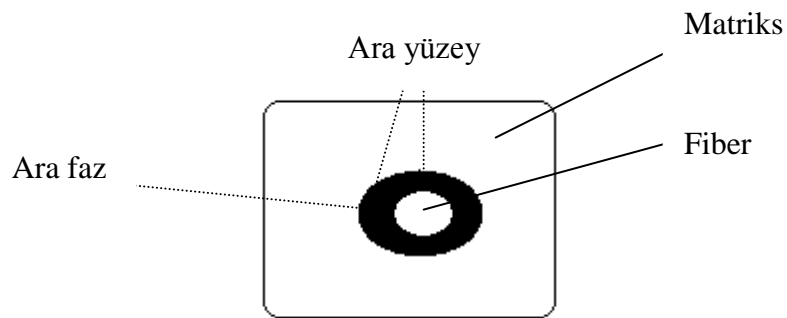
Şirket	Parça	Araç	Alaşım
Ford	Debriyaj yuvaları, yağ karteri, direksiyon kolonu	Ranger	AZ91HP
	Manuel transmisyon kutusu gövdesi	Bronco	AZ91D
General Motors	Valf kapakları, hava filtresi, debriyaj pedalı	Corvette	AZ91HP
	Fren pedalı, debriyaj pedalı	Pontiac	AZ91D
	Direksiyon kolonu braketleri	Pontiac	AZ91D
Chrysler	Destek braketleri, Yağ karteri	Jeep	
	Direksiyon kolonu	LH	
	Destek braketleri, Yağ karteri	Viper	
Mercedes-Benz	Koltuk iskeleti	500 SL	AM20/50
Alfa-Romeo	Çeşitli bileşenler (45kg)	GTV	AZ91B
Porsche AG	Çeşitli bileşenler (53kg)	911	AZ91D
	Tekerlekler (7,44kg)	944 Turbo	
Honda	Silindir Kapakları	City	AZ91D
	Tekerlekler (5,9kg)	Prelude	AM60B
Toyota	Direksiyon simidi	Lexus	AM60B
	Silindir bloğu, yağ pompası, kam mili kapağı	Quad 4	ZE41A

2.3. KOMPOZİT MALZEMELER

2.3.1. Tanım

Kompozit malzemeler, şekil ve/veya kimyasal bileşimleri farklı, birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla sayıda makro bileşenin kombinasyonundan oluşan malzemeler olarak tanımlanabilir [85].

Kompozit malzemeler en az iki yapı bileşeninden meydana geldiği için bileşenler arasında sınır oluşturan bir ara yüzey mevcuttur. Bu ara yüzey monolitik malzemelerdeki tane sınırlarına özdeştir. Bazı kompozitler de yapı bileşenleri arasında ara faz olarak adlandırılan ayrı bir bölge görülebilir. Plastiklerin pekiştirilmesinde kullanılan cam fiberler üzerine uygulanan kaplama malzemeleri bir ara faz olarak kabul edilebilir. Bu ara faz cam fiberlerle ve plastik matriksle ayrı ayrı birer ara yüzey oluşturur (Şekil 2.15). Ara fazı meydana getiren sadece kaplama tabakaları değildir. Yapı bileşenlerinin birbiri içerisinde düşük oranlarda çözünmeleri sonucu ortaya çıkan katı eriyik bölgeleri veya bileşenleri arasındaki reaksiyonla oluşan kimyasal bileşenler birer ara fazdır [85].



Şekil 2.15. Fiber takviyeli kompozitlerin enine kesitinde arafaz ve ara-yüzeylerin görünümü

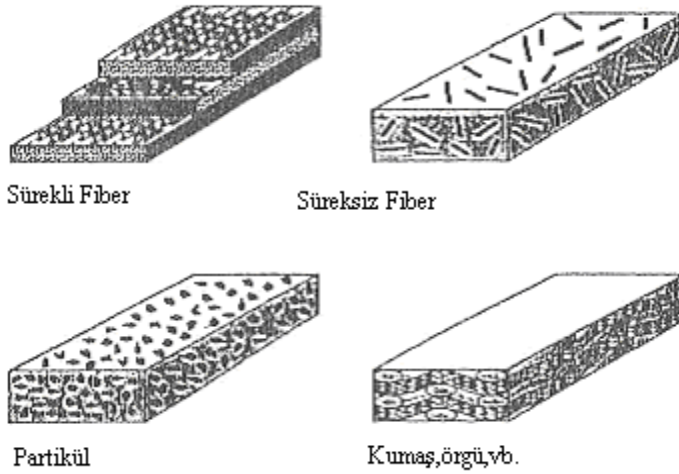
Kompozitler sadece kendi yapısal özellikleri için değil, aynı zamanda elektriksel, termal, tribolojik ve çevresel uygulamalar için de kullanılmaktadır. Modern kompozit malzemeler genellikle verilen bir uygulama alanında, belirli bir özellik dengesine ulaşmak için en iyi şekilde kullanılır. Genel bir pratik ifade olarak kompozit malzemeler, bir arada bulunan sürekli bir matris bileşeni içeren ve daha güçlü, kuvvetli bir takviye fazı bileşenlerinden oluşan malzemelerin önemini belirtmek için sınırlandırılabilir. Sonuçta kompozit malzeme, diğer malzeme bileşenleri ile tek başına daha üstün bir yapısal özellikler dengesine sahiptir [86].

2.3.2. Metal Matrisli Kompozitler

40 yılı geçkindir, malzeme dizaynında kullanım kolaylığı, düşük yoğunluk, düşük maliyet, kalite ve performans gibi özelliklerin öne çıkması ile bu duruma paralel olarak metal matrisli malzemelerin gelişmesinde enteresan bir büyüme gözlenmiştir [87]. Metal matrisli kompozitler genelde iki bileşenden meydana gelmektedirler. Bunlardan biri metal matris (genelde bir metal alaşımıdır), diğeri ise takviye malzemesidir (genel olarak bir metaller arası bileşik, bir oksit, bir karbür veya bir nitrit). Metal matrisli kompozitlerin iki veya daha fazla sayıdaki fazlardan ayrılışı kompozit oluşmasından dolayıdır. Kompozitin üretilmesinde matris ve takviye malzemesi beraber karıştırılırlar. Bir kompoziti elde etmek için başlangıçta farklı komponentler seçilir. Genelde matris bir metal veya metal bir alaşımdır.

Sınıflandırmanın ikinci kısmı takviye fazı çeşidine bağlı olarak yapılır:

- Fiber takviyeli kompozit malzemeler,
- Partikül takviyeli kompozit malzemeler,
- Tabakalı kompozit malzemelerdir [86].



Şekil 2.16. Fiber takviye fazlarının yaygın çeşitleri.

Genel olarak takviye fazları düz sürekli fiber, süreksiz veya kısa (parçalanmış) fiberler, partikül veya ince tabakalar, yada dokuma veya örülmüş sürekli fiberler olabilir

Metal matriksli kompozit (MMK) malzemeler üzerindeki çalışmalar son yıllarda özellikle gelişmiş ülkelerde doruk noktasına ulaşmıştır. Önemli oranda yüksek özelliklerinden dolayı alüminyum alaşımlarının seramik partiküllerle takviyesi mühendislik malzemeleri uygulamalarında önemini göstermiş durumdadır [88]. Özellikle otomotiv sektöründe ticari olarak MMK malzemeler 20 yıla yakındır kullanılmakta ve bunun nedeni de spesifik sertlik, aşınma ve yorulma dirençlerinin arttırılabilmesidir [91]. Yeni yöntemlerle ucuz ve kaliteli takviye elemanlarının elde edilebilir olması, ekonomik olarak konvansiyonel malzemelere alternatif olabilecek yeni MMK'lerin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır [90]. Bu nedenle yoğun araştırma ve geliştirme çalışmalarına hedef olan bu tür kompozitlerin ülkemiz şartları da göz önüne alınarak, endüstriyel uygulamalarda kullanımının arttırılması arzu edilmektedir. Çizelge 2.14. de Alüminyum bazlı metal matrisli kompozit malzemelerin endüstriyel anlamda hedefleri verilmiştir.

Çizelge 2.14. Alüminyum metal matrisli kompozit endüstrisinin hedefleri

Kriterler	Hedef
Maliyet	<ol style="list-style-type: none">1. Alüminyum bazlı metal maltrisli kompozitlerin maliyetinin %25 indirilmesi.2. Alüminyum bazlı MMK lerin döküm proseslerinin %25 e kadar indirilmesi.3. Metal işleme proseslerinin (haddeleme, ekstrizyon gibi) %50 e kadar maliyetinin düşürülmesi.4. Alüminyum bazlı MMK malzemelerinin işlenmesinde %50 e kadar maliyetinin düşürülmesi.
Altyapı	<ol style="list-style-type: none">1. Malzeme dizaynı için malzeme-özellik veri tabanının oluşturulması.2. Alüminyum bazlı MMK malzeme tasarımcıları için el kitabı geliştirmek.3. Alüminyum MMK malzeme üretim kapasitesini 2005 de 10x ve 2010 da 25x arttırmak.
Pazar	
Otomotiv	<ol style="list-style-type: none">1. İçten yanmalı makine bileşenlerinden çelik ve dökme demirin yerini alması.2. Yüksek sertlik uygulamaları için alüminyum MMK malzemelerin düşük maliyette geliştirilmesi.
Uzay	<ol style="list-style-type: none">1. Dayanıklılığın ve hasarlanma toleransının 2 kat artmasıyla alüminyum bazlı kompozitlerin pazarının genişlemesi.2. Uzay uygulamalarında alternatif malzemeler olması.
Endüstriyel/Ticari Ürünler	<ol style="list-style-type: none">1. Yüksek performans ürünleri için alternatif malzemeler olması2. Aşınma direncinin iyi olmasından dolayı çelik ve dökme demirlerin yerini almak.

Partikül kompozitler, bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya mikroskobik partiküllerin matris fazı ile oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Partikül takviyeli kompozitleri diğer kompozitlerden ayıran (örneğin; fiber) karakteristik özellikleri partiküllerin matris içerisinde tamamen rastgele dağılması ve bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermesidir. Partikül takviyeli kompozitler sermetler ve dispersiyonla sertleştirilmiş alaşımlar şeklinde iki grup içinde toplanabilir. Sermetler, seramik ve metal fazlarının karışımından oluşurlar. Seramikler genel olarak yüksek sıcaklık dirençleri, yüksek ergime sıcaklıkları, ısıl kararlılıkları ve elastik davranışları ile

karakterize edilirler. Dispersiyonla sertleştirme de prensip ise, sert, inert ve refrakter karakterli birkaç mikron boyutundaki partikülleri sünek bir yapı içerisinde homojen bir şekilde dağıtmaktır. Disperse faz olarak genellikle yüksek ergime sıcaklıkları, ısı kararlılıkları ve metalik sistemler de düşük çözünürlükleri nedeniyle oksitler kullanılır. Dispersiyonla sertleştirilmiş alaşımların üretiminde karşılaşılan bazı güçlükler nedeniyle endüstriyel olarak üretilen sistemlerin sayısı sınırlıdır. Al_2O_3 dispersiyonu ile sertleştirilmiş alüminyum ve ThO_2 dispersiyonu ile sertleştirilmiş nikel alaşımı bu tür kompozitlere örnek gösterilebilir [91].

MMK malzemelerin mekanik özelliklerinin tanımlanabilmesi için bir çok model geliştirilmiş olmasına rağmen, partikül takviyeli kompozit malzemelerin özelliklerine uygun model sayısı azdır. Ancak bu konu üzerine yapılan bazı çalışmalar, metal-seramik partikül kompozit malzemelerin fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerini karakterize etmiştir [93].

