

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**SOĞUK İZOSTATİK PRESLEME İLE ÜRETİLEN
Al/SiC_p METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE
FAKTÖR ETKİLEŞİMLERİNİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİ VE KARAKTERİZASYON
ÇALIŞMALARI**

İdil ARİTMAN

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Rasim İPEK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 625.02.00

Sunuş Tarihi: 21.07.2014

Bornova-İZMİR

2014

İdil ARİTMAN tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “**Soğuk İzostatik Presleme İle Üretilen Al/Sicp Metal Matrisli Kompozitlerde Faktör Etkileşimlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi Ve Karakterizasyon Çalışmaları**” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 21.07.2014 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

Jüri Başkanı	: Prof. Dr. Rasim İPEK
Raportör Üye	: Doç. Dr. Uğur MALAYOĞLU
Üye	: Doç. Dr. İbrahim Etem SAKLAKOĞLU

İmza



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum **“Soğuk İzostatik Presleme İle Üretilen Al/Sicp Metal Matrisli Kompozitlerde Faktör Etkileşimlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi Ve Karakterizasyon Çalışmaları”** başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

24/06/2014

İdil ARİTMAN

ÖZET

SOĞUK İZOSTATİK PRESLEME İLE ÜRETİLEN Al/SiC_p METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE FAKTÖR ETKİLEŞİMLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ VE KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

ARİTMAN, İdil

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Rasim İPEK

Haziran 2014, 102 sayfa

Bu çalışmada; takviye oranı, matris toz boyutu ve takviye partikül boyutu faktörleri ile bu faktörlerin etkileşimlerinin, soğuk izostatik presleme yöntemiyle (CIP) üretilen Al/SiC_p metal matrisli kompozit malzemelerin mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Üretim yöntemi olarak soğuk izostatik presleme (250MPa) ve deney tasarımı ise central composite design (CCD) metodu kullanılmıştır. CCD metodu, fazla sayıda değişken içeren çalışmalarda deney sayısını azaltmakta çok faydalı olmaktadır. Ayrıca, incelenen faktörlerin ana etkilerini ve birbirleriyle olan etkileşimlerinin sistem üzerindeki etkisini belirlemede de kullanılmaktadır. CCD metoduna göre Al/SiC_p kompozitlerinin matris toz boyutları; 20, 32, 53, 75, 90µm, takviye partikül boyutları; 20, 32, 53, 75, 90µm ve takviye oranları %1.59, 5, 10, 15, 18.41 olarak tasarlanmıştır.

Çalışmada, başlangıç alüminyum tozu ve silisyum karbür tozlarının toz boyut analizi, optik mikroskop (OP), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-Işını kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır. Üretilen kompozit malzemelere ise, yoğunluk ölçümü, sertlik ölçümü, üç nokta eğme deneyi, adhesiv aşınma testi ve karakterizasyon çalışmaları için yine SEM, XPS ve XRD analizleri yapılmıştır.

MMK malzemelerde, eğme ve aşınma davranışı üzerinde en etkili faktör takviye oranı olmuştur. Takviye oranı arttıkça takviye partiküllerinin

kümelenmesine bağılı olarak Al/SiCp kompozitlerinin eğme dayanımları azalmış, aşınma dayanımları ise artmıştır. Mikro yapı incelemeleri sonunda üretilen numunelerin $M_s/R_s \leq 1$ olduğu deneylerde gözeneklilik ve/veya kümelenmenin daha az olduğu ve takviye parçacıkların matris içerisinde homojen dağıldığı görülmüştür. Bu durumda mekanik özelliklerin de iyileştiği; aşınma kayıplarının azaldığı, eğme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Fakat bu oranı oluşturan matris ve takviye boyutları arttıkça bu ilişki değişmektedir. Çünkü takviye partiküllerinin boyutlarının fazla artması, sıkıştırma esnasında partiküllerin kırılmasına sebep olmuştur. Kırılan partiküller kendi aralarında kümelenmiş ve etraflarında gözeneklilik oluşturmıştır. $M_s/R_s > 1$ olduğu durumlarda ise SiC partiküllerin matris partikülleri arasına giremediği için takviye fazının daha çok kümenlendiği görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Metal matrisli kompozitler, CIP, CCD, faktörler arası etkileşim, eğme dayanımı, aşınma.

ABSTRACT**EFFECTS OF FACTOR INTERACTIONS ON MECHANIC
PROPERTIES OF Al-SiCp METAL MATRIX COMPOSITES
MANUFACTURED BY COLD ISOSTATIC PRESSING AND
CHARACTERIZATION STUDIES**

ARITMAN, İdil

M.Sc in Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Rasim İPEK

June 2014, 102 pages

In this study, the effects of reinforcement volume fraction, matrix powder size, reinforcement particle size and their interactions on the microstructure and mechanical properties of Al/SiCp metal matrix composites manufactured by cold isostatic pressing (CIP) were investigated experimentally and statistically. CIP (250 MPa) was used as a method of manufacturing and Central Composite Design (CCD) method was used as design of experiment. CCD method is very effective to reduce the number of experiments in involving many variables studies. it is also used to determined the main effects of the studied factors and the effect on the system of their each other interactions. The sizes of Al/SiCp matrix powders were 20, 32, 53, 75, 90 μ m; reinforcement particles were 20, 32, 53, 75, 90 μ m and the reinforcement volume fractions were 1.59, 5, 10, 15, 18.41% is designated as CCD method.

In this study; particle size analysis, optic microscope, Scanning Electron Microscope (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD) analysis was performed on the starting aluminum powder and silicon carbide particles. Eventually, density measurement, hardness measurement, three-point bending test, adhesive wear testing, and SEM, XPS and XRD analysis for characterization studies were performed to the produced composite materials.

In MMK material, the most effective factor on bending and wear behavior has been the reinforcement volume ratio. As the reinforcement volume rate increased, bending resistance of A1/SiCp composite decreased due to cluster of reinforcement particles whereas wear resistance thereof increased. In experiments where the samples produced as a result of micro building examinations is $M_s/R_s \leq 1$, porosity and/or cluster have been less and it has been observed that the reinforcement particles have been homogeneously distributed in the matrix. It has further been observed that the mechanic properties have improved; wear losses have decreased and bending resistance have increased in such circumstances. On the other hand, as the matrix and reinforcement sizes which constitute such ratio increase, the aforesaid correlation has changed since increase in the size of the reinforcement particles has resulted in breaking of the particles at the pressing. The broken particles have clustered among themselves and created a porous structure. In cases where $M_s/R_s > 1$, it has been observed that the reinforcement phase has clustered more as the SiC particles could not cut into the matrix particles.

Keywords: Metal matrix composites, CIP, CCD, interactions between factors, flexural strength, wear

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmalarındaki katkı ve yardımlarından dolayı danışmanım Sayın Prof. Dr. Rasim İPEK'e teşekkürü borç bilir, saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans tezime ilgili olarak tez çalışmaları esnasında yönlendirmelerinden dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Uğur MALAYOĞLU'na ve Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Sayın Dr. Ege Anıl DİLER'e mekanik testlerin uygulanması aşamasındaki ilgilerinden dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Sayın Yük. Müh. Onur ERTUĞRUL'a, karakterizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesindeki yardımlarından dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Uzm. Sayın Yük. Müh. Serdar YILDIRIM'a ve son olarak tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan sevgili aileme teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

İdil ARİTMAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xviii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxv
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	3
3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER	5
3.1. MMK Matris Malzemeleri	7
3.1.1. Alüminyum ve alaşımları	8
3.1.2. Magnezyum ve alaşımları	8
3.1.3. Titanyum ve alaşımları	9
3.1.4. Bakır ve alaşımları	10
3.2. MMK Takviye Malzemeleri	10
3.2.1. Alümina (Al_2O_3)	11

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.2.2. Silisyum karbür (SiC)	11
3.2.3. Bor karbür (B ₄ C)	12
3.2.4. Titanyum Karbür (TiC)	13
4. MMK ÜRETİM YÖNTEMLERİ	14
4.1. Sıvı Hal Üretim Yöntemleri	16
4.1.1. Karıştırılmalı döküm	16
4.1.2. Kompo döküm	17
4.1.3. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi	18
4.1.4. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi	19
4.1.5. Püskürtme (çökeltme) yöntemi	19
4.1.6. In-situ yöntemi	20
4.2. Katı Hal Üretim Yöntemleri	21
4.2.1. Difüzyonla bağlama	21
4.2.2. Toz metalurjisi yöntemi	22
5. İZOSTATİK PRESLEME	27
5.1. İzostatik Gerilme Durumunun Diğer Gerilme Durumlarıyla Karşılaştırılması.....	29

İÇİNDEKİLER (devam)

	Sayfa
5.1.1. Tek eksenli gerilme	29
5.1.2. İki eksenli gerilme	30
5.1.3. Üç eksenli gerilme	30
5.1.4. İzostatik gerilme	31
6. SİNERLEME	36
7. PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	39
7.1. Elastiklik Modülü	39
7.2. Mukavemet	40
7.3. Yüksek Sıcaklık Dayanımı	43
7.4. Uzama Miktarı	43
7.5. Kırılma Tokluğu	44
7.6. Yoğunluk	45
7.7. Termal Genleşme	46
7.8. Yorulma	47
7.9. Sürünme	48
7.10. Aşınma Direnci	48
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	50

İÇİNDEKİLER (devam)

	Sayfa
8.1. Parametrelerin Seçimi ve Deney Tasarımı	50
8.2. Malzeme Seçimi	52
8.3. MMK Malzeme Üretimi.....	52
8.4. Eğilme Deneyi	56
8.5. Sertlik ve Aşınma Deneyi	57
8.6. Yoğunluk Ölçümü	58
8.7. Karakterizasyon	59
9. SONUÇLAR	61
9.1. Eğilme Dayanımı Sonuçları	61
9.1.1. İstatiksel Analiz	62
9.2. Sertlik ve Aşınma Dayanımı Sonuçları	66
9.2.1. İstatiksel Analiz	67
9.2.2. Aşınma Kaybı-Zaman İlişkisi	72
9.3. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	73
9.4. Mikro Yapı Çalışmaları	75
10. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
11. KAYNAKLAR DİZİNİ	83

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ 87

EKLER.....

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Takviye malzemesinin geometrisine göre MMK'ler	5
4.1. Karşılaştırmalı döküm yöntemi	17
4.2. Kompo döküm yöntemi	17
4.3. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi - partikül takviye	18
4.4. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi - sürekli fiber	18
4.5. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi	19
4.6. Püskürtme yöntemi	20
4.7. In-situ yöntemi	20
4.8. Difüzyonla bağlama tekniği	21
4.9. Toz metalurjisi üretim yöntemi aşamaları	23
4.10. Toz metalurjisi üretim teknikleri	24
5.1. İzostatik Presleme	27
5.2. Tek eksenli yoğunlaştırma işleminde kalıp ve toz arasındaki sürtünme katsayılarına bağlı olarak yükseklik boyunca yoğunluk değişimi	27
5.3. İzostatik Presleme a) Tek yönlü pres, b) Soğuk İzostatik Pres	28
5.4. Asal normal gerilmenin bileşenleri	29
5.5. Tek eksenli gerilmede etkileyen kuvvetler ve yönleri	30
5.6. İki eksenli gerilmede etkiyen kuvvetler ve yönleri	30

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.7. Üç eksenli gerilmede uygulanan kuvvet çiftleri	31
5.8. İzostatik gerilme durumu	31
5.9. Soğuk izostatik presleme	32
5.10. Sıkıştırma basıncı altında tanecik yoğunlaşması. a) sıkıştırma sırasında uygulanan basıncın etkisi, 1) doldurmadan sonraki gevşek tozlar, 2) yeniden paketlenme, 3) parçacıkların deformasyonu, b) tozların yoğunluğunun basınca bağlı olarak değişimi	33
5.11. Sıcak izostatik presleme	34
5.12. HIP ile üretilen numunenin sıcaklık ve basınca bağlı yoğunluk değişimi.....	35
6.1 Sinterleme ile boyun oluşumu	36
6.2. Boyun çapı X olan iki küresel partikül için sinterleme profili.....	36
6.3. Sinterleme mekanizmaları. a) Sinterlemenin göstergesi olan boyun boyut oranı, b) yüzey alanı azalması, c) büzülme, d) yoğunlaşma (densifikasyon) üzerinde sinterleme süresinin etkisi. (iki farklı sıcaklık için)	37
6.4. Kontakt halindeki iki partikül	37
7.1. Partikül takviyeli MMK malzemelerde partikül çapının çekme mukavemeti etkisi	42
7.2. Al 6061 metal matris kompozitte, SiC whisker takviyesinin ve sıcaklığın dayanma etkisi.....	43

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.3. Bazı metal matris malzemeleri ve takviye elemanlarının termal genleşme katsayılarının sıcaklıkla değişimi.....	46
7.4. Yorulma kırığının karakteristik yüzeyi	47
7.5. Adhesiv aşınma mekanizması	48
7.6. Adhesiv aşınma aşamaları a) İki tepeciğin teması, b) iki tepeciğin adhezyonu, c) aşınma ürünü oluşumu	49
7.7. Bir metal veya seramik malzemenin kaymalı çalıştırılmasında yüzeylerde oluşan film tabakaları	49
8.1. Sebep-sonuç (balık kılçığı) diyagramı	50
8.2. Al tozlarının faz analizi (XRD)	52
8.3. SiC tozlarının faz analizi (XRD)	52
8.4. Elek analizi a) Deneylerde kullanılan elek analizi cihazı, b) İhtiyaca göre ayrılmış toz grupları	53
8.5. Matris faktörü birinci seviye değeri ortalama partikül boyutu (25µm).....	53
8.6. V tipi karıştırıcı	54
8.7. Ön şekillendirme işlemi a) Tek eksenli pres b)Eğilme numunesi kalıbı....	54
8.8. CIP (Cold Isostatic Press)	55

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
8.9. Sinterleme fırını	55
8.10. Sinterleme işlemi basamakları	56
8.11. Eğme deneyi için numune boyutları	56
8.12. Üç nokta eğme deney standardı	56
8.13. Sertlik ölçümü. a) Brinell sertlik ölçüm cihazı b) sertlik izi	57
8.14. Silindir-disk aşınma cihazı	58
8.15. Yoğunluk ölçümü. a) numuneye su emdirme, b) su emdirilmiş numunenin havadaki ağırlığı, c) su emdirilmiş numunenin saf sudaki asılı ağırlığı	59
9.1. Eğilme dayanımına faktör ana etkilerinin ayrı ayrı etkileri	63
9.2. Takviye boyutu ve matris boyutu etkileşiminin eğme dayanımı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi	64
9.3. Takviye oranı ve takviye boyutu etkileşiminin eğme dayanımı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi	65
9.4. Takviye oranı ve matris boyutu etkileşiminin eğme dayanımı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi	65
9.5. Takviye oranı, matris toz boyutu ve takviye partikül boyutu faktörlerinin Al-SiCp kompozitlerinin aşınma kaybı üzerindeki ana etkileri.....	69
9.6. Takviye oranı ve matris toz boyutu etkileşiminin aşınma kaybı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi	70

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
9.7. Takviye oranı ve takviye boyutu etkileşiminin aşınma kaybı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi	71
9.8. Takviye boyutu ve matris boyutu etkileşiminin aşınma kaybı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi	71
9.9. Aşınma kaybı-zaman grafiği	72
9.10. 32/32 %5 (d=%93,47)	73
9.11. 53/90 %10 (d=%90,65)	73
9.12. Mikro yapı görüntüleri (a) 53/53 %1,59 (d= %93,68), (b) 32/75 %5 (d= %94,04), (c) 32/32 %15 (d= 92,23), (d) 53/53 %18,41 (d= 88,9)	74
9.13. SiC partikülleri boyut ve şekil analizi (SEM)	76
9.14. 100X büyütmede (a) 32/75 %5, (b) 75/32 %5 kompozitlerinin mikro yapı görüntüleri	77
9.15. 100X büyütmede 53/90 %10 kompozitin mikro yapı görüntüsü	78
9.16. 100X büyütmede 75/32 %15 kompozitin mikro yapı görüntüsü	78
9.17. 1000X büyütmede 32/32 %5 kompozitin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	79
9.18. 1000X büyütmede (a) 90/53 %10, (b) 53/53 %10 kompozitlerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri	79
9.19. 500X büyütmede (a) 32/32 %5, (b) 90/53 %10, (c) 53/53 %10 kompozitlerin mikro yapı görüntüleri	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Bazı MMK malzemelerin mekanik özellikleri.....	6
3.2. Saf Alüminyumun Önemli Fiziksel Özellikleri	8
4.1. MMK üretim yöntemleri açıklamalar	15
7.1. Partikül takviyeli alüminyum matrisli MMK malzemed, partikül hacim oranına bağlı olarak elastisite modülünün artışı	40
7.2. MMK malzemenin elastiklik modülünün sıcaklıkla değişimi	40
7.3. 6061Al-SiC kompozit malzemesinde, partikül hacim oranına bağlı olarak bazı mekanik özelliklerin değişimi	41
7.4. 6092 Al-Mg-Si/SiC kompozit malzemesinde, partikül hacim oranına bağlı olarak sünekliğin değişimi	44
7.5. Bazı partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin kırılma tokluğu değerleri	45
7.6. Bazı malzemelerin spesifik modül değerleri	46
7.7. Al ve Cu metal matrisli kompozit malzemelerde takviye oranının artışı ile termal genleşme katsayısının değişimi.....	47
8.1. Deneysel çalışmalar için incelenen faktörler ve seçilen seviye değerleri.....	50
8.2. Deney numaraları ve değerleri	51
9.1. CCD'ye göre yapılan deney tasarımı ve Al-SiCp kompozitlerinin eğme dayanımları	61

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
9.2. Eğilme ANOVA sonuçları	62
9.3. Eğme dayanımı üzerinde etkili olan terimlerin regresyon analizi	63
9.4. CCD'ye göre yapılan deney tasarımı ve Al-SiCp kompozitlerin sertlik değerleri	66
9.5. CCD'ye göre yapılan deney tasarımı ve Al-SiCp kompozitlerin aşınma kayıpları	67
9.6. Aşınma ANOVA sonuçları	68
9.7. Aşınma dayanımı üzerinde etkili olan terimlerin regresyon analizi	68
9.8. CCD'ye göre yapılan deney tasarımı ve Al-SiCp kompozitlerin yoğunluk değerleri	75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
E	Elastisite modülü
V	Takviye oranı
A	Takviye oranı faktörünün kodlanmış değeri
B	Matris toz boyutu faktörünün kodlanmış değeri
C	Takviye partikül boyutu faktörünün kodlanmış değeri
Y	Eğme dayanımı (Gerçek deneysel cevap değeri)
W	Aşınma kaybı
<u>Kısaltmalar</u>	
AMMK	Aluminyum esaslı metal matrisli kompozitler
CCD	Central Composite Design
HB	Brinell sertlik değeri
HV	Vickers sertlik değeri
K _d	Kümelenme derecesi
MMK	Metal matrisli kompozit
MML	Mechanically mixed layer (Mekanik olarak karışmış tabaka)
PMMK	Partikül takviyeli metal matrisli kompozitler
SEM	Scanning Electron Microscopy (taramalı elektron mikroskobu)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

XRD	X-Ray Diffraction (X- ışınları kırınımı)
CIP	Cold Isostatic Pressing (soğuk izostatik presleme)
HIP	Hot Isostatic Pressing (sıcak izostatik presleme)
TM	Toz Metalurji
Al/SiCp	Silisyum karbür partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit
M_s	Matris Boyutu
R_s	Takviye Boyutu
M_s/R_s %w	M_s matris boyutlu R_s takviye boyutlu %w takviye içeren MMK

1. GİRİŞ

Endüstride malzemeden istenen en önemli özellikler; dayanım, tokluk, hafiflik ve düşük maliyettir. Geleneksel malzemelerde ısıtılma işlemi yapılarak malzemenin bazı dayanım değerleri artırılmış fakat aşınma dayanımı, darbe dayanımı, kırılma tokluğu ve hafiflik gibi özellikler aynı anda sağlanamamıştır. Günümüz metal malzemelerinin birçok özellikleri gelişen teknolojinin ihtiyacına cevap verememesinden dolayı, daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilmeye başlanmış ve bu konuda hızlı bir gelişme sürecine girilmiştir (Kalaycıoğlu, 2010).

Alüminyum hafif ve kolay şekillendirilebilir olması nedeniyle sanayide sıklıkla kullanılan bir metaldir. Günümüzde demirden sonra en çok üretilen ve tüketilen metal olmakla birlikte dünyada oldukça büyük bir rezerve sahiptir. Fakat alüminyum metali yüksek sıcaklık ve aşınma hızlarıyla karşılaştığında bazı mekanik özelliklerini önemli ölçüde yitirmektedir. Bu nedenle Al ve alaşımlarının içine bir takım oksit veya karbür gibi seramik fazları katılarak dayanım özelliklerini arttırmak alüminyum matrisli metal matris kompozit üretiminin başlangıcı olmuştur (Diler, 2012).

Silisyum Karbür (SiC), yüksek sıcaklıklarda ulaştığı, iyi mekanik özelliklerle ileri teknoloji seramiklerinin en önemlileri arasında yerini almış bir malzemedir. SiC, düşük termal iletkenliğe, düşük termal genleşme katsayısına, yüksek termal şok dayanımına sahip, sert, yarı iletken ve elmasan daha büyük refraktif indeks değerine sahip bir malzemedir (Öğünç, 2006).

Silisyum karbür (SiC) partikül takviyeli alüminyum metal matris kompozitler yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve yüksek aşınma direncinden dolayı havacılık, deniz taşıtları, otomotiv, inşaat, askeri ve uzay teknolojisi başta olmak üzere bir çok alanda önemli kullanım alanına sahiptir. Bundan dolayı, bu kompozitlerin mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını daha da geliştirmek için devamlı bir araştırma ve deney süreci mevcuttur (Kumar and Balasubramanian, 2010).

Metal matris kompozit malzemeler; döküm, infiltrasyon ve toz metalurjisi (T/M) gibi birçok üretim methodologyyla başarılı bir şekilde üretilmektedirler. Bu üretim metodları içerisinde alüminyum matrisli metal matris kompozitlerin üretiminde kullanılan T/M yöntemi diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, düşük işlem sıcaklığından dolayı matris ve takviye malzemeleri arasında istenmeyen ara

yüzey reaksiyon ürünlerinin minimize edilmesi gibi birçok avantaja sahiptir (Diler and İpek, 2012b).

Toz metalurjisinin çoğu uygulamalarında nihai ürün açısından yüksek yoğunluk öncelikli bir kavramdır. Yoğunlaştırma yöntemleri arasında da yaygın olarak kullanılan izostatik presleme yöntemi, homojen ve üç boyutta eş basınç olanağı sağlamasından dolayı vazgeçilmez şekillendirme çözümlerinden biridir (Kim et al., 2001). Soğuk izostatik presleme numunenin oda sıcaklığında bir sıvı içerisinde üç ekseninde, numunenin her noktasına eş basınç uygulanmasıyla gerçekleşir (Yang et al., 2004). Normal presleme de sadece tek ekseninde kuvvet verilirken, kalıp yüzeyi ve kalıbın eş oranda doldurulamaması gibi nedenlerden dolayı kuvvet gören yüzeyler hiçbir zaman her noktada eş basınca maruz kalmazlar. Bu da pişirilen numunede yoğunlaşma gradyanları oluşturabilir. İzostatik presleme ile bu sorunlar olmaz. Ayrıca izostatik preslemede çıkan yüksek basınç değerleri ile yüksek yaş yoğunluk sağlanır ve böylece nispeten daha düşük sıcaklıkta daha homojen bir sinterleme yapılabilir.

Bu çalışmada, parçacık takviyeli alüminyum alaşımı esaslı metal matrisli kompozitler CIP yöntemiyle üretilmiştir. Takviye elemanı olarak SiC parçacıkları kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerde SiC takviye elemanı oranları ağırlıkça %1,59 %5 %10 %15 ve %18,41 olarak seçilmiştir. Matris ve takviye boyutları ise 20µm, 32µm, 53µm, 75µm ve 90µm olarak seçilmiştir. CCD metoduna göre üç farklı değişkenin beş farklı seviye değerinde tasarımları yapılmış, deney sayıları belirlenmiştir. Deney numuneleri 250MPa tek yönlü ve 250MPa CIP preslemeyle üretilmiştir. Ardından, 2 saat 600°C tüp fırında argon gazı ortamında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası öncelikle tek eksen ve CIP ile üretilen numuneler gözeneklilik bakımından kıyaslamak için Archimedes prensibine göre yoğunluk testleri yapılmış ve mikro yapıları karşılaştırılmıştır. Burada CIP'in üstünlüğü çok net gözlemlenmiştir. Daha sonra CIP ile üretilen farklı takviye oranı, farklı matris ve takviye boyutundaki numuneler kendi aralarında kıyaslamak amacıyla mikro yapı incelemeleri yapılmış, sertlik, aşınma, yoğunluk ve eğme dayanımı değerleri belirlenmiştir. sonuçların belirlenmesindeki ana faktörleri belirlemek ve faktörler arası etkileşim değerlerini bulmak için yine CCD metodundan yararlanılmıştır. Ayrıca MMK malzemelerin kırılma yüzeylerin incelenmesi maksadıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış ve kompozitlere XPS, XRD analizleri yapılmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemeye kompozit malzeme denir. İç yapıları çıplak gözle incelendiğinde (makroskobik muayene) yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına rağmen mikro ölçüde (mikroskobik muayene ile seçilebilen) heterojen malzemelerdir.

Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmezler, kimyasal olarak inert davranırlar. Ancak özellikle metalik sistemlerde düşük oranlarda bile olsa, bir miktar çözünme bileşenler arasında kompozit özelliklerini etkileyebilen ara yüzey reaksiyonları görülebilir.

Yapı bileşenlerinin farklı karakteristik özellikleri kompozit malzeme yapısında bütünleşir. Bu nedenle kompozitin sahip olduğu özelliklerin tümünü tek bir yapı bileşeninde görmek mümkün değildir. Kompozit malzemelerde amaç fiziksel, mekanik veya kimyasal özelliklerden herhangi birinin veya birkaçının geliştirilmesine yönelik olabilir.

Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir fiber malzeme bulunmakta, bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, fiber malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da fiber malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece fiber malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur. Kompozitin sınıflandırılması matris fazının polimer, metal veya seramik oluşuna göre yapılır.

Kompozit malzemelerin avantajları yüksek dayanım, hafiflik, uzun ömür, yüksek korozyon direnci, azaltılabilen veya arttırılabilen termal ve elektriksel iletkenlikleri olarak özetlenebilir. Bu malzemelerin dezavantajları ise yüksek hammadde ve işleme maliyeti, değişken özelliklerde olası zayıflıklar, düşük

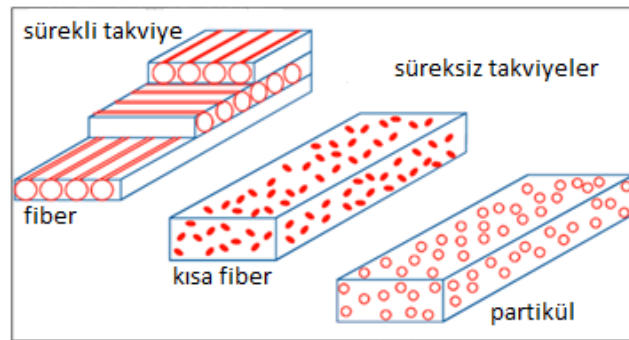
tokluk, geri dönüşümünün olmaması ve analiz yapımındaki zorluklar olarak öne çıkmaktadır. (Öğünç, 2006)

3. METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, arzu edilen özellikleri sağlamak üzere en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. MMK'ler tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere, bir metal matris içinde sürekli veya kısa fiber, whisker veya partikül şeklinde takviye fazı içerir. (Şahin, 2010)

Günümüz şartlarında üretilebilen metal matrisli kompozit malzemeler üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar elastiklik modülünün, belli oranda da mukavemetin artmasıyla sonuçlanan, bağlayıcı matris içine partikül şeklindeki takviye malzemelerinin ilavesi ile oluşturulan partikül takviyeli metal matrisli kompozit (PMMK), partikül takviyeli metal matrisli kompozitlere göre daha büyük yük iletimi yeteneğine sahip, yüksek dayanımlı whisker veya kısa fiber takviye metal matrisli kompozitler, fiberin yüksek performanslı tüm özelliklerini taşıyan sürekli fiber esaslı metal matrisli kompozitlerdir.

Belirtilen kompozit sistemlerinin her birinin de ayrı ayrı üstünlükleri ve zayıflıkları söz konusudur. Örneğin, partikül esaslı metal matrisli kompozitler düşük maliyetlerinin yanı sıra, rijitlikte dikkate değer gelişme ve hemen hemen izotropik özellikler gösterir. Ancak mukavemetteki gelişme sınırlıdır (Samal, et al., 2013). Ayrıca kopmadaki şekil değişiminin ve kırılma tokluğunun düşük olması bu kompozitlerin zayıf yönüdür. Whisker veya kısa fiber katkılı metal matrisli kompozitler, partikül esaslılara oranla daha pahalı, fakat daha mukavemetlidir. Sürekli fiber katkılı metal matrisli kompozitler elastiklik modülü ve mukavemetin en iyi kombinasyonunu vermelerine karşın bu kompozitlerin özellikleri anizotropiktir ve asıl zayıflıkları, kullanılan fiberlerin ve kompozit üretim maliyetlerinin oldukça yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. (Eker, 2008)



Şekil 3.1 Takviye malzemesinin geometrisine göre MMK'ler (Prasetyo, 2012)

Belli bir uygulama alanında kullanılmak üzere en uygun kompoziti elde edebilmek için MMK'in bileşenleri hakkında tam ve ayrıntılı bilgiye sahip olmak gerekmektedir. Takviye elemanının; cinsi, şekli, boyutu, dağılımı, yüzey özellikleri, kimyasal kompozisyonu, dağılım miktarı ve homojenliği gibi özgün ve yapısal özellikleri çok önemlidir. Bunun yanı sıra, metal matrisin de nitelikleri dikkate alınmalıdır. Matris, takviye fazını bir arada tutmaya yarayan bağlayıcı gibi davranır ve asıl işlevi katkı fazına yükü iletmektir. Takviye fazı ile matris alaşımının kimyasal olarak uyumluluğu da önemli bir konudur (Diler and İpek, 2013).

Sürekli fiberler, MMK'lere yüksek elastiklik modülü ve dayanım kazandırır fakat anizotropik özellik gösterirler. PMMK'ler ise izotropik özellik gösterirler. Örnek olarak, alüminyuma yaklaşık 4 ile 30 μm çapında düzensiz şekilli alümina ve silisyum karbür partikülleri katılarak üretilen düşük maliyetli alüminyum MMK malzemeler gösterilebilir.

Çizelge 3.1 Bazı MMK malzemelerin mekanik özellikleri (Eker, 2008)

Metal Matrisli Kompozit Malzeme	Çekme Dayanımı (Mpa)	Elastiklik Modülü (Gpa)	Kopmadaki Uzaman Miktarı (%)
<u>Sürekli fiberli</u> (fiber yönünde özellikleri)			
Al 2024-T6 (%45 Bor)	1458	220	0.810
Al 6061-T6 (%51 Bor)	1417	231	0.735
Al 6061-T6 (%47 SiC)	1462	204	0.89
<u>Süreksiz fiberli</u>			
Al 2124-T6 (%20 SiC)	650	127	2.4
Al 6061-T6 (%20 SiC)	480	115	5
<u>Partikül Takviyeli</u>			
Al 2124-F (%20 SiC)	552	103	7.0
Al 6061-F (%20 SiC)	496	103	5.5
<u>Güçlendirilmemiş</u>			
Al 2124-F	455	71	9
Al 6061-F	310	68.9	12

MMK'lerin diğer malzeme gruplarına tercih edilme nedenlerini açıklayabilmek için bu malzemelerin takviyesiz metallerle karşılaştırılması

gerekmektedir. Çizelge 3.1'de takviye cinsi, takviye oranı, takviye geometrisi ve takviyesiz malzemenin özellikleri karşılaştırılmıştır.

MMK'ler takviyesiz metallere aşağıdaki üstünlükleri sağlarlar:

- Yüksek dayanım/ağırlık oranı,
- Daha yüksek sıcaklık değerlerinde ısı kararlılık, örneğin sürünme direnci,
- Daha yüksek yorulma direnci,
- Boyutsal kararlılık.

MMK'leri PMK'lerden ayıran avantajları ise,

- Daha yüksek dayanım ve rijitlik,
- Daha yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik,
- Daha yüksek radyasyon direnci (lazer, UV),
- Çok az ya da hiç meydana gelmeyen kirlilik (zararlı gaz çıkışları) (Chawla and Chawla, 2006).

3.1. MMK Matris Malzemeleri

MMK'ler için matris malzemesi olarak genellikle hafif metaller tercih edilmektedir. Alüminyum ve alaşımları en çok kullanılan matris malzemeleridir (Bhanu Prasad et al., 2002). Bu alaşımların tercih edilmesinin nedeni düşük yoğunluk, düşük ergime sıcaklığına sahip olmaları ve birçok seramik takviye elemanını kolay ıslatabilmeleridir. Alüminyum saf olarak kullanılabildiği gibi alaşım olarak da kullanılabilmektedir. Yüksek aşınma dayanımı ve düşük sürtünme değerleri için Al-Si alaşımları, düşük yoğunluk ve yüksek termal iletkenlik için Al-Mg ve Al-Cu alaşımları matris alaşımı olarak kullanılabilmektedir.

Yüksek performanslı kompozit malzeme üretimi için matris malzemesi, takviye fiberleri veya partikülleri iyi ıslatabilmeli, iyi bir ara yüzey bağı oluşturmalı, mümkün olan en düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı şekilde katılma

yapabilmelidir. Ayrıca üretim esnasında veya bundan sonraki işlemler esnasında, matris ve takviye elemanı arasında diğer kimyasal etkileşimler olmamalı ve matris kararlı kalmalıdır.

Metal matrisli kompozit malzemelerde, matris malzemesi olarak genellikle Al, Ti, Mg, Ni, Cu, Co ve Zn gibi metaller ve alaşımları kullanılır. Fakat bunlardan sadece Al, Ti ve Mg alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1.1. Alüminyum ve alaşımları

Metal malzemeler içinde Alüminyum(Al) ve alaşımları, gerek saf olarak gerekse alaşım olarak en yaygın kullanılan malzeme gruplarından birisidir. Saf alüminyumun oksijene ilgisinden dolayı döküm kabiliyetinin kötü oluşu ve düşük mekanik özellikler göstermesi gibi istenmeyen özellikleri vardır. Alaşımlama yapılarak bu özelliklerde gelişme sağlanabilmektedir (Kumar et al., 2011). Al alaşımlarının yaygın kullanılmasının sebebi; dayanım / özgül ağırlık oranının yüksek olması, elektrik iletkenliği / özgül ağırlık oranının yüksek olması, atmosfere ve diğer ortamlara karşı korozyon direncinin iyi olması, plastik deformasyon kabiliyetinin iyi olmasından kaynaklanmaktadır. Alüminyum alaşımları, üretim yöntemlerine göre dövme alaşımları ve döküm alaşımları olarak iki ana gruba ayrılırlar. Bu iki grupta kendi içinde sertleştirilebilen ve sertleştirilemeyen alaşımlar olarak gruplandırılabilir.

