

**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TiB₂ ve B₄C TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN TOZ
METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

Okan ŞAHİN

MAYIS 2018

TEZ ONAYI

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalında Okan ŞAHİN tarafından hazırlanan “**TiB₂ ve B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilebilirliğinin İncelenmesi**” adlı Yüksek Lisans Tezinin Ana Bilim Dalı standardlarına uygun olduğunu onaylıyorum.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylıyorum.

Dr. Uğur GÖKMEN

Ortak Danışman

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Üye : Prof. Dr. Recep ÇALIN

Üye : Öğretim Üyesi Dr. Ali Osman ER

Üye : Dr. Uğur GÖKMEN

Üye : Öğretim Üyesi Dr. Hayri YAMAN

14 /05/2018

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylıyorum.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

TiB₂ ve B₄C TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

ŞAHİN, Okan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Recep ÇALIN

Ortak Danışman: Dr. Uğur GÖKMEN

Mayıs 2018, 104 sayfa

Bu çalışmanın amacı, toz metalurjisi (T/M) ve sıcak presleme tekniği ile seramik parçacık takviyeli metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler üretmek ve parçacık türünün etkilerini araştırmaktır. Matris malzemesi olarak ön alaşımlı Al 5154 metal tozları, takviye elemanı olarak TiB₂ ve B₄C parçacıklar kullanılmıştır. Al 5154 matris içerisine ağırlıkça farklı oranlarda (%5, 10 ve 15) TiB₂ ve B₄C parçacıklar ilave edilmiştir. Parçacık takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin üretimde TiB₂ ve B₄C parçacıklar ile Al 5154 tozu üç boyutlu karıştırıcıda 30 dakika karıştırılmıştır. Karışım tozlar 300°C sıcaklıkta ve 200 MPa basınçta preslenmiştir. Elde edilen toz metal blok numuneler 580°C sıcaklıkta 1 saat sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi sonrası numuneler tel erozyon yöntemi ile kesilerek standart boyutlarda çapraz kırılma test numuneleri elde edilmiştir. Yapılan ölçümler sonunda sıcak presleme ve sinterleme işlemleri ile numunelerin yoğunluğunda değişimler olduğu görülmüştür. TiB₂ parçacık miktarı arttıkça yoğunluğun arttığı tespit edilmiştir. Takviye elemanın miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik ve çapraz kırılma dayanım değerlerinde artış tespit edilmiştir.

Bu çalışmada en yüksek çapraz kırılma dayanımı (151 MPa) ve en yüksek sertlik (60.2 HB) değerleri %15 TiB₂ takviyeli numunelerde sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalurjisi, Metal Matrisli Kompozit, Al-5154, TiB₂
Takviyeli, B₄C takviyeli



ABSTRACT

INVESTIGATION of THE PRODUCTIVITY of TiB_2 and B_4C REINFORCED COMPOSITES BY POWDER METALLURGY METHOD

ŞAHİN, Okan

Kırıkkale University

Institute of Natural Science

Department of Defense Technology, Master Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Recep ÇALIN

Co-Supervisor : Instructor Dr. Uğur GÖKMEN

May 2018, 104 pages

Aim of this study is to produce ceramic particle reinforced metal matrix composite (MMC) materials by powder metallurgy (P/M) and hot pressing technique and to investigate the effects of particle type. In the study, pre-alloyed Al 5154 metal powders were used as a matrix material. TiB_2 and B_4C particles were used as reinforcement element (5-10-15% wt.). Matrix powder and reinforcement components were mixed in a three dimensional mixer for 30 minutes. Mixed powders were compacted at 300°C and 200 MPa. These blocks were sintered at 580°C for 1 hours. Then samples were cut with wire erosion method to ensure the appropriate standard dimension for transverse rupture strength (TRS) tests. The changes in the density of the samples were observed with hot pressing and sintering processes. It has been determined that as the amount of TiB_2 and B_4C particles increases, the density increases. Moreover, rising in hardness and transverse rupture strength values were determined depending on the increase in the amount of the reinforcing components.

In the study, maximum transverse rupture strength of 151 MPa and hardness of (60.2 HB) were reached with at %15 TiB₂ reinforced samples.

Keywords : Powder Metallurgy, Metal Matrix Composite, Al 5154 , TiB₂ Reinforced , B₄C Reinforced

ÖNSÖZ

Kompozit malzemeler; istenilen özellikte bir malzeme elde etmek amacıyla en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme bütünüdür. Diğer bir deyişle ileri bilimsel ve teknik yöntemlerle farklı üstünlükteki malzemelerin birleştirilerek daha üstün ve istenilen özelliklerde üretilen mühendislik malzemeleridir.

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi (TM) yöntemi kullanılarak metal matrisli kompozitler üretilmiştir. Al 5154 matrisli seramik takviyeli kompozitlerin toz metalurjisiyle üretimini ve mekanik özellikler üzerinde TiB_2 ve B_4C takviye oranının etkileri araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında Al 5154 matrisli kompozitler, toz metalurjisiyle üretilmesi ve malzemenin takviye oranı değiştirilerek dayanımının artırılması ile istenilen mekanik özelliklere getirilmesi amaçlanmaktadır.

Yüksek lisans çalışmamın her aşamasında her türlü desteğini esirgemeyen ve deneyimleri ile bana yol gösteren değerli hocalarım, başta Kırıkkale Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Sayın Recep ÇALIN olmak üzere Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden Yrd. Doç. Dr. Sayın Hanifi ÇİNİCİ'ye, Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümünden Dr. Sayın Uğur GÖKMEN'e, Gazi Üniversitesi Malzeme Teknoloji Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Sayın Görkem KIRMIZI'ya ve Kırıkkale Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlileri Sayın Arda TANIŞ ile Sayın Onur OKUR hocalarıma teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde varlığımın sebebi olan, her zaman maddi ve manevi olarak destekleyen, anneme ve babama teşekkür ederim.

Okan ŞAHİN

Mayıs 2018

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Bölüm 1	1
1. GİRİŞ	1
Bölüm 2	3
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1 Kompozit Malzemelerin Özellikleri.....	5
2.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları:	6
2.3 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları:	9
2.4 Kompozitlerde Takviye Elemanları ve Özellikleri	10
2.5 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	11
2.5.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK).....	13
2.5.2. Seramik Matrisli Kompozitler.....	15
2.5.3. Polimer Matrisli Kompozitler	18
3. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	19
3.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Teknikleri.....	19
3.1.1. Katı faz üretim yöntemleri	20
3.1.2. Sıvı faz üretim yöntemleri	20
3.1.3. Diğer Yöntemler	20
3.2. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	20
3.2.1. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri.....	21
3.2.2. Katı faz üretim yöntemleri	22
3.3. Alüminyum ve Alaşımları	23
3.2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri:	24
Bölüm 3	29
4. TOZ METALURJİSİ	29
4.1. Giriş	29
4.2. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	29
4.3. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları	30
4.4. TM Yöntemiyle Üretilen Kompozitlerin Askeri Uygulamaları	31
4.5. Geleneksel TM Uygulamaları	31
4.6. Toz Metalurjisi Yönteminin Temel Basamakları	32

4.6.1. Tozların Öğütülmesi ve Karıştırılması (Toz Hazırlama).....	33
4.6.2. Metal Tozlarının Preslenmesi	34
4.6.3. Sinterleme	38
4.7. Toz Üretim Yöntemleri	42
4.7.1. Elektroliz ile toz üretimi (Elektrolitik ayrıştırma yöntemi)	44
4.7.2. Kimyasal Yöntem ile Toz Üretimi.....	45
4.7.3. Atomizasyon yöntemi	46
4.7.4. Mekanik Yöntemler	48
4.8. Alüminyum Tozlar	50
Bölüm 4	52
5. MALZEME VE METOD.....	52
5.1. Malzeme	52
5.2. Deneysel Metod.....	54
5.2.1. Karışım Tozların Hazırlanması.....	55
5.2.2. Kompozit Tozlarının Preslenmesi	57
5.2.3. Numunelerin Sinterlenmesi	59
5.2.4. Metalografik İncelemeler İçin Numunelerin Hazırlanması.....	60
5.2.5. Yoğunluk Ölçümleri	61
5.2.6. Sertlik Ölçümleri.....	63
5.2.7. Çapraz Kırılma Testleri	63
5.2.8. Metalografik İncelemeler.....	64
Bölüm 5	66
6. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA. 66	
6.1. TiB ₂ Takviyeli AA 5154 Matrisli Kompozitlerin Mikroskopik İncelenmesi	66
6.2. B ₄ C Takviyeli Al-5154 Matrisli Kompozitlerin Mikroskopik İncelenmesi...	68
6.3. Yoğunluk Ölçümleri.....	69
6.4. Sertlik Ölçümleri	73
6.5. SEM ve EDS İncelemeleri.....	76
6.5.1. TiB ₂ Takviyeli Al-5154 Matrisli Kompozitlerin SEM ve EDS Analizleri	76
6.5.2. B ₄ C Takviyeli Al-5154 Matrisli Kompozitlerin SEM ve EDS Analizleri	80
6.6. Çapraz Kırılma Dayanımları	83
6.7. Kırık Yüzey İncelemeleri	86

Bölüm 6	92
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	92
KAYNAKLAR.....	94



ŞEKİLLER DİZİNİ

SEKİL

Sayfa

2.1. Matris Malzemeleri	4
2.2. Kompozitlerin yapısal bileşenlerinin şekline göre sınıflandırılması	11
2.3. Kompozitlerin takviye malzemelerine göre sınıflandırılması	12
2.4. Seramik matrisli kompozit fren diski.....	16
2.5. Uzay mekiklerinde kullanılan seramik matrisli kompozit örnekleri	17
2.6. Polimer matrisli kompozitlerin kullanım alanları	18
2.7. Polimer matrisli kompozitlerin kullanım alanları	19
2.8. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri	21
2.9. Sıvı damlacığının bir katıyı ıslatması	22
3.1. Toz metal parça üretim aşamaları	33
3.2. Çeşitli metallerin sıkışma özellikleri	35
3.3. Farklı kalınlıktaki iki kesite sahip parçanın presleme öncesi (a) ve presleme sonrası (b)	37
3.4. İki farklı kesite sahip bir parçada homojen yoğunluk elde için kullanılan iki farklı presleme metodu	37
3.5. Sinterleme sırasında meydana gelen mekanizmaların şematik gösterimi	39
3.6. Sinterleme esnasında gözenek oluşumu ve zamana bağlı olarak gözeneklerin şematik olarak gösterimi	40
3.7. Sinterleme esnasında oluşan gözenek yapısındaki değişim	41
3.8. Son sinterleme devresinde bir gözenegin izole edilmesi ve kapanması	42
3.9. Silindirik değirmende hareketin gösterilmesi	43
3.10. Toz biriktirmek için bir elektroliz hücresi	45
3.11. Kimyasal metodla demir tozu imalatı	46
3.12. Düşey gaz atomizasyon ünitesi	47
3.13. Bilyeli Öğütme.	49
3.14. Mekanik alaşımlama yöntemi	50
4.1. Deneysel çalışmalardaki iş akış şeması.....	55
4.2. Tozların oranlarının belirlenmesinde kullanılan Precisa marka hassas terazi. 56	
4.3. Turbula® Wab Mixer (Tip T2F) tipi karıştırıcı.	56
4.4. Preslenmesinde kullanılan 60X60 çelik sıcak iş takımları.....	57
4.5. Kalıptaki sıkıştırılmasında kullanılan hidrolik pres.	58
4.6. Kalıbın etrafının alümina battaniye ile kapatılması.	58
4.7. Sinterleme işleminin gerçekleştirildiği mufle tipi fırın.....	59
4.8. Numunelerin kesildiği CNC Tel Erezyon Tezgâhı	60
4.9. a) Numunelerin zımparalanması b) Numunelerin parlatılması.....	61
4.10. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan Sartorius marka hassas terazi	62
4.11. Sertlik ölçüm cihazı.....	63
4.12. Instron 3369 model test cihazı	64
4.13. Deneysel çalışmalarda kullanılan optik mikroskop	65
4.14. JOEL marka Taramalı Elektron Mikroskobu.....	65

5.1. TiB ₂ Takviyeli Al-5154 Matrisli Kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri	67
5.2. B ₄ C Takviyeli Al-5154 Matrisli Kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri	69
5.3. TiB ₂ takviyeli kompozit numunelerinin yoğunluk değişimleri.....	70
5.4. B ₄ C takviyeli kompozit numunelerinin yoğunluk değişimleri.....	71
5.5. B ₄ C takviye kompozitlerin gözenek miktarı	72
5.6. TiB ₂ takviye kompozitlerin gözenek miktarı	73
5.7. TiB ₂ takviyeli kompozit numunelerinin sertlik değişimleri.....	74
5.8. B ₄ C takviyeli kompozitlerin sertlik değişimleri.....	75
5.9. %5 TiB ₂ Takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı.....	77
5.10. %10 TiB ₂ takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı	78
5.11. %15 TiB ₂ Takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı.....	79
5.12. % 5 B ₄ C takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı	80
5.13. % 10 B ₄ C takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı	81
5.14. %15 B ₄ C takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı	83
5.15. TiB ₂ takviyeli kompozitlerin çapraz kırılmaz dayanımları.....	84
5.16. B ₄ C takviyeli kompozitlerin çapraz kırılmaz dayanımları	85
5.17. B ₄ C ve TiB ₂ takviyeli kompozitlerin çapraz kırılmaz dayanımlarının karşılaştırılması.....	86
5.18. Çapraz kırılma testi sonrası AA 5154 matrisli numunenin kırık yüzey görüntüleri a) X250 Büyütme b) X500 büyütme.....	87
5.19. Çapraz kırılma testi sonrası % 5 TiB ₂ takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri a) X250 Büyütme b) X500 büyütme.....	88
5.20. Çapraz kırılma testi sonrası % 10 TiB ₂ takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri a) X250 Büyütme b) X500 büyütme.....	89
5.21. Çapraz kırılma testi sonrası % 15 TiB ₂ takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri a) X250 Büyütme b) X500 büyütme.....	89
5.22. Çapraz kırılma testi sonrası % 5 B ₄ C takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri a) X250 Büyütme b) X500 büyütme.....	90
5.23. Çapraz kırılma testi sonrası % 10 B ₄ C takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri a) X250 Büyütme b) X500 büyütme.....	90
5.24. Çapraz kırılma testi sonrası % 15 B ₄ C takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri a) X250 Büyütme b) X500 büyütme.....	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2.1. Bazı metallerin ve polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırması	5
2.2. Alüminyum işlem alaşımlarının simgeleme dizisi	23
2.3. Saf alüminyumun fiziksel özellikleri	28
4.1. Al 5154 tozunun kimyasal kompozisyonu	52
4.2. AA 5154 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri	53
4.3. B ₄ C tozlarının fiziksel özellikleri	53
4.4. TiB ₂ 'nin fiziksel özellikleri	54
4.5. Matris/parçacık karışım oranları	57
5.1. Takviye oranlarına göre sinterlenen numunelerin yoğunluk değişimleri	70
5.2. B ₄ C ve TiB ₂ takviyeli alaşımların sertlik değişimleri	74

SİMGELER DİZİNİ

μm	Mikrometre
B_4C	Bor karbür
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alümina
SiC	Silisyum karbür
TiC	Titanyum karbür
Ti	Titanyum
Mg	Magnezyum
Ni	Nikel
C	Karbon
Pb	Kurşun
Fe	Demir
Sn	Kalay
Ag	Gümüş
Si	Silisyum
Mn	Mangan
Cr	Krom
Zn	Çinko
Cu	Bakır
ρ	Yoğunluk
HCl	Hidroklorik asit
HNO_3	Nitrik asit
Si_3N_4	Silisyumnitrür
ZrO_2	Zirkonya

KISALTMALAR DİZİNİ

AA5154	5154 alüminyum alaşımı
AMK	Alüminyum Matrisli Kompozitler
BSD	Brinell sertlik değeri
HV	Hardness Vickers
HB	Hardness Brinell
MA	Mekanik alaşımlama
TM	Toz metalurjisi
İKK	İşlem kontrol katkısı
PCA	Process control agent
BTO	Bilye toz ağırlık oranı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
EDS	Cihaza bağlı elementel analiz ekipmanı
MMK	Metal matrisli kompozit
XRD	X-ışınları difraktometresi
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
YSZ	Yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya
IAI	Uluslararası Alüminyum Enstitüsü
ASA	Amerikan Standartlar Birliği
CVD	Kimyasal buhar biriktirme
KK	Kontrol kimyasalı
ASTM	Alüminyum Birliği

Bölüm 1

1. GİRİŞ

Küresel rekabet ortamında daha kaliteli ürünlerin, daha düşük maliyetlerle piyasaya arz edilmesi, çok büyük bir zorunluluk haline gelmiştir. Malzeme alanında üstünlüğü ele geçirmek isteyen ülkelerde, doğal veya alaşım maddelerden oluşan daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler üretmek için, bugüne kadar bir çok araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar sayesinde, endüstride istenilen özelliklere sahip çok üstün yeni nesil malzemelerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Endüstrideki birçok mühendislik uygulamalarında daha düşük yoğunluklu (hafif), rijit ve yüksek dayanımlı ve düşük maliyetli malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Birçok farklı metal alaşımının mekanik özellikleri grafit, silikon, karbür ve alümina gibi yüksek dayanımlı seramik fazlarla iyileştirilebilmektedir.

Kompozit malzemeler, istenilen özellikte bir malzeme üretmek amacıyla, en az iki farklı malzemenin iyi özellikleri bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzemelerdir. Diğer bir ifade ile ileri bilimsel ve teknik yöntemlerle, farklı üstünlükteki malzemelerin birleştirilerek, daha üstün ve istenilen özelliklerde üretilebilmektedir.

Kompozit malzemelerin avantajları; yüksek dayanım, yüksek rijitlik, iyi yorulma dayanımı, mükemmel aşınma direnci, iyi korozyon direnci, iyi termal ve elektriksel iletkenlik, düşük yoğunluk, yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastiklik modülü/yoğunluk değerlerine (özellik değerleri) sahip olmasıdır. Dezavantajları ise; üretimlerinin güçlüğü, pahalı olmaları, yüzey kalitesinin düşük olması, geri dönüşümlerinin olmaması ve işleme zorluğudur [1].

Mühendislik uygulamalarında yüksek sıcaklıklara dayanabilen, rijitlik ve hafiflik gibi istenilen özellikleri sağlamak üzere, en az biri metal olan iki veya daha fazla kimyasal bileşimi ve özellikleri farklı malzemenin sistematik olarak bileşimiyle elde edilen ve Metal Matris Kompozitler (MMK) olarak adlandırılan bu yeni nesil malzemeler, klasik alaşımlara iyi bir alternatiftir. Mühendislik malzemesi olarak MMK'lerin hafif olmaları, maliyetlerinin düşük olması, mükemmel mekanik ve termal özelliklerinden

dolayı giderek kullanım alanları yaygınlaşmaktadır. Özellikle, hafif metallerin tercih edildiği havacılık ve denizcilik sanayiinde kullanılan malzemelerin, dayanımlarının iyi, hafif ve korozyona karşı dirençlerinin yüksek olması tercih edildiği için, kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde MMK'ler malzeme üretiminde sıvı yöntemler kullanılarak üretilen parçacık takviyeli MMK'ler oldukça tercih edilmektedir. Genel olarak, üstün döküm kalitesi ve yüksek üretim kapasitesine sahip olması ve son şekle yakın üretim imkânı sağlaması gibi avantajları nedeniyle, sıkıştırma döküm yöntemi kullanılmaktadır [2].

Metal Matrisli Malzemelerin gelişimini ve mühendislik özelliklerini artırmak veya diğer yöntemler ile üretilmesi zor olan malzemelerin üretiminde toz metalurjisi yöntemi, günümüz endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılmakta ve her geçen gün bu alanda gelişmeler sağlanmaktadır.

Toz metalurjisi, geleneksel döküm yöntemlerinde olduğu gibi, istenilen şekilli parça üretimine imkân tanımaktadır. Bu yöntem sadece düşük sıcaklıkta ergiyen metallere uygulanan döküm yöntemlerinden farklı olarak hemen hemen her malzemeye uygulanabilir.

Bu nedenlerle toz metalurjisi yoluyla üretilen malzemelerin birçoğu, örneğin kompozitler, bazı polimerler, yüksek sıcaklık seramikleri, bakırlı çelikler, refrakter metaller ve karışık fazlı bileşimler döküm yoluyla üretilemezler.

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle metal matris olarak Al-5154 seçilmiş ve matrise seramik takviyesi olarak B_4C ve TiB_2 parçacıkları ilave edilerek kompozitlerin üretilebilirlikleri incelenmiştir. Al-5154 alaşımı korozyona karşı direnci yüksek olduğu için, havacılık ve denizcilik sanayiinde tercih edilen malzemedir. Fakat dökülebilirliği zayıftır. Bu yüzden, bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle B_4C ve TiB_2 gibi farklı takviye fazları kullanılarak alüminyum kompozitlerin üretimi yapılarak mekanik özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır.

Bölüm 2

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Fiziksel ve termal özellikleri farklı iki veya daha fazla sayıdaki malzemenin en iyi özelliklerinin bir araya getirilmesi ve yeni özelliklere sahip bir malzeme üretmek amacıyla, bu malzemelerin en iyi özelliklerinin bir araya getirilmesi ile elde edilen makro seviyede yeni malzemelere “Kompozit Malzeme” denir. Başka bir ifadeyle bu malzemeler zayıf yönlerinin farklı malzemelerin düzeltilerek üstün özelliklere sahip yeni bir malzemenin üretilmesidir. Ayrıca kompozit, geniş anlamda, doğal veya sentetik birden fazla bileşenin bir araya getirilmesi ile oluşturulan malzemedir. Bu malzemeler, seramiklerin yüksek mukavemet ve metallerin yüksek tokluk özelliklerini birleştirmelerinden dolayı, matrise göre yüksek mukavemet sergilemekte ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir [3].

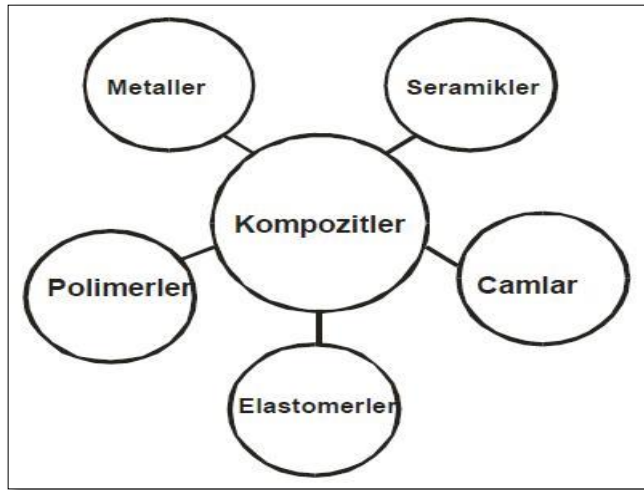
Metal matrisli kompozitler içerisinde en çok araştırma yapılan grubu, seramik parçacık takviyeli kompozitler oluşturulmaktadır. Seramik parçacık takviyeli kompozitlerin kullanım alanlarının artması, üretim kolaylığı ve üretim ekonomisindeki uygunluk açısından tercih edilmektedir. Bununla birlikte, üretim aşamalarında karşılaşılan problemler nedeniyle kompozitin özellikleri ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi çalışmaları halen devam etmektedir. Seramik parçacık takviyeli MMK’lerden iyi sonuçlar elde etmek için, seramik-matris arasındaki ara yüzey bağ mukavemetinin çok güçlü olması gerekir. Ara yüzey bağ mukavemetini, dolayısıyla katı-sıvı ara yüzeyindeki ıslanmayı etkileyen ana faktör parçacık dağılımıdır. Ara yüzeyde bulunan parçacık dağılımlarının homojen olması için, parçacık büyüklüğü, sıvı viskozitesi ve katılma hızının yüksek olması gerekmektedir. Bir de sıvı matris alaşımı ile seramik parçacık arasındaki yoğunluk farkının ve ara yüzeydeki sıcaklık gradyanının da düşük olması gerekmektedir.

Bunların yanında karıştırılması ve katı-sıvı ara yüzeyinin de düz olması gerektiği biliniyor [4]. Kompozitlerin mekanik özelliklerindeki artış, matrise gelen yükleri, mekanik özellikleri daha güçlü olan takviye elemanına iletmesine bağlıdır. Eğer ara yüzeyi zayıfsa, etkili yükler takviye elemanına iletilmeden matris metalde mikro

çatlaklar oluşmakta ve istenilen dayanım elde edilememektedir. Bununla birlikte, optimum mekanik özelliklerin elde edilebilmesi, takviye eleman boyutlarının yarı yarıya düşürülmesiyle mümkündür. Başka bir ifadeyle, ortalama parçacık boyutunun 2-3 μm küçük olması gerekmektedir. Karışım modeliyle bulunan mekanik özellikler, deneylerden elde edilen sonuçlarla mukayese edildiğinde, kılcal kristal (whisker) ve parçacık takviyeli kompozitlerde daha düşüktür. Bunun nedeni, eksenel yüklerin kedi bıyığı veya parçacıklar tarafından, taşınamamasından kaynaklanmaktadır. Bir diğer neden ise kompozit içerisinde bulunan daha büyük boyutlu takviyelerin, gerek üretim sırasında gerek ise çalışma esnasında gerilim konsantrasyonlarına neden olarak kırılmasıdır. Bu bölgelerin potansiyel çatlak oluşma ve büyüme alanları olduğu görülmektedir. Ancak, kaliteli üretimi gerçekleştirmiş sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler, model deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara çok yakın değerleri verebilmektedir [5].

Günümüzde, istenilen özelliklere sahip ileri teknoloji mühendislik malzemeleri ihtiyacı gittikçe artmaktadır. Tek bileşene sahip olan malzemeler, yeni teknolojinin ihtiyaç duyduğu malzeme özelliklerini karşılayamamaktadır. Bu nedenle, üstün özelliklere sahip ileri kompozit malzeme ihtiyacı her geçen gün artmaktadır.

Şekil 2.1.'de farklı kompozit malzemeler gösterilmektedir [6].



Şekil 2.1. Matris Malzemeleri

2.1 Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemeler, metallerden çok farklı ve üstün özelliklere sahip olmaları nedeniyle, ileri mühendislik malzemesi olarak tercih edilmektedir Kompozitler çok düşük yoğunluk, yüksek korozyon dayanımı, ses, ısı ve elektrik yalıtımı üstünlükleri, yüksek mekanik özellikler, rijitlik, gibi özelliklere sahiptirler. **Çizelge 2.1.**'de bazı metallerin ve polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 2.1. Bazı metallerin ve polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırması [7].

Malzeme Cinsi	Özgül Ağırlığı (ρ , gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (σ ,MPa)	Elastik Modül (E, GPa)	Özgül Çekme Dayanımı (σ/ρ)	Özgül Modül (E/ ρ)	Uzama (%)
Alüminyum	2.8	84	71	30	25	---
Al-2024	2.8	247	89	98	25	20
Al alaşımı	2.8	600	71	210	25	---
Titanyum	4.51	700	117	192	25.1	20
Ni Alaşımı	8.18	450-1200	204	147	24.90	26-45
Alaşımsız Çelik	7.86	460	210	60	27	20
Düşük Alaşımlı Çelik	7.8	600	207	80-250	26.5	20
Pirinç %30Zn	8.5	550	100	60	12	---
Karbon/epoxy %60	1.62	1400	220	865	135	0.8
Kevlar/epoxy	1.38	1310	83	950	60	---
Cam/epoxy %60	1.66	1510	165	910	99	---
Cam/polyester %50	1.9	750	38	390	19.8	1.8

2.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları:

2.2.1. Hafiflik

Kompozit malzemeler hem metal malzemelere, hem de polimerlere göre daha yüksek bir mukavemete sahiptir. Elde edilen son ürüne sağladığı yüksek mukavemet ve hafiflikten dolayı, bu malzemeler çok fazla tercih edilmektedir [8, 9].

Polimerlerden kompozit malzemeler genel olarak $1,5-2 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğunda bulunmaktadır. Metal kompozit malzemelerin yoğunluğu ise yaklaşık, $2,5-4,5 \text{ gr/cm}^3$ dür. Bununla birlikte özel amaç için üretilen kompozit malzemelerde yoğunluk, daha yüksek olabilmektedir. Seramik esaslı kompozit malzemelerde ise hem polimer hem de metal kompozitlerin arasında yoğunluğa sahiptir [10].

2.2.2. Rijitlik ve Boyutsal Kararlılık

Kompozitlerin ısı genleşme katsayıları düşük, rijit ve çok sağlam bir yapı ile boyutsal kararlılık özelliği bulunmaktadır [10].

Boyutsal kararlılık; çok farklı mekanik ve çevresel faktörlere bağlı olarak, polimer kompozit malzemelerin işlevsellik özelliklerini korumaktadır. Kompozitler malzemeler, polimerlerin sağladıkları viskoelastik ve büzülme özelliğini göstermezler. Genleşme katsayısı ise daha düşüktür [11].

2.2.3. Yüksek Mekanik Özellikler

Yorulma, basma, darbe ve çekme dayanımı özellikleri çok yüksektir [10].

Yüksek mukavemet; kompozitler, yüksek mukavemetli malzemeler arasındadır. Kompozit malzemelerin eğilme, darbe, basınç ve çekme dayanımları, birçok metal malzemeye nazaran daha yüksektir. Farklı tasarımlarda yüksek mukavemet özellikleri

sağlanabildiği gibi, daha az malzeme kullanımı ile daha hafif ve çok daha az maliyete ürün üretilmektedir [12].

2.2.4. Tasarım Esnekliği

Kompozit malzemeler, tasarımcıların aklına gelebilecek her türlü karmaşık, geniş, dekoratif, estetik, basit, yapısal veya fonksiyonel özelliklerde üretilmektedir. Tasarımlarda maliyetin azalması için yapılan çalışmalarla birlikte, prototip tasarım ürünlerden seri üretime geçilmesi aşamalarında yeni açılımlar geliştirilmektedir [11].

2.2.5 Kolay Şekillendirebilme

Üretilmesi zor, karmaşık ve büyük parçaların tek seferde üretilmesi mümkündür. Böylece işçilik ve malzemedan tasarruf sağlanmaktadır [11].

2.2.6. Yüksek Kimyasal Direnç

Kompozit malzemeler birçok asitler, alkaliler, çözücüler gibi bir çok kimyasal maddeye ve atmosfer şartlarına karşı son derece dirençlidir. Kimyasal tesislerde, çok fazla tercih edilen malzeme türüdür [10]. Kimyasal ve korozyon etkilere karşı mukavemet; özellikle termoset polimerlerden üretilmiş kompozitler (atmosfer şartlarından), korozyon ve kimyasal tepkimelere karşı dirençlidir. Bu kompozitler, kimyasal madde tankları, aspiratör ve borular, tekneler ve benzeri deniz araçları yapımında tercih edilmektedir. Özellikle korozyon direnci nedeniyle, endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır [11].

2.2.7. Yüksek Isıl Dayanım

Polimer kompozitlerin ısı dayanımı, geleneksel polimerlere nazaran daha yüksektir [10].

Isıya ve ateşe dayanımı; Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden üretilmiş kompozit malzemelerin ısı dayanımı, çok yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme imkânını sağlamaktadır. Bu sebeple, bazı özel katkılarla kompozit malzemelerin ısı dayanımı artırılabilir [11].

2.2.8. Elektriksel Özellikler

Kompozit malzemelerin elektriksel özellikleri, isteğe göre ayarlanabilmektedir. MMK'ler iletken malzemelerdir [10].

Elektriksel özellikler; uygun malzeme seçilerek çok üstün elektriksel özellikte kompozit malzeme üretmek mümkündür. Günümüzde büyük enerji nakil hatlarında hem iletken, hem de yalıtkan özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler tercih edilmektedirler.

Yüksek dielektrik dayanımı; Kompozit malzemelerin yalıtkan özellikleri, bu malzemelerin birçok parça üretiminde tercih edilmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte, bir çok uygulamada, uygun modifiyelerin ve katkıların kullanımıyla kompozit malzemelerin elektriksel iletkenliği de artırılabilir [11].

2.2.9. Kalıcı renklendirme

Kompozitlerin üretim uygulamalarında genellikle renk, üretim esnasında kazandırılmakta ve çok uzun sürelerde bakıma ihtiyaç olmadan mevcut halini korumaktadır. Üretim esnasında kompozit malzemeye ilave edilen renk pigmentleri sayesinde, istenilen renkler elde edilebilmektedir. Bu şekildeki işlemler, ek bir işçilik

ve maliyet gerektirmez. A sınıfı düzgün yüzey ve düşük çekme özellikleri sağlayan reçineler, metalik boyama uygulaması için uygun olmaktadır [11].

2.2.10. Titreşim sönümlendirme

Kompozitler sünekliklerinden dolayı doğal bir titreşim sönümleme özelliğine sahiptirler. Bu özellik sayesinde çatlak ilerlemesi de minimize edilmektedir [11].