Partikül takviyeli ve alüminyum matriksli kompozit malzemeler üzerine ilk detaylı inceleme McDanel's tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada SiC partiküller %60 hacim oranına kadar farklı bileşimdeki alüminyum alaşımlarına ilave edilmiş ve hacim oranına bağlı olarak akma ve çekme mukavemetlerinin arttığı belirtilmiştir [89]. Partikül takviyeli MMK'lerin mukavemeti üzerinde rol oynayan en önemli faktör partikül hacim oranıdır. Partikül boyutu da birinci derecede etkili olmamasına rağmen önemlidir. Ayrıca, matrikste oluşacak çökelti partikülleride kompozitin mukavemetine katkıda bulunmaktadır.

Metal matriksli kompozitlerin üretilmesinde çok değişik sayıda üretim metodu geliştirilmiş olmasına rağmen bu üretim yöntemlerini; (i) toz metalürjisi, (ii) difüzyon, (iii) ekstrüzyon ve çekme ve (iv) döküm yöntemleri olarak dört ana gruba ayırmak mümkündür. Metal matriksli kompozitler yeni ve ucuz üretim tekniklerinin bulunması ile doğru orantılı olarak uygulamaya aktarılabilmektedirler. Bu sebepten son yıllarda en ucuz ve en kolay üretim metotlarından olan döküm ile kompozit üretiminin olanakları araştırılmaktadır.

Metal matrisli kompozitlerin üretimi için en çok tercih edilen döküm metotları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Sıkıştırma döküm .
- Kompozit döküm .
- Atomizasyon ve gaz enjeksiyonu.
- Basınçlı infiltrasyon.
- Pelet metodu.
- Vorteks metodu.
- Santrifüj yöntemi .
- Ultrasonik titreşim.
- Metalik köpük yöntemi.
- Yönlenmiş katılma [94].

Metal matriksli kompozitler, partikül, tabaka, whisker, kısa fiber ve sürekli düzene girmiş fiber türündeki seramik fazlarla takviye edilmiş bir metalik alaşım matriksi içeren malzemelerin farklı bir sınıfıdır [86].

2.3.3. Polimer Matriksli Kompozitler

Polimerler, metal ve seramiklere göre çok daha fazla komplekstirler. Matris olarak kullanılan polimerler ucuz ve kolaylıkla çalışabilen malzemelerdir. Diğer taraftan düşük modüle ve düşük kullanım sıcaklığına sahiptirler. Termoset ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılan polimer matriksler genellikle sürekli fiberlerle kullanılırlar. Bunlardan en önemli olanları sürekli fiberlerle takviye edilen poliyester, poliamidler ve epoksi reçine matrisleridir. Epoksi reçine matrisli kompozitlerin en önemli uygulamalarından biri havacılık uygulamalarıdır. F-14 ve F-15 uçaklarında dengeleyici olarak bor-epoksi kullanılmaktadır ve ayrıca sivil havacılık alanında da Boeing 757 ve 767'lerde motor kaportalarında karbon/aramid-epoksidir [93]. Polimer matrisli kompozitlerle çalışırken göz önüne alınması gereken en önemli faktörlerden ikisi, sıcaklık ve nemdir. Özellikle iki faktörün beraber etkin

olduğu şartlarda polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinde hidro termal etkilerden dolayı düşüşler meydana gelmektedir. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde en çok bilinen ve en çok kullanılan metotlardan bazıları; ele sıvama, tel sarma, kese kalıplama işlemi, pultrüzyon metodu, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termo oluşum metotlarıdır. Polimerde kullanılan takviye malzemelerinden en önemli olanları; cam fiber, kevlar fiber, boron fiber ve karbon fiberlerdir [95].

2.3.4. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik malzemeler çok sert ve kırılmandır. Bunun yanında yüksek sıcaklıklarda bile yüksek elastik özellik gösterirlerken kimyasal olarak inerttirler ve ayrıca düşük yoğunluk gibi özellik sergilerler. Seramik malzemeler termal şok direncinin düşük olduğu malzemelerdir dolayısıyla kullanımları sırasında ani hasar sergilediklerinden faciaya yol açacak özelliktedirler. Seramik malzemelerin seramik fiberlerle takviye edilmesi durumunda ani kırılmalara karşı dayanım artarken tokluklarının da artırılması amaçlanmaktadır. Bu uygulamayla monolitik seramiklere oranla tokluk 20 kata kadar artırılabilir. Seramik matrisli kompozitlerde proses parametreleri ile oynayarak mikro çatlaklar oluşturulur. Bu çatlaklar gerilme konsantrasyonlarının yoğunlaşmasını engelleyerek gerilmeleri absorbe ederler [95].

Seramik matrisli kompozitlerin üretimi iki aşamalı bir süreçtir. Birincisi takviye malzemelerinin matris içine verilmesi, ve ikincisi ise matrisin yoğunlaştırılmasıdır. Üretim metotlarının bazıları; viskoz infiltrasyon toz metalürjisi içerisinde sayılabilen tüm metotlar, kimyasal reaksiyon, sol-jel ve polimer proliz metotlarıdır [86,88-95].

2.3.5. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemeler karşısında üstün mekanik özellikler sergilemesi son yıllarda bunların üretim teknikleri üzerinde daha yoğun çalışmalar yapılmasına yol açmıştır. Fakat bu kompozitlerin üretim maliyeti hala

yüksek ve problemler mevcuttur. Kompozit üretiminde en önemli parametre takviye malzemesi ile matris malzeme arasında kuvvetli bir ara yüzey bağının oluşmasını sağlamaktır. Aksi halde matristen takviyeye yük transfer edilmez.

Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan sıvı hal ve katı hal üretim teknikleridir.

Sıvı faz üretim işlemlerinde; seramik parçacıklar farklı teknikler kullanılarak sıvı metal matris içerisinde ilave edilir. Bu karıştırma işlemi ardından şekilli veya kütük döküm işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemde matriks alaşımına bağlı olarak seramik takviye elemanlarının dikkatli bir şekilde seçimini gerektirmektedir. Matrikse uygunluğunun yanı sıra seramik olarak takviye elemanı seçiminde yüksek elastik modülü ve çekme mukavemeti, düşük yoğunluk, yüksek ergime sıcaklığı, ısı kararlılık ve maliyet gibi faktörler dikkate alınmalıdır [87].

2.3.5.1. Sıvı metal emdirmesi (İnfiltrasyon)

Sıvı metal emdirmesi tekniği, takviyeli metal matriksli kompozitlerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılan bir metottur. İnfiltrasyon yöntemi, havada inert gaz kullanılarak veya vakumlu atmosferde gerçekleştirilebilir [87]. Bu metotta prensip, önce istenilen şekilde uygun bağlayıcı kullanılarak preform (önşekil) hazırlanır. Kompozitte tasarlanan takviye hacim içeriği ve doğrultuları bu aşamada yapılır. Hazırlanan bu model kalıp içerisine yerleştirilmekte ve ergimiş metal enjekte edilerek bu mastarın ısıtılması sıvı metal emdirerek sağlanır, bu arada organik bağlar yanar ve katılaşmaya bırakılır. Emdirme işlemi, sıvı dövme döküm tekniğinde olduğu gibi basınçla gerçekleştirilebilir [91]. Sıvı hal üretiminin en önemli dezavantajı ıslatılabilirlik, istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının gerçekleşmesi, preformun yapısal bozulmasıdır [85-91].

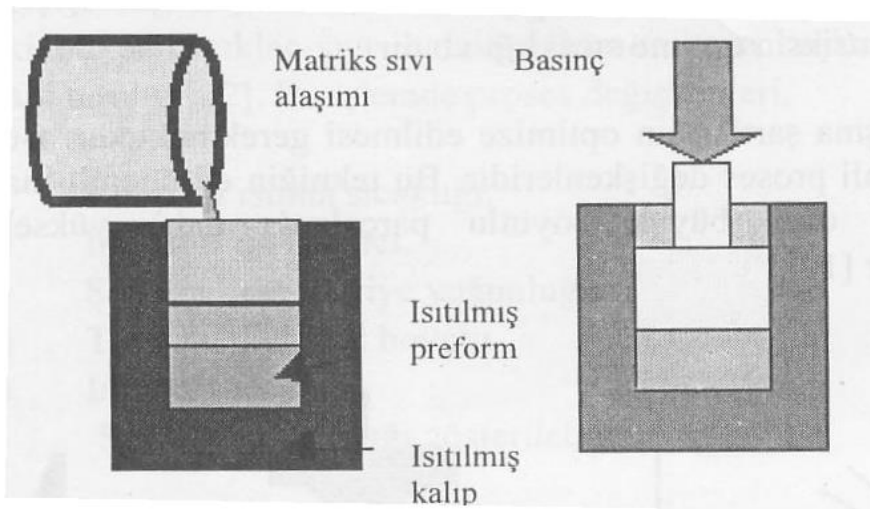
İnfiltrasyon tekniğini, kısa fiber takviyeli alüminyum alaşımları üzerinde ticari olarak ilk deneyen şirket Toyota firmasıdır. Dizel motorların silindirleri üzerinde denemiştir. Başlıca üretim yöntemi basınçlı döküm yöntemidir. Kısa fiber

alümina preformu önceden ısıtılmış kalıba yerleştirip ergimiş alüminyum alaşımını döktükten sonra basınçlı döküm hidrolik pres de gerçekleştirilir. Kompozit alüminyum pistonlar takviyesiz pistonlardan daha iyi performans sergiler [87].

2.3.5.2. Sıkıştırılmalı veya sıvı dövme döküm tekniği

Bu yöntemde takviyeden oluşturulmuş preform veya yatağa şekil 2.17 'de görüldüğü gibi sıvı alaşım hidrolik basınç altında emdirilmektedir. Sıvıyı soğutma etkisinden kaçınmak için kalıp, preform zımba ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Takviye preform veya yatağı içerisindeki hava boşlukları veya kalıp ile takviye arasındaki boşluklara zamansız sıvı penetrasyonu tehlikesini azaltmak için kalıp boşluğu içerisine sızdırmaz şekilde yerleştirilir. Her bir kompozit sistemi için paracıklar alaşımın sıvı sıcaklığını aşmayacak kritik sıcaklığa ısıtılmalıdır.

Silisyum karbür, grafit, alüminyum oksit ve paslanmaz çelik gibi takviye elemanları, ergimiş metal içerisinde gereği gibi ıslanamaz. Bu nedenle, sıvı metal emdirilmesi tekniği ile kompozit üretimi daha zordur. Fakat sıkıştırılmalı döküm tekniğinde ergimiş metalin elyaf demeti içerisine basınçla emdirme esasına dayandığından mikro boşluk önlenilebilmekte ve dolayısıyla preform içerisinde atıl gazlar dışarı atılarak daha sağlam, gözeneksiz bir yapı elde edilebilmektedir [91].