Çizelge 3.2 Saf Alüminyumun Önemli Fiziksel Özellikleri

Saf Alüminyumun Önemli Fiziksel Özellikleri	
Elektrik iletim katsayısı	40 m/Ωmm ²
Isı iletim katsayısı	230 W/Mk
Isıl genleşme katsayısı	24*10 ⁻⁶ 1/K
Elastik modülü	66 Gpa
Ergime ısısı	-390 KJ/kg
Ergime sıcaklığı	660 °C
Özgül ağırlığı	2.78 gr/cm ³

3.1.2. Magnezyum ve alaşımları

Birçok endüstriyel uygulamada, hafif mühendislik malzemelerine olan talep sürekli artmaktadır. Hafif metal alaşımlarından olan magnezyum alaşımlarının,

endüstriyel uygulamalardaki kullanımlarının gelecekte oldukça yaygınlaşacağı beklenmektedir. Buna bağlı olarak da magnezyum esaslı kompozit malzemelerin kullanımı artacaktır. Magnezyumun yoğunluğu 1.74 gr/cm^3 olup, yapısal uygulamalarda kullanılan en hafif metaldir. Ağırlığı, alüminyumun üçte ikisi, demirin dörtte biri, bakır ve nikelin ise beşte biri düzeyindedir. Alaşımlandırıldığında, mekanik özelliklerinde iyileşmeler görülür. Magnezyum alaşımları, yüksek özgül dayanıma, iyi dökülebilirlik özelliğine ve yüksek sönümleme kapasitesine sahiptirler. Düşük ergime sıcaklığı ($650 \text{ }^\circ\text{C}$) ve iyi kaynak kabiliyetine sahip olan magnezyum, doğada yaygın olarak bulunabilmektedir.

Magnezyum, alüminyum kadar mukavemetli değildir, fakat spesifik dayanımı daha iyidir. Bu nedenle uzay araçlarında, yüksek hızlı makine ve nakliye araçlarında kullanılır. Ancak magnezyum alaşımları oksijene karşı ilgisinin fazla olması, düşük elastik modülü ve yorulma direncine sahip olması, yüksek sıcaklıkta sürünme dayanımı değerinin düşük olması vb. nedenlerle daha az tercih edilirler. En önemli alaşım elementleri alüminyum ve çinko olup, yaklaşık % 2.5-8 alüminyum ve % 0.5-4 çinko ilave edilir. Bu sayede dayanım artırılabilir. Magnezyum alaşımları iyi dökülebilir alaşımlardır, sertleşebilen ve sertleşmeyen türleri mevcuttur. Aşınma direnci düşük olan Mg ve Al gibi metal matrislere, rijit partikül takviyesi yaparak veya grafit gibi yağlayıcı partiküller katılarak aşınma dirençleri artırılabilir.

3.1.3. Titanyum ve alaşımları

Ti ve alaşımları, metal matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak yaygın kullanım alanına sahiptir. Titanyumun korozyona karşı dayanımı çok iyidir. Yüzeyinde ince bir TiO_2 tabakası oluşturarak, çok iyi korozyon direnci sağlar. Vücut içine konan parçalarda, proses kazanları vb. yerlerde bu özelliğinden dolayı titanyum ve alaşımları kullanılır. Ayrıca Ti metali, alüminyumdan daha rijit ve dayanıklıdır. Özellikle çok iyi mukavemet / özgül ağırlık oranına sahip olduğundan dolayı uçak ve uzay sanayinde uygulama alanları bulmuştur. En önemli dezavantajı pahalı olmasıdır.

Metaller arasında titanyumun ısı genleşme katsayısı oldukça düşüktür. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında Ti alaşımları oldukça iyi performans gösterir. Ti alaşımları matris olarak kullanıldığında, takviye elemanı ile iyi bir yapışma sağlamaktadır. Bu da ara yüzey mukavemetini artırıcı bir rol oynar.

Metal matrisli kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan titanyum alaşımları matris malzemeleri, Ti-6Al-4V, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al ve Ti-17Mo alaşımlarıdır. Titanyumun matris olarak kullanıldığı kompozit malzemelerde, en yaygın kullanılan takviye elemanları ise TiC ve SiC' dür.

3.1.4. Bakır ve alaşımları

Metal matrisli kompozit malzemeler içerisinde bakır ve alaşımlarının kullanımı özellikle elektronik sistemlerde uygulama alanı bulmuştur. Burada bakırın elektriği iyi iletme özelliği ön plana çıkmaktadır. Genellikle bakır matris içerisine grafit partiküller ilave edilerek, düşük termal genleşme katsayısına sahip, iyi iletken malzemeler elde edilebilir. Bu malzemeler elektrik kontaktörleri ve elektronik devre yapımında kullanılırlar. Bakırın en önemli dezavantajı ise, diğer bir iletken malzeme olan alüminyuma göre daha pahalı olmasıdır.

Bakır alaşımı bir matrise, grafit partiküller katılarak sürtünme ve aşınma özellikleri iyileştirilebilir. Katı yağlayıcı olarak grafitin kullanıldığı metal matrisli kompozit malzemelerin, yatak malzemesi olarak ku

ullanımı kurşun kullanımından kaynaklanan zehirleyici etkiyi ortadan kaldırır. Ayrıca Al ve Cu alaşımlarının sönümleme kapasitesi içlerine grafit katıldığında önemli oranda artmaktadır. Japon Hitachi firması tarafından, dökme demirde dahil olmak üzere titreşimi sönümleyen alaşımlardan daha iyi sönümleme yeteneği olan Gradia adı altında Al-grafit veya Cu-grafit metal matrisli kompozit malzemeler üretilmektedir.

3.2. MMK Takviye Malzemeleri

Metal matrisli kompozit malzemeler üretilirken; takviye elemanının seçimi, üretim tekniği, üretim esnasında takviye elemanının matris tarafından ısıtılabilmesi, takviye elemanlarının yapısal özellikleri, kompozit malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler. Bu nedenle takviye elemanının doğru seçilmesi ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Kullanım yerine bağlı olmakla birlikte metal matrisli bir kompozitte, genel olarak takviye elemanından beklenen temel özellikler, yüksek modül ve dayanım, düşük yoğunluk, matris ile kimyasal uyumluluk, üretim kolaylığı, yüksek sıcaklıkta dayanımını muhafaza etmesi, ekonomik olmasıdır. Üretilcek kompozitin yapısal bir uygulamada kullanımı durumunda düşük yoğunluğa, yüksek modül ve mukavemete sahip takviye

elemanına gereksinimi vardır. Metal matrisli kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviye elemanları Al_2O_3 , SiC, Bor, TiC ve karbondur (Şahin, 2006).

Doğada bir çok seramik parçacık halinde bulunduğundan, bunlar partikül takviyeli kompozitler için geniş bir aralıkta takviye potansiyeline sahiptir. Partikül takviyeli kompozitlerin avantajları; Sürekli veya kısa fiberlilere göre, partikül takviyeli kompozitler daha ucuzdurlar. Toz metalurjisi ve döküm gibi üretim teknikleri ve bunu takiben haddeleme, dövme ekstrüzyon gibi geleneksel ikincil işlemler uygulanabilir. İzotropik özellikler gösterirler. Rijitlikleri ve aşınma dayanımları iyidir. Uygulamalarda mukavemetin yüksek olması gerektiği durumlarda, kısa fiberler veya whisker katkılı kompozit malzemeler kullanılır. Rijitlik ve mukavemetin en kombinasyonunu ise anizotropik özelliklere ve en önemlisi de yüksek maliyete sahip sürekli fiber katkılı metal matrisli kompozitler verir. Metal matrislerde kullanılan en pahalı takviye elemanı bordur. Ardından sırasıyla SiC, karbon ve Al_2O_3 gelmektedir.

3.2.1. Alümina (Al_2O_3)

MMK'lerde amaç, düşük yoğunluklu ve yüksek dayanımlı malzemeler elde etmektir. Bu özellikler genelde yapı içine katılan seramik faz ile sağlanır. Alümina sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek modül ve rijitlik nedeniyle tercih edilen takviye elemanlarından. Alüminanın takviye elemanı olarak en yaygın kullanıldığı matris malzemesi alüminyum ve alaşımlarıdır. Al_2O_3 , SiC ile karşılaştırıldığında daha düşük modül ve dayanıma, daha yüksek yoğunluğa sahiptir. Fakat maliyet açısından, SiC'e göre daha ucuz bir malzemedir.

3.2.2. Silisyum karbür (SiC)

Metal matrisli kompozit malzemelerde kullanılan diğer bir seramik takviye elemanı SiC'dür. Silisyum karbür; simgesi SiC, yoğunluğu 3,22 g/cm, ergime noktası 2730°C, oda sıcaklığında katı, koyu gri renkte, silisyum ve karbürün karışımı olan seramik formunda bir malzemedir. Doğada meteor kaynaklı demirde bulunmuştur. 70'e yakın kristal formu vardır ve en çok kullanılan olanı α -SiC, 2000 °C'nin üzerindeki bir sıcaklıkta şekil verilir. B-SiC ise çinko sülfür kristal yapısı ile elmasa benzer şekildedir. B-SiC'da 2000 °C'nin üzerindeki bir sıcaklıkta şekil verilir (Güneş, 2010) .

Aşınma dayanımının yüksek, elde edilebilirliği kolay ve maliyeti düşüktür. Metal matris kompozit malzeme üretiminde matris içine sürekli fiber, kısa fiber, visker ve partikül formlarında katılabilir. SiC fiberler genel olarak CVD yöntemi ile karbon veya tungsten altlık üzerine, kaplama yolu ile üretilirler. Partikül ve whisker tipinde SiC takviyeleri ile üretilen metal matrisli kompozit malzemelere, ekstrüzyon, haddeleme gibi plastik şekil verme işlemleri yapılabilmesi de önemli bir avantajdır.

Silisyum karbür, metal matris kompozitin aşınma dayanımını ve mukavemetini önemli ölçüde artmasına neden olur. Silisyum karbür (SiC) kuvvetli kovalent bağ yapısında yapay bir malzemedir.

Al_2O_3 'den daha sert ve ısıya daha dayanıklıdır. SiC fiberlerin termal genleşme katsayısı da alümina ile kıyaslandığında daha düşüktür. Ayrıca korozyona karşı yüksek dayanım gösterir. Bu yüzden yaygın olarak hem aşındırıcı hem de refrakter olarak kullanılır. SiC yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyabildiğinden takviye malzemesinin oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıkta rijitlik ve mukavemet özelliklerini koruması ve ergimiş alüminyum içindeki etkisi bakımından bor fiberlerden daha iyidir. Diğer bir üstünlüğü de bor fiberden daha ekonomik olmasıdır. Demir-çelik yapımında metalürjik katkı olarak da kullanılır, elektriksel özellikleri nedeniyle ısıtıcı elementlerde ve elektrik devrelerinde kullanılırlar.

3.2.3. Bor karbür (B_4C)

Bor karbür, simgesi B_4C oda sıcaklığında katı, siyah renkte ve rombohedral kristal yapısına sahip bir malzemedir. Bor karbür, metal olmayan en önemli gruba ait olup, elmasan sonra en sert malzemedir (Güneş, 2010).

Sahip olduğu yüksek sertlik, mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerine rağmen yüksek maliyeti sebebiyle kompozit malzemelerdeki kullanımı henüz istenene seviyeye gelmemiştir. Çok az malzemedeki bulunan, sıcaklıkla çekme mukavemetinin artması da Bor Karbür'ü diğer takviye malzemelerine göre ön plana çıkarmaktadır. B_4C takviyeli kompozitin işleme problemleri ve mekanik özelliklerdeki sınırlamalar alüminyumun matris malzemesi olarak kullanımıyla önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Kumdalı, 2008).

Yoğunluğu 2,51 g/cm³, Ergime Sıcaklığı 2450°C, Çekme Dayanımı 155 N/mm², (980°C)-162 N/mm²(1425°C), Eğme dayanımı 345 N/mm², ve Basma Mukavemeti 2850 N/mm² olan Bor Karbür(B₄C) yalnızca HF, H₂SO₄, HNO₃ karışımlarında yavaşta olsa çözünebilmektedir (TMMOB, 2003).

3.2.4. Titanyum karbür (TiC)

Geçiş elementinin karbürü olan titanyum karbür, iyonik kovalent ve metalik bağlar içermektedir. Metalik bağ içermesinden dolayı yüksek termal iletkenliğe ve yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir. Alaşımlardaki gibi sabit olmayan bileşime sahiptir. Kovalent bağ içermesi titanyum karbürün yüksek sertlik, yüksek bağ enerjisi ve yüksek ergime noktasına sahip olmasını sağlamaktadır. Yüksek elektron enerji seviyesinde iyonik bağlara sahip olmasının sonucudur (Karaduman, 2010)

TiC, yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini muhafaza edebilmesi nedeniyle kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık uygulamalarında, yüksek modül, yüksek mukavemet ve iyi sürünme dayanımı gibi özelliklerini koruyan TiC'ün, diğer takviye malzemelerine göre en büyük dezavantajı yoğunluğunun fazla olmasıdır ($\rho = 4.93 \text{ gr/cm}^3$). Bu özelliği, TiC takviye malzemesinin yaygın kullanımını engellemiştir.

Titanyum ve nikel bazlı alaşımlarda, TiC partikül takviyesi yapılması ile kullanım sıcaklığı 1100 °C'nin üzerine kadar çıkarılmıştır. Ayrıca alüminyum matris, TiC partiküller ile takviye edilerek, piston ve biyel kolları imal edilmiştir. Bu şekilde aşınmaya karşı dayanımın arttığı belirlenmiştir.

4. MMK ÜRETİM YÖNTEMLERİ

MMK'ler; matris ve takviye malzemelerinin kimyasal özellikleri, takviye elemanının formu (tipi) ve malzemeden beklenen özelliklere bağlı olarak çok farklı metodlarla üretilirler. Bunlar;

➤ Katı Faz Üretim Yöntemleri

- Toz Metalurjisi
- Difüzyon Bağı
- Haddeleme

➤ Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

- Sıvı Metal İnfiltrasyon
 - Basınçlı İnfiltrasyon
 - Basınçsız İnfiltrasyon
- Sıkıştırma Döküm
- Sıvı Metal Karıştırma
- Plazma Püskürtme

➤ Diğer Yöntemler

- Rheocasting ve Compocasting Döküm Yöntemleri
- Vidalı Ekstrüzyon
- In-Situ Tekniği
- XD Tekniği

Sıvı faz üretim yöntemlerinde matris sıvı halde (yüksek sıcaklık) olduğu için kimyasal özelliklere de bağlı olarak matris ile takviye arasında ara yüzey reaksiyonu oluşma riski çok yüksektir. Ara yüzey reaksiyon ürünleri, MMK'lerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiledikleri için bu reaksiyon ürünlerinin oluşumu katı faz üretim yöntemlerinin uygulanmasıyla minimize edilebilir. Sıvı faz üretim yöntemleri, ekstrüzyon ve difüzyon bağlama gibi katı hal yöntemleriyle karşılaştırıldığında işlem sonucunda elde edilen ürün için herhangi bir ikincil işleme gerek kalmayabilir (Chawla and Chawla,2006).

Çizelge 4.1. MMK üretim yöntemleri açıklamalar (Schwartz, 1997)

Metod	Maliyet	Uygulama	Açıklamalar
Difüzyon Bağlama	Yüksek	Levha, kanat, mil, yapısal elemanlar.	Matris, levha; takviye elemanı da filaman formundadır.
Toz Metalurjisi	Orta	Başlıca küçük parçaların, civata, piston, valfve yüksek dayanım veısı dirençli malzemelerin üretiminde kullanılır.	Hem matris hem de takviye toz formundadır. Ergime olmadığı için reaksiyon bölgesi (ürünü) oluşmaz ve kompozit yüksek dayanıma sahip olur.
Sıvı-Metal İnfiltrasyon	Düşük/Orta	Rot, tüp ve tek ekseninde maksimum özelliklere sahip yapısal elemanların üretiminde kullanılır.	Filaman formunda takviye fazı kullanılır.
Sıkıştırılmalı Döküm	Orta	Otomotive endüstrisinde piston, bağlantı rodı, silindir başlıkları ve kompleks parçaların üretiminde kullanılır.	Takviye elemanı herhangi bir formda olabilir ve büyük ölçekli üretime uygundur.
Püskürtme	Orta	Sürtünme malzemeleri, elektrik fırçaları ve kontaktları ile kesme taşlama takımlarında kullanılır.	Takviye partiküller kullanılır ve tam yoğunluğa sahip malzemeler üretilebilir.
Kompo Döküm	Düşük/Orta	Otomotiv, havacılık, endüstriyel ekipman ve spor malzemesi endüstrileriyle yatak malzemelerinin üretiminde kullanılır.	Süreksiz fiberler özellikle partikül takviyeler için uygundur.

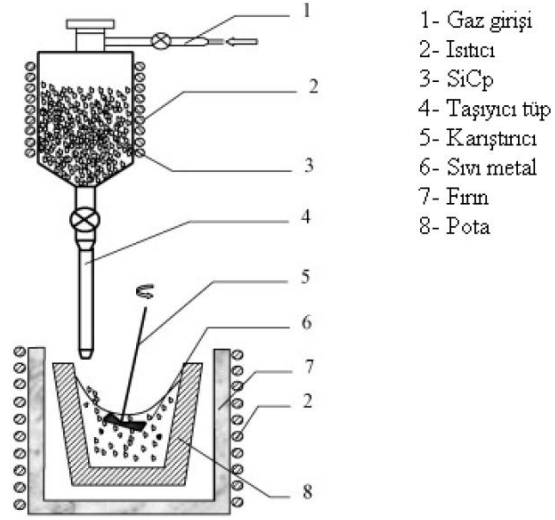
4.1. Sıvı hal üretim yöntemleri

MMK üretiminde yaygın olarak kullanılan yöntemler başlıca dört gruba ayrılabilir (Chawla and Chawla, 2006).

- Döküm ya da sıvı infiltrasyon: Bu üretim yöntemleri, fiber ya da partikül preformlarına sıvı metal emdirilmesi prensibine dayanır. Kısa fiber ya da partiküllerin sıvı metal içerisine direkt olarak ilave edilmesi halinde ise takviyelerin homojen karışımı için bir karıştırma işlemi uygulanır.
- Sıkıştırılmalı döküm ya da basınçlı infiltrasyon: Bu üretim yöntemlerinde, fiber ya da partikül preformlarına sıvı metal basınç yardımıyla emdirilir. Böylece kompleks şekilli parçaların üretimi daha kolay yapılabilir.
- Püskürtme: Yöntem, atomize edilen sıvı metalin takviye partikülleri ile bir altlık üzerine püskürtülerek katılaşması esasına dayanır.
- In situ (Reaktif) yöntemi: Bu yöntemde, takviye fazı ile sıvı metal reaksiyona girerek kompozit malzeme üretilir.

4.1.1. Karıştırılmalı döküm

MMK'lerin karıştırılmalı döküm yöntemi ile üretiminde öncelikle matris malzemesi fırın içerisindeki bir potada ısıtılarak belirli bir sıcaklıkta ergiyik hale getirilir. Ergiyik hale gelen sıvı metal içerisine belirli miktarda takviye partikülleri ilave edilir. Takviye partiküllerinin matris fazı içerisinde homojen bir şekilde dağılımını sağlamak için bir karıştırıcı ile sıvı metal ve takviye partikülleri karıştırılır (Şekil 4.1). Daha sonrasında karışım soğumaya bırakılarak MMK malzeme elde edilir. Matris malzemesinin ergiyik halde olmasından dolayı bulunduğu ortamla reaksiyona girmesini engellemek amacıyla üretim argon gibi koruyucu bir gaz atmosferi altında yapılır. (Şahin, 2003)

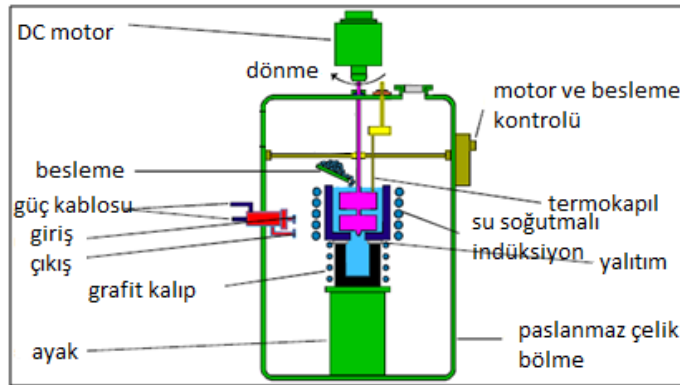


Şekil 4.1. Karıştırmalı döküm yöntemi (Nair and Karamış, 2009)

PMMK üretiminde en ekonomik ve basit yöntem karıştırmalı dökümdür. Fakat takviye partiküllerinin sıvı metal içerisinde dibe çökmeleri, sıvı metal yüzeyine çıkmaları ve kümeleşme eğilimleri bu yöntemi dezavantajlı yapar.

4.1.2. Kompo döküm

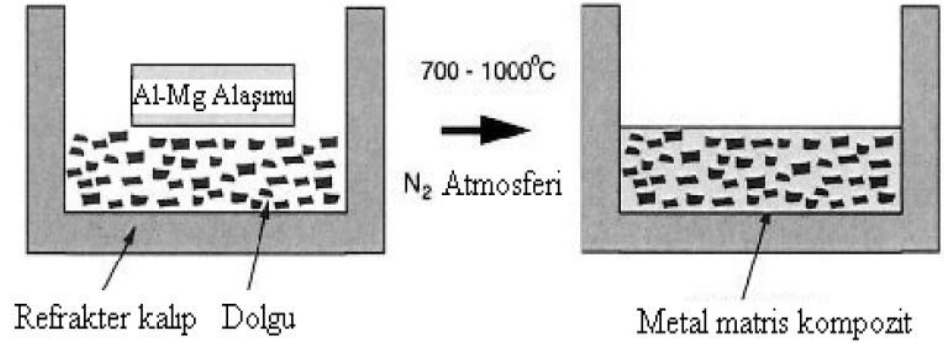
Yöntem prensipte karıştırmalı döküm yöntemine benzemektedir. Fakat karıştırma işlemi metalik malzemenin yarı katı yarı sıvı olduğu halde yapılır (Şekil 4.2). Bu durum ergiyik haldeki sıvı metalin yüksek sıcaklıkta bulunması nedeniyle neden olduğu olumsuzlukları azaltmanın dışında yöntem yarı katı-yarı sıvı halde yapıldığı için soğuma sırasında oluşan dendritik yapıların kırılarak daha küresel formda yapı içerisinde dağılmalarını sağlar. Ayrıca üretim sırasında oluşan gözenekler bu yöntem ile daha düşük seviyeye getirilebilir (Diler, 2012a).



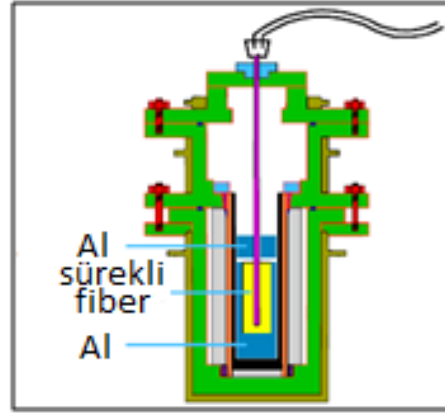
Şekil 4.2. Kompo döküm yöntemi (Prasetyo, 2012)

4.1.3. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi

Sıvı metal infiltrasyon yöntemi, sürekli ya da süreksiz takviyelerin bir bağlayıcı kullanarak bir araya getirilmesiyle elde edilen preforma sıvı metalin emdirilmesi yoluyla kompozit malzemelerin üretildiği bir yöntemdir (Şekil 4.3, Şekil 4.4). Sıvı metal emdirilmeden önce üretilecek parçanın şekline uygun preformlar hazırlanır. Hazırlanan preformlarda bulunan takviyeler arasındaki boşlukların sıvı metal emdirilerek doldurulmasıyla MMK üretimi gerçekleştirilir.



Şekil 4.3. Sıvı Metal infiltrasyon yöntemi-partikül takviye (Chawla and Chawla, 2006)

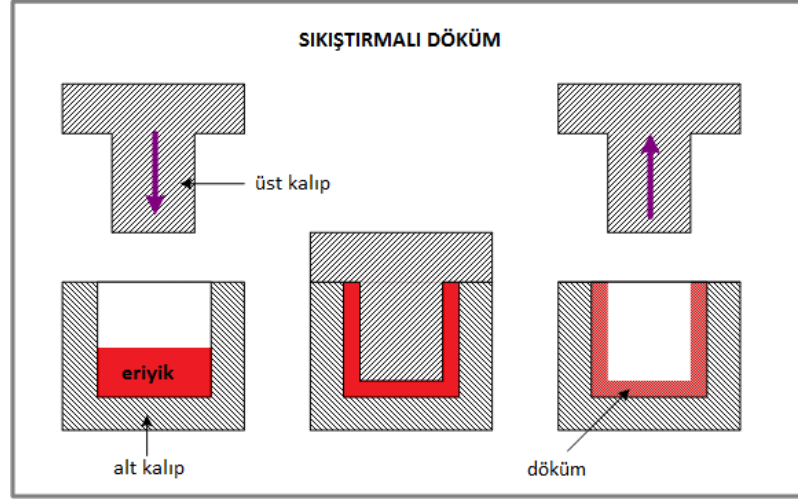


Şekil 4.4. Sıvı metal infiltrasyon yöntemi-sürekli fiber (Prasetyo, 2012)

Yöntemin avantajı hazırlanan preformlar sayesinde takviye fazının üretim aşamasında yerini koruyarak homojen dağılımının sağlanması ve takviye oranı yüksek malzemeler elde edilmesidir (Diler, 2012a). Dezavantajı ise, sıvı metal ile takviye fazı arasındaki ıslatma probleminden dolayı aralarındaki bağın zayıf ve mekanik özelliklerinin düşük olmasıdır.

4.1.4. Sıkıştırılmalı döküm yöntemi

Sıkıştırılmalı döküm, sıvı metal infiltrasyon metodunda olduğu gibi fiber ya da partiküllerden oluşan preforma, sıvı metalin emdirilmesi prensibiyle gerçekleştirilir. Fakat bu yöntemde sıvı metal ve preforma basınç uygulanarak preforma sıvı metal emdirilir. Burada basınç, mekanik güçle (Şekil 4.5) veya basınçlı bir soygaz yardımıyla uygulanır.

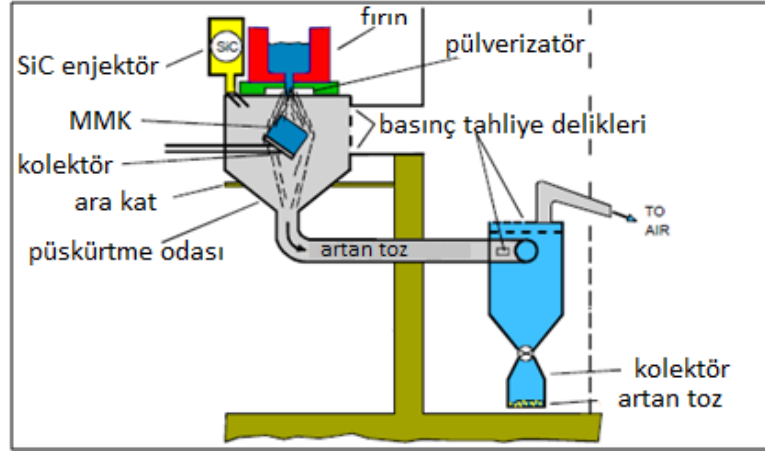


Şekil 4.5.Sıkıştırılmalı döküm yöntemi (Kopeliovich, 2012c)

Yöntemde basınç olması sebebiyle ısılatma problemi kısmen çözümlenmiştir. İşlem süresinin kısa olması ve karmaşık şekilli parçaların üretilmesi nedeniyle konvansiyal döküm yöntemlerinden daha avantajlıdır. Yöntemin basınçla gerçekleşmesi daha hızlı katılaşma ve bununla beraber ince taneli yapı, yüksek yoğunluk ve yüksek çekme dayanımı oluşturmaktadır (Chawla and Chawla, 2006).

4.1.5. Püskürtme yöntemi

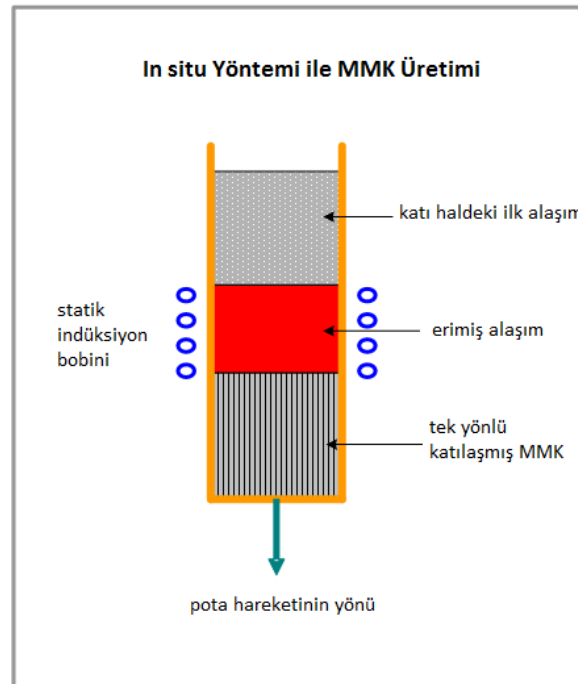
Yöntem, metalin bir potanın içerisinde ergitilmesi ve su veya bir soy gaz yardımıyla atomize edilirken aynı anda takviye partiküllerinin ilave edilerek altlık üzerine biriktirilmesiyle gerçekleşir (Şekil 4.6). Yöntemin hızı yüksek olduğundan ara yüzey reaksiyonları fazla değildir (Chawla and Chawla, 2006). Son ürünün yoğunluğu düşüktür. Ayrıca püskürtülen metal damlası sıvı haldeyken takviye partiküller damla içerisinde homojen bir şekilde dağılırken, yarı katı hale geldiğinde takviye partikülleri damla içerisine nüfuz edemeyerek damlanın dış kısmında kümelenmesi, yöntemin dezavantajıdır.



Şekil 4.6. Püskürtme yöntemi (Prasetyo, 2012)

4.1.6. In-situ yöntemi

In-situ yönteminde, iki bileşenin takviye fazını oluşturmaları için ekzotermik reaksiyona girmelerine izin verilerek MMK malzeme üretilmektedir (Şekil 3.8). Örneğin Al, Ti ve B tozlarının karıştırılıp reaksiyona girmeleriyle Al/TiB₂ kompozit malzemesi elde edilirken Al, Ti ve C tozları ile Al/TiC kompoziti elde edilebilmektedir. Yöntemin dezavantajı; kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan takviyelerin şekli, boyutu ve hacimsel oranı ile ilgili sınırlamalardır (Chawla and Chawla, 2006).



Şekil 4.7. In-situ Yöntemi (Kopeliovich, 2012b)

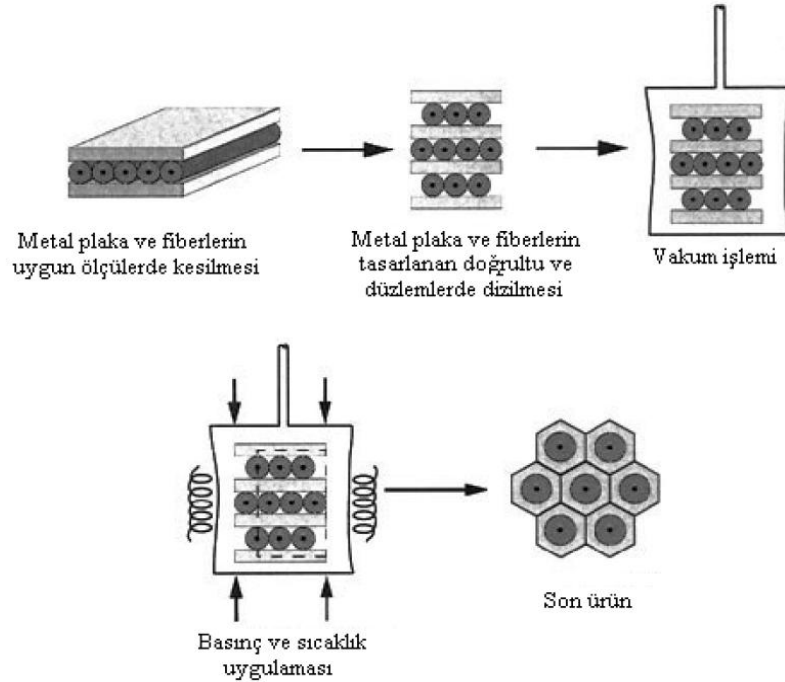
4.2. Katı hal üretim yöntemleri

Yöntem kısaca, takviye partiküllerinin karıştırılması, presleme gibi işlemlerle yoğunlaştırılması ve ekstrüzyon ya da dövme gibi ikincil işlemlerin uygulanması ile MMK malzeme üretimidir. Matris ve takviye arasında gerekli bağı sağlamak için malzeme, ergime sıcaklıklarının altındaki bir değere kadar ısıtılmaktadır. Süreksiz takviyelerin, toz metalurjisi yöntemi dışında uzun fiber takviyelerin kullanıldığı difüzyonla bağlama da diğer bir katı hal üretim yöntemidir.

Sıvı hal üretim yöntemlerine kıyasla matris içerisinde takviye dağılımının kontrolü ve homojen dağılımlarının sağlanması zordur. Fakat üretim sıcaklıkları sıvı hal üretim yöntemlerine nazaran daha düşük olduğu için, mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyen ara yüzey reaksiyonları çok daha azdır.

4.2.1. Difüzyonla bağlama

Bu yöntemde, ince saç şeklindeki metal plakalar arasına fiberler belirli düzende ve hacim oranlarında yerleştirilerek yüksek sıcaklıklara ısıtılmakta ve sıcaklık ve uygulanan basıncın etkisiyle atomların karşılıklı difüzyonuyla MMK üretimi gerçekleştirilmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Difüzyonla bağlama tekniği (Chawla and Chawla, 2006)

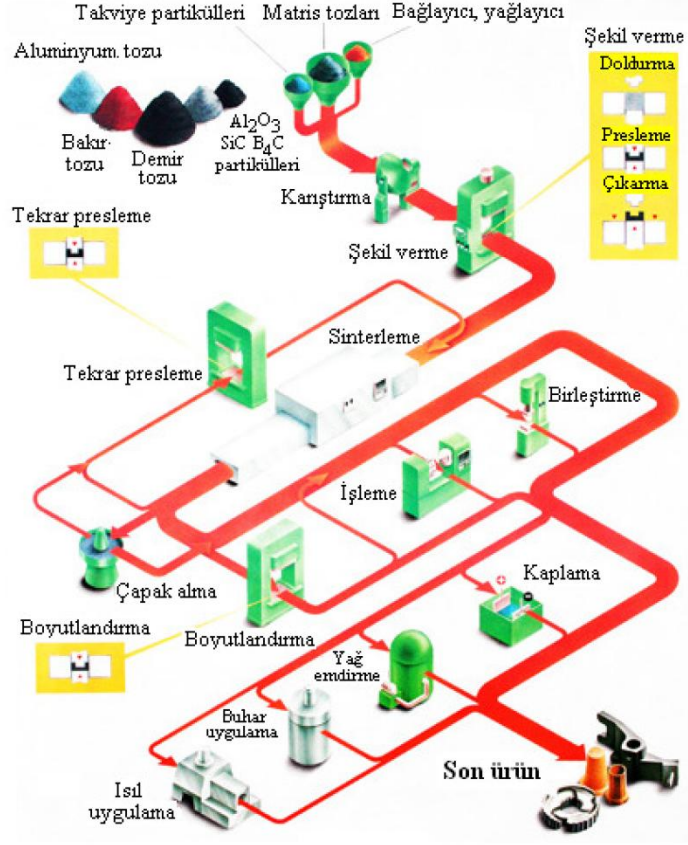
Difüzyonla bağlamada uygulanan bir diğer yöntemde ise fiberler öncelikle PVD işlemiyle matris malzemesiyle kaplanmakta ve yine sıcaklık ve basıncın etkisiyle birleştirilmektedirler.

