

FARKLI ORANLARDAKİ TAKVİYE ELEMANLARIYLA KATKILANDIRILMIŞ METAL  
MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Polen ŞANLI

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca

Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. Muammer GAVAS

Temmuz-2019

**KABUL VE ONAY SAYFASI**

Polen ŞANLI'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Farklı Oranlardaki Takviye Elemanlarıyla Katkılandırılmış Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

05/07/2019

Prof. Dr. Önder UYSAL  
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Ramazan KÖSE  
Bölüm Başkanı, Makine Mühendisliği Bölümü

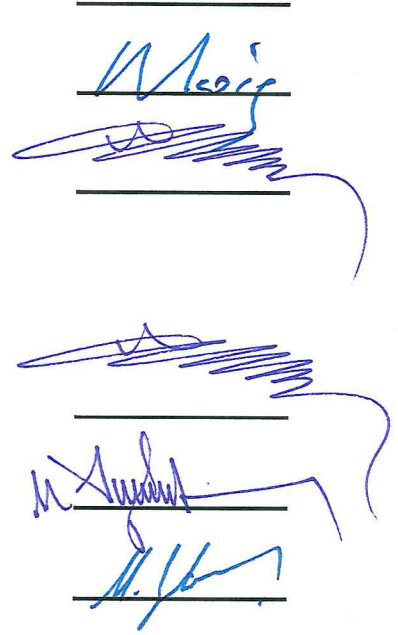
Prof. Dr. Muammer GAVAS  
Danışman, Makine Mühendisliği Bölümü

**Sınav Komitesi Üyeleri**

Prof. Dr. Muammer GAVAS  
Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa AYDIN  
Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi

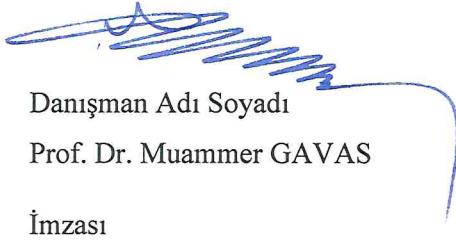
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa GÜLEŞEN  
Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi



The image shows three sets of handwritten signatures in blue ink, each placed on a horizontal line. The first signature is the most legible, appearing to read 'M. Köse'. The second and third signatures are more stylized and less legible.

**ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Program ile tarandığını ve benzerlik oranının % $\approx$  çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.



Danışman Adı Soyadı  
Prof. Dr. Muammer GAVAS  
İmzası



Öğrenci Adı Soyadı  
Polen ŞANLI  
İmzası

# FARKLI ORANLARDAKİ TAKVİYE ELEMANLARIYLA KATKILANDIRILMIŞ METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Polen Şanlı

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2019

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Muammer GAVAS

## ÖZET

Günümüzde sanayide ve teknolojiye meydana gelen gelişmeler sonucunda geleneksel malzemeler, endüstrinin ihtiyaçlarını tek başına karşılayamayacak duruma gelmiştir. Buna bağlı olarak, yeni ve gelişmiş malzeme eksikliğini gidermek amacıyla kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır. Özellikle havacılık, denizcilik, otomotiv ve savunma endüstrisinde ve askeri uygulama alanlarında bu tür gelişmiş malzemelere duyulan ihtiyaç, kompozit malzemelerin kullanımını artırmış ve böylece bu malzemelerin daha çok araştırılması ve geliştirilmesi için itici güç olmuştur.

Bu çalışmada, ağırlıkça farklı oranlarda bor karbür ( $B_4C$ ) ve silisyum karbür ( $SiC$ ) ile takviye edilen alüminyum metal matrisli kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Takviye oranları  $B_4C$  ve  $SiC$  için aynı olmak üzere %8, %16 ve %24 olarak seçilmiştir. Karıştırıcıda 3 saat süreyle karıştırıldıktan sonra elde edilen toz karışımları, 450 MPa yük altında tek eksenli hidrolik pres ile preslenerek kompakt hale getirilmiştir. Ardından numuneler, 540°C, 580°C ve 620°C olmak üzere üç farklı sinterleme sıcaklığında ve 2 ve 4 saat olmak üzere iki farklı sinterleme süresinde sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme sonrası numunelere mikroyapı ve mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi için gereken hazırlık işlemleri uygulandıktan sonra yoğunluk ve sertlik ölçümleri yapılmış, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDX) ile mikroyapı analizleri gerçekleştirilerek bulunan sonuçlar değerlendirilmiştir. Böylece takviye oranının, sinterleme sıcaklığının ve sinterleme süresinin üretilen kompozit malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:**  $B_4C$ , metal matrisli kompozitler,  $SiC$ , toz metalurjisi.