2.2.11. Düşük Maliyet

Polimer kompozit malzemelerin üretiminde seçilmiş olan yöntemler ne olursa olsun, kullanılan araç ve gereç maliyeti, metal alaşımlı malzemelere göre çok daha uygundur. Bu nedenle kompozitlerin üretiminde birbirinden çok farklı yöntemler kullanılmaktadır.

Tercih edilen tüm üretim yöntemlerinde ise değişmeyen temel kural, bileşenlerdeki zayıflıkların istenilen amaç doğrultusunda iyileştirilip, çok daha nitelikli bir yapı elde edilmesidir [12].

2.3 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları:

1. Polimer esaslı kompozitlerin üretimleri esnasında yapısında oluşan hava kabarcıkları, kompozit malzemenin yorulma özelliğini olumsuz yönde etkilemektedir.
2. Parçacık takviyeli kompozitler hariç, kompozit malzemeler anizotropiktir.
3. Aynı kompozitler için kesme, basma, eğilme ve çekme mukavemet değerleri farklılık gösterebilmektedir.
4. Tam olarak mekanik özelliklerin öngörülmesinde güçlükler yaşanmaktadır.
5. Talaşlı imalat aşamasında kesme ve delme vb. işlemler esnasında liflerde açılmaların meydana gelebilmesinden dolayı, kompozitlerde hassas ikincil imalat yöntemleri uygulanamamaktadır.

6. Polimer kompozitler haricinde, kompozit malzemelerin üretim maliyetleri yüksektir [13].

2.4 Kompozitlerde Takviye Elemanları ve Özellikleri

Kompozit malzemelerde takviye elemanının ana görevi, yükü taşıyıp matrisin rijitlikle dayanım özelliğini arttırmaktır. Teoride takviye elemanlarının yüksek dayanım, düşük yoğunluk, kovalent veya kovalent - iyonik bağlarının karışımına sahip bir yapıda olması istenmektedir [14].

Mühendislik alanında kullanılan takviye elemanları çoğunlukla elyaf olarak imal edildiklerinden dolayı, rijitlik ve dayanımlar katı haldeki konumlarından yaklaşık 30-50 kat fazla dayanıklı, 3 kat fazla rijit oldukları için, kütle halinde gösterdikleri özelliklerinden daha üstün performans sergilemektedirler. Çapları ise genellikle 5-20 µm arasında olmaktadır. Bununla birlikte elyafların boyu, şekli ve yönlendirilmeleri, matrisin mekanik özellikleriyle yeterli elyaf/matris ara yüzey bağına sahip olmalarını gerektirmektedir.

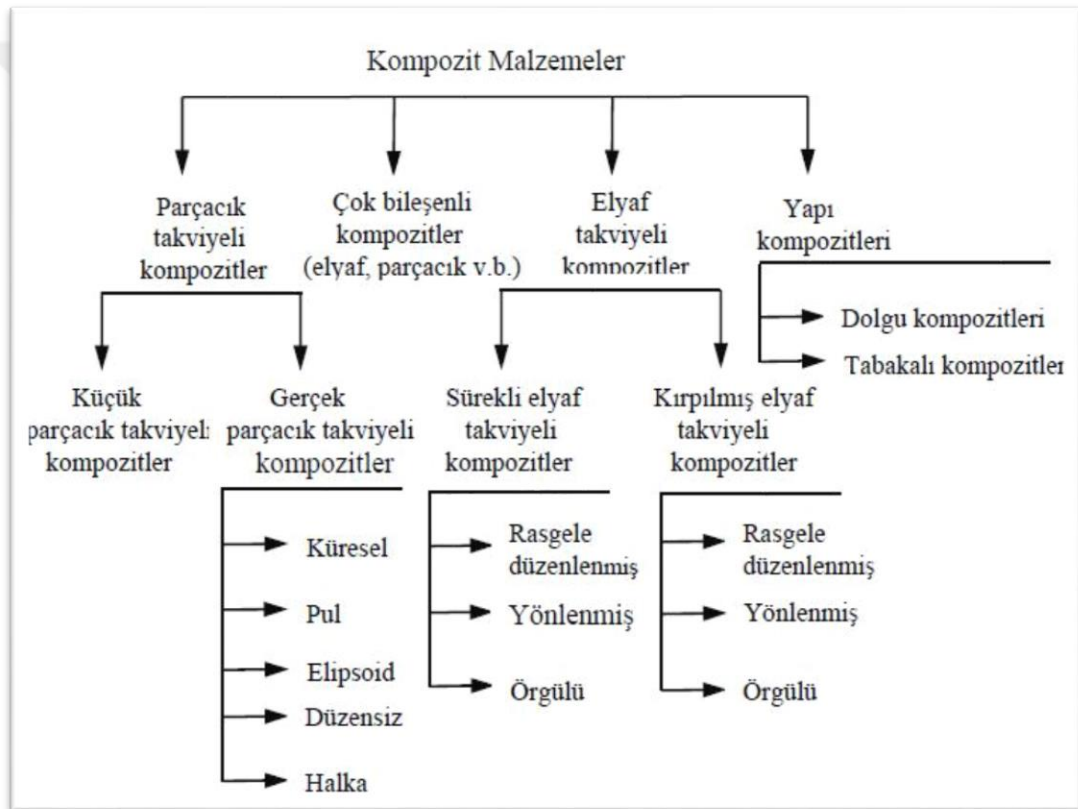
Kompozit üretiminde, takviye eleman seçiminde, üretim yöntemi, üretim sırasında matrisin elyafı ıslatması elyafın matrisçe yönlendirilmeleri ve elyaf içeriği, kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyen faktörlerdir. Bu sebeple, takviye elemanın tercihi ve özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

Elyaf takviye elemanlarında; yüksek dayanım, yüksek elastiklik modülü, imalat kolaylığı, düşük yoğunluk, kimyasal uyumluluk ve ısı direnç gibi temel özellikler bulunmaktadır. Bunlarla birlikte, metal ve seramik matrisli kompozit malzemelerde, elyafın yüksek sıcaklıkta dayanımının korunması, takviye elemanlarının kimyasal morfolojisi, mikro yapısıyla fiziksel özelliği ile birlikte maliyet vb. diğer önemli faktörlere de dikkat edilmesi gereklidir. Son dönemlerde takviye elemanı olarak tercih edilen seramiklerden en önemlileri; cam, karbon, bor, alümina, silisyum karbür ve metalik camlardır [15].

2.5 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler farklı kriterlere göre sınıflandırılabilir. Bunlar yapay veya doğal olup olmadığına göre doğal kompozitler (kas, kemik, ağaç, deri vb.) veya yapay kompozitlerdir. (cam, karbon-karbon, kevlar-epoksi, elyaf takviyeli v.b.).

Kompozitlerin, yapısal bileşenlerinin şekline göre sınıflandırılması **Şekil 2.2.**' de verilmektedir [16].

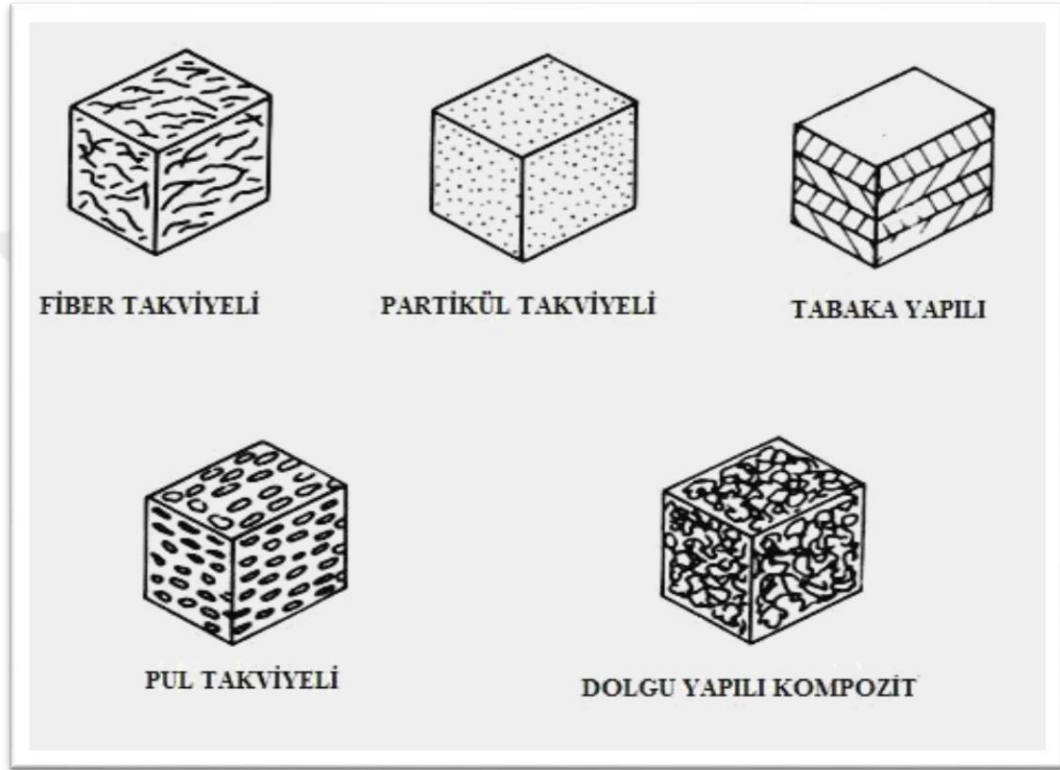


Şekil 2.2. Kompozitlerin yapısal bileşenlerinin şekline göre sınıflandırılması [17].

Kompozitlerde sınıflandırma genellikle kullanılan matris malzemesi veya takviye elemanlarının şekli ve cinsine göre yapılmaktadır.

Kompozitler matris malzemesine göre polimerler, metal ve seramik matrisli kompozit malzemeler olarak sınıflandırılmaktadır. Bununla birlikte, uygulamalarda en fazla kullanılan sınıflandırma, kompozite dayanım kazandıran takviye malzemelerine göre yapılmaktadır.

Kompozitlerin takviye malzemesine göre sınıflandırması, **Şekil 2.3.**'de verilmiştir.



Şekil 2.3. Kompozitlerin takviye malzemelerine göre sınıflandırılması [17].

Matris malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması ise;

- ✓ Metal matrisli kompozit malzemeler,
- ✓ Seramik matrisli kompozit malzemeler,
- ✓ Polimer matrisli kompozit malzemeler olarak yapılmaktadır.

2.5.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitler, matrisi (ana yapısı) metalden oluşan, takviye elemanı olarak seramiklerin veya refrakterlerin kullanıldığı malzemelerdir. Metal matrisli kompozit malzemeler, metal ve takviye elemanlarındaki üstün özelliklerin birleşmesi ile, yüksek elastiklik modülü, yüksek dayanım ve yoğunluk, yüksek mukavemet gibi üstün özelliklere sahiptir. MMK' lerde matris malzemesi olarak, daha çok düşük yoğunluğa sahip metal ve metal alaşımları tercih edilmektedir. Alüminyum alaşımları korozyona karşı dirençli olması, yoğunluğunun düşük olması ve birçok takviye fazını ıslatabildiğinden üretiminde, MMK üretiminde en fazla tercih edilen alaşım grubudur. Alüminyum alaşımlarının yanı sıra Ti, Mg, Cu gibi diğer metal ve metal alaşımları da matris malzemesi olarak kullanılmaktadır [18].

Takviye elemanı olarak sürekli fiberler, süreksiz (kısa) fiberler, parçacıklar MMK'lerde kullanılmaktadır. Genellikle kompozitler takviye elemanı türüne göre adlandırılırlar. Örnek olarak sürekli fiberlerle güçlendirilmişse, sürekli fiber takviyeli metal matrisli kompozitler, kısa fiberlerle güçlendirilmişse, kısa fiber takviyeli metal matrisli kompozitler verilebilir [19,20].

2.5.1.1. MMK'lerin Kullanım Alanları

Spor Malzemeleri:

Tenis raketi	B/Al, Gr/Al, SiC/Al
Kayak sopası	B/Al, Gr/Al, SiC/Al
Kayak	B/Al, Gr/Al, SiC/Al
Olta	B/Al, Gr/Al, SiC/Al
Golf sopası	B/Al, Gr/Al, SiC/Al
Bisiklet çerçevesi	B/Al, Gr/Al, SiC/Al

Tekstil Sanayi:

Tekstil Makinası Mekikleri	B/Al, Gr/Al, SiC/Al
----------------------------	---------------------

Diğer:

Yataklar	Gr/Pb	
Kimyasal ekipmanlar	Al ₂ O ₃ /Pb	
Aşındırıcı takımları	B/ Al ₂ O ₃ /, SiC/ Al ₂ O ₃	[21].

2.5.1.2. Matris Malzemeleri

Metal matrisli kompozitler, genel olarak iki yapısal bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi genellikle bir metal alaşımı olan metal matris, ikincisi ise genellikle bir metaller arası bileşik olan oksit, karbür veya nitrür olan takviye malzemesidir. Kompozit malzemelerin üretilmesi aşamasında matris ve takviye malzemesi birlikte hazırlanmaktadır. Bir kompozit malzeme üretiminde ilk olarak metal matris ve takviye malzeme belirlenmelidir. Her durumda matris bir metalden oluşmaktadır. Genel olarak matris, bir metal veya metal alaşımıdır [22].

Belirli bir uygulama alanında matris seçimi yüksek sıcaklık, yoğunluk, süneklik ve çekme dayanımı özelliği gibi faktörlerin yanında, üretim metodu ile bunların arasındaki uyuma da bağlıdır. Genellikle Al, Ti, Mg, Pb, Ni, Fe, Sn, Zn, Si ve Ag matris malzemesi olarak kullanılmaktadır [23]. En sık kullanılanlar ise Al, Mg, Ti ve alaşımları gibi metalik malzemelerdir [24]. Alüminyum dünyada en yaygın olarak bulunan elementlerden birisidir ve yer kabuğunun % 8'ini oluşturmaktadır. Alüminyumun keşfedilmesi ve üretim teknolojisinin geliştirilmesi, diğer pek çok metallerden yeni olmasına rağmen, diğer tüm demir dışı metallerden daha fazladır. [25]. Uluslararası Alüminyum Enstitüsü (IAI), 2010 yılında tüm dünyada toplam 24.290.000 ton alüminyum üretildiğini belirtmektedir [26].

Alüminyum matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan seramikler, sünek matrisin dayanımını ve sertliğini artırmaktadır. Örnek olarak, 6061 alüminyum alaşımına % 20 SiC parçacık takviyesi yapıldığında % 50 oranında dayanımı, % 40 oranında ise sertliği artırılabilir. Bununla birlikte, elektrik iletkenliği, sürtünme dayanımı ve ısı gibi özellikleri de iyileştirmektedir [27].

İleri mühendislik malzemesi olarak MMK'ler, yüksek çekme-basma ve kayma mukavemetine, yüksek elastiklik modülü ve servis sıcaklığına sahiptir. Bunun yanında seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastiklik modülünü, metallerin ise süneklik ve tokluk özellikleri nedeniyle kompozitler önemli mekanik özelliklere sahip olmaktadır.

Metal matrisli kompozitler bu üstünlüklerinin yanısıra tekrar üretilebilir mikroyapısı, mekanik özellikleri ve düşük yoğunluk değerlerinden dolayı daha da önem kazanmıştır.

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan takviye elemanları temel olarak;

- * Sürekli fiberler,
- * Süreksiz fiberler,
- * Viskerler,
- * Teller,
- * Parçacıklar olarak gruplandırılmaktadır.

Takviye elemanları genellikle oksit, nitrür ve karbürlerdir. Takviye elemanı olarak kullanılan seramikler, düşük yoğunluğa, yüksek elastiklik modülü ve erime sıcaklığına, düşük ısı genleşme katsayısına sahiptir. MMK'lerin en önemli ve üstün özelliklerinden birisi de matris alaşımlarına nazaran daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesidir. Takviye elemanları matris alaşımının yüksek sıcaklık mukavemetini arttırmaktadır. MMK'lerin bir başka avantajı ise matris alaşımına nazaran kullanılan seramik takviyelerinin düşük yoğunlukları nedeniyle kompozit malzemenin de yoğunluğunu azaltmasıdır [28].

2.5.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Metal ve ametal elementlerin birleşiminden oluşan inorganik malzemeler, seramikler olarak adlandırılmaktadır. Düşük yoğunluklu olmaları, 2000°C üzerindeki yüksek sıcaklıklarda çalışabilmeleri, elastik modülünün yüksekliği gibi nedenlerden dolayı, matris malzemesi olarak tercih edilmektedirler. Ancak, gevrek yapısı olan seramikler

darbelere karşı oldukça dayanıksızdırlar. Seramikler, gevrek olmaları dışında değişken özellikte olması, mekanik ve termal şok ile gerilme dayanımının düşüklüğü gibi dezavantajlara sahiptir. Seramik yapıdaki muhtemel çatlaklar, çizikler, içerisindeki muhtemel mikro çatlaklarla hava kabarcığı bile ciddi problemlere neden olabilmektedir. Bu nedenle, son yirmi içerisindeki seramik matrisli kompozitler alanında yapılan en büyük çalışmalar, dayanımı yüksek seramik kompozitlerin üretimlerine yoğunlaşmaktadırlar. Seramiklerin takviye malzemeleri ile güçlendirilmeleri nedeniyle kullanım sahaları, gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Seramik matrisli kompozitler malzemelerde takviye malzemesi, sürekli ve süreksiz olarak ikiye ayrılır. Sürekli fiberle takviye edilen seramiklerin tokluklarının daha yüksek olması nedeniyle, daha çok tercih edilirler [29].

En çok kullanılan seramik matrisli kompozitleri şu şekilde gruplandırılabilir:

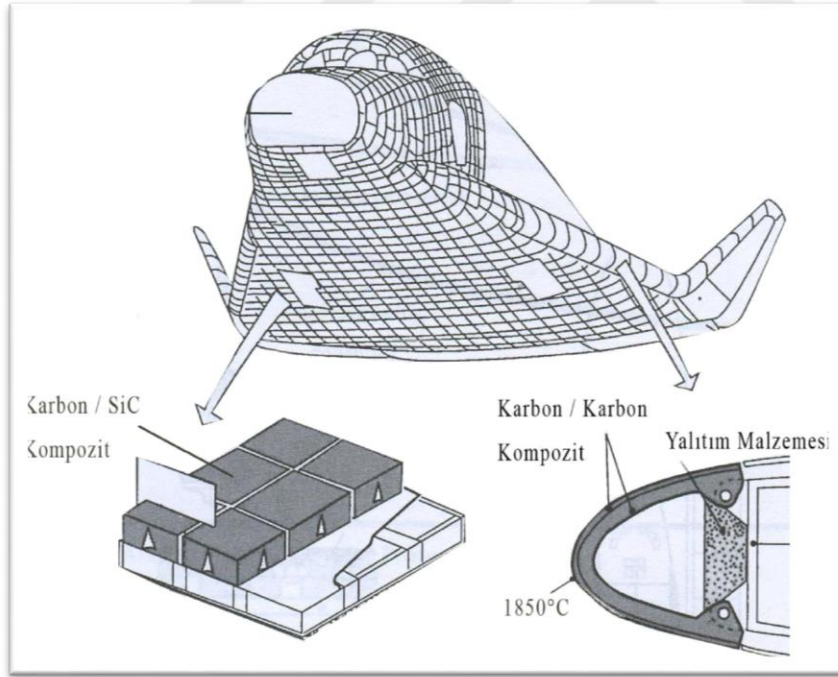
- Karbürler (Silisyum karbür (SiC))
- Nitrürler (Silisyum nitrür (Si_3N_4))
- Oksitler (Alümina mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$))
- Cam seramikler (Lityum alüminasilikat)

Seramik matrisli kompozitlerin kullanım alanlarından bir örnek **Şekil 2.4.**' de verilmiştir.



Şekil 2.4. Seramik matrisli kompozit fren diski.

Seramik matrisli kompozitler arasında karbon matrislileri ayrıca incelemekte fayda bulunmaktadır. Kompozitlerde karbon genel olarak yine karbonla takviye edilerek karbon/karbon kompozit yapı oluşturulmaktadır. Karbon/karbon kompozitler, 2200°C üzerindeki sıcaklıklarda dayanımları, bu sıcaklıklarda kazandıkları ilave dayanımdan dolayı, diğer seramik matrisli kompozitler arasında öne çıkmaktadır. Bunların dışında karbon/karbon kompozitler yüksek yorulma dayanımı ve boyutsal kararlılığa da sahiptir. Yüksek sıcaklık dayanımları ve düşük özgül ağırlıkları nedeniyle özellikle roket motorları ve uzay mekiklerinde kullanılmaktadır (**Şekil 2.5.**). Ayrıca karbonun kimyasal ve biyolojik yönden inert olması ve insan bedeninde steril kalabilmesinden dolayı, bir çok tıbbi ürünün yapımında kullanılmaktadır. Günümüzde bir çok tıbbi implantı korozyona ve kimyasallara olan dayanımları, paslanmaz çelik gibi alaşımlardan çok daha iyi olduğundan dolayı tercih edilebilmektedir. Fakat karbon/karbon kompozitlerde, malzeme ve imalat maliyetlerin çok yüksektir [30, 14].



Şekil 2.5. Uzay mekiklerinde kullanılan seramik matrisli kompozit örnekleri [31].

2.5.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, yoğunluğunun düşük olması, kolaylıkla üretilebilir olması, ekonomik olması, mekanik özellikleriyle yalıtkan özelliğinin iyi olmasından dolayı, endüstriyel amaçlarla kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin sıcaklık dayanımları, daha çok matris malzemesi tarafından belirlenmektedir. Polimer matrisli kompozitlerin ısı dayanımlarının düşüklüğü ise dezavantajdır.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde yayma yöntemi, soğuk presleme, basma ve transfer kalıplama, torba kalıp, helisel sarma ve profil çekme yöntemleri kullanılmaktadır [32].

2.5.3.1. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Kullanım alanları

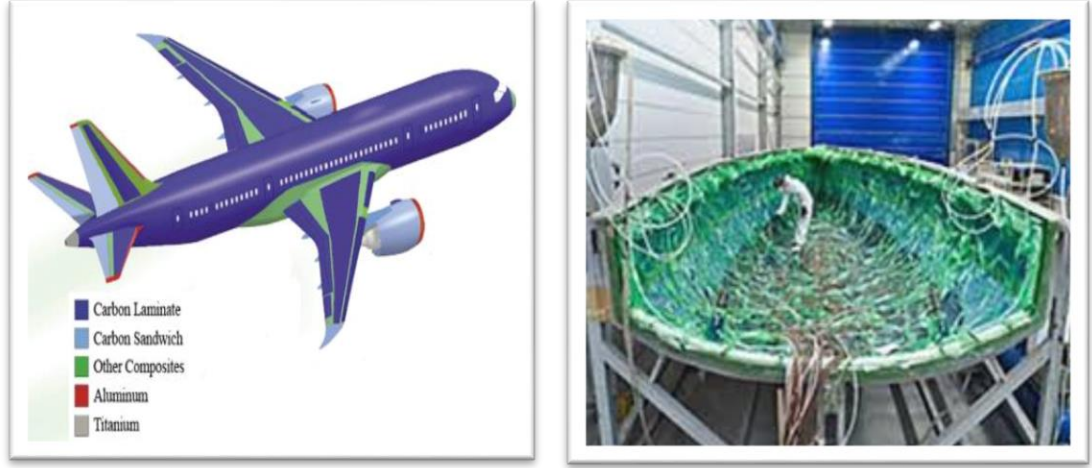
Polimer matrisli kompozitlerin kullandığı sektörler aşağıda belirtilmiştir.

* Otomotiv Sektörü * Havacılık Sektörü * Denizcilik Sektörü * Diğer

Şekil 2.6. ve 2.7.'de Polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanım alanlarından örnekleri görmekteyiz.



Şekil 2.6. Polimer matrisli kompozitlerin kullanım alanları [33].



Şekil 2.7. Polimer matrisli kompozitlerin kullanım alanları [33].

3. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Teknikleri

MMK malzemelerin ticari olarak üretimini azaltan etkenlerin fazla olması nedeniyle, önemli mekanik özellikleri kaybetmeden ekonomiklik kazandırılması amacıyla çok değişik imalat yöntemleri geliştirilmekte ve MMK'lerin imalat maliyetlerini en aza düşürmenin yolları araştırılmaktadır. Bunun için yapılan çalışmalarda öncelikli olarak hedefi, matris içine yapılan takviyelerin homojen olarak dağılımının sağlanmasıdır [34,35].

Çok farklı matris ve takviye malzemelerinin kullanılması MMK malzemelerin üretiminde farklı tekniklerin geliştirilmesine yol açmıştır. Üretim sırasında matrislerin sıvı, katı veya buhar fazında bulunmasına göre MMK'lerin üretim yöntemleri şu şekilde sınıflandırılabilir [36].

3.1.1. Katı faz üretim yöntemleri

- Difüzyon ile bağlama
- Toz metalurjisi (TM)
- Haddeleme

3.1.2. Sıvı faz üretim yöntemleri

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

3.1.3. Diğer Yöntemler

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

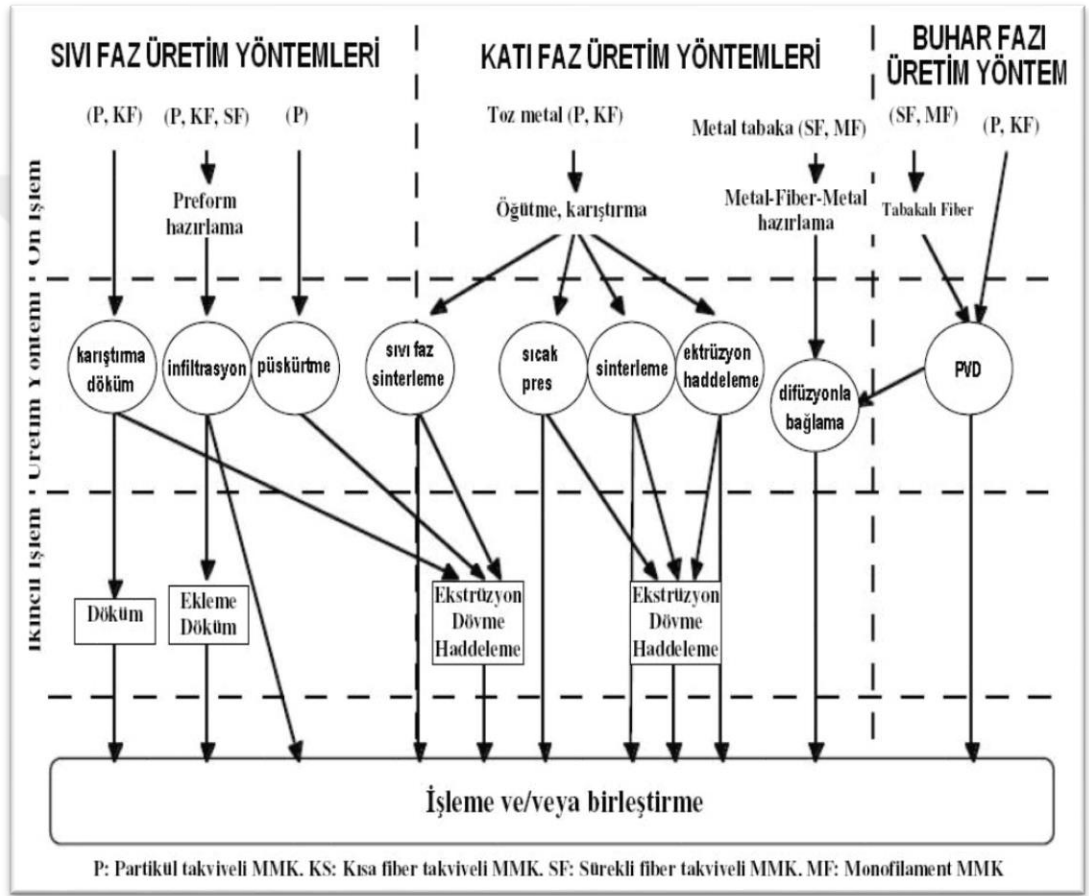
3.2. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Alüminyum matrisli kompozitlerin (AMK) üretim metotlarının seçiminde ürün kalitesi ile maliyetler ana etkenlerdir. AMK'lerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve ekonomik üretim amacıyla yeni metotlarının geliştirilmesi, bu alanda yapılan çalışmalarda önemli bir yer tutmaktadır [37]. Son zamanlarda bir çok ülkede çok sayıda bilim adamının çalışmaları neticesinde imalat yöntemlerinde yenilik ve

gelişmeler olmuştur. AMK'lerin üretimi sırasında kullanılan yöntemlerde belirleyici faktör, bu aşamadaki metal matrisin sıcaklığı olmaktadır.

AMK'lerin üretim yöntemleri iş akış şemalarıyla birlikte **Şekil 2.8.**'de verilmiştir.

1. Sıvı faz üretim yöntemleri
2. Katı faz üretim yöntemleri olarak gruplandırılabilir.



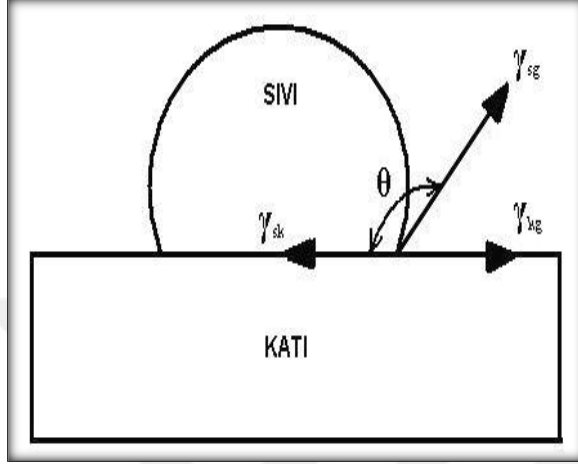
Şekil 2.8. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri [17].

3.2.1. Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

Kompozit malzeme üretiminin sıvıdan olduğu ve metalik matris ile takviye elemanları arasındaki ıslatmanın ve bağlanmanın öne çıktığı yöntemlerdir. İyi bir

bağlanma olması için sıvı ve katı malzeme ara yüzey geriliminin, sıvı yüzey geriliminden mümkün olduğu kadar fazla olması gereklidir [38].

Sıvı damlacık metoduna göre ıslatma mekanizması Şekil 2.9.'de verilmiştir.



Şekil 2.9. Sıvı damlacığının bir katıyı ıslatması [38].

3.2.2. Katı faz üretim yöntemleri

AMK lerin üretiminde kullanılan katı faz üretim yöntemleri arasında en çok kullanılanı toz metalurjisidir (TM). TM yönteminde, genellikle ergime sıcaklığı yüksek matrislerle geniş bir çeşitlilikteki takviye elemanı kompozisyonun üretimi mümkündür. TM yöntemi, sıvı hal işlemlerinde meydana gelen segregasyon etkisi ile gevrek reaksiyon ürününün meydana gelmesini engellemektedir [39,40].

Genellikle parçacık takviyeli kompozitlerin üretiminde TM yöntemi kullanılır. Katı faz yöntemlerinde matris ve takviye elemanı parçacıklarının karıştırılması, preslenmesi ve sinterlenmesi gibi bir takım işlemler gerektirdiğinden dolayı ancak sıvı yöntemle üretimle kıyaslandığında, mekanik özellikleri daha iyi olan kompozit malzemeler üretilmektedir [41].

3.3. Alüminyum ve Alaşımları

Deschams A.'ya [42] göre, işlenmiş alüminyum ve alaşımlarında, Amerikan Standartlar Birliği (ASA) tarafından belirlenen simgeleme dizisi kullanılmaktadır. Amerikan Alüminyum Birliği tarafından kullanılan bu simgeleme dizi, 1957 yılında standardize edilmiştir. **Çizelge 2.2'** de bu simgeleme dizini verilmektedir. Bu simgelemede dört rakamlı sayısal sembolden ilk rakam temel alaşım elementini ifade etmektedir [43].

Çizelge 2.2. Alüminyum işlem alaşımlarının simgeleme dizisi [29].

SİMGE	TEMEL ALAŞIM ELEMENTİ
1xxx	-
2xxx	Bakır (Cu)
3xxx	Mangan (Mn)
4xxx	Silis (Si)
5xxx	Magnezyum (Mg)
6xxx	Magnezyum + Silis
7xxx	Çinko (Zn)
8xxx	Diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan dizi

Simgelemelerde ilk rakam alaşım türünü, ikinci rakamsa değişimlerini simgelemektedir. Alaşım içerisinde özellikle denetlenen alaşımların sayısı, 1 ile 9 arasındaki bir rakamla simge sayısının ikinci rakamı olarak kullanılmaktadır. Örnek olarak 5065 serisinde özellikle denetlenen hiçbir alaşım elementi bulunmayan bir Al-Mg alaşımını simgelemektedir.