Difüzyonla bağlama yönteminin avantajları; çok geniş bir aralıkta metal malzemenin kullanılmasına olanak sağlaması, matris içerisinde fiber düzeninin kontrol edilebilir olması ve fiber oranının matris içerisinde çok yüksek oranda bulunmasına olanak sağlamasıdır. Yöntemin dezavantajları ise işlem süresinin uzunluğu, uygulanan sıcaklık ve basınç değerlerinin yüksek olmasından dolayı yüksek işlem maliyetleri ve karmaşık şekilli parçaların üretimine uygun olmamasıdır.

4.2.2. Toz metalurjisi yöntemi

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri toz metalurjisi tekniğidir. Bu yöntemde toz halindeki metal ve seramik malzemeler birleştirilebilir. Seramik partiküllerin sıvı metal tarafından ıslatılmasındaki güçlük nedeniyle toz metalurjisi ile kompozit üretimi ilk geliştirilmiş tekniklerden birisidir. Bu teknikte genel olarak partikül veya whisker formunda takviye elemanları ile toz haldeki metal kullanılarak, metal matrisli kompozit malzeme oluşturulur. Yaygın kullanılan takviye elemanları silisyum karbür, grafit, titanyum karbür, en çok kullanılan matris malzemeleri ise alüminyum, titanyum ve bakırdır.

Toz metalurjinin temel aşamaları; Hızlı katılaşmış metal veya alaşım tozlarının elenmesi, Takviye fazı ile metal tozlarının karıştırılması, Yaklaşık %75 yoğunlukta sıkıştırılması, Gaz giderme ve ekstrüzyon dövme haddeleme ve diğer sıcak işlemler ile son birleştirme işleminin uygulanmasıdır (Eker, 2008).

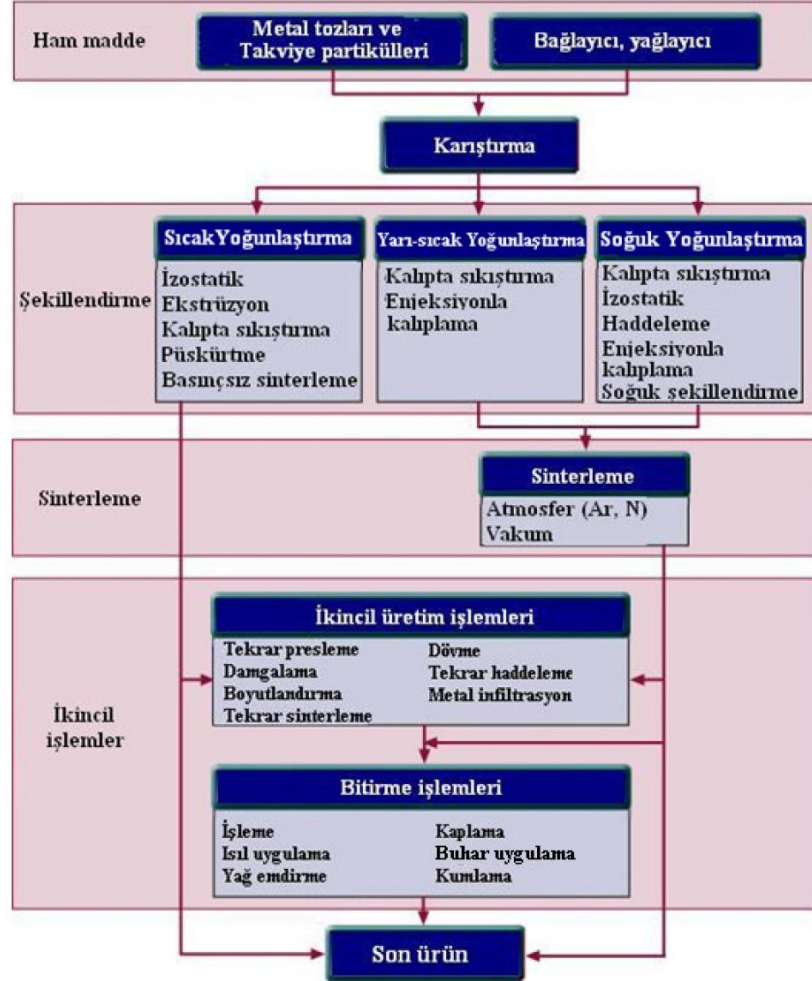


Şekil 4.9. Toz metalurjisi üretim yöntemi aşamaları (Components GTB, 2014)

Toz metalurjisi yöntemiyle metal matrisli kompozit malzeme üretiminde, matris ve takviye elemanlarının tozları öncelikle karıştırılır ve istenen şekli verebilecek bir kalıbın içine boşaltılır. Daha sonra bu toz karışımını sıkıştırabilmek ve ön mukavemet kazandırabilmek amacıyla basınç uygulanır. Kompakt yapı eldesi için yüksek basınç uygulanır. Ardından toz parçacıkları arasındaki birleşmeyi kolaylaştırmak amacıyla sıkıştırılmış toz karışımı yeterli miktarda katı hal difüzyonu oluşturacak şekilde ergime noktasının altında bir sıcaklıkta sinterlenir. Sinterleme işleminde takviye malzemesi hasar görmez.

Toz presleme ve sinterlemenin ayrı ayrı yapıldığı bu yöntemde elde edilen malzeme yoğunluğu çok iyi değildir. Bu nedenle artık günümüzde yaygın olarak sıcak presler (HP) kullanılmaktadır. Bu işlemde tozlar karıştırıldıktan sonra, toz sıkıştırma (presleme) ve sinterleme işlemi aynı anda yapılır. Bir başka deyişle, toz karışımı sıcak preslenir. Bu şekilde yoğunluk artarken, takviye – matris ara yüzey bağda önemli ölçüde kuvvetlenir.

Sinterleme ile teorik yoğunluğun %85-%95' ine ulaşılabilmekte ve istenen özelliklere ulaşmak amacı ile daha sonra meydana gelen ürüne ikincil operasyonlar örneğin; ekstrüzyon, dövme, haddeleme uygulanabilmektedir. Sıcak presleme sonucunda üretilen parça ekstrüzyon, haddeleme ve dövme gibi ikincil işlemlerin ardından kullanıma hazır hale gelir. Bir diğer alternatifte sıcak izostatik preslemedir (HIP). Bu yöntem ise son şekle yakın, çok yüksek yoğunluklu malzeme üretimi için daha uygundur. Ancak oldukça pahalıdır (German, 2005).



Şekil 4.10. Toz Metalurjisi Üretim Teknikleri (Metal Powder Industries Federation, 2012)

4.2.2.1. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantajları

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen parçaların genelde sıvı hal üretim yöntemleriyle üretilmiş parçalardan daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları bilinmektedir. Özellikle partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde bu yöntemin tercih edilmesinin nedeni, Toz metalurjisi (T/M) ile üretilen MMK malzemelerin üretiminin daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir. Bunun

sonucunda matris ve takviye elemanı arasında daha az etkileşim olmaktadır. Böylece mekanik özelliklerin azalmasına neden olan istenmeyen ara yüzey reaksiyonları en aza indirgenmiş olmaktadır. Takviye elemanının matris içinde homojen dağılımının sağlanabilmesi ancak T/M yöntemiyle gerçekleştirilebilmektedir.

Döküm metotlarında da parçacık dağılım homojen olmadığından, T/M üretim yöntemi tercih edilmektedir. Ergitme yöntemleri ile kompozit hazırlamanın mümkün olmadığı malzeme kombinasyonlarında T/M yöntemi başarılıdır. Örneğin, SiC whiskerlerin, sıvı titanyum alaşımları içinde oldukça fazla çözünmesi nedeniyle ergitme yöntemleri ile mümkün olmayan kompozit üretimi T/M yöntemi ile mümkün olmaktadır. Her türlü matris alaşımı ve takviye türü için uygulanabilir. Döküm tekniği yerine T/M yöntemi kullanılarak parçacık veya whisker takviyeli kompozit üretimi hem daha kolay olmakta hem de daha homojen yoğunluklu kompozit parça üretilebilmektedir.

SiC whiskerler, toz haldeki alüminyum alaşımları ile sıvı haldeki alüminyum alaşımlara kıyasla daha iyi uyum sağlamaktadır. T/M yöntemi ile parçacık veya whisker takviyeli kompozit malzeme, döküm yöntemlerine kıyasla daha kolay üretilmektedir. Sıvı karıştırma ve spreyci yöntemleri ile sınırlı olan hacimsel takviye oranı (% 15-20), toz metalurjisi yöntemi ile % 90 değerlerine kadar (kesici takımlarda olduğu gibi) çıkabilmektedir.

Katı hal yayılması sırasında, ara yüzeydeki reaksiyonlar en alt düzeyde olur. Yüksek dayanımlı kompozit parçalar üretilir. T/M yöntemiyle partikül takviyeli metal matrisli kompozit üretiminde takviye partiküllerin kontrolü mümkün olduğundan, yapının kontrolü de mümkündür. Çünkü yapı içerisinde dağılmış partikül boyutları ile yapının mekanik özellikleri arasında direkt ilişki vardır.

Yüksek takviye oranının elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bundan dolayı da yüksek modüllü, düşük termal genleşme katsayısına sahip kompozitler üretilebilmektedir (Upadhyaya, 2002).

4.2.2.2. Toz Metalurjisi Yönteminin Dezavantajları

Toz karıştırma işlemi sırasında, kısa fiber takviyesinin yapıldığı uygulamalarda kısa fiberler kırılabilir. Büyük parçalar için çok yüksek

basınç gerektirmesi maliyeti arttırır. Sıcak presleme sonrası genelde parçaya son şeklini vermek için ekstrüzyon, haddeleme veya dövme gibi ikincil işlem yapmak gereklidir. Küçük parçaların üretimi için uygundur.

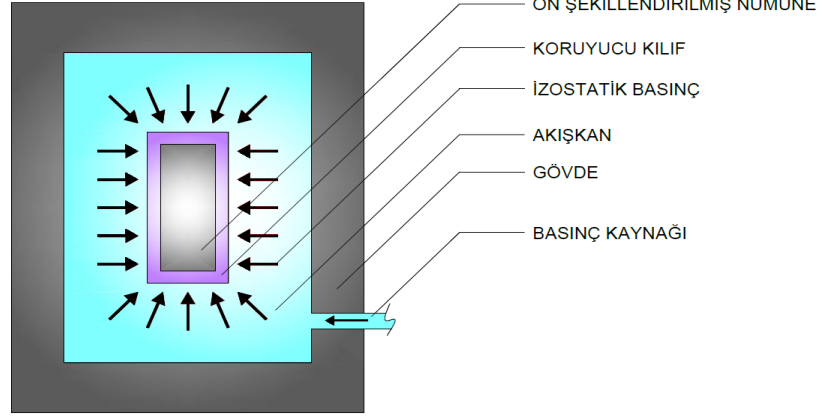
Ayrıca, toz kullanımı temizlik gerektirir. Aksi halde yabancı maddeler, artıklar vb. malzeme içine nüfuz ederek mekanik özellikler üzerine olumsuz etki yapabilmektedir. Takviye ve metal tozlarının basma işlemi öncesi homojen olarak karıştırılması gerektiğinden karıştırma aşaması pahalıdır.

Yüksek derecede reaktif tozların işlemlerini kapsadığından, potansiyel tehlike oluşturan ve fazla zaman isteyen işlemdir. Kullanılan tozların saflığı yüksek olmalıdır. Aksi takdirde ürün içinde inklüzyonlar oluşacak ve istenmeyen oluşumlar kırılma tokluğu ve yorulma dayanım değerlerini olumsuz etkileyecektir. (Eker, 2008)

5. İZOSTATİK PRESLEME

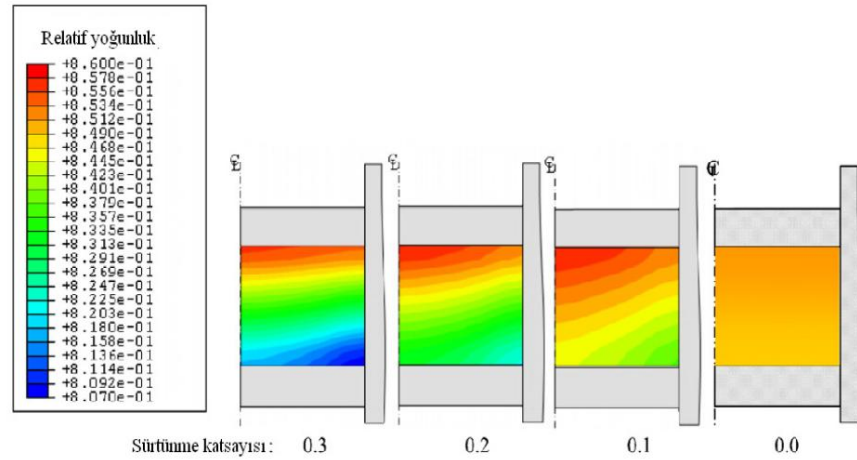
İzostatik presleme, bir toz kütesine veya ön şekillendirilmiş bir parçaya bütün yönlerden eşit şekilde basınç uygulaması ile gerçekleştirilen bir şekil verme yöntemidir.

İZOSTATİK PRESLEME



Şekil 5.1. İzostatik Presleme

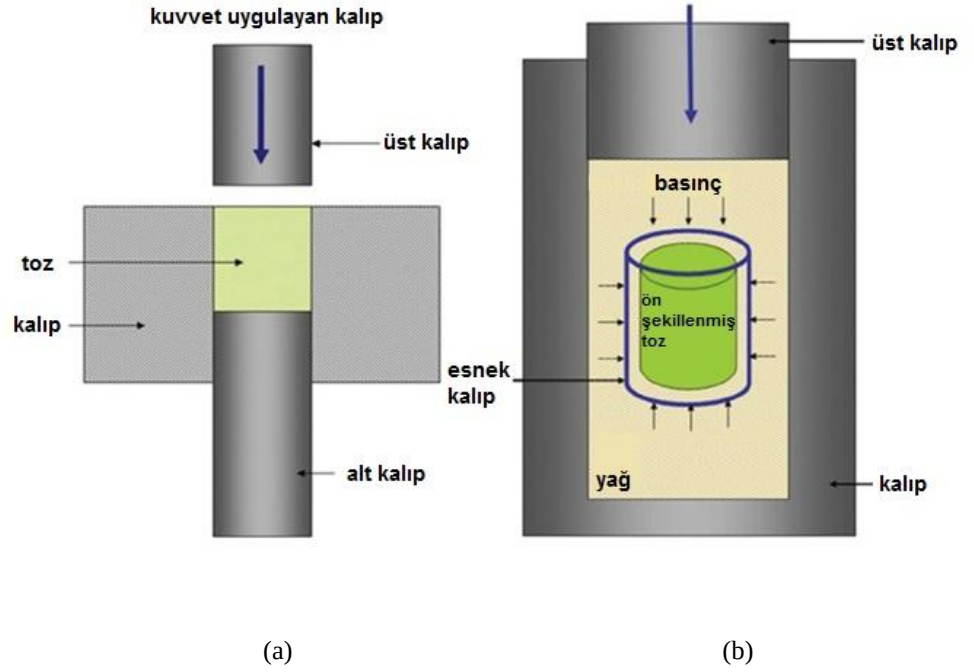
İzostatik presleme; büyük, uzun, ince veya kalıpta sıkıştırma yöntemiyle homojen olarak yapılamayacak parçaların üretiminde kullanılır. Sıkıştırma işlemi bir izostatik ortamda gerçekleştiği için basınç homojen bir şekilde dağılmakta ve böylece uniform bir yoğunluk elde edilmektedir (Henderson et al., 2000).



Şekil 5.2. Tek eksenli yoğunlaştırma işleminde kalıp ve toz arasındaki sürtünme katsayılarına bağlı olarak yükseklik boyunca yoğunluk değişimi (Szanto et al., 2008).

Tek eksenli yoğunlaştırma yönteminde yoğunluk zimbaya yakın olan kısımlarda daha yüksek olmakta, dolayısıyla parçanın yüksekliği boyunca düzensiz bir yoğunluk dağılımı meydana gelmektedir (Şekil 5.2).

İzostatik preslemede, tek eksenli preslerin aksine kalıp duvarı ile pres arasında sürtünmeden doğan kalıcı gerilmeler oluşmamaktadır. Ayrıca sürtünme olmadığından herhangi bir bağlayıcı veya yağlayıcı ilavesine de gerek kalmamaktadır. İzostatik presleme, kalıp yüzeyi sürtünmesi olmadığı için kalıpta sıkıştırma yöntemine göre daha fazla yoğunluk verir. İzostatik preslenmiş parçalarda yoğunluk gradyanları daha küçük olduğu için büyük sinterleme daralmaları sırasında çarpılma olmaz. Bundan dolayı; sert metaller, kalıp çelikleri, paslanmaz çelikler ve birçok seramik büyük parçaların şekillendirilmesinde kullanılır.



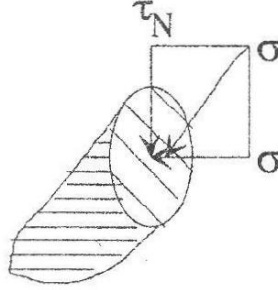
Şekil 5.3. İzostatik Presleme a) Tek yönlü pres, b) Soğuk İzostatik Pres (Seo et al., 2010)

Ham peletler şekil 5,3’de görülen soğuk izostatik preste (CIP) yüksek basınçlarda izostatik (eş eksenel) olarak sıkıştırılarak sinterleme öncesi maksimum ham yoğunluğa ulaştırılır. Sistem sıvılara ait “pascal prensibine” göre çalışır. Soğuk izostatik presleme sırasında, “Pascal prensibi” uyarınca toz kompaktını her doğrultuda eşit basınç uygulayarak sıkıştırır. Tek eksenli preslerin aksine kalıp duvarı ile pres arasında sürtünmeden doğan kalıcı gerilmeler oluşmamaktadır. Soğuk presleme işleminden sonra her yönden eşit olarak

sıkıştırılarak yoğunluğu arttırılan numunenin istenen nihai özellikleri (mekanik özellikler, yoğunluk gibi) vermesi için herhangi bir sinterleme metoduyla (basınçsız sinterleme, sıcak presleme vb.) sinterlenmesi gerekir.

5.1. İzostatik Gerilme Durumunun Diğer Gerilme Durumlarıyla Karşılaştırılması;

Bir cisme uygulanan farklı yön ve şiddetteki kuvvetlerin etkisi ile gerilmeler meydana gelir. Bu gerilmelerin, herhangi bir ayırma yüzeyine göre biri dik, diğeri de paralel olmak üzere iki bileşeni vardır. Ayırma düzlemine dik olan normal gerilmeye asal normal gerilme denir.



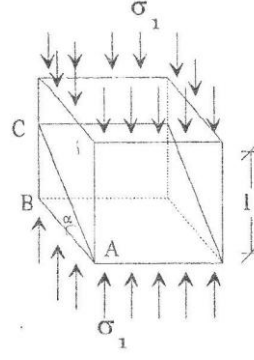
Şekil 5.4. Asal normal gerilmenin bileşenleri (Kılıç, 2005)

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \qquad \sigma = \frac{P}{A}$$

Bu bileşke gerilme, σ_1 , σ_2 , σ_3 gibi birbirine dik üç asal normal gerilme ile $\sigma = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ şeklinde tanımlanır.

5.1.1. Tek Eksenli Gerilme

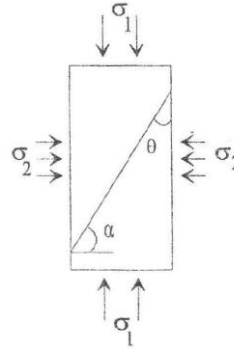
Bir A noktasından geçen bütün yüzey elemanlarındaki gerilme vektörleri sabit bir doğrultuya paralel ise bu gerilme haline tek eksenli gerilme hali denir. Şekilde kenar uzunluğu 1 birim ve h yüksekliğindeki kare prizma üzerine σ_1 gerilmesi uygulanıyor.



Şekil 5.5. Tek eksenli gerilmede etkiyen kuvvetler ve yönleri (Kılıç, 2005)

5.1.2. İki Eksenli Gerilme

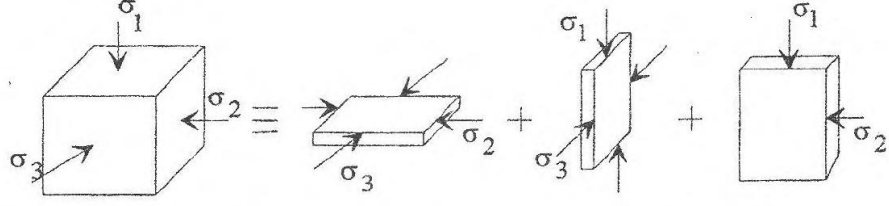
A noktasından geçen bütün yüzey elemanlarındaki gerilme vektörleri aynı bir düzleme paralel ise bu gerilme haline iki eksenli veya düzlem gerilme hali denir. Farklı şiddetlerdeki iki asal normal gerilmenin ($\sigma_1 > \sigma_2$) etkisinde kalan cisimde düzlemsel gerilme olur. Gerilme farkına ise ($\sigma_1 > \sigma_2$) deviatör gerilme denir.



Şekil 5.6. İki eksenli gerilmede etkiyen kuvvetler ve yönleri (Kılıç, 2005)

5.1.3. Üç Eksenli Gerilme

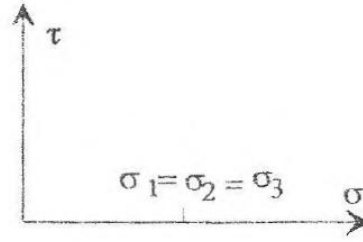
Üç eksenli gerilme durumunda cisme σ_1 , σ_2 , σ_3 asal normal gerilmeleri etkimektedir. Seçilen üç ayrı kesit yüzeylere etki eden kuvvetler şekilde gösterilmiştir. Her kesit düzleminde ayrı ayrı gerilme farkları oluşmaktadır.



Şekil 5.7. Üç eksenli gerilmede uygulanan kuvvet çiftleri (Kılıç, 2005)

5.1.4. İzostatik Gerilme

Her üç asal normal gerilmenin şiddeti de aynı ise, deviatör gerilmeler oluşmaz. Bu takdirde gerilme daireleri $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ noktasında toplanır. Mohr Diyagramında gerilme durumu bir nokta ile gösterilir. İzostatik gerilme durumunda cismin hangi ayırma yüzeyi seçilirse seçilsin, hiçbir kayma gerilmesi etkili olmaz, sonsuz sağlamdır (Kılıç, 2005).



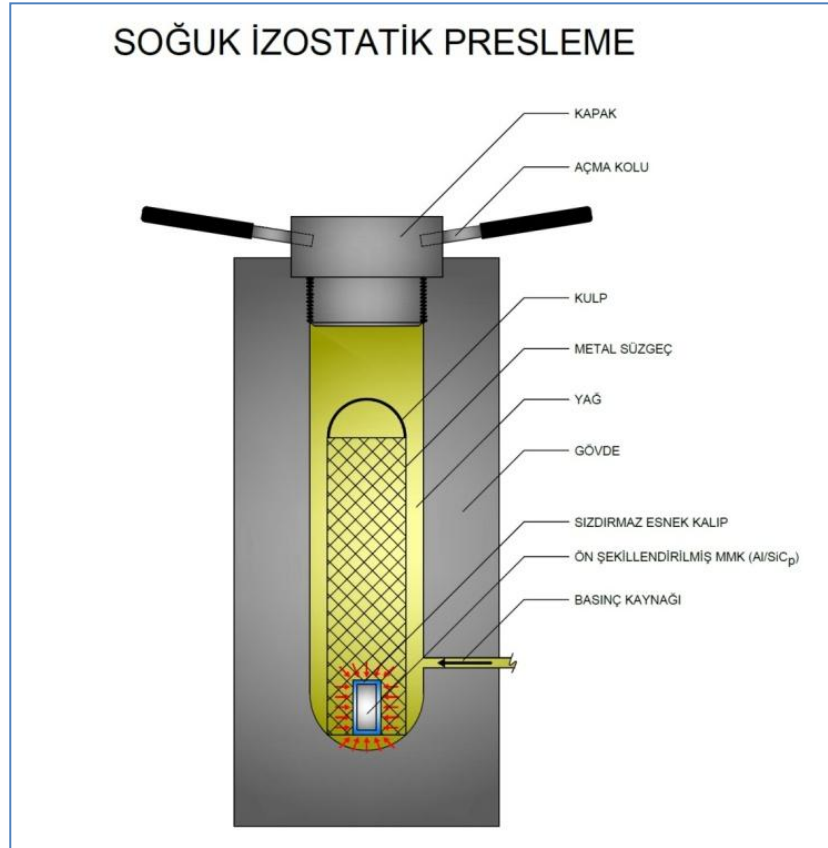
Şekil 5.8. İzostatik gerilme durumu (Kılıç, 2005)

Oda veya ortam sıcaklığında yapılan izostatik presleme soğuk izostatik presleme (CIP) olarak isimlendirilirken yüksek sıcaklıkta yapılan izostatik presleme ise sıcak izostatik presleme (HIP) olarak bilinmektedir. CIP’de kompakt hale getirilmiş olan parçaya, bir yüksek sıcaklık sinterlemesi uygulanarak daha yüksek yoğunluğa sahip ürünler elde edilmektedir. HIP yönteminde ise toz kütlenin sıkıştırılması ve sinterlenmesi aynı anda gerçekleşmektedir. Ayrıca CIP’de basınç geçirici ortam olarak çeşitli sıvılar kullanılırken HIP’de ise soygazlar kullanılmaktadır.

5.1.4.1. Soğuk İzostatik Presleme

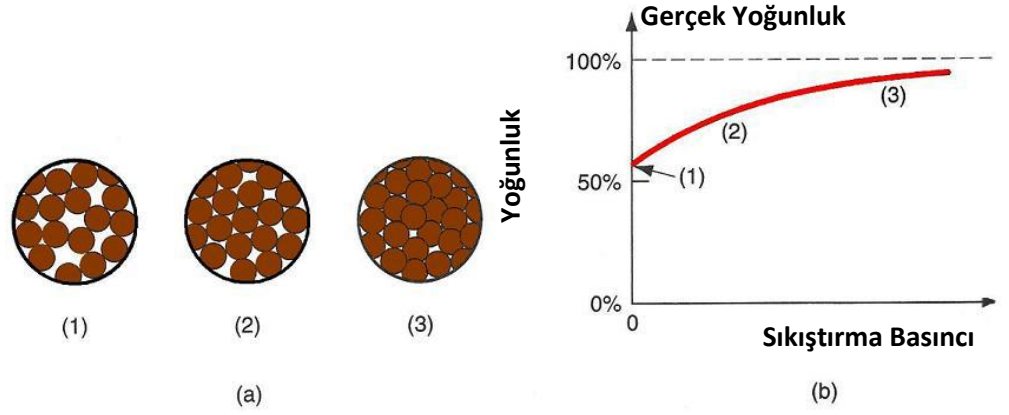
Soğuk izostatik presleme (CIP), kademeli ve karmaşık şekilli parçalar veya boy/çap oranının büyük olduğu parçalar için tercih edilir. Tozların kalıp içerisinde

tek yönlü preslenmesinde hareketli piston ile kalıp yüzeyi ve tozlarla kalıp yüzeyi arasında meydana gelen sürtünme nedeni ile uygulanan basınç tüm tozlara eşit olarak iletilemez. Bu durum özellikle boy/en oranı (L/D ; L =Yükseklik, D =Genişlik) büyük olan parçalarda homojen olmayan yoğunluk dağılımına neden olur. Parça iç yapısındaki homojen olmayan bu yoğunluk dağılımı nedeniyle preslenmiş parçalar sinterleme sırasında farklı boyutsal daralma miktarları nedeniyle şekilsel deformasyonlara maruz kalabilirler. Bunun giderilmesi için düşük basınçlarda preslenen numuneler soğuk veya sıcak izostatik presleme denen ve daha yüksek basınç altında bir akışkan yardımı ile sıkıştırma sağlayan sistemlerde homojen dağılımlı ve yüksek yoğunluklu parçalara dönüştürülürler (Kumar and Balasubramanian, 2008; Wang et al., 2014; Liu et al., 2014).



Şekil 5.9. Soğuk izostatik presleme

CIP işleminde, toz esnek bir kalıp içinde sızdırmaz hale getirilir (Yang et al., 2004). Bu toz-kalıp birleşimi yağ veya su gibi bir sıvının olduğu kabın içinde sıkıştırılır. Genellikle yağlayıcılar kullanılmaz. Bununla beraber, sert metallerin ham yoğunluğunu arttırmak için bazı parafinler ilave edilebilir. 1.400 MPa'a kadar sıkıştırma basınçları mümkün olmasına rağmen, CIP genellikle 420MPa altındaki basınçlarda yapılır (Ekşi and Sarıtaş, 2001).



Şekil 5.10. Sıkıştırma basıncı altında tanecik yoğunlaşması. a) Sıkıştırma sırasında uygulanan basıncın etkisi, 1) Doldurmadan sonraki gevşek tozlar, 2) yeniden paketleme, 3) parçacıkların deformasyonu, b) tozların yoğunluğunun basınca bağlı olarak değişimi. Buradaki sıralama, Şekil 5.10.'daki (1), (2) ve (3) aşamalarına karşı gelmektedir.

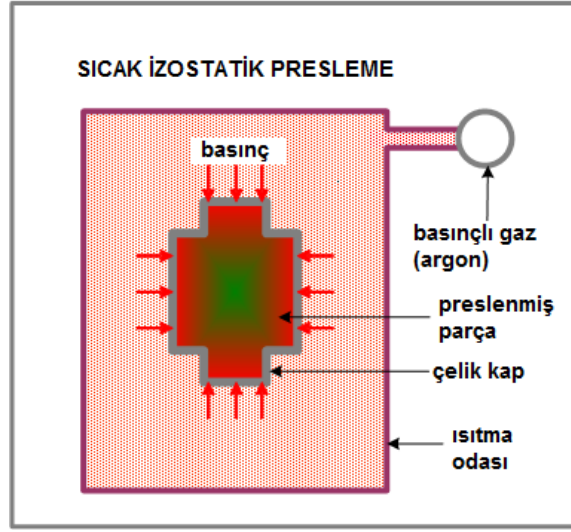
Esnek kalıp; lastik, lateks, poliüretan veya polisilikondan(oda sıcaklığında vulkanize olmuş) yapılır. Bunların seçilmesinin sebebi bir kalıpta daldırma ile veya dökümle kolaylıkla üretilebilmeleridir. Eğer kalıp yumuşak ise, sıkıştırma sırasında parçacıklar arasındaki gözeneklere girme riski vardır. Dolayısıyla, sert ve dayanıklı polimerlerin kullanılması yaygındır. Lastik kalıplar karmaşık şekilli olabilir, fakat toz yoğunlaşmasını karşılayacak şekilde büyük olmalıdır. Genellikle tozun dolumu sırasında kalıbın şeklini kaybetmesini önleyebilmek için kalıp dışarıdan desteklenir. Bazı durumlarda ise sıkıştırmadan önce kalıbın içerisindeki hava boşaltılır.

Soğuk izostatik preslemenin iki tipi ıslak ve kuru kalıplama tekniğidir. Islak kalıplamada, doldurulup sızdırılmazlığı sağlanmış esnek kalıp bir sıvı haznesine konur ve Şekil 5.9'da görüldüğü gibi dışarıdan bir hidrolik sistemle basınç uygulanır. Sıkıştırılma yapıldıktan sonra esnek kalıp hazneden dışarı alınır ve sıkıştırılmış parça esnek kalıptan çıkarılır.

Kuru kalıplama yöntemi seri üretimlerde kullanılır. Esnek kalıp basınç haznesi içine monte edilmiştir. Esnek kalıp şekil değiştirir fakat hazneden dışarı çıkarılmaz. İki uçtaki tapalar vasıtasıyla toz doldurulur ve parça esnek kalıptan çıkarılır (German, 2005).

5.1.4.2. Sıcak İzostatik Presleme (HIP)

Sıcak izostatik presleme (HIP) prensip olarak soğuk izostatik preslemeye benzer. Ancak, HIP eş eksenli uygulanan basınçla birlikte basınç kabının ısıtılarak tozların daha az kuvvetle ve daha yüksek yoğunlukta şekillendirilmesidir. Yani HIP yönteminde toz kütlenin sıkıştırılarak şekillendirilmesi ve sinterlenmesi aynı anda gerçekleşmektedir. Ayrıca CIP’de basınç geçirici ortam olarak çeşitli sıvılar kullanılırken HIP’de inert gazlar kullanılmaktadır.

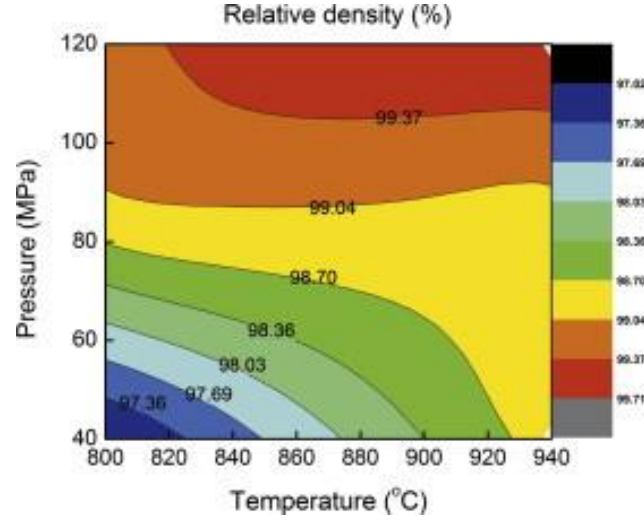


Şekil 5.11. Sıcak İzostatik Presleme (Kopeliovich, 2012a)

Seramik malzemelerin şekillendirilmesi sonrası sinterlenmesinden oluşan klasik yöntemde sinterleme işlemi, yüksek sıcaklıkta ve uzun bir sürede yapılırsa bile nihai malzemede, relatif yoğunluk ancak %80-90 mertebesinde. Normal bir sinterleme işleminde difüzyon prosesine bağlı olarak tam bir yoğunluk, ancak difüzyonun hızlı olduğu ergime noktasına yakın yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Bu uygulamanın dezavantajı, refrakter ve seramik malzemelerin çok yüksek ergime sıcaklıklarına sahip olmaları nedeni ile; çok yüksek sıcaklıklarda sinterlemenin hem teknik açıdan hem de ekonomik açıdan mümkün olmamasıdır.

Seramik ürünlerin yoğunluğunu arttırmak için genellikle HIP’e başvurulur. HIP prosesinde yoğunluk, büyük ölçüde atomların yayınması ile değil, toz malzemenin hareketi ile gerçekleşmekte ve bu işlem düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürede sağlanmaktadır (Wu et al., 2010). HIP kinetiğine etki eden parametreler sıcaklık, basınç, toz boyutu ve malzemenin mekanik davranışlarıdır. HIP prosesi

sonunda meydana gelen yoğunlaşma belirli boyuttaki toz ve sıcaklık için HIP basıncına bağlı olarak değişmektedir.