**PRODUCTION AND INVESTIGATION OF METAL MATRIX COMPOSITES DOPED  
WITH REINFORCING ELEMENTS AT DIFFERENT RATIOS BY POWDER  
METALLURGY METHOD**

Polen Şanlı

Mechanical Engineering, M.S. Thesis, 2019

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Muammer GAVAS

**SUMMARY**

Today, as a result of the developments in industry and technology, the traditional materials cannot meet the needs of the industry on their own. Accordingly, composite materials have emerged to eliminate new and improved material deficiencies. The need for such advanced materials, especially in the aerospace, maritime, automotive and defense industry and military applications, has increased the use of composite materials and thus has been the driving force for further research and development of these materials.

In this study, aluminum metal matrix composite materials reinforced with boron carbide ( $B_4C$ ) and silicon carbide ( $SiC$ ) in different weight ratios are produced by powder metallurgy method. Reinforcement ratios were chosen as 8%, 16% and 24% for  $B_4C$  and  $SiC$ . After mixing for 3 hours in the shaker-mixer, the resulting powder mixtures were compacted with a single axis hydraulic press under a load of 450 MPa. The samples were then sintered at three different sintering temperatures, 540 ° C, 580 ° C and 620 ° C, and two different sintering times for 2 and 4 hours. After sintering samples, metallographic sample preparation processes were applied to determine the microstructure and mechanical properties of the samples. After these processes, density and hardness measurements were made to the samples. Finally, microstructure analysis was performed by optical microscope, scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and the results were evaluated. Thus, the effect of the reinforcement ratio, sintering temperature and sintering time on the microstructure and mechanical properties of the composite material were determined.

**Keywords:**  $B_4C$ , metal matrix composites,  $SiC$ , powder metallurgy.

## TEŐEKKÜR

Bu çalıőmanın her aşamasında bilgileriyle bana yol gosteren ve her zaman yardımcı olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Muammer GAVAS'a, bana her zaman destek olan annem Gölde ÖZÜOK'a ve ailemin diğer fertlerine, gerek akademik anlamdaki bilgileriyle gerekse manevi dostluğuyla her zaman yanımda olan Dr. Öğr. Üyesi Sevda ENGİN'e, deneylerin yapımında tezgah ve teçhizat imkanı sağlayan Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi'ne ve bu çalışmada emeği geçen herkese teőekkürü bir borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	v
SUMMARY .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ .....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	8
2.1. Metal Matrisli Kompozitler .....	15
2.1.1. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitler .....	22
3. ALÜMİNYUM METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER.....	27
3.1. Al MMK Kullanım/Uygulama Alanları.....	29
3.2. Al MMK Üretim Yöntemleri .....	30
4. TOZ METALÜRJİSİ .....	32
4.1. Toz Üretimi ve Karakterizasyonu .....	37
4.2. Karıştırma ve Harmanlama .....	41
4.3. Sıkıştırma (Presleme).....	42
4.4. Sinterleme .....	45
4.5. Son İşlemler .....	49
5. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI .....	50
6. MATERYAL VE METOD .....	59
6.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	60
6.2. Deney Numunelerinin Üretilmesi .....	62
6.2.1. Toz karışımların hazırlanması .....	62
6.2.2. Toz karışımların preslenmesi .....	64
6.2.3. Ham numunelerin sinterlenmesi.....	68
6.3. Deney Numunelerine Uygulanan Testler.....	69

