

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL BAZLI KOMPOZİT ÜRÜNLERDE
MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİN
İYİLEŞTİRİLMESİ

Tuğçe YAĞCI

Aralık, 2016

İZMİR

**METAL BAZLI KOMPOZIT ÜRÜNLERDE
MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİN
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Tuğçe YAĞCI

Aralık, 2016

İZMİR

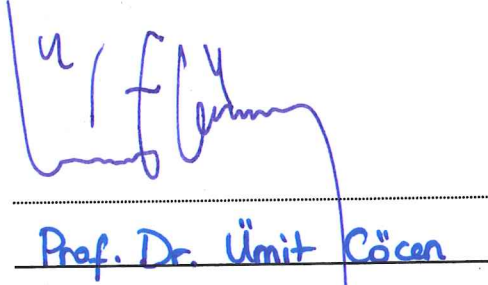
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

TUĞÇE YAĞCI, tarafından PROF. DR. KAZIM ÖNEL yönetiminde hazırlanan “METAL BAZLI KOMPOZİT ÜRÜNLERDE MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



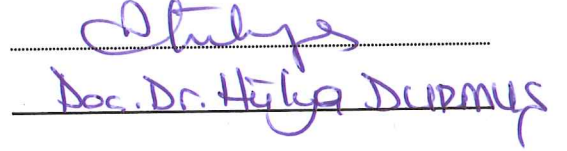
Prof. Dr. Kazım ÖNEL

Yönetici



Prof. Dr. Ümit Cöcen

Jüri Üyesi



Doc. Dr. Hülya DUDUĞUS

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Emine İlknur CÖCEN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarım sırasında değerli vaktini, fikir ve önerilerini benimle paylaşan ve laboratuvar imkanlarını sonuna kadar sağlayan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Kazım ÖNEL'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Gerek literatür araştırmalarım gerekse deneysel çalışmalarım sırasında göstermiş oldukları ilgi ve yardımlardan ötürü başta İzmir Katip Çelebi Üniversitesi'nden Yrd. Doc. Dr. Onur ERTUĞRUL olmak üzere; Celal Bayar Üniversitesi'nden Doc. Dr. Osman ÇULHA, Yrd. Doc. Dr. Simge İRİZALP ve Laboratuvar Sorumlusu Gökhan EYİCİ'ye; İstanbul Teknik Üniversitesi'nden Yrd. Doc. Dr. Nuri SOLAK ve çalışma ekibine minnetlerimi sunarım.

Tez konum kapsamında bana "2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı" aracılığı ile maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak; yüksek lisans tezimin her aşamasında yanımda olan, sabır ve anlayışımı bir an olsun eksik etmeyen çok değerli eşim Ali YAĞCI'ya çok teşekkür ederim.

Tuğçe YAĞCI

METAL BAZLI KOMPOZIT ÜRÜNLERDE MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİN İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZ

Metal bazlı kompozit malzemelerden, alüminyum matrisli kompozit ürünler sahip oldukları yüksek spesifik mukavemet, iyi işlenebilirlik, düşük ağırlık, yüksek termal şok ve aşınma direnci gibi özelliklerden dolayı özellikle otomotiv sektörü olmak üzere; havacılık, uzay, denizaltı ve savunma sanayisi gibi pek çok farklı alanda tercih edilmektedir. Literatürde, alüminyum bazlı kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik açıdan geliştirilmesinin önemine yönelik pek çok çalışma yer almaktadır.

Bu çalışma kapsamında, matris malzemesi olarak AlSi5Mg (Al-5Si-0,2Mg) alaşımı, takviye malzemesi olarak da farklı hacimsel oranlarda ve 10-15 mikrometre boyut aralığında silisyum karbür partikülleri kullanılarak sıvı metal karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen metal bazlı kompozit malzemeler üzerinde araştırma yapılmıştır. Karıştırmalı dökümden elde edilen numunelere 500 santigrat derecede sıcak ekstrüzyon uygulanmıştır. Ekstrüze numuneler, mekanik ve tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla T6 ısıl işlemine tabi tutulmuş ve sonrasında numunelerin sertlik ölçümleri ve aşınma testleri yapılmıştır. Testler sonucu yapılan optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapı incelemelerinde, silisyum karbür partiküllerin yapıda homojen olarak dağıldığı, matris-takviye arayüzeyinde iyi bir yapışma sağlandığı ve aşınma sonucu SiC partiküllerinin yapıdan kopmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, silisyum karbür partikül takviye malzemesinin hacimsel oranlarının artmasıyla sertliğin arttığı, bununla birlikte mekanik ve tribolojik özelliklerde iyileşme sağlandığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Alüminyum matris kompozitler, SiC partikül takviye, aşınma, taramalı elektron mikroskobu

IMPROVING MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF METAL BASED COMPOSITE PRODUCTS

ABSTRACT

In metal matrix composite materials, aluminum matrix composites are preferred in many different applications such as aviation, submarine, aerospace, defense and especially automotive industries due to the high specific strength, good machinability, lightness, high thermal shock and wear resistance they have. A large number of research reports on improving mechanical and tribological properties of aluminum matrix composites take place in literature.

In this study, AlSi5Mg (Al-5Si-0.2Mg) alloy matrix composite samples were produced by molten metal stir casting. Stir cast composite ingots were hot extruded at 500 centigrade degree. Particulate silicon carbide of approximately 10-15 micrometers size was used as reinforcing phase in different volume fractions. The extruded samples were undergone T6 heat treatment in order to improve their mechanical and tribological properties. The hardness measurements and wear tests were carried out. The microstructures and friction surfaces were examined using optical and scanning electron microscopy. The results of this study show that the distribution of silicon carbide particles in microstructure has been found homogeneous, the interfacial bonding of matrix-reinforcement was good and silicon carbide particles have remained intact in the structure of composite samples. Besides, the hardness values increased with increasing volume fraction of silicon carbide particles, the mechanical and tribological properties of the samples were also enhanced.

Keywords: Aluminum matrix composites, SiC particle reinforcement, wear, scanning electron microscopy

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ - METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER	3
2.1 Giriş.....	3
2.2 Matris ve Takviye Malzemeleri.....	4
2.3 Metal Matrisli Kompozitlerin Uygulama Alanları.....	6
2.4 Metal Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri	7
2.4.1 Katı Hal Üretim Yöntemleri	7
2.4.1.1 Toz Metalurjisi	7
2.4.1.2 Difüzyon Bağlı Yöntemi	9
2.4.2 Sıvı Hal Üretim Yöntemleri.....	9
2.4.2.1 Sıvı Metal İnfiltrasyon	9
2.4.2.2 Sıkıştırma Döküm	9
2.4.2.3 Sıvı Metal Püskürtme.....	10
2.4.2.4 Sıvı Metal Karıştırma.....	10
2.4.3 Diğer Üretim Yöntemleri.....	11
BÖLÜM ÜÇ - ALÜMİNYUM MATRİS KOMPOZİTLER.....	13
3.1 Giriş.....	13
3.2 Alüminyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri ve Sınıflandırılması.....	14
3.3 Takviye Malzemesi Silisyum Karbürün (SiC) Genel Özellikleri.....	17

3.4 Alüminyum Matris Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları	18
3.5 Alüminyumun Ekstrüzyonu	19
BÖLÜM DÖRT – ISIL İŞLEM	23
4.1 Giriş	23
4.2 Çökelme Sertleşmesi Isıl İşlemi	23
4.2.1 Çözeltiyeye Alma	24
4.2.2 Su Verme	25
4.2.3 Yaşlandırma	26
4.3 Alüminyum Alaşımlarında Çökelme Sertleşmesi Isıl İşlemi	27
BÖLÜM BEŞ - TRIBOLOJİ.....	29
5.1 Giriş	29
5.2 Sürtünme	29
5.3 Aşınma.....	31
5.3.1 Aşınmayı Etkileyen Faktörler	32
5.3.2 Aşınma Mekanizmaları.....	33
5.3.2.1 Adhesiv Aşınma	33
5.3.2.2 Abrasif Aşınma	35
5.3.2.3 Yüzey Yorulma Aşınması.....	36
5.3.2.4 Korozyon Aşınması.....	36
BÖLÜM ALTI - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	38
6.1 Giriş	38
6.2 Malzeme	38
6.3 Deney Numunelerinin Üretimi	38
6.5 Deney Numunelerinin Hazırlanması	39
6.6 Isıl İşlem	40
6.7 Malzemelerin Sertlik Ölçümleri	41

6.8 Aşınma Testleri ve Parametreleri	42
6.9 Mikro ve Makroyapı İncelemeleri.....	43
BÖLÜM YEDİ - DENEY SONUÇLARI	45
7.1 Mikroyapı Karakterizasyon Çalışmaları.....	45
7.2 Sertlik Deneyi Sonuçları.....	49
7.3 Aşınma Testi Sonuçları	50
BÖLÜM SEKİZ - SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR	64

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Karıştırmalı döküm yönteminin şematik gösterimi	10
Şekil 3.1 Endüstride kullanım oranlarına göre matris malzemeleri.....	13
Şekil 3.2 Alüminyum ekstrüzyonunun şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.3 Direkt ekstrüzyon ile Al profil üretimi.....	21
Şekil 3.4 Endirekt ekstrüzyon işlemi ile Al profil üretimi.....	21
Şekil 4.1 Tipik bir yaşlandırma ısıl işleminin aşamaları.....	24
Şekil 4.2 Çökeltme sertleşmesi sırasında meydana gelen mikroyapısal değişimler. ..	25
Şekil 4.3 Sıcaklık ve yaşlandırma süresiyle alaşımın mukavemetinin değişimi.....	27
Şekil 4.4 θ fazının çökmesi sırasında meydana gelen fazlar ve sertliğe etkileri.	28
Şekil 5.1 Statik ve kinetik sürtünme katsayıları.....	30
Şekil 5.2 Tribolojik sistemi oluşturan unsurlar.....	32
Şekil 5.3 Adhesiv aşınmanın oluşması.....	34
Şekil 5.4 Abrasif aşınma olayının modeli ve örnekleri.....	35
Şekil 6.1 Deneylerde kullanılan numunelerin üretim şeması.....	39
Şekil 6.2 Numunelere uygulanan T6 ısıl işlem çevrimi.....	40
Şekil 6.3 Numunelerin aşınma testlerinde kullanılan tribometre cihazı.....	42
Şekil 7.1 %23,4 SiC _p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC _p numunenin 10x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü	46
Şekil 7.2 %23,4 SiC _p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC _p numunenin 20x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü	46
Şekil 7.3 %23,4 SiC _p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC _p numunenin 50x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.	46
Şekil 7.4 %30,1 SiC _p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC _p numunenin 10x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.	47
Şekil 7.5 %30,1 SiC _p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC _p numunenin 20x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.	47
Şekil 7.6 %30,1 SiC _p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC _p numunenin 50x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.	47
Şekil 7.7 %36,8 SiC _p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC _p numunenin 10x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.	48

Şekil 7.8	%36,8 SiC _p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC _p numunenin 20x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.....	48
Şekil 7.9	%36,8 SiC _p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC _p numunenin 50x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.....	48
Şekil 7.10	Farklı SiC _p hacimsel oranlara sahip kompozit numunelerinin yaşlandırma süresine bağlı olarak sertlik değerlerinin değişimi.....	49
Şekil 7.11	Yaşlandırma süresinin numunelerin matris sertliklerine etkisi.....	50
Şekil 7.12	Isıl işlem uygulanmamış farklı SiC _p miktarına sahip alüminyum matrisli kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerine kayma mesafesinin etkisi (kayma hızı: 10 cm/s; kayma mesafesi: 1000 m; test yükü: 10N).....	51
Şekil 7.13	Farklı SiC _p miktarına sahip alüminyum matrisli kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerine kayma mesafesinin etkisi (kayma hızı: 6 cm/s; kayma mesafesi: 500 m; test yükü: 1N).....	52
Şekil 7.14	Farklı SiC _p miktarına sahip alüminyum matrisli kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerine kayma mesafesinin etkisi (kayma hızı: 10 cm/s; kayma mesafesi: 1000 m; test yükü: 10 N).....	52
Şekil 7.15	Farklı aşınma koşullarında SiC _p miktarına göre aşınma kütle kaybı....	60
Şekil 7.16	%23,4 SiC _p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 6 cm/s, kayma mesafesi: 500 m, test yükü: 1N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.	56
Şekil 7.17	%23,4 SiC _p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 10 cm/s, kayma mesafesi: 1000 m, test yükü: 10N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.....	56
Şekil 7.18	%30,1 SiC _p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 6 cm/s, kayma mesafesi: 500 m, test yükü: 1N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.	57

Şekil 7.19	%30,1 SiC _p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 10 cm/s, kayma mesafesi: 1000 m, test yükü: 10N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.....	57
Şekil 7.20	%36,8 SiC _p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 6 cm/s, kayma mesafesi: 500 m, test yükü: 1N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.	58
Şekil 7.21	%36,8 SiC _p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 10 cm/s, kayma mesafesi: 1000 m, test yükü: 10N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.....	58
Şekil 7.22	%23,4 SiC _p içeren numuneye ait elementel haritalama analizleri.	59
Şekil 7.23	%30,1 SiC _p içeren numuneye ait elementel haritalama analizleri.	60
Şekil 7.24	%36,8 SiC _p içeren numuneye ait elementel haritalama analizleri.	60

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Endüstride kullanılan metal matris kompozit sistemleri.....	5
Tablo 3.1 Alüminyum metalinin genel özellikleri.	14
Tablo 3.2 Isıl işlem uygulanıp uygulanmama durumuna göre döküm ve dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.	15
Tablo 3.3 Alüminyum alaşımlarında temper kodlaması.	16
Tablo 3.4 SiC partikül takviye malzemesinin genel özellikleri.	18
Tablo 6.1 Matris malzemesinin kimyasal kompozisyonu.....	38
Tablo 6.2 Aşınma testleri koşulları.	43
Tablo 7.1 Aşınma testleri sonucundaki % ağırlık kayıpları.....	53

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Metal matrisli kompozit malzemeler, tek bileşenli alaşımlarla sağlanamayan özelliklerin elde edilebilmesi amacıyla geliştirilmiş, bileşenlerinden en az biri metal olan iki ya da daha fazla birbirinden farklı malzeme sisteminin makro ölçekte ve alaşım oluşturmaksızın bir araya getirilmesi ile oluşturulan yeni malzeme grubudur (Ersoy, 2001). Metal matrisli kompozitlerin matris adı verilen ve yük taşıma özelliğine sahip bileşenini genellikle Al, Ti, Mg, Cu ve Ni gibi metaller oluştururken; takviye adı verilen ve matris malzemesini deforme ederek mukavemetini artıran bileşenini ise genellikle farklı şekil ve boyutlarda SiC, Al₂O₃, SiO₂, TiC gibi seramikler oluşturmaktadır (Mindivan, 2007; Clyne ve Withers, 1993). Matris ve takviye malzemelerinden farklı hacimsel oranlarda kullanılarak arzu edilen özelliklerde kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmek mümkündür.

Alüminyum matrise sahip kompozit malzemeler endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen metal bazlı kompozitlerdir (Uygur ve Saruhan, 2004). Alüminyum matrisli kompozitler yüksek spesifik mukavemet (mukavemet/yoğunluk), iyi işlenebilirlik, düşük ağırlık, yüksek termal şok ve aşınma direnci gibi üstün özelliklere sahip olduklarından havacılık, uzay, denizaltı ve özellikle otomotiv endüstrisinde çok geniş kullanım alanı bulmaktadır (Çiftçi, 2003). Alüminyum bazlı kompozitlerin üretimlerinde gerek uygulama kolaylığı gerekse maliyet açısından genellikle sıvı metotlar tercih edilmektedir. Kullanılan geniş alaşım çeşidi yelpazesi ve üretim yöntemi sayesinde farklı özelliklerde kompozit ürünler elde edilebilmekte ve üretim sonrası uygulanabilen ısıl işlemler ile mühendislik özellikleri geliştirilebilmektedir (Miracle, 2005).

Otomotiv ve taşımacılık sektöründe, geleneksel döküm parçalarının yerine alüminyum matrisli kompozit malzemelerin kullanılması, bu parçalara nazaran kompozit malzemelerin çok daha hafif olmaları sayesinde taşıtlarda ağırlık azalması sağlanır. Ağırlık azalması, yakıt tüketiminin azalmasını sağlar. Yakıt tüketiminin azalması da beraberinde karbondioksit emisyonlarının azalmasını getireceğinden,

alüminyum matrisli kompozit malzemelerin otomotiv sektöründe tercih edilmesi hava kirliliğinin azalmasını sağlar. Buna göre, alüminyum matrisli kompozit malzemeler, geleneksel döküm yoluyla üretilen demir esaslı malzemelere göre çok daha çevre dostu malzemelerdir (Ahmad ve diğer., 2013).

Bu çalışmada, matris malzemesi olarak AlSi5Mg alaşımı, takviye malzemesi olarak da farklı hacimsel oranlara sahip (23,4, 30,1 ve 36,8 %vol.) SiC partikülleri (SiC_p) kullanılarak sıvı metal karıştırma döküm yöntemi ile üretilen metal matrisli kompozit numuneler üzerinde araştırma-geliştirme yapılmıştır. Karıştırmalı dökümden elde edilen numunelere 500 °C sıcaklıkta sıcak ekstrüzyon prosesi uygulanmıştır. Ekstrüze numunelere farklı sürelerde T6 temper kodlu çökelme sertleşmesi ısıl işlemi uygulanmış ve numunelerin ısıl işlem sonrasında matris ve kompozit sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca numuneler düşük yükler ve yüksek yükler olmak üzere iki farklı koşulda aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda optik ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu çalışmaları yapılmış ve bu çalışmalarda aşınan yüzeyler incelenerek numunelerin tribolojik davranışlarının belirlenmesi ve optimum matris-takviye bileşiminin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi ise sertlik ölçümlerine göre yapılmıştır. Yapılan araştırma ve incelemeler sonucunda AlSi5Mg/SiC_p kompozit numunelerin “Aşınma direnci - Mikroyapı - Mekanik özellik” ilişkisi ortaya çıkarılmış ve değerlendirmeler ayrıntılı bir şekilde raporlanmıştır.

BÖLÜM İKİ

METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Giriş

Günümüzde teknoloji ve bilimde meydana gelen ilerlemeler ile birlikte gelişen endüstriyel koşullara bağlı olarak, malzemeler tek başlarına ihtiyaçları karşılayamaz duruma gelmişlerdir. Buna bağlı olarak, özellikle havacılık ve askeri uygulamalar başta olmak üzere, otomotiv ve denizcilik endüstrisinde; hafif, dayanıklı, uzun servis ömrüne sahip, yüksek sıcaklıklara dirençli ve boyutsal kararlılığı yüksek olan kompozit malzemelere olan ihtiyaç artmıştır (Sarıtış, 1995).

Kompozit malzemeler, belirli bir amaca yönelik olarak üretilen, en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesi sonucu oluşan farklı bir malzeme grubudur. Bir malzemenin kompozit malzeme olabilmesi için, aşağıda yer alan üç özelliği barındırıyor olması gerekmektedir.

- Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,
- Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması,
- Bileşenlerin hiçbirinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması. (Ersoy, 2001).

Her kompozit malzemedeki matris malzemesi ve takviye malzemesi olmak üzere iki temel bileşen bulunur. Matris ve takviye malzemesi birbirinden farklı özelliklere sahiptirler. Burada takviye edici malzeme, kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini sağlamaktadır. Matris malzeme ise, plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önler ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir (Özkarakoç, 2002).

İçerdikler matris faza göre kompozit malzemeler, metal matrisli, polimer matrisli, seramik matrisli olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Metal matrisli kompozitler, ana yapıyı matris metalin oluşturduğu, takviye elemanı olarak da genellikle seramik fazın kullanıldığı kompozitlerdir. Metal matrisli kompozitler, geleneksel malzemelere en büyük alternatif malzemelerdir. Seramik malzemelerin sahip olduğu yüksek elastisite modülü, mukavemet, tokluk ve darbe özellikleri, yorulma ve aşınma direnci, yüzey dayanıklılığı, düşük termal genleşme katsayısı ve iletkenlik özellikleri ile metal malzemelerin plastik şekil değiştirme özellikleri bir araya getirilerek performansı yüksek malzemeler geliştirilmektedir (Mindivan, 2007). Polimer matrisli kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında, metal matrisli kompozitler daha gelişmiş mekanik özellikler sergilemekle birlikte, daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler.

2.2 Matris ve Takviye Malzemeleri

MMK' lerde matris malzemesi olarak hafif metaller tercih edilmektedir. Genel olarak Al, Mg, Ti, Ni, Cu ve Zn alaşımları ve süper alaşımlar (Ni ve Co bazlı) kullanılan matris malzemeleridir (Taya ve Arsenault, 1987). Bunların içerisinde de en yaygın olarak kullanılanlar; Al, Ti ve Mg alaşımlarıdır. Endüstriyel anlamda da alüminyum ve alaşımları, hafiflik ve kalite açısından diğer matris metallerine kıyasla daha çok tercih edilmektedir.

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi esnasında takviye malzemesi seçimi kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi açısından çok önemlidir. Kullanılacağı amaca bağlı olmakla birlikte; takviye malzemesinin düşük yoğunluklu, yüksek dayanımlı (yorulma ve darbe özellikleri açısından), gelişmiş aşınma özellikleri sergileyen, matris malzemesi ile uyumlu, üretilebilir ve ekonomik olması beklenir (Lylod, 1994). Takviye malzemeleri sürekli fiber, partikül ve whisker (kedi bıyığı) şeklinde olup, genellikle oksit, karbür veya nitrür bileşimindedir. Metal matrisli kompozit malzemelerde en sık kullanılan takviye malzemeleri, Al_2O_3 , SiC, B, C ve TiB'dur (Donaldson ve Miracle, 1987). Tablo 2.1'de endüstride kullanılan metal matrisli kompozit sistemleri gösterilmektedir (Srivatsan ve diğer., 1991).

Tablo 2.1 Endüstride kullanılan metal matris kompozit sistemleri (Srivatsan ve diğer., 1991).