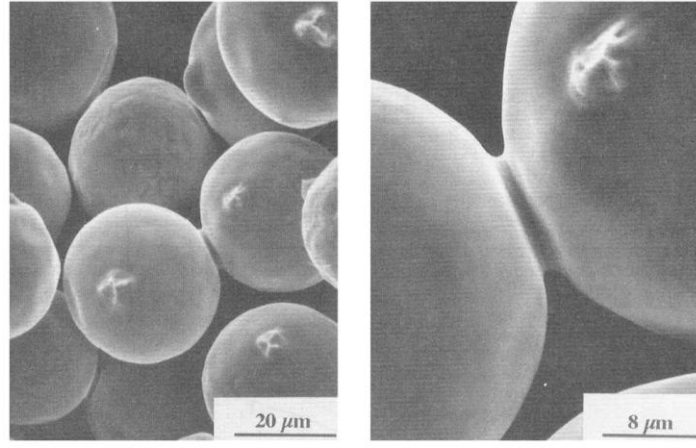


Şekil 5.12. HIP ile üretilen numunenin sıcaklık ve basınca bağlı yoğunluk değişimi (Xu et al., 2014)

Sıcak izostatik preslemenin önemi gün geçtikçe artmakta olup; klasik yöntemlerle poroziteyi ortadan kaldıracı için gereğinden yüksek sıcaklık ve basınç altında uzun süre malzemeyi tutmak yerine daha düşük sıcaklıklarda ve kısa sürede işlem tamamlanmaktadır. Bu sayede hem mikroyapının tane boyutu küçük olmakta hem de enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Günümüzde HIP prosesi, takım çeliklerinin, nükleer yakıtın, titanyum alaşımlarının, refrakter malzemelerin, seramik kompozitlerin ve süper alaşımların üretiminde kullanılmaktadır.

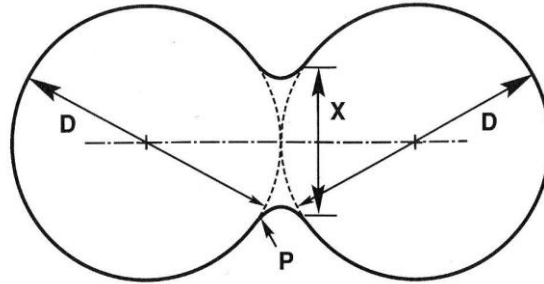
6. SİNERLEME

Sinterleme, ham konuma göre partiküller arası birleşmeyi sağlayan ve birçok özelliği geliştiren ısıl prosestir. Sinterleme işlemi ergime noktası altındaki sıcaklıklarda katı-hal atom taşınım olaylarıyla gerçekleştirilir, ancak bazı durumlarda sıvı faz oluşumunu da içerebilir. Mikro yapısal ölçekte bakıldığında bağlanma partikül temas noktalarındaki kohezif boyun büyümesi ile meydana gelir. Şekil 6.1 sinterleme küreleri arasındaki katı-hal boyun oluşumunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsünü göstermektedir.



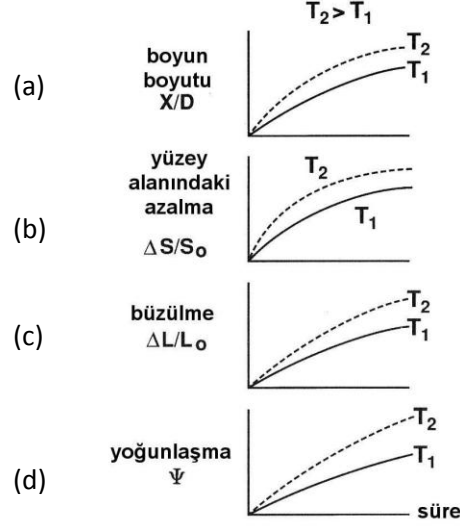
Şekil 6.1.Sinterleme ile boyun oluşumu (Zeren, 2006)

Bu boyun büyümesi özelliklerin değişmesine neden olmaktadır. Toz partikülleri, toz konumundan kaynaklanan yüksek yüzey enerjisini ortadan kaldıran atom hareketleri sayesinde sinterlenir. Birim hacim başına yüzey enerjisi, partikül çapı ile ters orantılıdır. Yüzey enerjisi tipik olarak yüzey alanı üzerinden değerlendirilir. Bu nedenle yüksek özgül yüzey alanına sahip daha küçük olan partiküllerin daha fazla enerjisi vardır ve daha hızlı sinterlenirler.

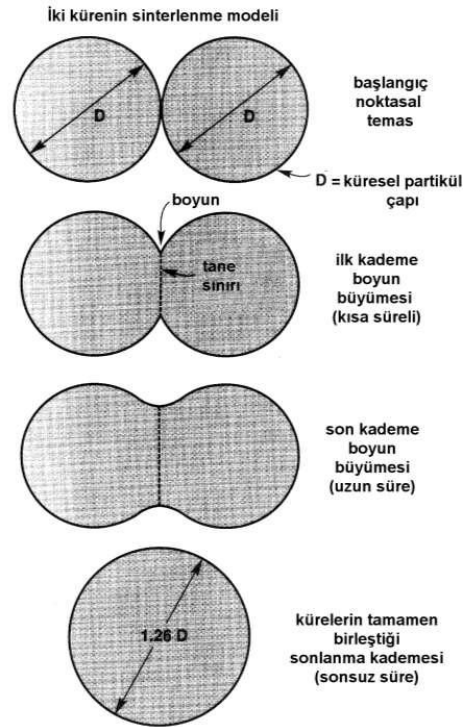


Şekil 6.2. Boyun çapı X olan iki küresel partikül için sinterleme profili (Zeren, 2006)

Sinterlemenin diğ er bir ölçüsü de boyun boyut oranıdır (X/D). Ş ekil 6.3'de gösterildiğ i gibi boyun ç apının partikül ç apına bölümü ile elde edilir. Sinterlenen bir küt lede, boyun büyümesi, büzülme, yoğunlaşma ve mukavemette artış görülür.



Ş ekil 6.3. Sinterleme mekanizmaları. a) Sinterlemenin göstergesi olan boyun boyut oranı, b) yüzey alanı azalması, c) büzülme, d) yoğunlaşma (densifikasyon) üzerinde sinterleme süresinin etkisi. (iki farklı sıcaklık için) (Zeren, 2006)



Ş ekil 6.4. Kontakt halindeki iki partikül (Zeren, 2006)

Şekil 6.4'de görülen kontakt halindeki iki partikülü ele alalım. Bir toz kompakt (sıkıştırılmış toz yığını) bulunan her bir partikülde buna benzer birçok kontakt vardır. Sinterleme prosesinin ilerlemesiyle temas eden partiküller arasındaki bağlar genişler ve birleşir. Her bir kontakta katı-buhar ara yüzeyi yerine bir tane sınırı büyür. Şekilde gösterildiği gibi uzun süreli bir sinterleme sonucunda iki partikül tamamen birleşerek başlangıç çapının 1.26 katı büyüklüğüne ulaşabildiği belirtilmektedir. (Zeren, 2006)

7. PARTİKÜL TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Metal matrisin cinsi, takviyenin cinsi, şekli, boyutu, dağılımı, miktarı, üniform dağılması, kompozitin üretim yöntemi ve işlem parametreleri, mikro yapı içinde oluşan fazlar, matris ile katkının kimyasal uyumluluğu, ek olarak termo mekanik ve ısı işleme tabi tutulması gibi birçok etken MMK malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde rol oynamaktadır.

7.1. Elastiklik Modülü

Metal matrisli kompozit malzemelerde, takviye elemanının partikül boyutu, şekli ve en çokta partikül hacim oranı elastiklik modülünün artışı belirleyen faktörlerdir. Takviye elemanı olan partikül veya fiberin elastiklik modülünün, metal matris malzemesinin elastiklik modülünden fazla olması bu artışın en temel nedenidir.

Partikül takviyeli alüminyum matrisli MMK malzemede, partikül hacim oranına bağlı olarak elastisite modülünün artışı çizelge 7.1’de görülmektedir.

Çizelge 7.1. Partikül takviyeli alüminyum matrisli MMK malzemede, partikül hacim oranına bağlı olarak elastisite modülünün artışı.

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)
A365 Al	75.2
A365 + % 10 SiC	77.2
A365 + % 15 SiC	92.4
A365 + % 20 SiC	95.8

MMK malzemeler oda sıcaklığında takviye edilmemiş metal alaşımlarına göre göstermiş oldukları yüksek elastiklik modülü özelliklerini, yüksek sıcaklıklarda da sürdürmektedirler. % 20 hacim oranında Al_2O_3 takviyeli Al 2124-T6 alaşımında elastiklik modülünün sıcaklığa bağlı olarak değişimi Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. MMK malzemenin elastiklik modülünün sıcaklıkla değişimi.

Sıcaklık (°C)	Elastisite Modülü (GPa)
25	104
93	101
149	101
204	99.3
260	95.8
300	91.7
350	90.3
400	88.3
450	85.5

7.2. Mukavemet

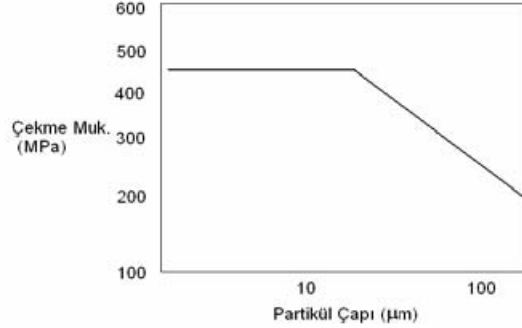
Metal matrisli kompozit malzemelerde mukavemet, takviye elemanının hacim oranının artışı ile artar. Takviye hacimsel oranı ve takviye boyut oranına bağlı olarak kompozit mukavemeti matematiksel olarak ifade edilebilmektedir. Ancak bu ifadelerde mikro yapı modifikasyonları, dislokasyon yoğunluğu, ısıtma işlemi sertleşmesi gibi faktörler göz önüne alınmadığı için elde edilen sonuçların geçerliliği azalmaktadır. Çizelge 7.3'de oda sıcaklığında, 6061 (Al-Mg-Si) matrisli SiC partikül takviyeli kompozit malzemede partikül hacim oranına bağlı olarak elastiklik modülü, akma ve çekme mukavemetinin değişimi görülmektedir.

Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde dayanım, partikül takviyelilere oranla daha fazladır. Tek yönlü fiberle takviye edilmiş kompozitlere bir kuvvet uygulandığında kompozit elastik deformasyona uğrar. Matris, fiber ve kompozitin uzama miktarları aynı kabul edilir. Kısacası $\epsilon_m = \epsilon_f = \epsilon_c$ 'dir. Kısa fiber veya partikül takviyeli kompozitlerde ise bu eşitlik geçersizdir.

Çizelge 7.3. 6061Al-SiC kompozit malzemesinde, partikül hacim oranına bağlı olarak bazı mekanik özelliklerin değişimi.

Partikül Hacim Oranı (%)	Elastisite Modülü (GPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
0	68.9	275.8	310.3
15	95.5	400	455.1
20	103.4	413.7	496.4
25	113.8	427.5	517.1
30	120.7	434.3	551.6
35	134.5	455.1	551.6
40	144.8	448.2	586.1

Mukavemet artışının büyüklüğü aynı zamanda, matris alaşımının mikro yapısını bağlıdır. Yaşlandırma sertleşmesine tabi tutulmuş alaşımlar iç gerilmelere karşı daha hassastır. Gerinim artışı ile şekil verme oranı, hızlı bir azalma gösterir.



Şekil 7.1. Partikül takviyeli MMK malzemelerde partikül çapının çekme mukavemeti etkisi.

Bir kompozitte, dayanım artışı elde edilebilmesi, kompozit malzemede meydana gelen gerilmeyi matristen daha mukavemetli olan takviye partikülüne transfer edebilme yeteneğine bağlıdır. Bu da partikül ile matris arasında kuvvetli bir ara yüzey bağlantısı ile olur.

Ara yüzey bağı zayıf olduğu zaman, malzemeye herhangi bir gerilme uygulanması durumunda, gerilme takviye partiküle transfer olamadan hasar meydana gelecektir. Kompozit, mukavemet açısından takviyesiz matristen bile daha zayıf olacaktır. Çünkü yükü çeken efektif alan azalacaktır. Bu nedenle metal

matrisli kompozit malzemelerde takviye-matris ara yüzey bağının iyi olması gerekmektedir. Bu yönde yapılan çalışmalar, parçacık yüzeyine kaplama yapılması, ısıt işlem uygulanması veya matris bileşiminin ayarlanması şeklindedir (Eker, 2008).

Eğilme mukavemeti açısından bakıldığında ise, uygulanan ısıt işlemlerin ve takviye malzemelerinin etkisinin önemli olduğunu görülmektedir (Bolzoni et al., 2013). Isıt işlem, malzemenin eğilme mukavemetini arttırabilmektedir (Liu et al., 2014). Belli bir noktadan sonra, ısıt işlem sıcaklığının artması ile mukavemet değerleri azalır. Bunun yanında, kompozitteki takviye fazının miktarının artmasının eğilme mukavemeti değerini düşürdüğü görülmüştür. Bunun nedeni ise takviye fazı miktarının artması ile kompozitin sünekliğinin azalmasıdır.

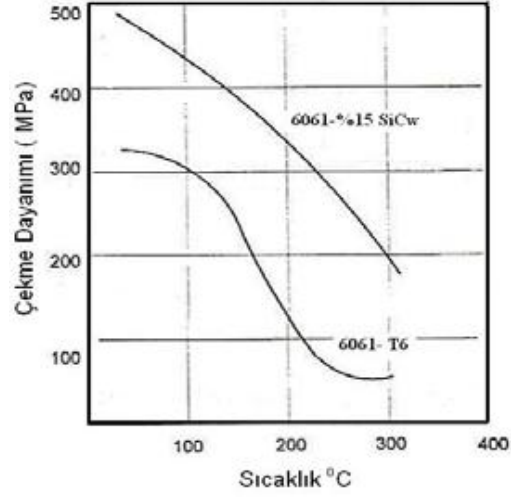
Kompozitin izotropik özelliklerinin geliştirilebilmesi, partiküllerin homojen dağılımı ile mümkündür. Partiküllerin homojen dağılımının sağlandığı en iyi üretim yöntemi ise toz metalurjisi yöntemidir (Şahin, 2006).

Yapılan araştırmalardan ortaya çıkan sonuçlara göre MMK malzemenin dayanımı:

- Partiküllerin oranına,
- Partiküllerin büyüklüğüne,
- Partiküllerin homojen dağılımına,
- Partiküllerin özelliklerine,
- Matris malzemesinin özelliklerine
- Ara yüzey özelliklerine bağlı olarak değişir.

7.3. Yüksek Sıcaklık Dayanımı

MMK'lerin yüksek sıcaklık dayanımı ticari açıdan önemli bir özelliktir. Bu özelliği sağlayan başlıca etmen seramik esaslı takviye malzemesinin yüksek sıcaklıkta göstermiş olduğu dayanımdır. Şekil 7.2'de Al 6061 MMK'te, SiC whisker takviyesinin sıcaklık dayanımı üzerine etkisi gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi whisker takviyesi ile malzeme, yüksek sıcaklıklarda daha iyi mukavemet göstermektedir.



Şekil 7.2. Al 6061 metal matris kompozitte, SiC whisker takviyesinin ve sıcaklığın dayanma etkisi (Eker, 2008)

7.4. Uzama Miktarı

MMK malzemelerde yüzde uzama değeri takviye elemanı oranının artmasıyla hızlı bir şekilde azalmaktadır. Yapılan çalışmalar, kompozit malzemedeki hasarın, partikül kırılması ve matris içerisindeki partikül yığılmaları arasında oluşan boşlukların birlikte etkisi sonucu oluştuğunu göstermektedir. Bunun nedeni ise büyük parçacıkların daha fazla gerilmeye maruz kalması ve daha fazla çatlak başlangıcı hatası içermesidir. Partikül yığılması ile meydana gelen hasarın nedeni, bu bölgede oluşmuş üç eksenli gerilmeye bağlanmaktadır. Çalışmalar partikül kırılmasını engellemek için, kaba partiküllerden kaçınılması gerektiğini göstermiştir. Partikül kırılmasını engellemek ve partiküle verimli bir şekilde yük transfer etmek için yüksek bir ara yüzey mukavemeti gereklidir. Partikül dağılımı kompozitin uzamasına etki edecek, homojen bir dağılım kopma uzamasını arttıracaktır. Ayrıca ekstrüde edilmiş malzemede, partikül dağılımı daha homojendir ve bu da % uzama değerini artırır. Belli bir hacim oranında, maksimum uzama elde etmek için gerekenler;

- Homojen partikül dağılımı İnce ($<10 \mu\text{m}$), homojen partikül boyutu
- Yüksek ara yüzey mukavemeti
- Sünek bir matris

Çizelge 7.4. 6092 Al-Mg-Si/SiC kompozit malzemesinde, partikül hacim oranına bağlı olarak sünekliğin değişimi

Partikül hacim oranı (%)	Süneklik (%)
0	11
15	5
20	4.5
25	3
30	1.5
35	1.0
40	0.8

7.5. Kırılma Tokluğu

Kırılma tokluğu değeri, çatlak oluşumuna ve ilerlemesine karşı direncin bir göstergesidir. Yüzde uzama değeri fazla olan, yani plastik deformasyon kabiliyeti fazla olan malzemelerin kırılma tokluğu değeri yüksektir. Genelde takviye oranının artması ile tokluk düşmektedir. Bu düşüş % 0'dan %10 takviye oranına kadar oldukça belirgindir. Yüksek takviye oranlarında ise bu düşüş çok azdır. Yaşlandırılabilen matrislerde, yaşlandırma işlemi ile tokluk bir miktar azalır. Partikül boyutunun büyük olması da kırılma tokluğunu artırır. Metal matrisli kompozit malzemelerde tokluğun optimizasyonu ve değerlendirilmesinin zor olmasının nedeni pek çok parametreye bağlı olmasından dolayıdır. Metal matrisli kompozitlerin toklukları aşağıdaki faktörlere bağlıdır;

- Takviye fazı özellikleri ve tipi,
- Takviye elemanı miktarı ve doğrultusu,
- Matris alaşımları ve özellikleri,
- Matris-takviye elemanı ara yüzeyi bağı,
- Uygulanan üretim metodu ve takviye elemanının dağılımı,
- Porozite seviyesi ve matris içindeki yığılma etkisi gibi mikro yapısal değişiklikler.

Çizelge 7.5. Bazı partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin kırılma tokluğu değerleri.

Malzeme	K_{Ic} (MPa · m ^{1/2})
2124-T6	29.7
2124-T6 + %10 Al ₂ O ₃	24.1
2124-T6 + %15 Al ₂ O ₃	22.0
6061-T6	29.7
6061-T6 + %10 Al ₂ O ₃	24.1
6061-T6 + %10 SiC	24.7
6061-T6 + %20 Al ₂ O ₃	21.5
6061-T6 + %20 SiC	20.5

7.6. Yoğunluk

Yoğunluk, metal matrisli kompozit malzemelerin en önemli özelliklerinden birisidir. Katkı olarak kullanılan malzemelerin yoğunlukları genelde matris alaşımının yoğunluğuna yakındır. Bu sebeple metal matrisli kompozitin yoğunluğunu pek değiştirmemektedir. Bununla birlikte genel olarak katkı malzemesi, matris malzemesinden daha rijit ve daha mukavemetlidir. Bu özellik metal matrisli kompozitlerin kullanımında en önemli faktörlerden olan, spesifik modül ve spesifik mukavemet gibi özelliklerin, metal malzemelere oranla çok üstün olması sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

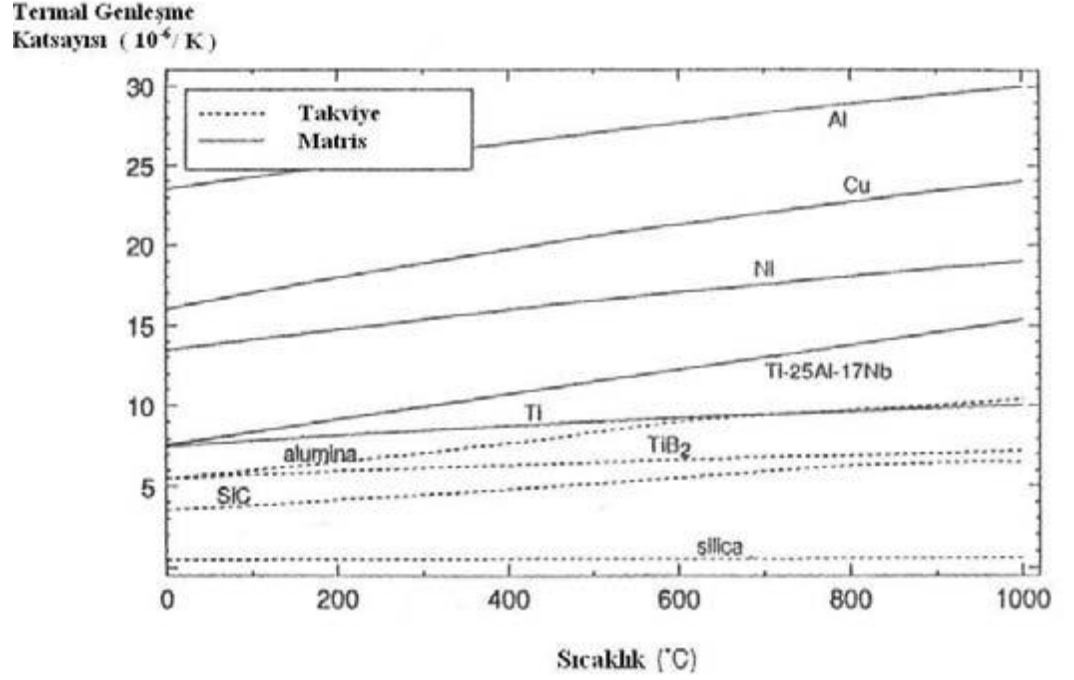
Çizelge 7.6. Bazı malzemelerin spesifik modül değerleri.

Malzeme	Elastiklik Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Spesifik Modül (GPa/(g/cm ³))
Si	110	2.3	48
Al ₂ O ₃	380	3.9	97
SiC	480	3.2	150
Al alaşımları	70	2.7	26
Çelikler	210	7.8	27

7.7. Termal Genleşme

Özellikle seramik ve karbon takviye malzemelerinin düşük termal genleşme katsayısına sahip olmalarından yararlanılarak, düşük termal genleşme katsayısına

sahip MMK malzemelerin üretimi mümkün olmaktadır. Bu özelliklerden yararlanılarak değişik oranlarda kullanılan takviye malzemeleri ile üretilen MMK malzemeler, mikro elektronik parça imalatında, hassas ölçme cihazlarında ve düşük ısıl genleşme özelliği aranan parçaların imalinde kullanılabilmektedirler.



Şekil 7.3. Bazı metal matris malzemeleri ve takviye elemanlarının termal genleşme katsayılarının sıcaklıkla değişimi.

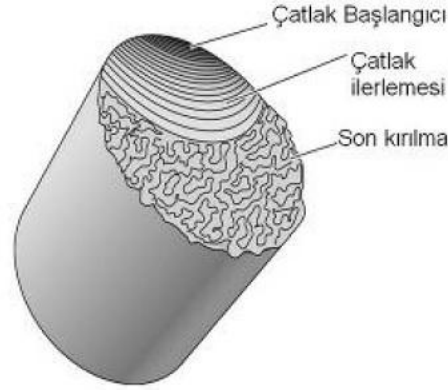
Havacılık ve uzay uygulamalarında da, çok düşük ısıl genleşme katsayılı kompozit malzemeler (Al matris-C takviye) oldukça yaygın kullanılmaktadır. Buna örnek olarak Hubble uzay teleskopunda anten destek yapılarının karbon fiber takviyeli Al metal matrisli kompozitten yapılmasını gösterebiliriz. Bu kullanımda göz önüne alınan en önemli iki faktör, yüksek eksenel modül değeri ve sifıra yakın termal genleşme katsayısıdır. Bu sayede güneş ışınlarına direkt olarak maruz kalınan bölgelerde boyutsal stabilite sağlanır.

Çizelge 7.7. Al ve Cu metal matrisli kompozit malzemelerde takviye oranının artışı ile termal genleşme katsayısının değişimi.

Malzeme	Takviye Hacim Oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Termal Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ / K)
Al	0	2.70	23
Al/C (fiber)	40	2.52	6.7
Al/C (fiber)	60	2.41	-0.32
Al/SiC (partikül)	40/70	2.91/3.03	12.6/6.5
Cu	0	8.94	17.6
Cu/C (fiber)	40	6.86	7.4
Cu/C (fiber)	60	4.90	-0.07

7.8. Yorulma

Malzemelerin statik zorlanmada dayanabileceği maksimum gerilmeden daha düşük, tekrarlanan gerilmelerin etkisiyle hasara uğramasına yorulma denir. Yorulmadan kaynaklanan kırılmalar çevrimsel gerilmeler sonucu oluşarak, çatlak başlangıcı, çatlağın kritik boyuta ilerlemesi ve kırılma olarak gerçekleşir (Eker, 2008).



Şekil 7.4. Yorulma kırığının karakteristik yüzeyi (Aran, 2008)

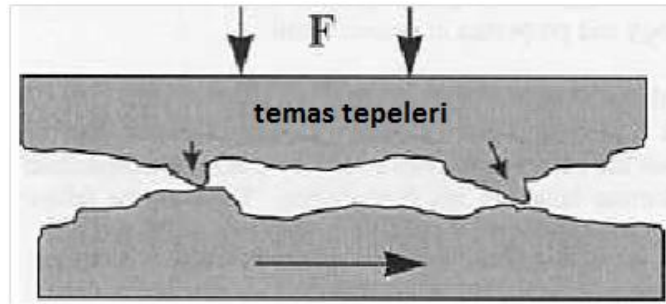
Çatlak başlangıcında olduğu gibi çatlak ilerlemesinde de çok sayıda ilave faktörün (çevre, frekans, sıcaklık ve mikro yapısal faktörler) etkisi vardır. Malzeme içerisinde, yorulma hasarına yol açacak mikro çatlak oluşum ve ilerleme mekanizmalarını azaltan her türlü faktör yorulma dayanımını artırır.

7.9. Sürünme

Sürünme, sabit yük altında malzemenin zaman içinde göstermiş olduğu deformasyondur. Sıcaklık, sürünmeyi arttırıcı bir faktördür. Yüksek sıcaklık uygulamaları için metal matrisli kompozit malzemelerin sürünme özelliği önemlidir. Kısa fiber ve partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler üzerinde yapılan deneylerde, sürünme hızının, takviye oranının artışı ile düştüğü görülmüştür.

7.10. Aşınma Direnci

Aşınma, aşındırıcı bir ortamda bulunan malzemenin yüzeyinde zamanla meydana gelen malzeme kaybıdır. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin, metal alaşımlarına göre en önemli üstünlüklerinden biride aşınma özellikleridir. SiC, Al₂O₃, TiC, B₄C gibi sert partiküller metal matrisin aşınma direncini arttırırken, grafit partiküller de yağlayıcı özellik sağlarlar. Yapılan çalışmalar, partikül takviyeli Al matrisli kompozitlerde aşınma direncinin, takviye elemanı miktarı ile doğru orantılı olarak arttığını göstermektedir. Aşınma abrasif ve adhesiv olmak üzere iki tiptir. Abrasif aşınmada yüksek temas basıncı ve çizgi şeklinde belirgin aşınma izleri oluşur. Adhesiv aşınmada ise düşük temas basıncı ile birlikte fazla sayıda temas tepecikleri vardır. Adhesiv aşınma yapışma aşınması olarakta adlandırılır. Adhezyon aşınmanın bir sonucu değil, kayan yüzeylerin temasının bir sonucudur.

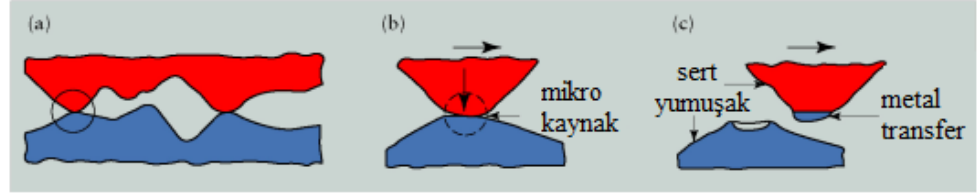


Şekil 7.5. Adhesiv aşınma mekanizması (Akbulut, 2005)

Aşınma direncini etkileyen diğer bir faktör ise matris malzemesinin sertliğidir. Alüminyum ve alaşımları çelik veya dökme demirle mukayese edildiğinde, genelde daha düşük sertliğe sahiptirler. Bu alaşımlar bundan dolayı yoğun aşınmaya maruz kalan yerlerde kullanılamamaktadır. Takviye elemanı

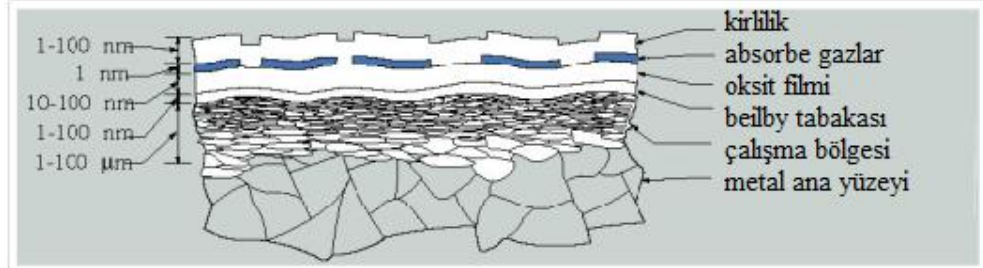
ilavesiyle aşınma direnci artmakta, bu sayede de MMK malzemeler aşınma direncinin önemli olduğu uygulama alanlarında kullanılabilmektedirler.

Bir çok çalışma, partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin adhesiv aşınma özelliğinin, takviye edilmemiş alaşımlara göre çok daha iyi olduğunu göstermektedir. Bununla beraber aşınma mekanizması etkileyen çok sayıda değişken olduğu unutulmamalıdır. Bu değişkenler; test geometrisi, uygulanan yük, test süresi, matris ve takviye malzemesi ve sıcaklık, nem gibi çevresel faktörlerdir. (Eker, 2008)



Şekil 7.6. Adhesiv aşınma aşamaları a) İki tepeciğin teması, b) iki tepeciğin adhezyonu, c) aşınma ürünü oluşumu(Akbulut, 2005)

Metal yüzeyleri genelde oksit filmleri ile kaplanmıştır. İkinci bir film ise oksit yüzeylerinde absorbe olan gazlar ve hidrokarbonlardır (yağlar). Bir metal ve seramiğin kaymalı çalıştırılmasında yüzeylerde oluşan film tabakalarıdır.

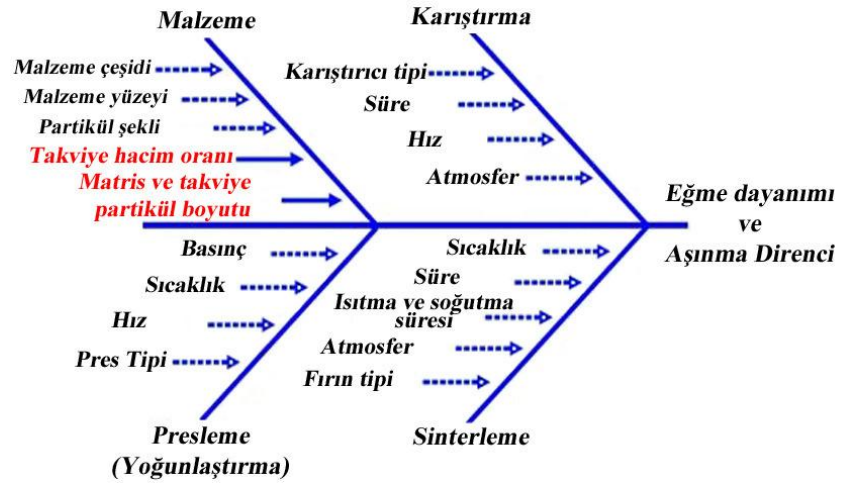


Şekil 7.7. Bir metal veya seramik malzemenin kaymalı çalıştırılmasında yüzeylerde oluşan film tabakaları (Akbulut, 2005)

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

8.1. Parametrelerin Seçimi ve Deney Tasarımı

Deneysel çalışmalara başlamadan önce eğilme ve aşınma davranışlarına etki edebilecek parametreler belirlenip sebep-sonuç (balık kılçığı) diyagramı çıkarılmıştır (Şekil 8.1). Bunların arasından eğme dayanımı ve aşınma direnci üzerinde etkili olan üç faktör deneysel çalışmalar için seçilmiştir. Bunlar; takviye oranı, matris toz boyutu ve takviye partikül boyutudur. Bu üç faktörün dışında kalan diğer faktörlerin değerleri sabit tutulmuştur.



Şekil 8.1. Sebep-sonuç (balık kılçığı) diyagramı

Al/SiC_p MMK malzemelerinin yapılacak deneyleri için literatür araştırması göz önünde bulundurularak CCD deney tasarım metoduna göre takviye oranı, matris toz boyutu ve takviye partikül boyutu faktörlerinin seviyeleri belirlenmiştir. (Çizelge 8.1.)

Çizelge 8.1. Deneysel çalışmalar için incelenen faktörler ve seçilen seviye değerleri

Faktörler	Her bir faktör için seçilen seviye değerleri					
Takviye Ağırlığı (%)	X ₁	1,59	5	10	15	18,41
Matris partikül boyutu (µm)	X ₂	20	32	53	75	90
Takviye partikül boyutu (µm)	X ₃	20	32	53	75	90

Bu çalışmada üç farklı parametre için beş farklı seviye değerinin birbiri ile etkileşimi araştırılmak istenmiştir. Toplamda yüzyirmibeş olması gereken deney sayısı CCD metodu kullanılarak yirmiye indirgenmiştir. Çizelge 8.2.'de deney numaraları ve parametre değerleri verilmiştir. Örneğin bir numaralı deney için üretilecek olan MMK'in takviye ağırlığı %5, matris partikül boyutu 32 μm ve takviye partikül boyutu 32 μm olarak belirlenmiştir.