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.3.1. Yoğunluk ölçümü .....	69
6.3.2. Sertlik ölçümü .....	70
6.3.3. Optik Mikroskop, SEM ve EDX ile mikroyapı incelemeleri .....	71
6.4. Test Sonuçları .....	74
6.4.1. Yoğunluk ölçüm sonuçları ve değerlendirilmesi.....	74
6.4.2. Sertlik ölçüm sonuçları ve değerlendirilmesi .....	88
6.4.3. Mikroyapı incelemeleri ve değerlendirilmesi.....	99
7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	123
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	125
<b>EKLER</b>	
1. Al Toz Boyut Ölçüm Raporu	
2. SiC Toz Boyut Ölçüm Raporu	
3. B <sub>4</sub> C Toz Boyut Ölçüm Raporu	
4. Kullanılan Kalıbın Teknik Resmi	
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	10
2.2. Takviye morfolojisine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması .....	10
2.3. Kompozitleri meydana getiren malzeme grupları ve genel özellikleri .....	13
2.4. Metal matrisli kompozit üretiminde endüstriyel firmalar tarafından kullanılan matris malzemelerinin kullanım oranları. ....	17
2.5. Metal matrisli kompozit üretiminde endüstriyel firmalar tarafından kullanılan takviye malzemelerinin kullanım oranları. ....	18
2.6. a) sürekli fiber, b) süreksiz (kısa) fiber, c) partikül takviyeli MMK malzemelerin SEM görüntüleri .....	20
2.7. Çeşitli takviye şekillerinin şematik gösterimi .....	20
2.8. Metal matrisli kompozit üretiminde kullanılan takviye elemanı türlerinin oranları. ....	21
2.9. Partikül takviyeli kompozit parça örnekleri: a) Döküm fren ve motor bileşenleri, ekstrüzyon silindir gömlekleri, dövme bağlantı çubukları; b) Ekstrüzyon profiller. ....	24
2.10. MMK üretiminde kullanılan toz metalürjisi ve döküm yöntemlerinin uygulama alanlarına göre kullanım oranları. ....	25
4.1. Toz metalürjisi üretim aşamaları.....	33
4.2. Toz metalürjisi parçacık şekilleri. ....	37
4.3. Farklı toz partikül şekilleri .....	38
4.4. Metalik tozların üretimi için kullanılan çeşitli atomizasyon yöntemleri: a) ve b) İki farklı (yatay-dikey) gaz atomizasyon yöntemi; c) Su atomizasyon yöntemi; d) Döner disk atomizasyon yöntemi.....	40
4.5. Toz metalürjisinde presleme aşamaları: (1) kalıp boşluğunun tozla doldurulması, (2) başlangıç, (3) sıkıştırma sırasındaki üst ve alt zımbaların son konumları, (4) parçanın çıkarılması. ....	43
4.6. (a) Sıkıştırma sırasında uygulanan basıncın etkisi: (1) kalıba doldurulan başlangıçtaki gevşek tozlar, (2) paketlenme, (3) parçacıkların deformasyonu; (b) Presleme basıncına bağlı olarak tozların yoğunluğundaki değişim. Bu grafikte 1, 2 ve 3 adımları, (a)'daki 1, 2 ve 3 adımlarına karşılık gelmektedir.....	44
4.7. Katı hal sinterlemesinin aşamaları .....	46