Takviye malzemesi	Matris malzemesi
Bor fiber	Alüminyum, titanyum
Grafit fiber	Alüminyum, magnezyum, bakır
Alümina fiber	Alüminyum, magnezyum
Silisyum karbür fiber	Alüminyum, titanyum
Alümina-silika fiber	Alüminyum
Silisyum karbür whisker	Alüminyum, magnezyum
Silisyum karbür partikül	Alüminyum, magnezyum
Bor karbür partikül	Alüminyum, magnezyum

Metal matrisli kompozit malzemeler, içermiş oldukları takviye elemanına göre parçacık, sürekli elyaf, kısa elyaf, rastgele düzlemsel yönlendirilmiş takviyeli ve dispersiyonla güçlendirilmişler olmak üzere beş farklı gruba ayrılmaktadır. Bunların içerisinden partikül takviye kullanımı ile metal matris kompozit üretiminin maliyeti, fiber takviyeli olana göre oldukça düşüktür. Bunun yanı sıra, partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler; gerek mekanik gerekse fiziksel özellikler açısından izotropik (özelliklerin yönden bağımsız olması) özellik göstermektedirler (Vencl ve diğer., 2010). Metal matrisli kompozitlerde, malzemenin mukavemeti, matris malzemesi ile takviye malzemenin arasında gerçekleşen yük iletimi ile sağlanmaktadır. Bu sebeple, matris-takviye ara yüzeyinin davranışları ve yapısı büyük önem taşımaktadır. Metal matris ve seramik takviye kompozitleri oluşturabilmek için, sıvı metalin seramik takviyeyi yeterince ıslatması gerekmektedir. Ara yüzeyin ıslanma derecesi, matris ile takviye arasındaki temas alanının artması ile doğru orantılıdır. Sıvı metalin, takviye malzemesini ıslatabilirliği, matris-takviye uyumuna bağlı bir parametredir. Bununla birlikte, ara yüzeyde gerçekleşen olaylara bakılarak, metal matris üretim yöntemlerinde iyileştirme sağlanabilir. Bir başka açıdan incelenirse, partikül takviyenin üretim esnasında matris alایشımına infiltrasyonu, fiber takviyeye göre daha kolay olduğundan, ıslatılabilirlik açısından partikül takviyeler, fiberlere göre daha avantajlıdır (Naher, Brabazon ve Looney, 2005).

Genellikle metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi; birleştirme veya sentezleme (takviyenin matris içinde yerleştirilmesi) ve ardından şekillendirme olmak üzere iki adımdan oluşmaktadır. Çok sayıda matris-takviye birleştirme yöntemi bulunmakla birlikte, bunların bir kısmı oldukça karmaşıktır. Diğer taraftan, parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler standart metal şekillendirme yöntemleriyle (dövme, ekstrüzyon, haddeleme gibi.) şekillendirilmeye de uygundur (Callister ve Rethwisch, 2007).

2.3 Metal Matrisli Kompozitlerin Uygulama Alanları

Günümüz koşullarında metal matrisli kompozit malzemeler endüstride pek çok alanda tercih edilmektedir. Yaygın olarak otomotiv ve savunma sanayinde kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe bazı motor parçaları geleneksel malzemeler yerine kompozit malzemelerden üretilmekte ve bu sayede dayanımları artırılmaktadır. Metal matrisli kompozit malzeme kullanılarak dayanımın yanı sıra; hafif, aşınmaya ve ısıya dayanıklı parçaların da üretimi sağlanmaktadır. Örneğin; otomobillerde kullanılan kardan milleri son dönemlerde metal matrisli kompozit malzemelerden üretilmiş ve böylelikle daha yüksek dönme hızına ve daha az gürültü kirliliğine ulaşılmıştır.

Havacılık sektörüne bakıldığında ise gelişmiş özellikler sergileyen alüminyum matrisli kompozit malzemelere rastlanılmaktadır. Bor elyafın kullanıldığı uydular ve sürekli grafit elyafların kullanıldığı Hubble Uzay Teleskobu yer almaktadır (Callister ve Rethwisch, 2008).

Metal matrisli kompozitlerden, matris malzemesini nikel ve kobaltın oluşturduğu süper alaşımlar ve alüminyum bazlı kompozitler de yüksek sıcaklıklara göstermiş oldukları üstün dayanım, korozyon direnci ve sergiledikleri gelişmiş darbe özellikleri sebebiyle yüksek verimlilik amaçlanan türbin rotorlarında değerlendirilmektedir (Yılmaz ve Avcı, 2012).

2.4 Metal Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozit malzemelerin pek çok farklı yolla üretimi mümkün olmasına rağmen, bu konu üzerine geliştirme çalışmaları hala devam etmektedir. Kompozit malzemelerin üretimi yapıyı oluşturan matris ve takviye fazlarının üretimi ve şekillendirilmesi olmak üzere iki aşamaya ayrılabilir. Buna dayanarak, her bir farklı kompozit malzeme için, farklı üretim yöntemleri ve buna bağlı farklı üretim parametreleri mevcuttur (Akbulut, 1995). Genel olarak, metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi üç farklı grupta sınıflandırılır:

- Katı hal üretim metotları (toz metalurjisi, difüzyon bağı yöntemleri)
- Sıvı hal üretim metotları (sıvı metal infiltrasyon, sıkıştırma döküm, sıvı metal karıştırma, plazma püskürtme yöntemleri)
- Diğer üretim metotları (rheocasting ve compocasting, vidalı ekstrüzyon, in-situ yöntemleri)

Kompozit malzeme üretim yöntemi seçerken, üretilmek istenen son ürün özellikleri baz alınarak; çalışma sıcaklıkları, matris-takviye fazlarının uyumu, takviye malzemesinin şekli, boyutları, oranı ve yapı içerisindeki dağılımı, uygulamada oluşabilecek reaksiyonlar ve ek işleme gerek duyulup duyulmadığı gibi parametreler göz önünde bulundurulmalıdır (Clyne, 2001).

2.4.1 Katı Hal Üretim Yöntemleri

2.4.1.1 Toz Metalurjisi

MMK malzeme üretiminde genel olarak, döküm, toz metalurjisi ve infiltrasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bunların arasından bilinen ve en sık kullanılan yöntem gerek maliyet gerekse uygulanabilirlik açısından dökümdür. Fakat döküm yöntemi ile her zaman istenilen özellikler elde edilemez. Döküm yönteminin kullanılacak takviye malzeme miktarının kısıtlı kalması gibi dezavantajları da vardır. Toz metalurjisi gibi katı hal üretim metodu ile takviye malzeme miktarına ve boyutuna bağlı kalmaksızın, istenilen özelliklerde toz metal malzemeler ile takviye

malzemesinin karıştırılması sonucu, ara yüzeyde reaksiyon olmaksızın MMK malzeme üretimi mümkün olmaktadır. Bu teknik, geleneksel yöntemle göre pahalı bir tekniktir. Ancak, istenilen kompozit malzeme özellikleri elde edilebildiğinden tercih edilmektedir (Orhan ve diğer., 2007). Toz metalurjisi ile MMK malzeme üretimi konusunda çalışmalar hala devam etmektedir. Toz metalurjisinde yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri SiC, Gr, TiC; matris metalleri ise Al, Ti ve Cu' dır. Bu teknikte sırasıyla aşağıdaki işlemler uygulanır:

- Toz metal ile takviye elemanları karıştırılır ve istenilen şekil ve boyutlardaki bir kalıba boşaltılır.
- Elde edilen toz karışımını sıkıştırmak amaçlı basınç uygulanır.
- Tozların birbiri ile birleşmesini kolaylaştırmak yani katı hal difüzyonuna olanak sağlayacak şekilde, toz karışımı ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta sinterlenir. Günümüzde, son ürün yoğunluğu açısından pres ve sinter kademeleri aynı anda sıcak presler kullanılarak gerçekleştirilmektedir.
- Sıcak pres işleminden sonra malzeme ikincil metalurjik işlemler olan hadde, ekstrüzyon ve dövmeden geçirilir ve kullanıma hazır hale gelir (Akoral ve diğer., 2002).

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen metal matrisli kompozit malzemelerin sergilemiş oldukları mekanik özellikler, döküm yöntemiyle üretilen MMK malzemelere göre daha üstün olsa da bu yöntemin de kendi içinde dezavantajları vardır. Örneğin, eğer herhangi bir çalışmada takviye malzemesi olarak kısa fiberler kullanılıyorsa, bu fiberlerin tozun sıkıştırılması sırasında kırılma riski mevcuttur. Bir başka açıdan, büyük boyutlardaki parça üretimi daha yüksek basınç gerektirdiğinden, üretim maliyeti buna paralel olarak artacaktır. Ayrıca, toz malzeme ile çalışmalarda temizlik faktörü çok önemlidir. Kullanılan toz malzeme içerisinde atık, yabancı madde vb. partikülleri mevcut ise, bu partiküller üretim sırasında esas malzemenin yapısına nüfuz eder ve mekanik özelliklerini negatif etkiler.

2.4.1.2 Difüzyon Bağı Yöntemi

Bir diğer katı hal üretim metodu ise difüzyon bağı ile MMK üretimidir. Bu metotta, takviye elemanları metal folyolar üstüne arzu edilen miktarlarda ve açılarda koyulur. Bunu takiben, ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta basma veya haddeleme yoluyla, matris ve takviye malzeme arasında bir bağ oluşumu sağlanır. Bu yöntem bir hayli maliyet gerektiren bir yöntemdir ve kullanılan malzeme şekli ve çeşidi sınırlıdır (Yılmaz, 1997).

2.4.2 Sıvı Hal Üretim Yöntemleri

Sıvı metal infiltrasyon, sıkıştırma döküm, metal püskürtme ve karıştırma döküm en sık kullanılan sıvı faz MMK üretim metotlarıdır.

2.4.2.1 Sıvı Metal İnfiltrasyon

Bu metot sıvı metal emdirmesi olarak da bilinmektedir. Gerek kısa elyaf gerekse sürekli elyafların takviye olarak kullanıldığı MMK üretimlerinde tercih edilmektedir. Bu yöntem için, ilk olarak uygun bağlayıcı ile master hazırlanmaktadır. Hazırlanan bu master kalıp içerisine uygun şekilde yerleştirilir. Sonrasında ergimiş metal kalıp içerisine enjekte edilir ve masterın ıslanması sağlanır (Mutlu, 1996). Örneğin, boron elyafların SiC ile kaplanması sıvı metal infiltrasyon yöntemi ile yapılmaktadır.

2.4.2.2 Sıkıştırma Döküm

Sıkıştırma döküm metodu, metal bir kalıp içerisine yerleştirilen ön ısıtılmış seramik fiber veya başka bir takviye malzemesinden oluşturulmuş ön şekle, belirli bir kuvvet yardımıyla sıvı metalin emdirilmesi esasına dayanır. Böylelikle, sıkışan ergiyik metalin yüksek basınçla katılması sağlanmaktadır. Bu metot, hassasiyeti yüksek mühendislik parçalarının üretiminde tercih edilmektedir. Bu yöntem kullanılarak üretilen MMK malzemelerin kalitelerini, uygulamada kullanılan kalıp ön sıcaklığı ve uygulanan basınç belirlemektedir (Tekmen, 2006).

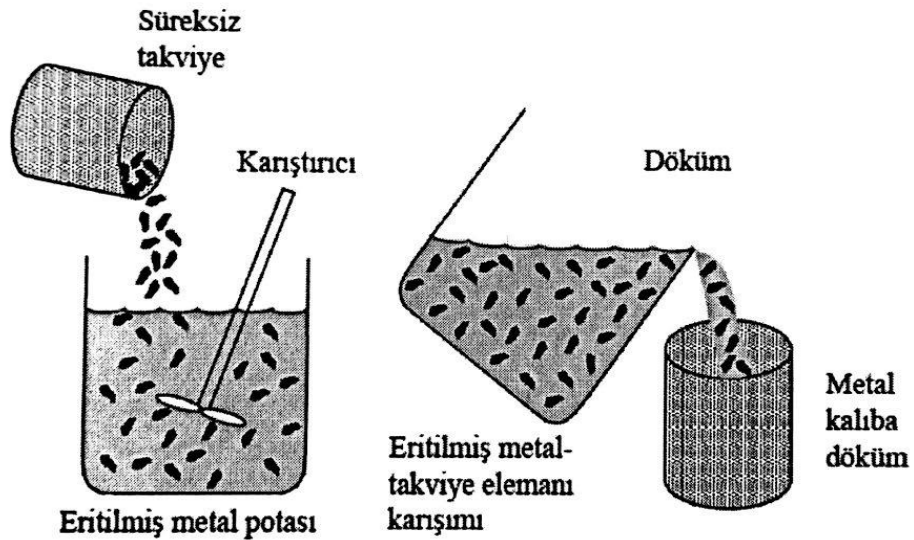
2.4.2.3 Sıvı Metal Püskürtme

Bu metot özellikle parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Matris malzemesi olarak genelde düşük ergime sıcaklığına sahip alüminyum metali tercih edilmektedir. Plazma püskürtme yöntemi olarak da bilinmektedir. Plazma püskürtmede, atomize edilen ergimiş metal parçacıkları, takviye elemanının üzerine arzu edilen miktar ve kalınlıkta püskürtülür. Püsküren metal parçaları, takviyenin üzerine yapışır ve hızla katılaşır.

2.4.2.4 Sıvı Metal Karıştırma

Sıvı hal üretim metotları arasında en çok tercih edilen ve bilinen dökümhane şartlarında kullanıma en uygun olan metottur. Vorteks (girdap) döküm yöntemi olarak da bilinmektedir. Yaygın olarak alüminyum matrisli seramik takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılmaktadır.

Karıştırmalı dökümde genel olarak sıvı metal karıştırılır ve parçacıklar karışan sıvı metale takviye edilmektedir. Şekil 2.1’de vorteks dökümün şematik gösterimi yer almaktadır (İlgaz, 1997).



Şekil 2.1 Karıştırmalı döküm yönteminin şematik gösterimi (İlgaz, 1997).

Ergitme işleminin yapıldığı düzenek, bir pota ve karıştırıcıdan oluşmaktadır. Alüminyum veya alaşımları bu pota içerisinde ergitilir ve takviye malzemesinin ilavesinden önce mutlaka koruyucu bir gaz veya katı gaz gidericiler yardımıyla gaz giderme işlemine tabi tutulur. Mekanik karıştırıcı kısmı, sıvı metal ile reaksiyon vermeyen malzemelerden yapılmaktadır. Karıştırma hızı, girdap oluşturacak şekilde ayarlanmaktadır. Girdap oluşumu sağlandığında, önceden hazırlanan takviyeler belirli bir hızda girdaba katılmaktadır. Takviye malzemesinin ilavesinin ardından bir süre daha karıştırma işlemine devam edilmektedir. Ardından hemen döküm gerçekleştirilir (İlgaz, 1997).

Bu yöntem kullanılarak mekanik özellikler açısından başarılı bir kompozit malzeme elde etmek için mutlaka matris malzemesi içinde takviye üniform yani homojen olarak dağılması ve matris-takviye ara yüzeyindeki ıslanma ile oluşan bağın çok iyi olması gerekmektedir. Bu başarı parametrelerinin sağlanması için dikkat edilmesi gereken noktalar; karıştırma hızı, karıştırıcının pozisyonu, boyutları ve bekletme sıcaklığıdır. Düşük karıştırma hızlarında döküm içerisinde poroziteler oluşmaktadır. Karıştırıcının konumu açısından değerlendirme yapıldığında ise, karıştırıcı sıvı metale dik açıda daldırıldığında homojen bir karıştırma gerçekleşmediği için istenilen özelliklere erişim sağlanamamaktadır. Dolayısıyla karıştırıcı sıvı metal içersine belirli bir açı ile daldırılmalıdır.

2.4.3 Diğer Üretim Yöntemleri

MMK malzemeler yukarıdaki yöntemler dışında; rheocasting ve compocasting döküm, in-situ tekniği gibi diğer yöntemlerle de üretilebilmektedir.

Rheocasting ve compocasting döküm yönteminde kısa fiber ya da partikül takviyeli MMK malzemeleri üretmede kullanılan ekonomik yöntemlerdir. Matris malzemesi, karıştırma bölmeli bir ergitme fırınına yerleştirilip ve ergitme sıcaklığının 40-50 °C üzerine ısıtılır. Sıcaklık homojenize edildikten sonra sıvı metalin sıcaklığı kontrollü biçimde düşürülmektedir. Metal alaşımı yaklaşık %50 katı hale geldiğinde ise takviye ilavesi yapılmaktadır. Takviye eklenmesi esnasında sıcaklık yükseltilir ve

matris-takviye arasında tam ıslanma gerçekleşene kadar karıştırma işlemi devam etmektedir (Khosravi ve Akhlaghi, 2015). Bu yöntem rheocasting adını almakta, eğer ergime sıcaklığı üzerinde karıştırılarak döküm gerçekleştirilirse işlemler compocasting adını almaktadır.

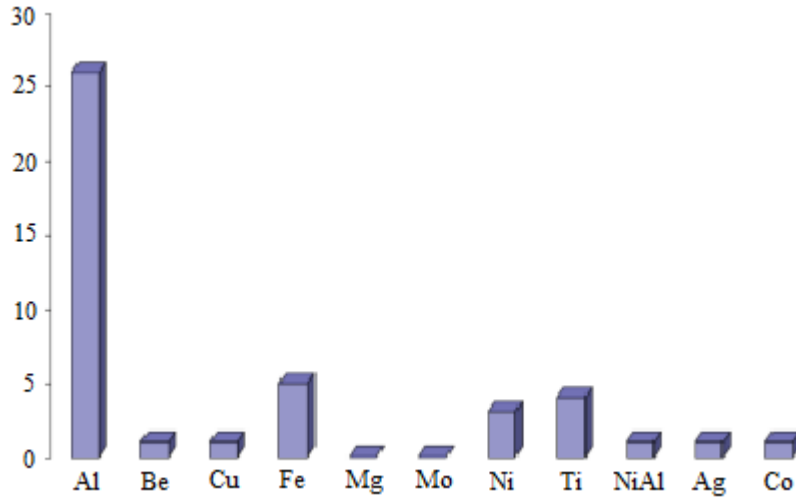
In-situ tekniğinde ise bir ötektik yönlendirilmiş olarak karıştırılmakta ve bunun sonucunda iki farklı faz yapısı ortaya çıkmaktadır. Fazlardan biri matris, diğerisi ise matris malzeme içerisine dağılmış lamel, plaka veya fiberlerdir (Popov ve diğer., 2016). İn-situ tekniğini uygulamada alüminyum, nikel ve kobalt esaslı metal alaşımları kullanılmaktadır. Ek aşamalı işlem sonucunda elde edilen bu MMK'lerin iç yapıları oldukça kararlıdır.

BÖLÜM ÜÇ

ALÜMİNYUM MATRİS KOMPOZİTLER

3.1 Giriş

Kompozit malzemelerde yaygın olarak tercih edilen matris malzemeleri; başta düşük yoğunluklu olmak üzere aynı zamanda yüksek tokluk, yüksek aşınma direnci ve gelişmiş mekanik özellikler gösteren hafif metal ve alaşımlarıdır. Bu alaşımların spesifik mukavemet (mukavemet/özgül ağırlık) değerleri yüksek olduğundan, özellikle hafiflik ve mukavemet gerektiren uygulama alanlarında öncelikli tercih sebebidir. Bu özellikler de baz alınarak, endüstride kullanılan en yaygın matris malzemesi alüminyum ve alüminyum alaşımlarıdır. Alüminyum ve alaşımlarının işlenebilirliği kolaydır ve aynı zamanda matris-takviye için yüksek uyumluluk gösterirler. Bunun yanı sıra, Al ve alaşımları yüksek korozyon direncine sahiptirler. Şekil 3.1’de endüstride firmaların kullandığı matris malzemelerine ait oranlar verilmektedir (Kalemtaş, 2014).



Şekil 3.1 Endüstride kullanım oranlarına göre matris malzemeleri (Kalemtaş, 2014).

Bu sütun grafiğine göre, yaklaşık %27’lik bir oranla alüminyum ve alaşımları endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen matris malzemesidir.

3.2 Alüminyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri ve Sınıflandırılması

Alüminyum ve alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri içermiş olduğu alaşım elementlerine, bu elementlerin miktarlarına ve mikroyapısına bağlı olarak değişim göstermektedir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri; bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Tablo 3.1’de alüminyum metalinin genel özellikleri yer almaktadır.

Tablo 3.1 Alüminyum metalinin genel özellikleri.

Al	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime noktası (°C)	Elastisite modülü (GPa)	Mukavemet (MPa)	Termal iletkenlik (W/m°C)	Termal genleşme katsayısı (*10 ⁻⁶ /°C)
	2,7	660	68,9	50	221	23,6

Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Dövme alüminyum alaşımlarının plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup, kolayca şekillendirilebilirler.

Döküm ve dövme alüminyum alaşımların büyük bir kısmına da ısı işlem uygulanabilmekte; mekanik ve diğer malzeme özellikleri geliştirilebilmektedir. Isıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alüminyum alaşımları, dövme ve döküm alaşımların isimlendirilmesi Tablo 3.2’de gösterilmektedir (Askeland, 1990).

Tablo 2.2 Isıl işlem uygulanıp uygulanmama durumuna göre döküm ve dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Askeland, 1990).

Döküm Al alaşımları	Ana alaşım elementi	Isıl işlem	Dövme Al alaşımları	Ana alaşım elementi	Isıl işlem
1xx.x	-	Hayır	1xxx	-	Hayır
2xx.x	Cu	Evet	2xxx	Cu	Evet
3xx.x	Si/Mg ve/veya Cu	Bir kısmına uygulanabilir	3xxx	Mn	Hayır
4xx.x	Si	Hayır	4xxx	Si	Hayır
5xx.x	Mg	Hayır	5xxx	Mg	Hayır
6xx.x	Kullanımı yok	-	6xxx	Si, Mg	Evet
7xx.x	Zn	Evet	7xxx	Zn	Evet
8xx.x	Sn	Evet	8xxx	Li	Evet

Döküm veya biçimlendirilme ile elde edilen, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısı işlem durumları, ilave edilen bir veya birkaç harf ile tanımlanır. Alüminyum alaşımlarında uygulanan ısı işlemlerin standart kodlanmaları ve açıklamaları Tablo 3.3' te verilmiştir.

Tablo 3.3 Alüminyum alaşımlarında temper kodlaması.

Temper	Temper kodu	Açıklama
	F	Mekanik veya ısıtıl işlem görmemiş (döküm, dövülmüş vb.) halde
	O	Tavlınmış ve yeniden kristalleşmiş
H	H1x	Soğuk işlem uygulanmış
	H2x	Soğuk işlenmiş ve kısmen tavlınmış (x, farklı sertlikleri ifade etmektedir.)
	H3x	Sadece soğuk işlem uygulanmış ve kararlı
	H4x	Soğuk işlem uygulanmış ve malzeme yaşlanmaması için düşük sıcaklıkta ısıtıl işlemle uygulanmış (x, ısıtıl işlem sonrası sertleşme işlemini ifade eder.)
	W	Çözeltiye alınmış
T		Yaşlandırma işlemini göstermektedir.
	T1	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve doğal olarak yaşlanmış
	T2	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk deformasyon uygulanmış, doğal olarak yaşlanmış
	T3	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma uygulanmış
	T4	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlanmış
	T5	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve yapay yaşlandırılmış
	T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış
	T7	Çözeltiye alınmış ve stabilize edilmiş (aşırı yaşlanmış)
	T8	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş, yapay yaşlandırılmış
	T9	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlem uygulanmış
T10	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk işlem uygulanmış ve yapay yaşlandırılmış	

Özetle; kompozit malzemelerde matris olarak alüminyum ve alaşımlarının seçilme nedenleri şunlardır:

- Düşük üretim sıcaklığı
- Düşük yoğunluk
- Düşük elektrik direnci
- Yüksek termal iletkenlik
- Düşük maliyet
- Yüksek spesifik mukavemet
- İyi işlenebilirlik ve şekillendirilebilme kabiliyeti

3.3 Takviye Malzemesi Silisyum Karbürün (SiC) Genel Özellikleri

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerde tercih edilen önemli takviye malzemelerinden biri silisyum karbür (SiC)'dür. SiC malzeme yapısında kovalent bağlar (ametal-ametal bağları) içermektedir. Bu özelliğinden dolayı SiC fiberler yüksek elastisite modülü değerine sahip olmaktadır.