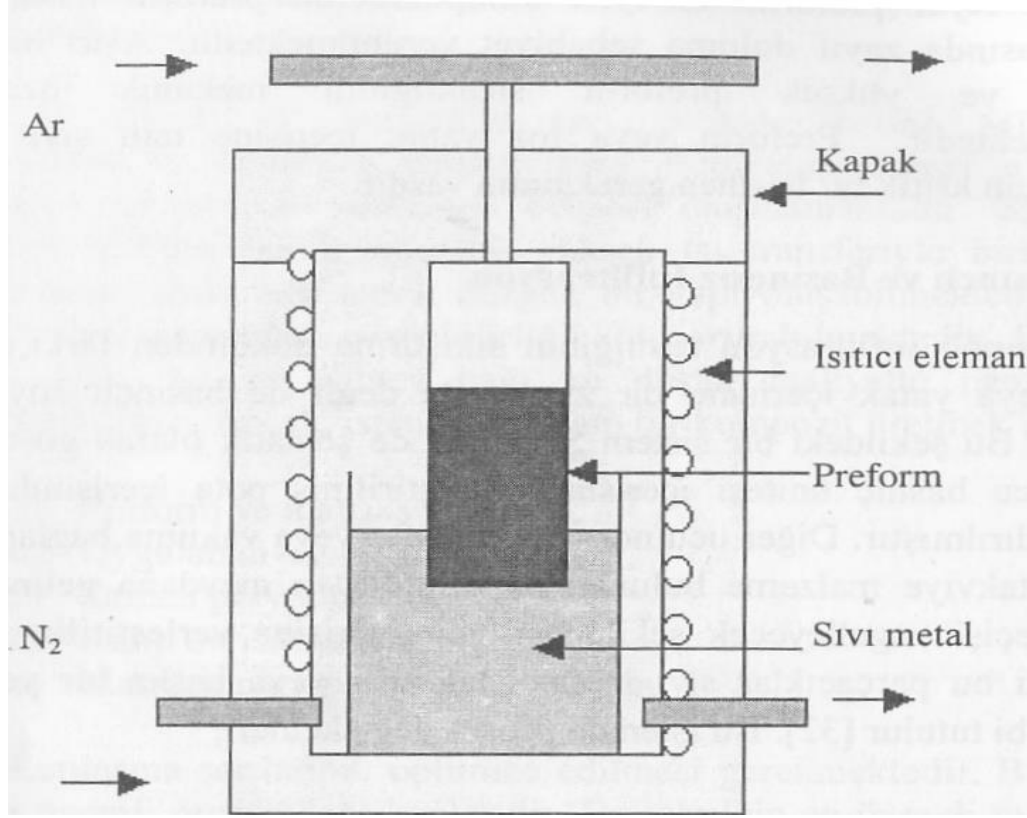
Şekil 2.17. Sıkıştırma döküm yöntemi

2.3.5.3. Basınçlı ve basınçsız infiltrasyon

Basınçlı infiltrasyon tekniğinin sıkıştırma dökümden farkı, sıvının preform veya yatak içerisine bir zımba ile değil de basınçlı soy gaz ile itilmesidir. Bu şekildeki bir sistem şekil 2.18 da şematik olarak gösterildiği gibi bir ucu basınç ünitesi içerisine yerleştirilmiş pota içerisindeki sıvı metale daldırılmıştır. Diğer ucu normal atmosfer veya vakuma bağlanmış ve içerisinde takviye malzeme bulunan bir silindirden meydana gelmektedir. Takviye geçişi engelleyecek şekilde silindir içerisine yerleştirilir. Silindir içerisindeki bu parçacıklar sıvı metale daldırılır veya başka bir yerde ön ısıtmaya tabi tutulur. Bu işlemde proses değişkenleri;

- Kalıp ön ısıtma sıcaklığı,
- İnfiltrasyon basıncı,
- Sıkıştırılmış takviye yoğunluğu,
- Takviye parçacık boyutu,
- İnfiltrasyon hızı,

Kapasitans tekniği kullanılarak gerçekleştirilen basınçlı infiltrasyon tekniğinde; toz numune içeren kuvarz tüp çevresine metal elektrot yerleştirilmiş, ve sıvı metal ile elektrot arasında bir potansiyel farkı uygulanmıştır. Sıvı metal elektrot seviyesini geçecek şekilde preform içerisine girdiği zaman silindirik bir kapasitör oluşmaktadır. Bu durumda kuvars tüp dielektrik olarak sıvı metal ise ikinci elektrot olarak görev yapmaktadır. Bu yöntemde yaklaşık % 55 hacimsel yoğunluğa sahip SiC preformun kalay ile infiltrasyonu sağlanabilmektedir.

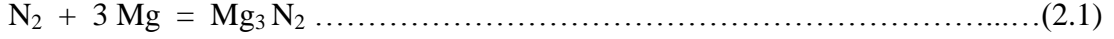


Şekil 2.18. Basıncılı infiltrasyon metodu

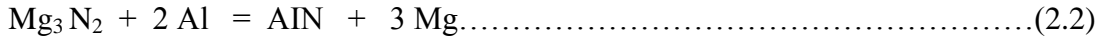
Ultrasonik infiltrasyon yönteminde ise; ultrasonik enerji ıslatabilirliğin geliştirilmesini, katı parçacıkların sıvı içerisine dağıtılmasını sağlar. Şayet alüminyum sıvısı içerisine daldırılmış olan parçacık preformu üzerine ultrasonik vibrasyon uygulanacak olursa infiltrasyon temin edilir fakat alüminyumun infiltrasyon mesafesi ultrasonik enerji yoğunluğuna bağlıdır. Sıvı emdirme proseslerinin tümünde temel mekanizma, gözenekli parçacık yatağı ve preformdaki kanallar vasıtasıyla sıvı metal ve alaşımların kılcallık etkisi ile akısıdır. Kılcallık kanununa göre sıvı bir katıyı ıslattığı zaman gözenekli bir ortam içerisine sıvının kendi kendine infiltrasyonu gerçekleşir. Aksi halde minimum bir dış basınç uygulanması gerekmektedir.

Basıncısız infiltrasyon metodunda; sıvı metalin takviye parçacık içerisine kendi kendine infiltrasyonunu sağlayan bu yöntemde paketlenmiş seramik toz yatak azot atmosferinde basınç uygulamaksızın Al-Mg alaşımının infiltrasyonu

sağlanabilir. Alaşım-seramik sistemi 800-1000°C'e kadar ısıtılmaktadır. İnfiltrasyonun gelişimini sağlayan reaksiyon denklemi;



İnfiltrasyon sırasındaki reaksiyon denklemi;



Şeklinde yazılabilir. İnfiltrasyon sıcaklığına ısıtma sırasında magnezyum buharlaşır. Takviye yüzeyini kaplayan magnezyum nitrit (Mg_3N_2) oluşturmak üzere azot atmosferi ile reaksiyona girer. Magnezyum nitrit basınç veya vakum uygulamaksızın alaşımın takviye faza infiltrasyonuna imkan sağlayan bir bileşiktir. Bu yöntemin ısıtılmış preformun sıvı içerisine daldırılarak kendi kendine infiltrasyonunun sağlandığı değişik bir uygulaması da mevcuttur.

2.3.5.4. Sıvı metal karıştırması

Bu üretim yönteminin oldukça değişik versiyonu olmakla beraber takviye malzemenin tamamıyla sıvı haldeki matriks içerisine girmesini sağlamak için bazı yaklaşımlar şöyle özetlenebilir[88]:

- Bir enjeksiyon tabancası kullanılarak sıvı içerisine taşıyıcı soygaz ile tozların enjeksiyonu
- Kalıp dolarken sıvı içerisine seramik parçacıkların ilavesi
- Mekanik hareket ile oluşturulan vorteks içerisinden parçacıkların sıvı metale ilavesi
- Sıvı içerisine matriks alaşımı ve takviye toz karışımından meydana gelen, küçük briketlerin ilavesi ve ardından karıştırılması
- Karşılıklı hareket eden çubuklar kullanılarak parçacıkların sıvı içerisine itilmesi
- Merkezkaç etki ile ince parçacıkların sıvı içerisine dağılması veya ultrasonik ile sıvı sürekli hareket halinde iken parçacıkların sıvı içerisine enjeksiyonu

- Sıfır yerçekimi prosesidir. Bu proses uzun bir zaman dilimi için çok yüksek vakum ve sıcaklıkların birlikte etkisi kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Yukarıdaki işlemlerin hepsinde metal matriks ile takviye arasındaki güçlü bağ; yüksek işlem sıcaklığı kullanımı ve yeni faz oluşturulması gereklidir. Bu nedenle de takviye fazı ile matriks arasındaki ıslatmayı geliştirmek için takviye ile etkileşim gösteren bir element ile matriksin alaşımlanması halinde başarılı olmaktadır. Doğal olarak ıslanmayan parçacıklar için ıslatmayı iyileştirici alaşım elementi ilavesi halinde veya parçacıkların ıslatılabilir bir örtü ile kaplanması gerekmektedir. Fakat bu reaksiyon kompozit üretimi veya kullanımı sırasında takviye elemanın zarar görmesine neden olmaksızın bağ oluşumunu teşvik edecek ıslatmayı sağlayacak kadar olmalıdır [91].

2.3.5.5. Yarı katı karıştırma

Bu yöntem bazen ‘Compocasting’ veya ‘Rheocasting’ olarak da anılmaktadır. Bu anılan yöntemde katı (solidus) ile sıvı (liquidus) arasındaki sıcaklığa sahip yarı katı karıştırmak suretiyle yapılan takviye ilave tekniğidir. Alaşımın sıcaklığı sıvı sıcaklığının 30 – 50 °C üzerine çıkarılıp şiddetli şekilde karıştırılarak yarı-katı aralığa kadar soğumasına müsaade edilir. Devam eden bu hareketlilik, katılaştıran dendritleri kırarak ince küresel parçacıklara dönüştürmekte ve yarı akışkan vizkozitesindeki yükselmeye de engel olur. Karıştırma devam ederken takviye ilavesi gerçekleştirilir. Nispeten düşük viskoziteye sahip karışım doğrudan basit kütük şeklinde dökülebilir ve bu durumda yöntem ise ‘Rheocasting’ adını alır. Şayet karışım sıvı sıcaklığı üzerine çıkarılıp karıştırılarak yapılırsa bu durumda da işleme ‘Compocasting’ adı verilmektedir. Fakat helisel indüksiyon karıştırıcı kullanılarak da kompozit üretim çalışmaları yapılmaktadır. Bu proses sırasında deformasyon direnci oldukça düşük olduğundan dolayı, son şekle yakın parça, ekstrüzyon ve şekil verme yöntemleri kullanılarak üretilebilir. Bu yöntemde ortaya çıkan en önemli problem karıştırma sırasında sürtünme etkisiyle fiberde hasar meydana gelmesidir [91,93-96].

2.3.5.6. Toz metalurjisi tekniği

Bu teknikte, toz halindeki metal ve seramik malzemeler birleştirilebilir. Genellikle takviye elemanı partikülleri olarak silisyum karbür, grafit, nikel, titanyum ve molibden ile matriks malzemesi olarak da metalik bakır, nikel, alüminyum, kobalt ve titanyum esaslı alaşımlar ve çelikler kullanılmaktadır. Bu metod da tozlar istenilen şekli oluşturmak için tasarlanan hacim oranlarında karıştırılıp kalıp içerisine konularak preslenir. Presleme işlemi soğuk yada sıcak olarak yapılabilmekte fakat ara yüzey bağıni iyileştirmek ve partikül kırılmasını azaltmak için sıcak preslemeden daha iyi netice elde edilebilmektedir. Elyafların yığılmadan homojen bir dağılım sağlaması için metal toz ve seramik partikül boyutu önemli olmaktadır. Örnek olarak alüminyum / silisyum karbür kompozit 0.7:1, ve 1.24:1 oranlarında üretilmiş ve kompozitin tokluğunda ilerlemeler olduğu gözlenmiştir. Ancak çok ince metal tozuyla kılcal kristalli silisyum karbürün yığılmasını önlemek ve uniform dağılımını gerçekleştirmek için sık sık sıvı çamur karışımı kullanılması gerekir. Bu karışım keza ince alüminyum tozlarıyla patlama tehlikesini azaltabilmektedir [91].