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.8. Mikroskobik ölçekte sinterleme: (1) temas noktalarında partikül bağlanması başlar, (2) temas noktaları “boyunlara” dönüşür, (3) parçacıklar arasındaki gözeneklerin büyüklüğü azalır, (4) boyunlu bölgelerin yerinde parçacıklar arasında tane sınırları gelişir.....	46
4.9. Sinterleme aşamalarına göre gözenek yapısındaki değişim. ....	46
4.10. Sinterleme mekanizmasının SEM ile görünüşü .....	47
4.11. Sinterlemede nokta teması ile başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli. ....	49
6.1. Bu araştırmanın deneysel prosedürünü gösteren akış çizelgesi.....	59
6.2. Deneylerde kullanılan Al tozunun boyut dağılımı. ....	60
6.3. Deneylerde kullanılan SiC tozunun boyut dağılımı. ....	60
6.4. Deneylerde kullanılan B <sub>4</sub> C tozunun boyut dağılımı.....	61
6.5. Toz karışımların hazırlanmasında kullanılan hassas terazi. ....	64
6.6. Toz karışımların karıştırılmasında kullanılan karıştırıcı. ....	64
6.7. Kalıp üretimi; a) İşlenmek üzere torna aynasına bağlanmış olan kalıp malzemesi. b) ve c) Kalıp malzemesinde kalıp boşluğunun oluşturulması. ....	65
6.8. Tozların preslenmesinde kullanılan; a) kalıp, b) kalıp ve zımbanın ayrı hali, c) zımba, d) kalıp ve zımbanın presleme esnasındaki hali. ....	66
6.9. Tozların preslenmesinde kullanılan hidrolik pres. ....	67
6.10. Presleme sonrası elde edilen numuneler. ....	67
6.11. Sinterleme işleminde; a) Kullanılan fırın. b) ve c) Sinterlenmek üzere fırın içerisine yerleştirilmiş olan numuneler.....	68
6.12. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan hassas terazi ve yoğunluk ölçüm kiti.....	70
6.13. Sertlik ölçümlerinde kullanılan cihaz.....	71
6.14. Numunelerin kesildiği kesme cihazı. ....	72
6.15. a) Kalıba alma işleminin yapıldığı cihaz. b) Bakalite alınmış numuneler. ....	72
6.16. a) zımparalama ve b) parlatma işlemlerinin gerçekleştirildiği cihazlar. ....	73
6.17. Mikroyapı görüntülerinin elde edilmesinde kullanılan optik mikroskop. ....	73
6.18. Mikroyapı görüntüleri ve EDX analizlerinin elde edilmesinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	74
6.19. Saf Al numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	77
6.20. %8 SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	77

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.21. %16 SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	78
6.22. %24 SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	78
6.23. Saf Al numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	79
6.24. %8 SiC takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	79
6.25. %16 SiC takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	80
6.26. %24 SiC takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	80
6.27. 2 saat sinterlenen SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun takviye oranına bağlı değişimi. .....	81
6.28. 4 saat sinterlenen SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun takviye oranına bağlı değişimi. .....	81
6.29. %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	84
6.30. %16 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	84
6.31. %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	85
6.32. %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	85
6.33. %16 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	86
6.34. %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	86
6.35. 2 saat sinterlenen B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde yoğunluğun takviye oranına bağlı değişimi. .....	87
6.36. 4 saat sinterlenen B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde yoğunluğun takviye oranına bağlı değişimi. .....	87
6.37. Saf Al numunelerinde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	90
6.38. %8 SiC takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	91
6.39. %16 SiC takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	91
6.40. %24 SiC takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	92
6.41. 2 saat sinterlenen SiC takviyeli numunelerde sertliğin takviye oranına bağlı değişimi. ....	92
6.42. 4 saat sinterlenen SiC takviyeli numunelerde sertliğin takviye oranına bağlı değişimi. ....	93
6.43. Yüzeyden kopma ve dağılmaların meydana geldiği %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerden bir tanesi. ....	96
6.44. %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	96
6.45. %16 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	97
6.46. %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi. ....	97

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.47. 2 saat sinterlenen B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde sertliğin takviye oranına bağlı değişimi. ...	98
6.48. 4 saat sinterlenen B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerde sertliğin takviye oranına bağlı değişimi. ...	98
6.49. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	101
6.50. 540 °C’de 4 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	101
6.51. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	102
6.52. 540 °C’de 4 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	102
6.53. 620 °C’de 2 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	103
6.54. 620 °C’de 4 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	103
6.55. 620 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	104
6.56. 620 °C’de 4 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	104
6.57. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	105
6.58. 540 °C’de 4 saat sinterlenen %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	105
6.59. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	106
6.60. 540 °C’de 4 saat sinterlenen %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	106
6.61. 620 °C’de 2 saat sinterlenen %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	107
6.62. 620 °C’de 4 saat sinterlenen %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	107

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.63. 620 °C’de 2 saat sinterlenen %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	108
6.64. 620 °C’de 4 saat sinterlenen %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme. ....	108
6.65. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	109
6.66. 540 °C’de 4 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	109
6.67. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	110
6.68. 540 °C’de 4 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	110
6.69. 620 °C’de 2 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	111
6.70. 620 °C’de 4 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	111
6.71. 620 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	112
6.72. 620 °C’de 4 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	112
6.73. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	113
6.74. 540 °C’de 4 saat sinterlenen %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	113
6.75. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	114
6.76. 540 °C’de 4 saat sinterlenen %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	114
6.77. 620 °C’de 2 saat sinterlenen %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	115