SiC partikül takviye malzemesinin bir diğer önemli avantajı yüksek çalışma sıcaklıklarında dahi özelliklerini koruyabilmesidir. Yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılık ve dayanım gibi özelliklerini koruyor olması açısından, ergimiş alüminyum içerisinde diğer takviye malzemelere göre daha iyidir (Xiaofan ve diğer., 2017). Diğer bir avantajı da, endüstriyel kullanım açısından ekonomik bir takviye malzemesi olmasıdır. Tablo 3.4'te silisyum karbür seramik malzemesinin özelliklerine ait bazı bilgiler yer almaktadır.

Tablo 3.4 SiC partikül takviye malzemesinin genel özellikleri.

Silisyum karbür (SiC)	Yoğunluk (g/cm³)	Ergime noktası (°C)	Elastisite modülü (GPa)	Mukavemet (MPa)	Termal iletkenlik (W/m°C)	Termal genleşme katsayısı (*10⁻⁶/°C)
	3,21	2300	400	2068	120	3,4

SiC, partikül ve fiber olarak farklı şekil ve boyutlarda kullanılabilir. Partikül olarak kullanılan ve whisker tipindeki silisyum karbürlerle üretilen metal matrisli kompozit malzemelere; ekstrüzyon, haddelme vb. kalıcı şekil değiştirme işlemleri uygulanabiliyor olması da bu malzemenin bir başka avantajlı özelliğidir.

3.4 Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Endüstride kullanımına göre, dünya pazarında en büyük payı alüminyum matrisli kompozit malzemeler almaktadırlar. Geleneksel malzemelere göre yüksek maliyetli olmalarına karşın, istenilen özellikleri sağlayabildiklerinden dolayı alüminyum matrisli kompozit malzemeler tercih sebebini oluşturmaktadır.

Özellikle 80'li yıllarda uzay, havacılık ve savunma sanayisinde meydana gelen gelişmelerle birlikte alüminyumun sektördeki kullanımı artmıştır. Uzay mekiklerinin gövde kısımlarında, uydu teknolojilerinin destek parçalarında, jet motorlarında, motor pistonlarında, fan kanatlarında, uçak kanatlarının yüzeylerinde, iniş takımlarında, bisiklet iskeletlerinde, spor malzemelerinde alüminyum matrisli kompozit malzemeler tercih edilmektedir (Sing ve Chauhan, 2016).

Metal matrisli kompozit malzemelerin değerlendirildiği endüstrilerde, bu malzemelerin üretiminde üretim hızı, maliyet, performans gibi parametreler dikkate alınmaktadır. Ancak bu parametrelerin de malzemenin kullanılacağı yere göre değerlendirilmesi esas olmalıdır. Örneğin, yüksek performans beklenen ve aynı zamanda güvenlik faktörünün de ön planda olduğu roket parçaları ve uçak kanatları gibi uygulamalarda üretilebilirlik açısından en uygun yaklaşım, üretim maliyetlerinin

göz önünde bulundurulmamasıdır. Çünkü bu tip parçalar endüstride çok kritik bölgelerde kullanılmaktadır. Daha düşük performans beklenen uygulama alanları söz konusu ise (tekstil ve spor malzemeleri üretimi gibi.) optimum üretim yaklaşımı maliyet ve üretim hızı parametrelerinin de dikkate alındığı yaklaşımdır (Özben, 2001).

Alüminyum matrisli kompozit malzemeler göstermiş oldukları yüksek spesifik mukavemet özelliklerinden dolayı otomotiv sektöründe tercih edilmektedirler (Mutlu, 1996). Geleneksel malzemelerin yerini alan alüminyum matrisli kompozit malzemeler sayesinde araçların ağırlıklarında azalma sağlanmaktadır. Ağırlık azalışına paralel olarak, yakıt tüketiminde azalma, enerji verimliliğinde artma görülmektedir. Yakıt tüketiminde azalma sayesinde CO₂ salınımında azalma sağlanmaktadır. Sonuç olarak, günümüzde gelişen endüstri ile birlikte artan hava kirliliğininde de azalma olmakta ve alüminyum matrisli kompozit malzemeler çevre dostu malzemeler kategorisinde yer almaktadır.

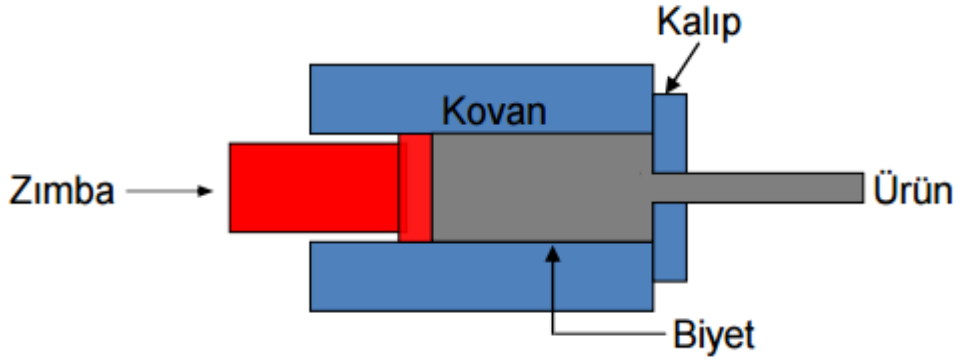
Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin bir başka tercih edilme sebebi ise, göstermiş oldukları aşınma dayanımıdır. Aşınma malzemelerde ömür ve çalışma performansını belirleyen en önemli mekanik unsurlardan biridir. Geleneksel malzemelerin kullanıldığı otomotiv parçalarında Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin kullanılması ile aşınma özelliklerinde iyileşmeler meydana gelmektedir (İlgaz, 1997). Bu sayede hem parçanın servis ömrü artırılmakta hem de kullanımı sırasındaki performansı geliştirilmektedir. Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin kullanılabileceği otomotiv parçalarına örnek olarak fren diskleri ve pistonlar gösterilebilir.

3.5 Alüminyumun Ekstrüzyonu

Ekstrüzyon, genel olarak Al, Cu, Mg gibi hafif metallerin imalatında kullanılan bir plastik şekil verme yöntemidir. Silindirik bir metal bloğun (takoz), bir alıcı (kovan) içerisine yerleştirilmesi ve sonrasında bir ıstampa aracılığıyla uygulanan basma kuvveti etkisiyle, matris adı verilen delikten geçirilmesi işlemidir. Buradaki

matris deliği ürünün kesitinin şekline sahiptir. Takoza ise döküm veya haddeleme ürünü olabilir. Ekstrüzyon yöntemi ile genellikle çubuk, şerit ve boru gibi uzun mamuller elde edilmektedir (Kayalı ve Ensari, 2000).

Alüminyum ve alaşımlarına ekstrüzyon işlemi uygulanmadan önce, ekstrüzyon basıncından etkilenip şekil değiştirebilmesi amacıyla önceden ısıtılır. Isıtılan alüminyum kovana yerleştirilir ve uygulanan basınç ile bir kalıptan geçmesi sağlanarak şekil değiştirme işlemi uygulanır (Garbacz, Giesko ve Mazurkiewicz, 2015). Bu işlem asla bir sıvı akışı değildir. Şekil 3.2’de ekstrüzyon işleminin şematik gösterimi yer almaktadır.



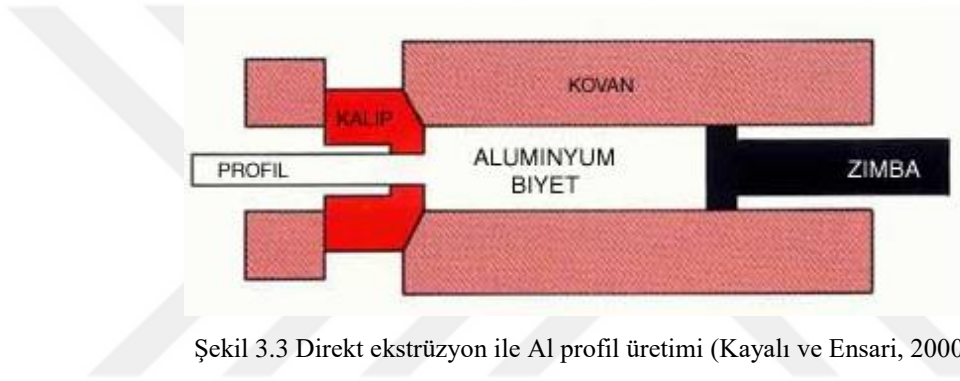
Şekil 3.2 Alüminyum ekstrüzyonunun şematik gösterimi.

Alüminyumun ekstrüzyonu aynı zamanda bir kesit daraltma işlemi olarak tanımlanabilir. Alüminyum biyetin kesiti, işlem sonrası profil kesitine indirilir. Alüminyumun ekstrüzyon yöntemi ile biyetten profile dönüştürülmesi için, alüminyum biyetin sıcaklığı 440-470 °C arasında olmalıdır. Kalıp ise 450-460 °C’ye ısıtılmalıdır. Pres işlemi sonrası profil çıkış sıcaklığı ise 500 °C civarında ölçülmelidir.

Ekstrüzyon işleminde kalıp açısı, ekstrüzyon hızı, metal takoza sıcaklığı ve yağlama ürün mekanik özelliklerini ve süreç verimliliğini etkileyen en önemli faktörlerdir. Ekstrüzyon hızı ve sıcaklığı uygun değer olmadığı takdirde malzemelerde süreç sonrası şişme meydana gelir. Bu durum ekstrüzyon işleminin başarıya ulaşmasını engeller.

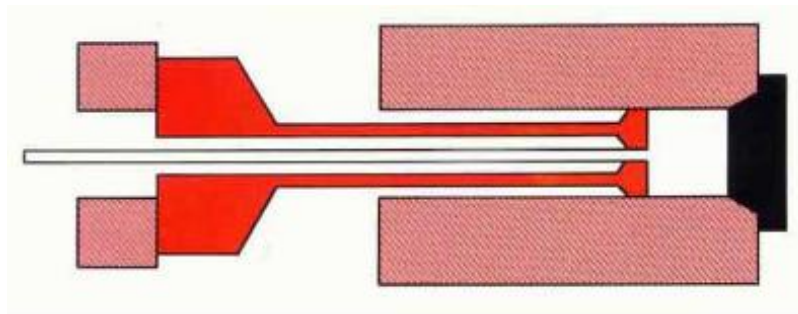
Endüstride direkt ve endirekt olmak üzere başlıca iki çeşit ekstrüzyon yöntemi kullanılmaktadır.

Direkt ekstrüzyonda, Al metal takoz alıcı kovan içerisine konur ve ıstampa yardımıyla bastırılır. Matris içinde geçerek ürün çıkar. Şekil 3.3'te direkt ekstrüzyon işlemi ile Al profil üretimi şematik olarak yer almaktadır (Kayalı ve Ensari, 2000). Bu metotta, Al metal takozun son aşamalarda artan kuvvet ihtiyacından dolayı artık malzeme kalıba giremez ve kesilip atılır. Malzeme hacminin %18-20'si artık malzemedir. Al metal takoz ve alıcı kovan arasındaki sürtünme miktarı yüksektir.



Şekil 3.3 Direkt ekstrüzyon ile Al profil üretimi (Kayalı ve Ensari, 2000).

Endirekt ekstrüzyonda ise Al metal takoz sabittir, kalıp Al metal takoza doğru hareket halindedir. Şekil 3.4'te endirekt ekstrüzyon işlemi ile Al profil üretimi şematik olarak yer almaktadır (Kayalı ve Ensari, 2000). Bu metotta, alıcı kovan ve Al metal takoz arasında sürtünme olmamaktadır. Ürün ıstampa içinde kalır. Artık malzeme, direkt ekstrüzyon ile kıyaslandığında hacmin %5-6'sı kadardır.



Şekil 3.4 Endirekt ekstrüzyon işlemi ile Al profil üretimi (Kayalı ve Ensari, 2000).

Ekstrüzyon işlemi sıcaklığa bağlı olarak soğuk veya sıcak olarak gerçekleştirilebilir. Soğuk ekstrüzyon oda sıcaklığında yapılırken, sıcak ekstrüzyon daha yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır.

Soğuk ekstrüzyon dövme ve ekstrüzyon işlemlerinin bir kombinasyonu olarak düşünülebilir. Boyutları daha küçük metal takozların ekstrüde edilmesi soğuk olarak yapılır. Eğer sürtünme ısısı yeniden kristalleşme sıcaklığına kadar ulaşamaz ve o sıcaklıkta kalamazsa pekleşme gerçekleşir ve mekanik özellikler iyileşir. Yağlama işleminin önemli bir parametre olduğu oda sıcaklığında gerçekleşen bu ekstrüzyon şeklinde, son ürün boyut toleransları da oldukça iyidir. Soğuk ekstrüzyonda oksit filmi oluşmadığı gibi, ısıtma işlemi yapılmadığı için enerji verimliliği de sağlanmaktadır.

Metaller ve alaşımlarının pek çoğu oda sıcaklığında şekil verilebilirlik açısından yeterince sünek değildir. Bu problemi oradan kaldırmak amacıyla sıcak olarak ekstrüzyon uygulanmaktadır. Sıcak ekstrüzyonda kuvvet ihtiyacı daha azdır. Isınan metal takozlarda aşındırıcı bir oksit filmi oluşmaktadır. Bunun için ön levha kısmına hafif boyut daraltması uygulanır ve bu problem çözülür.

BÖLÜM DÖRT

ISIL İŞLEM

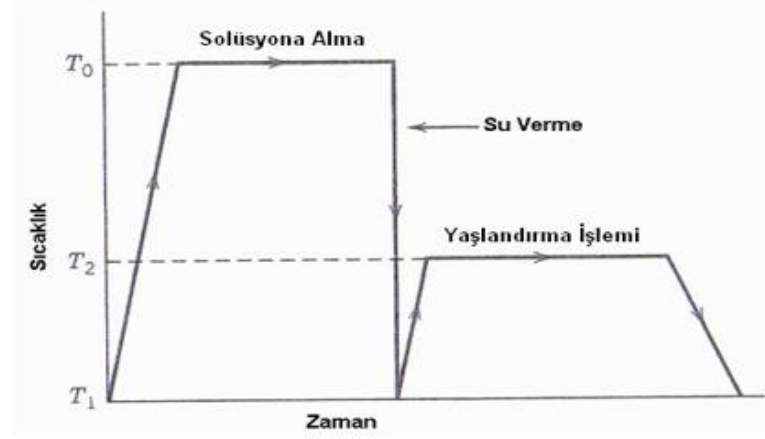
4.1 Giriş

Isıl işlemler genel olarak, bir metal veya alaşımlarına katı halde mekanik özelliklerini, metalurjik yapısını değiştirmek, kalıntı gerilmeleri gidermek amacıyla uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma evrelerinden oluşan işlemler olarak tanımlanabilir (Davis, 1993). Isıl işlemler; tavlama, sertleştirme, yüzey sertleştirme ve yaşlandırma olmak üzere dört ana grupta incelenebilir.

Alüminyum ve alaşımlarına genellikle tavlama, çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmaktadır. Yaşlandırma ısıl işlemi yalnızca faz denge diyagramında solvüs eğrisi içeren alaşımlara uygulanabilir. Sadece solvüs eğrisi ile sınırlanan katı eriyik bileşimleri yaşlandırma ısıl işlemi için uygundur. Yani alaşım elementinin katı eriyikteki çözünme miktarı sıcaklıkla artmalıdır.

4.2 Çökelme Sertleşmesi Isıl İşlemi

Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla sıklıkla uygulanan ısıl işlem yaşlandırmadır. Isıl işlem çözeltiye alma (solüsyona alma), su verme ve yaşlandırma (çökelme) evrelerinin birbiri ardına uygulanmasıyla gerçekleştirilir. Çökelme sertleşmesi olarak da adlandırılan bu ısıl işlemde amaç, ikinci bir fazın matris içerisinde katı çözeltiden çökmesiyle alaşımın mukavemetinin artırılmasıdır. Tipik bir yaşlandırma ısıl işleminin aşamalarını gösteren grafik Şekil 4.1’de verilmektedir.

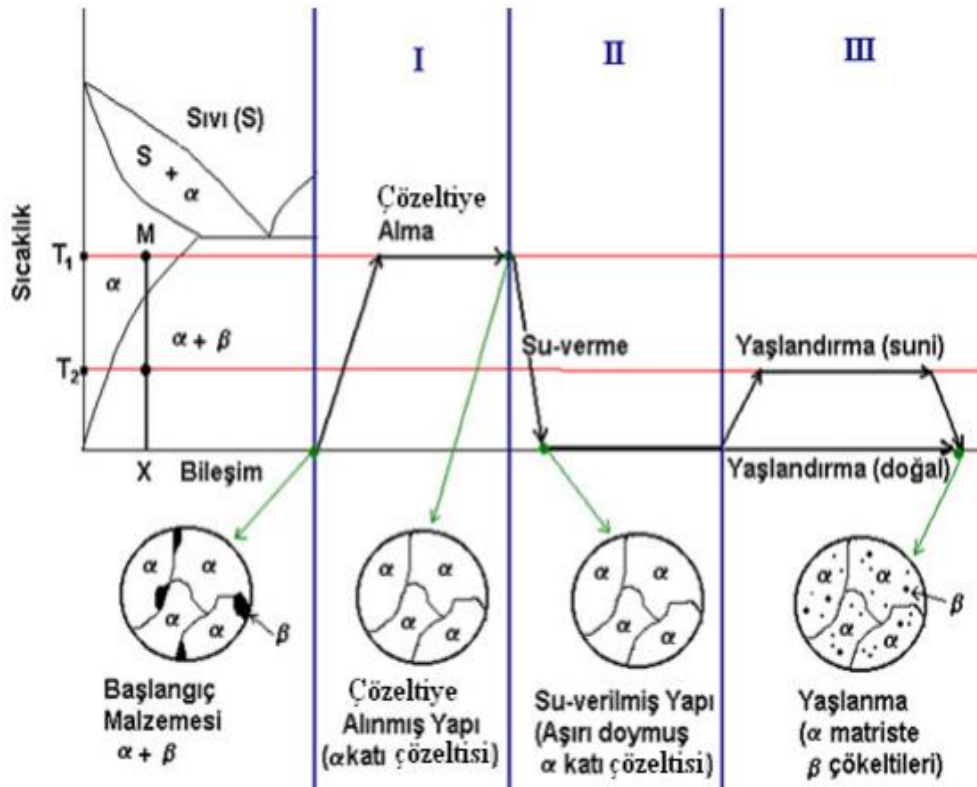


Şekil 4.1 Tipik bir yaşlandırma ısıl işleminin aşamaları.

4.2.1 Çözeltiye Alma

Çökelme sertleşmesi ile malzeme dayanımını artırmada ilk aşama çözeltiye alma (solüsyona alma) aşamasıdır. Çözeltiye alma işlemi ile tek fazlı katı çözelti eldesi amaçlanır. Bunun için faz diyagramında solvüs eğrisi içeren alaşım, bu eğrinin üzerindeki bir sıcaklığa çıkarılır ve bu sıcaklıkta mukavemet artırıcı alaşım elementleri maksimum oranda katı eriyik içerisine alınır. Isıtılan bu sıcaklık, alaşımın ötektik dönüşüm sıcaklığının altında, solvüs eğrisinin üstünde bir sıcaklık olmalıdır (Kayalı ve Ensari, 2000). Şekil 2'deki T_0 sıcaklığı, çözeltiye alma sıcaklığını temsil etmektedir. Çözeltiye alma sıcaklığı, alaşımın kompozisyonuna bağlı olduğundan, işlemin gerçekleştirilmesinden önce içerdiği alaşım elemanı tayini yapmak, işlemin sağlıklı olması açısından faydalıdır.

Alüminyum alaşımlarında bu sıcaklık, alaşımın kompozisyonuna da bağlı olarak yaklaşık 525-545 °C sıcaklık aralığındadır. Bu sıcaklık aralığına ısıtılan alaşımda, mukavemetleştirici alaşım elementlerinin tamamı katı çözelti içerisinde tek faz halinde bulunur. Şekil 4.2'de ikili faz diyagramı üzerinden çökelme sertleşmesi ısıl işleminin çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma adımlarında meydana gelen mikroyapısal değişiklikler gösterilmiştir. Buna dayanarak, kütlece %x B içeren bir AB alaşımı, çözeltiye alma sonucunda çökelmeyi sağlayan β fazı α katı eriyiği içerisinde çözünmüştür ve I numaralı bölgede yer alan tek fazlı α katı çözeltisi mikroyapısı elde edilmiştir.



Şekil 4.2 Çökeltme sertleşmesi sırasında meydana gelen mikroyapısal değişimler (Smallman, 1970).

4.2.2 Su Verme

Çökeltme sertleşmesi ısı işleminin en önemli adımı olarak düşünülebilir. Su vermede amaç solüsyona alma işlemiyle oluşturulan aşırı doymuş katı eriyiğin bu sıcaklıktan hızla soğutulması ile difüzyon gerçekleşmesine fırsat vermeden oda sıcaklığına soğutulmasıdır (Aydın, 2002). Hızlı soğutma yapılmadığı takdirde, örneğin alaşım kendiliğinden yavaş soğumaya bırakılırsa, α katı eriyiğinin içinde hapsolan β fazı, heterojen bir şekilde çekirdeklenir, $\alpha + \beta$ fazı oluşturur ve çökler. Bu durumda alaşımın şekil değiştirme kabiliyeti azalır ve taneler arası korozyon mukavemeti de düşer (Doğan, 1989). Su verme işlemi ile ani soğuma sağlanmış olur ve difüzyona fırsat verilmeksizin α katı eriyiğinin içindeki β fazının çökmesi engellenmiş olur. Bunun sonucunda Şekil 4.2’de, II numaralı bölgedeki aşırı doymuş α katı çözelti mikroyapısı elde edilir.