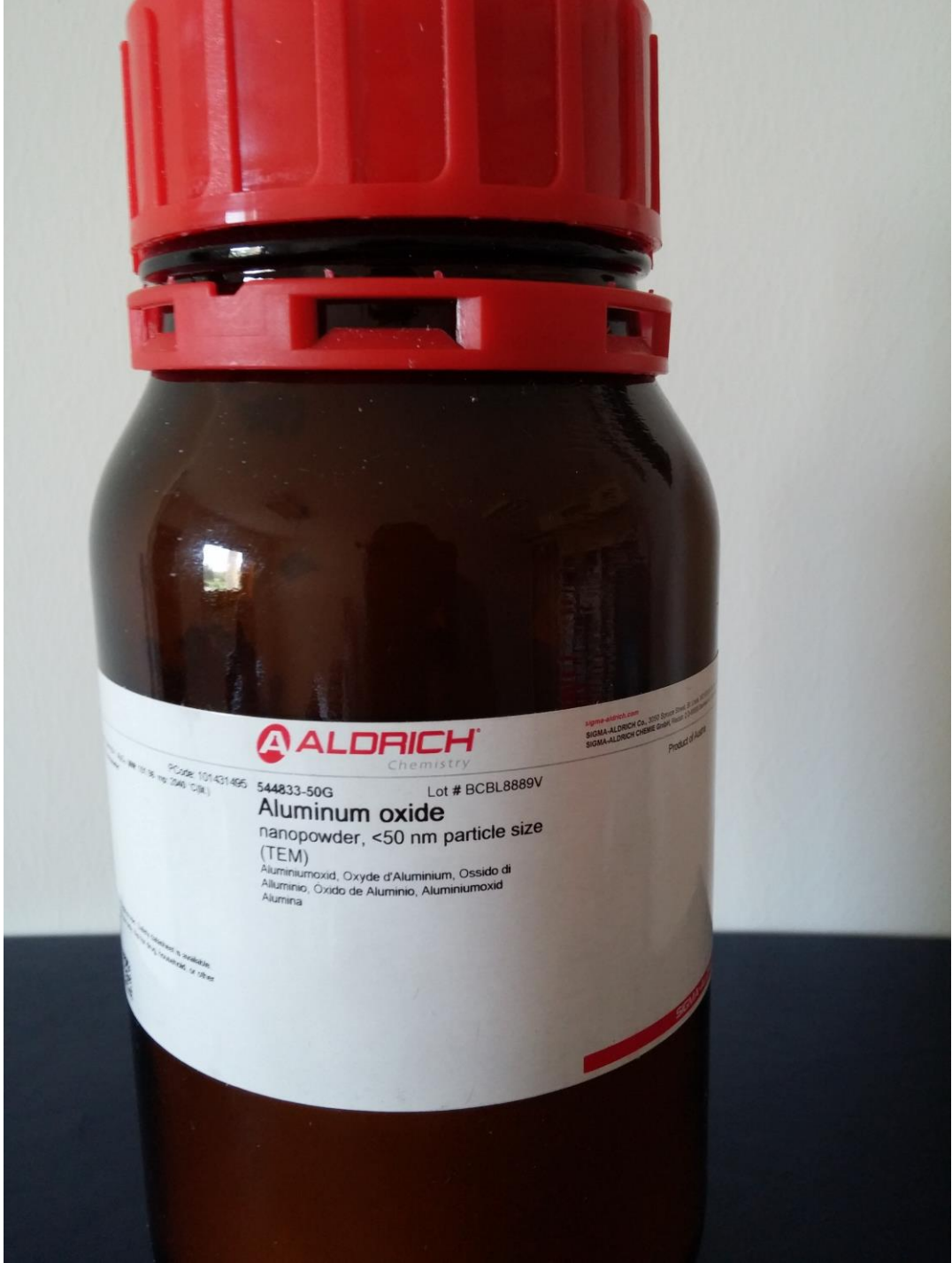
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, nanopartikül ilaveli magnezyum kompozit malzemelerin üretimleri iki kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzeme üretiminin ilk kademesinde vorteks metodu kullanılarak partiküller matriks alaşımı içerisine ilave edilmiş ve kompozit oluşumu sağlanmıştır. Matriks alaşımı olarak Mg-6Al-0.3Mn alaşımı kullanılmıştır. Matriks alaşımının ergitilmesi ve takviye ilavesi için Mersin Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği döküm laboratuvarımızda bulunan özgün olarak dizayn edilmiş 2 KW gücünde 1200 °C'ye kadar çıkabilen, koruyucu atmosfer gazı giriş ve çıkışlarının mevcut olduğu fırında magnezyum esaslı alaşım ve kompozitin üretiminde SF₆ ve CO₂ gazı kullanılarak kontrollü atmosfer oluşturulmuş, çelik potalar yardımı ile oluşturulmuş bu kontrollü atmosfer ortamında magnezyum metali ergitilmiş ve alaşım elementleri ilave edilmiştir.

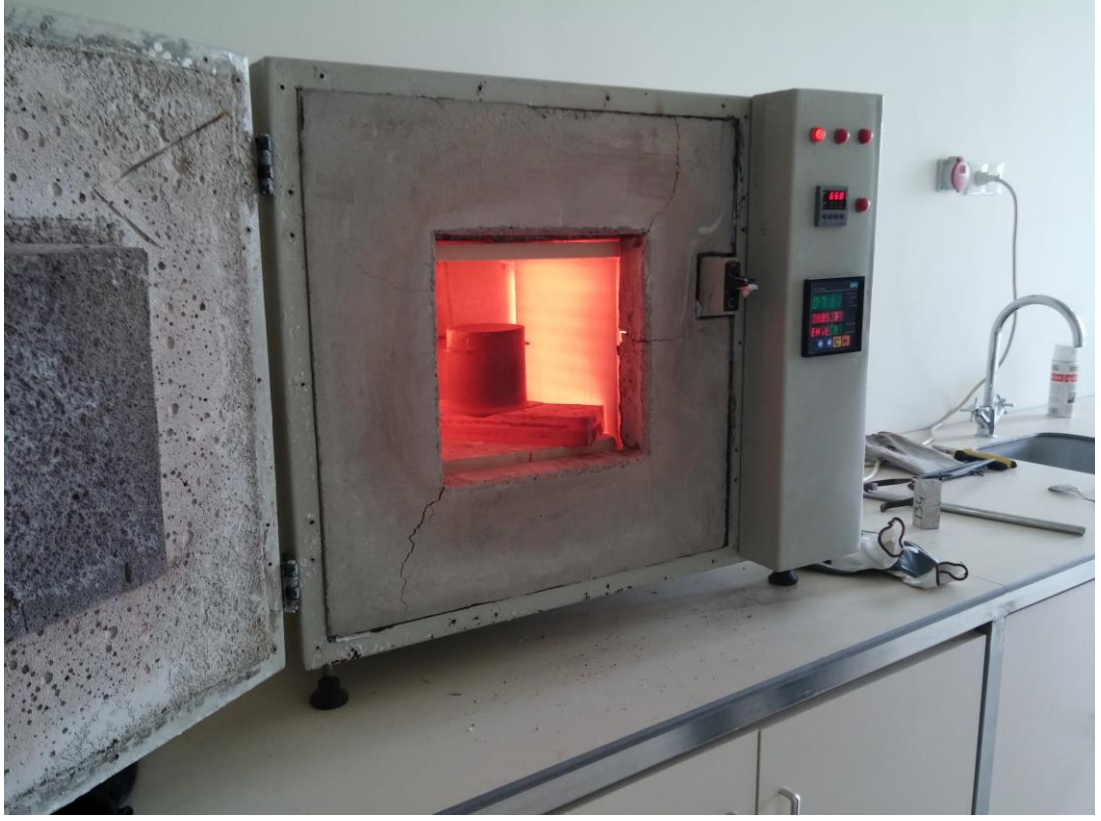


Şekil 3.1. Döküm fırını genel görünümü

Matriks alaşım oluşturulduktan ve ergitildikten sonra 850 °C’de cüruf alınarak önce 300gr. ağırlığında matriks alaşım üretilmiş ve daha sonra aynı ağırlıkta alaşım ergitilerek hacimce %0.5 nano alümina (Şekil 3.2.) ilavesi gerçekleştirilmiştir. Takviye malzemesinin 850 °C gibi yüksek sıcaklıkta ilave edilmesinin nedeni karıştırma esnasında bu sıcaklıkta arayüzeyde gerçekleşen reaksiyon sonucu $MgAl_2O_4$ oluşur ve bu reaksiyon ıslatılabilirliği artırır. Magnezyum alaşımlarını 750 °C üzerinde oksidasyondan korunmak son derece zordur. Bu nedenle nanokompozitler üretilirken koruyucu gaz karışımı olarak %2 SF_6 + %98 CO_2 kullanılmıştır. Vorteks işlemi sırasında kullanılan çelik karıştırıcı 50 mm çapındadır. Bu işlem sırasında karıştırıcı hızı ortalama 300 dev/dk’da tutulmuştur. Partikül ilave işlemi tamamlandıktan sonra sıvı alaşım 850 °C’ye çıkarılmış ve yoğunluk farkından oluşacak segragasyonu önleme için tekrar belli bir süre karıştırılarak kompozit malzemelerin üretim yönteminin ikinci kademesine geçilmiştir.



Şekil 3.2. 50 Nanometre altı alümina



Şekil 3.3. Döküm fırını

Malzemelerin katılaştırılmasında Şekil 3.4’de görülen çelik kalıp kullanılmıştır. Çelik kalıp çekme ve sertlik numuneleri çıkacak şekilde dizayn edilmiştir. Ayrıca, Şekil 3.5’de gravity döküm sonrası elde edilen malzemeler görülmektedir.



Şekil 3.4. Çelik kalıp



Şekil 3.5. Döküm sonrası malzemeleri



Şekil 3.6. Çekme deneyinde kullanılan çekme numunesi.

Üretilen malzemeler sertlik ve çekme deneyi için şekil 3.7’de görülen kesme cihazında kesilmiş ve deneyler gerçekleştirilmeden önce zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Kesme cihazı



Şekil 3.8. Zımpara ve parlatma cihazı

3.1. MEKANİK TESTLER

3.1.1. Sertlik deneyi

Üretilen alaşımların makro sertlik deneyleri 62,5/2.5/30 kombinasyonuna sahip Brinell sertlik (HB) skalasında Şekil 3.9’de görülen Brooks marka sertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm alaşım sınıflarından alınan numuneler 50x50x10mm boyutlarında hazırlanmış ve her birinden 8’er ölçüm yapıp sertlik değeri olarak bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.9. Sertlik cihazı

3.1.2. Çekme deneyi

Üretilen alaşımların çekme deneyleri ALŞA 30kN’luk çekme cihazında yapılmıştır. Her bir numunenin mukavemeti ve yüzde uzama değerlerinin hesaplanması için 2 adet numune kullanılmıştır. Çekme testleri esnasında çene hızı

0.2 mm/dakika olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.10 çekme mukavemeti deneylerinde kullanılan bilgisayarlı çekme cihazı görülmektedir.