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.78. 620 °C’de 4 saat sinterlenen %8 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	115
6.79. 620 °C’de 2 saat sinterlenen %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	116
6.80. 620 °C’de 4 saat sinterlenen %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme. ....	116
6.81. 540 °C’de 2 saat sinterlenen saf Al numunesine ait EDX analiz raporu.....	117
6.82. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait EDX analizi için ölçüm alınan bölgeler. ....	118
6.83. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait EDX analizinde 1 numaralı bölgeye (genel tarama) ait analiz raporu. ....	119
6.84. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait EDX analizinde 2 numaralı bölgeye (SiC) ait analiz raporu.....	120
6.85. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait EDX analizinde 3 numaralı bölgeye (Al) ait analiz raporu.....	121
6.86. 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait EDX analizinde genel alana ait analiz raporu. ....	122

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Malzeme türleri ve genel özellikleri. ....	11
2.2. Kompozit malzemelerin uygulama alanları .....	14
2.3. Takviye malzemelerinin MMK malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi ve üretilen kompozitlerin uygulama alanları.....	19
2.4. Toz metalurjisi ve döküm yöntemleriyle üretilen MMK'lerin çekme özelliklerinin karşılaştırılması. ....	25
2.5. Farklı MMK üretim yöntemlerinin maliyet ve uygulama alanları açısından karşılaştırılması .....	26
6.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin genel özellikleri.....	61
6.2. Toz karışımların yoğunluk ve ağırlıkları.....	63
6.3. SiC takviyeli Al matrisli kompozit numunelerine ait yoğunluk ölçüm değerleri. ....	75
6.4. B <sub>4</sub> C takviyeli Al matrisli kompozit numunelerine ait yoğunluk ölçüm değerleri. ....	82
6.5. SiC takviyeli Al matrisli kompozit numunelerine ait sertlik ölçüm değerleri. ....	89
6.6. B <sub>4</sub> C takviyeli Al matrisli kompozit numunelerine ait sertlik ölçüm değerleri. ....	94

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
%gözenek	Gözeneklilik yüzdesi
% $\rho$	Yoğunluk yüzdesi
(%W) <sub>n</sub>	n bileşenin karışım içindeki ağırlık yüzdesi
$\mu\text{m}$	Mikrometre
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
AlN	Alüminyum nitrür
B	Bor
B <sub>4</sub> C	Bor karbür
Be	Berilyum
C	Karbon
cm	Santimetre
Co	Kobalt
Cu	Bakır
Fe	Demir
g	Gram
K	Kelvin
m	Metre
Mg	Magnezyum
mg	Miligram
MgB <sub>2</sub>	Magnezyum diborür



**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
MgO	Magnezyum oksit
mm	Milimetre
Mo	Molibden
Nb	Niyobyum
Ni	Nikel
Pb	Kurşun
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Silisyum nitrür
SiC	Silisyum karbür
SiO <sub>2</sub>	Silisyum dioksit
T	Sıcaklık
Ta	Tantal
T <sub>e</sub>	Ergime sıcaklığı
ThO <sub>2</sub>	Toryum dioksit
Ti	Titanyum
TiB <sub>2</sub>	Titanyum diborür
TiC	Titanyum karbür
TiN	Titanyum nitrür
TiO <sub>2</sub>	Titanyum dioksit
V	Hacim
W	Ağırlık
W <sub>hava</sub>	Havadaki ağırlık

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
$W_{su}$	Sudaki ağırlık
$Y_2O_3$	İtriyum oksit
Zn	Çinko
ZrB <sub>2</sub>	Zirkonyum diborür
$\rho$	Yoğunluk
$\rho_{deneysel}$	Deneysel yoğunluk
$\rho_{kar}$	Toz karışımın teorik yoğunluğu
$\rho_n$	n bileşenin yoğunluğu
$\rho_{su}$	Su yoğunluğu
$\rho_{teorik}$	Teorik yoğunluk
2xxx	Bakırın ana alaşım elementi olduğu alüminyum alaşımları
5xxx	Magnezyumun ana alaşım elementi olduğu alüminyum alaşımları
6xxx	Magnezyum ve silisyumun ana alaşım elementi olduğu alüminyum alaşımları
7xxx	Çinkonun ana alaşım elementi olduğu alüminyum alaşımları
8xxx	Demir ve lityum gibi çeşitli elementlerle alaşımlanan özel alüminyum alaşımları
<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
AR-GE	Araştırma geliştirme
EDX/EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
HV	Hardness Vickers
MMK	Metal Matrisli Kompozit