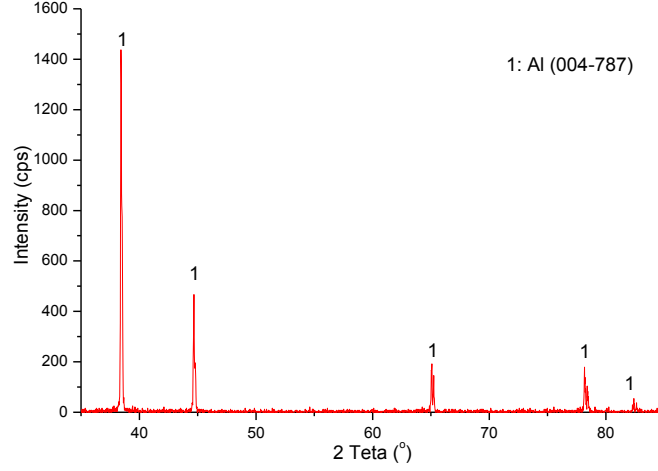
Çizelge 8.2. Deney numaraları ve değerleri

Sıra No	Takviye Ağırlığı (%)	Matris partikül boyutu (μm)	Takviye partikül boyutu (μm)
	X_1	X_2	X_3
1	5	32	32
2	15	32	32
3	5	75	32
4	15	75	32
5	5	32	75
6	15	32	75
7	5	75	75
8	15	75	75
9	1,59	53	53
10	18,41	53	53
11	10	20	53
12	10	90	53
13	10	53	20
14	10	53	90
15	10	53	53
16	10	53	53
17	10	53	53
18	10	53	53
19	10	53	53
20	10	53	53

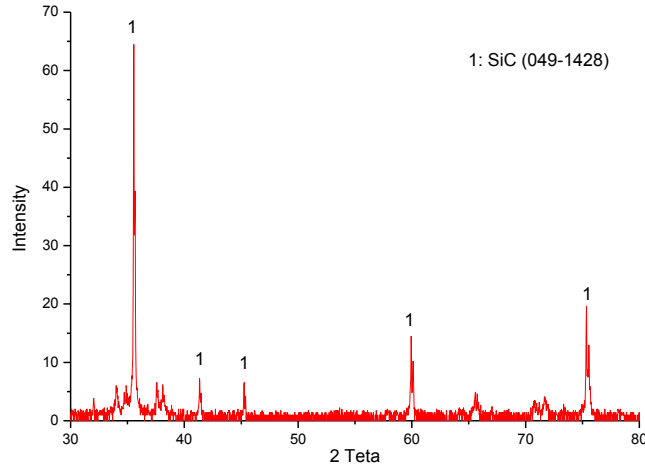
CCD methoduna göre hazırlanmış olan üretim çizelgesinde, Çizelge 8.2'de görüldüğü üzere ilk yani 1. sıradaki Al/SiC üretimi için takviye (SiC) ağırlık oranı % 5, matris (Al) partikül boyutu 32 μm , takviye (SiC) partikül boyutu 32 μm 'dir.

8.2. Malzeme Seçimi

Bu çalışmada matris malzemesi olarak %95 saflıkta, boyut aralığı 5-156 μ m olan Al tozları ve takviye malzemesi olarak da 10-160 μ m boyut aralığında SiC partikülleri kullanılmıştır. Faz analizleri XRD cihazıyla yapılmıştır (şekil 8.2, şekil 8.3).



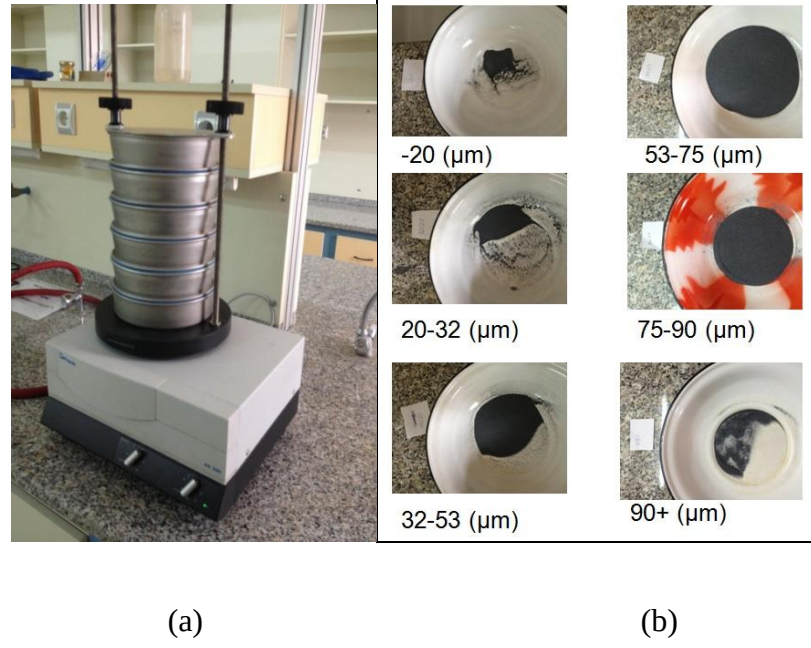
Şekil 8.2. Al tozlarının faz analizi (XRD)



Şekil 8.3. SiC tozlarının faz analizi (XRD)

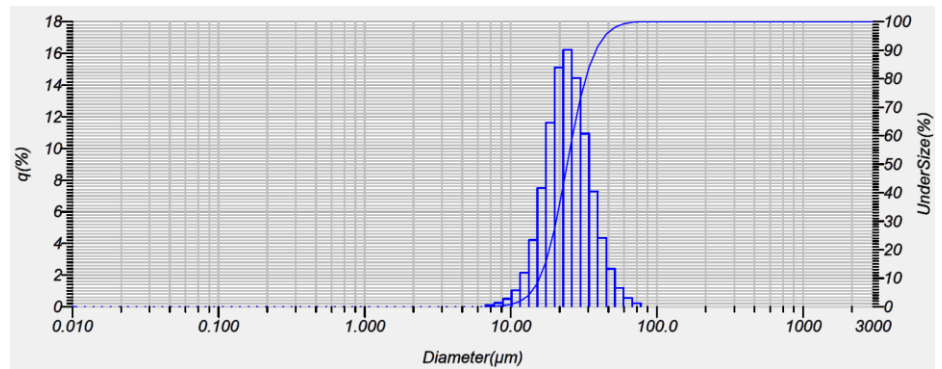
8.3. MMK Malzeme Üretimi

Çalışmanın deneysel kısmında ilk olarak matris ve takviye malzemesinin, geniş boyut aralığındaki tozları, CCD’de belirlendiği üzere 20, 32, 53, 75 ve 90 μ m eleklerde eleme işleminden geçirilmiştir.(Şekil 8.4)



Şekil 8.4. Elek analizi. a) Deneylerde kullanılan elek analizi cihazı, b) İhtiyaca göre ayrılmış toz grupları.

CCD deney tasarımında belirtildiği üzere matris ve takviye tozları için beş farklı seviye değeri seçilmiştir. Dolayısıyla elek analizi sonucunda matris ve takviye malzemeleri için beş farklı seviyede toz grupları oluşmuştur. Bu toz gruplarının ortalama partikül boyutunu ölçmek amacıyla “Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950” cihazı kullanılmıştır. Elde edilen Al boyut analizinde teorikte 20μm olarak aldığımız toz boyutu grubunun ortalama tane boyutu 25 μm bulunmuştur. (Şekil 8.5)



Şekil 8.5. Matris faktörü birinci seviye değeri ortalama partikül boyutu (25μm)

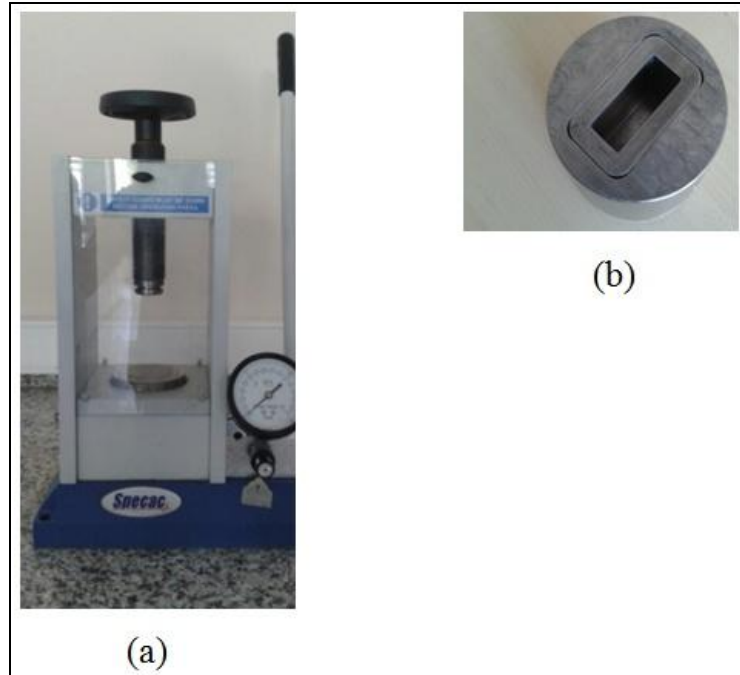
Aynı şekilde diğer boyutlar için de ölçümler yapılmış, elde edilen verilerin grafikleri Ek-E' de verilmiştir.

CCD deney tasarım metoduna göre, belirli takviye oranı, matris toz ve takviye partikül boyutlarında numuneler üretebilmek için, SiC takviye partiküllerinin Al tozları arasında homojen olarak dağılmasını sağlamak amacıyla, 30 dk süreyle V tipi karıştırıcı ile karıştırma işlemi yapılmıştır. (Şekil 8.6)



Şekil 8.6. V tipi karıştırıcı

Belirli matris toz boyutu, takviye partikül boyutu ve takviye oranlarında karışımlar hazırlandıktan sonra karışımlara tek eksenli soğuk presle 125 MPa basınçta ön şekillendirme işlemi uygulanmıştır.(Şekil 8.7)



Şekil 8.7. Ön şekillendirme işlemi. a) Tek eksenli pres b) Eğilme numunesi kalıbı.

Ön şekillendirme sonrası elde edilen parçalar 250 MPa basınçta, 20 dk boyunca, elastik ve sızdırmaz bir kalıp içerisinde, yağ ortamında AIP-CP 360 soğuk izostatik presleme cihazıyla presleme işlemine tabi tutulmuştur. (Şekil 8.8.)

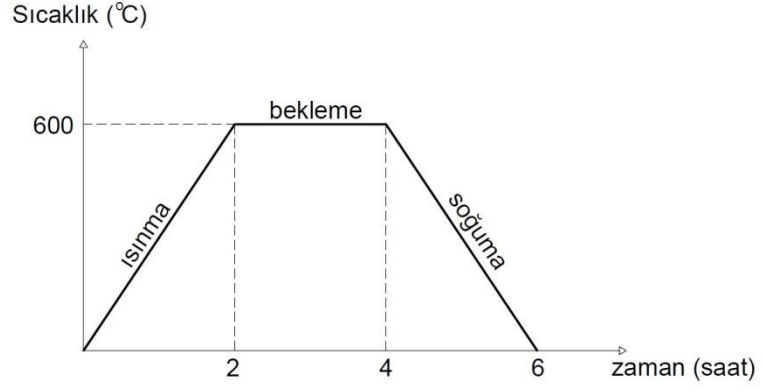


Şekil 8.8. CIP (Cold isostatic press)

Presleme işlemiyle sıkıştırma yoğunluğuna ulaşan malzemeleri, ısıtının etkisiyle toz ve partiküller arasındaki birleşmenin tam olarak sağlanarak maksimum yoğunluklarına ulaştırmak için sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterleme işlemi; 600°C’de, 2 saat boyunca argon gazı atmosferi altında sinterleme fırınında gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.9).



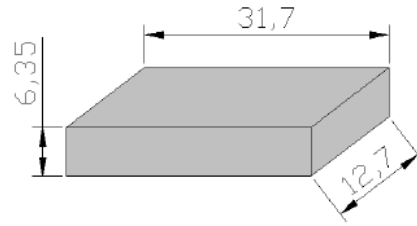
Şekil 8.9. Sinterleme fırını.



Şekil 8.10. Sinterleme işlemi basamakları

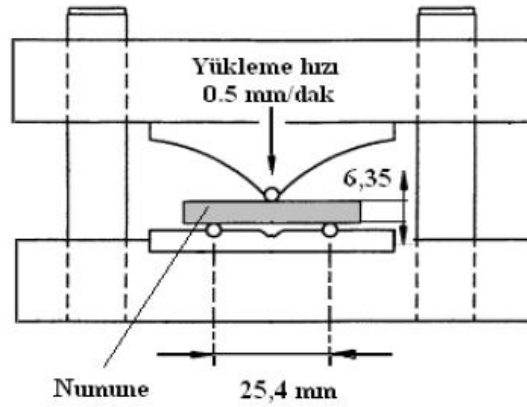
8.4. Eğilme Deneyi

Eğilme deneyi için numuneleri, ASTM B312'ye göre 31,7x12,7x6,35 mm ölçülerinde hazırlanmıştır.



Sekil 8.11. Eğme deneyi için numune boyutları.

Eğme deneyi için standartlara uygun olarak 25,4 mm ayaklar arası açıklıkta ve 0,5 mm/dak yükleme hızında üç nokta eğme deneyi uygulanmıştır.



Sekil 8.12. Üç nokta eğme deney standardı.

8.5. Sertlik ve Aşınma Deneyi

Sertlik ve aşınma deneyi öncesi tüm numuneler sırasıyla 300-800-1200 grid zımpara ile zımparalanmıştır. Ardından elmas süspansiyon ve keçe kullanılarak parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu işlemlerin ardından numunelere Brinell sertlik ölçüm testi yapılmıştır. Sertlik ölçümünde 10 mm çapında bilya kullanılmış ve 1839 N yük uygulanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 8.13. Sertlik ölçümü. a) Brinell sertlik ölçüm cihazı b) sertlik izi

MMK malzemelerin sertlik değerlerini bulabilmek için Brinell sertlik ölçüm cihazı bilyasının kompozit malzeme üzerine bıraktığı izlerin çapları optik mikroskopta ölçülmüştür.

Aşınma deney tipi olarak adhesiv aşınma koşullarında silindir-disk tipi aşınma çalışılmıştır (Şekil 8.14). Adhesiv aşınma mekanizmasında aşındırıcı olarak 62 HRC sertlikte paslanmaz çelik silindir kullanılmıştır. Ayrıca normal kuvvet 25 N, hız 70 rpm ve süre 10 dk. olarak belirlenmiştir.



Şekil 8.14. Silindir-disk aşınma cihazı

Aşınma deneyi sonrası numunelerdeki aşınma kayıpları, ağırlık kayıpları olarak ölçülmüştür. Ölçümlerde 10^{-2} mg hassasiyetinde Precise marka ES 225SMDR modeli terazi kullanılmıştır. Aşınma deneyi öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri öncesinde numune yüzeyleri aseton ile temizlenmiştir.

8.6. Yoğunluk Ölçümü

Yoğunluk ölçümünde amaç; bazı sinterlenmiş seramik numunelerin yığınsal (bulk) ve görünen yoğunluklarının ve açık porozite miktarlarının hesaplanmasıdır. Hemen hemen tüm seramik sistemlerde özellikle yüksek mukavemet ya da yüksek sıcaklık uygulamalarında malzemelerin yoğunluğu büyük öneme sahiptir. Bunun nedeni; porozite, bir malzemenin mekanik özelliklerini (mukavemet ve elastisite), termal özelliklerini (özellikle ısı transferini) ve ortam içinde bulunan malzemelerden dolayı korozyon ve mekanik aşınma davranışlarını etkiler. Bu çalışmada yoğunluk ölçümü metodu Archimedes prensibine dayanmaktadır.

Burada;

D_{H_2O} = Suyun yoğunluğu

W_a = Kuru numunenin havadaki ağırlığı

W_b = Su emdirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı

W_c = Su emdirilmiş numunenin havadaki ağırlığı

Öncelikle hassas terazide numuneler tartıldı ve kuru numunelerin havadaki ağırlı (W_a) hesaplandı. Ardından numuneler ısıtıcının üzerinde kaynamakta olan 100 °C'deki suya bırakıldı ve su emmesi için 3 saat bekletildi (Şekil 8.15a). Su emdirilmiş numuneler suyun içinden çıkarılıp bir kâğıt yardımıyla üzerindeki su alınıp havadaki ağırlıkları (W_b) ölçüldü (Şekil 8.15b). Ardından numuneler tekrar oda sıcaklığındaki saf suya bırakıldı. Saf su içerisindeki numunelerin aynı kap içerisindeki sudaki asılı ağırlıkları (W_c) ölçüldü (Şekil 8.15c). . Elde ettiğimiz bu veriler kullanılarak yoğunluk değeri hesaplandı.

$$D_{sinterlenmiş\ numune} = \frac{W_a * \rho_{su}}{W_b - W_c}$$



(a)

(b)

(c)

Şekil 8.15. Yoğunluk ölçümü. a) numuneye su emdiriliyor, b) su emdirilmiş numunenin havadaki ağırlığına ölçülüyor, c) su emdirilmiş numunenin saf sudaki asılı ağırlığı ölçülüyor.

8.7. Karakterizasyon

Üretilen numunelerin deney öncesi ve sonrası karakterizasyonunda aşağıdaki cihazlar kullanılmıştır.

- Optik mikroskop: Eğme ve aşınma deneyleri öncesi parlatma işleminin ardından tüm numunelerin mikro yapılarının ve aşınma deneyi sonrası numune ve aşındırıcı yüzeylerinin görüntülenmesi amacıyla.
- SEM - Taramalı elektron mikroskobu: MMK gözenek yapısı ve dağılımı araştırması için, başlangıç tozlarının boyut analizi verilerini doğrulamak ve

şekillerini görmek için, eğme deneyi uygulanan numunelerin kırılma yüzey görüntülerini araştırmak için ve aşınma testine tabi tutulan numunelerin aşınma yüzey görüntüleri için.

- XPS – Aşınma yüzeylerinin elementel analizi için.
- XRD – MMK’lerde oluşabilecek diğer kimyasal fazların saptanması için, özellikle ara yüzey ve metal oksitlerin varlığının ve miktarının araştırılması için.

9. SONUÇLAR

CCD deney tasarım metoduna göre farklı matris toz boyutu, takviye partikül boyutu ve hacim oranlarında Al-SiCp kompozitlerinin eğme dayanımları, aşınma dayanımları, sertlikleri, yoğunlukları ve mikro yapıları deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir;

9.1. Eğilme Dayanımı Sonuçları

Üç nokta eğme deneyi sonucunda farklı matris toz partikül, takviye partikül ve hacim oranlarındaki Al-SiCp kompozitlerinin eğme dayanımları Çizelge 7.1’de verilmiştir. Eğme dayanımı değerlerine bakıldığında en etkili faktörün takviye oranı olduğu görülmüştür. Takviye oranı %1,59’dan %18,41 e yükselmesiyle MMK’in eğme dayanımı düşmüştür. Hacim oranından sonra en etkili faktör matris toz boyutunun takviye toz boyutuna oranına (Ms/Rs) bağlı olduğu görülmüştür. Ancak bu durum boyutların daha küçük olduğu durumlarda daha etkili olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 9.1 CCD’ye göre yapılan deney tasarımı ve Al-SiCp kompozitlerinin eğme dayanımları.

Std Order	Run Order	Pt Type	Blocks	A	B	C	Eğme Dayanımı (Mpa)	max. depl.
1	1	1	1	-1	-1	-1	212	1
2	2	1	1	1	-1	-1	109	0,83
3	3	1	1	-1	1	-1	143	0,54
4	4	1	1	1	1	-1	96	0,42
5	5	1	1	-1	-1	1	199	0,46
6	6	1	1	1	-1	1	130	0,55
7	7	1	1	-1	1	1	168	0,45
8	8	1	1	1	1	1	111	0,46
9	9	-1	1	-1,68179	0	0	178	0,62
10	10	-1	1	1,681793	0	0	77	0,43
11	11	-1	1	0	-1,68179	0	190	1
12	12	-1	1	0	1,681793	0	130	1,23
13	13	-1	1	0	0	-1,68179	128	0,42
14	14	-1	1	0	0	1,681793	142	0,48
15	15	0	1	0	0	0	151	0,6
16	16	0	1	0	0	0	150	0,55
17	17	0	1	0	0	0	155	0,58
18	18	0	1	0	0	0	148	0,58
19	19	0	1	0	0	0	152	0,6
20	20	0	1	0	0	0	155	0,48

9.1.1. İstatiksel analiz

İncelenen faktörler ve faktörler arasındaki etkileşimlerin eğme dayanımı üzerindeki etkilerini ve deney tasarımının güvenilirliğini belirlemek için MINITAB 15 programı ile deney sonuçlarının istatistiksel analizi (ANOVA) yapılmıştır. ANOVA sonuçları, Çizelge 9.2 ve 9.3 verilmiştir.

Çizelge 9.2. Eğilme ANOVA sonuçları.

Varyans Analizi				
	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Ortalama kareler	P
Regresyon	9	21.094,3	2.343,8	0,000
A	1	14.556,2	14.556,2	0,000
B	1	3.972,1	3.972,1	0,000
C	1	374,8	374,8	0,018
A*A	1	783,2	783,2	0,002
B*B	1	244,4	244,4	0,046
C*C	1	321,1	321,1	0,026
A*B	1	578,0	578,0	0,006
A*C	1	72,0	72,0	0,245
B*C	1	128,0	128,0	0,131
Error	10	472,9	47,3	
Lack-of-Fit	5	434,1	86,8	0,010
Pure Error	5	38,8	7,8	
Toplam	19	21.567,2		
Güvenirlilik	97,81%			

P değeri, bir sonucun istatistiksel anlamlılığı, bir başka ifadeyle, sonucun doğru olarak kabul edilme derecesidir. P değerinin 0,05'den daha küçük olması, incelenen bir faktörün ana ve ikinci dereceden etkilerinin ve diğer faktörlerle olan etkileşimlerinin sistem üzerinde anlamlı olduğunu gösterir.

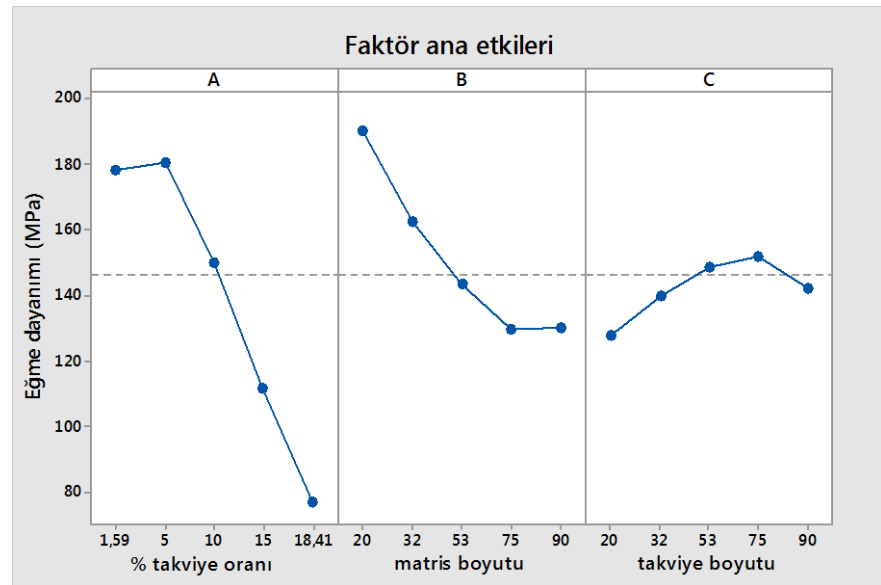
Çizelge 9.3. Eğme dayanımı üzerinde etkili olan terimlerin regresyon analizi

Terim	Katsayılar	SE katsayıları	P
sabit	151,64	2,80	0,000
A	-32,65	1,86	0,000
B	-17,05	1,86	0,000
C	5,24	1,86	0,018
A*A	-7,37	1,81	0,002
B*B	4,12	1,81	0,046
C*C	-4,72	1,81	0,026
A*B	8,50	2,43	0,006
A*C	3,00	2,43	0,245
B*C	4,00	2,43	0,131

Kodlanmamış değerler için regresyon denklemi:

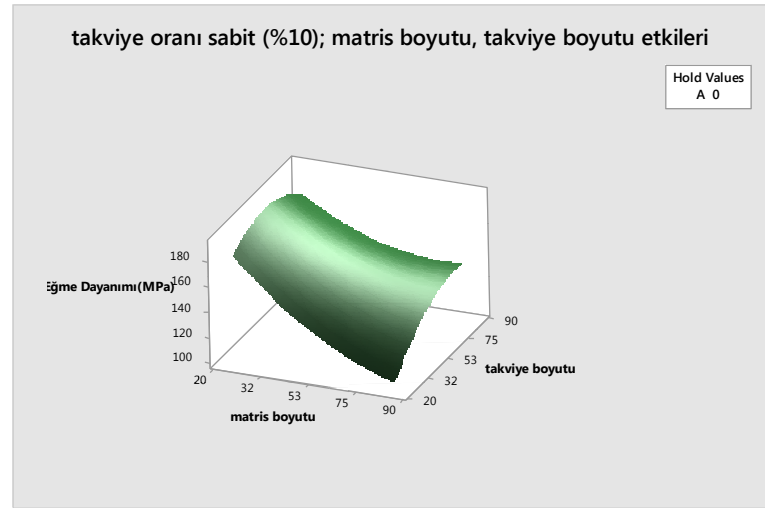
$$\text{Eğme Dayanımı} = 151,64 - 32,65 A - 17,05 B + 5,24 C - 7,37 A*A + 4,12 B*B - 4,72 C*C + 8,50 A*B + 3,00 A*C + 4,00 B*C$$

Burada eğme dayanımı, A, B ve C kodlanmış faktörleri temsil etmektedir. Katsayıların önündeki negatif işaretler, genel olarak takviye oranı (A) ve matris toz boyutundaki (B) artışın eğme dayanımını olumsuz yönde etkilediğini, pozitif işaret ise takviye partikül boyutundaki (C) artışın eğme dayanımını arttırdığını göstermektedir.



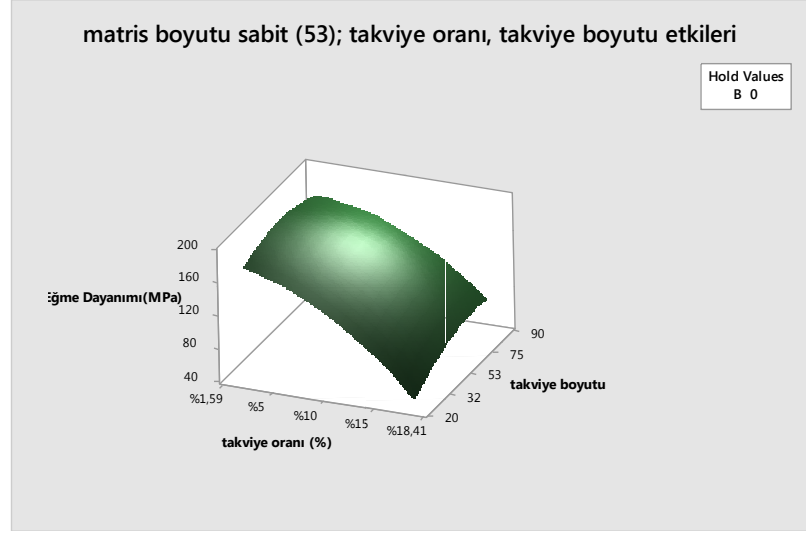
Şekil 9.1. Eğilme dayanımına faktör ana etkilerinin ayrı ayrı etkileri

Deney tasarım metoduyla hesaplanan eğme dayanımlarına etki eden ana faktörlere ait grafik şeklindeki gibidir. Burada takviye oranında az artışlar eğilme dayanımını kısmen arttırmış, lakin genel anlamda takviye oranı arttıkça eğme dayanımı düşmektedir. Matris partikül boyutunun artması başından itibaren hep eğme dayanımını düşürmüştür. O halde eğme dayanımını yüksek istediğimiz malzemelere seramik takviyeleri minimumda kullanmalıyız. Takviye boyutundaki artış ise eğme dayanımını önce yükseltmiş fakat boyutlar 75 μm ' yi geçince eğme dayanımı düşmeye başlamıştır.



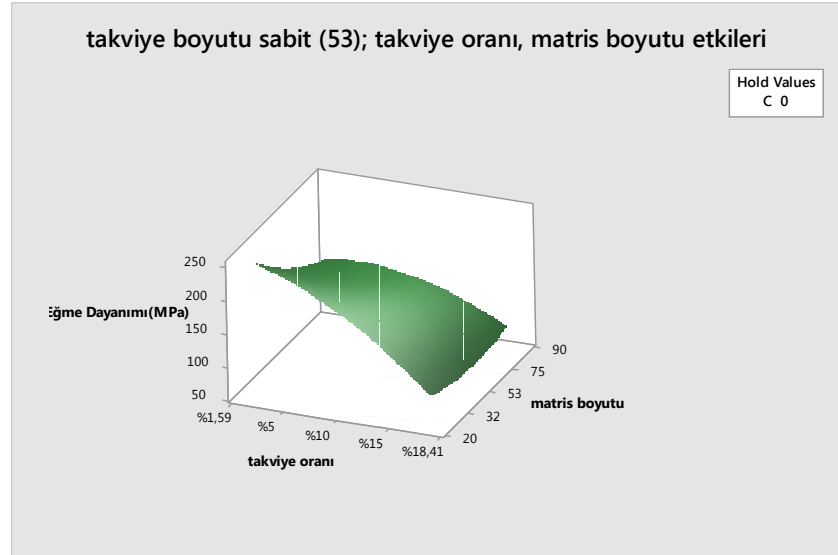
Şekil 9.2. Takviye boyutu ve matris boyutu etkileşiminin eğme dayanımı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi

Matris boyutu ve takviye boyutu arasındaki etkileşimin ($B \times C$), eğme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, takviye boyutu (C) ve matris boyutundaki (B) herhangi bir değişimin, diğer faktörün değişimiyle lineer olmayan bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir (Şekil 9.2). Bu durum, $B \times C$ etkileşiminin eğme dayanımı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 9.3. Takviye oranı ve takviye boyutu etkileşiminin eğme dayanımı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi

Takviye oranı (A) ve takviye partikül boyutu (C) arasındaki etkileşimin eğme dayanımı üzerinde etkisiz olduğu gerek ANOVA analizi gerekse 3D yanıt yüzeyinde açıkça görülmektedir. Şekil 7.6'dan da görüldüğü gibi belirli bir takviye oranında takviye partikül boyutu değişimi, eğme dayanımı üzerinde ihmal edilebilecek kadar düşük bir etkiye sahip olmaktadır.



Şekil 9.4. Takviye oranı ve matris boyutu etkileşiminin eğme dayanımı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi

Takviye oranı ve matris toz boyutu arasındaki etkileşimin (A*B) eğme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, takviye oranındaki (A) ve matris toz

boyutundaki (B) herhangi bir değişimin, diğer faktörün değişimiyle lineer olmayan bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir (Sekil 9.4). Bu durum, A*B etkileşiminin eğme dayanımı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

9.2. Sertlik ve Aşınma Dayanımı Sonuçları

Malzemenin mekanik özellikleri ile sertliği arasında paralel bir ilişki olduğundan, malzeme hakkında genel bir fikir sahibi olabilmek adına, sertlik deneyi yapılmıştır. Sinterleme sonrası numuneler zımpara ve parlatma işlemlerinden geçirilmiştir. Ardından bu parlak yüzeylere Brinell sertlik ölçümü yapılmıştır. Brinell sertlik ölçümünde 10 mm çapında bilya kullanılıp, 187,5 kgf'lık (1839 N) yük uygulanmıştır. Yükü kaldırdığımız zaman oluşan izin çapı mikroskopta ölçülmüş ve Brinell sertlik ölçüm formülünde yerine yazılmıştır. Neticede çıkan değerler çizelge 9.4'de verilmiştir.

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

Çizelge 9.4. CCD'ye göre yapılan deney tasarımı ve Al-SiCp kompozitlerin sertlik değerleri

CCD no	Kütlece % SiC	Tane boyutu (Al)	Tane boyutu (SiC)	İz çapı (d) (mm)	Sertlik (HB)
1	5	32	32	2,30	44,57
2	15	32	32	2,21	48,32
3	5	75	32	2,35	42,66
4	15	75	32	2,22	47,88
5	5	32	75	2,41	40,53
6	15	32	75	2,19	49,22
7	5	75	75	2,44	39,53
8	15	75	75	2,34	43,03
9	1,59	53	53	2,46	38,88
10	18,41	53	53	2,05	56,26
11	10	20	53	2,20	48,77
12	10	90	53	2,35	42,66
13	10	53	20	2,33	43,41
14	10	53	90	2,18	49,68
15	10	53	53	2,17	50,14
16	10	53	53	2,17	50,14
17	10	53	53	2,17	50,14
18	10	53	53	2,17	50,14
19	10	53	53	2,17	50,14
20	10	53	53	2,17	50,14

Çizelge 9.4'deki verilere göre takviye oranı artışıyla sertlik orantılı olarak artmıştır. Bu artış Ms/Rs oranına bağlı orantılı az da olsa düştüğü görülmektedir.

CCD'ye göre silindir-disk tipi aşınma testi sonucunda farklı matris toz boyutu, takviye partikül boyutu ve hacim oranlarındaki Al-SiC_p kompozitlerinin sertlik değerleri ve aşınma kayıpları Çizelge 9.5'de verilmiştir.

Çizelge 9.5. CCD'ye göre yapılan deney tasarımı ve Al-SiC_p kompozitlerin aşınma kayıpları

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	A	B	C	Aşınma kaybı (gr)
1	1	1	1	-1	-1	-1	0,029986
2	2	1	1	1	-1	-1	0,003595
3	3	1	1	-1	1	-1	0,045011
4	4	1	1	1	1	-1	0,003755
5	5	1	1	-1	-1	1	0,012997
6	6	1	1	1	-1	1	0,002313
7	7	1	1	-1	1	1	0,026112
8	8	1	1	1	1	1	0,00279
9	9	-1	1	-1,68179	0	0	0,054428
10	10	-1	1	1,681793	0	0	0,0017
11	11	-1	1	0	-1,68179	0	0,007999
12	12	-1	1	0	1,681793	0	0,019877
13	13	-1	1	0	0	-1,68179	0,026886
14	14	-1	1	0	0	1,681793	0,01989
15	15	0	1	0	0	0	0,00722
16	16	0	1	0	0	0	0,00598
17	17	0	1	0	0	0	0,008012
18	18	0	1	0	0	0	0,007299
19	19	0	1	0	0	0	0,006598
20	20	0	1	0	0	0	0,00661

9.2.1. İstatiksel Analiz

İncelenen faktörlerin ve etkileşimlerinin aşınma davranışı üzerindeki etkilerini ve deney tasarımının yeterliliğini (güvenilirliğini) belirlemek için MINITAB 15 programı ile deney sonuçlarının istatistiksel analizi (ANOVA) yapılmıştır. ANOVA sonuçları, Çizelge 9.6 ve 9.7'de verilmiştir.