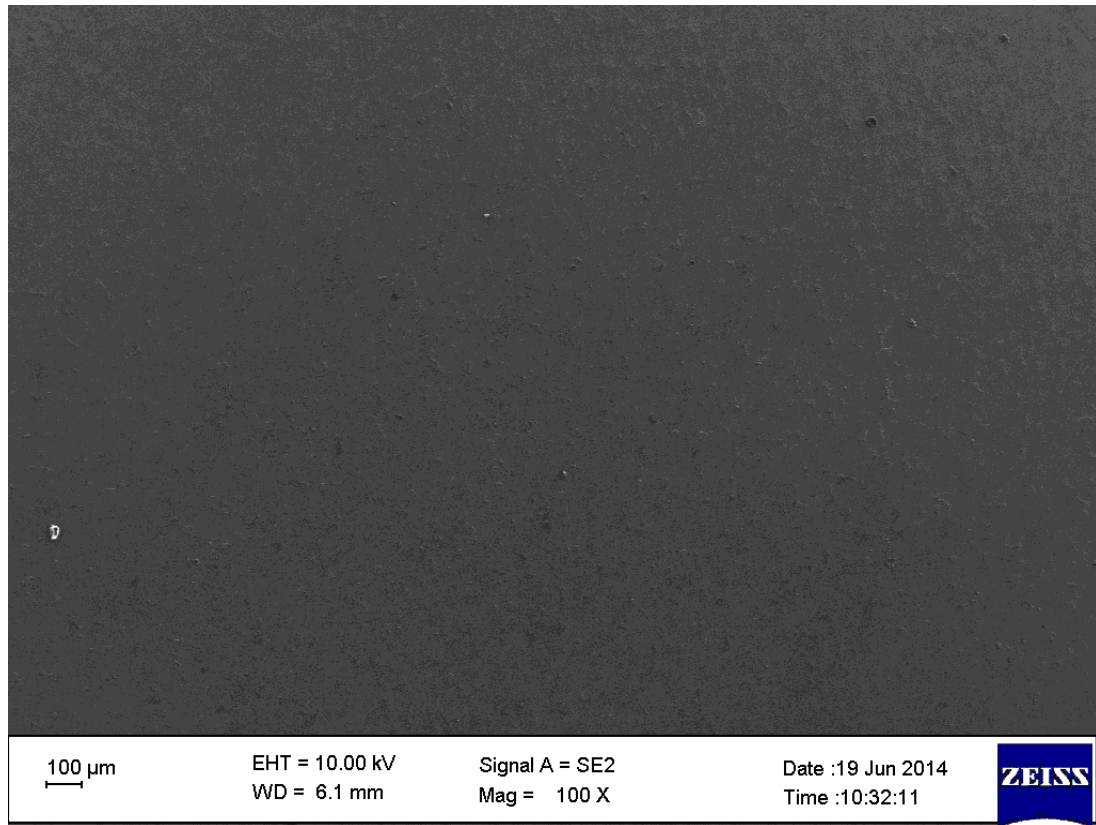


Şekil 3.10. Çekme cihazı

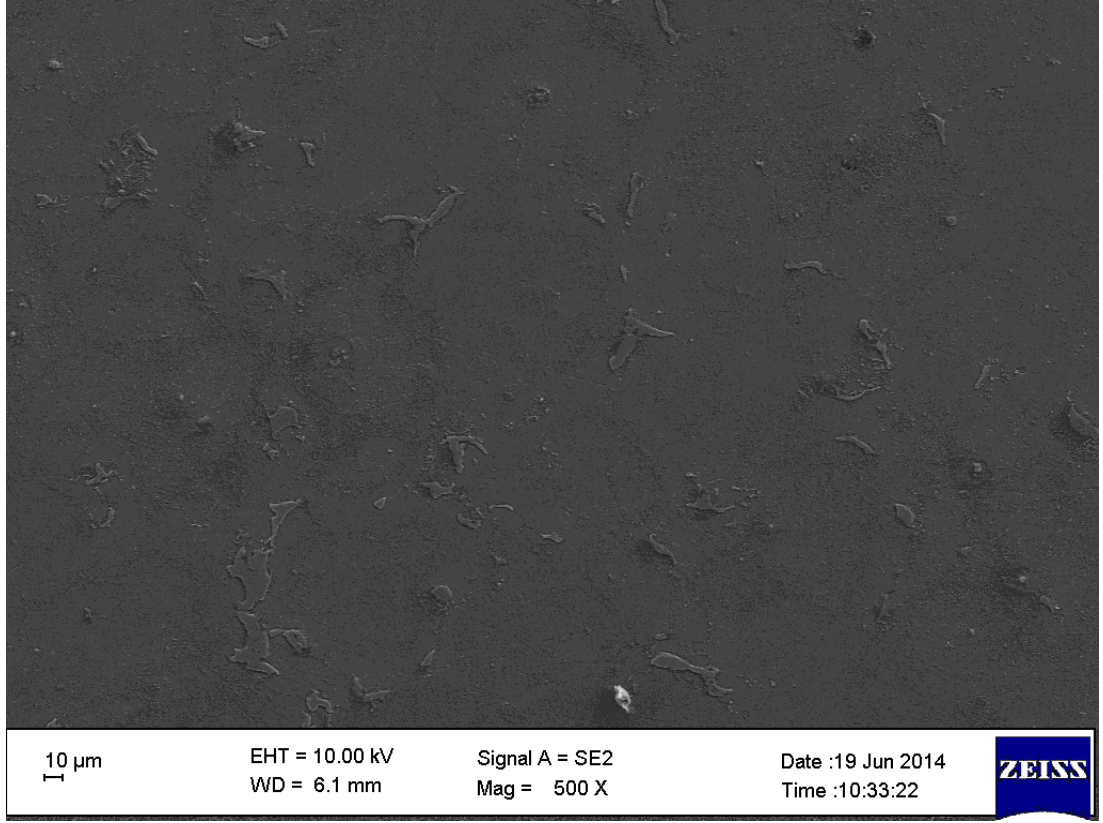
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

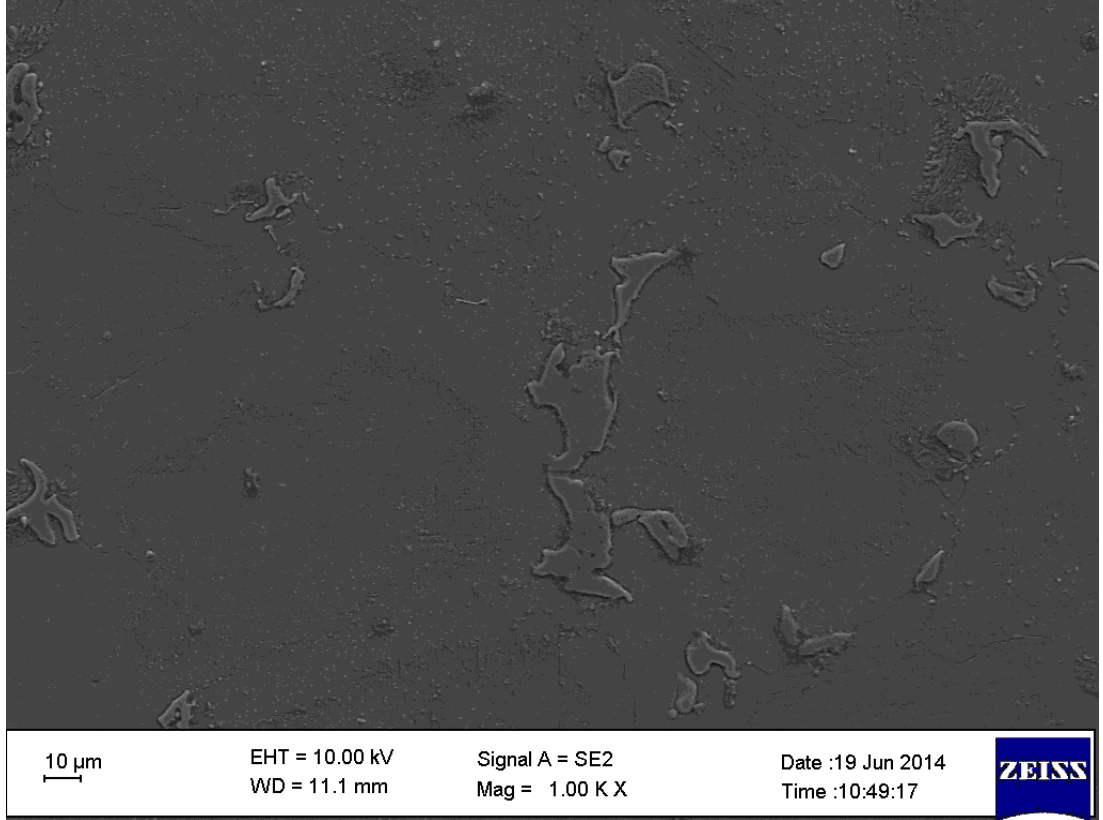
Mg-Al alaşımlarında % 2'den daha fazla alüminyum içeriği döküm mikroyapısında β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazının oluşmasına neden olduğu literatür çalışmasında bahsedilmiştir. Şekil 4.1. , 4.2. ve 4.3. Matriks alaşımının farklı büyütmelerde taramalı elektron mikroskop görüntüsünü, Şekil 4.4. ise EDS analizini göstermektedir. SEM ve EDS analiz sonuçları başlıca α -Mg (beyaz bölge (Şekil 4.4 1222 nolu nokta analizi)), ötektik yapı (kalan koyu bölge) olmak üzere 2 farklı bölgeden oluştuğunu göstermekte ve ayrıca ötektik bölgede 1220 nolu nokta analizi (Şekil 4.4.) β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazın varlığını, 1221 nolu nokta analizi ise alüminyumca zengin α -Mg fazın varlığının mevcut olduğunu göstermektedir.



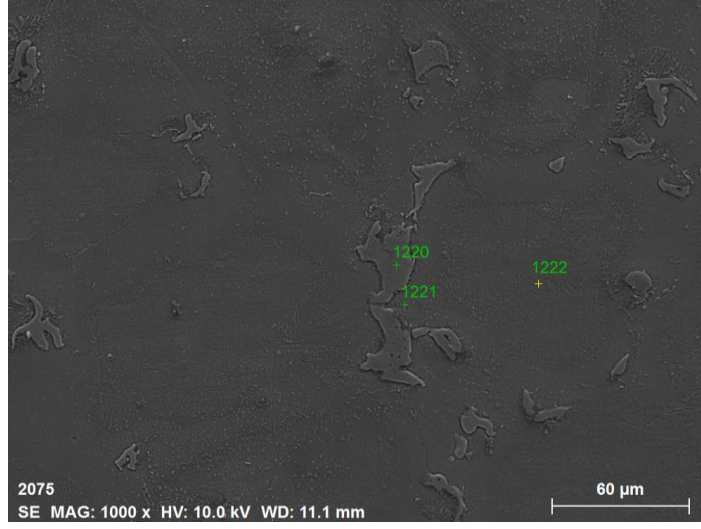
Şekil 4.1. Matriks alaşımı SEM görüntüsü (100x)



Şekil 4.2. Matriks alaşımı SEM görüntüsü (500x)



Şekil 4.3. Matriks alaşımı SEM görüntüsü (1000x)