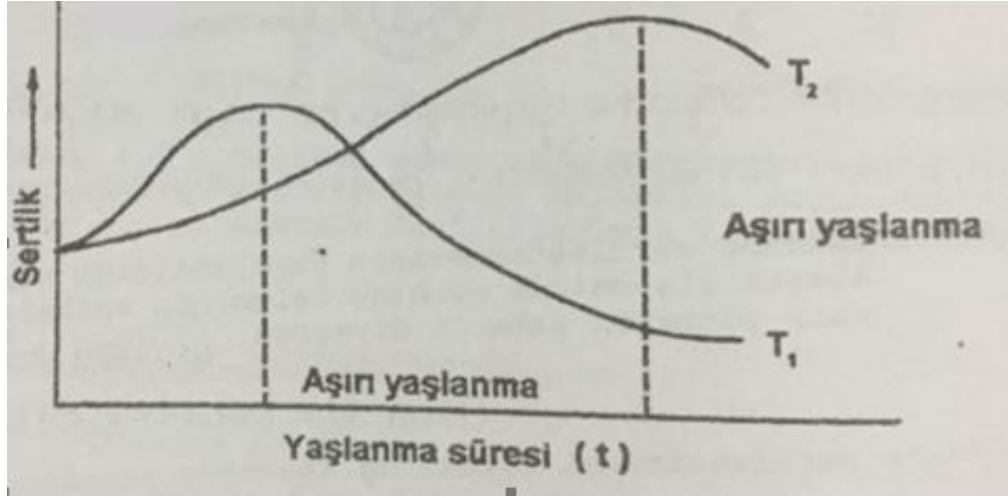
Su verme işlemi sırasında soğutma için genel olarak su kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, madeni yağlar, suda çözülen polimerik yağlar ya da alkol-su karışımları da

soğutma ortamı olarak kullanılabilir. Su verme sırasında sağlıklı bir çökeltme olmaması için fırın ve soğutma ortamı arasındaki süre kısa olmalıdır. Ayrıca, su verme işlemi için kullanılan ortamın ısıyı absorblama katsayısı küçük olmalıdır.

4.2.3 Yaşlandırma

Çökeltme sertleşmesinin, ikinci adımı olan su verme işlemi sonrasında elde edilen aşırı doymuş α katı çözeltilisinden sıcaklık etkisiyle β fazlarının çökeltmesi üçüncü ve son adım olan yaşlandırma evresini oluşturur. Bu evrede alaşım oda sıcaklığında veya belirli bir süre uygun sıcaklıklarda tutulur. Eğer alaşım oda sıcaklığında tutularak yaşlandırma yapılıyorsa, bu tip yaşlandırma doğal yaşlandırma olarak adlandırılırken, belirlenmiş uygun sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işlemi ise yapay yaşlandırma olarak adlandırılır. Yaşlandırma esnasında aşırı doymuş katı eriyik ayrışır ve sert ikinci faz oluşur. Bu durum alaşımın mukavemetlenmesini sağlar.

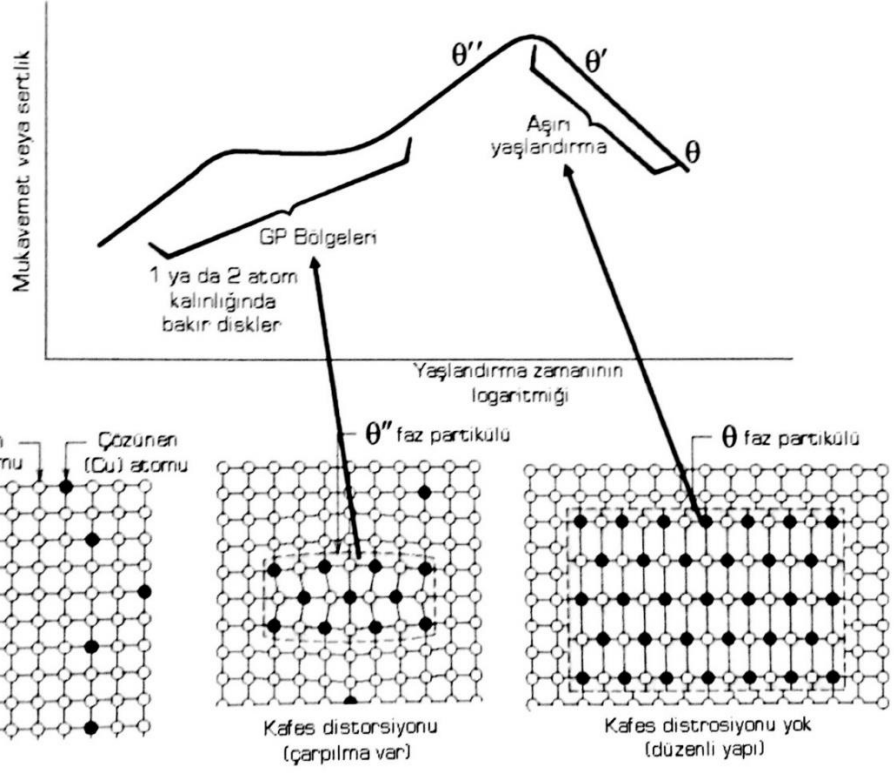
Çökeltmenin başlangıcında oluşan çökeltelerin boyutları çok küçük olduğundan çökelteler deformasyon uygulandığı zaman dislokasyonların hareketlerini çok az etkileyebilirler. Bu sebeple malzemenin sertlik ve mukavemet değerlerinde kayda değer bir değişiklik gözlenemez. Fakat çökeltelerin boyutlarında artış meydana geldiğinde, dislokasyon hareketlerinin önemli ölçüde sınırlandırılmasıyla, malzeme mukavemeti artar. Sabit bir sıcaklıkta malzemenin yaşlanma süresine bağlı olarak sertliğinde meydana gelen değişim Şekil 4.3'te gösterilmiştir ve grafikte T_1 sıcaklığı T_2 sıcaklığından daha büyüktür (Kayalı ve Ensari, 2000). Buradan da anlaşılacağı üzere, yaşlanma süresinin fazla uzun tutulması, mekanik özellikler açısından istenilen faydayı sağlamaz. Bir süre sonra mukavemet artışını sağlayan çökeltelerin boyutları difüzyon etkisiyle çok büyür ve çökelti sayısında azalma meydana gelir. Büyük çökelteler malzemenin sertliğinin düşmesine neden olur. Bu olay, literatürde aşırı yaşlanma (overaging) olarak adlandırılır.



Şekil 4.3 Sıcaklık ve yaşlandırma süresiyle alaşımın mukavemetinin değişimi (Kayalı ve Ensari, 2000).

4.3 Alüminyum Alaşımlarında Çökeltme Sertleşmesi Isıl İşlemi

Çökeltme sertleşmesi mukavemet artırıcı işlemin mekanizmasının alüminyum-bakır alaşımları üzerinden değerlendirilmesi yapıldığında; alüminyum-bakır alaşımlarının çökeltme sertleşmesinde; sertleşmenin meydana geldiği ilk kademelerde bakır atomlarının “ α ” katı çözültisi içindeki birçok noktada olmak üzere bir veya iki atom kalınlığında ve yaklaşık 25 atom çapındaki çok ince diskler şeklinde bir araya gelerek kümelenmesine “Guinier-Preston (GP) bölgeleri” adı verilir. GP bölgeleri çok küçük boyutta oldukları için, henüz bir çökelti parçacığı olarak anılmazlar. Fakat bakır atomlarının zamanla yayınmasıyla bu atom topluluklarının boyutu da büyür ve kristal yapı oluşturarak birer faz parçacığı haline gelir. Çökelen parçacıklar θ kararlı faz yapısına kavuşmadan önce, sırasıyla θ'' ve θ' olarak gösterilen iki geçiş fazını oluşturur. Şekil 4.4'te θ fazının çökeltmesi esnasında meydana gelen fazlar ve sertliğe etkileri gösterilmektedir (Smallman, 1970). Al-Cu alaşımlarında, çökelti fazı olan θ , CuAl_2 iken; AlSiMg alaşımlarında çökelti fazı olan θ , Mg_2Si bileşikleridir. Çökeltme sertleşmesi sırasında ilk oluşan GP bölgeleri geçirimli elektron mikroskobu yardımıyla görülebilir iken, ısıtma ile GP bölgeleri çözülmeye başlar ve θ'' çökeltileri oluşur. Sonrasında oluşan θ' çökeltileri optik mikroskopta görülebilecek ilk çökeltilerdir. Yaşlandırma işlemi sonunda oluşan θ çökeltileri ise denge çökeltileridir.



Şekil 4.4 θ fazının çökmesi sırasında meydana gelen fazlar ve sertliğe etkileri (Smallman, 1970).

BÖLÜM BEŞ

TRİBOLOJİ

5.1 Giriş

Günümüzde gelişmiş malzemelerin endüstride kullanım oranlarının artmasıyla birlikte, kullanıldığı veya kullanılacağı yere göre bu malzeme veya malzeme sistemlerinden beklenen işlev, kalite ve performans özellikleri üzerine çalışmaların artmasını sağlamıştır (Czichos, Klaffke, Santner ve Woydt, 1995). Bütün endüstriyel sistemlerde gelişmiş özelliklerin belirlenmesinde malzeme faktörü anahtar rol üstlenmektedir. Gelişmiş malzeme kavramının altında yatan tanıma bakılacak olursa, bu tip malzemelerden yüksek performans, uzun kullanım ömrü, yüksek verimlilik, düşük enerji tüketimi ve üretilebilirlik kavramlarına rastlanmaktadır. Bütün bu kavramları niteleyen önemli olgulardan biri de malzemelerin gelişmiş tribolojik özelliklere sahip olmasıdır.

Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlama konularını inceleyen bilim ve teknoloji dalıdır. Triboloji kelimesi, Yunanca tribo ve logos sözcüklerinden türetilmiştir. ‘Tribo’ kelimesi sürtünme, ‘logos’ kelimesi prensip/mantık anlamlarına gelmektedir.

Triboloji biliminin alt disiplinlerinden biri olan sürtünme olayı, meydana geldiği sistemlerde güç kaybına yol açmaktadır. Aşınma ise malzemelerde boyut hassasiyetlerinin bozulmasına ve güvenli kullanım ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır. Öte yandan, bir diğer alt disiplin olan yağlama konusu da sürtünme ve aşınmayı etkileyen doğal mekanizmaların bulunması açısından büyük önem taşımaktadır.

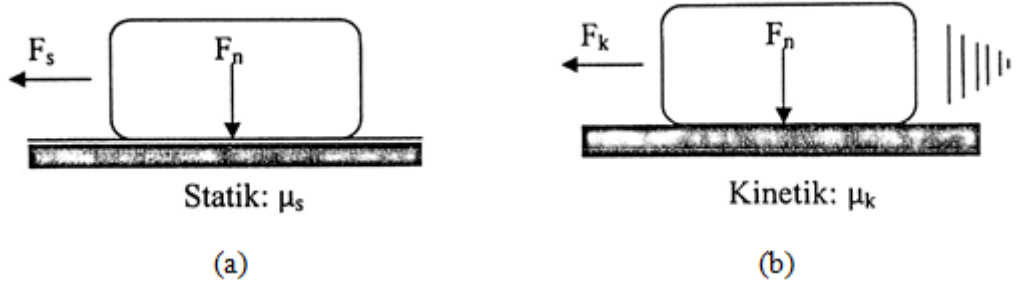
5.2 Sürtünme

Sürtünme, teknik olarak birbiri ile temas halinde olan ve birbirlerine göre bağlı hareketli ya da hareket etme eğiliminde olan iki cismin bu harekete karşı göstermiş oldukları direnç olarak tanımlanmaktadır. İki malzeme birbiri ile temas edecek

şekilde yerleştirildiğinde, malzemelerin birbiri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete dik yönde olacak şekilde bir sürtünme kuvvet başka bir deyişle sürtünme direnci oluşur. Kaymayı başlatan kuvvet F_s ile temas yüzeyine etki eden kuvvet F_n arasında (5.1) numaralı bağıntı bulunmaktadır.

$$F_s = \mu_s \cdot F_n \quad (5.1)$$

Yukarıdaki bağıntıda yer alan μ_s statik sürtünme katsayısıdır. Şekil 1(a)'daki malzemelerin herhangi birine teğet bir kuvvet uygulandığında, iki farklı durum ortaya çıkabilir. Bu durumlardan ilkinde, teğet kuvvetlere rağmen cisimler herhangi bir şekilde birbiri üzerinde kayma hareketi yapmazlar, yani hareket etmezler. Böyle bir durumda, hareket olanağı olmadığı için, temas yüzeyleri arasında statik sürtünme denilen bir direnç oluşmaktadır. Cisim hareket etmediği için, yüzeyler arasındaki sürtünme kuvveti, cisme etkiyen teğetsel kuvvetlerin toplamına eşit, ters yöndedir.



Şekil 5.1 Statik ve kinetik sürtünme katsayıları.

İkinci bir durum ise teğetsel kuvvet ya da kuvvetlerin etkidiği yüzeyler birbiri üzerinde kayma hareketi yaparlar. Şekil 5.1 (b)'ye bakıldığında, kinetik ya da dinamik sürtünme denilen bu durumda, sürtünme kuvveti teğetsel kuvvet değerinden daha küçüktür ve yine hareket yönüne terstir. Kinetik sürtünme için sürtünme katsayısı (2) numaralı bağıntı kullanılarak hesaplanabilir. (5.1) ve (5.2) numaralı bağıntılarda yer alan μ_s ve μ_k değerleri statik ve dinamik sürtünme katsayısı değerleridir.

$$F_k = \mu_k \cdot F_n \quad (5.2)$$

Kayma hareketi başladıktan sonra, sürtünme kuvvetinde bir azalma olmaktadır. Bu durumda kinetik sürtünme katsayısının, statik sürtünme katsayısından daha küçük olduğuna dair yorum yapmak mümkündür.

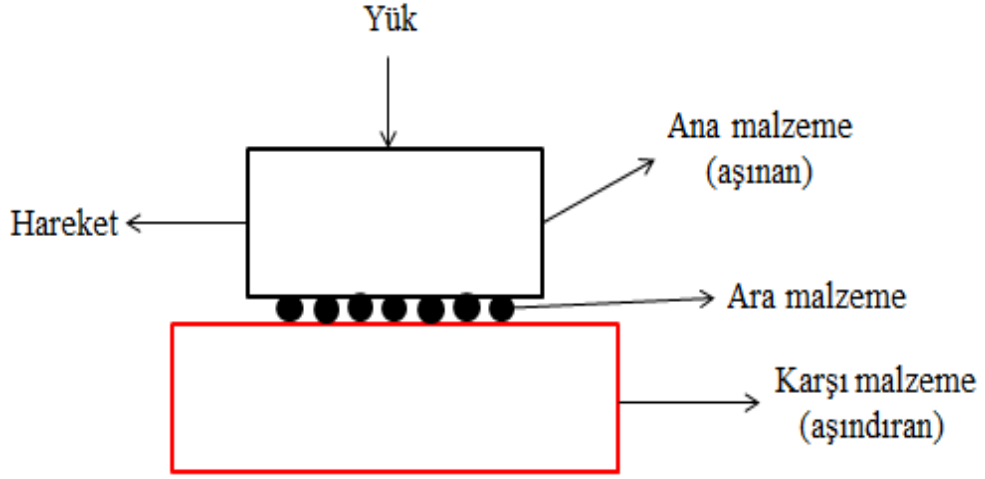
Sürtünme konusunda dikkat edilmesi gereken sürtünme katsayısı dışında bir diğer önemli husus, yüzey pürüzlülüğüdür. İsteddiği kadar hassas şekilde işlenmiş ve parlatılmış olsun, eğer iki yüzey birbiri ile temas ederse, gerçek temas yüzeylerdeki pürüzlerin birbirine değdiği noktalarda meydana gelmektedir. Bu durumda, yüzey alanı tümüyle değil, pürüzlerin olduğu belirli bir alanla yükü taşımaktadır.

5.3 Aşınma

Aşınma, kimyasal veya mekanik ya da her ikisinin birlikte oluşturduğu etkiler ile bir yüzeyden bir başka yüzeye malzeme transferi veya yüzeyden parçacık kopmasıyla oluşan malzeme kaybıdır (Yıldız ve Gür, 2006). Temas halindeki yüzeylerden malzeme kaybı bölgesel erimeler, yüzeyden fiziksel olarak ayrılmalar ve kimyasal çözünme olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleşebilir. Pratikte daha çok malzeme yüzeyinden fiziksel anlamda oluşan ayrılmalar aşınmanın kapsamında incelenmektedir. Birbirine temas eden yüzeylerde oluşan aşınma endüstride büyük ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Son yıllarda, aşınma ile ilgili emniyet kayıpları ve aşınma problemlerini minimuma indirmek için yapılan çalışmaların sayısı artmıştır.

Bir aşınma sistemini irdeleyebilmek için onu oluşturan aşağıdaki temel öğelerin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu öğelerin oluşturduğu sistem “tribolojik sistem” olarak adlandırılmaktadır (Yılmaz, 1997). Tribolojik sistemi oluşturan öğelerin şematik gösterimi Şekil 5.2’de verilmiştir.

- Ana malzeme(aşınan)
- Karşı malzeme(aşındıran)
- Ara madde
- Yük
- Hareket



Şekil 5.2 Tribolojik sistemi oluşturan unsurlar.

Aşınmada önemli olan bir diğer parametre de çevredir. Tribolojik sistem elemanlarının korozif ve nem gibi çevresel etkilere maruz kalması aşınmayı hızlandırmaktadır.

5.3.1 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen faktörler; ana malzeme kaynaklı faktörler, karşı malzeme kaynaklı faktörler, ortam ve servis koşullarına bağlı faktörler olarak dört ana grupta incelenebilir.

Ana malzemenin sahip olduğu kristal yapı, sertlik, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler aşınmayı etkilemektedir. Örneğin, ana malzemenin mikroyapısını oluşturan fazlar ve bu fazların tane boyutları mekanik özelliklere etki eder ve malzemenin sahip olduğu mekanik özellikler de doğrudan aşınma direncini etkilemektedir. Karşı elemana bağlı faktörlerden tane büyüklüğü, şekli ve dağılımı gibi parametreler de aşınma üzerine etki sahibi olan unsurlardandır. Örneğin, artan tane büyüklüğü malzemede aşınmayı azalttığı bilinmektedir. Ayrıca aşındırıcı malzeme tanelerinin küresel şekilli olması, keskin hatlı tanelerle kıyaslandığında aşınmayı azaltmaktadır.

Bir diğeryandan, aşınma olayı nem, sıcaklık, atmosfer gibi ortam şartlarından ve basınç, kayma yolu, kayma hızı gibi servis koşullarından da etkilenmektedir. Birbiri ile temas eden bölgelerde sıcaklık artışı meydana gelir. Artan sıcaklık da malzemelerin sahip olduğu fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri üzerinde birtakım değişikliklere sebep olur ve bu durum da aşınmayı doğrudan etkilemektedir (Abhok, 1978). 1999 yılında alüminyum alaşımlarından biri olan A356 alaşımının aşınma özelliklerinin incelenmesi amacıyla Japonya’ da yapılan çalışmada, numunelere farklı yükler uygulanmış ve artan yük ile birlikte birim yük başına düşen aşınma miktarının arttığı görülmüştür (Chen, Iwabuchi ve Shimizu, 1999).

5.3.2 Aşınma Mekanizmaları

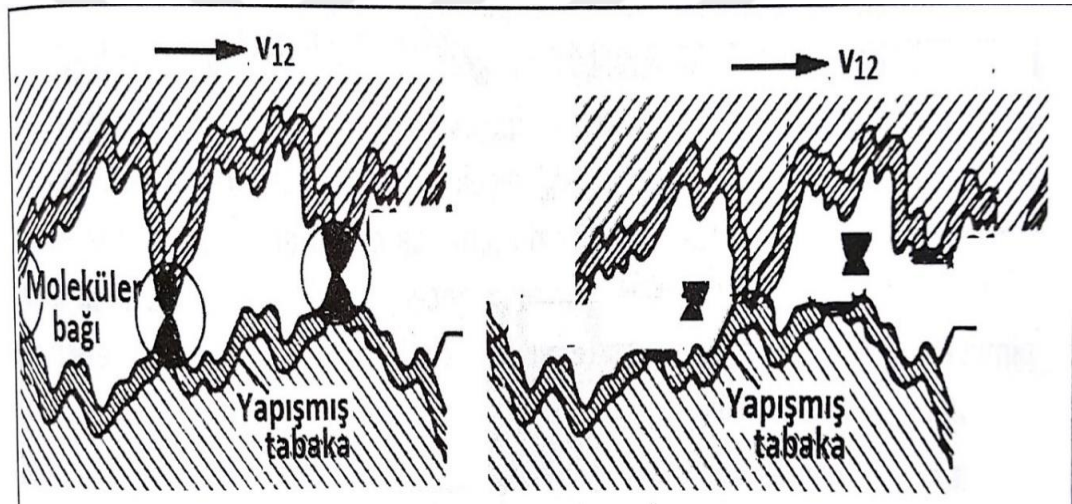
Aşınma dinamik parametrelerden, çevreye bağılı unsurlardan ve malzeme özelliklerinden meydana gelen bir tribolojik sistemde nispeten küçük bir değişme ile aşırı derecede değişir. Aşınma bir malzeme özelliği değildir. Aşınma bir sistem cevabıdır (Bhushan, 2001). Literatürde pek çok aşınma mekanizması vardır. Ancak bunlardan en önemlileri, oluşum mekanizması açısından sınıflandırıldığında karşımıza çıkan adhesiv aşınma, abrasif aşınma, mekanik korozyon ve yüzey yorulması aşınmalarıdır. Bu aşınma türleri, aşınmanın meydana geliş şekli hakkında bize bilgi vermektedir.

5.3.2.1 Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma; yapışma, ovalanma ve kavrama aşınması olarak da bilinmektedir. Özellikle birbiri ile kayma sürtünmesi yapan, metal-metal aşınma çiftlerinde oluşan kaynaklanma olayının sonucunda görülmektedir. Birbiri üstünde kayan yüzeylerdeki gerilmeler, çok küçük yüklemeler altında dahi akma gerilmesi sınırına ulaşmaktadır ya da bu sınırı aşmaktadır. Bu şekilde, temas eden metal çifti arasında yapışma kuvvetleri etkili olur. Bu sebeple, bir parçadan diğeryine malzeme transferi, soğuk kaynaklaşma ve küçük parçaların kopması olayları meydana gelmektedir. Bir başka deyişle adhesiv aşınma, metal çiftlerinin temas yüzeylerinde yüksek mekanik gerilme sonucu mikrokaynak bölgelerinin oluşması temeline

dayanmaktadır. Görülen en yaygın aşınma mekanizmasıdır ve genel anlamda aşınma kavramı bu aşınma için kullanılmaktadır. Adhesiv aşınmanın oluşma şekli Şekil 5.3'te gösterilmektedir (Akkurt, 2012).