Çizelge 9.6. Aşınma ANOVA sonuçları

Varyans Analizi				
	Serbestlik Derecesi	Kareler toplamı	Ortalama kareler	P
Regresyon	7	0,003957	0,000565	0,000
A	1	0,002653	0,002653	0,000
B	1	0,000174	0,000174	0,010
C	1	0,000182	0,000182	0,009
A*A	1	0,000509	0,000509	0,000
C*C	1	0,000264	0,000264	0,003
A*B	1	0,000095	0,000095	0,043
A*C	1	0,000141	0,000141	0,017
Error	12	0,000223	0,000019	
Lack-of-Fit	7	0,002200	0,000031	0,000
Pure Error	5	0,000003	0,000001	
Toplam	19	0,004180		
Güvenirlilik	94,67%			

Çizelge 9.6, aşınma testi sonucunda elde edilen deneysel verilerin istatistiksel analiz (ANOVA) sonuçlarını vermektedir. Analiz modelin güvenilirliğinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir (% 94,67). Çizelge 9.7’de görüldüğü gibi incelenen tüm faktörlerin P değerlerinin 0,05’den düşük olması bu faktörlerin ana etkilerinin aşınma davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

Çizelge 9.7. Aşınma dayanımı üzerinde etkili olan terimlerin regresyon analizi

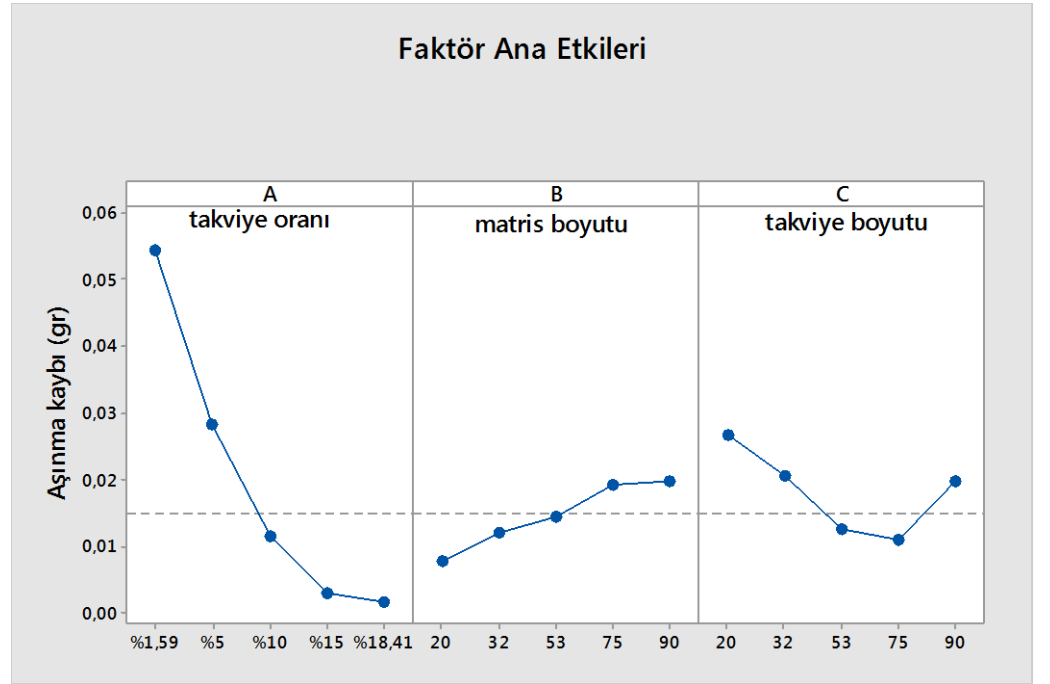
Terim	Katsayılar	SE katsayıları	P
sabit	0,00801	0,00149	0,000
A	-0,01394	0,00117	0,000
B	0,00357	0,00117	0,010
C	-0,00365	0,00117	0,009
A*A	0,00591	0,00113	0,000
C*C	0,00426	0,00113	0,003
A*B	-0,00344	0,00152	0,043
A*C	0,00421	0,00152	0,017

Aşınma davranışı üzerinde etkili olmayan B*B, C*C ve B*C etkileşimi analizden çıkarılarak tekrar bir analiz yapılmış ve modeldeki tüm terimlerin (ana, ikinci dereceden ve etkileşim) katsayıları aşağıdaki regresyon denklemi oluşturulmuştur.

Kodlanmamış değerler için regresyon denklemi:

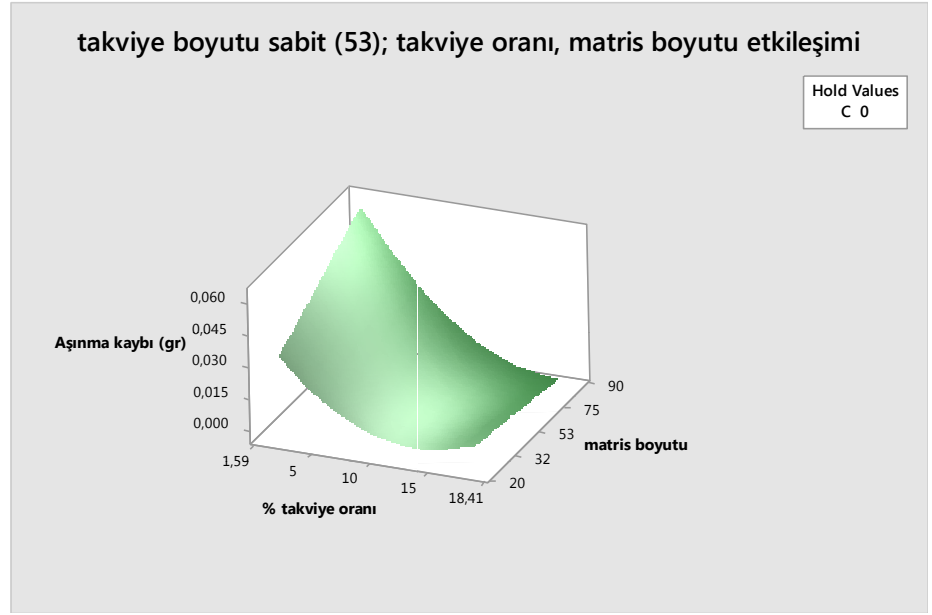
$$\text{Aşınma kaybı (gr)} = 0,00801 - 0,01394 A + 0,00357 B - 0,00365 C + 0,00591 A*A + 0,00426 C*C - 0,00344 A*B + 0,00421 A*C$$

Burada aşınma kaybı A, B ve C kodlanmış faktörleri temsil etmektedir. Takviye oranı (A) ve takviye partikül boyutu (C) katsayılarının önündeki negatif işaret bu faktörlerin aşınma kaybını azalttığını, matris toz boyutu (B) önündeki pozitif işaret ise bu faktörün aşınma kaybını arttırdığını göstermektedir.



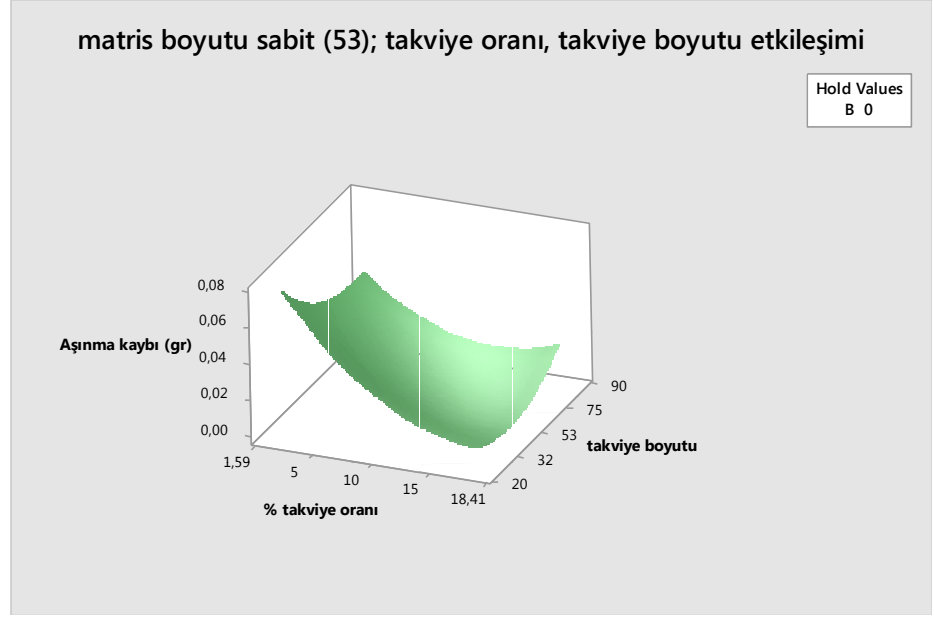
Şekil 9.5. Takviye oranı, matris toz boyutu ve takviye partikül boyutu faktörlerinin Al-SiCp kompozitlerinin aşınma kaybı üzerindeki ana etkileri.

Faktör ana etkilerine bakıldığında, aşınma dayanımı üzerinde en etkili faktörün takviye oranı olduğunu görülmektedir. Takviye oranı arttıkça aşınma kaybı hızla düşmektedir. Matris toz boyutunun artışı ise aşınma kaybını arttırmıştır. Takviye toz boyutundaki artış 53-75 μm değerlerine dek aşınma kaybını azaltmış, fakat 75 μm sonrası aşınma kaybını arttırdığı görülmüştür. Bu durum mikro yapı görüntülerine bakıldığında çok net bir şekilde açıklanmıştır. Takviye toz boyutu 75 μm 'nin üzerinde partiküller kırılıp, kümelenmeler oluşturmuştur. Kümelenmenin olduğu yerlerde ise gözeneklilikler görülmüştür.



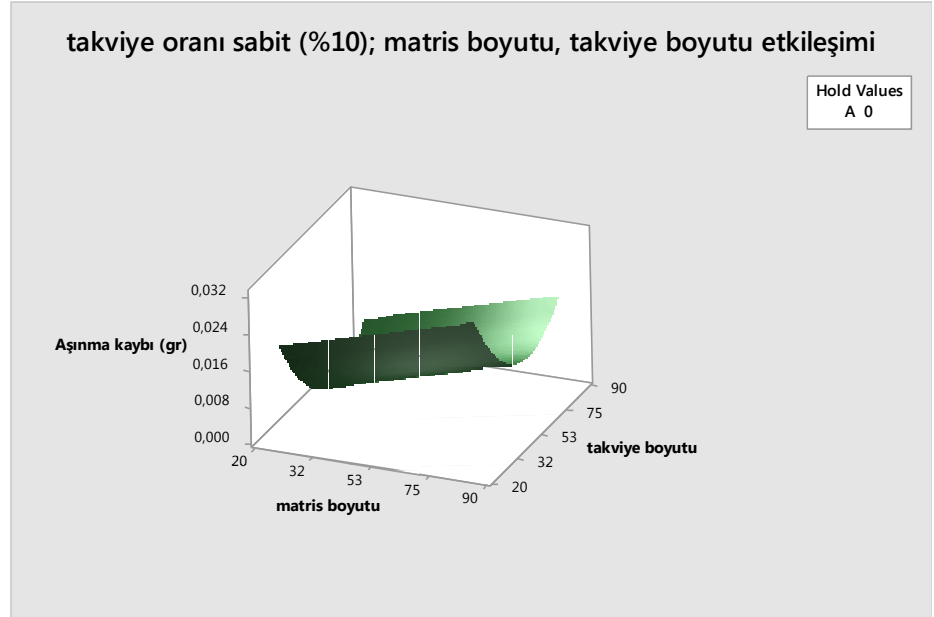
Şekil 9.6. Takviye oranı ve matris toz boyutu etkileşiminin aşınma kaybı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi.

Şekil 9.6'da görüldüğü gibi takviye oranı değiştikçe matris toz boyut değişiminin aşınma kaybı değerleri üzerinde etkisi çok düşük olmuştur. Takviye oranı aşınma kaybını azaltıp matris toz boyutu aşınma kaybını arttırırken, regresyon denkleminde bulunan değerlerde $A*B$ (takviye oranı*matris boyutu) etkileşimi aşınma kaybını azaltmıştır. Bu, takviye oranı faktörünün matris toz boyut faktöründen daha baskın olduğunu göstermektedir.



Şekil 9.7. Takviye oranı ve takviye boyutu etkileşiminin aşınma kaybı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi.

Takviye oranı ve takviye partikül boyutu arasındaki etkileşimin aşınma davranışı üzerinde etkili olduğunu görülmüştür.

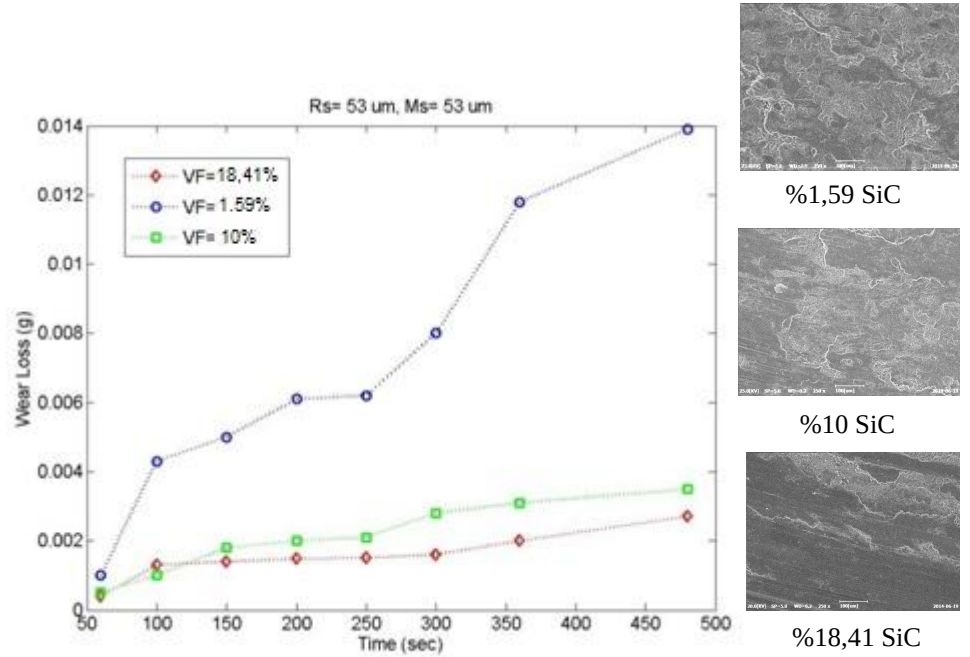


Şekil 9.8. Takviye boyutu ve matris boyutu etkileşiminin aşınma kaybı üzerindeki etkisini gösteren 3D yanıt yüzeyi.

Matris toz boyutu ve takviye partikül boyutu arasındaki etkileşimin aşınma davranışı üzerinde etkili olduğunu görülmüştür.

9.2.2. Aşınma kaybı- Zaman İlişkisi

Üretilen tüm MMK malzemelerin aşınma kayıpları değerlendirildikten sonra, sabit matris ve takviye boyutu, değişken takviye oranında yeni bir çalışma yapılmış sonuçları MATLAB’ da değerlendirilmiştir. Bu çalışmada %1,59, %10, %18,41 olmak üzere üç farklı takviye oranı için 53 μ m boyutunda Al ve yine 53 μ m boyutunda SiC içeren MMK malzemelerin zamana bağlı aşınma miktarları ölçülmüştür. Şekil 9.9 ‘ da görüldüğü gibi en iyi aşınma direnci %10 takviye içeren numunede görülmüştür. %18,41 takviye içeren MMK’de kümelenmelere bağlı malzemede homojen bir yapı oluşmamış ve bu durumun aşınma kayıplarını da etkilediği görülmüştür. %1,59 takviye içeren MMK’in ise aşınma dayanımının %10 takviye oranına göre düşük olduğu gözlemlenmiştir.

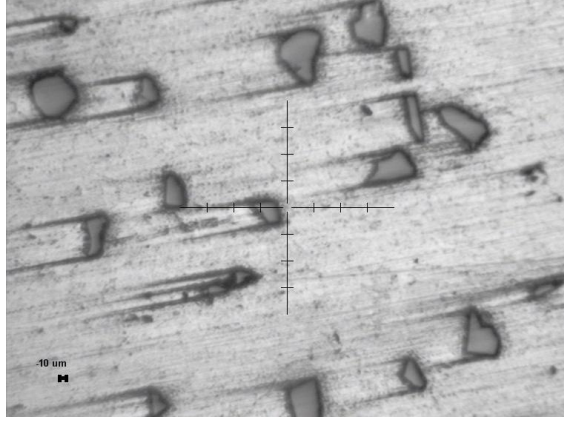


Şekil 9.9. Aşınma kaybı-zaman grafiği

Aşındırılan malzemelerin ağırlık kayıpları ölçüldükten sonra aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Aşınma kaybını gösteren eğrilerin yanlarında aynı numuneye ait aşınma yüzeyi SEM görüntüleri yer almaktadır. (Şekil 9.9)

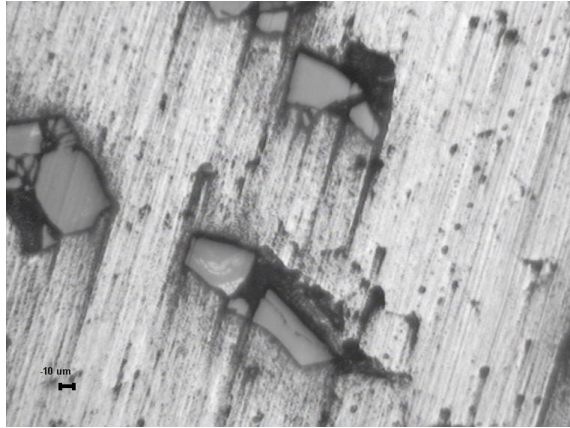
9.3. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Deney tasarımıındaki tüm numuneler Archimedes prensibine göre testleri yapılmış, burada matris partikül boyutu küçük olan ($20\mu\text{m}$ ve $32\mu\text{m}$) MMK'lerde matrisin devamlı oluşu ve gözenekliliğin yok denecek kadar az olması dikkati çekmiştir. (Şekil 9.10)



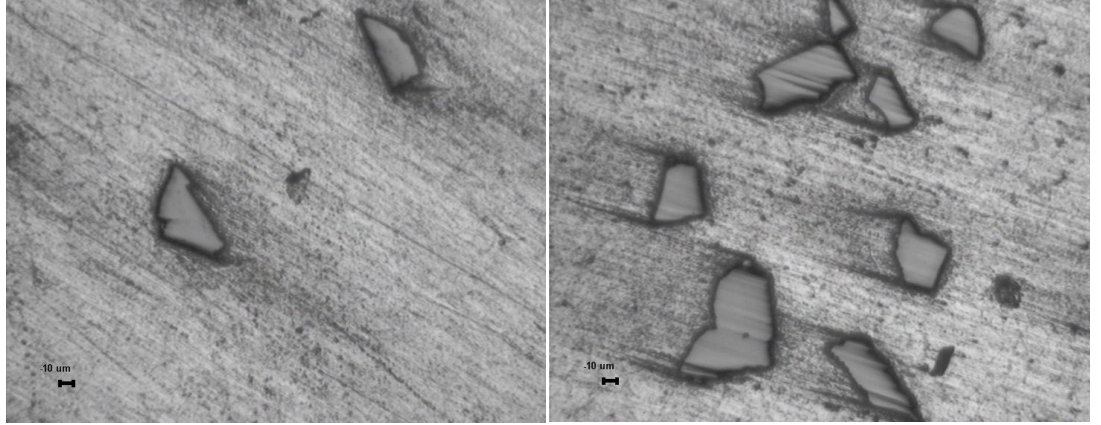
Şekil 9.10. 32/32 %5 ($d=93,47$)

Takviye partikül boyutunun büyük ($90\mu\text{m}$) olduğu MMK'lerde ise takviye partiküllerinin kırıldığı ve çevrelerinde boşluklar yarattığı görülmüştür. (Şekil 9.11)



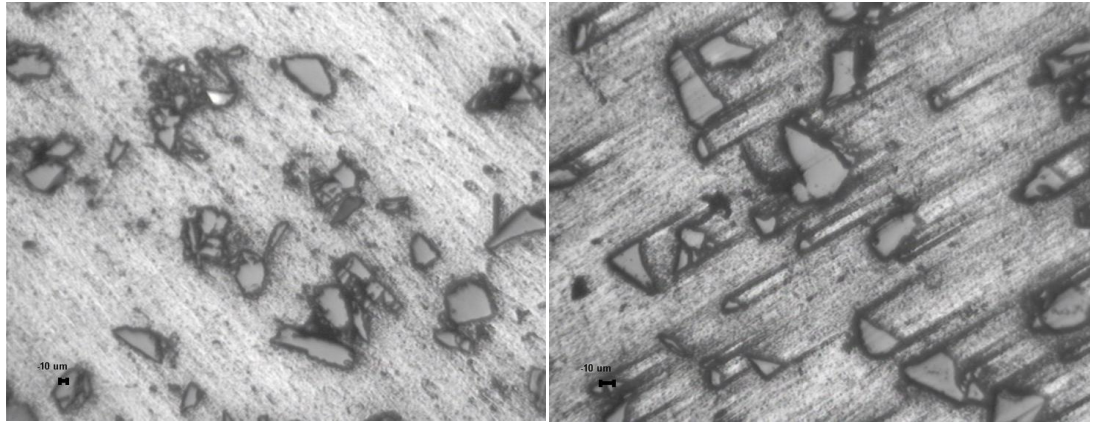
Şekil 9.11. 53/90 %10 ($d=90,65$)

Genel olarak yoğunluk ölçüm sonuçlarında en etkili faktörün takviye oranı olduğu görülmüştür. %1,59 ve %5 SiC içeren numunelerin gözenekliliği çok düşük şekil 9.12 a, şekil 9.12 b, %15 ve %18,41 SiC içeren numunelerin gözenekliliği daha fazla görülmüştür. (Şekil 9.12 c, Şekil 9.12 d)



(a) 53/53 %1,59 (d= %93,68)

(b) 32/75 %5 (d= %94,04)



(c) 32/32 %15 (d= 92,23)

(d) 53/53 %18,41 (d= 88,9)

Şekil 9.12. Mikro yapı görüntüleri (a) 53/53 %1,59 (d= %93,68), (b) 32/75 %5 (d= %94,04), (c) 32/32 %15 (d= 92,23), (d) 53/53 %18,41 (d= 88,9)

CCD deney tasarım metoduna göre farklı matris toz boyutu, takviye partikül boyutu ve hacim oranlarında tüm Al-SiCp kompozitlerin Archimedes prensibine göre hesaplanan yoğunluk değerleri Çizelge 9.7’de verilmiştir.

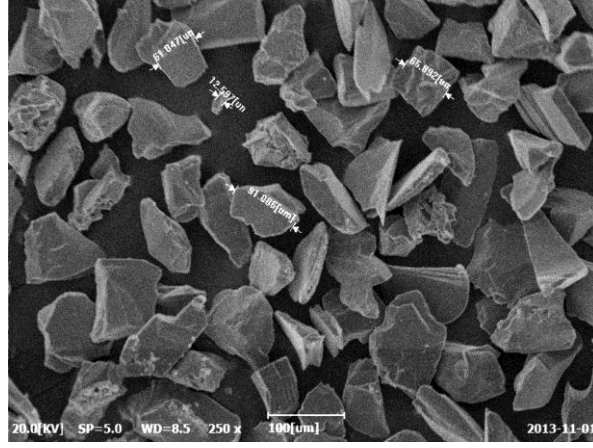
Çizelge 9.8. CCD'ye göre yapılan deney tasarımı ve Al-SiCp kompozitlerin yoğunluk değerleri.

CCD	kütlece	tane boyutu	tane boyutu	$d_{\text{gerçek}}$ (gr/cm ³)	d_{teorik}	% $d_{\text{gerçek}}$
1	5	32	32	2,547081	2,73	93,47
2	15	32	32	2,58616	2,78	92,63
3	5	75	32	2,555985	2,73	93,80
4	15	75	32	2,545935	2,78	91,75
5	5	32	75	2,562542	2,73	94,04
6	15	32	75	2,571763	2,78	92,68
7	5	75	75	2,580202	2,73	94,69
8	15	75	75	2,557012	2,78	92,14
9	1,59	53	53	2,536788	2,71	93,68
10	18,41	53	53	2,468584	2,79	88,96
11	10	20	53	2,498077	2,75	90,84
12	10	90	53	2,517942	2,75	91,56
13	10	53	20	2,547465	2,75	92,64
14	10	53	90	2,492857	2,75	90,65
15	10	53	53	2,52126	2,75	91,68
16	10	53	53	2,52078	2,75	91,66
17	10	53	53	2,52098	2,75	91,67
18	10	53	53	2,52077	2,75	91,66
19	10	53	53	2,52126	2,75	91,68
20	10	53	53	2,52097	2,75	91,67

9.4. Mikro Yapı Çalışmaları

Deneylere başlamadan önce toz boyut analizi yapılmış olan başlangıç tozlarının boyutlarını yeniden tetkik etmek ve parçacıkların şekillerini görmek için SEM görüntüleri alınmıştır.

Şekil 9.13'de görüldüğü üzere elek analizi amacına ulaşmış, birbirine yakın boyutlardaki tozlar bir araya getirilmiştir. Parçacıkların şekillerinin ise düzensiz olduğu görülmektedir.



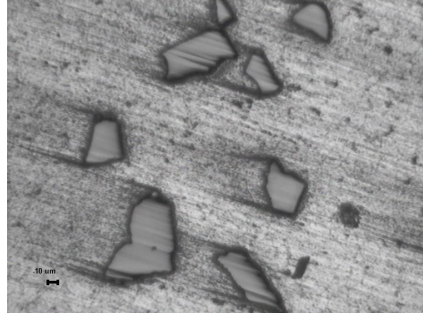
Şekil 9.13. SiC partikülleri boyut ve şekil analizi (SEM)

Üç nokta eğme deneyi öncesinde farklı matris ve takviye partikül boyutu ve hacim oranlarında hazırlanan Al/SiCp kompozitlerinde takviye partiküllerinin matris içerisindeki dağılımlarını ve gözeneklerini gözlemlemek için optik mikroskop ile mikro yapı görüntüleri alınmıştır (Ek-A).

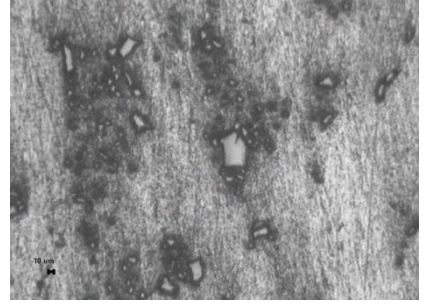
Ek-A'da her görüntünün altında sırasıyla o numuneye ait matris ve takviye partikül boyutu, takviye oranı ve en son da üretim tekniği verilmiştir. Ek-A'da sol sütun tamamen CIP üretimi, sağ sütun ise tamamen tek eksenli basma ile üretilmiş numunelerin görüntüsünü vermektedir. Bu çalışmada CIP ile üretilen farklı takviye oranı, takviye ve matris partikül boyutlu numuneler karşılaştırılmıştır. Fakat CIP'in malzemenin yoğunluğu ve partiküllerin homojen dağılımındaki etkisini görmek adına aynı deneyler tek eksenle de yapılmıştır. Ek-A'daki görüntülerde de görüldüğü gibi tek eksen ile üretilmiş numunelerde kümelenme oranı çok daha yüksek ve takviye parçacıklarının etrafında büyük boşluklar vardır. Ayrıca tek eksenli basma ile yapılan çalışmalarda seramik takviyeler kırılmıştır. CIP ile üretilen numunelerde ise kümelenmenin tek eksenle üretime nazaran çok daha iyi ve gözenekliliğin yok denecek kadar az olduğu ve %90-95 yoğunluklara ulaşıldığı görülmüştür.

CIP ile üretilen MMK'leri kendi aralarında kıyaslayacak olursak matris partikül boyutunun küçük olduğu (20µm ve 32 µm) durumlarda matris fazı sürekli ve gözenekliliği minimum görülmüştür. (Şekil 9.14a) Matris fazının büyük olduğu durumlarda ise SiC partiküllerinin matris fazının içerisinde homojen dağılmadığı görülmüştür. (Şekil 9.14b) Takviye partikül boyutunun ise büyük olduğu (75µm ve 90 µm) deneylerde sıkıştırma esnasında büyük SiC partiküllerinin kırıldığı gözlemlenmiştir. (Şekil 9.14c) Küçük takviye partiküllü

deneylerde ise (20 μ m ve 32 μ m) takviye partiküllerinin matris fazının aralarına giremediği ve kümelenmenin fazla olduğu görülmüştür. (Şekil 9.14d)



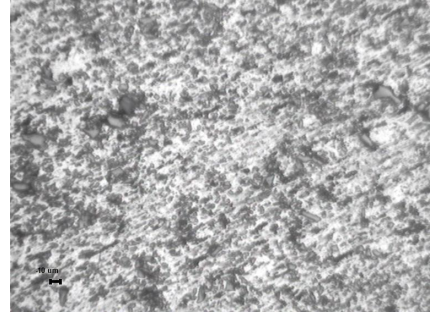
(a) 32/75 %5



(b) 75/32 %5



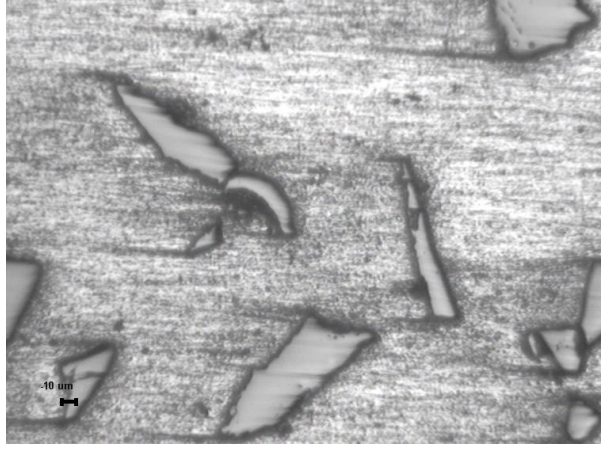
(c) 53/90 %10



(d) 53/20 %10

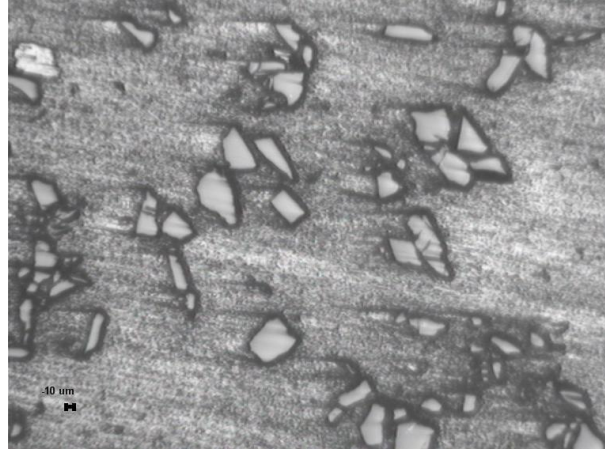
Şekil 9.14. 100X büyütmede (a) 32/75 %5, (b) 75/32 %5 kompozitlerinin mikro yapı görüntüleri

Deneyler göstermiştir ki matris fazı takviye fazından küçük olduğunda mikro yapı daha homojen ve gözeneksiz bulunmuştur. Hatta matris partikül boyutu (M_s) / takviye partikül boyutu (R_s) ≤ 1 olduğunda mikro yapı daha ideale yakın olduğu görülmektedir. Fakat bu oran da malzemenin boyutları arttıkça dezavantaj olmaktadır. Nitekim SiC partikül boyutu büyüdükçe basma sırasında partiküller kırılıp kümelenmekte ve kendi aralarında boşluklar oluşturmaktadır. (Şekil 9.15)



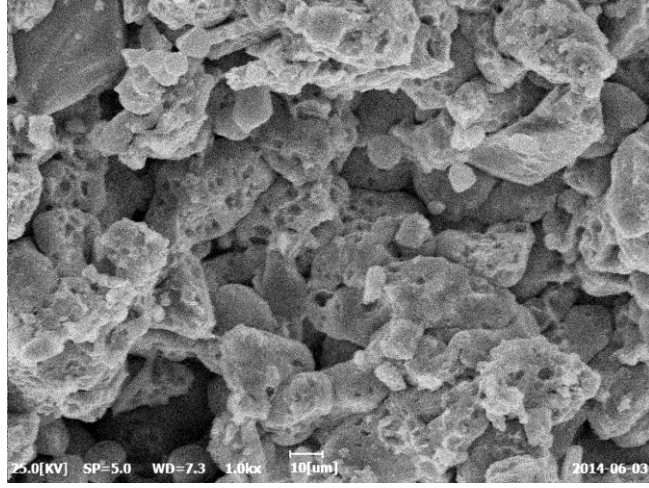
Şekil 9.15. 100X büyütmede 53/90 %10 kompozitin mikro yapı görüntüsü

Takviye oranının artması ise malzemede belli bir dereceye kadar (%15) uniform bir dağılım göstermiş, %15'den sonraki hacim oranı artışı takviye partiküllerinin kendi aralarında kümelenmesine sebep olmuştur. (Şekil 9.16)

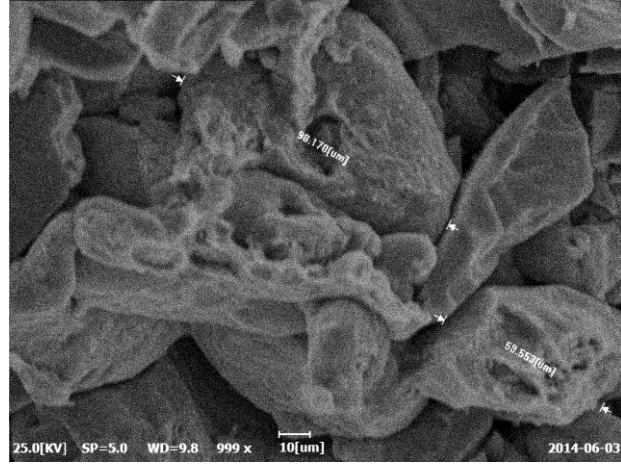


Şekil 9.16. 100X büyütmede 75/32 %15 kompozitin mikro yapı görüntüsü

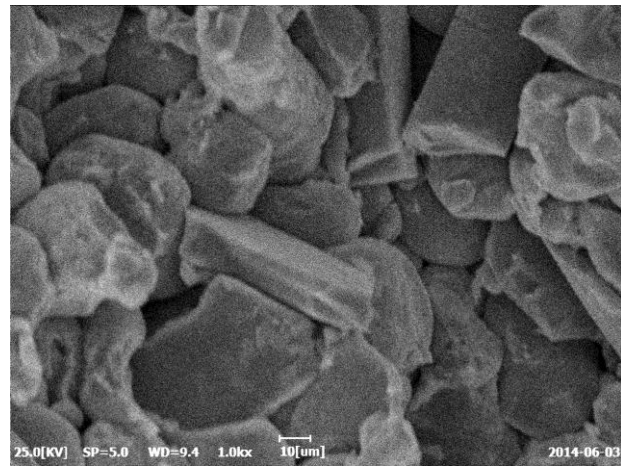
Eğilme deneyi sonrası MMK'lerin kırık yüzeylerini görmek için SEM analizleri yapılmıştır. Şekil 9.17'de görüldüğü gibi daha açık renkli bölgeler; metalik sünek ayrışmayı gösterirken, daha koyu bölgeler; takviye fazı ve çevresindeki mekanik birleşmenin olduğu yerleri göstermektedir. Daha koyu bölgelerin çokluğu eğilme dayanımını düşürdüğü çok net bir şekilde verilerden de görülmektedir. Buna göre; takviye fazının az olması durumunda metalik matris malzemesinin sünek kırılmasının daha etkin bir mekanizma olduğu gözlenmiştir.