Endüstriyel amaçlı olarak kullanılan alüminyum alaşımları ısıtıl işlem davranışlarına göre iki bölüme ayrılabilir. Bunlar ısıtıl işlem uygulanabilen alaşımlar ve ısıtıl işlem uygulanamayan alaşımlardır. Genellikle 2XXX, 6XXX, 7XXX dizilerindeki alaşımların mekanik özellikleri ısıtıl işlem ile artırılabilir. 3XXX ve 5XXX dizilerindeki, alaşımlara ise ısıtıl işlem uygulanmamaktadır. Bu alaşımların dayanımları, içerisindeki alaşım elementi miktarına bağlıdır. Bu son iki dizideki alaşımlar ise, soğuk işleme deformasyon sertleşmesine uğramaktadırlar [43, 30].

1XXX dizini, ticari saflıktaki alüminyum (% 99,00) ifade etmektedir. Sondaki iki rakamsa % 99 değerinin noktadan sonra gelen rakamlarını ve alüminyum en az aralıktaki değerini belirtilmektedir. 1XXX dizisinde soldan ikinci rakamsa özel olarak denetlenen empurite elementinin sayısını belirtmekte olup 1'den 9'a kadar değişebilir. Örnek olarak 1042 simgesini ele aldığımızda alaşımın saf alüminyum ve saflık değerininse en az % 99,42 olduğunu belirtilmektedir. Ayrıca 1042'de bulunan 0 ise geride kalan % 1,00 - % 0,42 = % 0,58 içinde özellikle denetlenen hiçbir elementin bulunmadığını göstermektedir.

2XXX den 8XXX' e kadar olan dizilerdeyse **Çizelge 2.2.**' de belirtilen alaşımları simgelemektedir.

3.2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Özellikleri:

Alüminyumda çok az miktarda ki safsızlıklar bile alaşımların fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Saf alüminyumun yüzeyinde kolaylıkla oluşan koruyucu oksit tabakası, galvanik seride çok aktif bir metal olmasına rağmen, onun çok yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Çok sert ve koruyucu olan oksit tabakası, alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşmaktadır. Aynı zamanda geçirimsiz olan bu tabaka, alüminyumun korozyon direncini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu şekilde alüminyum saflaştırıldıkça da korozyon direnci ve iletkenliği artmaktadır. Bu özellik nedeniyle korozyona karşı oldukça hassas olan alüminyum alaşımları, günümüz endüstri uygulamalarında saf alüminyum giydirilmesi (cladding) yoluyla korozyona karşı korunabilmektedir. Diğer taraftan, saf alüminyumun oldukça düşük olan

mukavemetiye, soğuk işlem uygulanarak artırılabilir. Günümüzde alüminyum ve alaşımları, sahip olduğu bu üstün özelliklerinden dolayı, endüstriyel alanlarda kullanılan en önemli yapısal malzemelerden biridir. Saf alüminyumda yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, yüksek korozyon direnci vb. özelliklere sahip iken, alaşımlamayla bu özellikleri çok geniş bir aralığa ulaştırılarak yaygın bir kullanım alanına sahip hale gelmiştir. Günümüzde 100' ün üzerinde alüminyum alaşımı, endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Bu alaşımların bazı önemli üstünlükleri aşağıda verilmektedir.

1. Hafiflik

Saf alüminyumun özgül ağırlığı, yaklaşık $2,7 \text{ gr/cm}^3$ ' dır. Kütlesiye demirin % 35'i, bakırın ise % 29'u kadardır. Bu özelliği nedeniyle, başta uçak ve otomobil endüstrisi olmak üzere, tüm taşımacılık sanayiinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2. Mekanik Özellikler

Farklı alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler ile istenilen sertlik, mukavemet, tokluk vb. gibi diğer mekanik özellikler sağlanabilir. Özellikle düşük miktarda Mg, Cu, Si ve Zn ilavesi ile alaşımların dayanımları arttırılmaktadır. Alüminyum alaşımlarında ısıt işlem ile oldukça yüksek çekme mukavemeti değerlerine ulaşılmaktadır. Mekanik özelliklerinin bu şekilde değiştirilebilir olması, bu alaşımlara avantaj sağlamak ve kullanım alanlarını arttırmaktadır.

3. Korozyon Direnci

Alüminyumun yüzeyi atmosferik şartlara maruz kaldığında, çok ince ($20-25 \text{ Å}$) bir oksit tabakası oluşmaktadır. Bu tabaka ise daha fazla oksitlenmeyi önlemektedir. Bu özellik, alüminyumun yüksek korozyon direncinin temel nedenidir. Birçok aside karşı da aynı korozyon direncini göstermektedir. Ancak, bazı alkalilerde bu oksit tabakasını tahrip etme özelliğine sahiptirler. Elektrolitik ortamda bazı metaller ile doğrudan

temas, galvanik korozyona neden olabilmektedir. Böyle durumlarda boya veya yalıtkan bant uygulaması yapılmaktadır.

4. Toksikolojik reaksiyonlara girmemesi

Zehirleyici olmaması, gıda endüstrisinde ve mutfak malzemelerinde geniş bir kullanım alanı bulmasına neden olmaktadır. Bu özelliği nedeniyle sigara ve çay gibi gıda paketlemelerinde, yiyecek ve ilaçların ambalajlanmasında kullanılmaktadır.

5. Isı ve Elektrik İletkenliği

Alüminyum ve alaşımlarının ısı ve elektrik iletkenliği oldukça iyidir. Çeliğin 6 katı olan yüksek ısı iletkenliği nedeniyle ısıtma ve soğutma endüstrisinde, petrol, gıda, havacılık, kimya sektörlerinde alüminyumdan oluşan ısı değiştiricileri kullanılmaktadır. Ticari alanda kullanılan alüminyumun elektrik iletkenliği 37 siemens civarında olmaktadır. Bakırın % 62'si seviyesinde elektriksel iletkenliği vardır. Bakırın yoğunluğunun $8,9 \text{ gr/cm}^3$, alüminyumun yoğunluğunun ise $2,7 \text{ gr/cm}^3$ olduğu düşünüldüğünde (Ağırlık olarak kıyaslandığında), alüminyumun bakırdan çok daha iyi bir iletken olduğu anlaşılmaktadır.

6. Yüksek Isı ve Işık Yansıtması

Işık yansıtma özellikleri % 80'in üzerinde olduğu için aydınlatma işlerinde, yüksek ısı yansıtma özelliğinden dolayı çatı kaplamalarında kullanılabilmektedir. Bu özelliği sayesinde, ışık reflektörlerinin kaplanması ve ayna geri yansıtıcılığı işlerinde kullanılmaktadır.

7. Metalotermik Reaksiyonlarda Kullanımı

Alüminyum, oksijen ilgisi nedeniyle diğer metallerin oksitlerini indirgemektedir. Bu özelliği sayesinde toz alüminyum, baryum, krom, vanadyum ve lityum gibi metal oksitleri indirger ve bu metallerin üretiminde de kullanılmaktadır.

8. Kolay Şekillendirilebilirliği ve İşlenebilirliği

Alüminyum, kolaylıkla dökülebilmekte, kağıttan daha ince folyo olarak haddelenebilip, çekilebilmekte (tel, ekstrüzyon ürünleri, profil) ve dövülebilmektedir. Alüminyum tornalanıp, frezeleme ve delme uygulamalarına tabi tutulabilmektedir.

9. Kaynaklanabilirliği

Kaynak ve perçinleme gibi her türlü birleştirme yöntemi uygulanabilmektedir. Havacılık ve otomotiv sanayiinde yapıştırma uygulamaları da çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

10. Çok Geniş Aralıkta Yüzey İşlemlerine Tabi Tutulması

Mekanik yüzey işlemlerinden fırçalama, parlatma ve kumlama koruyucu kaplama gerekmeyen birçok durumda yeterli olmaktadır. Koruyucu kaplama olarak ise kimyasal, elektrokimyasal boya işlemleriyle elektro ve eloksal kaplamalar uygulanabilmektedir. Belirtilen bu özelliklerden iki ya da daha fazlası bir araya gelip uygulamalarda belirleyici olmaktadır (Örnek olarak hafiflik ve mukavemet nedeniyle uçak sanayiinde, raylı sistem taşımacılık ekipmanları üretiminde). Korozyon direnci ve ısı iletkenliği nedeniyle kimya ve petrol sanayiinde, gıda endüstrisinde ve inşaat sektöründe kullanılmaktadır.

11. Düşük Maliyet

Diğer metallere nazaran alüminyumun ekonomik yönden avantajlı konumu hızla artmaktadır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi birim ünitesi maliyetinin diğer metallere göre çok daha ekonomik olmasından kaynaklanmaktadır. Alüminyumun diğer metallere göre daha hafif olması, döküm sanayiinde büyük bir avantaj sağlamaktadır. Aynı boyutta bulunan diğer metallere göre daha yüksek miktarda döküm yapabilmesi mümkün olmaktadır. Bunların yanında, çok yüksek olmayan ergime sıcaklığı, daha az enerji harcamasına ve kalıp aşınmasının daha az olmasından dolayı tercih edilmektedir. Diğer bir avantajı ise, alüminyum ve alaşımlarının yüksek atmosferik korozyon direncinden dolayı, kaplama ihtiyacı duyulmamasıdır [44-46].

Saf alüminyumun fiziksel özellikleri çizelge 2.3.'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Saf alüminyumun fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlığı (g/cm³)	Ergime Isısı (KJ/kg)	Ergime Sıcaklığı (⁰C)	Elastik Modülü (GPa)	Isıl Genleşme Katsayısı (1/K)	Isı İletim Katsayısı (W/mk)
2,78	-390	660	66	24.10 ⁻⁶	230

Bölüm 3

4. TOZ METALURJİSİ

4.1. Giriş

Toz Metalurjisi (TM) ile üretim, genellikle tozların hazırlaması, preslenmesi, sinterlenmesi ve son işlemlerden oluşan dört aşamadan meydana gelmektedir. Toz metalurjisiyle üretim yönteminde; kaynak, döküm, talaşlı imalat ve plastik şekil verme vb. yöntemlerle üretimi zor veya üretilemeyen alaşımların üretimi yapılabilmektedir. Malzeme kaybının çok az olması, üretim hızı, karmaşık şekle sahip ve hassasiyet gerektiren parçaların üretimi, üretilen parçalar üstün fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması vb. avantajlara sahiptir. Ayrıca, kalıp maliyeti yüksekliği, olması mümkün gözenekler nedeniyle düşük mekanik özellikler, homojen yoğunluk ve parça boyutunun sınırlı olması gibi dezavantajları bulunmaktadır [47-50].

TM, metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan en yaygın tekniklerden birisidir. Sıvı metalin seramik parçacıkları ıslatılmasındaki zorluktan dolayı toz metalurjisiyle kompozit malzeme üretimi, ilk geliştirilen yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, genellikle parçacık veya whisker formundaki takviye elemanı, toz haldeki metalle, metal matrisli kompozit malzemeler oluşturulmaktadır. En fazla kullanılan takviye elemanları grafit, silisyum karbür, titanyum karbürdür. En yaygın kullanılan matris malzemeleri ise alüminyum, titanyum ve bakırdır.

4.2. Toz Metalurjisi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Toz metalurjisi yöntemiyle imalatı yapılan malzemelerin genellikle sıvı hal yöntemiyle üretilen malzemelerden daha iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Özellikle parçacık takviyeli MMK lerin üretiminde bu yöntemin tercih edilmesindeki etkenler;

- ✓ TM ile üretilen metal matrisli kompozitlerin üretimi daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Bu nedenle, matris ve takviye elemanı arasındaki etkileşim daha

az olmaktadır. Böylece, mekanik özelliklerin azalmasına yol açan ara yüzey reaksiyonlarının azaltılması sağlanmaktadır.

- ✓ TM yöntemiyle takviye elemanının matris içinde homojen olarak dağılımının sağlanması mümkündür. Döküm yöntemlerinde homojen dağılımın sağlanması ise oldukça zordur.
- ✓ TM yönteminin döküm yöntemi yerine tercih edilmesi, parçacık veya Whisker takviyeli kompozit üretiminde hem daha kolay, hem de daha homojen yoğunluklu kompozit malzeme üretilmesini sağlamaktadır.
- ✓ Bu yöntemde yüksek takviye hacim oranının sağlanması mümkündür. Bu nedenle, yüksek elastiklik modülüne ve düşük termal genleşme katsayısına sahip kompozit malzemeler üretilmektedir.

Toz Metalurjisi yönteminin üstünlüklerin yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar;

- ✓ Kısa fiber takviyesi yapılan uygulamalarda, toz karıştırma işlemi esnasında kısa fiberlerin kırılması mümkündür.
- ✓ Büyük parçaların üretiminde, çok yüksek basınçlar gerekmesi nedeniyle maliyet artmaktadır. Sıcak presleme sonrasında, genellikle parçanın son şeklini alması amacıyla dövme, haddeleme veya ekstrüzyon vb. ikincil işlemler gerekmektedir. İlaveten, toz kullanımında temizlik gerekmektedir. Aksi takdirde yabancı maddeler ve artıklar malzemeye nüfuz ederek, mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir [51].

4.3. Toz Metalurjisinin Uygulama Alanları

Son zamanlarda TM kullanım alanlarında büyük bir gelişim ve farklılıklar görülmektedir. TM çok yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Bunlara örnek olarak, tungsten lamba teli imali, elektrik kontakları, zırh delici mermiler, kendinden yağlamalı yataklar, otomotiv sanayiinde güç aktarma dişlileri, nükleer güç yakıt elemanları, takım çelikleri, küçük bileşim değişikliğine karşı hassas şekil hafızalı alaşımlar, sürtünme elemanları, yüksek sıcaklık filtreleri, türbin parçaları ve dişçilik

sektöründe kullanılan amalgamlar gösterilebilir. Ayrıca, kaynak elektrodları örtüleri, piller, baskı devreleri, boyalar, katı roket yakıtları, patlayıcılar, mürekkepler, katalizörler ve sert lehim bileşiklerde TM ile üretilen endüstriyel malzemelerdir. Metalurjide, endüstriyel TM yöntemlerinin hepsi, bileşim esnekliği, alaşım elementlerin ise en az seviyede ayrışması ve ince taneli mikro yapıların kolaylıkla elde edilebilmesi gibi özellikler sunulmaktadırlar. Toz metalurjisinin en önemli avantajlarından biriside, malzeme kullanım oranının % 100' lerde olması nedeniyle, kritik hammadde kayıplarının en az düzeyde olmasıdır. Aynı parçadan çok sayıda üretim yapılması istendiğinde en uygun yöntem toz metalurjisidir. Böylece, tam verimlilik elde edilmektedir. Boyut kontrolünün kolaylığı ve karmaşık şekilli parçaların üretim kolaylığı, toz metalurjisinin öne çıkan en önemli avantajıdır [52].

4.4. TM Yöntemiyle Üretilen Kompozitlerin Askeri Uygulamaları

TM yönteminin, boyut kontrolü kolaylığı ve karmaşık şekilli parçaların üretim kolaylığı ile üretim maliyetleri açısından sivil amaçlı olduğu kadar askeri amaçlı uygulamaları da çok fazladır. Askeri uygulamaları iki ana grupta toplanmaktadır. Bunlar geleneksel TM ile üretilen parçalar ve piroteknik uygulamalarıdır.

Geleneksel TM uygulamaları, TM ile üretilen parçaları kapsamaktadır. Örnek olarak uçak, deniz ve yer teçhizatında ve taşıtlarında kullanılan parçalar, çeşitli silah ve mermi parçaları gösterilebilir. Piroteknik uygulamalarda ise metal ve metal olmayan malzemelerin tozları, çeşitli organik maddelerle karıştırılarak hangi sahada kullanılmak isteniyorsa ona göre karışımı hazırlanmaktadır. Örnek olarak bu grupta patlayıcılar, ateşleyiciler, roket yakıtları, geciktiriciler, tutuşturucular, aydınlatma bombaları, dumanlar vb. gösterilebilir [53].

4.5. Geleneksel TM Uygulamaları

Geleneksel TM uygulamaları her türlü hava, kara ve deniz araçlarının yapısal parçalarını kapsamaktadır. Bunlara örnek olarak uçak motor türbin diskleri gibi çok

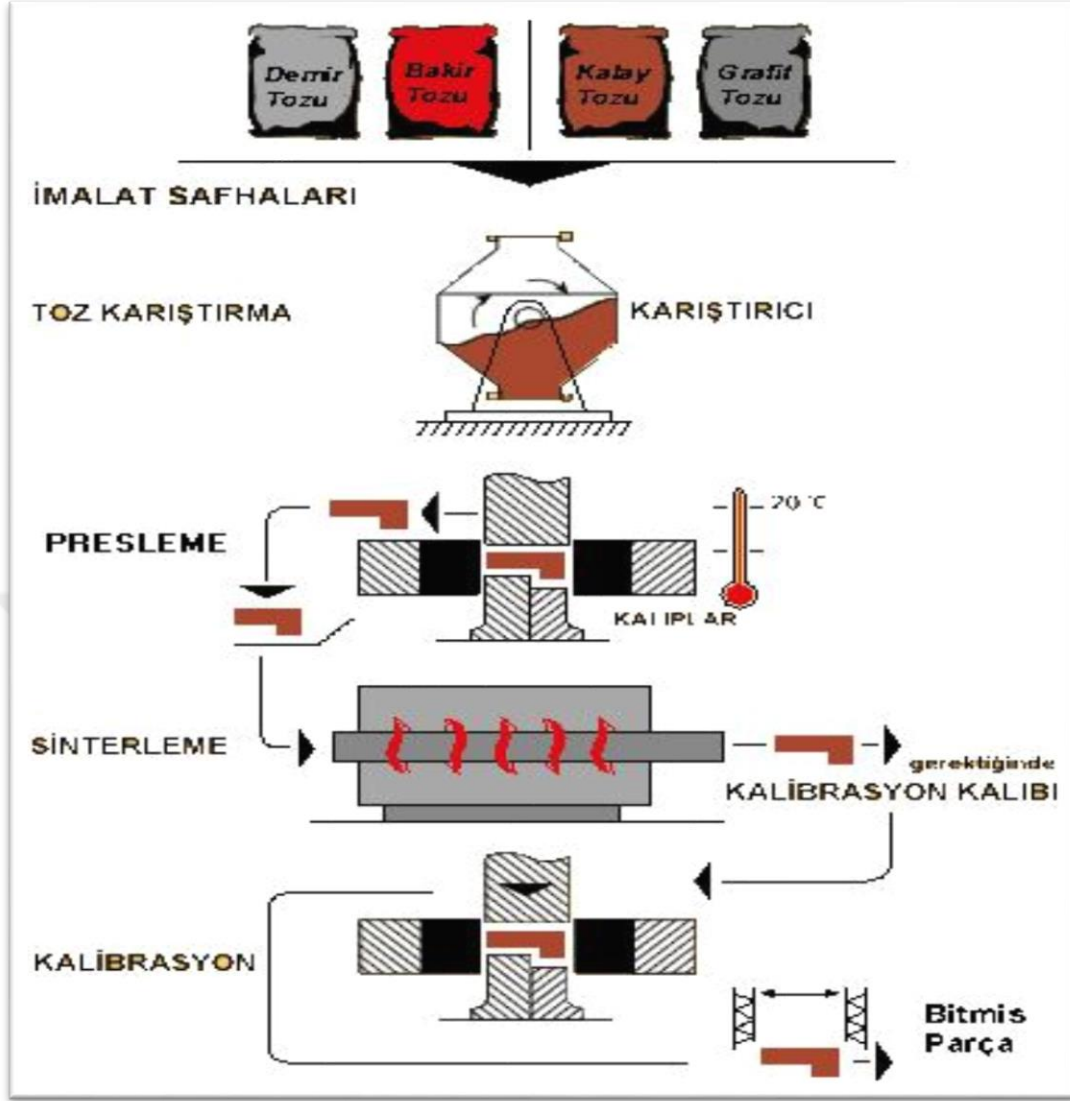
önemli parçaları sayılabilir. Ayrıca askeri alanlardaki silah sistemlerinde ise, yapı elemanları ve tamamlayıcı elemanlar olarakta kullanılmaktadır. Bu alandaki geleneksel TM uygulamalarına örnek olarak, ağır top mermilerinin ve uçuş kararlılığını sağlayan mermilerin döner bantları, parça tesiri yapmak amacı (şarapnel etkisi) ile tüm havan mermisi gövdeleri, ağır zırhları delmek için kullanılan yüksek kinetik enerjisine sahip delicilerin içinde kinetik enerjisinden faydalanılan tungsten deliciler, parça tesirli cephaneler vb. silah sistemleri ve parçalarını verebilmektedir [57].

4.6. Toz Metalurjisi Yönteminin Temel Basamakları

İstenilen boyut, şekil ve paketlenme özelliklerine sahip olan metal tozu güçlü, mükemmel ve yüksek performanslı bir parça şekline dönüştürebilmektir. TM yönteminde tozun şekillendirilmesi, sıkıştırılması ve sinterlenmesi ile üretim aşaması tamamlanmaktadır [54].

T/M parçalarının üretimi basit olarak beş aşamada gerçekleştirilmektedir (**Şekil 3.1**).

1. Toz hazırlama
2. Presleme
3. Sinterleme
4. Yağ emdirme ve kalibrasyon (gerekirse)
5. Tam yoğunluk işlemleri



Şekil 3.1. Toz metal parça üretim aşamaları

4.6.1. Tozların Öğütülmesi ve Karıştırılması (Toz Hazırlama)

Öğütme: Aynı kimyasal bileşimde olup farklı parçacık boyutlarında bulunan tozlar birbirine benzetilmektedir. Genellikle, farklı boyutlardaki tozlar, gözeneklikleri azaltmak için öğütülmektedir. Toz hazırlama sürecindeki parametreler, öğütme süresi, öğütme tipi, öğütme kabı, öğütme hızı, öğütme atmosferi, öğütücü malzemeler, bilye/toz oranı, kabın doldurulma miktarı, işlem kontrol kimyasalı, öğütme sıcaklığıdır [55].

Karıştırma: Farklı kimyasal bileşime sahip olan tozlar birbiriyle karıştırılmaktadır. TM yöntemi farklı metallerin, başka yöntemlerle üretilmesi zor/imkânsız olan alaşımlarla karışmasına olanak sağlamaktadır. Belirlenen metal tozları, dengeli homojen karışım olacak şekilde karıştırılmalıdır. Aynı zamanda karışım, kalıbın bütün bölgelerine dolacak akıcılıkta olmalıdır. Bunun için tozlar, hassas bir şekilde tartılarak, grafit gibi ametal malzemeyle birlikte karıştırıcıya konulmaktadır. Katı yağlayıcının % 0,5 ile % 1,5 arasındaki bir oranda tutulmaktadır. Karıştırma hızı ve süresi, üretilen parçanın mekanik davranışlarına ve fiziksel özelliklerine etki etmektedir. Kalıptaki aşınmayı ve sıkıştırma basıncını azaltmak için yağlayıcıların bütün tanelerle temas edebilmesi gerekmektedir. Karıştırmadaki amaç, farklı yapıdaki malzemelerden ihtiyaca ve isteğe bağlı yeni bir karışımın elde edilmesidir [56]. Karıştırmadaki bir diğer amaç ise, kuru ve katı halde bulunan tozların birbirine soğuk kaynaklanması ve büyüyen bu malzemelerin kırılmasıyla daha ince ve daha homojen bir mikroyapı elde edilmesini sağlamaktadır. Böylece, dayanımı yüksek kompozitlerin üretimi yapılabilmektedir [57].

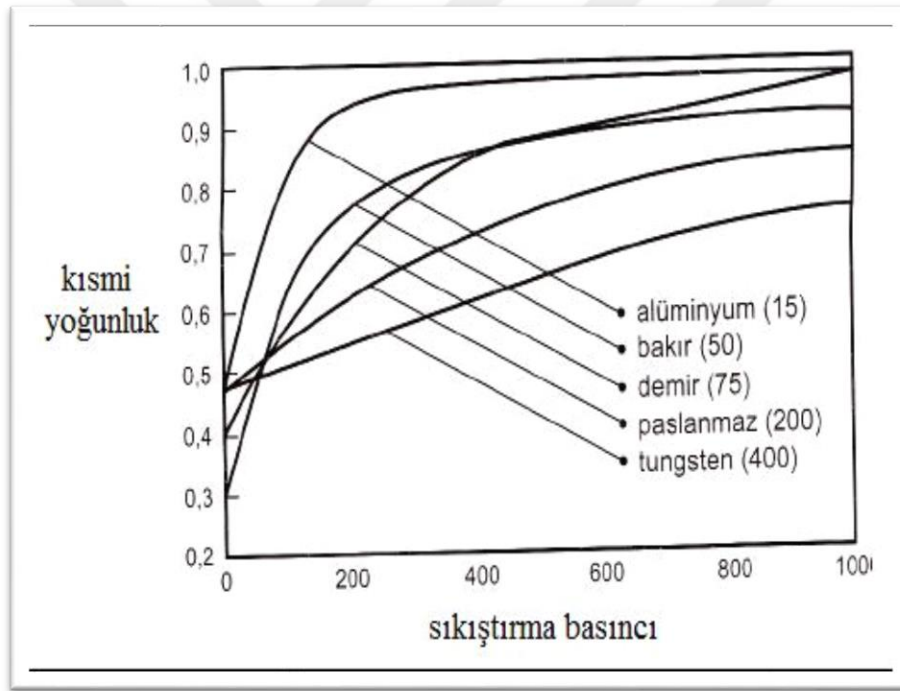
4.6.2. Metal Tozlarının Preslenmesi

Tozları basınç altında daha yoğun bir hale getirme işlemine presleme işlemi denilmektedir. Kalıp tasarımının ve parça yoğunluğunun belirlenmesi aynı zamanda istenen bu yoğunluğun sağlanabilmesi için pres seçimi gerektirmektedir.

Tozların preslenebilirliğine etki eden faktörler;

- ✓ Ana malzeme sertliği; bazı malzemelerin sertlik oranının yüksek olması preslenebilmesi için gerekli olan basınç kuvvetinin daha fazla olmasını gerektirir.
- ✓ Toz şekli; tozun şekli ne kadar düzensiz ise preslenebilirlik o oranda azdır.
- ✓ Toz gözenekliliği; tozun içinde bulunan küçük boşluklar presleme esnasında havanın sıkışmasına dolayısıyla tozların bağlanmasına engel olmaktadır. Boşluksuz toz en yüksek preslenebilme özelliğine sahiptir.

- ✓ Tozun boyut dağılımı; aynı boyuttaki tozların preslenebilirliği zayıftır. Farklı boyutlarda bulunan tozların karışımıyla tozlar arası boşluklar azaldığı için daha iyi preslenebilirlik elde edilebilmektedir.
- ✓ Metalik olmayan kalıntı mevcudiyeti; oksit indirgeme gibi metalik olmayan malzemelerin sertliğinin çok fazla, yoğunluğununsa az olmasından dolayı preslenebilirliği azaltmaktadır.
- ✓ Katı yağlayıcı kullanımı; Katı yağlayıcıların düşük ağırlığı buna karşılık olarak çok yer tutan hacimlerinden dolayı metal karışımının preslenebilirliği artırmaktadır.
- ✓ Alaşım elementlerinin ilavesi; Grafit ve sülfür gibi alaşımların ilavesi genelde preslenebilirliği artırmaktadır [58].



Şekil 3.2. Çeşitli metallerin sıkıştırma özellikleri [59].

Şekil 3.2.'de farklı metallerin sıkıştırma özellikleri verilmektedir. Şekil 3.2.' de verilen grafikten de anlaşıldığı gibi, düşük basınçlarda yoğunluk artışı önce hızlı olmakta,

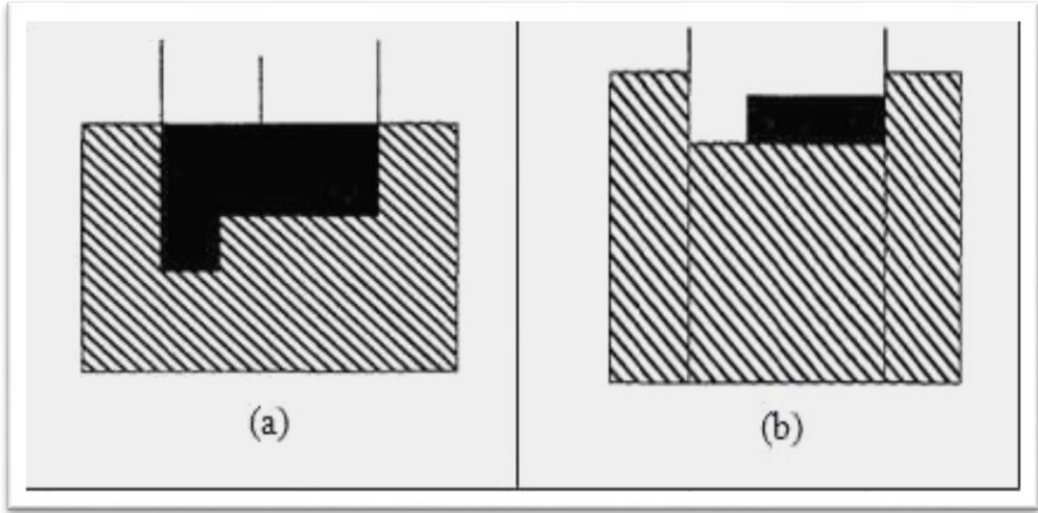
gözenekler kapandıkça tozlar yoğunlaşmaya karşı, artan bir direnç göstermektedir. Parçacık sertliğinin sıkıştırma için önemli bir parametre olduğu çok doğaldır [59].

Toz metalurjisi yönteminde farklı presler kullanılmaktadır. Preslenen tozlarda yoğunlaşma dağılımının homojen olması istenilen en önemli özelliktir. Preslemeye bağlı olarak tuzların yoğunlaşma davranışı, farklılık gösterebilmektedir [44]. Presleme TM yönteminde en önemli aşamalardandır. Kalıpta bulunan tozlar tek eksen boyunca uygulanan basınçla preslenip şekillendirilebilmektedir.

Kalıba doldurulan toza üst baskı plakasıyla basma gerçekleştirildikten sonra, şekillenen parça alt piston hareketiyle çıkarılır. Seri imalat esnasında basma işlemi, bir sonraki toz harmanı için yeniden tekrarlanır. Basma işlemi esnasında kullanılacak kalıplar geometrik sınırlamalar içerisinde basit geometrik yapıda olabildiği gibi, karmaşık şekilli de olabilir. Basma işlemi esnasında kalıptaki aşınma sorunu, yağlayıcılarla giderilmektedir. Yağlama parçanın kolayca çıkarılması amacıyla yapılmaktadır. Genellikle bu işlem için sementit karbür esaslı ve/veya ısıtılma işlemle sertleştirilmiş takım çeliğinden üretilen kalıplar kullanılmaktadır.

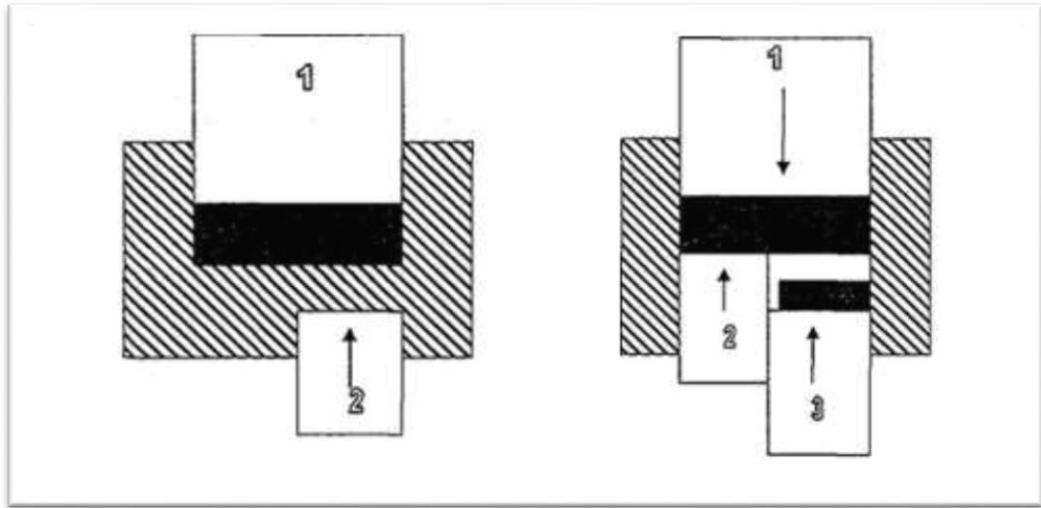
Preslemede genelde hidrolik, mekanik ve pnömatik presler kullanılır. Preslerle uygulanan basınçlar 70-700 MPa değerleri arasındadır. Pratikte ise kullanılmakta olan basınçlar genelde, 145-450 MPa arasındadır. Pres kapasiteleri genellikle 100 ton civarındadır. Son dönemlerde 200-300 ton kapasiteli presler de kullanılabilir. Toz metalurjisiyle imal edilen ürünlerinin maksimum kesit alanları 2000 mm² 'dir.

Şekil 3.3.'de farklı kalınlıktaki iki kesite sahip parçanın presleme öncesi ve presleme sonrası halleri verilmektedir.



Şekil 3.3. Farklı kalınlıktaki iki kesite sahip parçanın presleme öncesi (a) ve presleme sonrası (b) [60].