Metal çiftinin sürtünen yüzeylerinde oksit veya nem kaynaklı natürel tabakanın oluşması adhesiv aşınmayı etkileyen faktörlerdendir. Metal çiftinin yüzeylerinden birinin sertliği diğerinden daha büyük ise kaynak bağlarının kopması daha düşük sertlikteki malzemede meydana gelir. Dolayısıyla malzeme transferi daha düşük sertlikteki malzemeden daha yüksek sertlikteki malzeme yüzeyine doğru gerçekleşir. Sürtünen yüzeyler arasında sert malzeme parçacıkları var ise abrasif aşınma meydana gelir ve adhesiv aşınma görülmez (Akkurt, 1982).



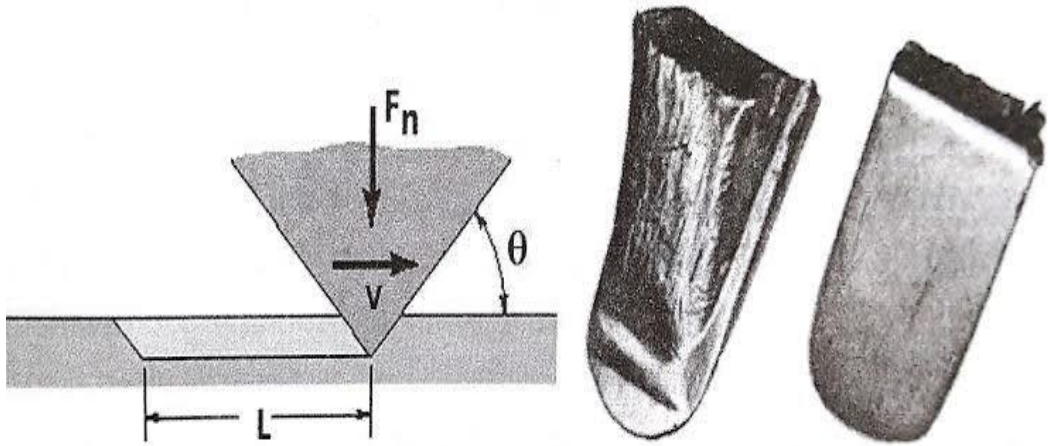
Şekil 5.3 Adhesiv aşınmanın oluşması (Akkurt, 2012).

Adhesiv aşınmayı önlemek için, metal çiftinin sürtünen yüzeyleri iyi şekilde yağlanmalıdır ve uygun yağlayıcı katkıları kullanılmalıdır. Ayrıca kullanılan malzeme sertliğinin artırılması da adhesiv aşınmayı azaltan önemli parametrelerdendir. Bir başka şekilde ifade edilecek olursa, birlikte çalışacak malzeme çiftleri uygun olarak seçilmelidir. Çünkü adhesiv aşınma benzer ve birbiri ile kolay alaşımlanabilen malzemelerde görülmektedir.

5.3.2.2 Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, yırtılma veya çizilme aşınması olarak da bilinmektedir. Çok önemli bir aşınma mekanizmasıdır. Bu aşınma türü, biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbiri ile temas anında iken kayma esnasında meydana gelmektedir. Abrasif aşınmada, yüzeylerin bozulması, dışarıdan yüzeyleri arasına giren toz, talaş veya doğrudan eş çalışan sert malzemelerin yüzeylerinden kopan veya oksidasyon gibi başka nedenlerle oluşan sert parçacıkların etkisi ile meydana gelmektedir (Akkurt, 2012). Bu oluşan parçacıklar tıpkı zımpara tozu gibi yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yapmaktadır. Abrasif aşınma olayının modeli ve bazı örnekleri Şekil 5.4'te gösterilmektedir.

Abrasif aşınma, endüstriyel makinelerde ve cihazlarda malzeme kaybının başlıca sebebinin oluşturmaktadır. Aşındırıcı malzeme serbest biçimde iki metal arasında ise ya da sadece bir metali aşındıran sabit veya serbest parçacıklar var ise, bu durumda abrasif aşınma *iki elemanlı* ve *üç elemanlı* abrasif aşınma olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bu durumda, araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro talaşlar ve parçalanmış oksitler üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturmaktadır.



Şekil 5.4 Abrasif aşınma olayının modeli ve örnekleri (Akkurt, 2012).

Abrasif aşınmada önemli olan parametre yüzey sertliğidir. Yüzeylerin sertliği; sementasyon, nitrürasyon gibi ısıtılma işlemi veya sert malzeme kaplanması ile elde

edilebilir. Abrasif aşınmayı önlemek için alınacak önlemler, şu şekilde özetlenebilir:

- Yüzeyler sertleştirilmelidir,
- Dışarıdan sert madde parçacıkların yüzeyler arasına girmemesi için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalıdır,
- Makine ve cihazlar talaştan ve diğer pisliklerden sık sık temizlenmelidir (Yılmaz, 2013).

5.3.2.3 Yüzey Yorulma Aşınması (Çukurlaşma)

Yüzey yorulma aşınması, temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması biçiminde kendini göstermektedir. Yorulma aşınmasında temas halindeki yüzeyler arasında dinamik bir ilişki söz konusudur. Temas halindeki yüzeyler, ortam ile reaksiyon verir ve reaksiyon sonucu oluşan ürünler çatlak oluşumu ve abrasif aşınmaya sebep olurlar (Bhushan ve Gupta, 1991).

Hafif ve şiddetli olmak üzere iki çeşit yorulma aşınması mevcuttur. Hafif yorulma aşınmasında çukurcuklar çok küçüktür ve büyümezler, yüzeylerde kümeler halinde kalırlar. Şiddetli yorulma aşınmasında ise çukurcuklar zaman içinde büyürler ve tüm yüzeye yayılırlar. Hafif yorulma aşınması genellikle malzeme çiftinin normal seyrinde çalışmasını engelleyici etki yapmaz, ancak şiddetli yorulma durumunda sistem çalışması bozulma durumuna gelebilir.

Yorulma aşınması yuvarlanma hareketi yapan parça yüzeylerinde, özellikle rulmanlar, dişli çarklar gibi makine elemanlarında görülmektedir.

5.3.2.4 Korozyon Aşınması

Korozyon, metalik yüzeylerin, hava ve/veya nem ortamında bulunan elementlerle kimyasal reaksiyona girmesi sonucu oluşan bir malzeme yıpranmasıdır. Aşınan yüzeyler aynı zamanda korozif etkilere de uğrarsa buna korozif aşınma adı verilmektedir. Korozyon aşınması kendi başına oluşabildiği gibi diğer aşınma türleri ile birlikte de meydana gelebilir. Oksidasyon bakımından alüminyum ve alaşımları

özel bir durumda bulunmaktadır. Oksijen ile kimyasal reaksiyon sonucu, bu malzemelerin yüzeyinde yaklaşık 0,02 µm kalınlığında bir tabaka oluşmaktadır. Bu tabakanın oluşmasından sonra kimyasal reaksiyon durur ve bu tabaka malzemeyi oksidasyona karşı korur. Bu nedenle oksidasyon tehlikesi altında olan ortamlarda, ancak malzemelerin sahip olması gereken mukavemet şartı yerine getirildiği takdirde, bu malzemelerden yapılan makine elemanları kullanılmaktadır (Akkurt, 2012). Oksidasyon aşınmasını önlemek amacıyla yüzeylere klorit, fosfat veya sülfite ile işlem uygulanır ya da oksidasyonu önleyen özel yağlayıcı maddeler ile kullanılırlar.



BÖLÜM ALTI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Giriş

Bu çalışma kapsamında farklı SiC partikül miktarına sahip alüminyum matrisli kompozit numunelere mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla farklı sürelerde ısıtma işlemleri uygulanmıştır. Isıtma işlem uygulamasının ardından numunelerin sertlik ölçümleri alınmış ve aşınma testleri yapılmıştır. Sonuçlar literatür ışığında yorumlanmış ve ayrıntılı bir şekilde raporlanmıştır.

6.2 Malzeme

Kullanılan kompozit malzemenin matrisini AlSi5Mg alaşımı oluşturmaktadır. Alüminyum alaşımının bileşimi Tablo 6.1’de yer almaktadır.

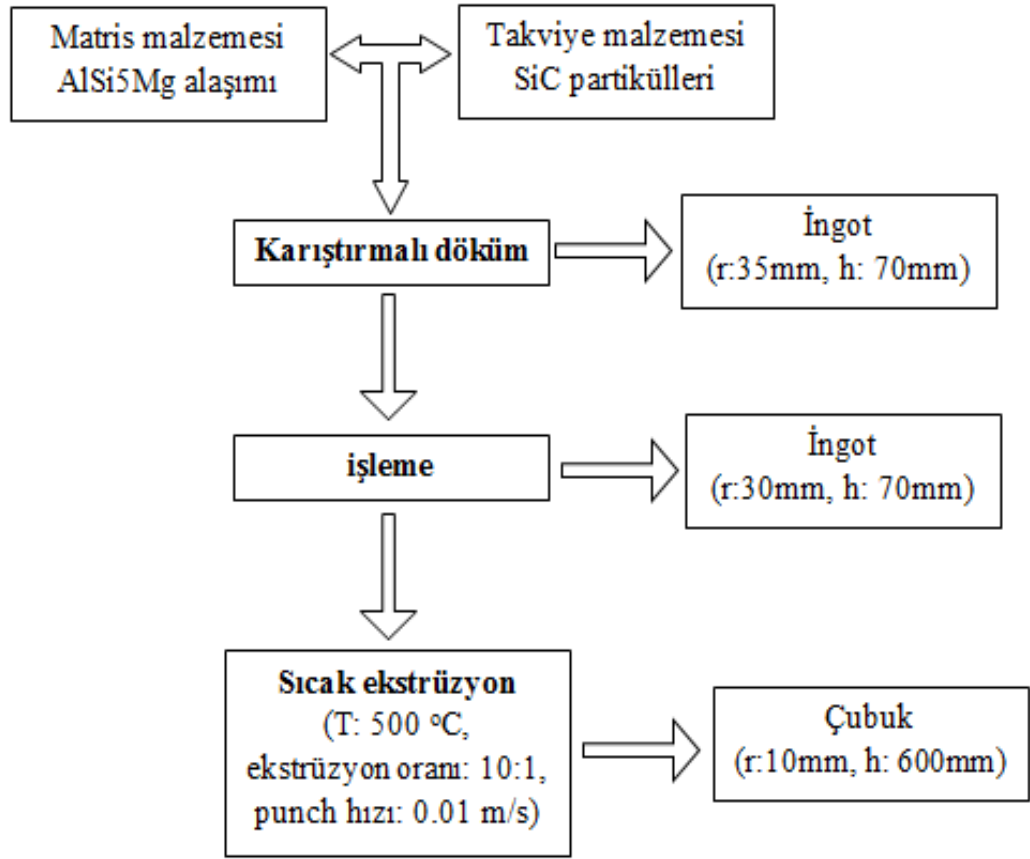
Tablo 6.1 Matris malzemesinin kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %).

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
AlSi5Mg	5,0	0,3	0,003	0,4	0,2	0,10	0,20

Takviye malzemesi olarak %23,4, %30,1 ve %36,8 olmak üzere farklı hacimsel oranlara sahip, ortalama 10-15 µm boyutlarında SiC partiküller kullanılmıştır. SiC partiküllerin genel özellikleri Tablo 3.4’te verilmiştir.

6.3 Deney Numunelerinin Üretimi

Bu çalışmada kullanılan numunelerin üretimleri, 2001 yılında Prof. Dr. Ümit Cöcen ve Prof. Dr. Kazım Önel tarafından İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde, aşağıdaki Şekil 6.1’de yer alan üretim şemasına göre gerçekleştirilmiştir (Cöcen ve Önel, 2002).



Şekil 6.1 Deneylerde kullanılan numunelerin üretim şeması.

Sıcak ekstrüzyon ürünü olan 10 mm çaplı ekstrüze çubuklardan 15 mm boyunda numuneler kesilmiştir. Kesilen numunelere T6 temper kodlu çökeltme sertleşmesi ısıl işlemi uygulanmış, ardından gerekli ölçümler ve testler yapılmıştır.

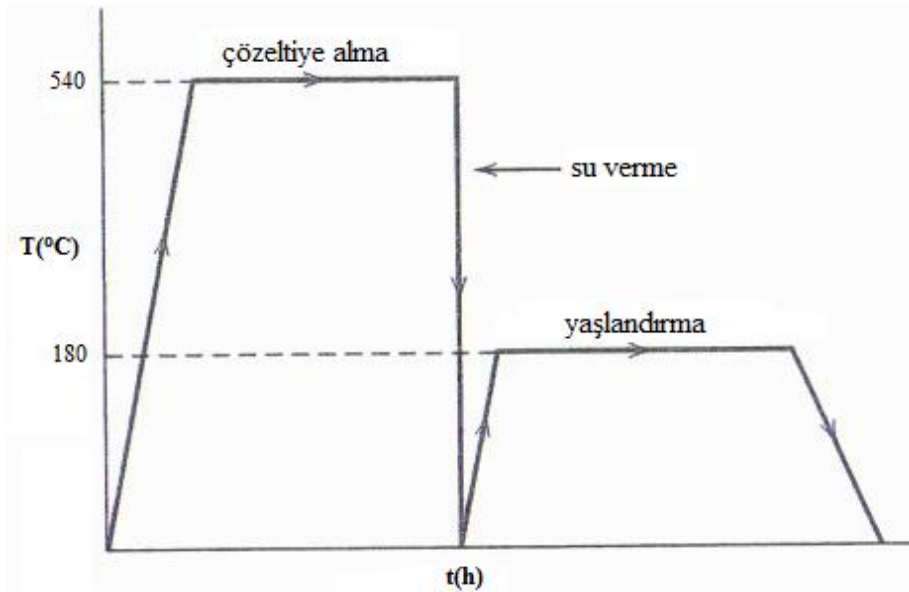
6.5 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Isıl işlem uygulanmasından önce, sıcak ekstrüzyondan çıkan ve uygun boyutlarda kesilen numuneler mikroyapı incelemelerine elverişli hale gelebilmesi için standart metalografik numune hazırlama sürecinden geçirilmiştir. Bunun için numuneler önce poliester kalıba alınmıştır. Daha sonra sırasıyla 80, 200, 400, 600, 1000 ve 1200 numaralı zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Bu işlemler sonrasında numunelerde son derece düzgün ve temiz yüzeyler elde edilmiştir.

6.6 Isıl İşlem

Ekstrüze numunelere T6 temper kodlu çökelme sertleşmesi ısıl işlemi uygulanmıştır. Malzemelerde mukavemet artışını sağlamak amacıyla uygulanmaktadır.

Bu kapsamda, numuneler 540 °C'ye ısıtılmıştır. Çözeltiye alma sıcaklığı olan bu sıcaklık, matris alaşımında tek fazlı yapı elde etmek ve matris içindeki diğer fazların tamamını çözebilecek bir sıcaklıktır. Bu sıcaklıkta 1 saat boyunca beklenmiştir. Çözeltiye alma sıcaklığında bekleme süresi numunenin kesit alanı ile orantılı olarak artmaktadır. AlSi5Mg/SiCp kompozit numunelerin kesit alanı küçük olduğundan bir saatlik bekleme süresi yeterlidir (Mindivan, 2007). Daha sonra numuneler ani olarak suda soğutulmuştur. Suda soğutulmasının ardından numuneler önceden 180 °C'ye ısıtılan ısıl işlem fırınında farklı sürelerde (30 dakika, 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 9 saat) yaşlandırılmıştır. Uygulanan ısıl işlem çevrimi Şekil 6.2'de şematik olarak gösterilmektedir. 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çökelti fazı olan Mg₂Si taneciklerinin küreselleştiği ve yapıdaki ötektik Si'un kabalaştığı ve bu durumun mekanik özellikler açısından olumsuzluk teşkil etmesi üzerine yaşlandırma sıcaklığı 180 °C olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.2 Numunelere uygulanan T6 ısıl işlem çevrimi.

Farklı SiC partikül hacimsel oranlarına sahip numunelere literatür araştırma verilerine uygun olarak, T6 ısıtma işleminin yaşlandırma safhası, 30 dakikadan, 9 saate kadar farklı sürelerde (30 dk, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 saat) uygulanmıştır. Yaşlandırma süresi boyunca belirli sürelerde numunelerin sertlik ölçümleri yapılmış ve numunelerin pik sertliğe ulaşma süresi tayin edilmiştir. Pik sertliğe ulaşma süresinin tayini ile numunelerin mekanik özelliklerinin gelişimi arasında bağlantı kurulmuştur. Numunelerin ısıtma işlemleri Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarları bünyesinde bulunan PROTHERM marka ısıtma işlem fırını kullanılmıştır. Numuneler fırın oda sıcaklığında iken içine yerleştirilmiştir. Gerekli ölçümler yapıldıktan sonra pik sertliğe ulaşma süresi 6 saat yaşlandırma süresi olarak belirlenmiştir.

6.7 Malzemelerin Sertlik Ölçümleri

Sertlik deneyi malzemelerin mekanik özellikleri hakkında bilgi edinmek için yapılan en genel ve uygulaması kolay deneydir. Malzemelerin sertlik değerleri ile mekanik özellikleri arasında paralel bir ilişki bulunmaktadır. Sertlik, genel anlamda malzemelerin deformasyona karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlanır. Direkt bir büyüklük değildir ve daha yüksek dayanımlı bir malzemenin kendisinden daha düşük dayanımlı bir malzeme üzerinde yapmış olduğu deformasyon miktarı üzerinden hesaplanmaktadır.

Isıtma işlem öncesi parlatılan numunelerin her birinin yüzeylerinde 3'er noktadan Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarındaki Brinel Sertlik Ölçüm Cihazı yardımıyla ölçüm alınmıştır. Sertlik ölçümleri, 15 saniyelik süre boyunca uygulanan 250 kg yük altında, 5 mm çaplı bilya kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numune sertlikleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

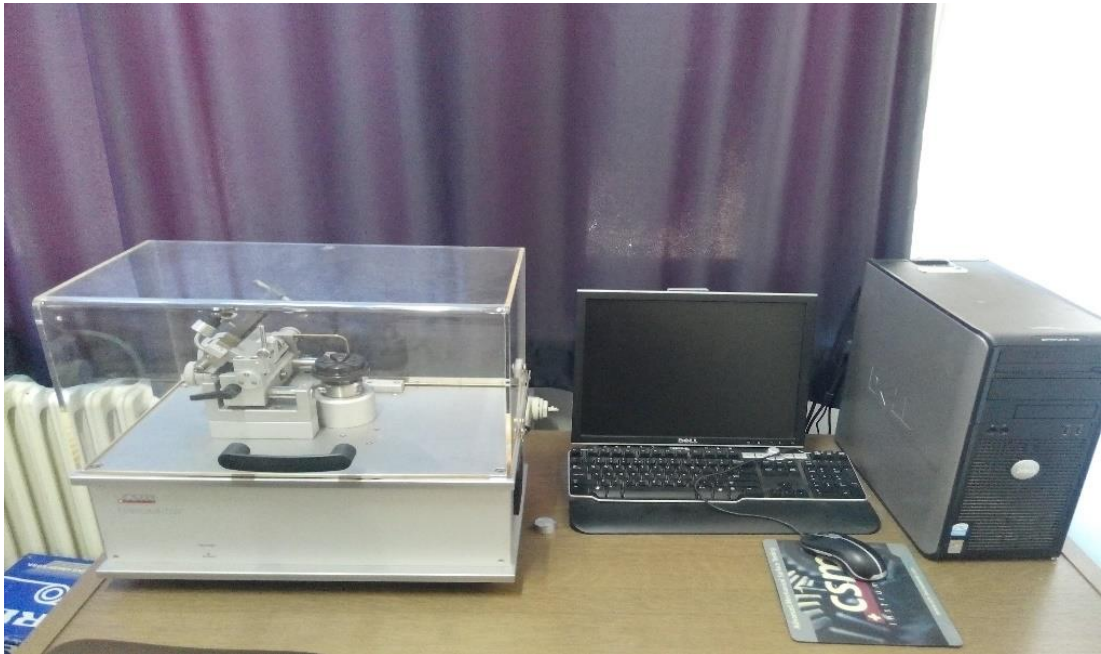
$$HB = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (6.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte F, uygulanan yükü (N); d, iz çapı ortalamasını (mm); D bilya çapını (mm) ifade etmektedir.

Kompozit numunelerin sertlik ölçümlerinin yanı sıra, matris sertliğinin ısıtılma işlemiyle değişimini görmek amacıyla Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarı bünyesinde bulunan Mikro Vickers SHIMADZU HMV sertlik cihazı yardımıyla numunelerin matris sertlik ölçümleri yapılmıştır. Tüm numunelere 0,5 kg yük, 10 saniye süreyle uygulanmıştır ve numune yüzeylerinin farklı bölgelerinden 3'er kez ölçüm alınmıştır.

6.8 Aşınma Testleri ve Parametreleri

Isıl işlem görmüş numunelere düşük ve yüksek yüklerde olmak üzere iki farklı koşulda aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma testleri Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bünyesinde bulunan CSM ball-on disk tipi tribometre kullanılarak, oda sıcaklığında, kuru koşullarda gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinde aşınan malzeme $AlSi5Mg/SiC_p$ kompoziti iken, aşındırıcı malzeme olarak piyasada rulman çeliği olarak da bilinen 100Cr6 çelik bilyalar kullanılmıştır. Test sonuçlarının sağlıklı olması açısından her bir aşınma testi başlangıcında aşındırıcı çelik bilya değiştirilmiştir. Şekil 6.3'te kullanılan tribometrenin fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 6.3 Numunelerin aşınma testlerinde kullanılan tribometre cihazı.

Tablo 6.2’de ısıtılmalı numunelere uygulanan aşınma test koşulları yer almaktadır. Her bir farklı SiC_p hacimsel oranına sahip numuneye her düşük ve yüksek yüklerde olmak üzere iki farklı aşınma koşulu uygulanmıştır.

Tablo 6.2 Aşınma testleri koşulları.

Aşınma parametreleri	Düşük yüklerdeki aşınma koşulları	Yüksek yüklerdeki aşınma koşulları
Kayma hızı (cm/s)	6	10
Kayma yolu (m)	500	1000
Yük (N)	1	10

CSM tribometre cihazının çıkabileceği maksimum yük 10 N olduğundan yüksek yüklerdeki aşınma koşullarında bu yük kullanılmıştır. Testler sonucunda sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafikleri elde edilmiş ve aşınma koşullarında kullanılacak optimum kompozit bileşimi tayin edilmiştir. Ayrıca, aşınma deneylerinin öncesinde ve sonrasında analitik (hassas) terazi ile numunelerin ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Buna dayanarak, aşınma sonrası kütlece % aşınma kayıpları hesaplanmıştır.