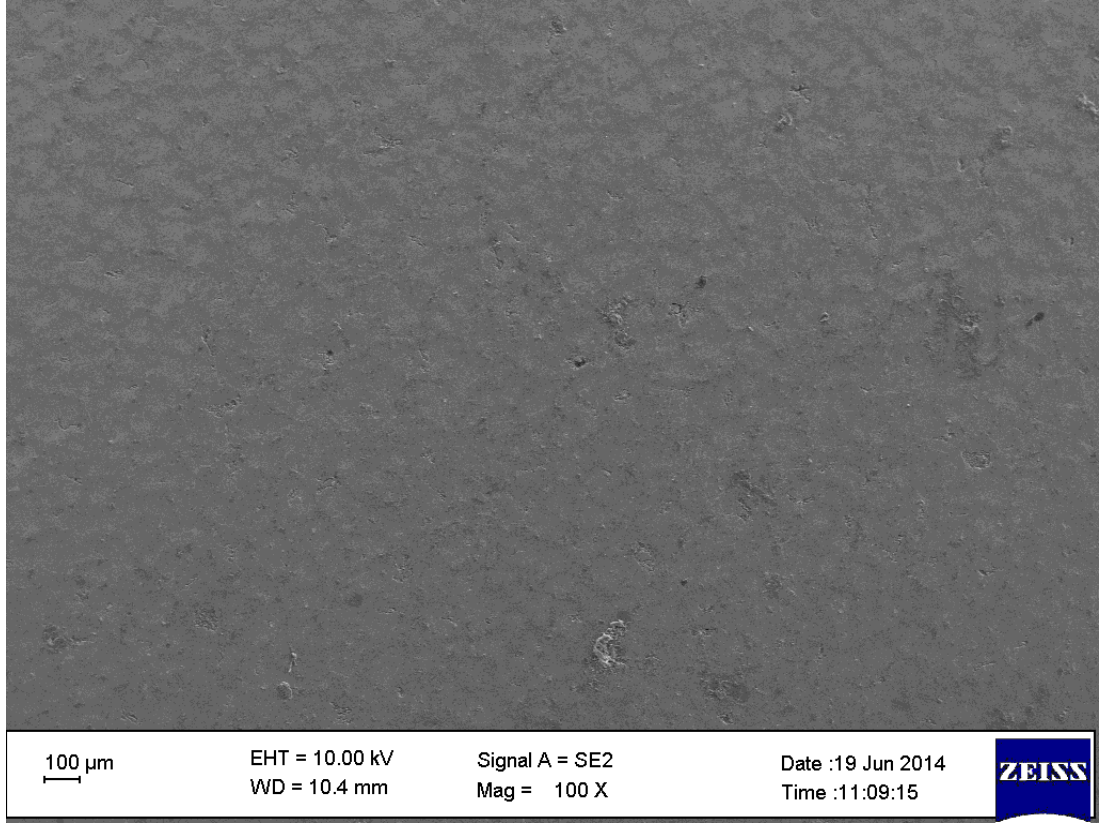


Şekil 4.4. Matris alaşımı EDS analiz görüntüsü

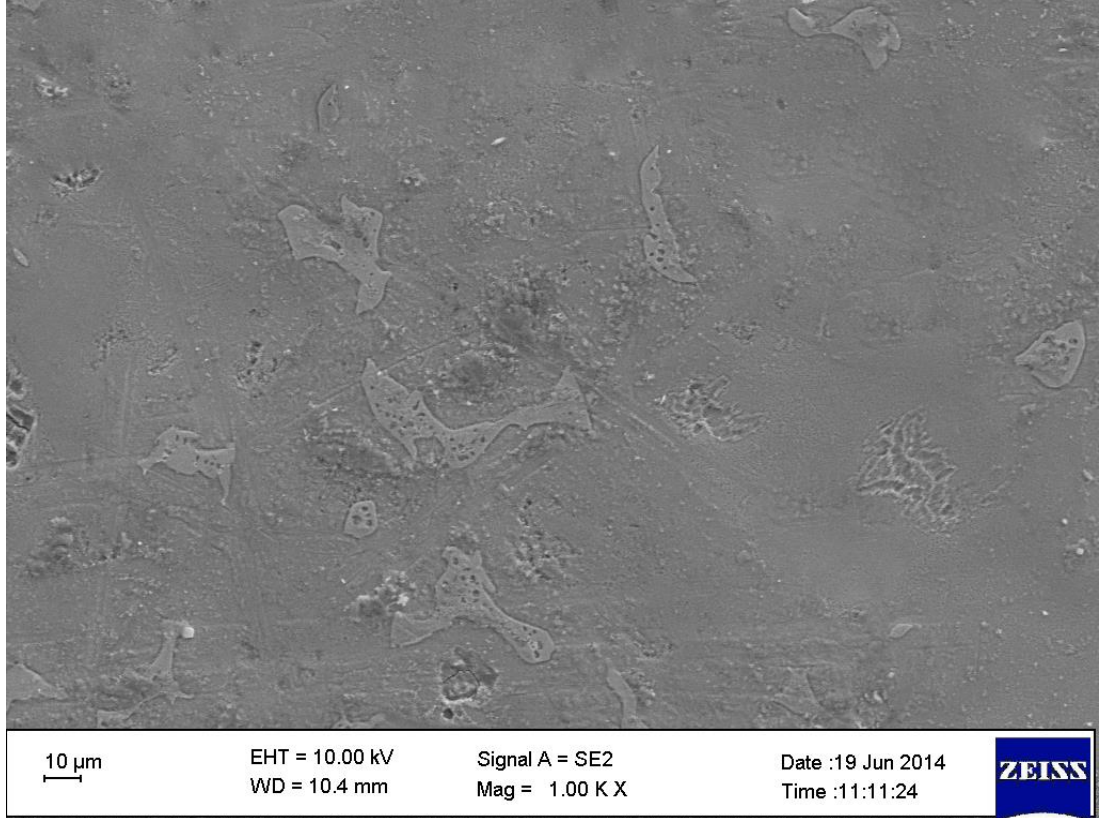
Çizelge 4.1. Matris alaşımı EDS analiz sonucu

Analiz No	Kimyasal Bileşim (at.%)		Atomik Oran
	Al	Mg	
1220	38	62	1.63
1221	8	92	11.5
1222	3,96	96.04	-

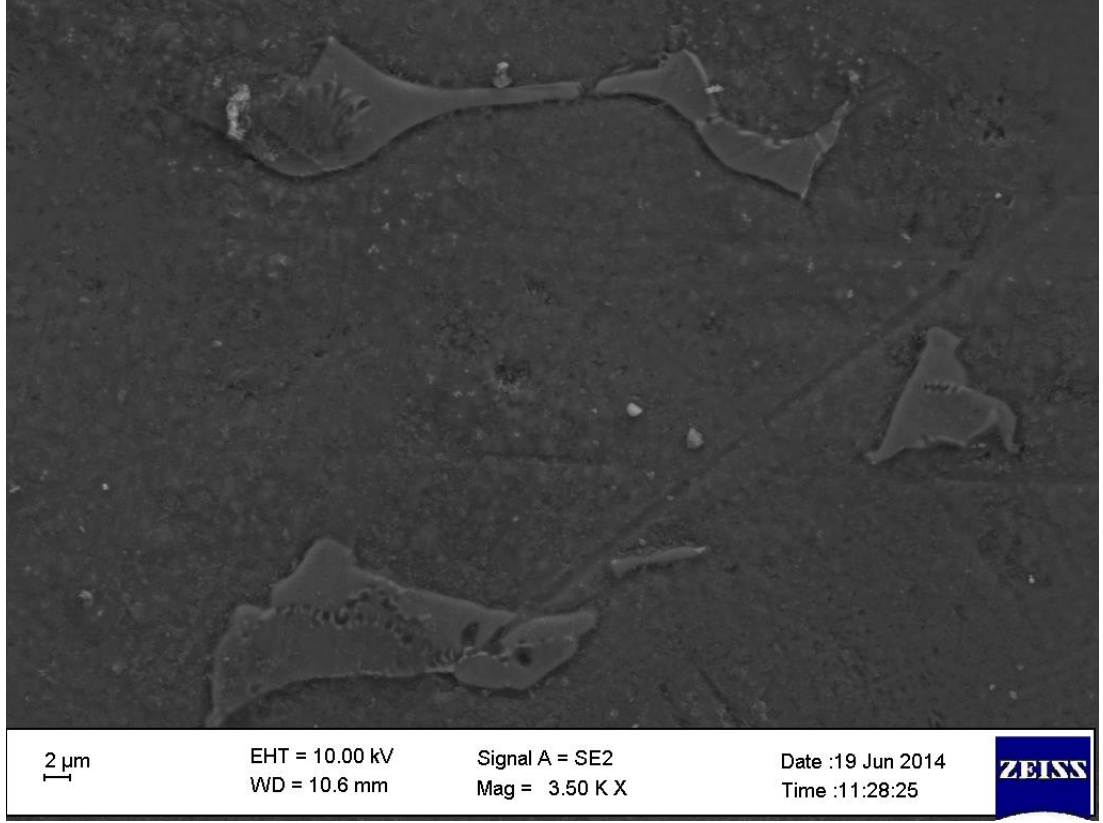
Şekil 4.5. , 4.6. ve 4.7. %0.5 nano- Al_2O_3 içeren kompozit malzemenin farklı büyütmelelerdeki SEM mikroyapısını göstermektedir. Şekil 4.8. ise EDS analizini vermektedir. Şekil 4.7. nano Al_2O_3 partiküllerinin varlığını göstermektedir. Ayrıca EDS analizi (şekil 4.8) mevcut partiküllerin Al_2O_3 olduğunun kanıtıdır.



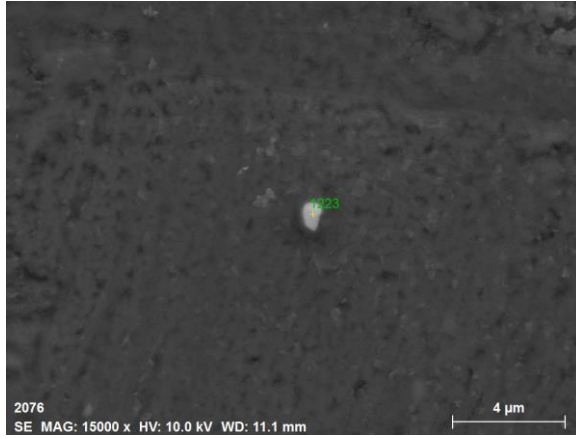
Şekil 4.5. Nanokompozit SEM görüntüsü (100x)



Şekil 4.6. Nanokompozit SEM görüntüsü (1000x)



Şekil 4.7. Nanokompozit SEM görüntüsü (3500x)



Şekil 4.8. Nanokompozit EDS analiz görüntüsü

Çizelge 4.2. Nanokompozit EDS analiz sonucu

Analiz No	Kimyasal Bileşim (at.%)			Atomik Oran
	Al	O	Mg	
1223	30	19	51	Al/O
				1.57

4.2. MEKANİK TESTLER

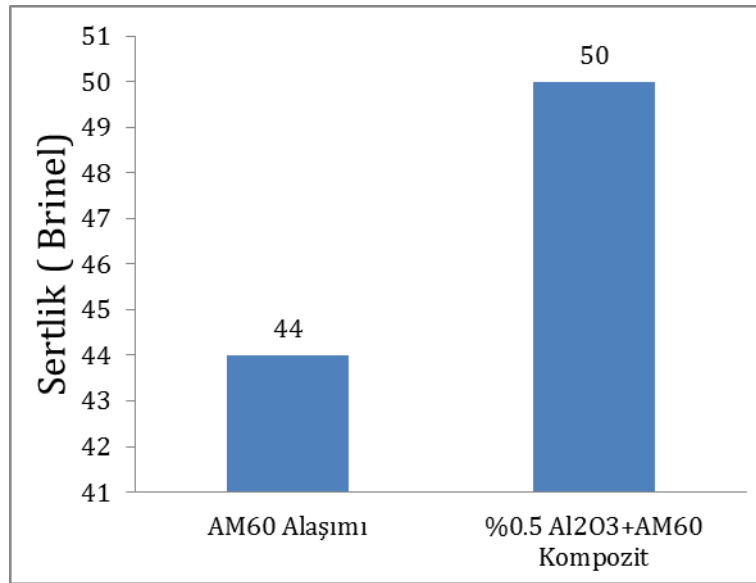
Üretilen alaşım ve kompozit kullanılarak yapılan mekanik testler sonucunda elde edilen sonuçlar çizelge 4.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.3. Üretilen alaşım ve kompozitin mekanik test sonuçları.

Alaşım No:	%e	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	Sertlik (Brinel)
AM60 Alaşımı	11,7	64	147	44
%0.5 Al ₂ O ₃ +AM60 Kompozit	11	64	159	50

4.3. ÜRETİLEN MALZEMELERDE SERTLİK

Şekil 4.9. Matriks alaşımı ve kompozit malzemenin sertlik test sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.9.’den anlaşılacağı gibi nano-Al₂O₃ ilavesi ile matriksin sertliği yaklaşık % 13,6 artarak 44 Brinell’den 50 Brinell’e çıkmıştır. Sertliğin artışı temel olarak sert nano partikül ilavesinin homojen olarak ilave edilmesine bağlanabilir.