Şekil 3.4.'de İki farklı kesite sahip bir parçada homojen yoğunluk elde etmek için kullanılan iki farklı presleme metodu verilmektedir.



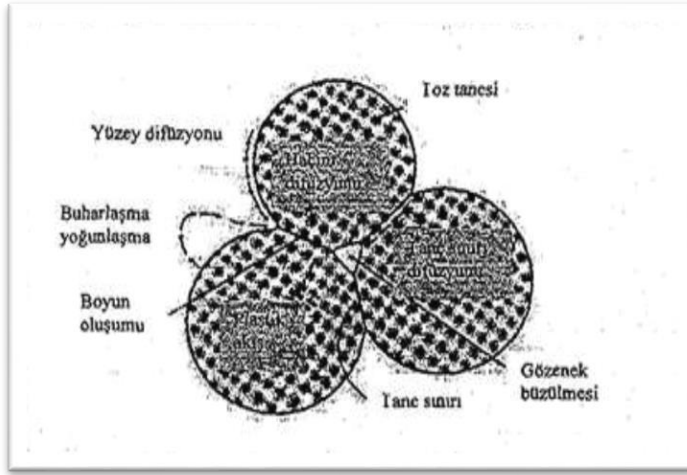
Şekil 3.4. İki farklı kesite sahip bir parçada homojen yoğunluk elde için kullanılan iki farklı presleme metodu [60].

Tozlar sıkıştırma işlemi sırasında, öncelikle uygulanan kuvvet yönünde hareket etmektedirler. Toz parçaları sıvı gibi akışkan değildirler. Bu nedenle, kalıp yüzeyiyle parçacıklar arasında oluşan sürtünmeden dolayı bir reaksiyon meydana gelmektedir. Bu reaksiyon, uygulanan kuvvet değerine ulaşıncaya kadar eksenel yönde devam etmektedir. Sonrasında ise parçacıklar, yatay yönde harekete devam ederler. Yoğunlaştırma veya sıkıştırma işlemi esnasında kalıp kenar duvarında oluşan sürtünme, anahtar bir faktördür. Bu nedenle, preslemeyle elde edilen yoğunluk, kalıplanan parça kalınlığı ve genişliğinin bir fonksiyonu olmaktadır. Homojen yoğunluk dağılımı elde edebilmek için, kalınlık/genişlik (t/w) oranının ikiden küçük olması gerekir. Kalınlık/genişlik oranı ikiden büyük olan ürünlerdeki yoğunluk, parça içerisinde bir noktadan başka bir noktaya değişiklik göstermektedir.

4.6.3. Sinterleme

Yüksek sıcaklıklarda toz parçacıklarının birleştirilmesi işlemine sinterleme denilmektedir. Genelde bu işlem ergime sıcaklığının altındaki bir noktada ve atomik boyutta gerçekleştirilmektedir. Ancak, bazı alaşımlarda bu işlem, sıvı faz bölgesinde yapılmaktadır. Sinterleme işlemi, bölgesel birleşmenin olduğu yerlerde, boyun noktası büyümesiyle başlar (**Şekil 3.5**). Parçacık şekline ve malzemesine göre boyun oluşumu farklılık gösterebilmektedir. Parçacıkların sinterlenmesi sırasında atomik hareketler nedeniyle yüzey enerjisi engellenmektedir. Birim alana gelen yüzey enerjisi, atomik çapla ters orantılıdır. Küçük parçacığın spesifik yüzey alanı küçük, enerjisi ise yüksektir. Buna bağlı olarak sinterleme daha hızlı olmaktadır. Ancak, tüm yüzey alanı sinterleme için geçerli değildir. Katı kristallerinde her temas noktasında taneler, tane sınır enerjisiyle birleşirler.

Atomik hareketlilik bakımından tane sınırları önemli bölgelerdir. Sinterleme mekanizması, atomların yoldaki kütsel akışına benzemektedir. Bu olay, metalik malzemelerde genelde difüzyon şeklindedir. Belirtilen difüzyon hareketi, parçacık şekline bağlı olarak modellenir ve hareket enerjisi ile kinetik enerjisi hesaplanabilmektedir. İlk toz çapı/son toz çapının birbirine oranı genelde; ilk çap = D olarak alırsak son çap = $1,26xD$ dir.



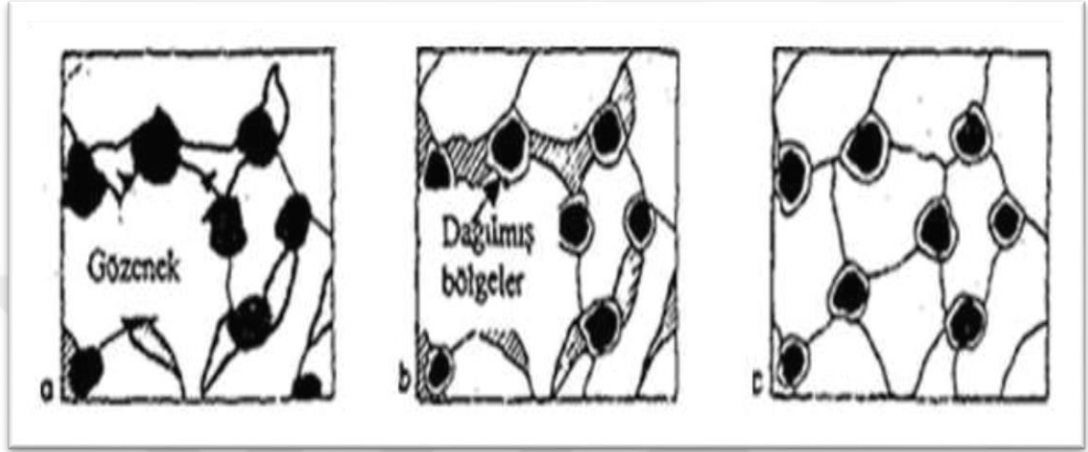
Şekil 3.5. Sinterleme sırasında meydana gelen mekanizmaların şematik gösterimi [61].

Sinterlemeyi etkileyen faktörler, sıcaklık, toz boyutu, sinterleme atmosferi, alaşım elementlerinin ham yoğunluğu vb.'dir. Sinterleme mekanizmasının etkinliğinde en önemli faktör, preslenen ve sinterlenen toz yüzeyinde oksit veya sinterlemeyi olumsuz etkileyen katmanların oluşmamasıdır. Tozların yüzeyinde meydana gelen oksit katmanları, sinterlemeyi olumsuz etkilemektedir.

Sinterlemeden sonra parça içerisinde oluşan boşluk/gözenek miktarları, malzemelerin mekanik ve tüm işlevsel özelliklerine etki etmektedir. Bu boşluk/gözeneklerin oluşmasında presleme basıncı ve malzemenin özellikleri ile birlikte sinterleme aşamasında etkilidir. Sinterleme sırasında parça boyutlarının değişmesi istenmese de, boşlukların giderilmesi amacıyla katı transfer işlemlerinin olması beklenmektedir. Bunları, tane sınırı difüzyonu, hacim difüzyonu, sıvı akış ve plastik akışı şeklinde olmaktadır. **Şekil 3.6.**' de sinterleme sırasında gözenek oluşumu görülmektedir. Bu genel bir oluşumdur ve malzemelere göre farklılık gösterebilmektedir.

Karıştırılmış tozlarının sinterlenmesi işleminde denge diyagramlarının dikkate alınması ve eğer büyük farklar var ise hacimsel oranlarına göre uygun sinterleme sıcaklığının seçilmesi gerekmektedir. Sinterleme işleminin ileri aşamasında, toz sınırları kalkar ve tane büyümesi meydana gelir. Fakat büyümenin ileri safhasında, gözenekler tamamen tane içine hapsolmaktadır. Bu olay, istenilmeyen bir durumdur.

Sinterlenen parçanın gözenek şeklinin küreselleşmesi, sinterlenmenin son safhasında gerçekleşmektedir. Buna rağmen %100 yoğunluk elde edilememektedir. Sinterlemeden sonra yoğunluk artışı sağlanması amacıyla ekstrüzyon, haddeleme gibi farklı yöntemler uygulanmaktadır.



Şekil 3.6. Sinterleme esnasında gözenek oluşumu ve zamana bağlı olarak gözeneklerin şematik olarak gösterimi [62].

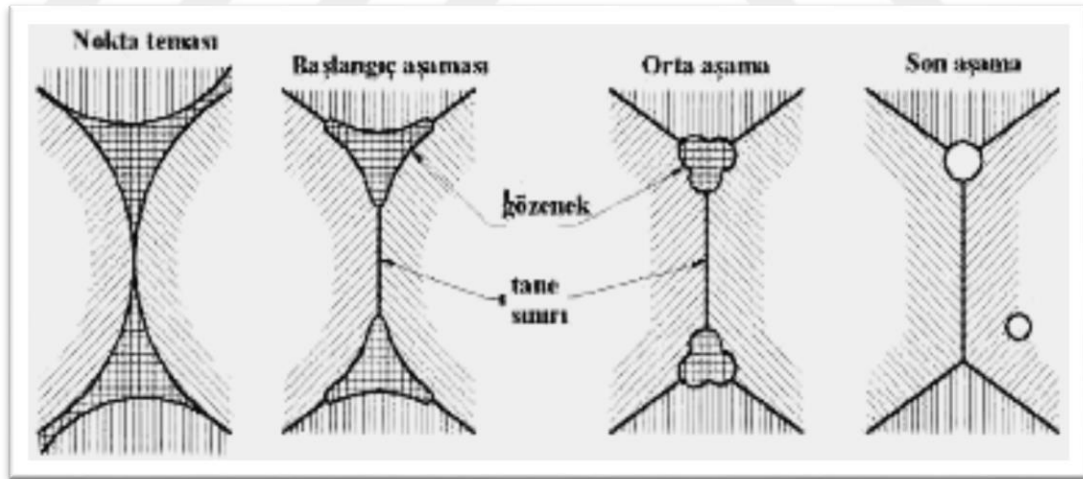
Son dönemlerde tam yoğun malzeme elde etmek amacıyla kullanılan bir yöntem de, sıvı faz sinterlemesidir. Bu işlemle, katı fazın yanında sıvı faz da oluşturulmaktadır. Sıvı faz, difüzyon hızını büyük ölçüde artırmakta ve parçacıklar arasındaki bağ oluşumunu sağlamaktadır. Bu oluşum ise üretilen parçanın mukavemetini, gözenek yapısını, iletkenliğini, manyetik özelliklerini ve korozyon dayanımını büyük ölçüde etkilemektedir [63].

Sinterlenen malzemeler eğer sadece saf metalden veya sadece seramik malzemelerden oluşuyor ise tek bileşenli sistem, birden çok malzemedan oluşuyor ise çok bileşenli sistem olarak adlandırılmaktadır. Genellikle, tek bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı, malzeme ergime sıcaklığının $T_{m0,7}$ - $T_{m0,9}$ arasında olmaktadır. Çok bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı kimyasal bileşimi oluşturan malzemelerden, en düşük ergime sıcaklığına sahip olanın ergime sıcaklığının hemen altındaki bir sıcaklıktır. Ergime sıcaklığı altındaki sinterlemeler katı faz sinterlemesidir. Çok

bileşenli sistemlerdeyse bileşimi meydana getiren malzemelerden en az birinin ergime sıcaklığı üstünde yapılan sinterleme ise sıvı faz sinterlemesi olarak adlandırılmaktadır.

Ham parçaların çoğunda, sinterleme sırasında mukavemet, yoğunluk, boyut, elastiklik modülü, sertlik, ısıl ve elektriksel iletkenlik vb. bazı özelliklerde değişimler olmaktadır. Bu nedenle, sinterleme işleminin izlenmesinde hacimsel özelliklerin kullanılması mümkündür. Bunun dışında, yaygın bir izleme yöntemi ise yapıdaki boyun değişimidir. Sinterleme çekmesi, yoğunluk artışına ve gözeneklerdeki azalmaya bağlıdır. Bununla birlikte, sinterleme ile yoğunlaşmanın olmadığı, hatta şişmelerin de olduğu bazı durumlarda söz konusudur [64].

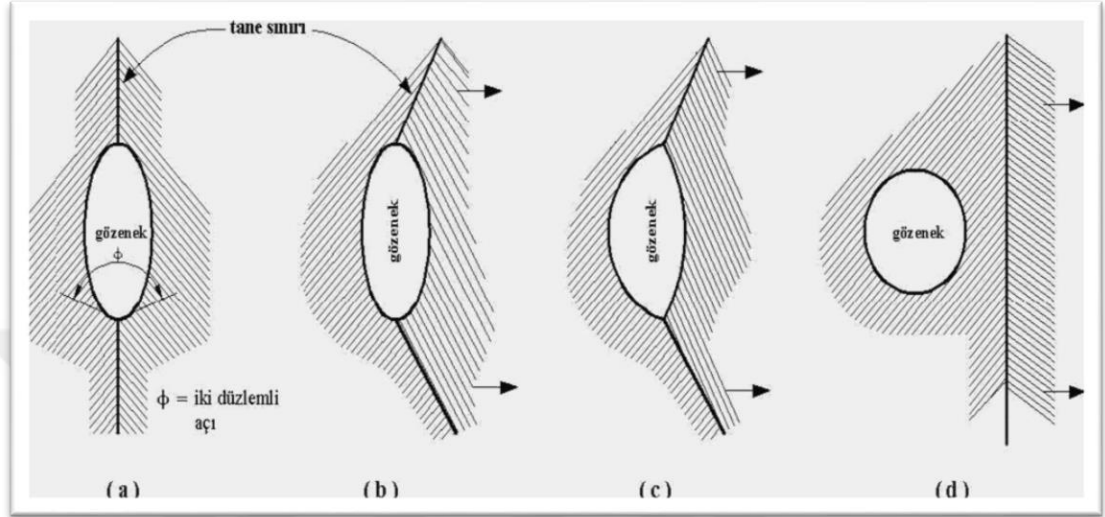
Sinterleme sırasında küresel şekilli toz parçacıkları arasında, nokta temasıyla etkileşim başlar ve parçacıklarda önce bir boyunlaşma ile tane sınırı oluşur. Sonrasında ise, sinterleme zamanının ilerlemesi ile tane sınırı köşelerinde meydana gelen gözeneklerde büzölmeler başlar ve sonrasında meydana gelen gözenek kanalları kapanarak kapalı gözenekler oluşur. Sinterleme sırasında gözenek yapısında meydana gelen değişim aşamaları, **Şekil 3.7.**'de görölmektedir.



Şekil 3.7. Sinterleme esnasında oluşan gözenek yapısındaki değişim [65,66].

Sinterlemenin ilerleyen aşamalarında toz sınırları kalkmakta ve taneler büyümeye devam etmektedir. Büyümenin daha sonraki aşamalarında gözenekler tamamen tane

içerisine hapsolmaktadır. Bu durum istenmez. Sinterlenen numunelerde gözenekler dairesel bir şekle dönüştüğünde sinterlemenin son safhasına gelindiği anlaşılmaktadır [67]. Buna rağmen % 100 yoğunluk elde edilememektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Son sinterleme devresinde bir gözenneğin izole edilmesi ve kapanması [67].

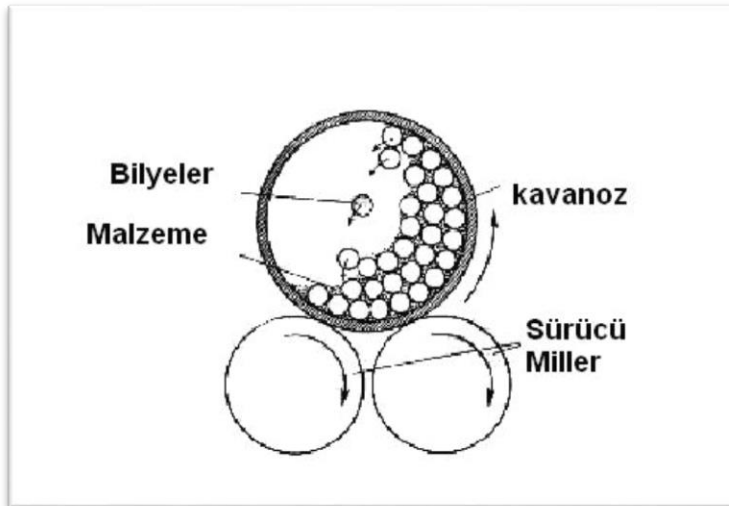
Sinterleme atmosferi, sinterleme işleminin en önemli etkenlerinden birisidir. Sinterleme için gerekli atmosfer parçaların oksitlenmesini engellemek, yüzey oksitlerinin indirgenmesini sağlamak, fırında buharlaşan yağlayıcı gazları dışarı atılmasını sağlamak ve demir karbon alaşımlarındaki gibi blok parça bileşimini kontrol etmek açısından önemlidir. Endüstriyel alanda, genelde oksitlenmeyi en aza indirmek için, koruyucu atmosfer olarak Ar, H veya N gazı kullanılmaktadır [68].

4.7. Toz Üretim Yöntemleri

TM’de, tozların ortalama boyutları birkaç mikrondan, birkaç yüz mikrona kadar değişmektedir. Tozların geometrik şekilleri üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, dendritik formlara kadar farklılık göstermektedir. Tozların yüzeylerinin düzgün veya

gözenekli olması da yine üretim yöntemlerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Tozların ortalama boyutu, yüzey şekli ve durumu da parça üretimi açısından önemlidir. Toz üretimi mekanik üretim yöntemleri, elektrolizle üretim teknikleri, kimyasal üretim teknikleri ve atomizasyon teknikleri olarak dört ana grupta toplanmaktadır [69]. Bunlardan farklı olarak, bazı seçilmiş malzemeler için özel toz üretim teknikleri de kullanılmaktadır. Endüstriyel alanda kullanılmakta olan tozların % 60'dan fazlası ise atomizasyon yöntemiyle üretilmektedir [70].

Mekanik üretim yöntemleri aşındırarak öğütme, darbe, kesme ve basma işlemleriyle yapılmaktadır. Darbe, malzemeye çekiç ile vurma şeklinde çok hızlı ve anlık uygulamaları içermektedir. Böylece, malzemeler küçük parçalara ayrılmaktadır. Aşındırarak öğütme ise, aşındırıcıların birbiri üstünde sürtünme hareketi ile parçacık boyutları küçültülmektedir. Kesme, talaşlı imalat işlemindeki gibi kesiciler yardımıyla yapılmaktadır. Diş dolgu malzemesi olarak kullanılan amalgamlardaki gümüş gibi pek çok metal tozu, daha önceleri bu yöntemle üretilmekteydi. Kesmeyle üretilen tozların boyutları diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha büyüktür. Son öğütme yöntemi olan basma kuvvetleriyle malzemeler kırılma noktasına kadar deformasyona uğratıldığında toz haline gelmektedir [71].



Şekil 3.9. Silindirik değirmende hareketin gösterilmesi [71].

Şekil 3.9.'da görüldüğü gibi iri taneli öğütülecek malzeme öğütücü kap içinde büyük çaplı, sert ve aşınmaya karşı dayanıklı bilyalar ile birlikte döndürülerek veya titreştirilerek darbe etkisiyle çok küçük tozlara bölünmektedir.

Metal tozları üretiminde kullanılan yöntemler, tozların birçok özelliğini belirlemektedir. Tozların geometrik şekilleri üretim yöntemine göre küreselden, karmaşık şekle kadar değişmektedir. Tozların yüzey durumları da aynı şekilde farklılık göstermektedir. Malzemelerin büyük bir kısmı, özelliklerine uygun yöntemler kullanılarak toz haline getirilmektedir [72].

Bir çok toz üretim teknikleri içerisinde, ticari olarak kullanılan yöntemleri ise;

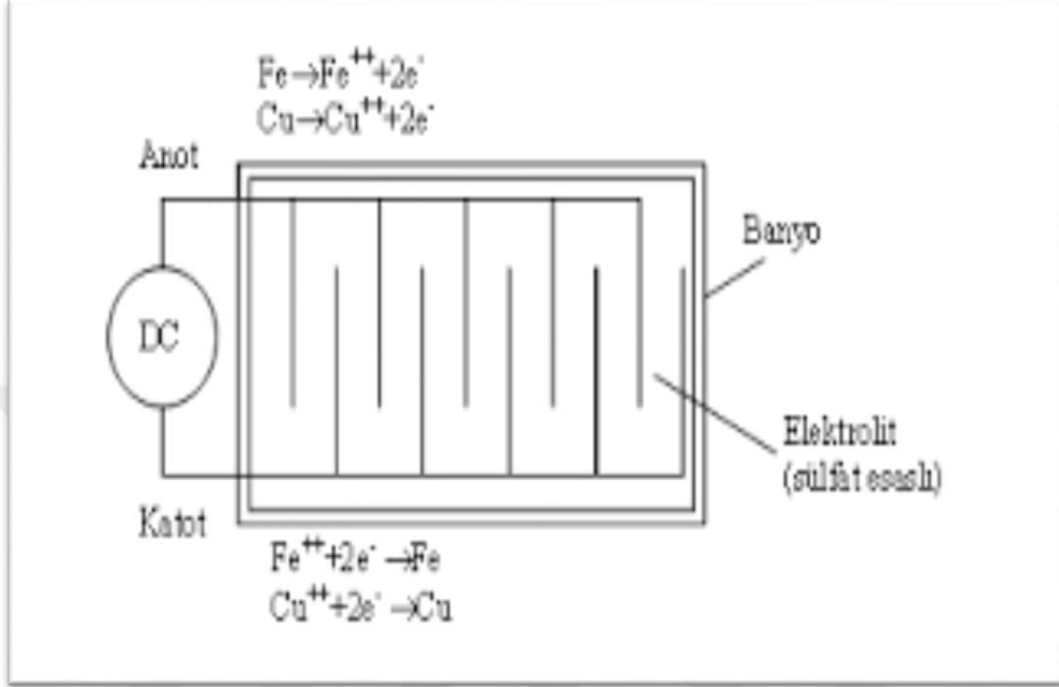
- ✓ Elektrolitik ayrıştırma yöntemi
- ✓ Kimyasal yöntemler
- ✓ Atomizasyon yöntemi
- ✓ Mekanik yöntemler
- ✓ Talaş kaldırma
- ✓ Değirmende öğütme
- ✓ Mekanik alaşımlama'dır.

4.7.1. Elektroliz ile toz üretimi (Elektrolitik ayrıştırma yöntemi)

Bu yöntemde tozlar doğrudan elektrolitik banyo içerisinde çökeltilir veya iyi kırılabilme özelliğindeki katot da toplanmaktadır. Bu yöntemle üretilen demir veya bakır tozları elektrolitin bulunduğu tekne içerisindeki paslanmaz çelik katot üzerinde, ortalama 48 saatte 2,5 mm kalınlığında toz birikmektedir. Katot üzerinde toplanan Cu veya Fe tozları sıyrılıp alınır, yıkanır, kurutulur ve gerektiğinde öğütme işlemiyle toz tane boyutu küçültülebilir.

Bu yöntemle üretilen tozlar indirgeyici gazlarla tavlansak sıkıştırılabilme özelliği artırılmaktadır. Elektrolizle genellikle bakır tozu üretimi yapılmaktadır. Bu yöntemle demir tozu üretimi de mümkündür. Fakat maliyet yüksekliğinden dolayı diğer teknikler daha avantajlıdır. Bu yöntemle sadece saf element tozları üretilmektedir.

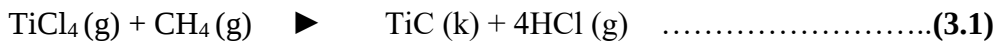
Alaşım tozları üretilemez. Üretilen tozlar dendritik yapıya sahiptirler. **Şekil 3.10.**'da elektrolitik toz imalatının şematik resmi görülmektedir [73].



Şekil 3.10. Toz biriktirmek için bir elektroliz hücresi [71].

4.7.2. Kimyasal Yöntem ile Toz Üretimi

Toz üretimini yöntemlerinden kimyasal yöntemle üretimde, değişik işlemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler kimyasal çöktürme, Sol-Gel, redüksiyon (otoklav içerisindeki hidrojen vasıtasıyla metal tuzlarını redükleyerek metal elde edilmesi), reaksiyon ile kimyasal buhar biriktirme (CVD), dekompozisyon (parçalama) ve elektroliz işlemleri olarak sıralanabilir. CVD yönteminde, hidrojen atmosferinde ısıtmayla TiC tozu üretilabilmektedir. **(Eşitlik 3.1.)**



Sol-Gel yönteminde ise genellikle nükleer endüstriyel amaçlar için seramik malzeme üretimi yapılmaktadır. Tozların sınıflandırması ve eleme işlemlerinden kurtulabilmek

amacı ile geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemle üretilen tozların boyutları 20 µm den küçüktür [63].

Şekil 3.11.'de Kimyasal metodla demir tozu imalatı üretim akış şeması verilmektedir.

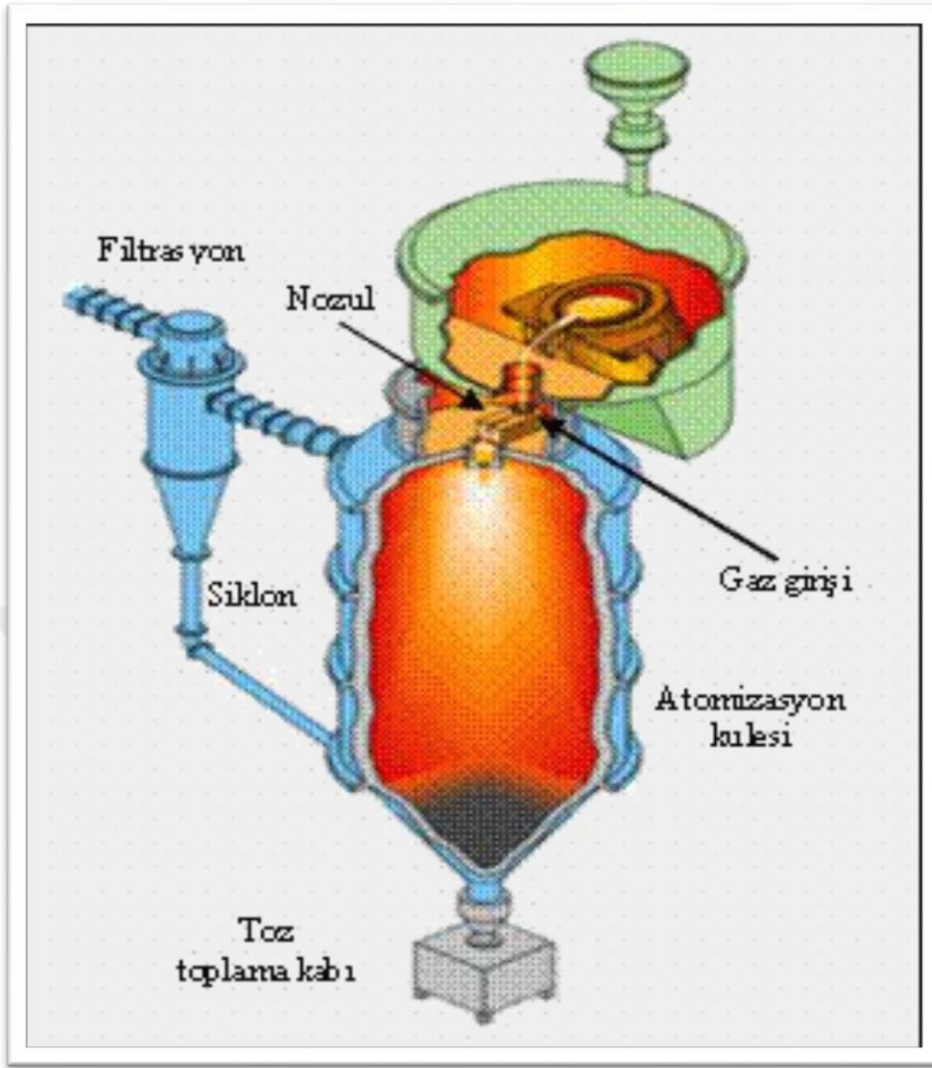


Şekil 3.11. Kimyasal metodla demir tozu imalatı [74].

4.7.3. Atomizasyon yöntemi

Bir sıvı demetinin değişik boyutlarda çok sayıda parçacığa bölünmesi olarak tanımlanabilir. Atomizasyon yöntemiyle toz boyutu dağılımı, ortalama boyutu, toz şekli yüzey kompozisyonu da içerisinde olmak üzere, kimyasal bileşimi ve mikro yapısı kontrol edilebilmektedir. Sıvı metalin su jetiyle parçalanması su atomizasyonu, gaz jetiyle parçalanması ise, gaz atomizasyonudur. En çok kullanılan bu iki yönteme ilave olarak merkezkaç kuvvetinin kullanılmasıyla yapılan santrifüj atomizasyon, toz üretim yöntemlerinden bazılarıdır [72].

Düşey gaz atomizasyon yöntemiyle toz üretim ünitesi Şekil 3.12.'de verilmektedir.



Şekil 3.12. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [72].

Ayrıca, bu yöntemlerde kullanılan gazlar genelde argon, azot veya havadır. Sıvı olarak da genelde su kullanılmaktadır. Atomizasyon yönteminde akışkan hızı ve debisi, gaz veya sıvı püskürtme açısı, akan metalin miktarı vb. parametreler kontrol edilerek, farklı boyutlarda toz üretilebilmektedir. Parçacık şekli, katılaşma hızına bağlı olarak küresel, düzensiz parçacık gibi farklılıklar gösterebilmektedir. Bu yöntem pratik uygulamalarda, ergitilebilen tüm metallere uygulanabilir. Ticari alanda kullanılan tozlar takım çelikleri, demir, bakır, alaşımlı çelikler, pirinç, bronz ve alüminyum, kalay, çinko, kurşun ve kadmiyum ile diğer düşük ergime derecesine sahip metallerdir. Kolay oksitlenen krom benzeri elementler içeren alaşımlarsa argon gibi asal gazların

altında üretilebilmektedir. Alaşım tozların üretilmesindeki kolaylıklar, atomizasyon yönteminin avantajlarından birisidir [63].

4.7.4. Mekanik Yöntemler

Mekanik yöntemler; talaşlı üretim, mekanik öğütme ve mekanik alaşımlama olarak sınıflandırılmaktadır.

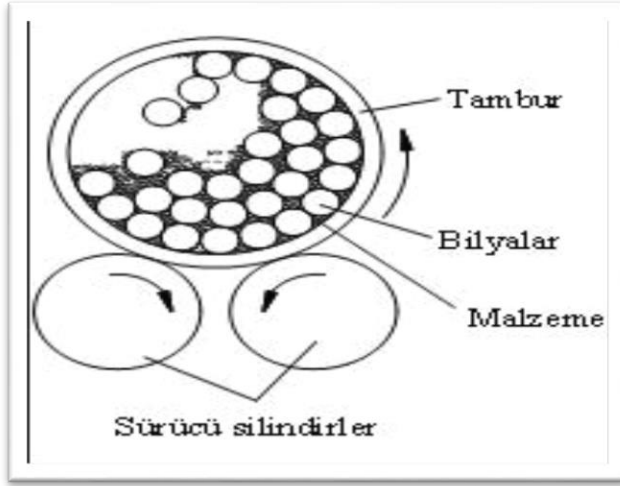
4.7.4.1. Talaşlı Üretim Yöntemi (Talaş Kaldırma)

Bu yöntemde tornalama, frezeleme ve taşlama vb. talaş kaldırma yöntemleriyle çok iri ve karmaşık şekilli toz üretilebilmektedir. Üretilen bu tozlar, mekanik öğütülerek küçültülmektedir. Toz özelliklerinin kontrolündeki zorluk, oksitlenme, yağlanma, vb. nedenler tozların kirlenmesine yol açabilmektedir. Yüksek karbonlu çelik tozları bu yöntemle üretilebilmektedir [72].

4.7.4.2. Mekanik Öğütme

Genellikle bilyeli değirmenlerde tozların kırılması ile küçültülebilmesi için kullanılan kullanılan mekanik öğütme, aynı zamanda bir metal tozu üretim yöntemidir. Temel prensibi, kırılma ile küçültülmek istenen malzemeyle sert bir cisim arasında darbe uygulanarak toz üretilmesidir.

Öğütülmek istenen metal, öncesinde kaba olarak kırılmış biçimde içinde büyük çaplı aşınma dayanımı olan sert ve dayanıklı bilyelerin bulunduğu kaba yerleştirilmektedir. İri taneli malzeme öğütücü kabın içindeki büyük çaplı, sert ve aşınma dayanımlı bilyelerle birlikte küçültülmektedir (**Şekil 3.13.**).

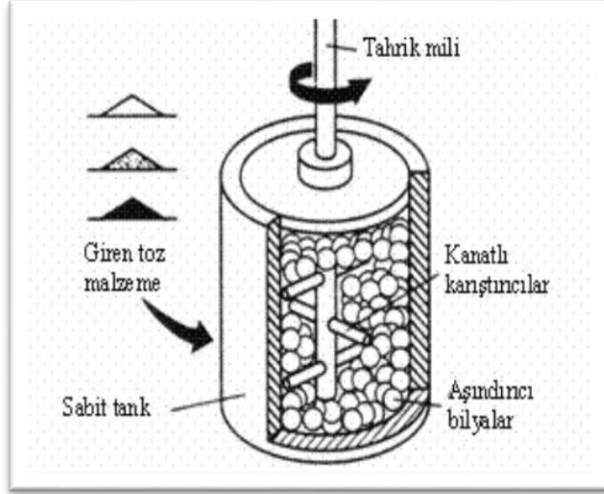


Şekil 3.13. Bilyeli Öğütme [75].