6.9 Mikro ve Makroyapı İncelemeleri

Isıl işlem gerçekleştirilmeden önce gerekli metalografik numune hazırlanma sürecinden geçirilen kompozit malzeme örneklerinin, ısıtılmalı işlemler ve testler öncesinde ve sonrasında optik ve taramalı elektron mikroskobu yardımıyla mikro ve makro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi sonrasında aşınan yüzeylerin SEM incelemeleri yapılmış, çeşitli büyütme fotoğrafları çekilmiştir. Ayrıca, aşınan yüzeylerde taramalı elektron mikroskobu yardımıyla elementel haritalama yapılmış ve karşıt malzemedeki kompozite malzeme aktarımı olup olmadığı tespit edilmiştir.

Optik mikroyapı incelemelerinde Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan Nikon ECLIPSE ME 600

marka optik mikroskop kullanılmıştır. SEM incelemelerinde ise, yine Dokuz Eylöl Üniversitesi Mühendislik Faköltesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan JEOL JSM 6060 markalı taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



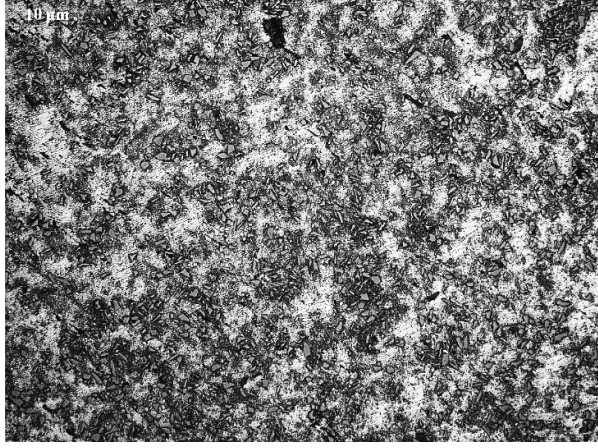
BÖLÜM YEDİ

DENEY SONUÇLARI

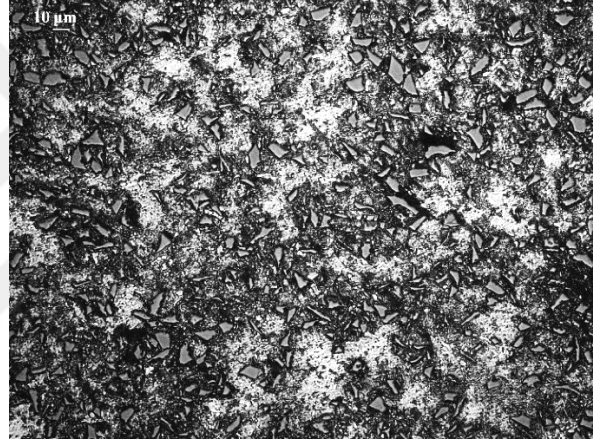
7.1 Mikroyapı Karakterizasyon Çalışmaları

Karıştırmalı döküm ve sıcak ekstrüzyon süreçleri ile üretilen AlSi5Mg/SiC_p kompozit malzemelerdeki SiC_p'nin mikroyapı içerisindeki dağılımını incelemek amacıyla numuneler üzerinde optik mikroskop aracılığıyla farklı büyütmelerde görüntüler alınarak mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Görüntülerde, SiC_p aglomerasyonlarını ve matris-takviye arayüzey durumunu daha iyi görebilmek için, yüksek büyütmelere çıkılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için metalografik numune hazırlama sürecinden geçirilen farklı SiC_p hacimsel oranlarına sahip numunelerin her birinin yüzeylerinden farklı büyütmelerde görüntüler alınmıştır. Mikroyapı incelemeleri ile numunelerin içerdikleri porozite miktarı, SiC_p miktarı ve yapı içerisindeki dağılımı optik mikroskop aracılığıyla görüntü analiz sistemleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin, mekanik özellikler üzerindeki etkisi literatüre dayandırılarak araştırılmıştır. Ayrıca; alüminyum matris içerisindeki SiC_p hacimsel oranı ve porozite oranı lineer kesişme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

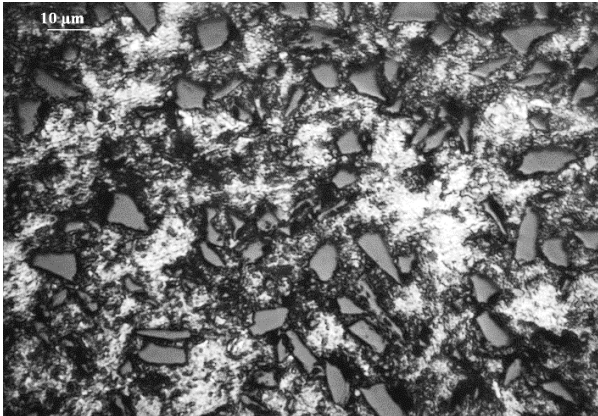
İncelemeler sonrasında SiC_p'nin Şekil 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8 ve 7.9'da mikroyapıda dağılımları gösterilmektedir. Numunelerdeki porozite miktarı değerlendirildiğinde; %23,4 SiC_p hacimsel oranına ait numunede ortalama %4; %30,1 SiC_p oranına ait numunede ortalama %2,5; %36,8 SiC_p oranına ait numunede ortalama %3,5 oranlarında boşluk (porozite) tespit edilmiştir. Buna göre; %23,4 SiC_p hacimsel oranına sahip numunede matris-katkı ara yüzeyindeki boşluk miktarının diğerlerine oranla daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, %30,1 SiC_p içeren numunenin optik mikroskop görüntülerine bakıldığında yer yer aglomere olmuş SiC_p'ne rastlanmaktadır. Bu da ürünün mekanik özellikleri açısından olumsuzluk teşkil etmektedir (İlgaz, 1997).



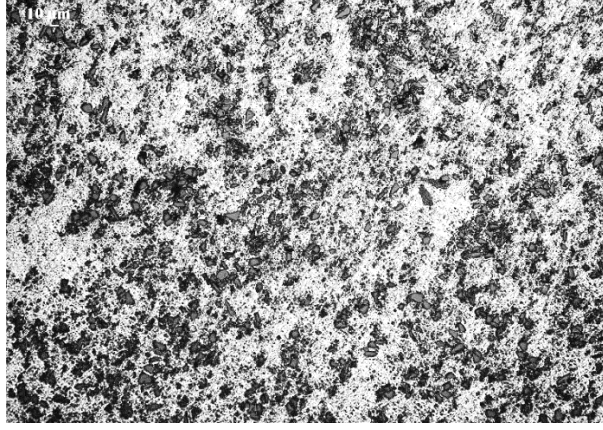
Şekil 7.1 %23,4 SiC_p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC_p numunenin 10x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.



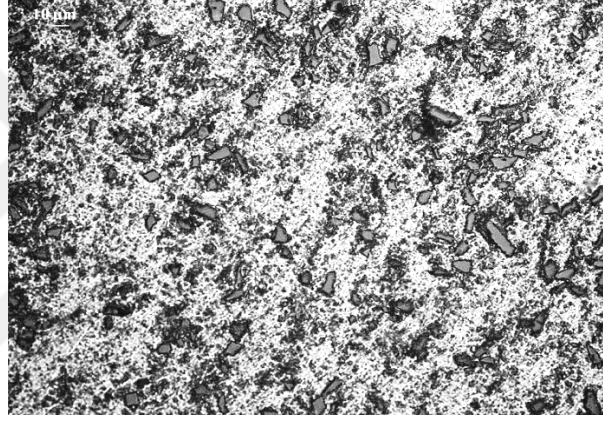
Şekil 7.2 %23,4 SiC_p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC_p numunenin 20x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.



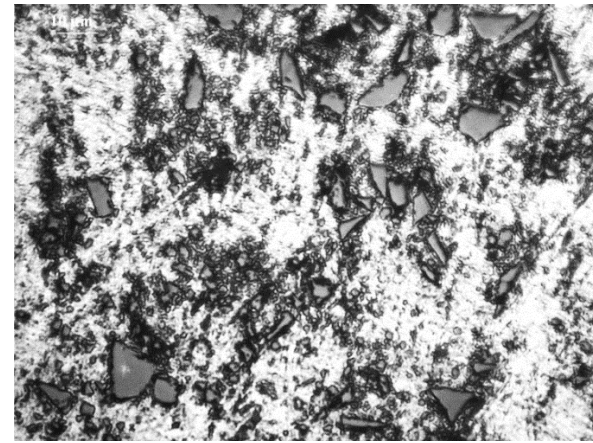
Şekil 7.3 %23,4 SiC_p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC_p numunenin 50x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.



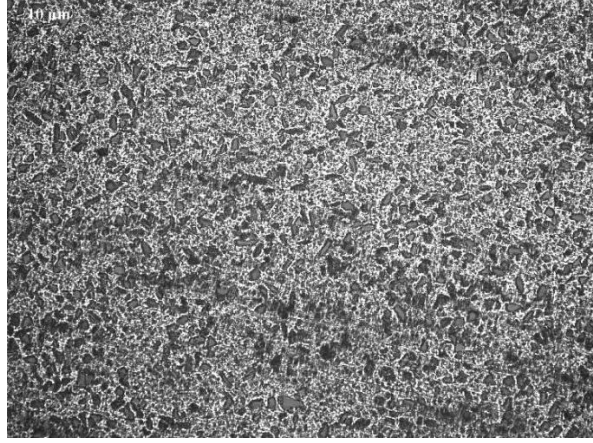
Şekil 7.4 %30,1 SiC_p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC_p numunenin 10x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.



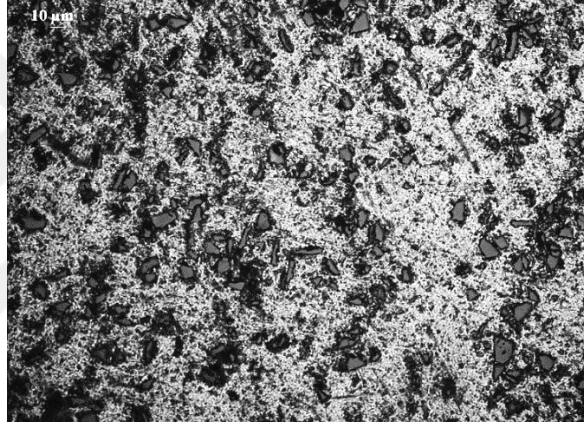
Şekil 7.5 %30,1 SiC_p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC_p numunenin 20x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.



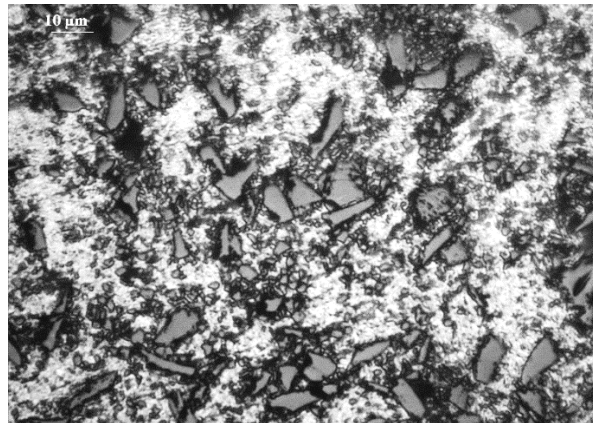
Şekil 7.6 %30,1 SiC_p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC_p numunenin 50x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 7.7 %36,8 SiC_p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC_p numunenin 10x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.



Şekil 7.8 %36,8 SiC_p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC_p numunenin 20x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.

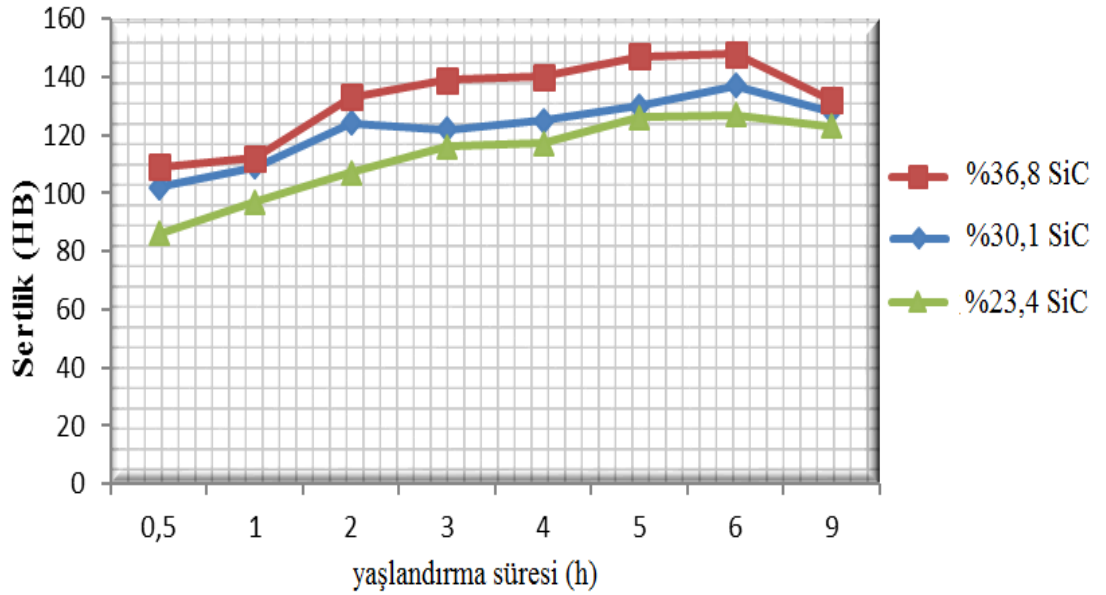


Şekil 7.9 %36,8 SiC_p hacim oranına sahip AlSi5Mg/SiC_p numunenin 50x büyütmede alınan optik mikroskop görüntüsü.

Genel olarak mikroyapı incelemeleri sonucunda SiC partiküllerinin mikroyapı içerisinde homojen dağılım gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu dağılım numunelerin başarılı bir döküm ve ekstrüzyon süreci geçirdiğinin göstergesidir. SiC_p'lerin homojen dağılım göstermesi kompozit malzemenin mekanik özellikleri ve performansı açısından önemlidir (Cöcen, Önel ve Özdemir, 1997).

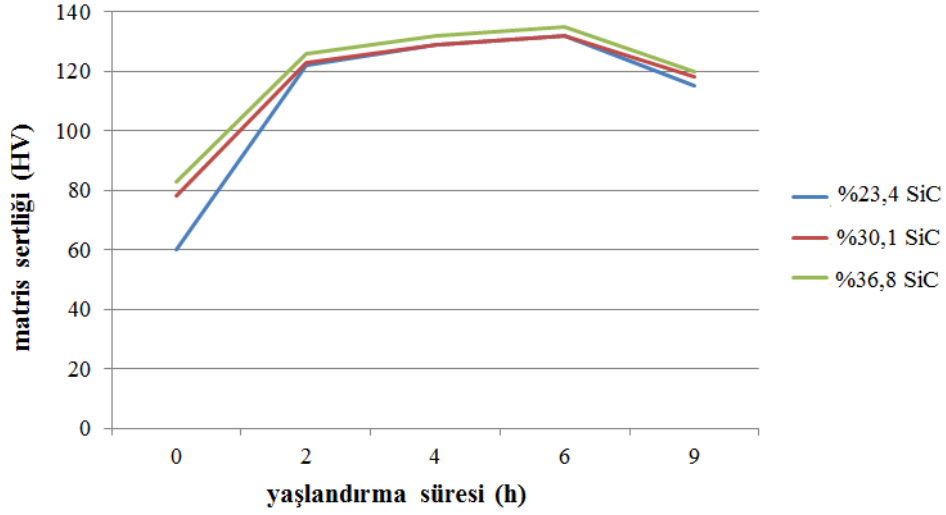
7.2 Sertlik Deneyi Sonuçları

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerde kullanılan seramik takviye fazın boyutu, şekli ve mikroyapı içerisindeki dağılımı mekanik özelliklerin iyileşmesinde önemli rol oynamaktadır (Zhang ve Gu, 2006). Numunelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu ise sertlik deneyi ile gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem görmeden önceki ve yaşlandırma sonrasında numunelerden belirli süreler sonunda alınan kompozitlerin sertlik ölçümlerinin sonuçları Şekil 7.10'da verilmiştir. SiC_p takviye miktarının artmasıyla birlikte, matrisin plastik deformasyonu zorlaştığından sertlik değerlerinde artış görülmektedir. Bir diğer yandan, yapısındaki sert SiC partikülleri sebebiyle, kompozit malzemenin sertliğinin matris alaşımının sertliğinden daha yüksek olduğu da görülmüştür. Ayrıca yaşlandırma sürecinin etkisiyle hem kompozitin hem de matris malzemenin sertliklerinde artış meydana gelmiştir.



Şekil 7.10 Farklı SiC_p hacimsel oranlara sahip kompozit numunelerinin yaşlandırma süresine bağlı olarak sertlik değerlerinin değişimi.

Şekil 7.11 farklı SiC partikül hacim oranına sahip numunelerden alınan matris sertliklerinin, yaşlandırma süresi ile değişimini göstermektedir.



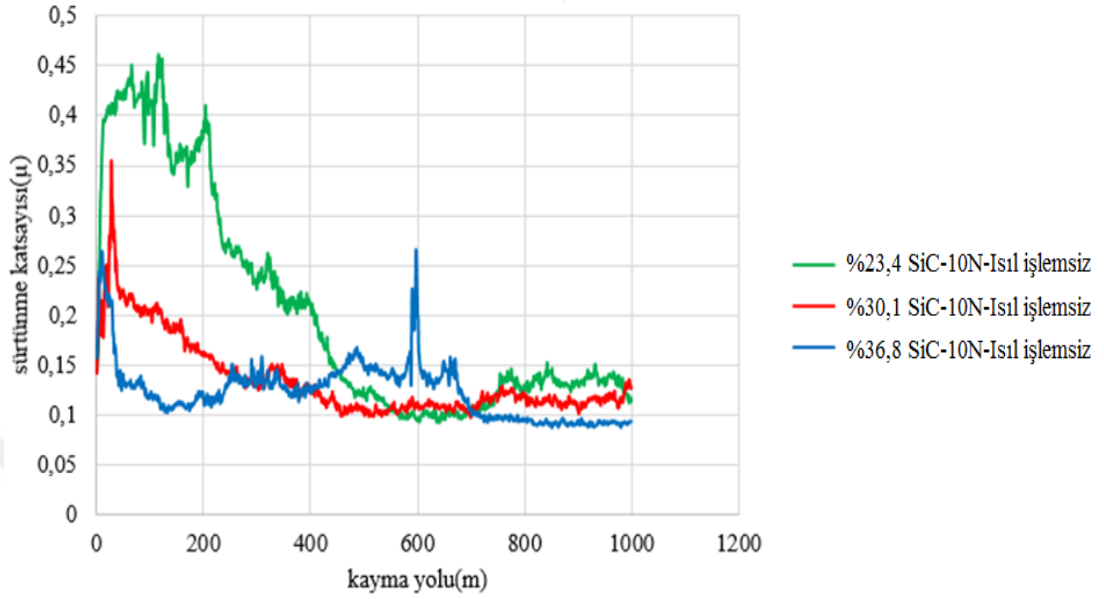
Şekil 7.11 Yaşlandırma süresinin numunelerin matris sertliklerine etkisi.

Gerek kompozit gerekse matris sertlik değerleri ölçülen numunelerin, sertlik-zaman grafiklerinden de anlaşılacağı gibi, 6 saatlik yaşlandırma süresinin sonunda tüm numunelerde en yüksek (pik) matris ve kompozit sertlik değerlerine ulaşılmıştır. 6 saatlik sürenin sonunda farklı SiC partikül hacim oranına sahip numunelerin tümünde aşırı yaşlanma olayı görülmüştür ve hem kompozit hem de matris sertlik değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. 9 saatlik yaşlandırma süresi sonunda yaşlandırma prosesine son verilmiştir.

7.3 Aşınma Testi Sonuçları

İncelenen kompozitlerin kuru ortamda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma deneylerinin sonuçlarından kütle (ağırlık) kaybı ölçülmüş ve kayma mesafesine göre sürtünme katsayısının değişimini gösteren grafikler elde edilmiştir. Bu verilerden yola çıkılarak kompozit numunelerin aşınma davranışları analiz edilmiştir. Şekil 7.12'de ısıtma işlemi uygulanmamış, farklı SiC partikül hacimsel oranlarına sahip numunelerin yüksek yüklerdeki aşınma koşullarındaki (kayma hızı: 10 cm/s, kayma mesafesi: 1000 m, test yükü: 10 N) sürtünme katsayısının kayma yoluna bağlı

değişimini gösteren grafik yer almaktadır.

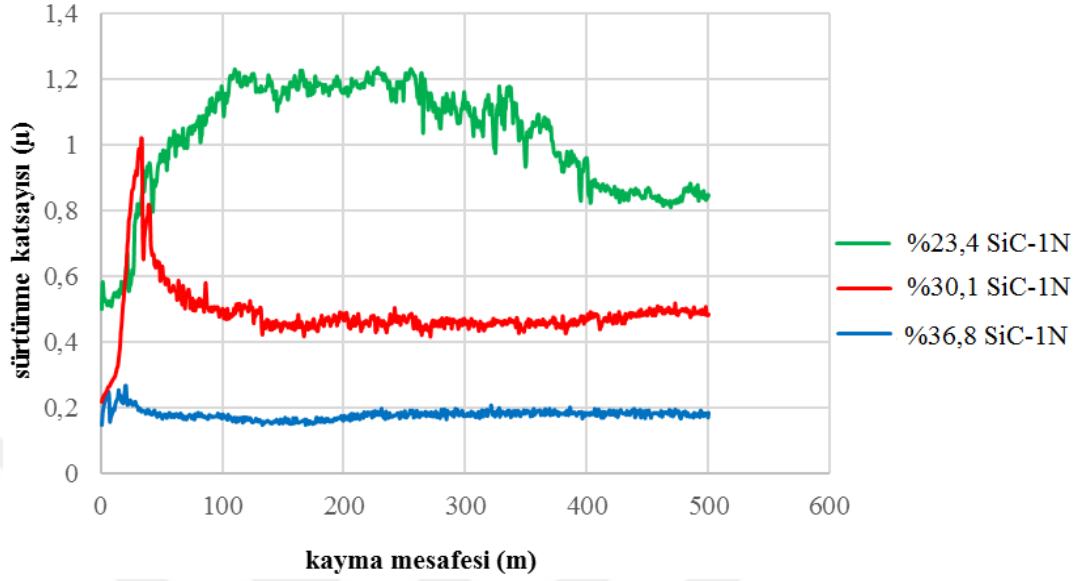


Şekil 7.12 Isıl işlem uygulanmamış farklı SiC_p miktarına sahip alüminyum matrisli kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerine kayma mesafesinin etkisi (kayma hızı: 10 cm/s; kayma mesafesi: 1000 m; test yükü: 10N).