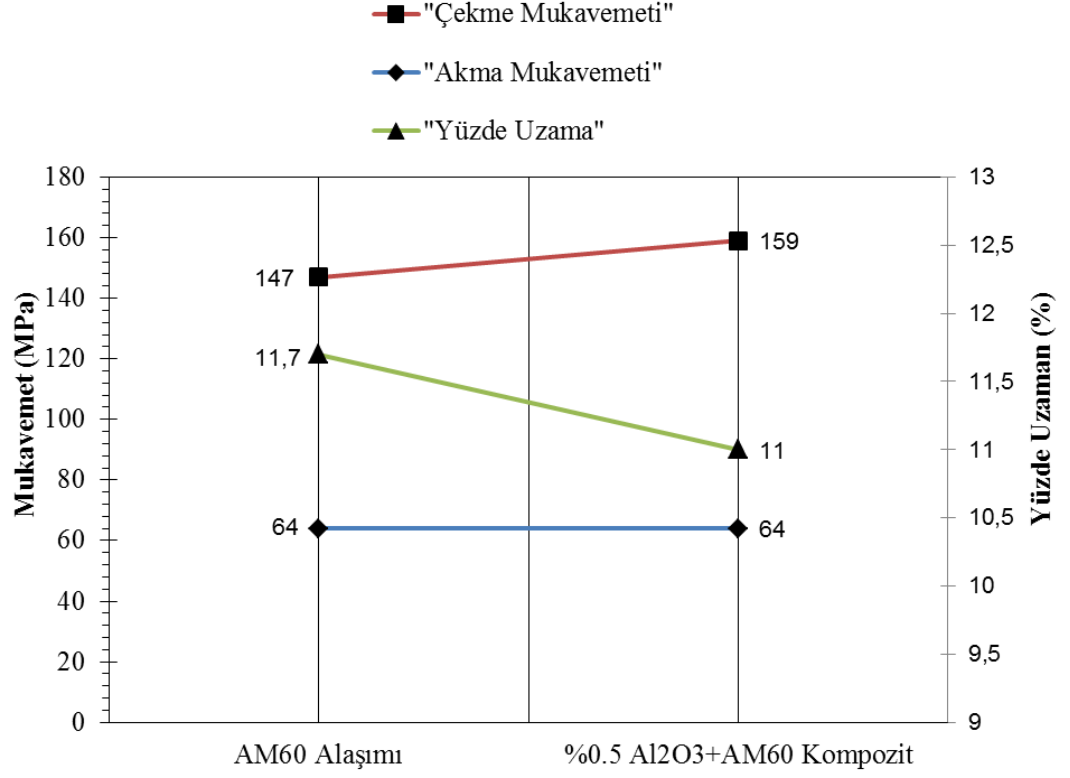
Şekil 4.9. Sertlik test sonuçları

4.4. ÜRETİLEN MALZEMELERDE ÇEKME MUKAVEMETİ

Çeşitli araştırmacılar tarafından Al_2O_3 , SiC, TiC veya B_4C gibi seramik malzemeler kısa fiber veya partikül olarak magnezyum alaşımlarına ilave edilmiş ve çeşitli özellikleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; Gupta ve arkadaşları $Mg+5,6+3Al$ alaşımına %2.5 oranında nano-alümina ilavesi gerçekleştirmiş ve matriks alaşımın çekme mukavemetinin iyileştiği, sünekliliğinin ise değişmediği görülmüştür. Gupta ve arkadaşları bu iyileşmenin nedenlerinden birinin nanopartiküllerin dislokasyon hareketini kısıtlamasından olduğunu düşünmektedirler [3]. Jakalakshmi ve arkadaşları sıkıştırma döküm yöntemiyle AM100 alaşımına farklı hacim oranlarında Al_2O_3 süreksiz fiber takviyesi gerçekleştirmiş ve farklı sıcaklıklarda çekme mukavemetine etkisini incelemiştir. Yüksek sıcaklıkta alaşımın çekme mukavemetinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir [4]. Bir diğer çalışma, Badini ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiş ve yapay yaşlanma yöntemi kullanarak çökeltme işlemiyle B_4C takviyeli magnezyum esaslı kompozitleri araştırmıştır. Seramik takviye $Mg_{17}Al_{12}$ 'nin heterojen çöktürme mekanizmasını korumuş, takviye-matris arayüzeyinde çekirdeklenmeyi geliştirmiş olduğu tespit edilmiştir [5]. Bir başka çalışmada, infiltrasyon yöntemiyle B_4C takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozitin mikro yapısı, yeni oluşmuş MgB_2 ve başlangıçtaki B_4C partikülleri ve bir miktar metal ile birleşmiş üç atomlu karbür MgB_2C_2 'den oluştuğu tespit edilmiştir [6].

Şekil 4.10, Matriks ve nano-kompozit malzemenin sırasıyla yüzde uzama, akma ve çekme mukavemet değerleri görülmektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi matriks alaşımının sünekliliği partikül ilavesi ile düşerken akma mukavemetinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Buna karşın, çekme mukavemetinde iyileşme görülmüştür. Yüzde uzama değeri %6 azalarak %11,7 değerinden %11'e inmiştir. Çekme mukavemeti ise %8 iyileşerek 147MPa değerinden 159MPa değerine çıkmıştır. Mukavemet artışının temel nedenin homojen olarak dağılan nanopartiküllerin ikincil faz olarak davrandığı ve bu nedenle dislokasyon hareketlerini kısıtlamasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Süneklilik ise bir miktar azalmıştır.

Bunun temel nedeninin çatlak oluşumu ve ilerlemesinde partiküller etkin rol oynadığı düşünülmektedir.



Şekil 4.10. Matris ve nano-kompozit malzemenin yüzde uzama, akma ve çekme mukavemet değerleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, magnezyum esaslı matriks alaşımı ve hacimce %0.5 nano- Al_2O_3 ilaveli nano-kompozit malzemenin gravity döküm yöntemiyle kontrollü atmosferde üretilmesi ve konvansiyonel alaşımlara göre kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu nedenle, magnezyum-alüminyum esaslı AM60 alaşımı matriks olarak üretilmiş ve matriks alaşımına nano partikül ilavesi ile nanokompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapı ve mekanik testleri çalışmanın ana başlıklarını oluşturmuştur. Üretilen alaşımlara sertlik ve çekme mekanik deneyler uygulanmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak mikroyapı çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar ışığında elde edilen sonuçlar bu bölümde özetlenmektedir;

1) Mg-6Al-0.3Mn alaşımı başlıca α -Mg (beyaz bölge) ve ötektik yapı (kalan koyu bölge) olmak üzere 2 farklı bölgeden oluştuğu görülmüştür. Ötektik bölge ise β - $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik faz ve alüminyumca zengin ötektik α -Mg fazı içermektedir.

2) Nano- Al_2O_3 ilavesi ile matriksin sertliği yaklaşık % 13,6 artarak 44 Brinell'den 50 Brinell'e çıkmıştır.

3) Mg-6Al-0.3Mn alaşımının sünekliliği partikül ilavesi ile düşerken akma mukavemetinde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Buna karşın, çekme mukavemetinde iyileşme görülmüştür.

Elde edilen bulgular ışığında mukavemet artışının nedeninin daha net anlaşılması için matriks ile partikül arasında oluşan arayüzey fazlarının tespiti gerekmektedir. Ayrıca artış eğiliminin ne zaman sonlandığını gözlemleyebilmek için farklı hacim oranlarında nano-alümina ilavesi gerçekleştirilip daha detaylı mukavemet çalışmaları ileri zamanda yapılması önerilen çalışmalardır.

KAYNAKLAR

- [1] Ye, Z. H., Liu, Y. Review of recent studies in magnesium matrix composite Journal of Materials Science sayfa 6153-6171, 2004.
- [2] Kainer, K.U., Magnesium Alloys and Technology, 2003.
- [3] Sankaranarayanan S., Jayalakshmi S., Gupta M, Effect of nano- Al_2O_3 addition and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Mg-(5.6Ti+3Al) composite, Mater. Charac., 75, sayfa 150-164, 2013.
- [4] Jayalakshmi S., Kaila S. V., Seshan S., Tensile behaviour of squeeze cast AM100 magnesium alloy Al_2O_3 fibre reinforced composites, Comp.:Part A, 33, sayfa 1135-1140, 2002.
- [5] Jiang, Q.,C., Wang, H., Y., Ma, B., X., Wang, Y., Zhao, F., Fabrication of B_4C particulate reinforced magnesium matrix composite by powder metallurgy, Journal of Alloys and Compounds, 386, sayfa 177-181, 2005.
- [6] Cafri, M., Dilman, H., Frage, N, Boron carbide/magnesium composite: Processing, microstructure and properties, Journal of the European Ceramic Society 32, sayfa 3477-3483, 2012.
- [7] Lim C. Y., Lim S. C., Gupta M., Wear behaviour of SiC-reinforced magnesium matrix composites, wear, 255, sayfa 629-637, 2003.
- [8] Shamekh M., Pugh M., Medraj M., Understanding the reaction mechanism of in-situ synthesized ($TiC-TiB_2$) /AZ91 magnesium matrix composites, Mat. Chem. And Phy., 135, sayfa 193-205, 2012.
- [9] Dieringa H, Huang Y., Maier P., Hort N., Kainer K., Tensile and compressive creep behaviour of Al_2O_3 short fiber reinforced magnesium alloy AE42, Mater. Sci. And Eng. A, 410, sayfa 85-8, 2005.
- [10] Yong H., Li R., Effect of particulate reinforcement on wear behavior of magnesium matrix composites, Trans. of Nonfer. Met. Soc. Of China, 22, sayfa 2659-2664, 2012.
- [11] Cafri M., Malka A., Dilman H., Dariel M., Frage N., Reaction-Bonded Boron Carbide/Magnesium-Silicon Composites, Int. J. Appl. Cerm. Technol. Sayfa 1-7, 2013.

- [12] Hunt W. H., Jr. , “Automotive Applications of Metal-Matrix Composites” Aluminum Consultants Group, Inc. Daniel B. Miracle, Air Force Research Laboratory.
- [13] Lashgari, H. R., Emamy, M., Razaghian A., Najimi A., The effect of strontium on the microstructure, porosity and tensile properties of A356-10%B₄C cast composite, Materials Science and Engineering A 517, sayfa 170-179, 2009.
- [14] KAİNER, K., Magnesium Alloys and Technology, Institute for Materials Research, Center for Magnesium Technology, GKSS Research Center Geesthacht GmbH, Geesthacht, ISBN 3-527-30256-5, syf. 1, 23, 45, 56, 72, 90, 106, 218, 226, Ocak 2003.
- [15] <http://www.roskill.com/reports/magnesium>, Ocak 2009.
- [16] KRAMER, A., Magnesium It’s Alloys and Compounds, U.S Geological Survey Open-File Report, U.S.A, syf. 300-341, 2002.
- [17] SARENNAH, J. P., The Bolting of Magnesium Components in Car Engines, Master, University of Cambridge, Cambridge, syf. 6-10, 2001.
- [18] International Magnesium Associaton Web Sitesi, <http://www.intlmag.org>, [Kasım](#) 2009
- [19] ÇITAK, K., Magnezyum alaşımları seçim ve kullanım kriterleri, Metal Dünyası Dergisi, syf. 10-20, Eylül 2004.
- [20] SMİTH, W. F., Çeviren KINIKOĞLU, N.G., Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Literatür Yayıncılık, İstanbul, syf. 525-526, 2001.
- [21] FRİEDRİCH, H., SCHUMANN, S., Research for a new age of magnesium in the automotive industry, Journal of Materials Processing Technology, syf. 276-281, 2001.
- [22] PLANO, S., Nanomag, Sustainable Production The Role of Nanotechnologies, Copenhagen, syf. 5-10, 2002.
- [23] BLAWERT, C., HORT, N., KAİNER, K. U., Automotive Applications of Magnesium and Its Alloys, Trans. Indian Inst. Met. Vol. 57, syf. 397-408, 2004.
- [24] FENT, A., Aluminium/magnesium composite crankcase, BMW Landshut Plant report, Germany, syf. 5-20, 2005.