Eğer öğütülen malzemeler gevrekse, bilyeler ile çarpışma nedeniyle çok küçük tozlara bölünürler. Öğütülen metal malzemeler sünek parçacıklardan meydana geliyorsa, çarpışmayla birlikte şekil değiştirip yassılaşırlar. Homojen bir karışım elde edebilmek için, kaba konulan bilye hacmi ve öğütülecek metal malzeme miktarları çok önemlidir. Bilyelerin hacminin kap hacminin yaklaşık olarak yarısı ve öğütülen metal malzemelerin miktarı ise kap hacminin yaklaşık % 25'i oranında olması gereklidir. Demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum gibi gevrek metaller mekanik olarak bilyeli değirmenlerde öğütülmektedir.

4.7.4.3. Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama (MA) katı ve kuru halde bulunan tozun birbirine soğuk kaynaklanma detormasyon mukavemetlenmesi ve kırılması ile yapılan bir toz metalurji üretimi yöntemidir. Mekanik alaşımlama (MA) yönteminde toz, kapalı bir kap içerisinde şaft yardımıyla mekanik alaşımlandırılmaktadır (**Şekil 3.14**).



Şekil 3.14. Mekanik alaşımlama yöntemi [75].

MA yönteminde tozlar yüksek enerjili öğütme/alaşımlandırma etkisiyle tozlar soğuk kaynaklanır. Son tozdaki mikroyapı, genelde atomizasyon ile elde edilen tozdan daha küçüktür. Hızlı soğutma yöntemleri kullanılarak elde edilenlerin mikroyapısı benzer tane boyutu seviyesine sahiptirler. Bunun haricinde bilyelerin arasında ezilen tozlar yassılaşıp irileşmektedir [71].

4.8. Alüminyum Tozlar

Alüminyum tozlarının 1900'lü yılların ilk dönemlerinde pul ürün olarak kullanılmıştır. Toz Metalurjisi teknikleri ile yüksek mukavemetli alüminyum alaşımı parçaları üretimiye 20. yüzyılın ortalarında başlamıştır. Alüminyum tozlarının gerçek yoğunluğu ise ana metal yoğunluğuna yakındır. Görünür yoğunluğu ise, 0,8-1,3 g/cm³ arasındadır ve bu değer verilen aralıkta boyut dağılımına bağlı şekilde değişebilmektedir. Alüminyumun oksijenle reaksiyona girmesi ile toz yüzeylerinde Al₂O₃ tabakası oluşmaktadır. Alüminyum tozlarının sinterlenmesinde, toz yüzeyinde oluşan ince oksit tabakası olumsuz etki yapmaktadır. Ağırlıkça % 0,1 - 1,0 arasında oksit miktarı, toz boyutu büyüklüğüne bağlı olarak değişebilmektedir. İnce tozlarda birim ağırlıktan dolayı artan yüzey alanı nedeniyle, ağırlıkça en fazla oksite sahiptir. Farklı atomizasyon şartları olsa bile alüminyum tozları üzerindeki oksit tabakası kalınlıkları sabit olmaktadır. Bu ince alüminyum oksit tabakası nedeniyle alüminyum

atmosferik ortamda kararlıdır. Bununla birlikte, ince bölünmüş olan alüminyum tozlarının kimyasal olarak reaktif olduğu görölmektedir [76].

Alüminyum tozları eriyik haldeki metalden atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir. İşlem sırasında atmosferik şartlarda kararlı kalmasını sağlayan koruyucu ince bir oksit tabakası oluşturmaktadır. Alüminyum tozlarının şeklinin çubuk şekilli, incelmış ve yassı yüzeyli olduğu görölmektedir. Alüminyum tozlarının katı roket yakıtı olarak kullanımı içinse, boyutunun 10 µm' nin altında olması gereklidir. Alüminyum tozu çeşitli parlaklık derecesinde ve metalik beyaz rengindedir [77].



Bölüm 4

5. MALZEME VE METOD

5.1. Malzeme

Bu çalışmada, toz metalurjisi (TM) ve sıcak presleme yöntemi kullanılarak seramik parçacık takviyeli metal matrisli kompozitler üretilmiştir. Matris malzemesi olarak ön alaşımlı Al 5154 alaşımı takviye elemanı olarak TiB_2 ve B_4C seramik parçacıklar kullanılmıştır. İlave edilen seramik parçacıkların miktarına ve türüne bağlı olarak metal matrisli kompozitlerin özellikleri karakterize edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan Al 5154 tozunun kimyasal kompozisyonu, **Çizelge 4.1.**'de verilmiştir. Matris malzemesi olarak kullanılan AA 5154 tozları $2,66 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir. AA 5154 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri, **Çizelge 4.2.**'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Al 5154 tozunun kimyasal kompozisyonu.

Al 5154 (% Ağırlıkça)									
Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Ni	Al (Min)
0,00-0,10	3,10-3,90	0,00 - 0,10	0,4	0,00 - 0,25	0,00 - 0,10	0,25	-	-	95.1 %

Çizelge 4.2. AA 5154 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri

Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (BSD)	Erime Noktası (°C)
2,66	280	200	69	14	60	607-649 °C

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan B₄C ve TiB₂ seramik parçacıkların fiziksel özelliklerine ait referans değerleri, **Çizelge 4.3.** ve **Çizelge 4.4.**'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. B₄C tozlarının fiziksel özellikleri

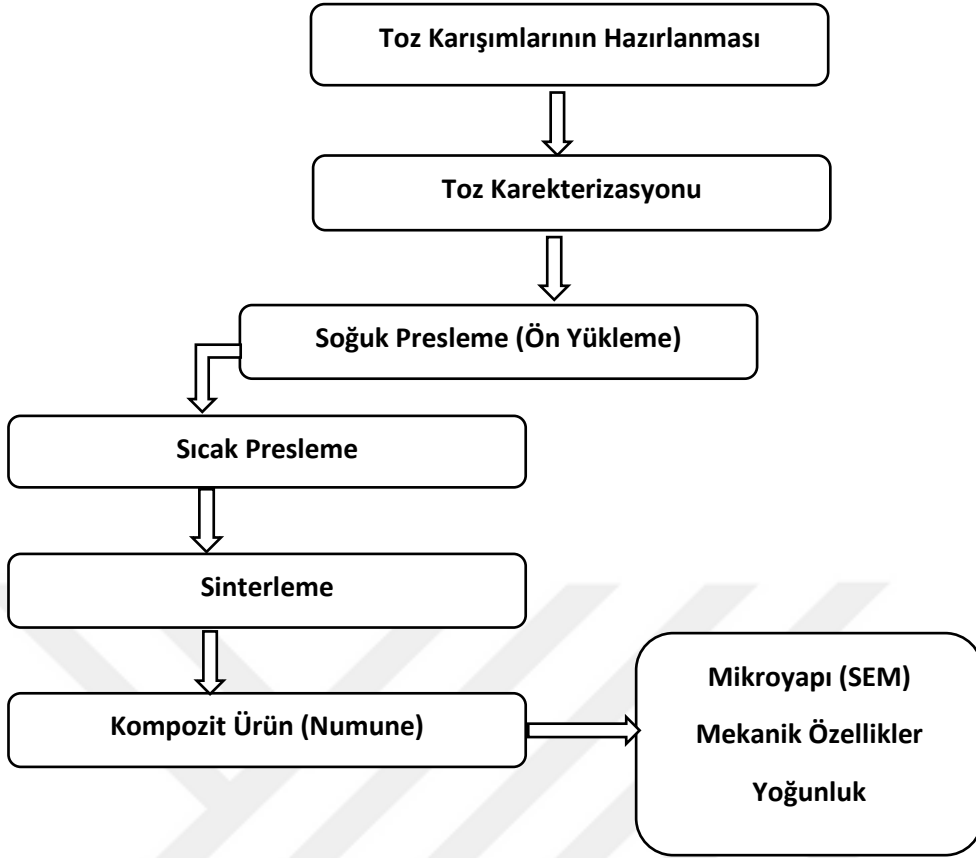
Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Erime Noktası(°C)	Eğme Dayanımı (MPa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Elastiklik Modülü (GPa)	Basma Dayanımı (MPa)	Sertlik (Vickers) (GPa)
2.52	2400	345	155 – 162 (980-1425) °C	290-450	2750	27,4 - 34,3

Çizelge 4.4. TiB₂'nin fiziksel özellikleri [78].

Mol Ağırlığı (g/mol)		69,54
Renk		Gri
Teorik Yoğunluk (kg/m³.10⁻³)		4,52
Ergime Sıcaklığı (°C)		2920
Kristal Yapısı		Hegzagonal
Latis parametreleri	a (nm)	0,3030
	b (nm)	-
	c (nm)	0,3230
Termal Genleşme Katsayısı, α (10⁻⁶/K)	300-1300 K	4,6
	1300-2300 K	5,2
Termal İletkenlik Katsayısı, κ (W/m.K)	300-1300 K	24,0
	1300-2300 K	26,3
Mikrosertlik (1N) (GPa)		25,5
Young Modülü, E (GPa)		541
Poisson Oranı, ν		0,09 - 0,11
Eğme Mukavemeti, $\sigma_{eğme}$ (MPa)		450 ± 70
Basma Mukavemeti, σ_{basma} (MPa)		1350
Çekme Mukavemeti, σ_{ϵ} (MPa)		127
Kırılma Tokluğu (MPa.m^{1/2})		6,4 ± 0,4
Elektriksel Direnç, $\rho \times 10^8$ (Ω.m)		9

5.2. Deneysel Metod

Şekil 4.1.'de deneysel çalışmalara ait iş akış şeması verilmiştir. Tozların karıştırılması, preslenme işlemleri, elde edilen numunelerin sinterlenmesi, metalografik muayene çalışmaları, sertlik ölçümleri, çapraz kırılma deneyleri, SEM görüntüleri ve EDS analizlerinin alınması Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmalardaki iş akış şeması

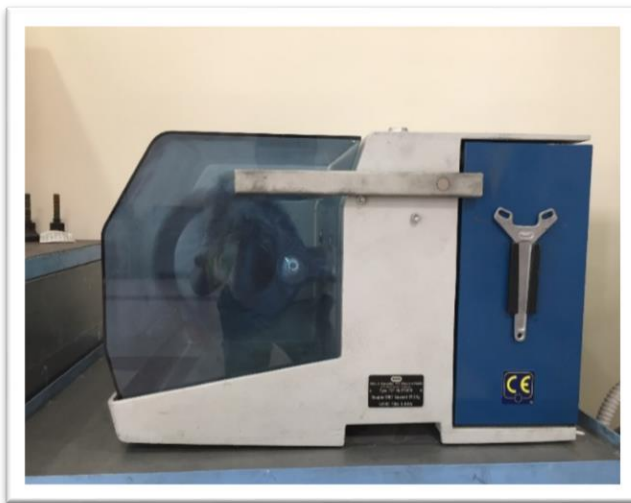
5.2.1. Karışım Tozların Hazırlanması

Kompozit numunelerinin hazırlanmasında AA 5154 tozu içerisine takviye malzemesi olarak B_4C ile TiB_2 tozları ilave edilmiştir. Matris ve takviye elemanı karışım oranları **Çizelge 4.5**'de verilmiştir. Her bir grup için 7 ayrı toz karışımı hazırlanmıştır. Karışım oranlarının belirlenmesinde 0,001 g. hassasiyetteki Precisa marka hassas terazide kullanılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Tozların oranlarının belirlenmesinde kullanılan Precisa marka hassas terazi.

Al 5154 matris tozu B_4C ve TiB_2 seramik parçacıklar her bir karışımın toplam ağırlığı 68 g. olacak şekilde ayarlanmış ve hazırlanan tozlar birbiri içerisinde homojen olarak dağılımını sağlamak amacı ile Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi laboratuvarında bulunan ve **Şekil 4.3.**'de verilen Turbula® Wab Mixer (Tip T2F) 3 boyutlu karıştırıcıda 67 dv/dk. ile 30 dakika karıştırılmıştır.



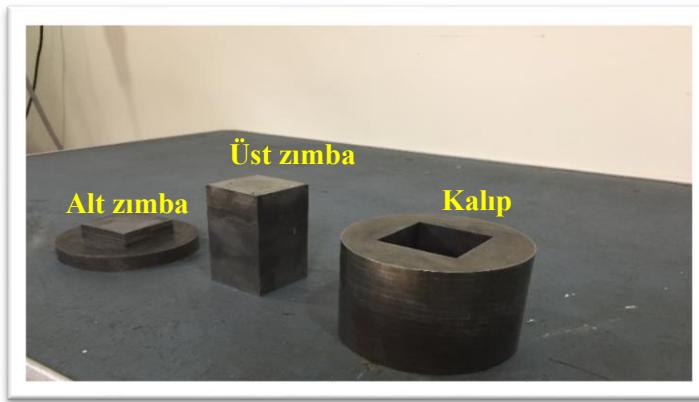
Şekil 4.3. Turbula® Wab Mixer (Tip T2F) tipi karıştırıcı.

Çizelge 4.5. Matris/parçacık karışım oranları

KOMPOZİT ADI	TOPLAM KARIŞIM AĞIRLIĞI	TOZ KARIŞIM ORANLARI (% AĞIRLIK)		
		AA 5154	B ₄ C	TiB ₂
AA 5154	68 g.	68 g.	-	-
AA 5154 - B ₄ C (%5)	68 g.	64,6 g.	3,4 g.	-
AA 5154 - B ₄ C (%10)	68 g.	61,2 g.	6,8 g.	-
AA 5154 - B ₄ C (%15)	68 g.	57,8 g.	10,2 g.	-
AA 5154 - TiB ₂ (%5)	68 g.	64,6 g.	-	3,4 g.
AA 5154 - TiB ₂ (%10)	68 g.	61,2 g.	-	6,8 g.
AA 5154 - TiB ₂ (%15)	68 g.	57,8 g.	-	10,2 g.

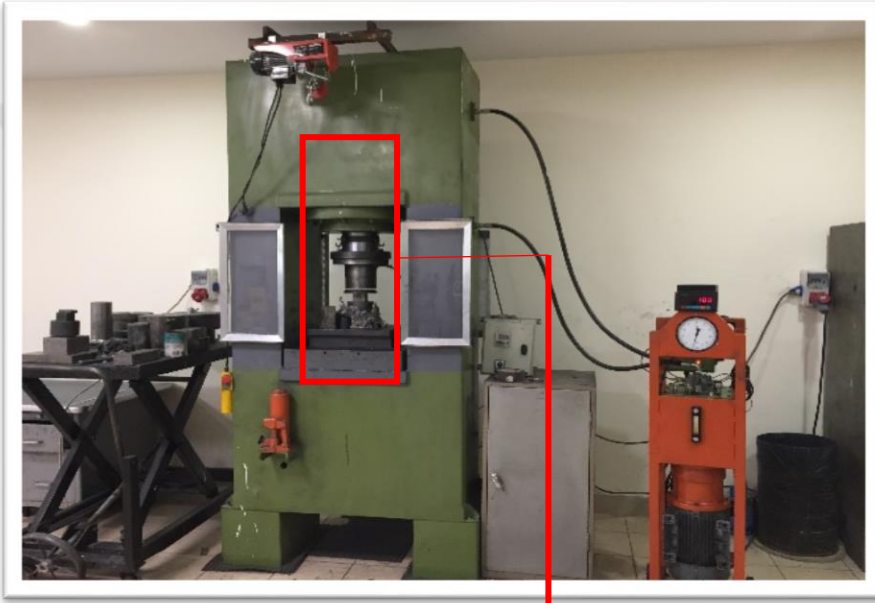
5.2.2. Kompozit Tozlarının Preslenmesi

Deneyisel çalışmalarda kullanılan 60X60X7 mm. ebatlarındaki numuneleri üretmek amacıyla 60X60 sıcak iş takım çeliğinden üretilmiş kalıp ile alt ve üst zımbalar kullanılmıştır (**Şekil 4.4**). Sıkıştırma işlemi 300 ton basma kapasitesine sahip hidrolik pres ile gerçekleştirilmiştir (**Şekil 4.5**).



Şekil 4.4. Preslenmede kullanılan 60X60 çelik sıcak iş takımları

Numunelerin kolay çıkması amacıyla ilk önce kalıbın iç yüzeyleri, alt zımba ve üst zımba grafit ile yağlanmıştır. Kompozit numunelerin üretimi için yukarıda verilen ağırlık oranlarında hazırlanan ve üç boyutlu karıştırıcıda karıştırılan her biri 68 g. olan tozlar kalıp boşluğuna konulmuştur. Kalıp Şekil 4.5’de görüldüğü şekilde presin tablasına yerleştirilmiştir. Kalıbın etrafı Şekil 4.6’de görüldüğü şekilde refrakter malzemeden oluşan battaniye ile sarılmış ve ısıtma işlemi uygulanmıştır. Tozların bulunduğu kalıp 300 °C ye kadar ısıtıldıktan sonra 200 MPa basınç uygulanmıştır.



Şekil 4.5. Kalıptaki sıkıştırılmasında kullanılan hidrolik pres.

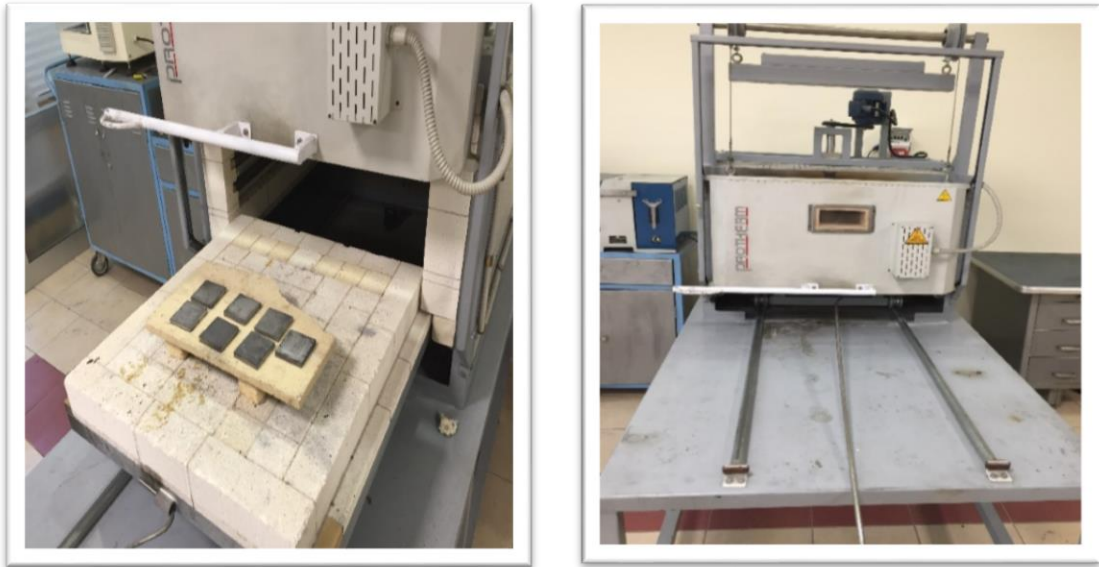


Şekil 4.6. Kalıbın etrafının alümina battaniye ile kapatılması.

Çizelge 4.5.’ de belirtilen oranlarda hazırlanan ve üç boyutlu karıştırıcıda karıştırılıp kalıpta ısıtılıp preslenen 6 adet karışım kompozit bir adette referans olarak AA 5154 tozundan olmak üzere toplamda 60X60X7 mm ebatında 7 adet T/M blok deney numunesi elde edilmiştir.

5.2.3. Numunelerin Sinterlenmesi

Sinterleme işlemi Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Toz Metalurjisi laboratuvarında bulunan PROTHERM marka HLF 100 mufle tipi özel tasarım fırın içerisinde yapılmıştır. Sinterleme işlemi koruyucu atmosfer kullanılmadan 1 saat süre ile 580°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir (**Şekil 4.7**). Sinterleme işleminde, üretilen toplam 7 adet deney numunesi fırın içerisine ısıya dayanıklı kayar tabla üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra fırın 580 °C sinterleme sıcaklığına kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta numuneler 1 saat süreyle bekletilmiştir. Sinterleme sonrası fırın oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur.



Şekil 4.7. Sinterleme işleminin gerçekleştirildiği mufle tipi fırın

Sinterleme işlemi sonrası numuneler makro ve mikro incelemeler için GF Machining Solutions AgieCharmilles CUT 300 Sp modeli CNC Tel Erezyon tezgâhında kesilmiştir (**Şekil 4.8**).



Şekil 4.8. Numunelerin kesildiği CNC Tel Erezyon Tezgâhı

5.2.4. Metalografik İncelemeler İçin Numunelerin Hazırlanması

Sinterleme işlemi sonrasında yüzeyde oluşan oksit tabakasını temizlemek için bütün numunelerin yüzeylerine Metkon marka Focipol 1V serisi cihazda, zımparalama ve yüzey parlatma işlemi yapılmıştır (**Şekil 4.9**).

Numunelerin toz tane şekilleri ve tane sınırları yapısı metalografik incelemelerle belirlenmiştir. Metalografik incelemeye hazır hale getirmek amacıyla numuneler bakalite gömülerek sırasıyla 600, 800 ve 1200'lük zımparalar ile zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işlemi sonrası parlatma keçesinde 3 µm boyutta elmas pasta ile numunelerin yüzeyleri parlatılmıştır. Numunelerin tane sınırlarını daha net bir şekilde gözlemleyebilmek amacıyla numunelere alüminyum alaşımlarında kullanılan Keller çözeltisi ile dağlama işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.9. a) Numunelerin zımparalanması b) Numunelerin parlatılması

Keller çözeltisi hazırlamak için 2 ml HF (%48), 3 ml HCl (Konsantre), 5ml HNO₃ (Konsantre), 190 ml su +80 ml su kullanılmış numuneler 8-15 sn. dağlayıcıya daldırılmış ılık suyla yıkanarak saç kurutma makinasıyla sıcak hava üflenmek suretiyle dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

5.2.5. Yoğunluk Ölçümleri

Çalışma kapsamında üretilen Al 5154 matrisli B4C ve TiB₂ parçacık takviyeli kompozit numunelerin yoğunluk ölçümleri Sartorius marka 0,0001 g hassasiyetine sahip terazi ve bu teraziye bağlanan yoğunluk kiti kullanılarak Arşimet prensibine göre belirlenmiştir (**Şekil 4.10.**). Yoğunluk hesabı **Eşitlik 4.1.**'de verilen Arşimet prensibi esasına göre yapılmıştır [86]. Toz metal malzemelerde porozite yoğunluğa etki etmektedir. Numunelerin poroziteleri, kompozit malzemenin kimyasal bileşiminden hesaplanan teorik yoğunluk (ρ_c) ile deneysel yöntemlerle elde edilen gerçek yoğunluk değeri (ρ_e) arasındaki farkın birbirine oranlanmasıyla bulunmuştur **Eşitlik (4.2.)**.



Şekil 4.10. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan Sartorius marka hassas terazi

$$d = \frac{m}{V_y - V_s} \quad \dots\dots\dots \text{Eşitlik (4.1.)}$$

Eşitlik (4.1.) 'e göre;

d: Yoğunluk (g/cm³)

m: Ağırlık (g)

V_y: Yaş ağırlık (g)

V_s: Su içerisindeki ağırlık (g)

Numune Kompozisyonlarının Teorik Yoğunluk Hesaplarında;

AA 5154 Teorik Yoğunluğu : 2,66 g/cm³

TiB₂ Teorik Yoğunluğu : 4,52 g/cm³

B₄C Teorik Yoğunluğu : 2,52 g/cm³

Olarak alınmış,

Gözeneklilik (Porozite) hesaplamalarında ise;

$$\text{GÖZENEK (\%)} = \frac{q_{\text{Teorik yoğunluk}} - q_{\text{Gerçek yoğunluk}}}{q_{\text{Teorik yoğunluk}}} \times 100 \quad \text{Eşitlik (4.2.)}$$

kullanılmıştır.

5.2.6. Sertlik Ölçümleri

Toz metalurjisi ve sıcak presleme yöntemiyle üretilen kompozitlerin sertlik ölçümleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Emco Test Duravision 2000 marka sertlik ölçüm cihazı (**Şekil 4.11.**) ile her numune için farklı bölgeden alınan değerlerin ortalaması alınmak suretiyle, Brinell olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.11. Sertlik ölçüm cihazı

5.2.7. Çapraz Kırılma Testleri

Sıcak preslenmiş ve sinterleme işlemine tabi tutulmuş numunelerin çapraz kırılma testleri Instron 3369 model test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Çapraz kırılma testleri her bir kompozit için 3 farklı numunenin ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Test numunelerinin hazırlanmasında ve testlerin yapılmasında MPIF Standart 41 ve daha önce yapılmış çalışmalar referans alınmıştır. Kullanılan Instron marka test cihazı **Şekil 4.12.**'de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Instron 3369 model test cihazı

5.2.8. Metalografik İncelemeler

Toz metalurjisi ve sıcak presleme yöntemi ile üretilen Al 5154 matrisli seramik parçacık takviyeli kompozitlerin tane yapıları, tane sınırları, matris malzeme parçacık arayüzey uyumları ve elementel analizleri optik mikroskop ve SEM yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan optik mikroskop **Şekil 4.13.**' de sunulmuştur.

SEM ve EDS analizleri Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan JOEL JSM 6060 LV marka Taramalı Elektron Mikroskop cihazı (**Şekil 4.14.**) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13. Deneysel çalışmalarda kullanılan optik mikroskop



Şekil 4.14. JOEL marka Taramalı Elektron Mikroskobu

Bölüm 5

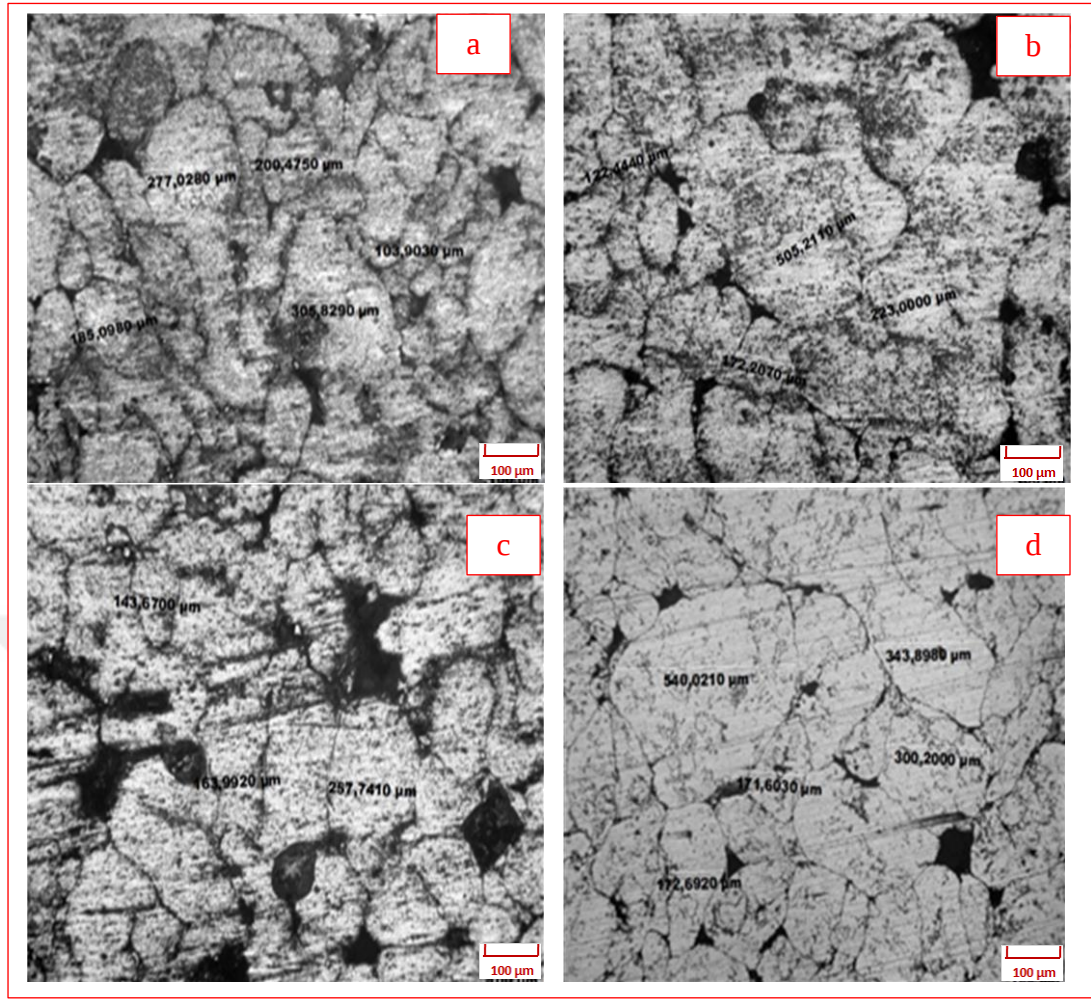
6. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemi (TM) kullanılarak metal matrisli kompozitler üretilmiştir. Al-5154 matrisli TiB_2 ve B_4C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisiyle üretimi ve mekanik özellikler üzerinde ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında TiB_2 ve B_4C takviyesinin malzeme özellikleri ve mikoyapıya etkileri araştırılmıştır. Üretilen kompozit deney numunelerinin mekanik özellikleri ve karakterizasyon işlemlerinden elde edilen sonuçlar ayrı ayrı incelenerek tartışılmıştır.

6.1. TiB_2 Takviyeli AA 5154 Matrisli Kompozitlerin Mikroskopik İncelenmesi

TiB_2 takviyeli Al-5154 metal matrisli kompozitlerin, optik mikroskopta yapılan incelemelerinde tozların sıcak presleme ve akabinde $580^{\circ}C$ sıcaklıkta, 1 saat süre ile yapılan sinterleme ile birbirleri arasında boyun vererek birleşmesi sonucu matrisin olduğu gözlemlenmiştir. **Şekil 5.1.**'deki görüntüler de beyaz kısım Al matris, koyu gri taneler TiB_2 ve siyah olan kısımların gözenek olduğu belirlenmiştir. Yapılan incelemede, takviye oranı arttıkça, gözenek oranının da (siyah bölgelerin) arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.1.a.'da ağırlıkça % 5 oranında TiB_2 içeren numuneye ait optik mikroskop görüntüsüne bakıldığında tanelerin birleştiği ve gözenekliliğin homojen olduğu saptanmıştır. Tane sınırlarında TiB_2 takviye tanelerinin genel olarak homojen dağıldığı fakat bazı bölgelerde biriktiği görülmüştür. Bu birikmelerin olduğu kısımlarda tanelerin birleşmesine engel oluşturduğu ve gözenekli yapının olduğu belirlenmiştir. %10 ve %15 TiB_2 takviyeli numunelerin Şekillerine bakıldığında takviye oranı arttıkça birikmelerinde arttığı ve gözenek oranının da arttığı görülmektedir. TiB_2 parçacıkların sahip oldukları yüksek mukavemetten dolayı tane oluşumu esnasında bariyer görevi gördüğü ve birikimli bölgelerde gözenek boyutunu artırıcı yönde etki yaptığı düşünülmektedir. **Şekil 5.1.**'de verilen optik mikroskop görüntüleri bu durumu destekler niteliktedir.