Şekil 7.12'de görüldüğü gibi, ısıl işlem uygulanmamış farklı SiC_p hacimsel oranlarına sahip numunelerde, sürtünme katsayısı değerleri 0,1 ile 0,45 değerleri arasında değişmektedir ve kayma mesafesinin artmasıyla sürtünme katsayısı değerlerinde kararlılık gözlemlenmemektedir. Isıl işlemin yaşlandırma safhası, mikroyapıda bulunan ve kararsız aşınmalara sebebiyet veren düzensiz metaller arası bileşiklerin çözünmesini etkilemektedir ve buna bağlı olarak sertlik ve aşınma davranışları değişiklik göstermektedir (Mindivan ve Kayalı, 2007).

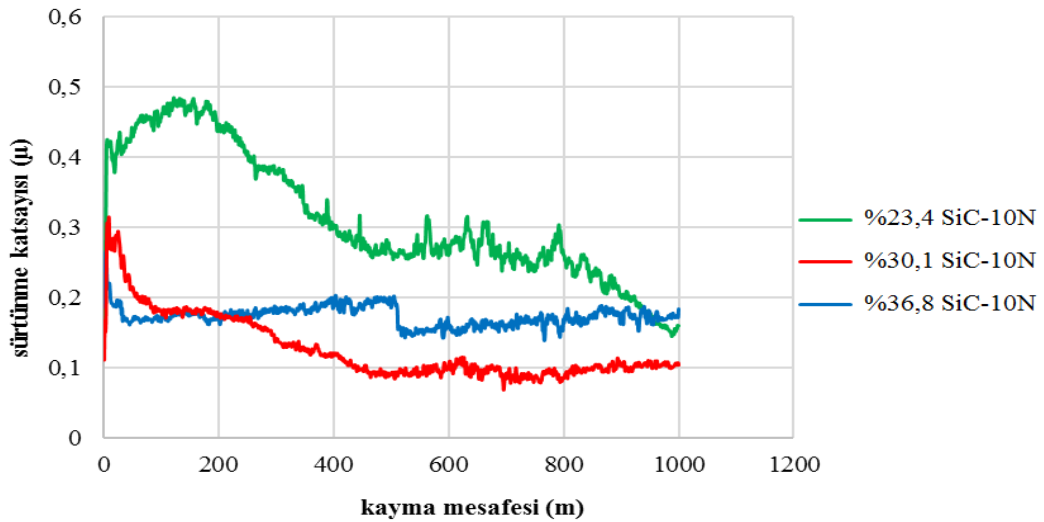
Şekil 7.13'te farklı SiC_p hacimsel orana sahip numunelerin düşük yüklerdeki aşınma koşullarındaki (kayma hızı: 6 cm/s, kayma mesafesi: 500 m, test yükü: 1 N) davranışlarının grafiği yer almaktadır. Şeki 7.13'e bakıldığında, sürtünme katsayısı değerleri 0,2 ile 1,2 arasında değişiklik göstermektedir. Grafikte yukarıdan aşağıya doğru, SiC partiküllerinin hacimsel oranı artmaktadır. SiC partiküllerinin hacimsel oranının artmasıyla sürtünme katsayısı değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca, %36,8 SiC partikül içeren numunenin sürtünme katsayısı değeri kısa zaman

içerisinde kararlı hale ulaşmıştır ve numuneler içerisinde düşük yüklerde en kararlı aşınma davranışını SiC partikül miktarı en yüksek olan numune göstermiştir.



Şekil 7.13 Farklı SiC_p miktarına sahip alüminyum matrisli kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerine kayma mesafesinin etkisi (kayma hızı: 6 cm/s; kayma mesafesi: 500 m; test yükü: 1N).

Şekil 7.14'te ise, yüksek yüklerdeki koşullarda (kayma hızı: 10 cm/s, kayma mesafesi: 1000 m, test yükü: 10 N) gerçekleştirilen aşınma testlerinin sonuçları yer almaktadır.



Şekil 7.14 Farklı SiC_p miktarına sahip alüminyum matrisli kompozitlerin sürtünme katsayısı değerlerine kayma mesafesinin etkisi (kayma hızı: 10 cm/s; kayma mesafesi: 1000 m; test yükü: 10 N).

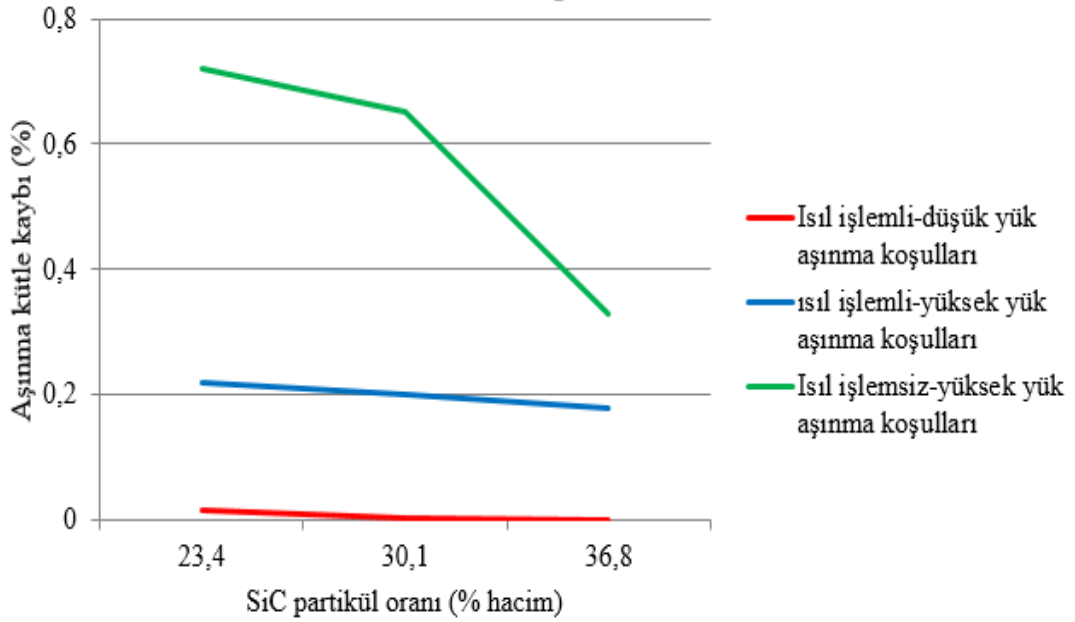
Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'te görüldüğü gibi, SiC partikül miktarının artmasıyla aşınma davranışlarında istikrar meydana gelmiştir. %23,4 ve %30,1 SiC_p içeren kompozit numunelerde düşük ve yüksek yüklerdeki aşınma koşullarında da kayma mesafesinin artmasıyla birlikte sürtünme katsayısı değerleri sürekli değişkenlik göstermiş ve stabil bir değişim gözlemlenmemiştir. Buna karşın; %36,8 SiC_p içeren kompozit numunesinde hem düşük hem yüksek yüklerdeki aşınma koşullarında daha kararlı bir aşınma davranışı gözlemlenmiştir. Düşük yüklerdeki aşınma koşullarına göre, sürtünme katsayısı değerleri daha düşüktür. Yüksek yüklerde gerçekleşen aşınmalarda, matrisin aşınma yüzeylerinin kenarlarına doğru sıyrılmasından dolayı aşınmaya katkısının olmaması durumundan, aşınma anındaki temas basıncı SiC partikülleri tarafından karşılanmıştır. Bu durum, sürtünme katsayısı değerlerinin azalmasına sebep olmuştur.

Aşınma testlerinin sonucunda hassas terazi yardımıyla belirlenen kütle kayıpları Tablo 7.1'de yer almaktadır. Buna göre, daha yüksek yüklerdeki aşınma koşulları daha büyük kütle kayıplarına neden olmuştur. Düşük yük ve kayma hızında gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda %36,8 SiC_p içeren kompozit numunede aşınma sonucu ağırlık kaybı olmamıştır. Şekil 7.15'te aşınma kütle kaybı sonuçları grafik halinde gösterilmiştir.

Tablo 7.1'e göre, ısıtılma işlem uygulanmayan numunelerdeki aşınma kütle kayıpları, ısıtılma işlem uygulanan numunelerde meydana gelen aşınma kütle kaybı değerlerinden çok daha yüksektir. Bir diğer yandan, ısıtılma işlem uygulanmamış numunelerde meydana gelen aşınma kütle kayıpları, ısıtılma işlem uygulanan gerek düşük gerekse yüksek yüklerde aşındırılmış numunelerde meydana gelen aşınma kütle kaybı değerlerinden daha yüksektir. Bu durumda, T6 temper kodlu çökelme sertleşmesi ısıtılma işleminin farklı SiC partikül hacimsel oranlarına sahip numunelerde aşınma davranışlarını iyileştirdiği ve aşınma kütle kayıplarında azalma sağladığı sonuçlarına ulaşılabilir.

Tablo 7.1 Aşınma testleri sonucundaki % ağırlık kayıpları.

SiC _p miktarı (%)	Isıl işlem	Aşınma test koşulları	Ağırlık kaybı (%)
23,4	Evet	1N/500m/ 6cm.s ⁻¹	0,015
30,1	Evet	1N/500m/ 6cm.s ⁻¹	0,005
36,8	Evet	1N/500m/ 6cm.s ⁻¹	-
23,4	Evet	10N/1000m/ 10cm.s ⁻¹	0,22
30,1	Evet	10N/1000m/ 10cm.s ⁻¹	0,20
36,8	Evet	10N/1000m/ 10cm.s ⁻¹	0,18
23,4	Hayır	10N/1000m/ 10cm.s ⁻¹	0,72
30,1	Hayır	10N/1000m/ 10cm.s ⁻¹	0,65
36,8	Hayır	10N/1000m/ 10cm.s ⁻¹	0,33



Şekil 7.15 Farklı aşınma koşullarında SiC_p miktarına göre aşınma kütle kaybı.

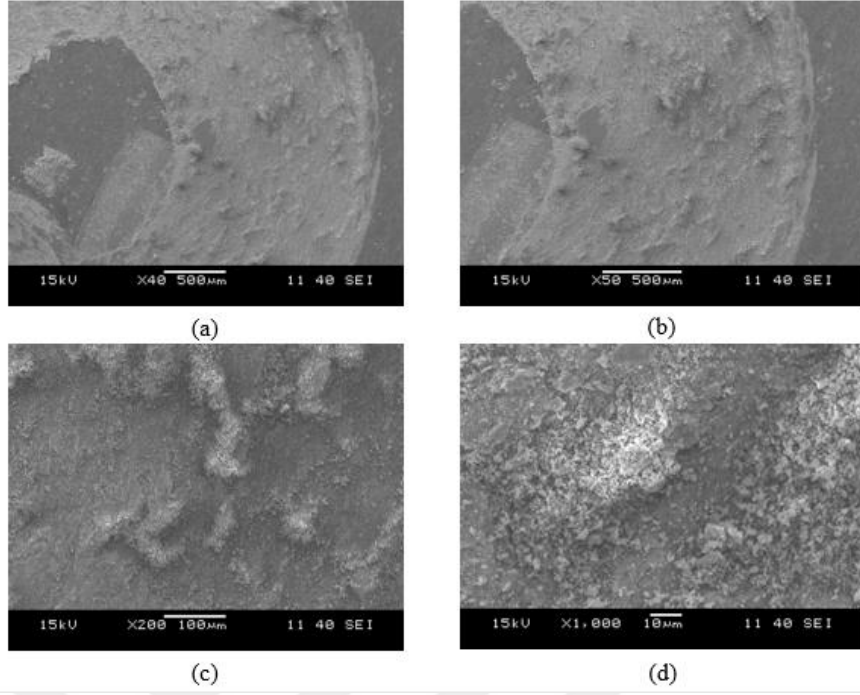
Uygulanan yük aralığında değerlendirilen kompozit numunelerin tümünde aşınmadan kaynaklı kütle kayıpları, test yükünün artmasıyla artmıştır. Düşük

yüklerde gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda kütle kaybı, yüksek yüklerde yapılan aşınma testlerine göre nispeten daha düşüktür.

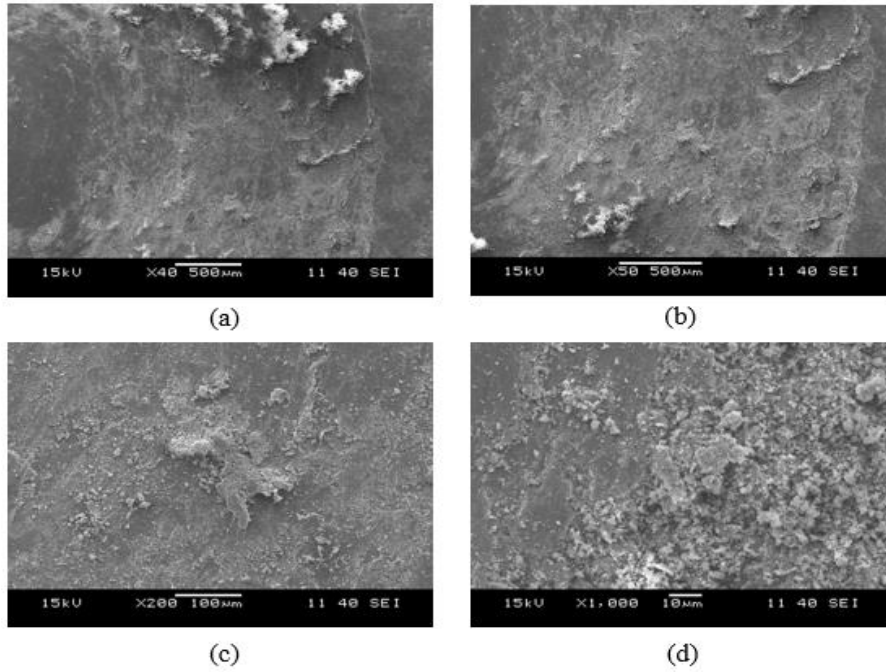
Öte yandan, numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla farklı büyütme oranlarında görüntüleri alınmış ve aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Ek olarak, taramalı elektron mikroskobuna bağlı elementel haritalama tekniği kullanılarak Al, Si, C ve Fe elementlerinin aşınma yüzeylerindeki konumsal olarak dağılımları ve karşıt malzeme olan 100Cr6 rulman çelik bilyasından aşınan ana malzeme AlSi5Mg/SiC_p kompozitlerine, malzeme aktarımı olup olmadığı irdelenmiştir.

Elementel haritalama tekniğinde, incelenen her element farklı bir renk kullanılarak, taramalı elektron mikroskobunda tanımlanır ve daha sonra verilen renklere göre, incelenen bölgedeki faz haritası belirlenir.

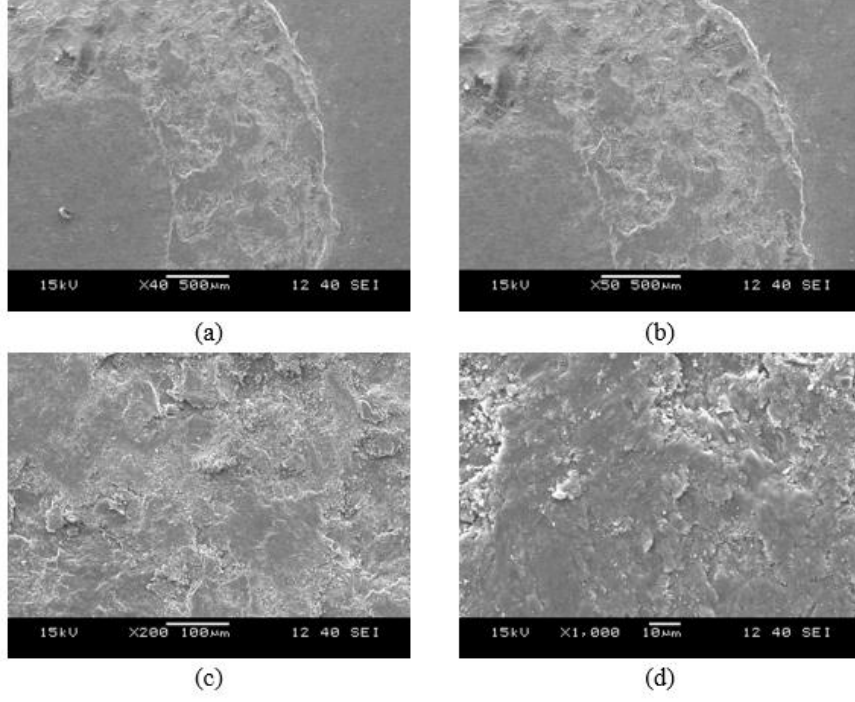
Şekil 7.16, 7.17, 7.18, 7.19 ve 7.20 ve 7.21'de aşındırılmış numunelerden alınan taramalı elektron mikroskop görüntüleri yer almaktadır.



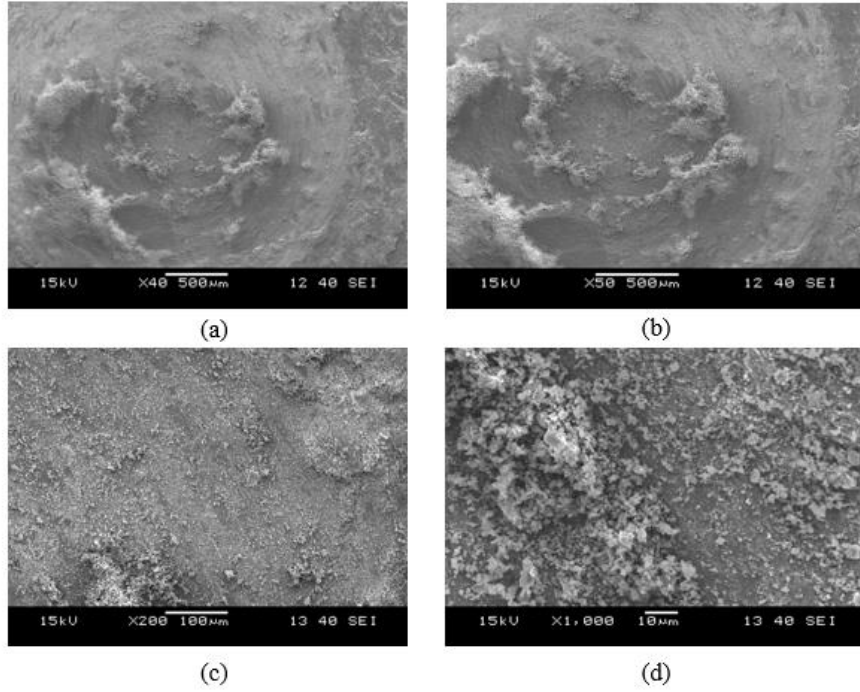
Şekil 7.16 %23,4 SiC_p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 6 cm/s, kayma mesafesi: 500 m, test yükü: 1N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.



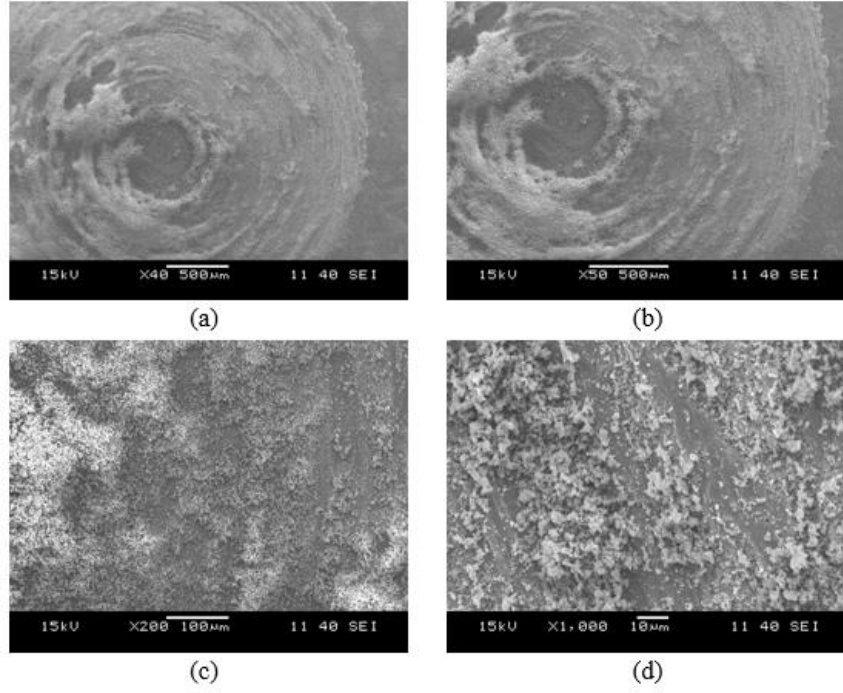
Şekil 7.17 %23,4 SiC_p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 10 cm/s, kayma mesafesi: 1000 m, test yükü: 10N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.



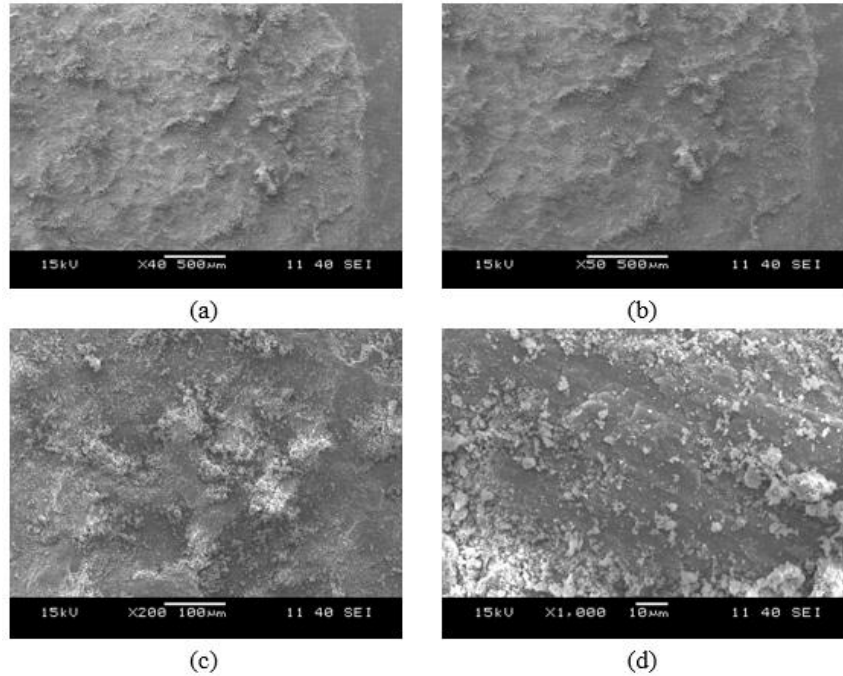
Şekil 7.18 %30,1 SiC_p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 6 cm/s, kayma mesafesi: 500 m, test yükü: 1N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.



Şekil 7.19 %30,1 SiC_p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 10 cm/s, kayma mesafesi: 1000 m, test yükü: 10N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.



Şekil 7.20 %36,8 SiC_p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 6 cm/s, kayma mesafesi: 500 m, test yükü: 1N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.