Şekil 9.17. 1000X büyütmede 32/32 %5 kompozitin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü



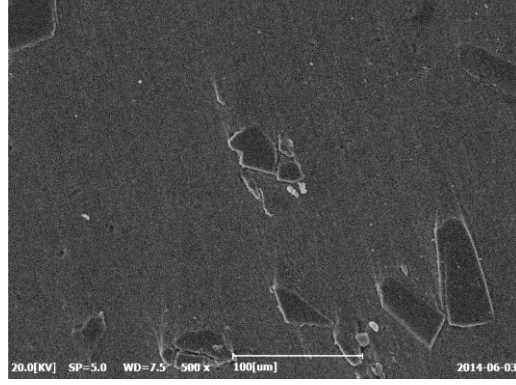
(a)



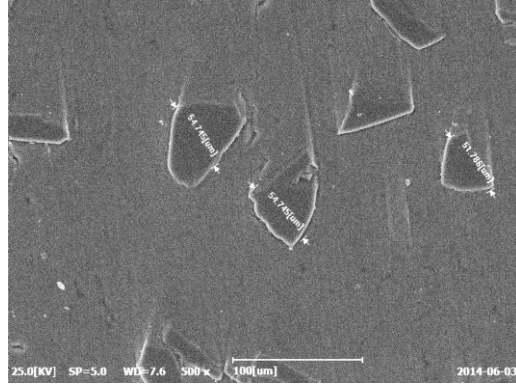
(b)

Şekil 9.18. 1000X büyütmede (a) 90/53 %10, (b) 53/53 %10 kompozitlerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri

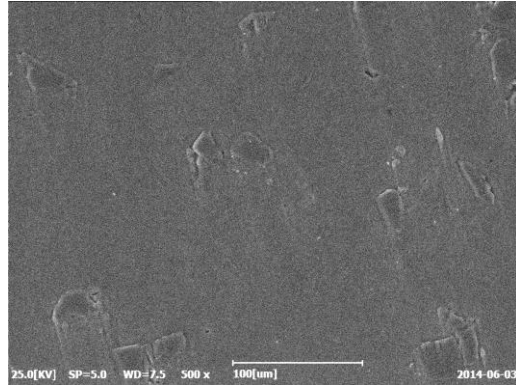
MMK'lerin optik mikroskopla mikro yapılarının incelenmesi sonrası, kıyaslama yapılabilecek üç tanesi seçilmiş, SEM analizi yapılmıştır. (Şekil 9.19) Burada 32/32 %5, 90/53 %10, 53/53 %10 olan MMK'ler parçacık dağılımı ve gözeneklilik açısından kıyaslama yapılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 9.19. 500X büyütmede (a) 32/32 %5, (b) 90/53 %10, (c) 53/53 %10 kompozitlerin mikro yapı görüntüleri.

10. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Soğuk izostatik presleme yöntemiyle üretilen Al/SiC_p metal matris kompozit malzemelerinin eğme dayanımı, sertlik, aşınma, yoğunluk değerlerinin ve mikro yapı görüntülerinin incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve ileride yapılabilecek çalışmalar için bazı öneriler aşağıda özetlenmiştir:

- CCD deney tasarım metoduyla hazırlanan farklı takviye oranı, matris boyutu ve takviye boyutunda üretilecek MMK malzemeler geleneksel TM tek eksenle basma yöntemiyle ve soğuk izostatik presleme yöntemiyle ayrı ayrı üretimleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- Tek eksenli basma ile üretilen numunelerin hepsinde gözeneklilik meydana gelmiş olup gözenekliliğin en çok görüldüğü numune % 18,41 SiC içeren MMK olmuştur. Bu numunenin yoğunluğu $\%d_{\text{gerçek}} = 86,30$ olarak ölçülmüştür. Aynı numunenin CIP (soğuk izostatik presleme) ile üretiminde $\%d_{\text{gerçek}} = 92,63$ ölçülmüştür. Tek eksen ile üretilen numunelerde max. yoğunluk % 91,83 iken CIP ile üretimde % 95 yoğunluklara ulaşılmıştır. En yoğun yani gözenekliliğin en düşük olduğu numune %5 SiC takviye içeren ve matris boyutu 32 μm , takviye boyutu 75 μm olan numune olmuştur. Neticede CIP ile üretimin yoğunluk değerlerinin iyileşmesinde daha üstün olduğu görülmüştür.
- Mikro yapı incelemeleri sonunda üretilen numunelerin $M_s/R_s \leq 1$ olduğu deneylerde kümelenmenin daha az olduğu ve takviye parçacıkların matris içerisinde homojen dağıldığı görülmüştür. Fakat bu oranı oluşturan matris ve takviye boyutları arttıkça bu ilişki değişmektedir. Çünkü takviye partiküllerinin boyutlarının fazla artması, sıkıştırma esnasında partikülleri kırılmasına sebep olmuştur. Kırılan partiküller kendi aralarında kümelenmiş ve etraflarında gözeneklilik oluşturmuştur. $M_s/R_s > 1$ olduğu durumlarda ise SiC partiküllerin matris partikülleri arasına giremediği için takviye fazının daha çok kümелendiği görülmüştür.
- Numuneler arasında en yüksek sertlik değeri %18,41 SiC takviyeli kompozit malzemedeki 56,26 HB olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, numune içerisindeki SiC takviye oranının daha fazla olmasıyla açıklanabilir.

- Çalışmada takviye oranı arttıkça takviye partiküllerin kümelenmesine bağlı olarak Al/SiCp kompozitlerinin eğme dayanımları azalmıştır. Bu durum, MMK'lerin eğme davranışlarının partikül kümelenmelerine karşı önemli olduğunu göstermektedir. Matris toz boyutunun eğme dayanımı üzerindeki etkisi bakımından matris toz boyutundaki artış eğme dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Düşük takviye oranları için en yüksek eğme dayanımı değerlerine matris toz boyutu ve takviye partikül boyutunun en küçük olduğu durumlarda ulaşılmıştır.
- Üretilen kompozit malzemelerin kırık yüzeylerin SEM görüntüleri incelendiğinde, kırılmanın ara yüzeylerde ve matris tane sınırlarında olduğu görülmektedir. Kompozitlerde oluşan gözenekliliğin, takviye elemanı etrafında gerçekleştiği tespit edilmiştir.
- İncelenen faktörler arasında aşınma direnci üzerinde en etkin faktör takviye oranı olmuştur. Takviye oranı ve takviye partikül boyut artışı, Al/SiCp kompozitlerinin aşınma dirençlerini yükseltmiştir. Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı matris boyutunun küçük olduğu durumlarda aşınma direnci de yüksek bulunmuştur.
- Sonuç olarak, metal matris kompozitlerin soğuk izostatik şekillendirilmesiyle, daha düşük gözeneklilik ve dolayısıyla daha yüksek yoğunluğa ulaşılmıştır. MMK'lerde, mekanik özellikler, takviye miktarına sıkı sıkıya bağlıdır. Mekanik özelliklerin bir diğer bağlı olduğu parametre ise, matris ve takviye fazının boyut oranları olduğu saptanmıştır.
- Bu çalışmayla, TM yöntemi ile şekillendirilen metal matris kompozitlerde mekanik özellikleri iyileştirmek ve en yüksek takviye fazı oranında gözeneklilik ve/veya kümelenmeyi azaltmak için, üretim yöntemi olarak CIP' in kullanılması, $M_s/R_s \leq 1$ ve takviye boyutunda kırılmayacak kadar büyük boyutlar kullanılması gerekliliği ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akbulut, H.**, Adhesiv Aşınma, <http://web.sakarya.edu.tr/~akbulut/WEAR4.pdf>, (2005), (Erişim tarihi: 15 Mayıs 2014)
- Aran, A.**, 2008, Malzeme Bilgisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi, İstanbul, 94s.
- Bhanu Prasad, V.V., Bhat, B.V.R., Mahajan, Y.R. and Ramakrishnan, P.**, 2002, Structure-property correlation in discontinuously reinforced aluminium matrix composites as a function of relative particle size ratio, Materials Science and Engineering A, 337: 179-186pp.
- Bolzoni L., Ruiz-Navas E. M., and Gordo E.**, 2013, Influence of sintering parameters on the properties of powder metallurgy Ti-3Al-2.5V alloy, Materials Characterization, 84: 48-57.
- Chawla, N. and Chawla K.K.**, 2006, Metal Matrix Composites , Springer, New York, 401p.
- Components GTB**, P/M Process, <http://www.gtbcomponents.co.uk/process.html>, (Erişim tarihi: 23 Mayıs 2014).
- Diler, E. A.**, 2012a, Toz Metalurjisiyle Üretilen Al-SiCp Metal Matrisli Kompozitlerde Faktör Etkileşimlerinin Partikül Dağılımı, Eğme dayanımı ve Aşınma Özelliklerine Etkisi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 202s.
- Diler, E. A. and İpek, R.**, 2012b, An experimental and statistical study of interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on the flexural strength of Al-SiCp composites by P/M using central composite design, Materials Science and Engineering A, 548: 43-45pp.
- Diler, E. A. and İpek, R.**, 2013, Main and interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on wear characteristics of Al-SiCp composites using central composite design, Composites: Part B, 50: 371-380pp.
- Eker, A.**, Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri, http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son, (2008), (Erişim tarihi: 10 Şubat 2014).
- Ekşi A., Sarıtaş S.**, 2002, Effects of Powder Hardness and Particle Size on the Densification of Cold Isostatically Pressed Powders, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 26: 377-384pp.
- German, M. Randall**, 2005, Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing, Metal Powder Industries Federation, New Jersey, 528p.
- Güneş, D.**, 2010, Al Matrisli SiCp Takviyeli Kompozit ile Ç1030 Çeliğinin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, Balıkesir, 132s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Henderson, R. J., Chandler, H. W., Akisanya, A. R., Barber, H. and Moriarty, B., 2000**, Finite element modelling of cold isostatic pressing, *Journal of the European Ceramic Society*, 20: 1121-1128pp.
- Kai, L., Yusheng, S., Chenhui, L., Liang, H., Jie, L. and Qingsong, W., 2014**, Indirect selective laser sintering of epoxy resin-Al₂O₃ ceramic powders combined with cold isostatic pressing, *Ceramics International*, 40: 7099-7106pp.
- Kalaycıoğlu, A. S., 2010**, SiC Tane Katkılı Alüminyum Kompozitlerin Toz Metalurjisi İle Üretimi Ve Karakterizasyonu, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 132s.
- Karaduman, B., 2010**, Titanyum Matrisli Titanyum Karbür Takviyeli Kompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, İstanbul, 87s.
- Kılıç, R., 2005**, Kaya Mekaniği, Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye İşletme Yayınları No:39, Ankara, 86s.
- Kim H. G., Lee J. W. and Kim K. T., 2001**, The effect of a rubber mold on densification and deformation of a metal powder compact during cold isostatic pressing, *Materials Science and Engineering A*, 318: 174-182.
- Kopeliovich, D., Solid state fabrication of Metal Matrix Composites**, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=solid_state_fabrication_of_metal_matrix_composites, (2012a), (Erişim tarihi: 11 Şubat 2014)
- Kopeliovich, D., In-situ fabrication of Metal Matrix Composites**, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=in-situ_fabrication_of_metal_matrix_composites, (2012b), (Erişim tarihi: 22 Mayıs 2014).
- Kopeliovich, D., Liquid state fabrication of Metal Matrix Composites**, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=liquid_state_fabrication_of_metal_matrix_composites, (2012c), (Erişim tarihi: 22 Mayıs 2014).
- Kopeliovich, D., Isostatic pressing of metallic powders**, http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=isostatic_pressing_of_metallic_powders, (2012d), (Erişim tarihi: 11 Şubat 2014).
- Kumar S. and Balasubramanian V., 2008**, Developing a mathematical model to evaluate wear rate of AA7075/SiCp powder metallurgy composites, *Wear*, 264: 1026-1034pp.
- Kumar, S. and Balasubramanian, V., 2010**, Effect of reinforcement size and volume fraction on the abrasive wear behaviour of AA7075 Al/SiCp P/M composites- A statistical analysis, *Tribology International*, 44: 414-422pp.
- Kumar D.R., Loganathan C. and Narayanasamy R., 2011**, Effect of glass in aluminum matrix on workability and strain hardening behavior of powder metallurgy composite, *Materials and Design*, 32: 2413-2422pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kumdalı, F.**, 2008, Alüminyum matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, İstanbul, 84s.
- Liu, Y. Q., Wei, S. H., Fan, J. Z., Ma, Z. L. and Zuo, T.**, 2014, Mechanical Properties of a Low-thermal-expansion Aluminum/Silicon Composite Produced by Powder Metallurgy, *Journal of Materials Science & Technology*, 30: 417-422pp.
- METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION**, Technology Update for the Powder Metallurgy Industry, http://www.mpif.org/intropm/2012_industry_roadmap.pdf, (2012), (Erişim tarihi: 11 Şubat 2014)
- Nair, F. and KARAMIŞ, M. B.**, 2009, Effects of reinforcement particle size in MMCs on extrusion die wear, *Wear*, 265: 1741-1750pp.
- Öğünç, H.**, 2006, Sıcak Presleme ile Sinterlenmiş α -SiC Matrisli B₄C Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 74s.
- Prasetyo, Y.**, Komposit Aluminium untuk Aplikasi Tegangan Tinggi, <http://yudiprasetyo53.wordpress.com/author/yudiprasetyo53/page/15/>, (2012), (22 Mayıs 2014).
- Samal C. P., Parihar J. S. and Chaira D.**, 2013, The effect of milling and sintering techniques on mechanical properties of Cu-graphite metal matrix composite prepared by powder metallurgy route, *Journal of Alloys and Compounds*, 569: 95-101pp.
- Schwartz, M. M.**, 1997, Composite Materials, Vol. II Processing, Fabrication, and Applications; Polymers, Ceramics, Metal Matrices, Prentice Hall PTR, USA, 592p.
- Seo, Y., Yun, K., Kim, H., and Park, S.**, 2010, Adaptability of zirconia core fabricated by cold isostatic pressing, *J Korean Acad Prosthodont*, 48(2): 143-150pp.
- Szantoa, M., Bier, W., Frage, N., Hartmann, S. and Yosibash, Z.**, 2008, Experimental based finite element simulation of cold isostatic pressing of metal powders, *International Journal of Mechanical Sciences*, 50: 405-421pp.
- Şahin, Y.**, 2003, Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminium alloy composites, *Materials & Design*, 24: 671-679pp.
- Şahin, Y.**, 2006, Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 424s.
- Şahin, Y.**, 2010, Abrasive wear behaviour of SiC/2014 aluminium composite, *Tribology International*, 43: 939-943pp.
- TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası**, Bor Raporu, http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi134/d134_1158.pdf, (2003), (Erişim tarihi: 23 Mayıs 2014).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Upadhyaya, G.S.**, 2002, Powder Metallurgy Technology, Cambridge International Science Publishing, England, 160p.
- Wang, Z., He, W., Shi, Y. and Zhang, Y.**, 2014, Experimental based full process simulation of alumina selective laserprocessed parts densified by cold isostatic pressing and solid state sintering, Journal of the European Ceramic Society, 1853–1863pp.
- Wu, Q., Li, C. and Tang, H.**, 2010, Surface characterization and growth mechanism of laminated Ti_3SiC_2 crystals fabricated by hot isostatic pressing, Applied Surface Science, s 6986-6990pp.
- Xu, L., D., P., Guo, R., Bai, C., Lei, J. and Yang, R.**, 2014, Effect of Hot Isostatic Pressing Conditions and Cooling Rate on Microstructure and Properties of Ti–6Al–4V Alloy from Atomized Powder, Journal of Materials Science & Technology.
- Yang H. C., Kim J. K. and Kim K. T.**, 2004, Rubber isostatic pressing and cold isostatic pressing of metal powder, Materials Science and Engineering A, 318: 41-49pp.
- Zeren, M.**, Toz Metalurjisi ve Sinterleme, <http://metalurji.kocaeli.edu.tr/files/DersNotlari/mmt423-11.pdf>, (2006),(17 Şubat 2014)

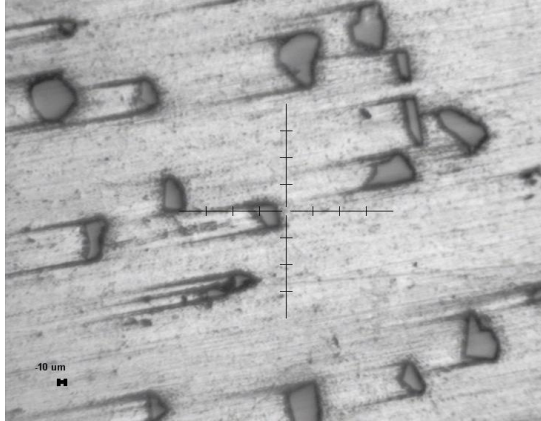
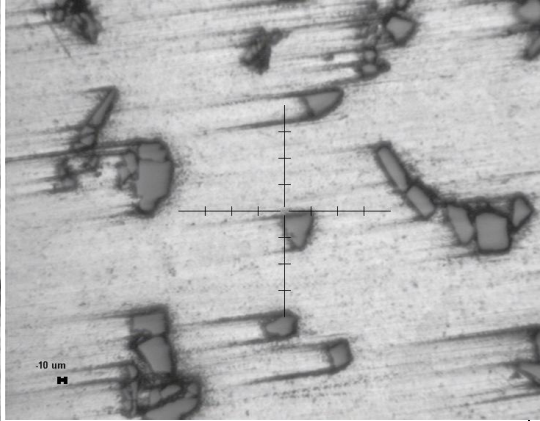
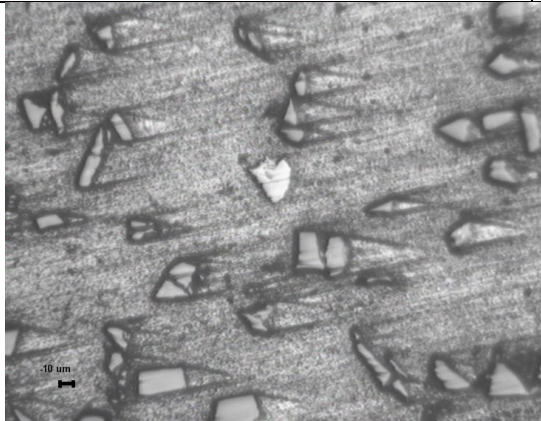
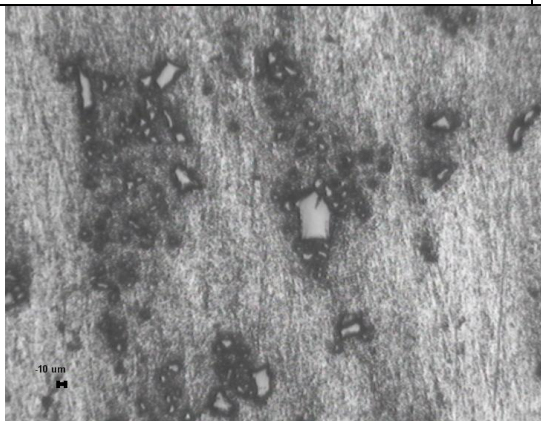
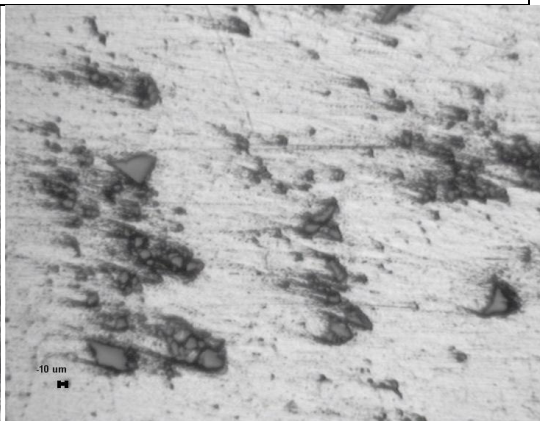
ÖZGEÇMİŞ

İdil Aritman, 1987 yılında Edirne’de doğmuştur. Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2010 yılında mezun olmuştur. 2009 yılında Safkar Ege Soğutmacılık Klima Soğuk Hava Fabrikasında yönetim stajını, 2010 yılında da Totomak Makine ve Yedek Parça Fabrikasında üretim stajlarını yapmıştır. 2010-2013 yılları arasında Demirefe Yapı Denetim Şirketinde Kontrolör Makina Mühendisi olarak çalışmıştır. 2013 yılından bu yana, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde Uzman (öğretim yardımcısı) olarak görev yapmaktadır.

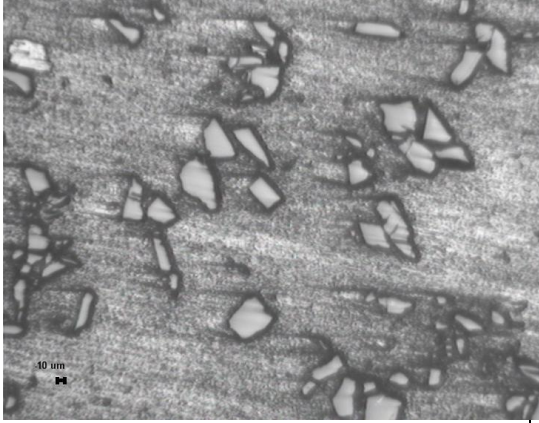
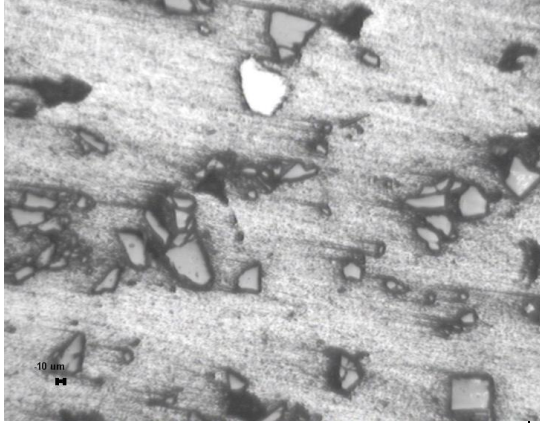
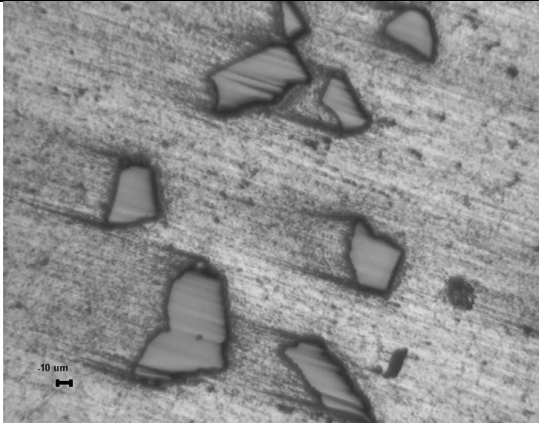
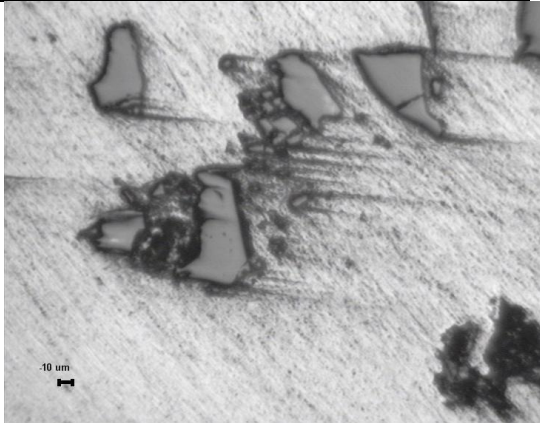
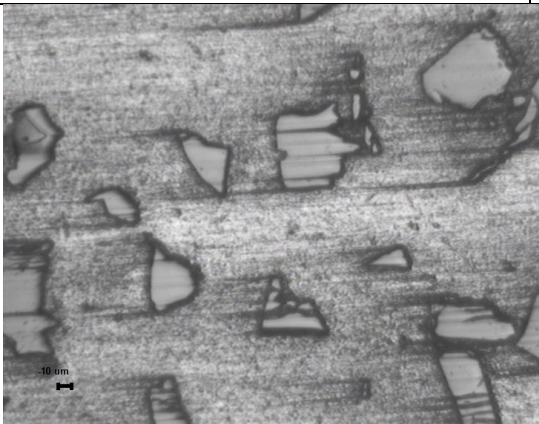
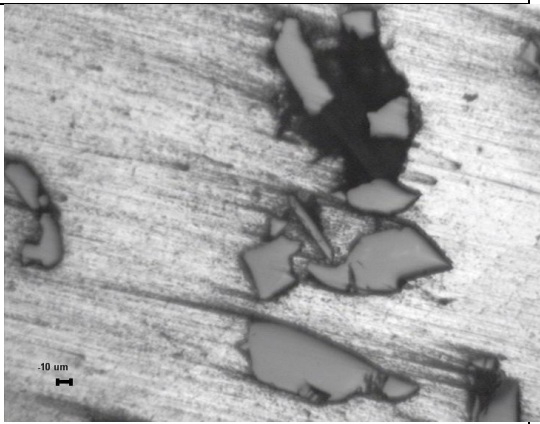
EKLER

- Ek A 250 MPa CIP ile üretilmiş MMK'lerin 250 MPa tek eksen basma ile üretilen MMK malzemelerle mikro yapılarının karşılaştırılması.
- Ek B CIP ile üretilen MMK malzemelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.
- Ek C CIP ile üretilen MMK malzemelerin XPS ve XRD analiz sonuçları.
- Ek D 250MPa tek eksen basma ile üretilmiş MMK malzemelerin yoğunluk değerleri.
- Ek E Matris ve takviye tozlarının boyut analizi sonuçları.

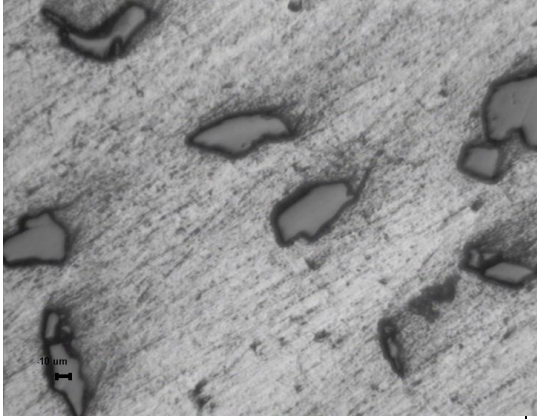
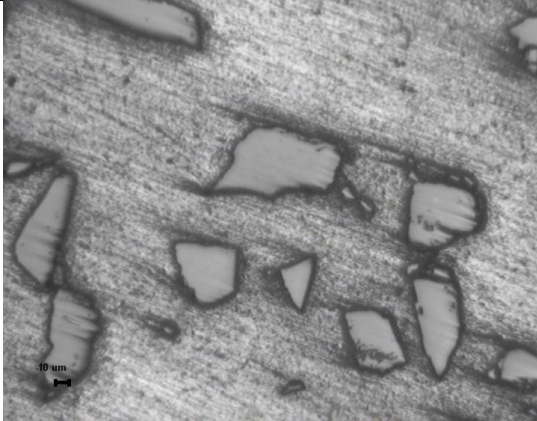
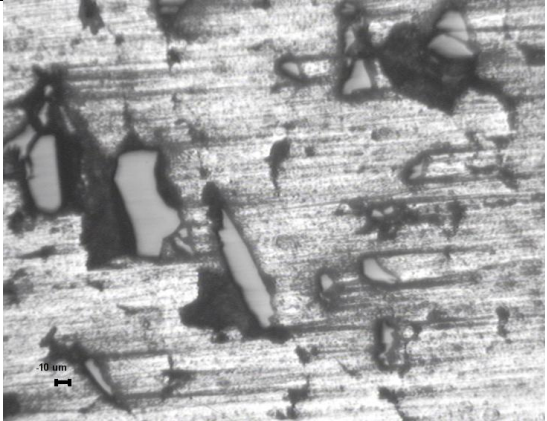
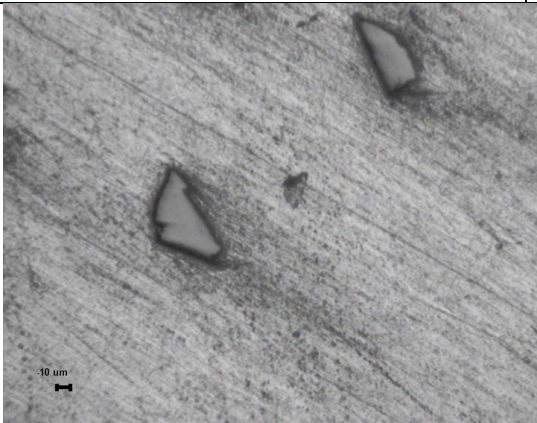
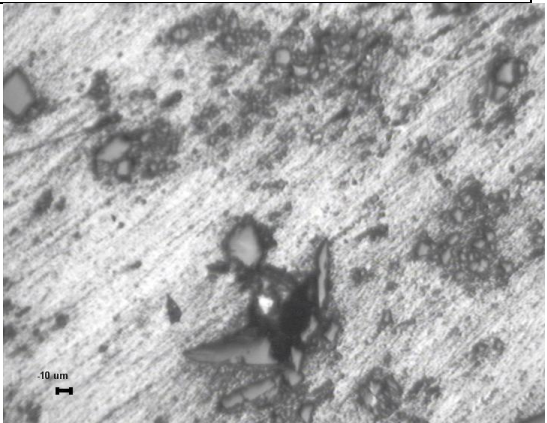
Ek-A 250 MPa CIP ile üretilmiş MMK'lerin 250 MPa tek eksen basma ile üretilen MMK malzemelerle mikro yapılarının karşılaştırılması.

(a) <u>CIP: 250 MPa- Argon 600⁰C-2 saat</u>	(b) <u>Tek Eksenli: 250 MPa- Argon 600⁰C-2 saat</u>
	
32/32 %5 CIP	32/32 %5 Tek Eksenli Basma
	
32/32 %15 CIP	32/32 %15 Tek Eksenli Basma
	
75/32 %5 CIP	75/32 %5 Tek Eksenli Basma

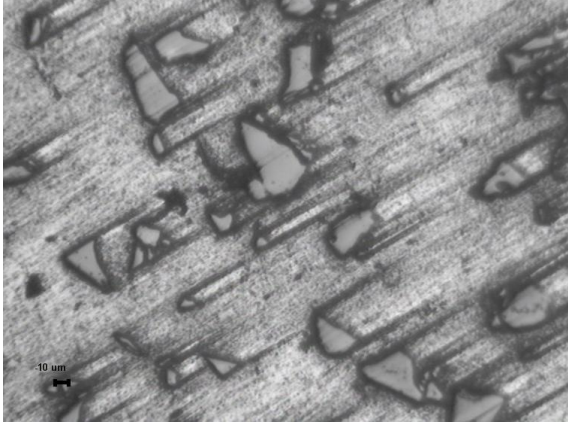
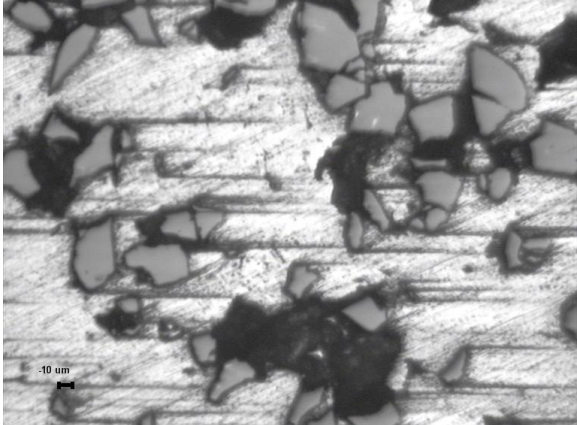
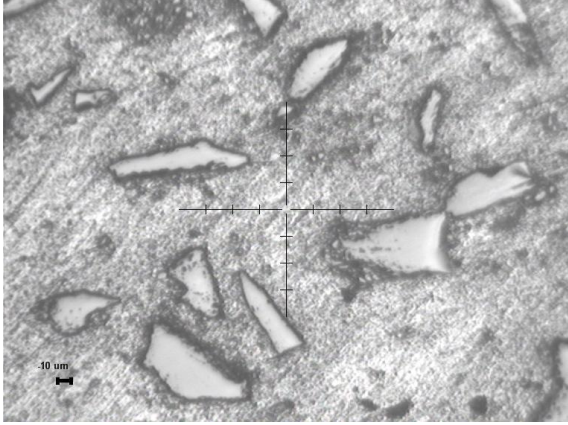
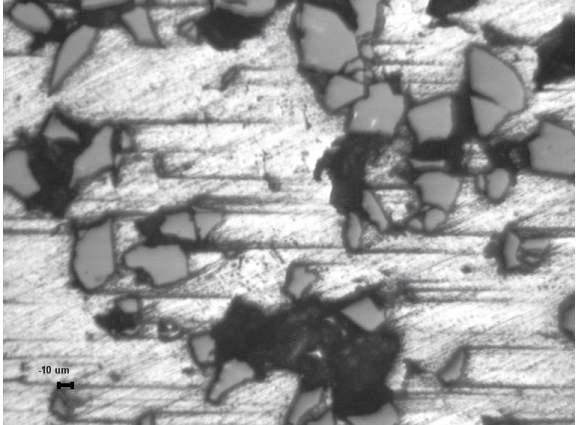
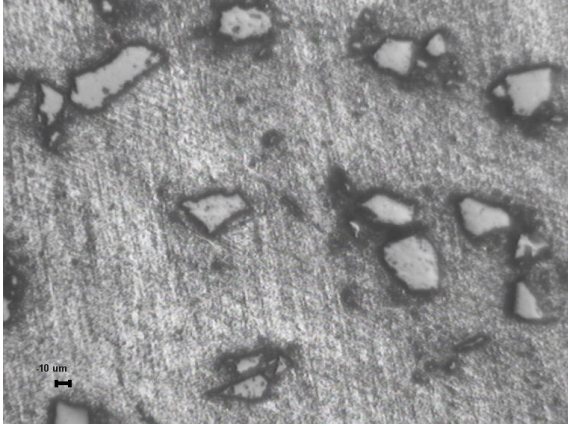
Ek A (devam)

(c) CIP: 250 MPa- Argon 600 ⁰ C-2 saat	(d) Tek Eksenli: 250 MPa- Argon 600 ⁰ C-2 saat
 75/32 %15 CIP	 75/32 %15 Tek Eksenli Basma
 32/75 %5 CIP	 32/75 %5 Tek Eksenli Basma
 32/75 %15 CIP	 32/75 %15 Tek Eksenli Basma