Şekil 5.1. TiB₂ Takviyeli Al-5154 Matrisli Kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri

a) % 5 TiB₂ Takviyeli

b) % 10 TiB₂ Takviyeli

c) % 15 TiB₂ Takviyeli

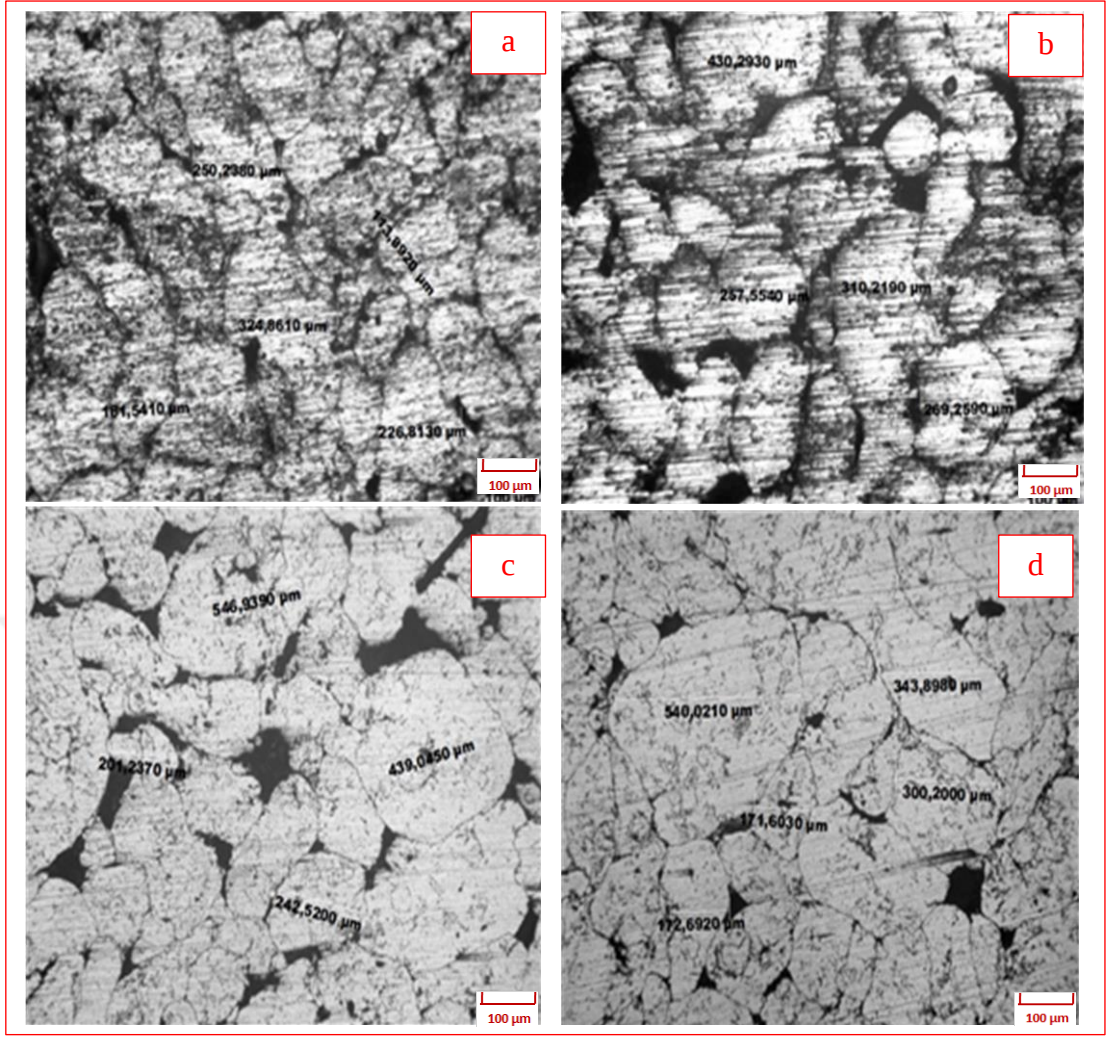
d) AA 5154

6.2. B₄C Takviyeli Al-5154 Matrisli Kompozitlerin Mikroskobik İncelenmesi

Şekil 5.2.'de sıcak presleme ve sinterleme işlemi yapılmış %5, 10 ve 15 B₄C içeren kompozit numunelere ait optik mikroskop Şekilleri verilmiştir. B₄C takviyeli Al-5154 metal matrisli kompozitlerin, optik mikroskopta yapılan incelemelerinde tozların sıcak presleme ve akabinde 580 °C sıcaklıkta, 1 saat süre ile yapılan sinterleme ile birbirleri arasında boyun vererek birleşmesi sonucu matrisin oluştuğu gözlemlenmiştir. **Şekil 5.2.**'de ki görüntüler de beyaz kısım Al matris, koyu gri taneler B₄C ve siyah olan kısımların gözenek olduğu belirlenmiştir. Yapılan incelemede, takviye oranı arttıkça gözenek oranının da (siyah bölgelerin) arttığı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.2.'de verilen optik mikroskop görüntülerine göre Al 5154 matris içerisinde bulunan parçacıklar homojen olarak dağılmıştır. Matris yapı üzerinde bulunan gözeneklerin ise birbirinden bağımsız olduğu gözlenmiştir. **Şekil 5.2.**'de verilen görüntüler incelendiğinde, numunelerde kısmen topaklanma olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 5.2.'de %5'lik B₄C takviyeli numuneye kompozitte tanelerin birleştiği ve gözenekliliğin homojen olduğu saptanmıştır. Tane sınırlarında B₄C takviye tanelerinin genel olarak homojen dağıldığı, fakat bazı bölgelerde biriktiği görülmüştür. Bu birikmelerin olduğu kısımlarda tanelerinin birleşmesine engel oluşturduğu ve gözenekli yapının oluştuğu belirlenmiştir. %10 ve %15 B₄C takviyeli numunelerin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde takviye oranı arttıkça birikmelerinde arttığı ve gözenek oranında arttığı görülmektedir. B₄C parçacıkların sahip oldukları yüksek mukavemetten dolayı tane oluşumu esnasında bariyer görevi gördüğü ve birikimli bölgelerde gözenek boyutunu artırıcı yönde etki yapmaktadır. **Şekil 5.2.** bu durumu destekler niteliktedir.



Şekil 5.2. B₄C Takviyeli Al-5154 Matrisli Kompozitlerin optik mikroskop görüntüleri

a) % 5 B₄C Takviyeli
c) % 15 B₄C Takviyeli

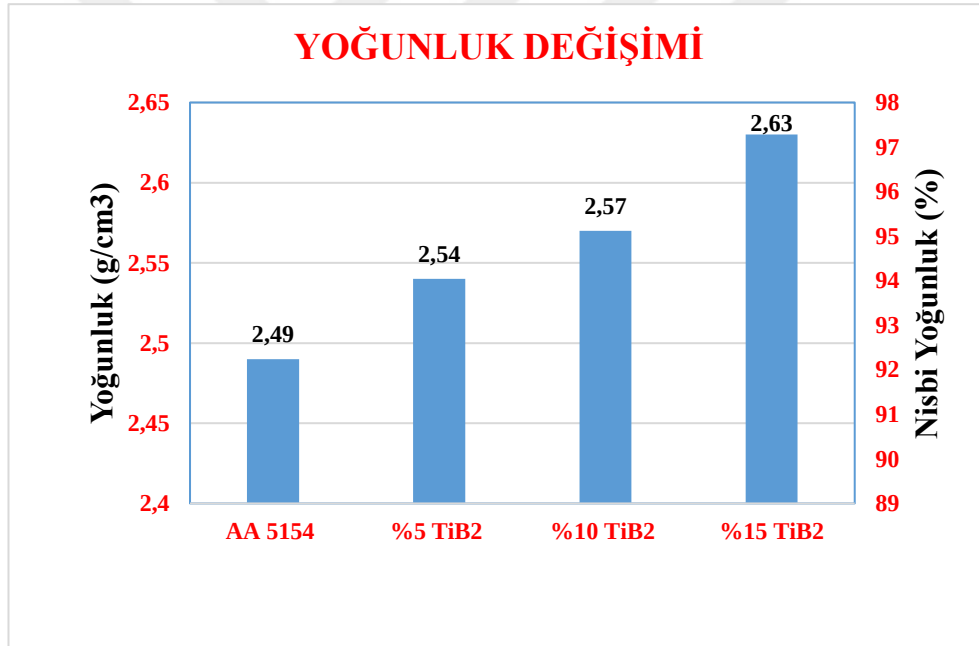
b) % 10 B₄C Takviyeli
d) AA 5154

6.3. Yoğunluk Ölçümleri

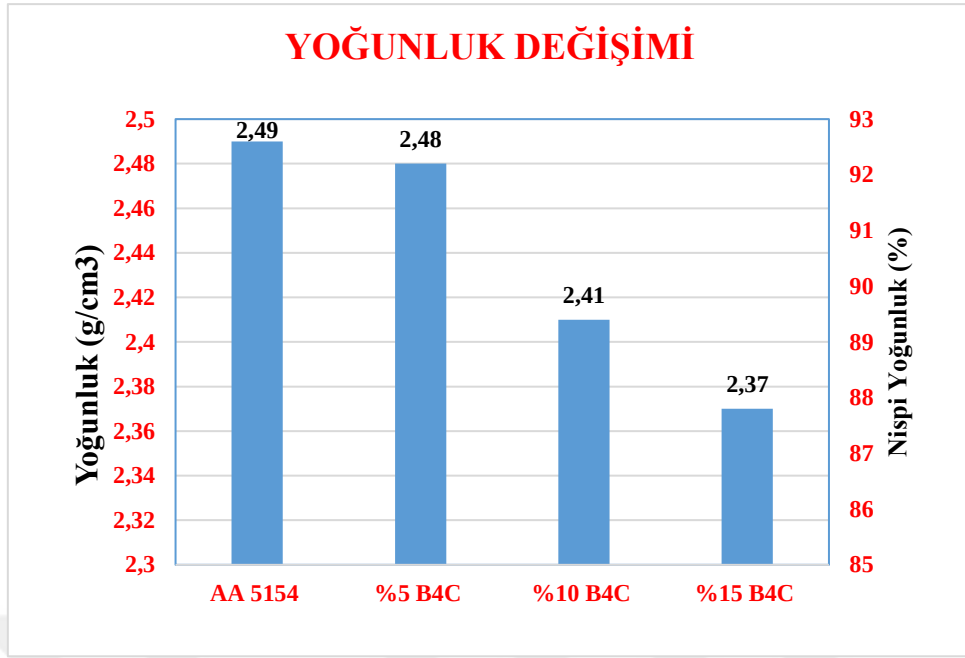
Sıcak presleme ile üretilen kompozit numunelerin yoğunluk ölçümleri, sinterleme işleminden sonra gerçekleştirilmiştir. Sinterlenen numunelerin yoğunluk ölçümleri Arshimed prensibine göre ölçülmüştür. Hesaplanan gerçek yoğunluk değerleri ile **Eşitlik (4.2.)**'den hesaplanan gözenek değerleri aşağıdaki **Çizelge 5.1.**'de verilmiştir. TiB₂ ve B₄C takviyeli kompozit numunelerinin yoğunluk değişimleri, **Şekil 5.3.** ve **Şekil 5.4.**'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Takviye oranlarına göre sinterlenen numunelerin yoğunluk değişimleri

NUMUNE KOMPOZİSYONLARI	YOĞUNLUK (g/cm ³)	GÖZENEK (%)
AA 5154 (Matris)	2,49	6,3
%5 TiB ₂ Takviyeli	2,54	9,2
%10 TiB ₂ Takviyeli	2,57	8,8
%15 TiB ₂ Takviyeli	2,63	7,2
%5 B ₄ C Takviyeli	2,48	6,4
%10 B ₄ C Takviyeli	2,41	8,7
%15 B ₄ C Takviyeli	2,37	9,8



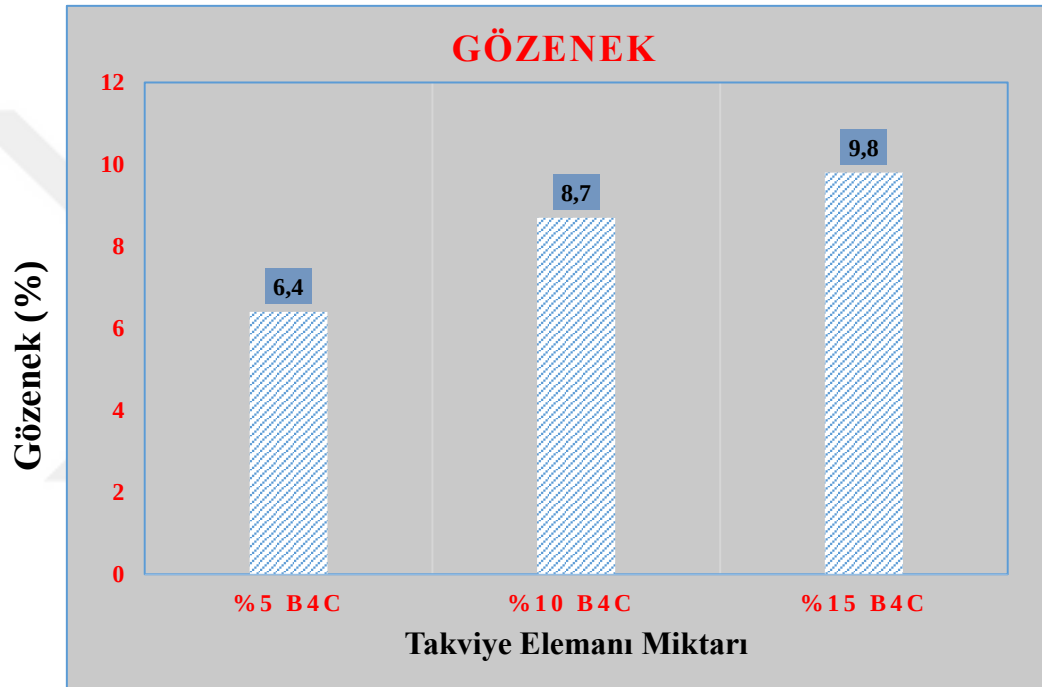
Şekil 5.3. TiB₂ takviyeli kompozit numunelerinin yoğunluk değişimleri



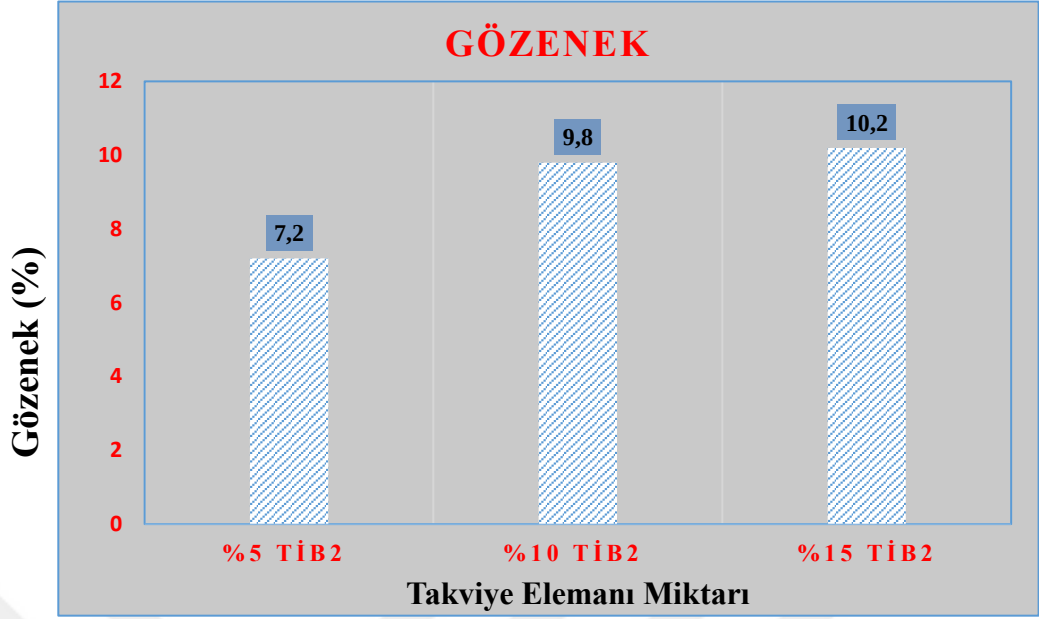
Şekil 5.4. B₄C takviyeli kompozit numunelerinin yoğunluk değişimleri

AA 5154 alaşımına ilave edilen TiB₂ ve B₄C oranlarına bağlı olarak, yoğunlukta değişimler olduğu görülmektedir. AA 5154 alaşım tozuna ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında TiB₂ ilave edildiğinde gerçek yoğunlukta artış olduğu, AA 5154 alaşım tozuna ağırlıkça %5, %10 ve %15' i oranında B₄C ilave edildiğinde üretilen kompozit malzemenin gerçek yoğunluğunda azalma olduğu görülmektedir. TiB₂ takviyeli kompozitin % takviye oranı arttıkça gerçek yoğunluğundaki artışın, TiB₂ yoğunluğunun (4,52 g/cm³), AA 5154 yoğunluğundan (2,66 g/cm³) yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. B₄C takviyeli kompozitin % takviye oranı arttıkça gerçek yoğunluğundaki azalmanın ise B₄C yoğunluğunun (2,52 g/cm³), AA 5154 yoğunluğundan (2,66 g/cm³) düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca takviye miktarının artışına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde meydana gelen azalmanın nedenin, matris malzeme ile parçacık ara yüzeyinde tespit edilen boşluklardan kaynaklanmaktadır. **Çizelge 5.1.**'de verilen değerlere bakıldığında, AA 5154 alaşımının gözeneklilik oranı % 6,3 olarak olarak ölçülmüştür. Yine **Çizelge 5.1.**'de görüldüğü gibi ; %5 TiB₂ takviyeli kompozitin gözeneklilik oranının % 7,2 , %10 TiB₂ takviyeli kompozitin gözeneklilik oranının % 9,8 , %15 TiB₂ takviyeli kompozitin gözeneklilik oranının %10,2 olduğu tespit edilmiştir.

B₄C takviyesi ve matris arayüzeyinin gözeneklilik ilişkisi değerlendirildiğinde ise; %5 B₄C takviyeli kompozitin gözeneklilik oranının % 6,4 , %10 B₄C takviyeli kompozitin gözeneklilik oranı % 8,7 , %15 B₄C takviyeli kompozitin gözeneklilik oranı % 9,8 olarak hesaplanmıştır. B₄C takviye oranı attıkça gözeneklerin arttığı görülmektedir. Parçacık miktarındaki artışa bağlı olarak, ara yüzeyde gözlenen gözenek miktarının arttığı ve bu nedenle yoğunluğun azaldığı anlaşılmıştır. Benzer durumlar, Gökmen'in [79] yaptığı çalışmada gözlenmiştir.



Şekil 5.5. B₄C takviye kompozitlerin gözenek miktarı



Şekil 5.6. TiB₂ takviye kompozitlerin gözenek miktarı

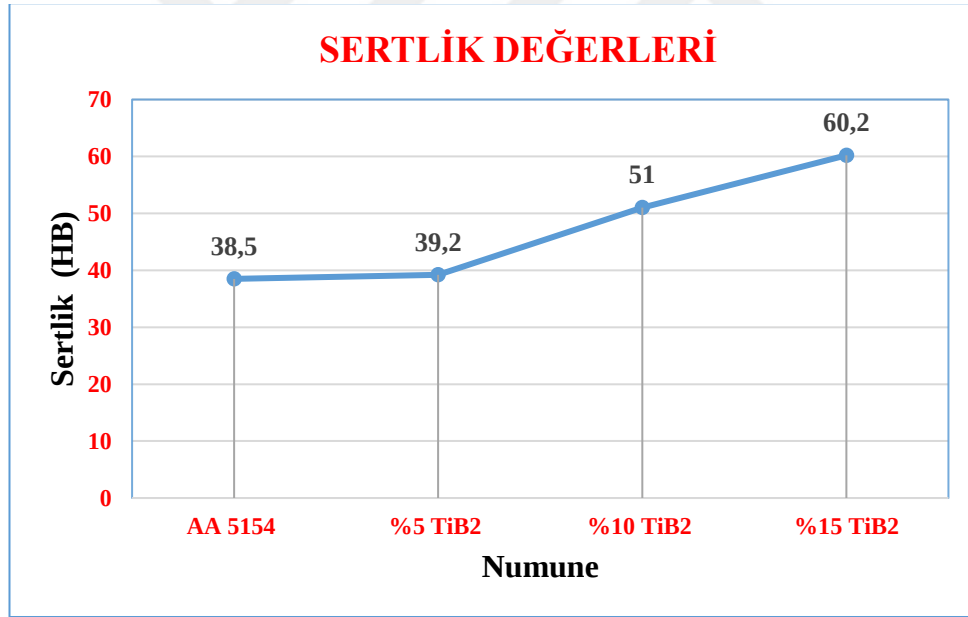
Kompozit malzemede, takviye elemanının artan hacim oranında teorik yoğunlukları artmaktadır. Bu durum yoğunluğu yüksek olan TiB₂ ve B₄C'ün hacim oranının artmasından kaynaklanmaktadır. Deneysel yoğunluklarda ise Şekil 5.4.'de görüldüğü gibi takviye hacim oranının artmasıyla deneysel yoğunluğun azaldığı görülmektedir. Kompozitte oluşan gözenekler takviye elemanı TiB₂ ve B₄C etrafında oluşmuştur. Takviye hacim oranının artmasıyla TiB₂ ve B₄C takviyelerinin etrafındaki gözenek miktarları da artmaktadır. Şekil 5.1.'de bu durumu açıklar niteliktedir. Benzer durum literatürde, Çalın'ın [80] yaptığı çalışmada da belirtilmektedir.

6.4. Sertlik Ölçümleri

Çizelge 5.2.'de, Al 5154 matrisli B₄C ve TiB₂ parçacık takviyeli sıcak presleme ve sinterleme işlemlerine tabi tutulmuş metal matrisli kompozit numunelerin Brinell sertlik değerleri görülmektedir. Al 5154 matris içerisinde artan TiB₂ parçacık miktarına bağlı olarak sertlikte artış olduğu belirlenmiştir. En düşük sertlik değeri takviye elemanı içermeyen Al 5154 numunelerde ölçülmüştür.

Çizelge 5.2. B₄C ve TiB₂ takviyeli alaşımların sertlik değişimleri

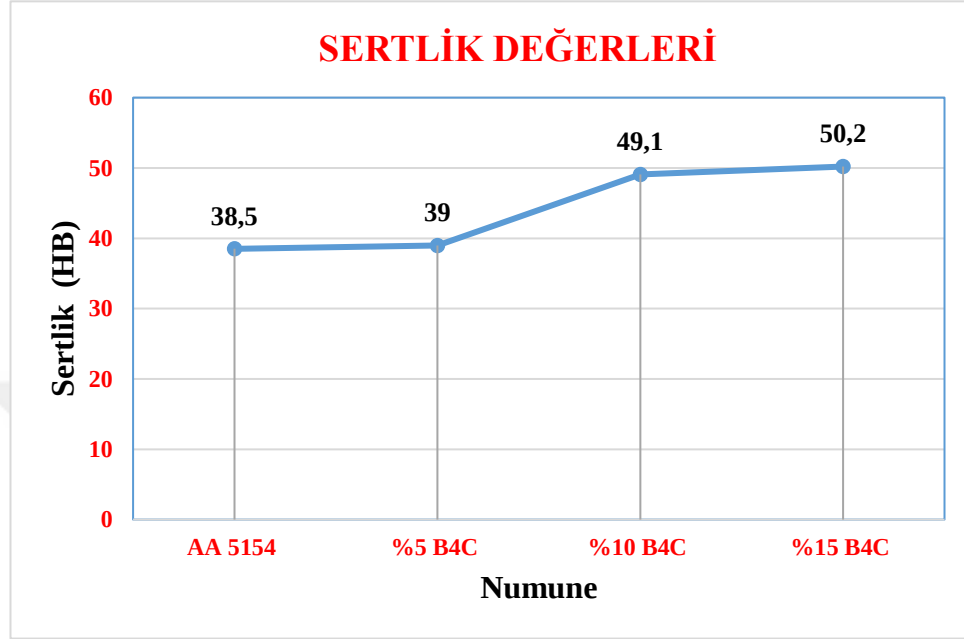
KOMPOZİTLERİN BİLEŞİMİ	SERTLİK DEĞERİ (HB)
AA 5154	38,5
% 5 TiB ₂	39,2
% 10 TiB ₂	51
% 15 TiB ₂	60,2
% 5 B ₄ C	39
% 10 B ₄ C	49,1
% 15 B ₄ C	50.2



Şekil 5.7. TiB₂ takviyeli kompozit numunelerinin sertlik değişimleri

Şekil 5.7.'de verilen AMK'lerin sertlik değişimleri incelendiğinde, TiB₂ Takviyeli Kompozitlerde takviye elemanı arttıkça, sertlik değerlerinin de arttığı görülmektedir.

En yüksek sertlik 60,2 HB ile % 15 TiB₂ takviyeli kompozitte elde edilmiştir. En düşük sertlik ise, takviye elemanı içermeyen AA 5154 alaşımında ölçülmüştür.



Şekil 5.8. B₄C takviyeli kompozitlerin sertlik değişimleri

Şekil 5.8.'de verilen AMK'lerin sertlik değişimleri incelendiğinde, ağırlıkça %5 B₄C içeren numunelerde sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. En düşük sertlik 39 HB ile % 5 B₄C takviyeli kompozitte tespit edilmiştir.

Al 5154 matris içerisinde aynı oranda B₄C ve TiB₂ içeren numunelere ait sertlik değerleri mukayese edildiğinde, TiB₂ içeren kompozitlerin sertlik değerlerinin yüksek çıktığı gözlenmektedir. Ağırlıkça % 5 ve 10 seramik parçacık takviyesi içeren numunelerden elde edilen sertlik değerinin bir birlerine yakın olduğu söylenebilir. Fakat % 15 TiB₂ içeren kompozit numunelerin sertlik değerleri, aynı oranda B₄C içeren numunelerden yaklaşık %20 daha fazladır. Bu önemli bir farktır. Aynı oranda takviye elemanı içeren Al 5154 matrisli kompozitlerin sertlik değerleri arasındaki farkın seramik parçacıkların karakteristik özelliklerinin yanı sıra matris takviye elemanı arayüzeylerin arasında oluşan boşluklardan kaynaklanmaktadır. B₄C miktarındaki artışa bağlı olarak yoğunluk azalırken, TiB₂ artışına bağlı olarak

yoğunluk artmıştır. Yoğunluk ve gözenekliliğin kompozitlerin mekanik özelliklerini etkilediği bilinmektedir [81,82].

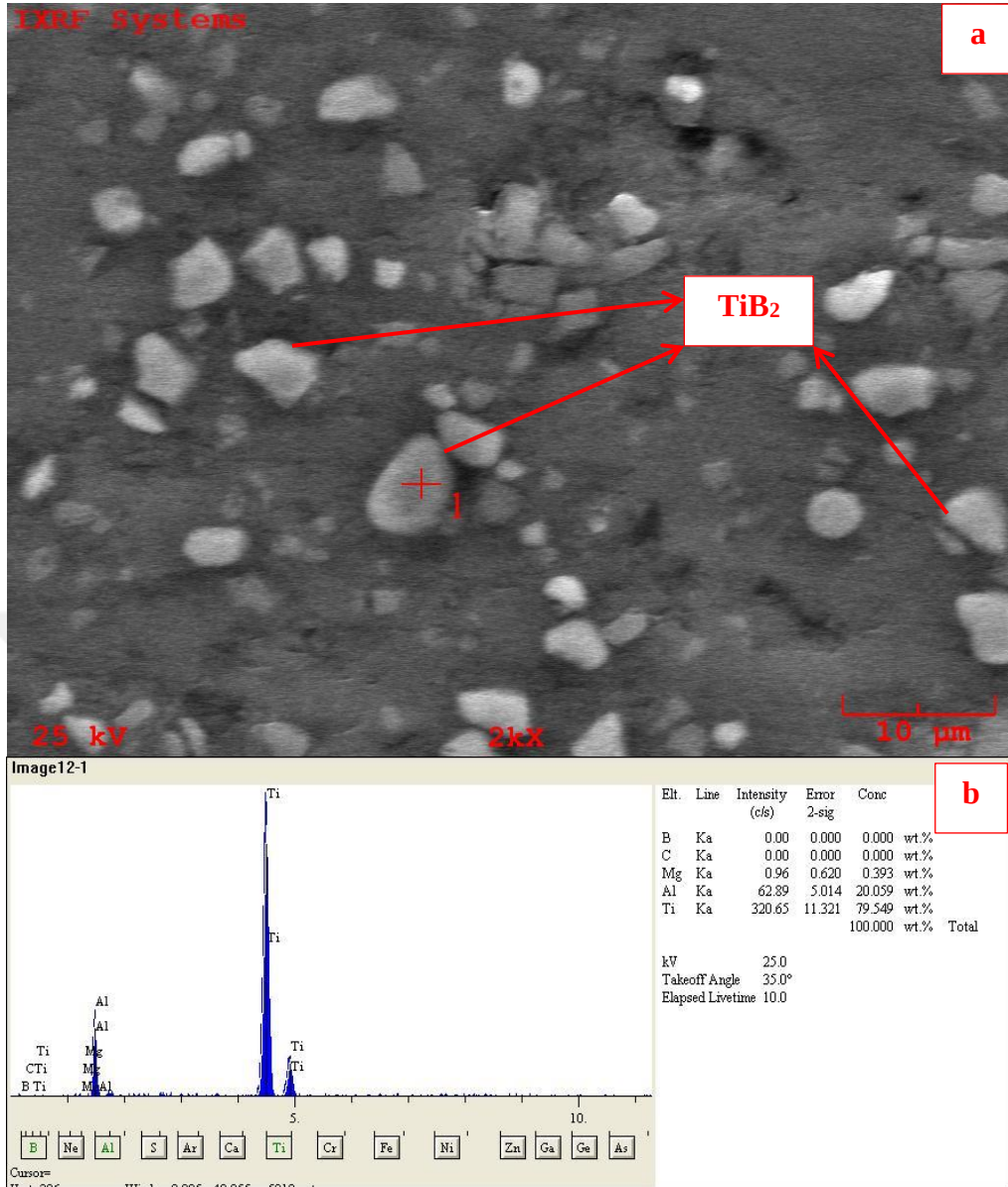
6.5. SEM ve EDS İncelemeleri

Optik mikroskop için hazırlanan numuneler, takviye tanelerin ıslanabilirliğinin, morfolojisinin, kimyasal kompozisyonunun ve mikroyapılarının daha detaylı bir şekilde belirlenmesi için SEM ve EDS incelemeleri yapılmıştır.

6.5.1. TiB₂ Takviyeli Al-5154 Matrisli Kompozitlerin SEM ve EDS Analizleri

% 5 TiB₂ takviyeli kompozitlerin mikroyapı SEM görüntüleri incelendiğinde **Şekil 5.9.a.**'da verilen (tanelerin biriktiği bölüm incelendiğinde) taneler arasında matris takviye elemanı birleşmesinin tam olmadığı ve bazı kısımlarında gözenekler olduğu görülmektedir. EDS(noktasal) incelemesinde beyaz kısmın TiB₂ olduğu **Şekil 5.9.b.**'de verilen kimyasal analizde saptanmıştır.

Belirlenen gözenekler beyaz renkte görülen tanelerin kenar kısımlarında siyah boşluklar olarak görülmektedir.

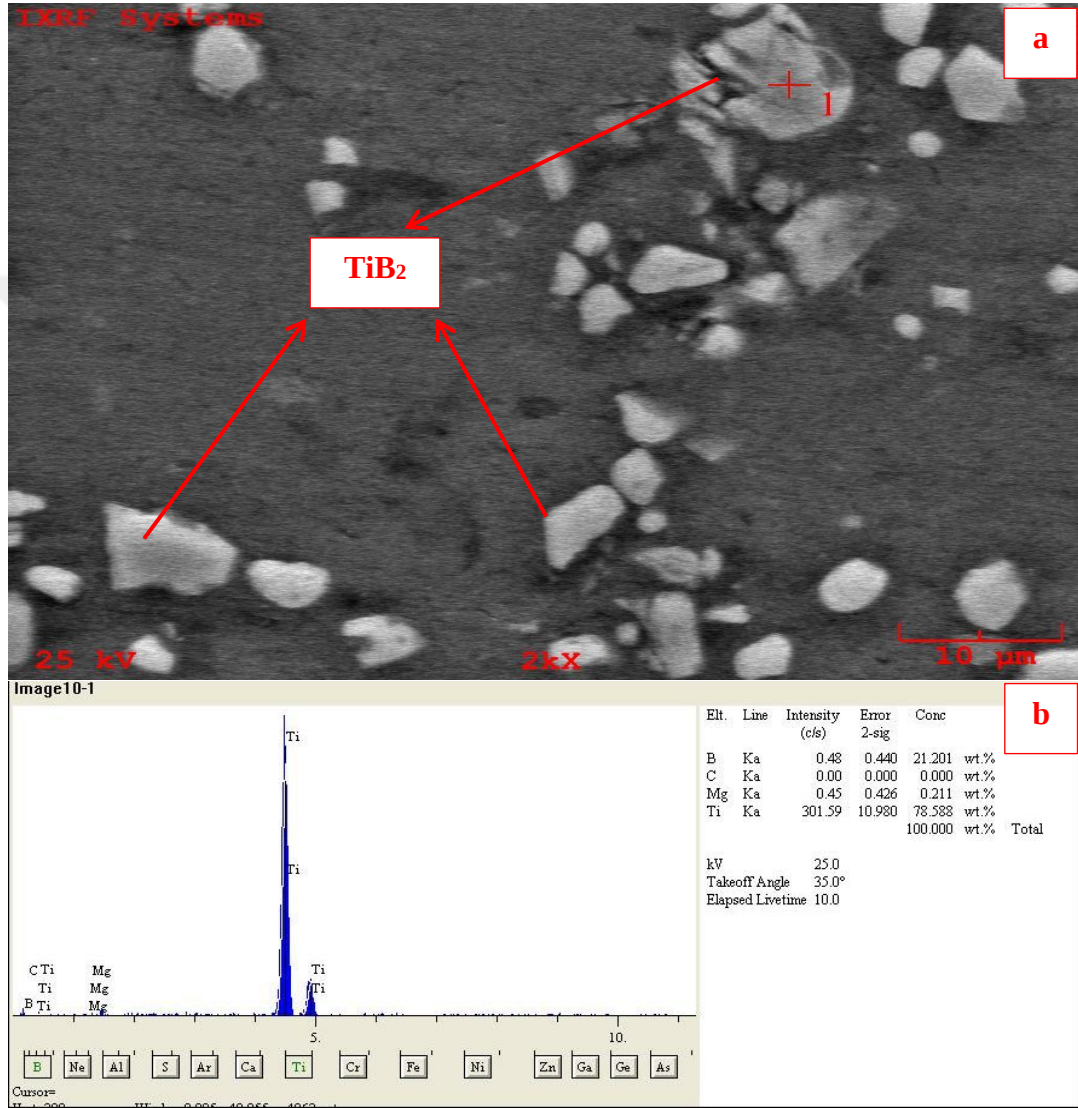


Şekil 5.9. %5 TiB₂ Takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı

a) SEM Görüntüleri ve **b) EDS Sonuçları**

%10 TiB₂ takviyeli kompozitlerin mikroyapı SEM görüntüleri incelendiğinde **Şekil 5.10.a.**'da verilen (tanelerin biriktiği bölüm incelendiğinde) tanelerin % 5' TiB₂ takviyelideki gibi homojen dağılmadığı belirlenmiş, biraraya toplanan tanelerin arasında gözeneklerin olduğu görülmektedir. Tanelerin arasında matris takviye elemanı birleşmesinin tam olmadığı ve bazı kısımlarında gözenekler olduğu görülmektedir. EDS (noktasal) incelemesinde, beyaz kısmın TiB₂ olduğu **Şekil**

5.10.b.'de anlaşılmaktadır. Belirlenen gözenekler beyaz renkte görülen tanelerin kenar kısımlarında siyah boşluklar olarak görülmektedir. Takviye oranı arttıkça, birikmenin daha çok olduğu, tanelerin daha az homojen olduğu, tanelerin daha fazla bir araya geldiği görülmektedir.