- [25] DOBRZANSKI, L. A., TANSKI, T., CIZEK, L. ve BRYTAN, Z., Structure and Properties of Magnesium Cast Alloys, Journal of Materials Processing Technology, syf.5-9, 2007.
- [26] MORDIKE, B. L., EBERT, T., Magnesium Properties-applications-potential, Materials Science&Engineering A, syf. 37, 2001.
- [27] BEFFORT, O., HAUSMANN, C., Das Leichtmetall Magnesium und seine egierungen, EMPA Mg seminar, Thun, syf. 15-22, 1999.
- [28] Li, N., Automotive Magnesium Applications and Life Cycle Environmental Assesment, 3rd International Conference on SF₆ and the Environment, Scottsdale, Arizona, syf. 1-26, 2004.
- [29] LANDKOF, B., Magnesium alloys applications, Magnesium Alloys Science, Technology and Application, Dead Sea Magnesium, Ben-Guron University, syf. 293-316, 2005.
- [30] <http://www.autozine.org/html/BMW/3er.html#R6>, 1997-2005, Aralık 2007.
- [31] ASM Specialty Handbook, Magnesium and Magnesium Alloys, ASM International Handbook Committee, United States of America, syf. 305-415, 1999.
- [32] FRIEDRICH, H. E., ve MORDIKE, B.L., Magnesium Technology (Metallurgy, Design Data, Applications), Springer, Berlin, syf. 1-5, 2006.
- [33] ASM Handbook Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, ASM International Handbook Committee, United States of America, syf. 700-750, 1996.
- [34] ZEYTİN, H., Magnezyum Alaşımları: Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması ve Geleceği, Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli, syf. 3-39, 1999.
- [35] GAİNES, L., CUENCA R., STODOLSKY, F., WU, S., Potential Automotive Technology Development, Automotive Technology Development Conference, Conference Paper, syf. 1-7, Kasım 1996.
- [36] CASHION, S.P., RICKETTS, N.J., HAYES, P.C., Characterisation of protective surface films formed on molten magnesium protected by air/ SF₆ atmospheres, Journal of light metals 2, syf. 37-42, 2002.
- [37] BOLSTAD, J., Magnesium Alloy Development for Intelligent Magnesium Designs, SinoMaG seminar, Beijing-China, syf. 8-14, 2000.

- [38] KÄNER, K. U., The Current State of Technology and Potential For Further Development of Magnesium Applications Wiley-Vch Germany, syf. 3-20, 2006.
- [39] BARBER, L. P., Master Thesis, Characterization of the Solidification Behavior and Resultant Microstructures of Magnesium-Aluminum Alloys, Worcester Polytechnic Institute, syf. 14, 103, Aralık 2004.
- [40] ZHANG, Z., Development of Magnesium-Based Alloys for Elevated Temperature Applications, Doktora Tezi, Faculte Des Sciences Et De Genie Universite, Quebec-Canada, syf. 2-75, 1999.
- [41] JOHANSSON, S., Magnesium Alloys, Summary of chapter 1-7 in Light alloys by I. J. Polmear, Engineering Materials, syf. 17-20, 2002.
- [42] CHUNG, Y. J., PARK, J. L., KİM, N. J., SHİN, K. S., Effects of Alloying Elements on Mechanical Properties of Mg-Al Alloys, Materials Science syf. 488-489, 845-848, 2005.
- [43] BALASUBRAMANİ, N., SRİNIVASAN, A., PİLLAİ, U.T.S., PAİ, B. C., Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy, Materials Science & Engineering, syf. 275-281, 2007.
- [44] KİMA, J. M., PARK, B. K., JUN, J. H., KİM, K. T., JUNG, W. J., Microstructure and Properties of Mg-Al Based Casting Alloys Modified With Minor Alloying Elements, Materials Science, syf. 488-489, 149-150, 2005.
- [45] BARBER, L., Master Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2004.
- [46] ZHANG, Z., Ph.D. Thesis, University of Naval, Quebec, 2000.
- [47] ZHOU, M., M.Sc. Thesis, University of Windsor, Ontario, 2004.
- [48] WANG, Y., XIA, M., FAN, Z., ZHOU, X., THOMPSON, G., E., Intermetallics, 18, sayfa 1683-1689, 2010.
- [49] SUZUKI, A., SADDOCK, N., D., RIESTER, L., CURZIO, E., JONES, J., W., POLLOCK, T., Metallurgical and Materials Transactions A, 38, sayfa 420-427, 2007.
- [50] YANG, Z., LI, J., P., ZHANG, J., X., LORIMER, G., W., ROBSON, J., Acta Metallurgica Sinica, 21, sayfa 313-328, 2008

- [51] ZHANG, L., CAO, Z., Y., LIU, Y., SU, G., CHENG, L., *Materials Science and Engineering A*, 508, sayfa 129-133, 2009.
- [52] GUANG, H., GUOLONG, M., ZIANGFA, L., *Journal of Alloys and Compounds*, 486, sayfa 136-141, 2009.
- [53] CAO, P., QIAN, M., STJOHN, D.H., *Scripta Materialia* 54, sayfa 1853-1858, 2006.
- [54] NAVE, M., D., DAHLE, A., K., STJOHN, D., H., *Magnesium Technology*, sayfa 233-242, 2000.
- [55] *ASM Handbook*, Vol.3, sayfa 305, 1108.
- [56] FRIEDRICH, H., MORDIKE, B., 'Magnesium Technology' 2006.
- [57] SIN, S., L., DUBE, D., TREMBLAY, R., *Materials Characterization* 58, sayfa 989-996, 2007.
- [58] MA, Y., ZHANG, J., YANG, M., *Journal of Alloys and Compounds*, 470, sayfa 515-521, 2009.
- [59] BARBAGALLO, S., LAUKLI, H.,I., LOHNE, O., *Journal of Alloys and Compounds*, 378, sayfa 226-232, 2004.
- [60] TARTAGLIA, J., M., GREBETZ, J., C., *Magnesium Technology*, sayfa 113-121, 2000.
- [61] WEI, L., WARREN, R., *Materials Science and Technology*, 23, sayfa 745-752, 2007.
- [62] ZHAN ZHANG and ALAÏN COUTURE, An investigation of the properties of Mg-Zn-Al alloys, 1998.
- [63] BARRY L. MORDİKE, FRİEDRİCH HORST E., HDKON WESTENGEN, T. K. AUNE, *Magnesium Casting Alloys, Magnesium Technology - Metallurgy Data, Applications*, 2006.
- [64] SHUANG-SHOU Lİ , BİN TANG , DA-BEN ZENG, Effects and mechanism of Ca on refinement of AZ91D alloy, 2006.
- [65] D.H. KANG, S.S. PARK, YOON S. OH, NACK J. KİM, Effect of nano-particles on the creep resistance of Mg-Sn based alloys, 2006.
- [66] N. BALASUBRAMAÏ, A. SRİNİVASAN, U.T.S. PİLLAÏ, B.C. PAÏ, Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy, 2006.

- [67] PAUL LYON, New magnesium alloys for aerospace and speciality applications, Magnesium Technology (The Minerals, Metals & Materials Society), 2004.
- [68] MASOUMİ , M., M.Sc. Thesis, University of Windsor, Ontario, 2003.
- [69] CASHION, S.P., N.J. RICKETTS, P.C. HAYES, Journal of light metals 2,37-42, 2002.
- [70] <http://www.roskill.com/reports/magnesium>.
- [71] BARTOS, S., J. MARKS, R. KANTAMANENİ, C. LAUSCH, Magnesium Technology, 23-29, 2003.
- [72] M.M. AVEDESİAN, H. BAKER, Eds., Magnesium & Magnesium Alloys, ASM International, 1999.
- [73] ZHANG, Z., COUNTURE, A., in Proc. 4th international conference on Magnesium Alloys and Their Application, Wolfsburg, Germany,289, 1998.
- [74] BARTOS, S., MARKS, J., LAUSH, C., Magnesium Technology, 23-27, 2003.
- [75] COULTES, B.J, J.T. WOOD, G. WANG, R. BERKMORTEL, Magnesium Technology, 45-51, 2003.
- [76] Y.V.R.K. PRASAD, K.P. RAO, N. HORT, K.U. KÄINER, Optimum parameters and rate-controlling mechanisms for hot working of extruded Mg-3Sn-1Ca alloy, Materials Science and Engineering A 502, 25-31, 2009.
- [77] HORT, N., KÄINER,K., U., Advanced Engineering Materials, 8, No 4, 235-240, 2006.
- [78] CAO, P., QIAN, M. , St. JOHN, D.H., Scripta Materialia 51, 647-651, 2004.
- [79] AARSTAD, K., G. TRANELL, G. PETTERSEN, T. A. ENGH, Magnesium Technology, 5-11, 2003.
- [80] B.L. MORDİKE, T. EBERT, Magnesium properties - applications - potential, Materials Science and Engineering A302, 37-45, 2001.
- [81] D. ARGO and M. LEFEBVRE, Melt protection for the AJ52 magnesium strontium alloy, Magnesium Technology(The Minerals, Metals & Materials Society), 2003.
- [82] JOHN R. BROWN, Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook, Eleventh edition.

- [83] RİDDLE, Y., W., MAKHLOUF, M., M., Magnesium Technology, 101-106, 2003.
- [84] ASM Handbook, Vol.3, syf. 305.
- [85] DEMİRKESEN E., Kompozit Malzemeler, İ. T. Ü. Kimya Fakültesi, 1. baskı 1991, s. 1-5.
- [86] ASM HANDBOOK, Volume 21. Composites.
- [87] EJIÖFOR J. U. and REDDY R.G. “Developments in The Processing and Properties of Particulate Al-Si Composites”, JOM p.31-37, 1997.
- [88] SURESH, K.R., NIRANJAN, H.B., JEBARAJ, P.M., CHOWDIAH M.P. ”Tensile and wear properties of aluminium composites” Wear 255 (2003) 638-642.
- [89] HUNT W. H., Jr. , “Automotive Applications of Metal-Matrix Composites” Aluminum Consultants Group, Inc. Daniel B. Miracle, Air Force Research Laboratory,.
- [90] KURNAZ S.C., “Alümina Fiber Takviyeli Çinko-Alüminyum Metal Matrisli Kompozitlerin Basınçlı Döküm Yöntemi ile Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Malzeme Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, 1999.
- [91] ŞAHİN Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara, 2000.
- [92] Aluminium Metal Matrix Composites Consortium, Technologies Research Corporation a Subsidiary of the National Center For Manufacturing Sciences 3025 Boardwalk Drive An Arbor, Michigan 48108 USA.
- [93] ILGAZ U. “Seramik Partikül Takviyeli Al-Si Esaslı Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri” İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 1997.
- [94] Yaralı Y. , “SiC takviyeli MMK Malzemelerinin Aşınma Davranışları” Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı Lisans Tezi, , 2000.

- [95] AKBULUT H. “Alümina Fiber Takviyeli Al-Si Metal Matrisli kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı Özellik İlişkilerinin İncelenmesi” İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Malzeme Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi, 1994.
- [96] ASM Handbook Cast Metal-Matrix Composites Vol:8 Casting p:840-853.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Engin DİNCEL

Doğum Tarihi: 17/05/1985

Öğrenim Durumu:

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lise	Fen Bilimleri	Yusuf Kalkavan A.L.	1999-2003
Lisans	Kimya Mühendisliği	Ege Üniversitesi	2004-2010
Yüksek Lisans	Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler	Mersin Üniversitesi	2012-2014