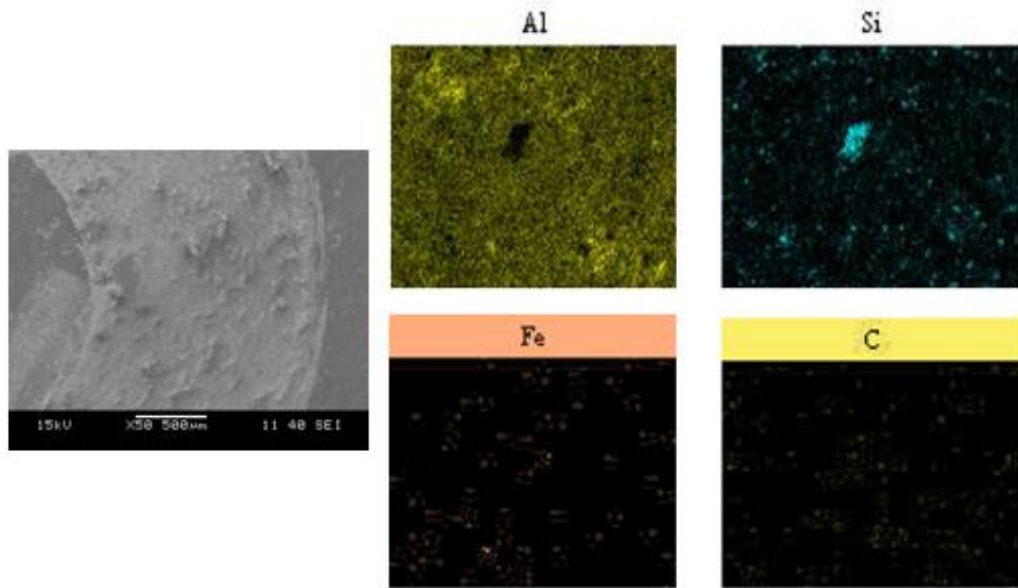


Şekil 7.21 %36,8 SiC_p içeren numunenin aşınma izinin farklı büyütmelelerdeki taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (kayma hızı: 10 cm/s, kayma mesafesi: 1000 m, test yükü: 10N); (a) 40x, (b) 50x, (c) 200x, (d) 1000x.

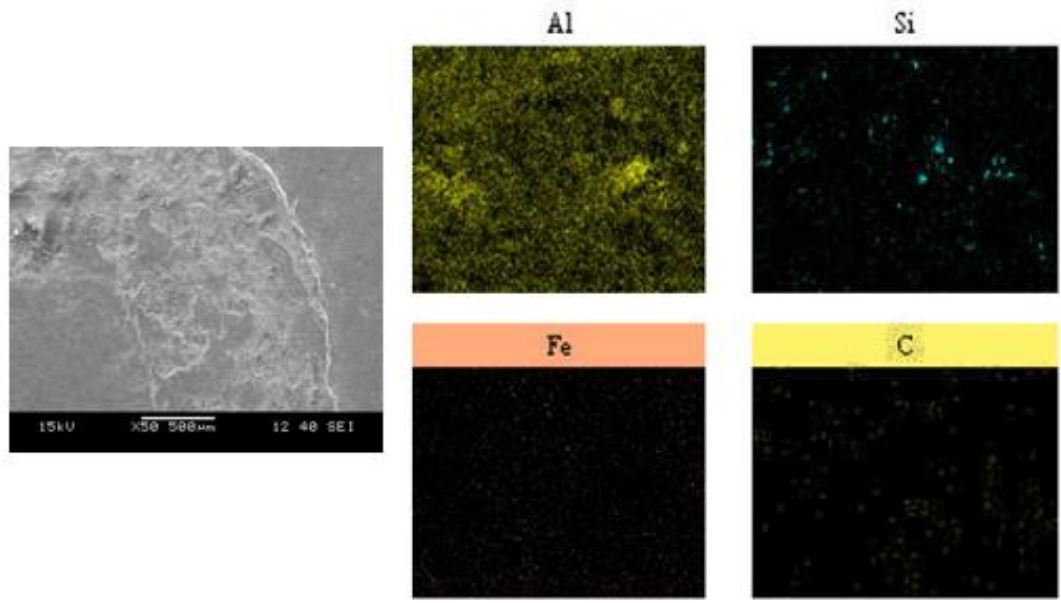
Taramalı elektron mikroskobundan alınan görüntüler değerlendirildiğinde, numunelerin tümünde SiC partiküllerin matris yapısından kopmadığı ve yerlerinde kaldıkları görülmüştür. En yüksek aşınma kütle kaybı, SiC_p miktarı en düşük olan numunede meydana gelmiştir. Numunelerin üzerlerindeki aşınma izleri makro düzeyde incelendiğinde, en büyük aşınma iz alanına % 23,4 SiC_p içeren numunenin sahip olduğu görülmüştür.

Alüminyum matriste, gerek düşük gerekse yüksek yüklerdeki aşınmanın etkisiyle aşınma izinin kenarlarına doğru sıyrılma meydana gelmiştir. Bu da taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde, birikintiler (matris yığılmaları) olarak görülmektedir.

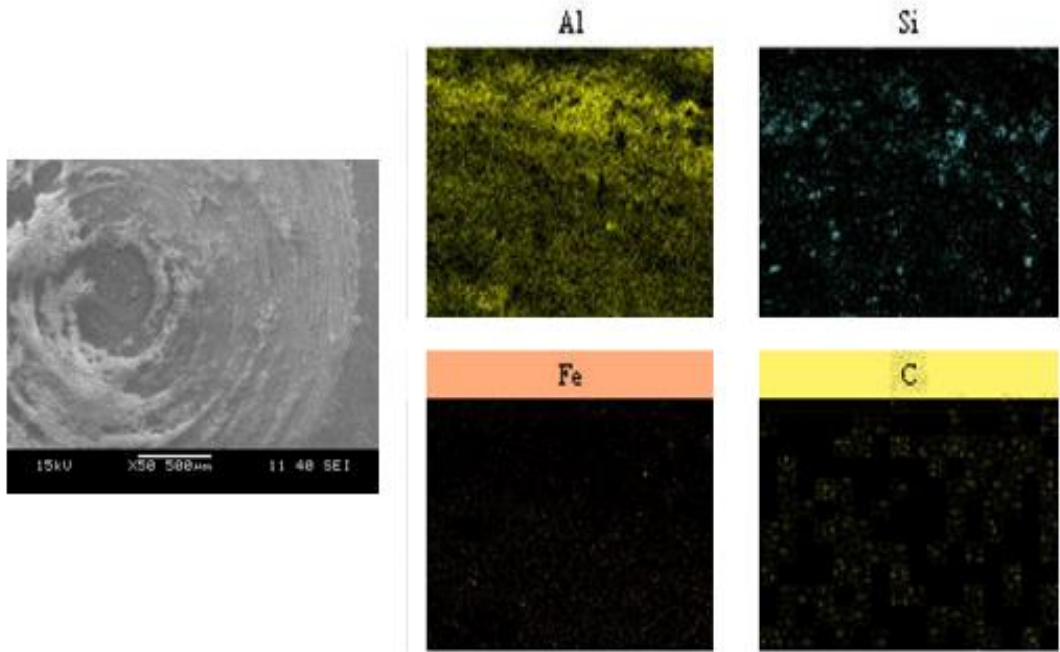
Ek olarak, düşük yüklerde aşındırılmış numuneler üzerinde taramalı elektron mikroskobu kullanılarak aşındırıcı 100Cr6 çelik bilyadan aşınan kompozitler üzerine malzeme akışı olup olmadığını tespit etmek amacıyla elementel haritalama yapılmıştır. Elementel haritalama, bir numune içindeki elementlerin konumsal olarak dağılımını iki boyutlu olarak göstermektedir. Bu analiz sayesinde aynı alanda konumlanan farklı elementlerle o bölgedeki faz tayini yapılabilmektedir. Elementel haritalama verilerinin sonuçları Şekil 7.22, 7.23 ve Şekil 7.24'te verilmektedir.



Şekil 7.22 %23,4 SiC_p içeren numuneye ait elementel haritalama analizleri.



Şekil 7.23 %30,1 SiC_p içeren numuneye ait elementel haritalama analizleri.



Şekil 7.24 %36,8 SiC_p içeren numuneye ait elementel haritalama analizleri.

Farklı hacimsel oranlarda SiC partikül içeren AlSi5Mg matrisli kompozitlerin EDS elementel haritalama analizlerinde yukarıdaki şekillerde görüldüğü gibi Fe, C, Al ve Si elementlerinin yapı içerisindeki konumsal dağılımları elde edilmiştir. Analizler neticesinde artan SiC_p miktarı ile numunelerin aşınma davranışları

iyileştiğinden ve daha stabil hale geldiğinden dolayı, %36,8 SiC_p miktarı içeren numunenin elementel haritalama sonuçlarında karşıt malzemenin diğerlerine göre daha fazla aşındığı ve dolayısıyla Fe elementinin konumsal olarak daha fazla yer kapladığı açıkça görülmektedir.

Alüminyum matris kompozit malzemelerin gerek mekanik özelliklerinin gerekse aşınma davranışlarının geliştirilmesine yönelik literatürde çalışmalar mevcuttur. Ganesh ve diğer. (2015), toz metalurjisi ile üretilen Al2219 alüminyum matris alaşım, %10, %15 ve %20 olmak üzere üç farklı hacimsel oranlarda SiC partikül katkı kompozit malzemelerin kuru ortamda aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Aşınma testleri farklı yüklerde ve kayma mesafelerinde kuru ortamda, oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, sinterleme sıcaklığının kompozitin aşınma davranışı üzerine etkisi de detaylıca incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, artan sinterleme sıcaklığı ile birlikte azalan porozite oranı ve artan sertliğin, aşınma miktarını azalttığı görülmüştür. Ayrıca, SiC partikül takviye miktarının artmasıyla da, aşınma miktarının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Ganesh, Subbiah ve Chandrasekaran, 2015).

Geleneksel karıştırmalı döküm yöntemi ile üretilen, silisyum nitrür katkı Al6082 alüminyum matris alaşım kompozitin yüzey yanıt metodundan yararlanılarak kuru ortamdaki aşınma davranışları incelenmiştir. Çalışmada, Si₃N₄ partiküllerinin hacimsel katkı oranları %0, %3, %6, %9 ve %12 olarak alınmıştır ve farklı kayma mesafeleri ve kayma hızları değişkenleriyle, aşınma testleri oda sıcaklığında, kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonunda, artan Si₃N₄ takviye miktarı ile kompozit sertliğinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca; aşınma hızının artan kayma hızı ile azaldığı ve artan yük miktarı ve kayma mesafesi ile arttığı belirlenmiştir. ANOVA yazılımı ile yapılan incelemeler neticesinde, kompozitin aşınma davranışları üzerinde en etkili parametrenin kayma yolu olduğu ve bunu sırasıyla yük, kayma hızı ve takviye malzemesinin miktarı parametrelerinin izlediği sonucuna ulaşılmıştır (Sharman ve Khanduja, 2015).

Walczak ve diğ. (2015) SiC partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerin, matris malzemesi ile kompozitin aşınma davranışlarını karşılaştırmışlardır. Yapılan incelemeler neticesinde, SiC takviyeli kompozitin sürtünme katsayısı değerinin matris malzemesinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, SiC takviyeli kompozitin aşınma direncinin, matris alaşımı olan AlSi9Mg alaşımından daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Walczak, Pieniak ve Zwierzchowski, 2015).

Ahmad ve diğ. (2013) fren disklerinde kullanılan geleneksel malzemeler ile alümina katkılı alüminyum matrisli kompozitlerin aşınma davranışlarını karşılaştırmışlardır. Araştırma neticesinde, aşınma test yükünün artmasıyla her iki malzeme için de aşınma hızının arttığı; ancak, aşınma yükünün artmasıyla, kompozit malzemede meydana gelen aşınma kütle kayıplarının, geleneksel malzemelerden daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Ahmad ve diğ., 2013).

Rahman ve Rashad, (2013) SiC partikül takviye malzemesinin alüminyum matrisli kompozitlerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri ile aşınma davranışları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda, %20 SiC partikül takviye miktarında kompozit, maksimum sertlik ve çekme dayanımı sergilemiştir. Ayrıca, SiC partikül miktarının artmasıyla alüminyum matrisli kompozitin aşınma direncinin arttığı görülmüştür (Rahman ve Rashed, 2013).

Bu tez çalışmasında %23,4, %30,1 ve %36,8 olmak üzere üç farklı SiC_p hacimsel orana sahip AlSi5Mg alüminyum matrisli numunelere T6 ısıtma işleminin uygulanmasıyla mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştiği görülmüştür. Bu kompozitlerin mekanik özellikleri ve aşınma davranışları literatürde yer alan ve yukarıda belirtilen çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmektedir.

BÖLÜM SEKİZ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez kapsamında karıştırmalı döküm ve sıcak ekstrüzyon yöntemleri ile üretilen AlSi5Mg matrisli SiC_p takviyeli numunelerdeki SiC partiküllerin, optik mikroskop ile yapılan analizler neticesinde mikroyapıda homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. SiC partiküllerinin mikroyapıda homojen olarak dağılması, mekanik ve tribolojik özelliklerin geliştirilmesi açısından çok önemlidir.

Kompozit malzemelerin sertlik değerleri, uygulanan ısıl işlem miktarının artmasıyla artmıştır. Bunun yanı sıra, SiC partiküllerinin hacimsel oranlarının artmasıyla da kompozit sertliklerinde artış meydana gelmiştir. Dolayısıyla pik sertlik, 6 saat optimum yaşlandırma süresinin ardından, %36,8 ile maksimum hacimsel SiC_p oranına sahip numunede görülmüştür.

Tez çalışmasında, hassas terazide dikkatli bir şekilde yapılan ölçümler neticesinde, gerek düşük yüklerdeki gerekse yüksek yüklerdeki aşınma koşullarında, SiC_p hacimsel oranının artmasıyla, aşınma kütle kaybının azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Örneğin, %36,8 SiC_p miktarına sahip numunede, düşük yüklerdeki aşınma koşullarında kütle kaybı olmamıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda da, SiC_p takviye malzemesinin miktarının artmasıyla aşınma kayıplarının azaldığı söylenebilir.

Tez kapsamında yapılan aşınma testlerinin sonucunda da %36,8 SiC_p miktarına sahip numunenin gerek düşük yüklerdeki gerekse yüksek yüklerdeki aşınma koşullarında kararlı bir aşınma davranışı sergilediği söylenebilir.

Aşınma testleri sonucu yapılan, aşınma izlerinin taramalı elektron mikroskobu analizlerinde SiC partiküllerin yapıdan kopmadığı, fakat numune yüzeyinin küçük olmasından dolayı aşınma izinin kenarlarına doğru sıyrılmaların meydana geldiği görülmüştür. SiC partiküllerinin yapıdan kopmaması, aşınma davranışlarının kararlı seyretmesindeki önemli etmenlerden biridir.

KAYNAKLAR

- Abhok, K. V. (1978). Comparative tendencies for metal loss by abrasive wear. *Impact Erosion and Arc Erosion Wear*, 40, 305-314.
- Ahmad, F., Jason, S., Aslam, M. ve Haziq, A. (2013). Tribological behavior of alumina particles reinforced aluminium matrix composites and brake disc materials. *Procedia Engineering*, 68, 674-680.
- Akbulut, H. (1995). *Metal matrisli kompozitlerin sıkıştırırmalı döküm yöntemiyle üretimi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Akkurt, M. (1982). *Makine elemanları* (1. Baskı). İstanbul: Birsen Kitabevi Yayınları.
- Akkurt, M. (2012). *Makine elemanları Cilt:1* (1. Baskı). İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Akoral, E., Türker, M. ve Özçatalbaş, Y. (2002). Al matrisli SiC parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi. *3. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı Bildirileri*, 942-950.
- Askeland, D. R. (1990). *The science and engineering of materials* (2. Baskı). İstanbul: Chapman&Hall.
- Bhushan, B. (Ed.). (2001). *Modern tribology handbook* (1). Ohio: CRC Press.
- Bhushan, B. ve Gupta, B. K. (1991). *Handbook of tribology: Materials, coatings, and surface treatments*. Michigan: McGraw-Hill.
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2008). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. (K. Genel, Çev.). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim ve Danışmanlık Ticaret Limited Şirketi. (Orijinal çalışma basım tarihi 2007).

- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2007). *Material science and engineering: An introduction* (7). United States of America: John Wiley & Sons. Inc.
- Chen, R., Iwabuchi, A. ve Schimizu, T. (1999). The effect of a T6 heat treatment on fretting wear of a SiC particle-reinforced A356 aluminum alloy matrix composite. *Wear*, 238, 110-119.
- Clyne, T. W. (2001). Metal matrix composites: Matrices and processing. *Encyclopaedia of Materials: Science and Technology*.
- Clyne, T. ve Withers, P. (1993). *An introduction to metal matrix composites*, 10 Şubat 2016, <https://books.google.com.tr>.
- Cöcen, Ü. ve Önel, K. (2002). Ductility and strength of extruded SiC_p aluminium alloy composites. *Material Science and Engineering*, 62, 275-282.
- Cöcen, Ü., Önel, K. ve Özdemir, İ. (1997). Microstructures and hardenability of Al-5Si-0,2%Mg based composites reinforced with particulate SiC. *Composites Science and Technology*, 57, 801-808.
- Czichos, H., Klaffke, D., Santner, E. ve Woydt, M. (1995). Advances in tribology: The materials point of view. *Wear*, 190, 155-161.
- Çiftçi, İ. (2003). *Alüminyum esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Donaldson, S. L. ve Miracle, D. B. (1987). *ASM handbook composites volume 21*. (10. Baskı). ASM International.
- Ersoy, H. Y. (2001). *Kompozit malzeme*. İstanbul: Literatür Yayınları.

- Ganesh, R., Subbiah, R. ve Chandrasekaran, K. (2015). Dry sliding wear behavior of powder metallurgy aluminium matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 2, 1441-1449.
- Garbacz, P., Giesko, T. ve Mazurkiewicz, A. (2015). Inspection method of aluminium extrusion process. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15, 631-638.
- İlgaz, M. U. (1997). *Basınçlı döküm yöntemiyle üretilen seramik partikül takviyeli Al-Si esaslı metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Kalemtaş, A. (2014). *Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış*. 20 Şubat 2016, <http://www.academia.edu>.
- Kayalı, E. S. ve Ensari, C. (2000). *Metallere plastik şekil verme ilke ve uygulamaları*. İstanbul: İ.T.Ü. Kimya- Metalurji Fakültesi Offset Atölyesi.
- Khosravi, H. ve Akhlaghi, F. (2015). Comparison of microstructure and wear resistance of A356-SiCp composites processed via compocasting and vibrating cooling slope. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 25, 2490-2498.
- Lylod, D. J. (1994). Particle reinforced aluminum and magnesium matrix composites. *International Materials Reviews* 39 (1), 1-45.
- Mindivan, H. (2007). *Silisyum karbür takviyeli alüminyum matris kompozitlerin tribolojik davranışlarının incelenmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Mindivan, H. ve Kayalı, E. S. (2007). SiC takviyeli 2618 Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışı. *İ.T.Ü. Dergisi/Mühendislik* 6 (2), 63-70.

- Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites: From science to technological significance. *Composite Science and Technology*, 65 (15-16), 2526-2540.
- Mutlu, İ. (1996). *Alüminyum matriksli metal kompozit malzemelerin üretilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Naher, S., Brabazon, D. ve Looney, L. (2005). Development and assessment of a new quick quench stir design for the production of metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 166, 430-439.
- Orhan, A., Gür, A. K. ve Çalığülü, U. (2007). Al matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 8-13.
- Özben, T. (2001). *Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen seramik partikül takviyeli Al-Si esashlı metal matriksli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özkarakoç, M. (2002). *Alüminyum bazlı SiC_p takviyeli kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Popov, V. A., Shelekhov, E. V., Prosviryakov, A.S., Presniakov, M. Y., Senatulin, B. R., Kotov, A. D. ve diğer. (2016). Particulate metal matrix composites development on the basis of in situ synthesis of TiC reinforcing nanoparticles during mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*, 1-6.
- Rahman, H. ve Rashed, A. M. (2014). Characterization of silicon carbide reinforced aluminium matrix composites. *Procedia Engineering*, 90, 103-109.
- Sarıtaş, S. (1995). *Engineering metallurgy and materials*. Ankara: İletişim Fakültesi Basımevi.

- Sharman, P. ve Khanduja, D. (2015). Parametric study of dry sliding wear of aluminium metal matrix composites by response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, 2, 2687-2697.
- Sing, J. ve Chauhan, A. (2015). Overview of wear performance of aluminium matrix composites reinforced with ceramic materials under the influence of controllable variables. *Ceramics International* 42, 56-81.
- Smallman, R. E. (1970). *Modern physical metallurgy* (3. Baskı). Büyük Britanya: Butterworths.
- Srivatson, T. S., Ibrahim, I. A., Mohammed, F. A. ve Lavernia, E. J., (1991). Processing techniques for particulate-reinforced metal aluminium matrix composites. *Journal of Materials Science*, 26, 5965-5978.
- Taya, M. ve Arsenault, R. J. (1987). Thermal residual stress in metal matrix composite. *Acta Metallurgica*, 3 (35), 651-659.
- Tekmen, Ç. (2006). *Metal matriksli kompozitlerin sıkıştırırmalı döküm yöntemiyle üretimi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Uygur, İ. ve Saruhan, H. (2004). Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), 167-174.
- Vencl, A., Bobic, I., Arestegui, S., Bobic, B., Marinkovic, A. ve Bobic, M. (2010). Structural, mechanical and tribological properties of A356 aluminium alloy reinforced with Al₂O₃ and SiC+Graphite particles. *Journal of Alloys and Compounds*, 506, 631-639.
- Walczak, M., Pieniak, D. ve Zwierzchowski, M. (2015). The tribological characteristics of SiC particle reinforced aluminium composites. *Archives of Civil Mechanical Engineering*, 15, 116-123.

- Xiaofan, D., Tong, G., Guiliang, L. ve Xiangfa, L. (2017). In situ synthesizing SiC particles and its strengthening effect on an Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 1-8.
- Yıldız, T. ve Gür, A. K. (2006). *Doğu Anadolu bölgesi araştırmaları*. Fırat Üniversitesi, Elazığ. 20 Eylül 2016, <http://tr.scribd.com>.
- Yılmaz, F. (1997). Sürtünme ve aşınma. 9. *Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi bildiriler kitabı* içinde (ss. 229-256). İstanbul.
- Yılmaz, T. B. ve Avcı, B. (2012). *Rüzgar türbini kanat tasarımı ve analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Yılmaz, M. (1997). *Production and mechanical behavior of particulate reinforced aluminium matrix composites*, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Zhang, Q. ve Gu, M. (2006). Effect of silicon carbide particles on properties of Al/Si_p + SiC_p. *Materials Science and Engineering A*, 1, 2 (419), 86-90.