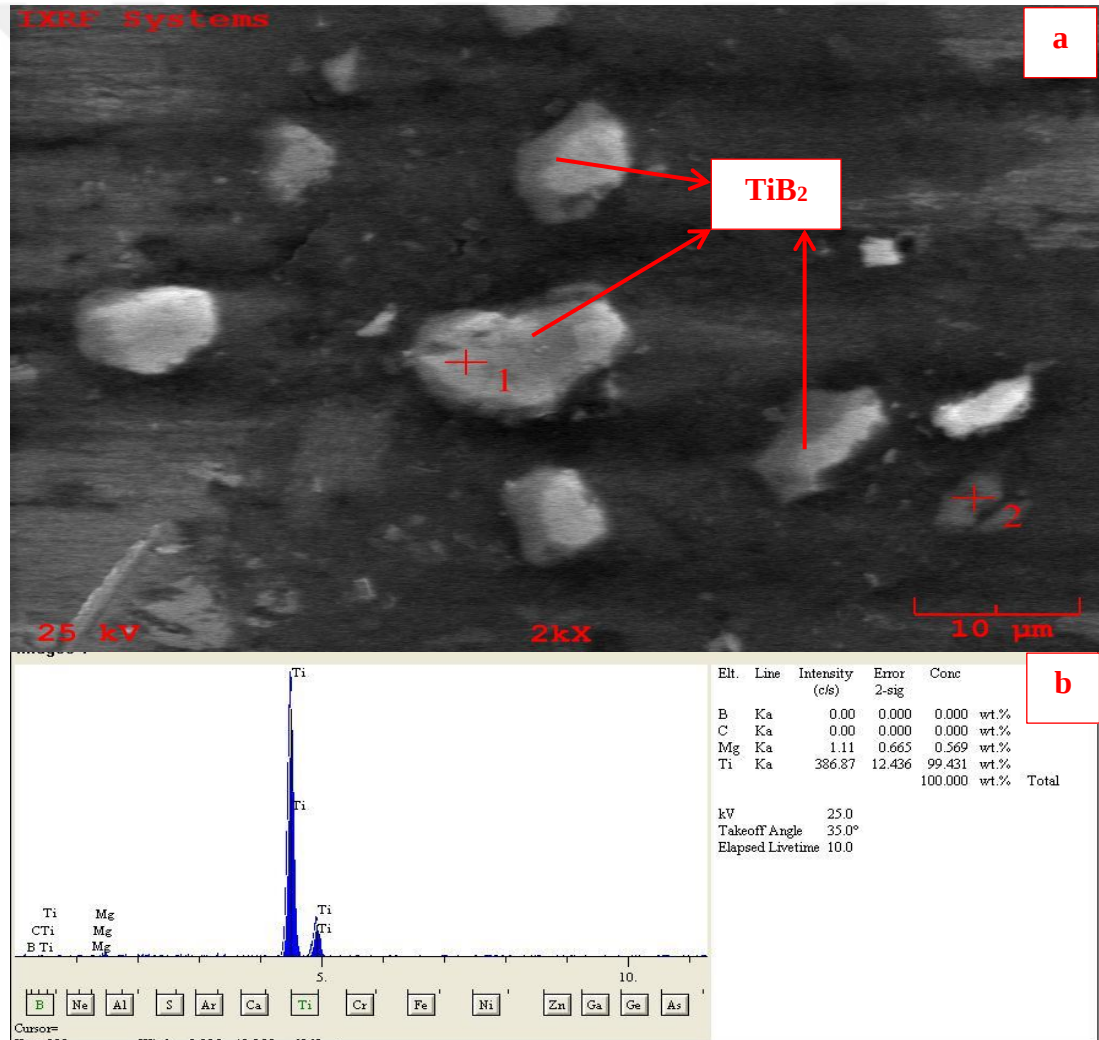
Şekil 5.10. %10 TiB₂ takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı

a) SEM görüntüleri

ve b) EDS Sonuçları

Şekil 5.11.'de %15 TiB₂ seramik parçacık içeren AA 5154 matrisli numunelere ait SEM ve EDS görüntüleri mevcuttur. TiB₂ seramik parçacıkların matris yüzeyinde

homojen dağıldığı gözlenmiştir. Ağırlıkça %10 TiB₂ içeren numuneler ile %15 TiB₂ içeren numunelerin matris parçacık dağılım homojenliği kısmen birbirine yakındır. %10, %10 ve %15 TiB₂ olmak üzere bütün numunelerde AA 5154 matris ile seramik parçacıkları arası boşlukların az olduğu ve matris/parçacık arayüzeyinde oluşan ıslatmanın iyi durumda olduğu düşünülmektedir. Parçacıklar etrafında oluşan gözeneklerin azalmasında sıcak presleme yönteminin etkin olduğu söylenebilir. Noktasal EDS incelemesinde beyaz kısmın TiB₂ olduğu Şekil 5.11.b.'de anlaşılmaktadır. Yapıda oluşan gözenekler, beyaz renkte görülen tanelerin kenar kısımlarında siyah boşluklar olarak görülmektedir.

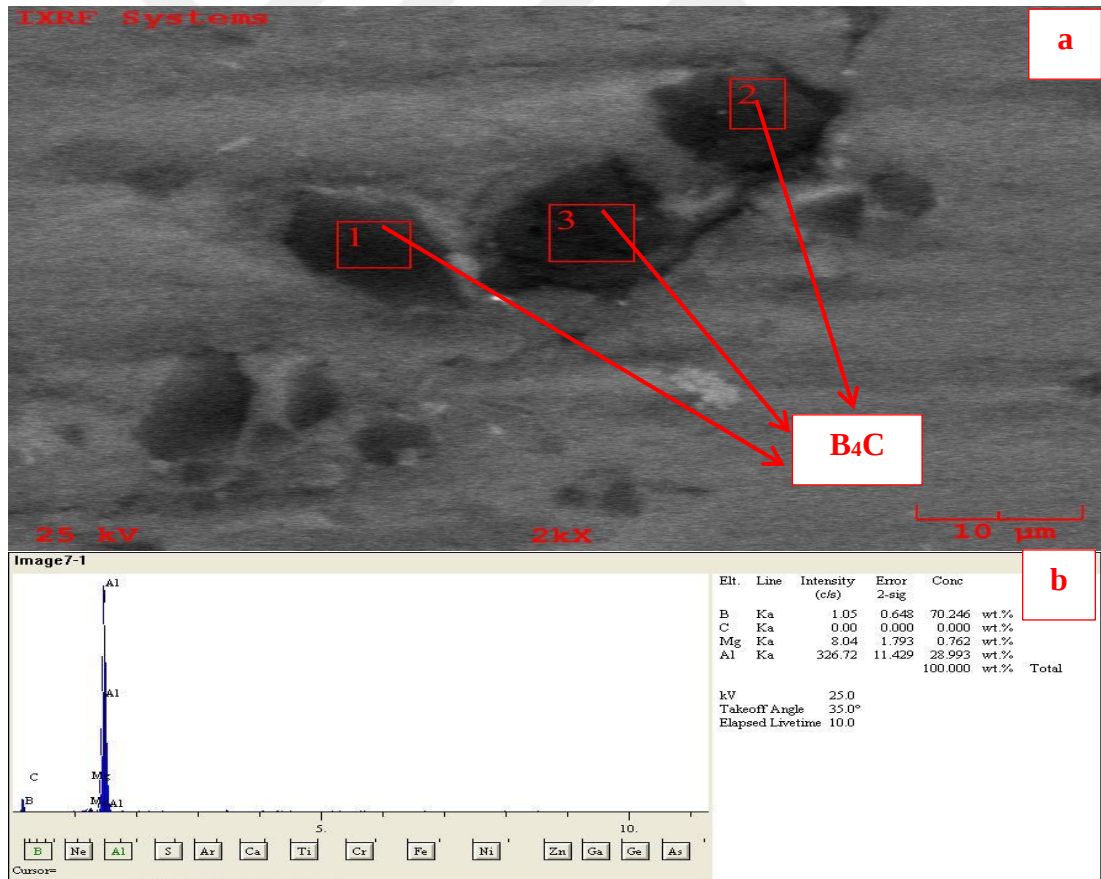


Şekil 5.11. %15 TiB₂ Takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı

a) SEM görüntüleri ve b) EDS Sonuçları

6.5.2. B₄C Takviyeli Al-5154 Matrisli Kompozitlerin SEM ve EDS Analizleri

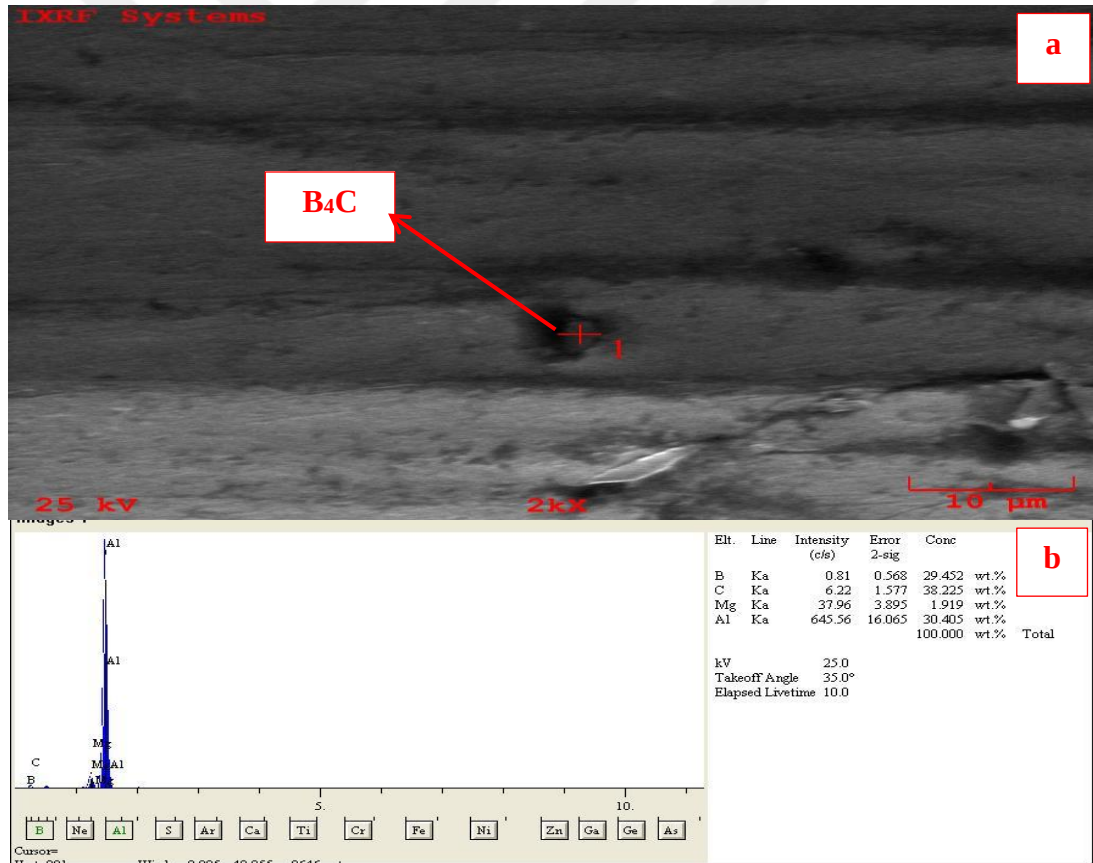
Şekil 5.12.a.'da verilen %5 B₄C takviyeli kompozitlerin mikroyapı SEM görüntüleri incelendiğinde (tanelerin biriktiği bölüm incelendiğinde) taneler arasında matris takviye birleşmesinin tam olmadığı ve bazı kısımlarında gözenekler olduğu görülmektedir. EDS incelemesinde koyu kısmın B₄C, gri kısımların matris malzemesi olan AA 5154 olduğu görülmüştür. Yapıda oluşan gözenekler, beyaz renkte görülen tanelerin kenar kısımlarında siyah boşluklar olarak görülmektedir. Şekil 5.12.b.'de verilen EDS analiz değerleri incelendiğinde yüksek oranda B elementinin varlığı görülmektedir. Elde edilen değer AA 5154 matris içerisinde B elementi olmadığı düşünüldüğünde tespit edilen parçacıkların B₄C olduğunu kuvvetle destekler niteliktedir.



Şekil 5.12. % 5 B₄C takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı

a) SEM görüntüleri ve b) EDS Sonuçları

Şekil 5.13.a.'da verilen %10 B₄C takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde (tanelerin biriktiği bölüm incelendiğinde) % 10 B₄C takviyeli kompozitte tanelerin tam olarak homojen dağılmadığı görülmüş, görüntülerde koyu gri olan kısımlar B₄C'nin toplandığı kısımlar olarak EDS (noktasal) analiziyle belirlenmiştir. Bu biraraya birikmeden dolayı gözenek oranı TiB₂ takviyelilerde olduğu gibi artış göstermiştir. EDS analiz incelemesinde koyu kısmın B₄C, gri kısımların matris malzemesi olan AA 5154 olduğu **Şekil 5.13.b.**'de verilen kimyasal analizde görülmüştür. Yapıda oluşan gözenekler beyaz renkte görülen tanelerin kenar kısımlarında siyah boşluklar olarak görülmektedir. Takviye elemanı oranı arttıkça, takviye elemanı oranı %10'a çıkarıldığında, birikmenin daha çok olduğu, tanelerin daha az homojen olduğu, tanelerin daha fazla bir araya geldiği görülmektedir.

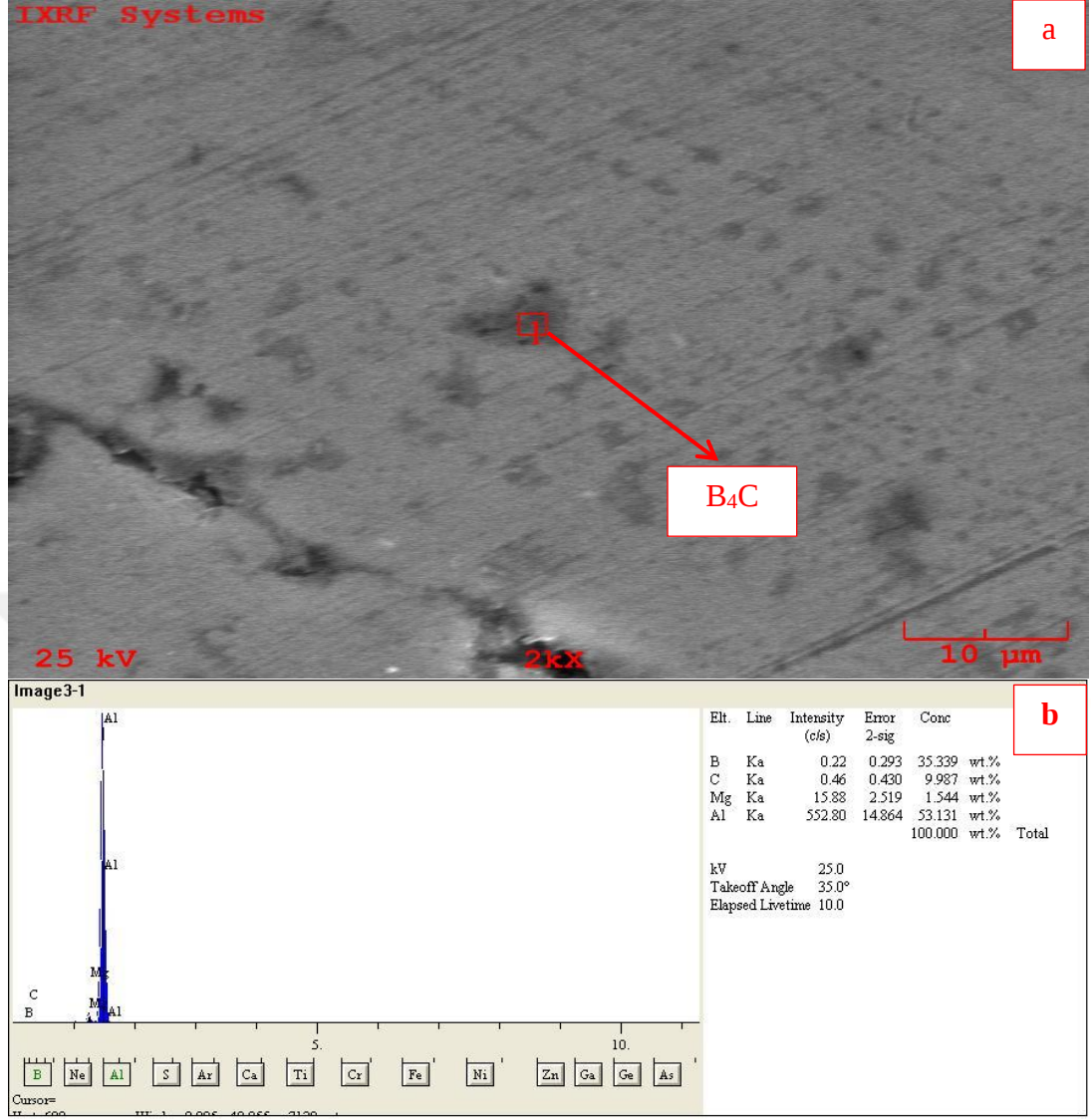


Şekil 5.13. % 10 B₄C takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı

a) SEM görüntüleri ve b) EDS Sonuçları

Şekil 5.14.a.'da verilen % 15 B₄C takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde (tanelerin biriktiği bölüm incelendiğinde) %10 B₄C takviyeli malzemeye göre daha homojen bir araya geldiği fakat belli bölgelerde hat şeklinde biriktiği görülmüştür. Bu birikmelerin olduğu kısımlarda araya ana malzeme giremediği için siyah olarak görünen gözenek olduğu görülmektedir. **Şekil 5.14.b.**'de görülen koyu gri bölgeden alınan kimyasal EDS (noktasal) incelemesinde bu bölgelerin B₄C taneleri olduğu, gri kısımların ise matris malzemesi olan AA 5154 olduğu görülmüştür. Yapıda oluşan gözenekler beyaz renkte görülen tanelerin kenar kısımlarında siyah boşluklar olarak görülmektedir. Takviye elemanı oranı arttıkça, takviye elemanı oranı % 15'e çıkarıldığında, birikmenin daha çok olduğu, tanelerin daha az homojen olduğu, tanelerin daha da fazla bir araya geldiği görülmektedir.

Sonuç olarak, TiB₂ ve B₄C takviyeli numunelerde takviye oranı arttıkça birikmelerin olduğu homojenlikten uzaklaştığı ve biriken taneler arasında gözenekliliğin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca tanelerin yapısından dolayı, AA 5154 matrisle tam birleşme olmadığı ve takviye taneler etrafında siyah bölgelerin (gözeneklerin) olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda takviye oranları arttıkça gözeneklilik oranları da artmıştır.



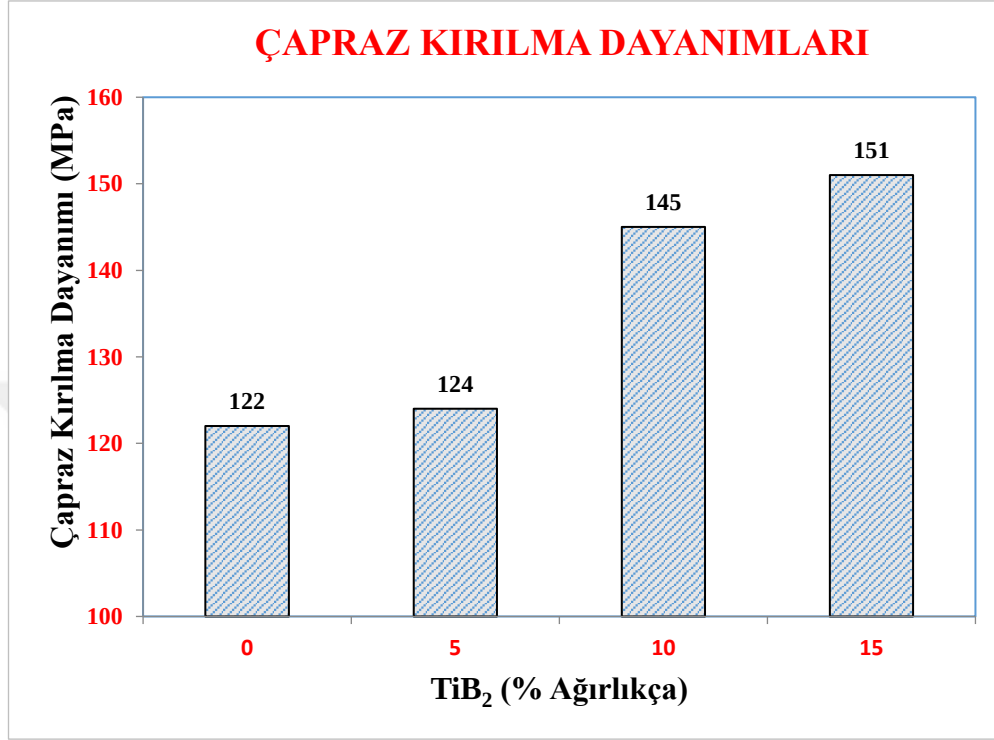
Şekil 5.14. %15 B₄C takviyeli alüminyum kompozitlerin mikroyapısı

a) SEM görüntüleri **ve** **b)** EDS Sonuçları

6.6. Çapraz Kırılma Dayanımları

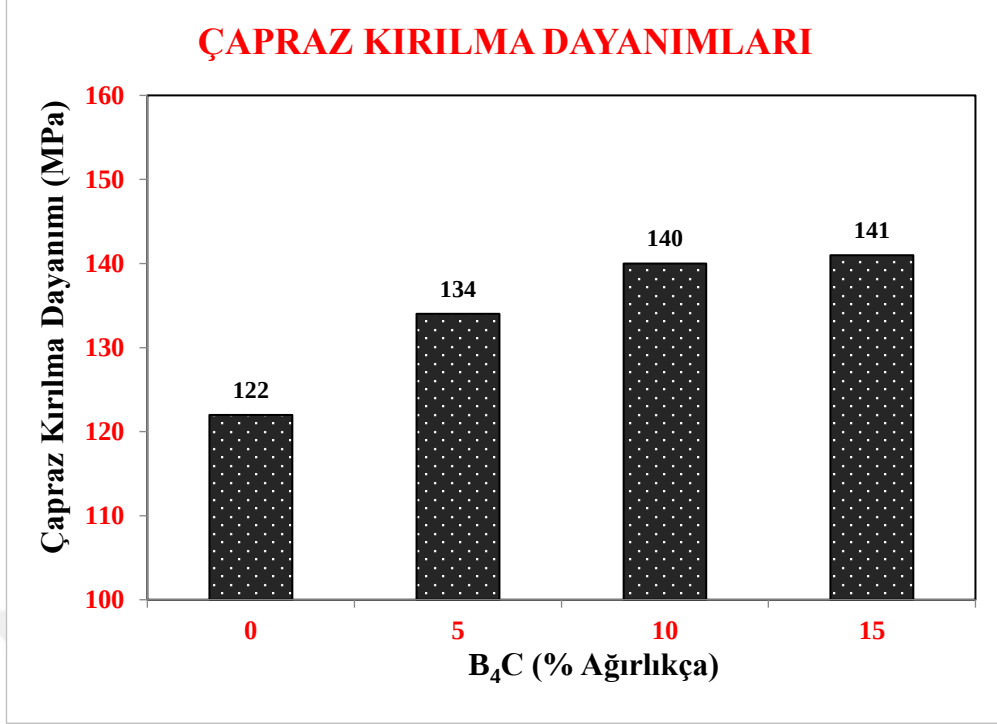
Şekil 5.15.'de TiB₂ içeren kompozit numunelerin çapraz kırılma dayanımı sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek çapraz kırılma dayanımı, 151 MPa ile %15 TiB₂ içeren kompozit numunede elde edilmiştir. Ağırlıkça %10 ve 15 TiB₂ içeren numunelerde ulaşılan çapraz kırılma dayanımı değerlerinin birbirlerine

yakın olduğu gözlenmiştir. En düşük çapraz kırılma dayanımı 122 MPa ile takviye elemanı içermeyen AA 5154 Alüminyum alaşımı kompozit numunede elde edilmiştir.



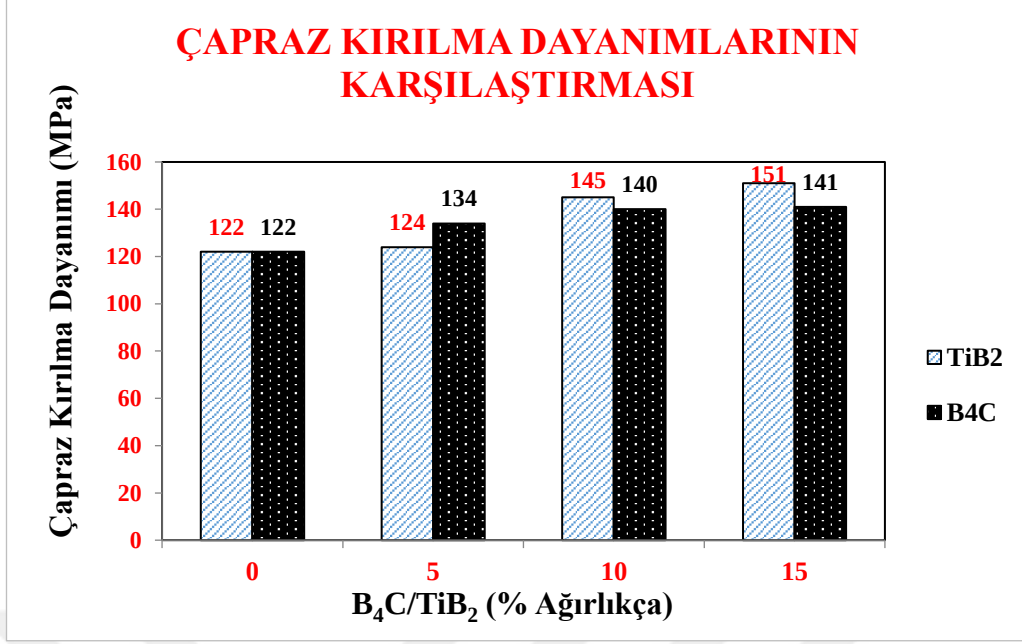
Şekil 5.15. TiB₂ takviyeli kompozitlerin çapraz kırılmaz dayanımları

Şekil 5.16'da B₄C içeren kompozit numunelerin çapraz kırılma dayanımı sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde artan B₄C miktarına bağlı olarak kompozitlerin çapraz kırılma dayanımı artmaktadır. B₄C takviyeli kompozitler kendi aralarında karşılaştırıldığında en yüksek çapraz kırılma dayanımı, 141 MPa ile %15 B₄C içeren kompozit numunede elde edilmiştir.



Şekil 5.16. B₄C takviyeli kompozitlerin çapraz kırılmaz dayanımları

Şekil 5.17.'de B₄C ve TiB₂ takviyeli kompozitlerin çapraz kırılmaz dayanımlarının karşılaştırılması verilmiştir. TiB₂ takviyeli kompozitlerin B₄C takviyeli kompozitlere kıyasla daha yüksek dayanım sergilediği tespit edilmiştir. Aynı takviye elemanı oranına sahip sıcak presleme yöntemiyle elde edilen numunelerde görülen dayanım farkının yoğunluk farkından ve gözeneklilik miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.17. B₄C ve TiB₂ takviyeli kompozitlerin çapraz kırılmaz dayanımlarının karşılaştırılması

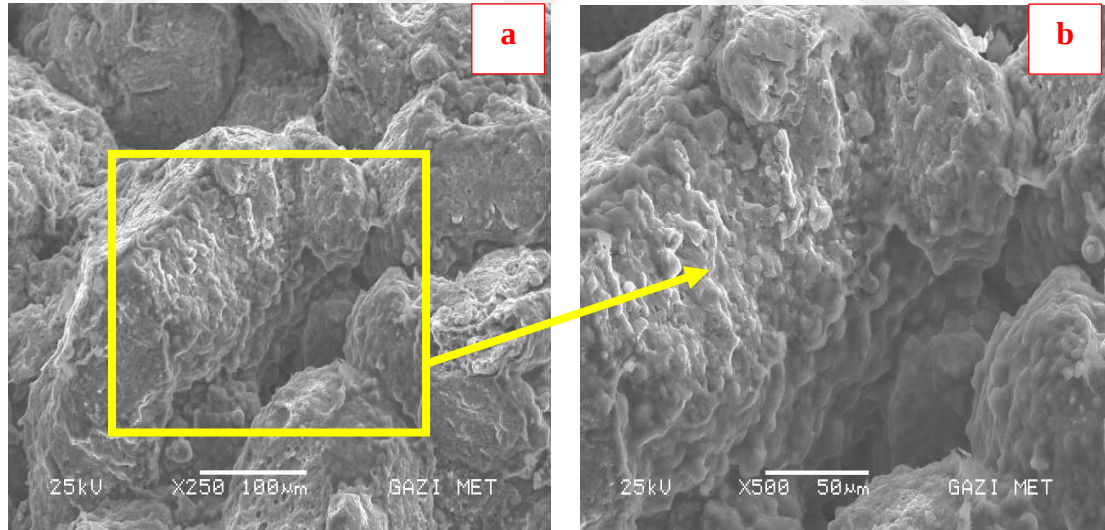
6.7. Kırık Yüzey İncelemeleri

Şekil 5.18 ile Şekil 5.24. arasındaki şekillerde sıcak presleme yöntemiyle üretilmiş AA 5154 matrisli kompozit numunelere ait çapraz kırılma işlemi sonrası elde edilen farklı büyütmelerdeki kırık yüzey SEM görüntüleri verilmektedir. Al alaşımlarında hasarın genellikle büyük çökeltilerin ve parçacık kümelenmelerinin olduğu bölgelerde bazen de küçük çökelti etrafında ve mikro çatlaklar ile başladığı bilinmektedir [83]. Bütün numuneler çukurcuklu sünek kırılma davranışı sergilemiştir.