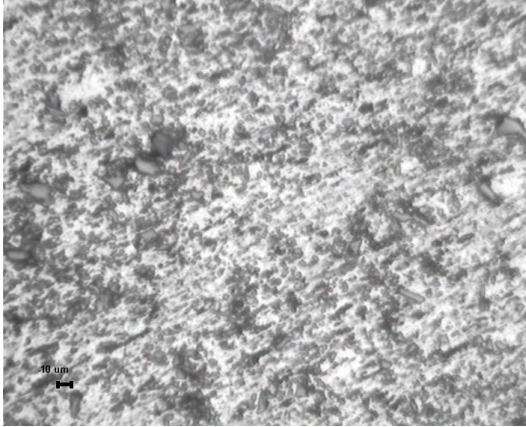
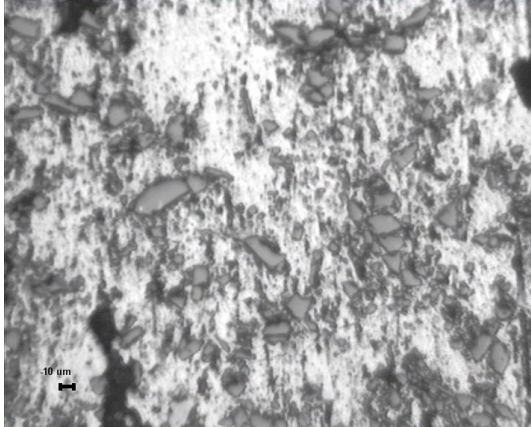
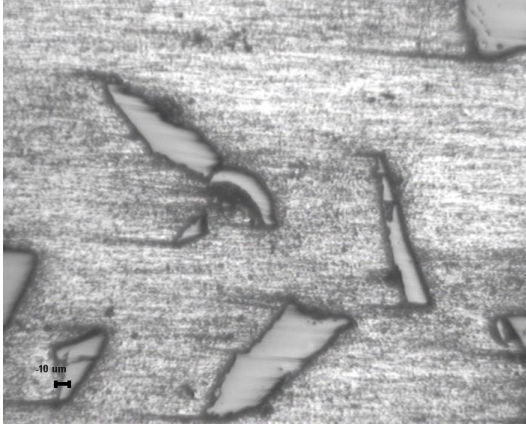
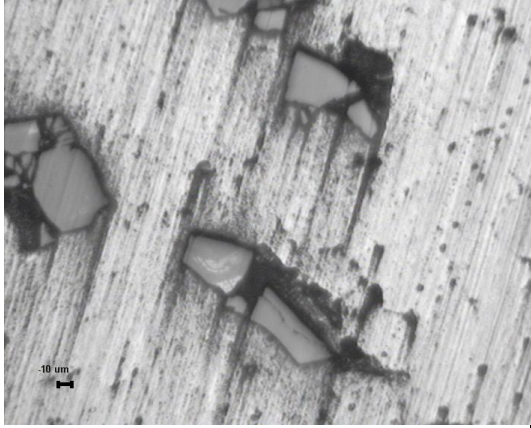
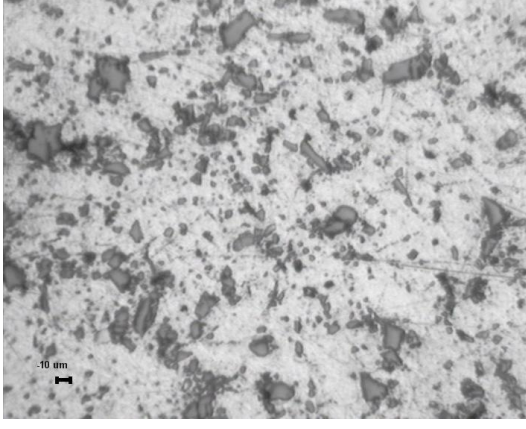
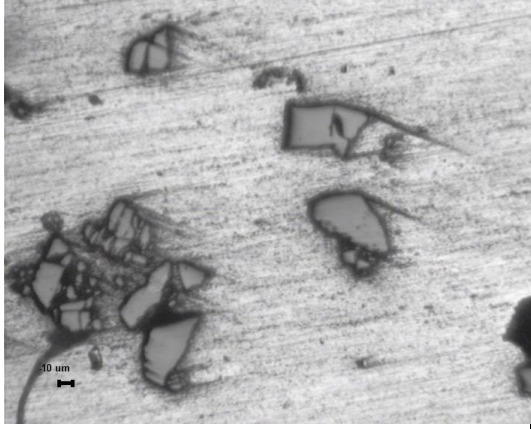
Ek A (devam)

(e) CIP: 250 MPa- Argon 600 ⁰ C-2 saat	(f) Tek Eksenli: 250 MPa- Argon 600 ⁰ C- 2 saat
	
75/75 %5 CIP	75/75 %5 Tek Eksenli Basma
	
75/75 %15 CIP	75/75 %15 Tek Eksenli Basma
	
53/53 %1,59 CIP	53/53 %1,59 Tek Eksenli Basma

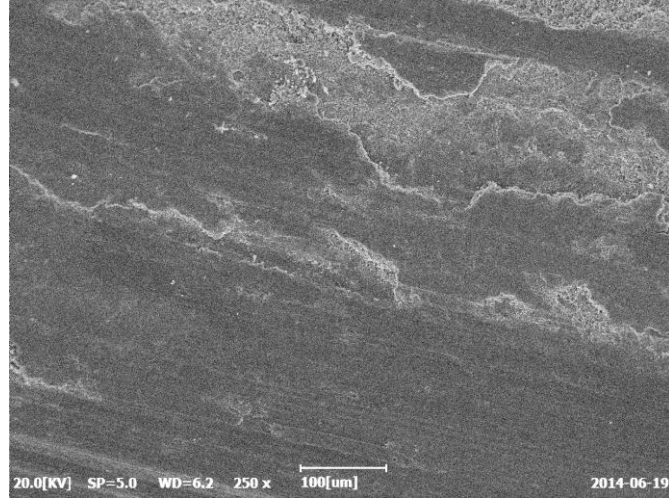
Ek A (devam)

(g) CIP: 250 MPa- Argon 600⁰C-2 saat	(h) Tek Eksenli: 250 MPa- Argon 600⁰C-2 saat
 53/53 %18,41 CIP	 53/53 %18,41 Tek Eksenli Basma
 20/53 %10 CIP	 20/53 %10 Tek Eksenli Basma
 90/53 %10 CIP	 90/53 %10 Tek Eksenli Basma

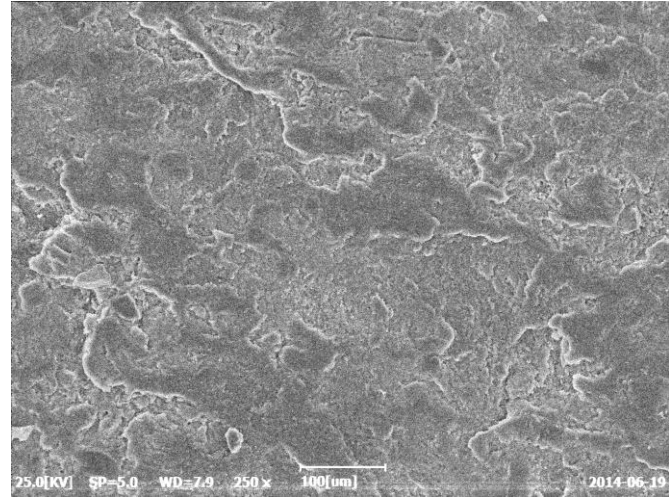
Ek A (devam)

(i) CIP: 250 MPa- Argon 600 ⁰ C-2 saat	(j) Tek Eksenli: 250 MPa- Argon 600 ⁰ C-2 saat
 53/20 %10 CIP	 53/20 %10 Tek Eksenli Basma
 53/90 %10 CIP	 53/90 %10 Tek Eksenli Basma
 53/53 %10 CIP	 53/53 %10 Tek Eksenli Basma

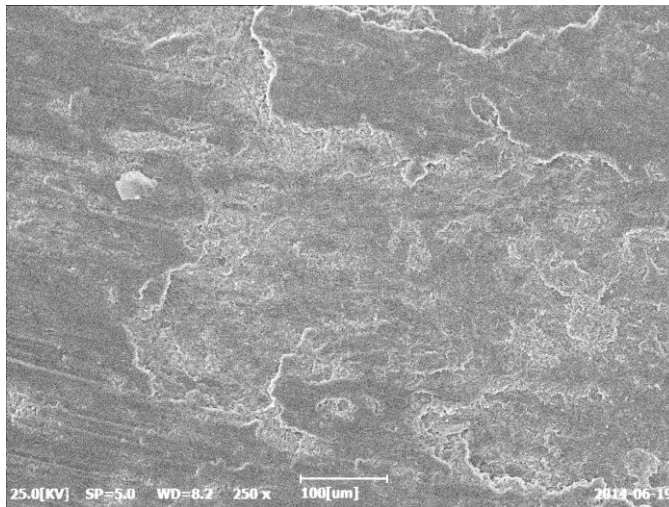
Ek-B CIP ile üretilen MMK malzemelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri



53/53 %1,59 SiC içeren MMK'in aşınma yüzeyi

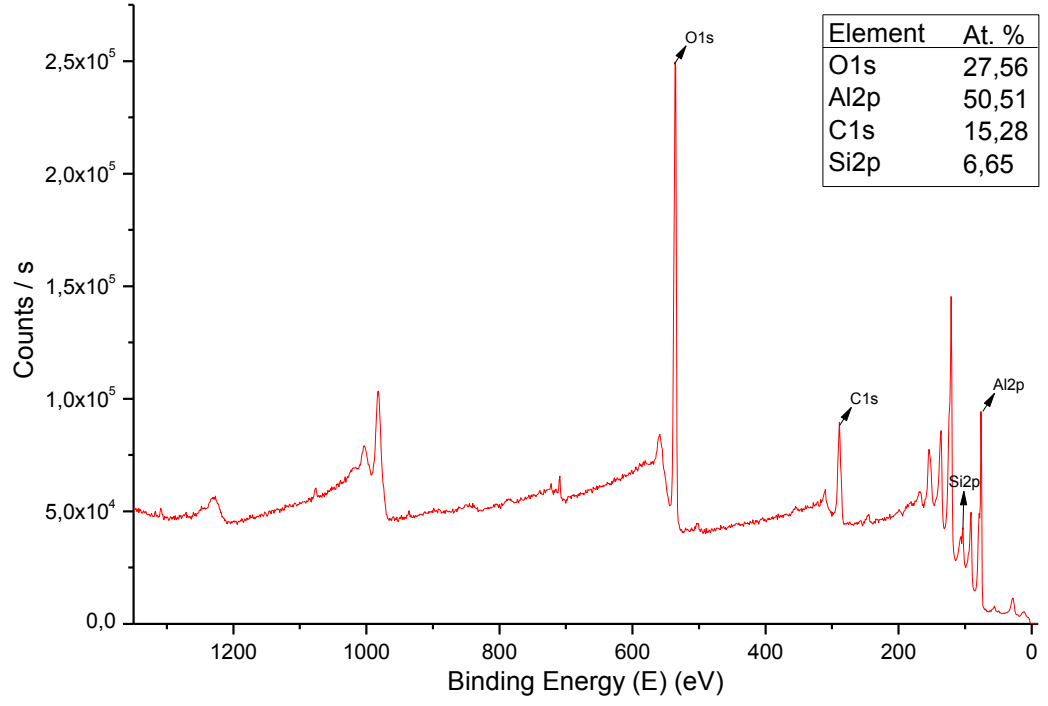


53/53 %18,41 SiC içeren MMK'in aşınma yüzeyi

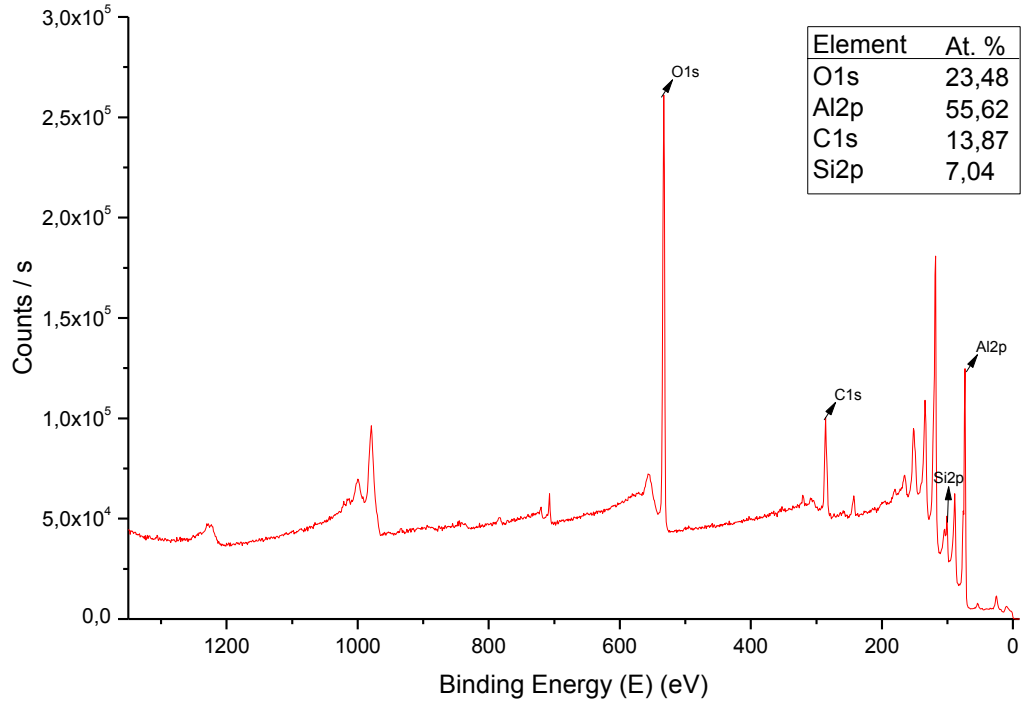


53/53 %10 SiC içeren MMK'in aşınma yüzeyi

Ek-C CIP ile üretilen MMK malzemelerin XPS ve XRD analiz sonuçları.

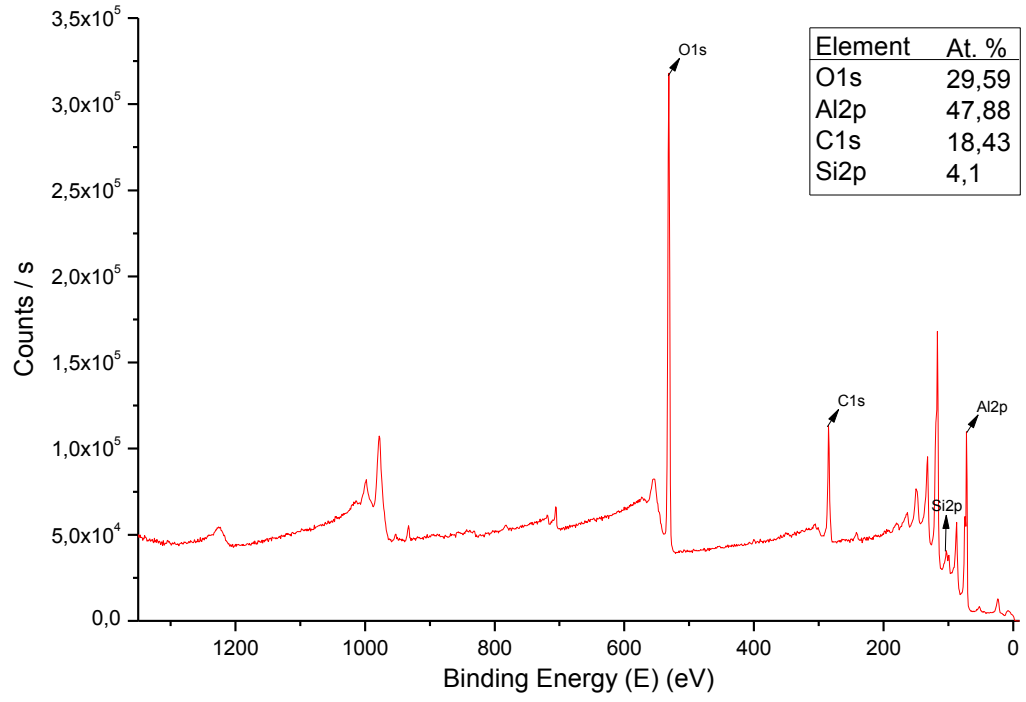


32/32 % 15 XPS grafiği

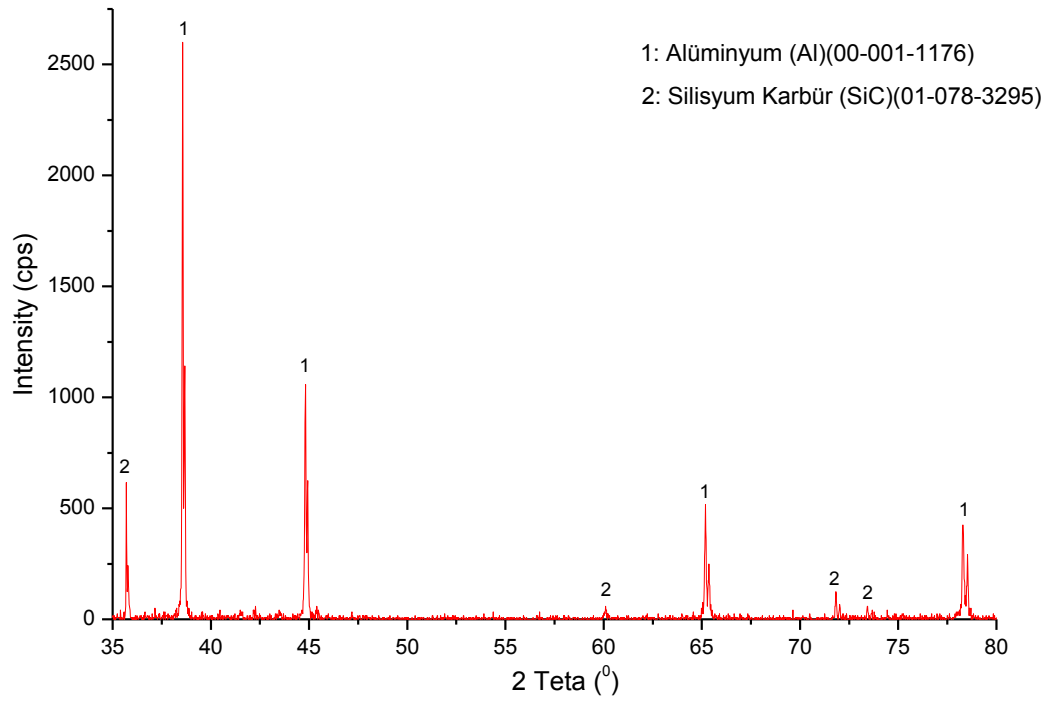


20/53 %10 XPS grafiği

Ek-C (devam)

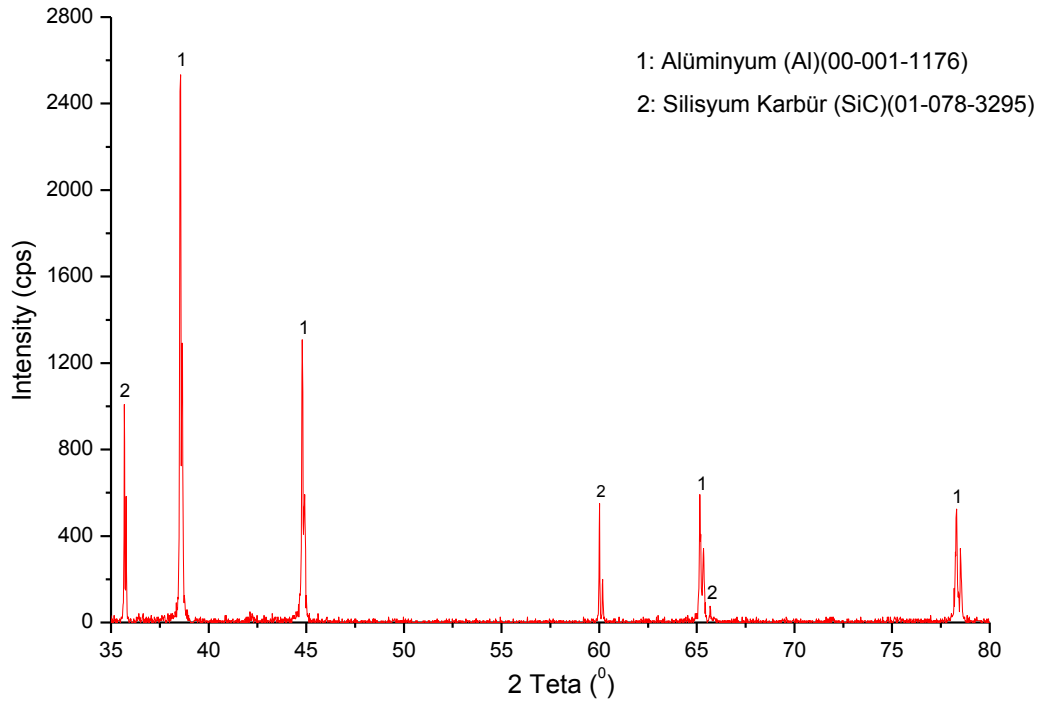


53/90 %10 XPS grafiği

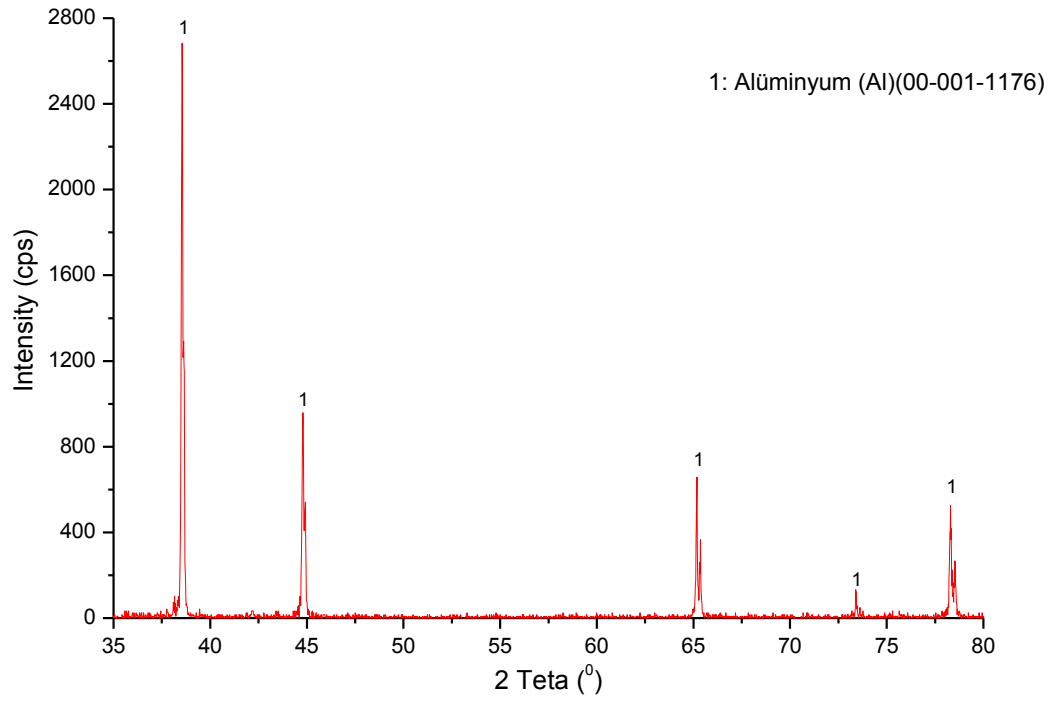


32/32 %15 XRD analizi

Ek-C (devam)



20/53 %10 XRD analizi

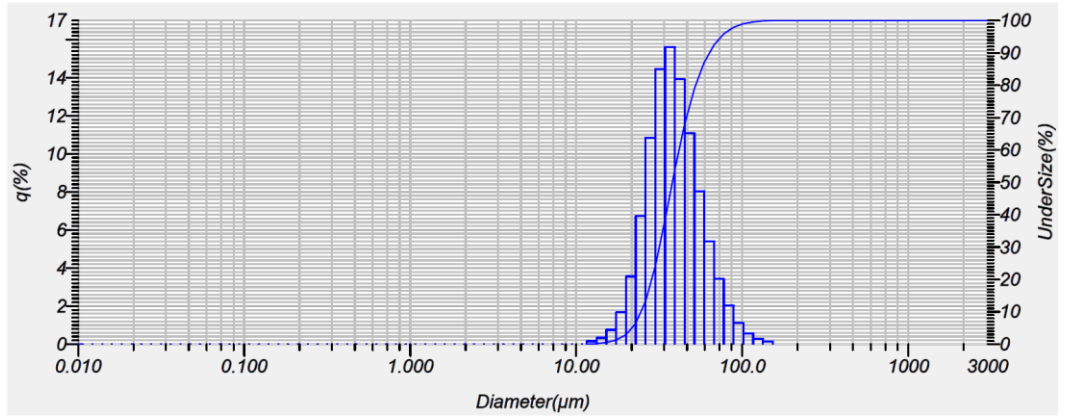


53/90 %10 XRD analizi

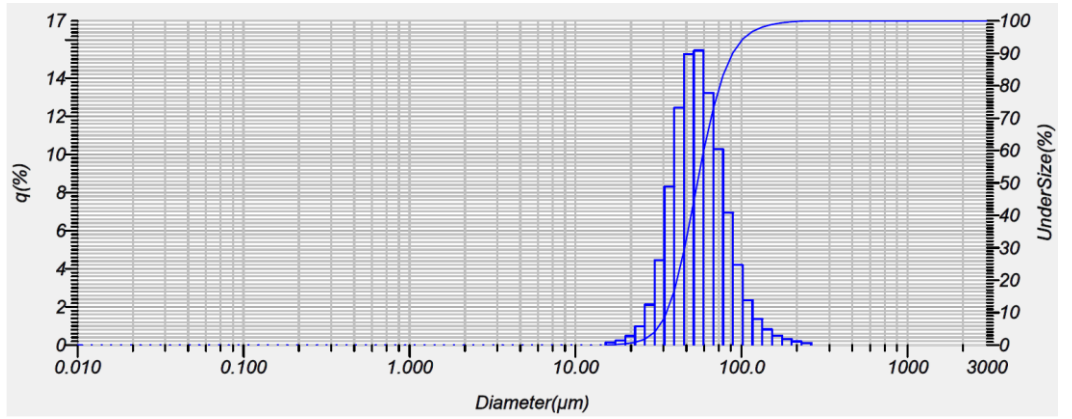
Ek-D 250MPa tek eksen basma ile üretilmiş MMK malzemelerin yoğunluk değerleri.

CCD no	kütlece takviye oranı (%)	tane boyutu (μm)	tane boyutu (μm)	d _{gerçek} (gr/cm ³)	d _{teorik}	%d _{gerçek}
1	5	32	32	2,41	2,73	88,42
2	15	32	32	2,42	2,78	87,26
3	5	75	32	2,48	2,73	91,12
4	15	75	32	2,40	2,78	86,36
5	5	32	75	2,45	2,73	89,92
6	15	32	75	2,46	2,78	88,63
7	5	75	75	2,47	2,73	90,65
8	15	75	75	2,43	2,78	87,73
9	1,59	53	53	2,47	2,71	91,19
10	18,41	53	53	2,41	2,79	86,30
11	10	20	53	2,42	2,75	87,84
12	10	90	53	2,43	2,75	88,53
13	10	53	20	2,41	2,75	87,67
14	10	53	90	2,42	2,75	89,89
15	10	53	53	2,43	2,75	89,62
16	10	53	53	2,41	2,75	89,67
17	10	53	53	2,47	2,75	90,9
18	10	53	53	2,46	2,75	88,69
19	10	53	53	2,46	2,75	88,79
20	10	53	53	2,47	2,75	90,2

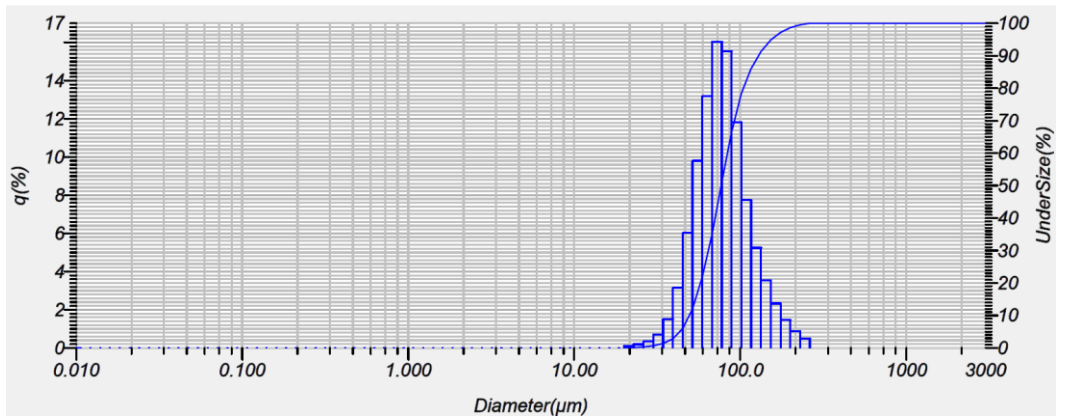
Ek E- Matris ve takviye tozlarının boyut analizi sonuçları



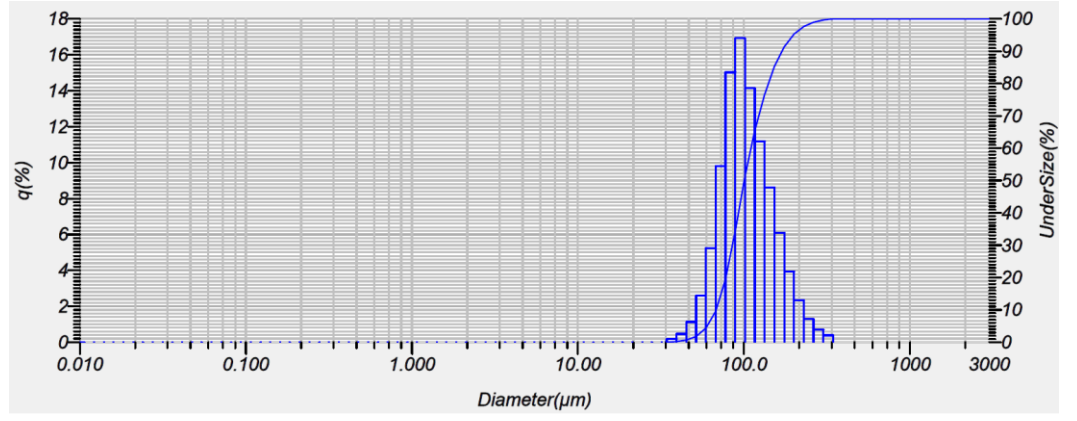
Şekil E.1. Matris faktörü ikinci seviye değeri ortalama partikül boyutu (39µm)



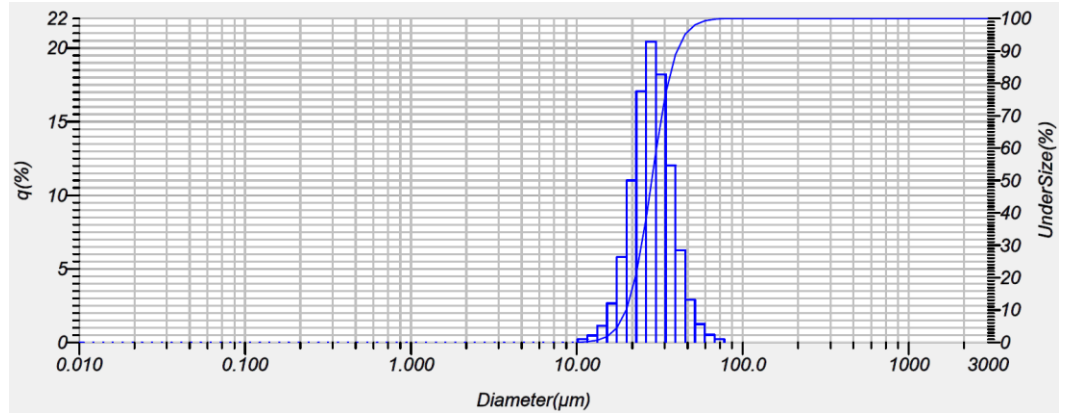
Şekil E.2. Matris faktörü üçüncü seviye değeri ortalama partikül boyutu (59µm)



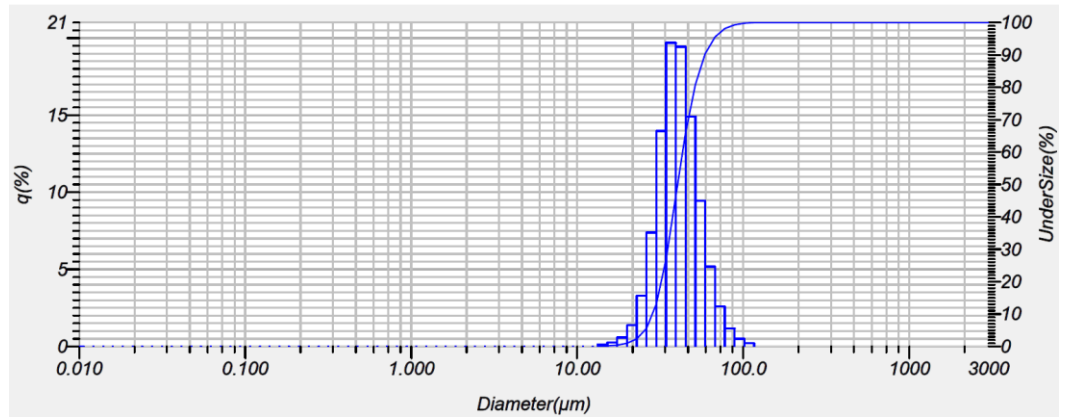
Şekil E.3. Matris faktörü dördüncü seviye değeri ortalama partikül boyutu (84µm)



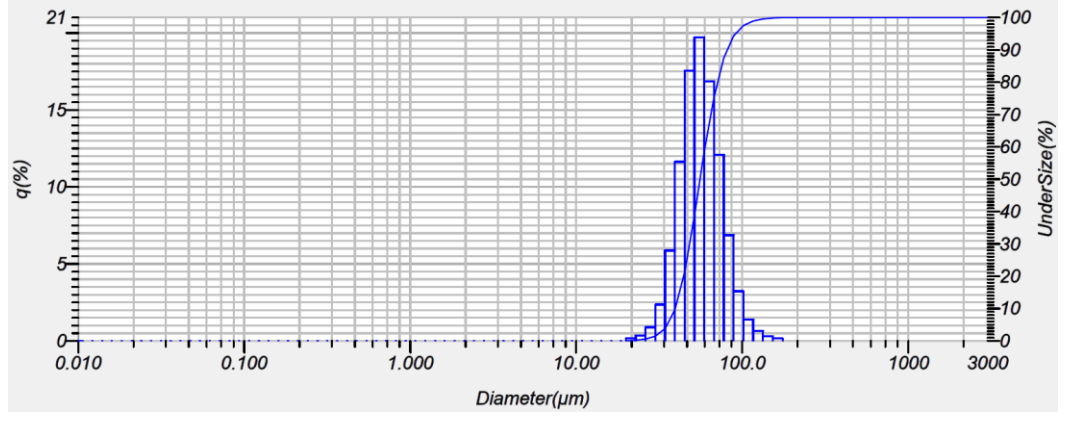
Şekil E.4. Matris faktörü beşinci seviye değeri ortalama partikül boyutu (111μm)



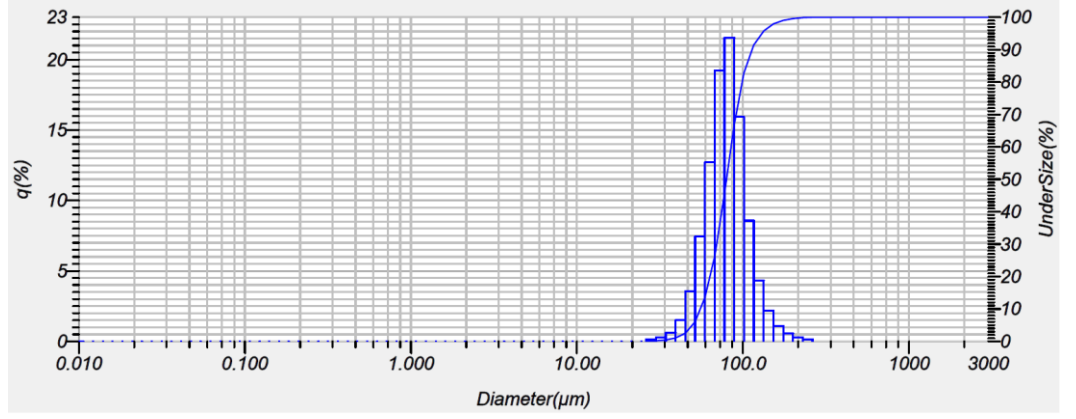
Şekil E.5. Takviye faktörü birinci seviye değeri ortalama partikül boyutu (29μm)



Şekil E.6. Takviye faktörü ikinci seviye değeri ortalama partikül boyutu (42μm)



Şekil E.7. Takviye faktörü üçüncü seviye değeri ortalama partikül boyutu (58μm)



Şekil E.8. Takviye faktörü dördüncü seviye değeri ortalama partikül boyutu (83μm)