TiB₂ takviyeli AA 5154 Matrisli Kompozitlerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri Şekil 5.19. ile Şekil 5.21. arasında verilmiştir. Şekil 5.19.'da görülen alüminyum alaşımlarının yüzeyinin çukurcuklu bir görünüm sergilediği görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde AA 5154 matrisin kırık yüzeyinde TiB₂ seramik parçacıklarının katmanlar arasında sıkıştığı ve yük altında kırılmanın gerçekleştiği söylenebilir. Katman katman görülen bu yapının sünek bir kırılma sonucunda oluştuğu anlaşılmıştır. Bu alaşımların kırılma davranışına TiB₂ katkısının etkisi Şekil 5.19. ile

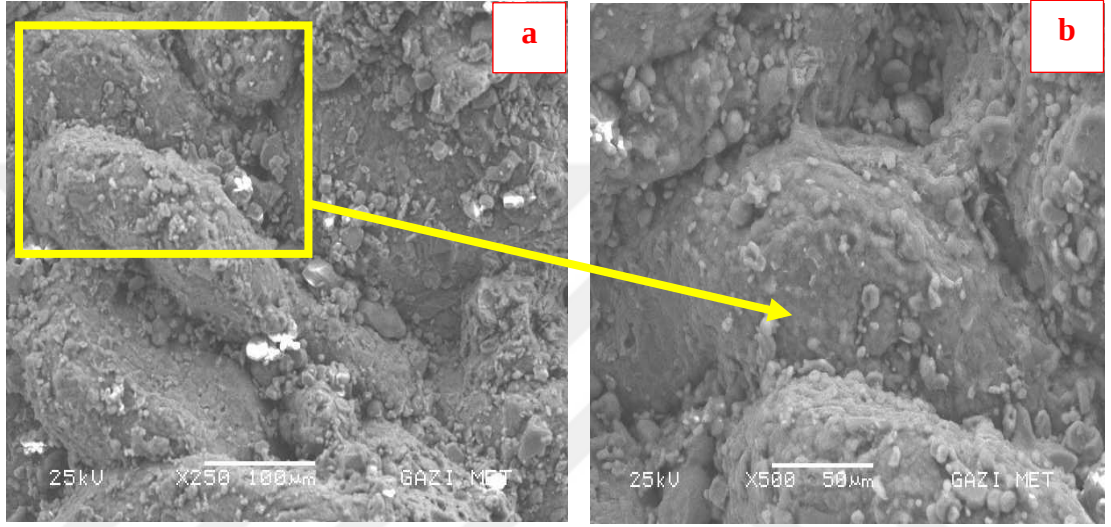
Şekil 5.21. arasında verilmiştir. Bu Şekillere bakıldığında TiB_2 ilavesiyle yüzeylerin parlak ve pürüzsüzleştiği görülmüştür

B_4C takviyeli AA 5154 Matrisli kompozitlerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri **Şekil 5.22** ile **Şekil 5.24** arasında verilmiştir. B_4C oranı arttıkça kırılma yüzeylerinde farklı bir değişim görülmemiştir. B_4C katkısının söz konusu alüminyum alaşımının kırılma davranışını çok fazla etkilemediği, etkin kırılma mekanizmasının sünek bir kırılma olduğu gözlenmiştir. Matrisin sünek olarak kopması parçacığın matris yüzeyine daha iyi gömüldüğüne bir işaret olarak düşünülmektedir. Çukurcukların boyutunun büyümesinin parçacık matris ilişkisini geliştirdiği ve sünek davranışı arttırdığı, küçük çukurcukların ise düşük süneklığe işaret ettiği bilinmektedir [84]. Parçacık ilavesiyle çukurlu kopma modlarının daha mikro düzeyde olması sünekliğin kısıtlı olmasına neden olmuştur. B_4C ve TiB_2 katkısının artması ile sünek kırılma davranışı gevrek kırılma davranışına dönüşebileceği düşünülmektedir. **Şekil 5.22.** ile **Şekil 5.24** arasında sergilenen görüntüler bu durumu destekler niteliktedir.

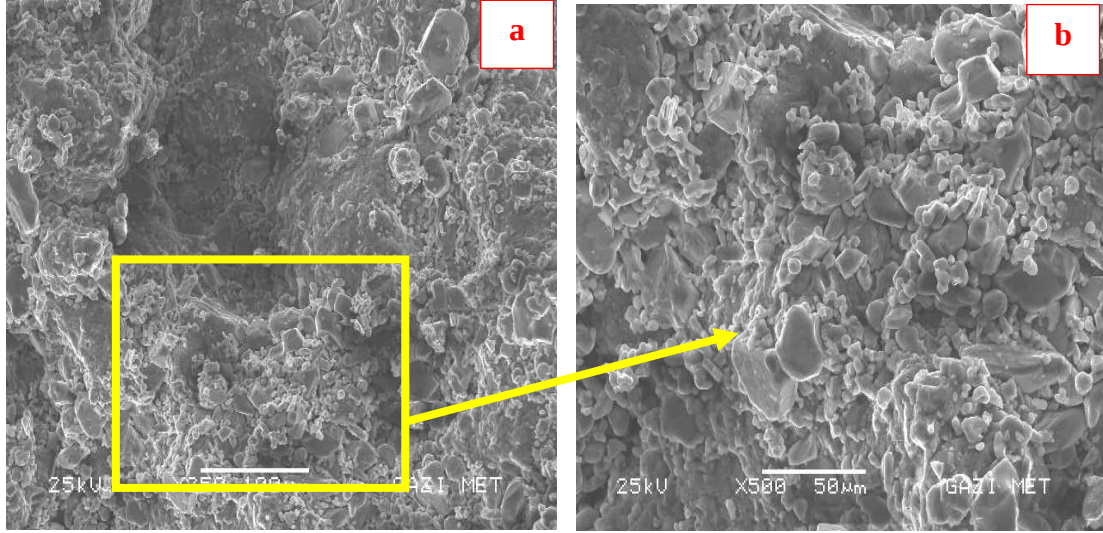


Şekil 5.18. Çapraz kırılma testi sonrası AA 5154 matrisli numunenin kırık yüzey görüntüleri **a)** X250 Büyütme **b)** X500 büyütme

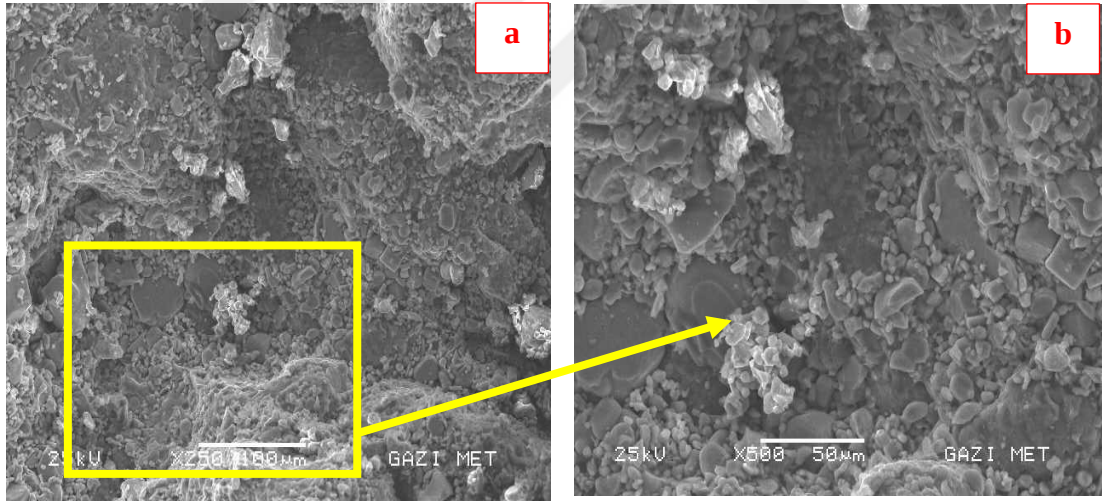
% 5 TiB₂ takviyeli AA 5154 matrisli kompozitlerin kırılma yüzeylerinde gözlenen çukurcukların boyutunun, % 15 TiB₂ takviye içeren kompozitlere kıyasla daha küçük olduğu gözlenmiştir. Bu durumun artan TiB₂ miktarına paralel olarak topaklanmanın artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. AA 5154 matrisin sünek kopma davranışı sergilemesi TiB₂ seramik parçacıkların matris yüzeyine sağlam durumda gömüldüğüne bir işaret olarak düşünülmektedir.



Şekil 5.19. Çapraz kırılma testi sonrası % 5 TiB₂ takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri **a)** X250 Büyütme **b)** X500 büyütme



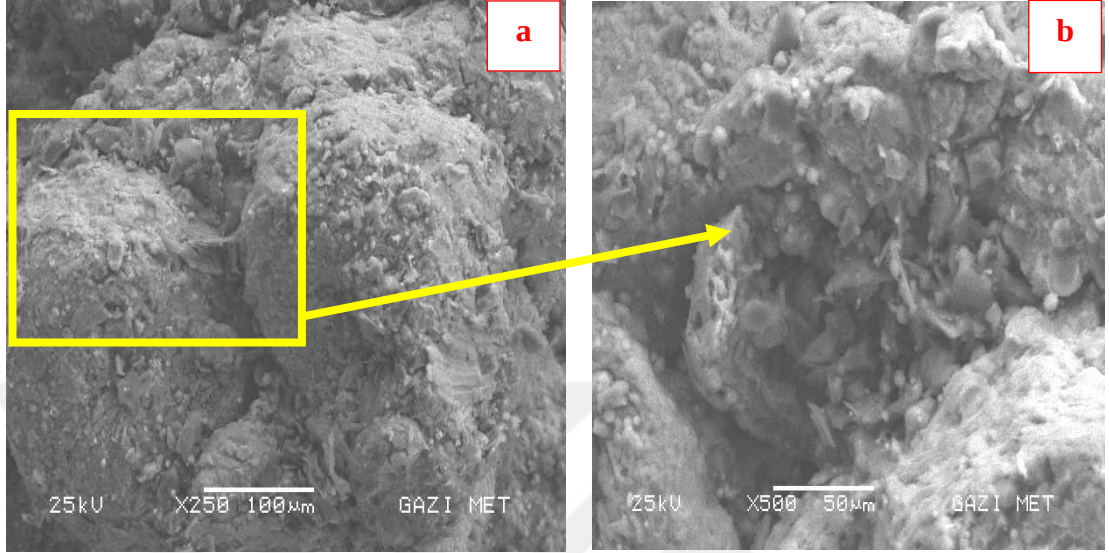
Şekil 5.20. Çapraz kırılma testi sonrası % 10 TiB₂ takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri **a)** X250 Büyütme **b)** X500 büyütme



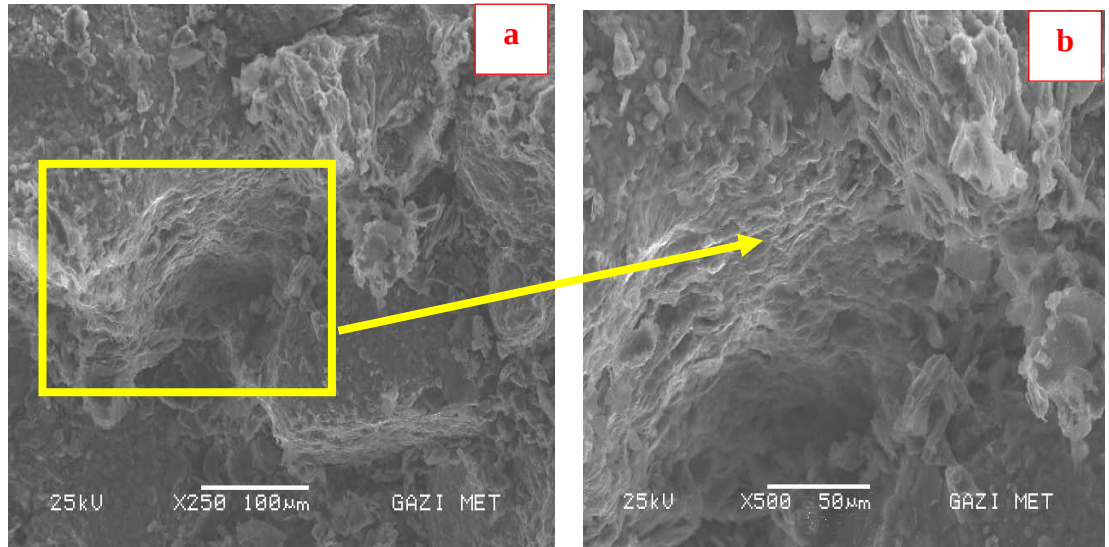
Şekil 5.21. Çapraz kırılma testi sonrası % 15 TiB₂ takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri **a)** X250 Büyütme **b)** X500 büyütme

Şekil 5.22. ile Şekil 5.24’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde matris yapının katmanları arasında B₄C seramik parçacıkları sıkıştığı ve oluşan dinamik yükün kırılmayı tetiklediği düşünülmektedir. AA 5154 matris içerisinde bulunan B₄C miktarı

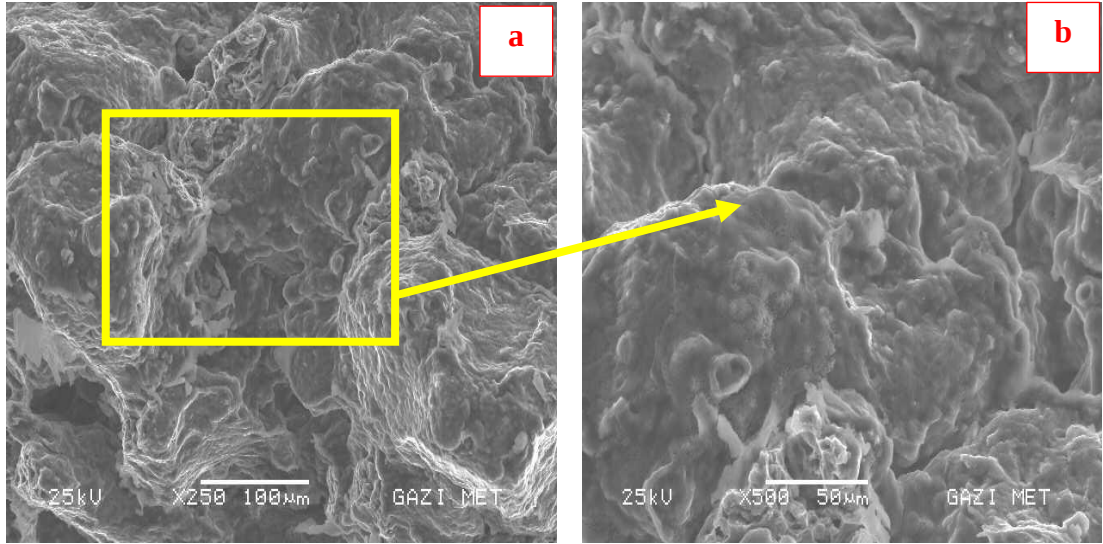
arttıkça topaklanmanın arttığı ve duruma paralel olarak boşluk çaplarının genişlediği gözlenmiştir.



Şekil 5.22. Çapraz kırılma testi sonrası % 5 B₄C takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri **a)** X250 Büyütme **b)** X500 büyütme



Şekil 5.23. Çapraz kırılma testi sonrası % 10 B₄C takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri **a)** X250 Büyütme **b)** X500 büyütme



Şekil 5.24. Çapraz kırılma testi sonrası % 15 B₄C takviyeli numunenin kırık yüzey görüntüleri **a)** X250 Büyütme **b)** X500 büyütme

Bölüm 6

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada toz metalurjisi ve sıcak presleme yöntemiyle AA 5154 tozu içerisine farklı miktarlarda takviye malzemesi olarak B_4C (Ağırlıkça % 5, 10, 15 oranlarında) ile TiB_2 (Ağırlıkça % 5, 10, 15 oranlarında) ilave edilerek hazırlanan tozlar kalıpta 300 °C ye kadar ısıtıldıktan sonra 200 MPa basınç uygulanarak deney numuneleri elde edilmiştir. Daha sonra deney numuneleri 580 °C’de 1 saat süreyle sinterlenerek metalografik incelemelere tabi tutulmuştur.

Üretilen numunelerde TiB_2 ve B_4C takviyelerinin etkileriyle ilgili sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

1. TiB_2 ve B_4C takviyeli numunelerde takviye oranı arttıkça topaklanmaların ve gözenek oranının da arttığı tespit edilmiştir.
2. AA 5154 matris malzeme ile takviye elemanları arayüzeyinde gözenekler gözlenmiş ve bunun sonucunda takviye oranları arttıkça gözeneklilik oranları da artmıştır.
3. AA 5154 matris içerisine ilave edilen TiB_2 takviyeli numunelerde takviye oranı arttıkça kompozitin gerçek yoğunluğunda artış olduğu gözlenmiştir.
4. Matris içerisine ilave edilen B_4C takviye oranı arttıkça kompozitin gerçek yoğunluğunda azalma olduğu gözlenmiştir.
5. AA 5154 matris içerisine ilave edilen TiB_2 ve B_4C takviye oranı attıkça gözenekliliğin arttığı tespit edilmiştir.
6. AA 5154 matrisli kompozitin sertliğinin TiB_2 ve B_4C ’ün artan miktarına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir.
7. AA 5154 matrisli TiB_2 ve B_4C takviyeli kompozit numuneleri arasında yüksek sertlik değerine %15 TiB_2 takviyeli kompozit numunesinde ulaşılmıştır.
8. En düşük sertlik değerini takviye elemanı içermeyen Al 5154 matrisli numuneler sergilemiştir.

9. AA 5154 matrisli TiB_2 ve B_4C takviyeli kompozit numuneleri arasında en yüksek çapraz kırılma dayanımını 151 MPa ile %15 TiB_2 içeren numuneler sergilemiştir.
10. En düşük çapraz kırılma dayanımını değerini takviye elemanı içermeyen Al 5154 matrisli numuneler sergilemiştir.
11. Bütün numuneler çukurcuklu sünek kırılma davranışı sergilemiştir.
12. Kırık yüzeylerdeki katman katman görülen yapının sünek bir kırılma sonucunda oluştuğu anlaşılmıştır.
13. TiB_2 ilavesiyle yüzeylerin parlak ve pürüzsüzleştiği görülmüştür.
14. Parçacık ilavesiyle çukurlu kopma modlarının daha mikro düzeyde olması sünekliğin kısıtlı olmasına neden olmuştur. TiB_2 ve B_4C katkısının artması ile sünek kırılma davranışı gevrek kırılma davranışına dönüşebileceği düşünülmektedir.
15. TiB_2 takviyeli kompozitlerin B_4C takviyeli kompozitlere kıyasla daha yüksek dayanım sergilediği tespit edilmiştir.
16. Aynı takviye elemanı oranına sahip sıcak presleme yöntemiyle elde edilen numunelerde görülen dayanım farkının yoğunluk farkından ve gözeneklilik miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Öneri olarak, TiB_2 ve B_4C takviyeli hibrit kompozitler toz metalurjisi yöntemiyle üretilip aşınma ve mekanik özellikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Alptekin KISASÖZ, Kerem Altuğ GÜLER, Ahmet KARAASLAN “Metal Matris Kompozitlerin Vakum İnfiltrasyonla Dereceli Hassas Döküm Kalıplarında Üretimi” İTÜ Dergisi/d Mühendislik Cilt:6, Sayı:2, 63-70 Nisan 2007.
- [2] Harun MİNDİVAN, E.Sabri KAYALI, “SiC takviyeli 2618 Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışı “ İTÜ Dergisi/d mühendislik Cilt:6, Sayı:2, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Nisan 2007.
- [3] İbrahim Mutlu “Alüminyum Matrisli Metal Kompozit Malzemelerin Üretilmesi” Taşıt Teknolojileri elektronik Dergisi (TATED) Cilt: 4, No: 1, 2012 (31-36).
- [4] Ekinci, V.Ş. (2007). Alümina Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 4-5.
- [5] İ. Uygur, H. Saruhan “Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri” SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 8.Cilt, I. Sayı (Mart 2004).
- [6] Varol T., 2012, AA 2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 3-6.
- [7] İnternet: Cam Elyaf Sanayii A.Ş., “Cam Elyaf (CTP) Teknolojisi. <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.camelyaf.com.tr%2Fimages%2Fpdf%2FCTPcamelyaf.pdf+&date=> (Erişim Tarihi: 15.02.2017).

- [8] İnternet: Vural, M., “Polimerler Ve Kompozit Malzemeler”, <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fakademi.itu.edu.tr%2Fvuralmu%2FDosyaGetir%2F65047%2Fch08-Polimer-Kompozit.pdf+&date=> (Erişim Tarihi: 20.02.2017).
- [9] İnternet: Dokuz Eylül Üniversitesi, “Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Ve Ansys 10 Programı ile Isıl Gerilme Analizi”, <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fweb.deu.edu.tr%2Fansys%2Fsayac2.php%3Fid%3D60&date=> (Erişim Tarihi: 28.03.2017).
- [10] Ay, H. , Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen AA7075 Alüminyum Alaşımına Ti Ve B4C İlavesinin Aşınma Davranışı Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2014, Karabük Üniversitesi.
- [11] Erek, H.B., Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen AA7075 Alüminyum Alaşımına Ti Ve B4C İlavesinin Korozyon Ve Elektrik İletkenliğine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, 2016, Karabük Üniversitesi.
- [12] İnternet: Dokuz Eylül Üniversitesi, “Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Ve Ansys 10 Programı İle Isıl Gerilme Analizi”, <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fweb.deu.edu.tr%2Fansys%2Fsayac2.php%3Fid%3D60&date=> (Erişim Tarihi: 30.03.2017).
- [13] Arıcasoy, O., “Kompozit Sektör Raporu”, İTO-0017049, İstanbul Ticaret Odası Yayınları, 25-29 76 (2006).
- [14] Şahin, Y., 2006: Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. AŞ. Ankara, Ekim.
- [15] Alüminyum Matrisli Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi Ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi)-Süleyman Özkan-Gazi Üniversitesi-Eylül 2007.

- [16] Akbulut H. (2013). Kompozit Malzemeler Ders Notları, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Sakarya.
- [17] Çanakçı, A., 2006: AA2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [18] Çalın R., “Effect of Reinforced Volume Ratio on Thermal Conductivity of SiO₂ Reinforced Al Matrix Composite Produced by Vacuum Infiltration Method”, Asian Journal of Chemistry, Vol. 22, No 1, p 808-814 (2010).
- [19] Sur, G. (2002). *Alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-42.
- [20] Zhou, W. And Xu, Z.M. (1997). Casting of SiC reinforced metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 358-363.
- [21] Prof.Dr. Ahmet Aran - İ.T.Ü. Makina Fakültesi - Metal Matrisli Kompozit Malzemeler - Ders Notları <http://web.itu.edu.tr/~arana/IML212-N9.pdf>. (Erişim Tarihi: 30.03.2017).
- [22] Erdiñ IŞIK - Sic Takviyeli Al-12Si Matrisli Kompozitin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi Ve Aşınma Davranışının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi) Gazi Üniversitesi –Haziran 2014.
- [23] Akbulut, H., 2001, “Kompozit Malzemeler Ders Notları”, Sakarya Üniversitesi.
- [24] Clyne,T.W., Withers, 1993, “An Introduction to Metal Matrix Composites, Cambridge University pres, USA.

- [25] European Aluminium Association, Aluminium: A history, <http://www.eaa.net/en/about-aluminium/aluminium-history/>, (Erişim Tarihi: 21.04.2017).
- [26] International Aluminium Institute, Primary Aluminium Production, https://stats.world-aluminium.org/iai/stats_new/formServer.asp?form=1, (Erişim Tarihi: 25.04.2017).
- [27] M. Kok, “ Al₂O₃ Partikül Takviyeli (2024) Alüminyum Alaşımlı Kompozitlerin Üretim ve Mekanik Özellikleri” Malzeme İşleme Teknolojisi Dergisi, (2005), 161 (3), s. 381-387.
- [28] Hiçyılmaz, N., “Toz Metalurjisi Yöntemleri İle Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri” Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2 -4,134 (1999).
- [29] Url-3 , <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-HDBK-17-5.pdf>, (Erişim Tarihi: 15.05.2017).
- [30] Ersoy, H. Y., 2001: Kompozit Malzeme, Literatür, İstanbul.
- [31] Gay, D., and Hoa, V.S., 2007: Composite Materials: Design and Application, CRC Pres – Boca, Raton
- [32] Kalaycıoğlu, A. S., "SiC Tane Katkılı Alüminyum Kompozitlerin Toz Metalurjisi İle Üretimi Ve Karakterizasyonu", Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 41-52 (2010).
- [33] Bengisu Yılmaz -Dilay Aydın-İhsan Horoz –Polimer Matrisli Kompozitler- Ders Notları-<http://muhendislik.istanbul.edu.tr/metalurji/wp-content/uploads/2013/09/k14.pptx>. (Erişim Tarihi: 20.05.2017).

- [34] Cahn , R . W. , and Haasen , P. , 1996. Physical Metallurgy, 4th, Revised and Enhanced Edition, Vol. III, North Holland Elsevier Science.
- [35] Haris, S.J., 1988 . Cast Metal Matrix Composites, Mater. Sci. Tech , 4 , 231-- 238.
- [36] Eker, A.A., 2008, Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Üretim Yöntemleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, http://www.yarbis.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/akdogan_81544a85d0e65_10467de73b57b89f0fe.pdf. (Erişim Tarihi: 01.06.2017).
- [37] Clyne, T. and Withers, P., 1993: An İntroduction To Metal Matrix Composites, Cambridge University Pres, Cambridge, U.K.
- [38] Ahlatçı, H. , 2003. Alüminyum - Silisyum Karbür Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Takviye Boyutunun ve Matris Bileşiminin Etkisi, *Doktora Tezi*, İ. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [39] Cayron, C., 2000: TEM Study of Interfacial Reactions and Precipitation Mechanisms in Al₂O₃ Short Fiber or High Volume Fraction SiC Particle Reinforced Al-4Cu-1Mg-0.5Ag Squeeze-Cast Composites, *Doktora Tezi*, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- [40] Fogagnolo, J.B., Robert, M.H., Ruiz-Navas, E.M. and Torralba, J.M., 2004: 6061 Al Reinforced With Zirconium Diboride Particles Processed by Conventional Powder Metallurgy and Mechanical Alloying, *Journal of Materials Science*, 39: 127-132.
- [41] Chawla, N. and Chawla, K.K., 2006: Metal matrix composites, Springer Science Business Media, Inc., Boston.

- [42] Deschams, A., Dumont, D., Brechet, Y., Sigli, C. ve Dubost, B. (2001), Process modeling of age-hardening aluminum alloys : from microstructure evolution to mechanical and fracture properties, ASM International, Materials Park, OH, 298-305.
- [43] Burgucu, S., 2011, “7075 Alüminyum Alaşımlarının Üretimi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 28-39.
- [44] Hiçyılmaz, N.(1999). Toz metalurjisi yöntemleri ile elde edilen seramik tanecik destekli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin aşınma özellikleri. Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2-4: 134.
- [45] Şahin, Y. (1999). Kompozit Malzemelere Giriş. *Gazi Kitabevi*, Ankara, 43-55.
- [46] Hiçyılmaz, N., Aydın, Ş., Sarıtaş, S. (1999). Toz Metalurjisi İle Üretilmiş Alüminyum Esaslı Tanecikli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri. *Uluslararası Katılımlı 2.Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, ODTÜ, Ankara, 621- 629.
- [47] Sarıtaş, S., Türker, M, Durlu, N.,”Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, Türk Toz Metalurjisi Yayınları: 05, Ankara, 2-9, 15-34, 206, 237, 379-387, 404-410, (2007).
- [48] Türker, M., Özdemir, T., Ögel, B., ve Yavuz, A., “Al-SiC tozlarının mekanik alaşımlama değirmeninde öğütme zamanının kompozit toz yapısına etkisinin araştırılması”, Uluslar arası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı,Ankara, 425, 430 (1999).
- [49] Yavuz N., Karadere, G., “Toz Metal Parçaların Tasarım Özelliklerinin İncelenmesi”, Süleyman Demirel Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Mak. Müh. Dergisi, 79-82 (1996).

- [50] Kurt, H., “Alüminyum Alümina Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 33-48 (2010).
- [51] Şahin, Y. (1999). Kompozit Malzemelere Giriş. *Gazi Kitabevi*, Ankara, 43-55.
- [52] Karataş, Ç. (1997). Metal Tozu Üretim Teknikleri ve Tozların Özellikleri, Makine Tasarım Teorisi ve Modern İmalat Yöntemleri Konferansı. *G.Ü.T.E.F.* Ankara, 389-396.
- [53] Dursun , K ., Mak. Y. Müh., 1999. Askeri Uygulamalarda Toz Metalurjisi. *Aselsan Dergisi*. [http:// www.aselsan.com.tr/ DERGI/eylul99/toz.htm](http://www.aselsan.com.tr/DERGI/eylul99/toz.htm).
- [54] Man, H.C., Kwork, C.T., Yue, T.M. (2000). Cavitation erosion and corrosion behaviour of laser surface alloyed MMC of SiC and Si₃N₄ on Al alloy AA6061. *Surface and Coatings Technology*, Hong-Kong, 132:11-20.
- [55] Özkan, S., 2007: Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [56] German, R.M., 2007: Powder Metallurgy&Particulate Materials Processing, Çeviri Editörleri: Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., MPIF.
- [57] Çiftçi, İ., 2003: Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Takviye Oranı ve Boyutunun Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerine Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [58] Davitson, J.E., “Compressibility of Metal Powders”, *Metals Handbook Ninth Edition*, Powder Metallurgy, Ohio, 7: 286-287, (1984).

- [59] German, Randall M., “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, 05, Prof.Dr. Süleyman SARITAŞ, Prof.Dr. Mehmet TÜRKER, Doç.Dr. Nuri DURLU, *Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları*, Ankara, 8-10, 61-87, 195-218, 235-270, (2007).
- [60] Arslan, F., "Sıvı faz sinterlenmesi", *Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, 16-17 Eylül, Ankara, 551-558 (1996).
- [61] German, R. M., "Phase diagrams in liquid phase sintering treatments", *J. of Metals*, 38: 26-29 (1986).
- [62] Cebeci, H. A., "Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen SiC takviyeli alüminyum kompozitlerin aşınma davranışlarının incelenmesi", Bilim Uzmanlığı Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 80-90 (2008).
- [63] Lee, C. J. and German, R. M., "Enhanced sintering of tungsten phase equilibrium effect on properties", *Int. J. of Pow. Met Pow. Tech.*, 20: 149-162 (1984).
- [64] Sarıtaş, S., Türker, M, Durlu, N.,”Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, *Türk Toz Metalurjisi Yayınları*: 05, Ankara, 2-9, 15-34, 206, 237, 379-387, 404-410, (2007).
- [65] Akarol, E., “Toz Metalurjisi yöntemi ile Al-SiC üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi”, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 7-23 (2003).
- [66] Özkan, S., “Alüminyum matrisli SiC parçacık takviyeli kompozitlerin mekanik alaşımlama yöntemiyle üretimi ve kuru aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2007).
- [67] German, R. M., “Powder Metallurgy Science”, Metal Powder Industries Federation, 2nd edition, USA (1994).

- [68] Okura T, Nomura S and Shikakura S (1990) Solid State Powder Processing, *The Minerals, Metal and Materials Society*, ed. Clouer, A. H., De Barbadillo, J.J., 195.
- [69] Baksan, B., Gürlü, R., “Toz metalurjisinin savunma sanayinde uygulanması” Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskisehir, 1-15, (2004).
- [70] İnternet: TTMD – Türk Toz Metalurjisi Derneği Online Yayını “Toz Metalurjisi”, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, www.turktoz.gazi.edu.tr, (Erişim Tarihi: 07.06.2017).
- [71] German, Randall M., “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, 05, Prof.Dr. Süleyman SARITAŞ, Prof.Dr. Mehmet TÜRKER, Doç.Dr. Nuri DURLU, *Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları*, Ankara, 8-10, 61-87, 195-218, 235-270, (2007).
- [72] R.Ünal, 2007, Toz Üretim http://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html, (Erişim Tarihi: 10.06.2017).
- [73] Karataş, Ç., “Toz enjeksiyon kalıplamada kurşun, demir, alümina tozlarının basılabilirliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-25 (1992).
- [74] İnternet: TTMD – Türk Toz Metalurjisi Derneği Online Yayını “Toz Metalurjisi”, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, www.turktoz.gazi.edu.tr, (Erişim Tarihi: 12.06.2017).
- [75] Suryanarayana, C., 2001, “Mechanical alloying and milling”, *Progress in Materials Science*, 46: 1-184.

- [76] Işker, V., Ögel, B. (1996). Al-SiC Kompozitlerinin Üretiminde Yatay Bilyalı Değirmen Kullanımı Ve Parçacık Dağılımına Etkisi. 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, Gazi Üniversitesi, Ankara, 377-385.
- [77] Çöçen, Ü., Önel, K. and Özdemir, İ. (1997). Microstructures and age hardenability of Al-5%Si - 0-2%Mg based composites reinforced with particulate SiC. *Composites Science and Technology*, 139-147.
- [78] Weimer, A.W., 1997, Appendices Selected Property Data, in Carbide, nitride and boride materials synthesis and processing, pp. 637-664, Chapman & Hall.
- [79] Gökmen U. “Sıcak Ekstrüze Edilmiş Al 2024 Matrisli B₄C/Al₂O₃ Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Karakterizasyonu” *Politeknik Dergisi*, 2016; 19 (4) : 445-453.
- [80] Çalın, R., “Magnezya parçacık takviyeli Al matrisli kompozitin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 35-37 (2006).
- [81] Varol, T., Canakci, A., Ozsahin, S., “Artificial neural network modeling to effect of reinforcement properties on the physical and mechanical properties of Al2024–B₄C composites produced by powder metallurgy”, *Composites: Part B*, 54: 224–233, (2013)
- [82] Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, N., Baharvandi, H.R., “The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al–Al₂O₃ composites, made by powder metallurgy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 5387–5393, (2009)

- [83] Steglich, D., Brocks, W., Heerens, J., Pardoën, T., “Anisotropic ductile fracture of Al 2024 alloys”, *Engineering Fracture Mechanics*, 75: 3692–3706, (2008)
- [84] Bauri, R., Surappa, M.K., “Processing and properties of Al–Li–SiCp composites”, *Science and Technology of Advanced Materials*, 8: 494–502, (2007)