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
MPa	Megapascal
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
SEM	Scanning Electron Microscopy
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
XRD	X-Ray Diffraction



## 1. GİRİŞ

Malzeme, genel olarak ihtiyaçları karşılamak ve belli bir amacı gerçekleştirmek, daha özel olarak mühendislik alanında ise ihtiyaa göre gerek duyulan ürün ve sistemlerin üretiminde kullanılan madde olarak tanımlanır. Bütün mühendislik bilim dalları malzeme ile yakından ilişkilidir ve birçok yeni mühendislik ürününün tasarımı yeni malzemelerin geliştirilmesine bağlıdır. Arzu edilen mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip mühendislik ürünlerinin üretimi öncelikle uygun malzeme üretimi ile başlar, ardından tasarım, üretim ve kontrol safhaları ile tamamlanır (Gavas vd., 2015).

19. yüzyıl sonlarına doğru bilim adamı Gibbs' in, malzemelerin fiziksel özelliklerinin atomik yapıya bağlı olan termodinamik özellikleri ile ilişkili olduğunu ispat etmesi, malzeme alanında büyük değişime ve malzeme davranışlarının anlaşılması üzerine yapılacak çalışmaların önem kazanmasına sebep olmuştur. Böylece alan, manyetik malzemeler, biyolojik malzemeler, seramikler, yarı iletkenler, polimerler, tıbbi implant malzemeleri ve nano malzemeler dahil olmak üzere her türden malzeme sınıfını içerecek Şekilde genişlemiştir (Kumar, 2016).

Geleneksel olarak katı malzemeler; metaller, seramikler ve polimerler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılır. Bu sınıflandırma, malzemenin kimyasal bileşimi ve atom yapısını esas alarak yapılır. Bu gruplara ek olarak ortaya çıkan, iki ya da daha fazla malzemenin birleşimiyle elde edilen malzemeler ise kompozit malzemeler olarak adlandırılır. Diğer grupta ise özellikle ileri teknoloji uygulamalarında kullanılan yarı iletkenler, biyomalzemeler, akıllı malzemeler ve nano malzemeler gibi ileri malzemeler yer alır (Callister vd., 2014).

Endüstriyel uygulamalarda kullanılacak malzemelerde olması arzu edilen özellikler genellikle düşük maliyet, dayanım, tokluk ve hafifliktir. Geleneksel malzemelerde dayanım, ısıl işlem ile artırılabilir. Ancak darbe dayanımı, aşınma dayanımı, tokluk ve hafiflik gibi özelliklerin hepsinin geleneksel malzemelerde aynı anda bir arada bulunması mümkün olmamaktadır (Kalaycıoğlu, 2010). Bu sebeple, malzeme bilimi alanında yüksek mukavemet ve aşınma direncine sahip, düşük yoğunluklu, korozyon direnci iyi olan hafif malzemelerin üretilmesi ve geliştirilmesi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmektedir (ifti, 2003). Bu çalışmalarla birlikte teknoloji alanında gerçekleştirilen faaliyetlerin ve kaydedilen ilerlemelerin günden güne hız kazanması, geleneksel malzemelerin yeni uygulama alanlarında yetersiz kalmasına sebep olmakta ve kullanımını sınırlamaktadır. Böylece ileri teknoloji uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılayabilecek özelliklere sahip yeni malzemelerin üretilmesi zorunlu hale gelmektedir (Acılar, 2002).

Kompozit malzemeler uzun zamandan beri teknolojik problemlerin giderilmesinde fayda sağlayan malzemeler olup esas olarak 1960'lı yıllarda polimer bazlı kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve piyasaya tanıtılmasıyla dikkat çekmeye başlamışlardır (Schwartz, 1984). Kompozit malzemeler, malzemelerin en iyi özelliklerini tek bir malzemede toplamak amacıyla, kimyasal bileşimleri ve özellikleri birbirinden farklı olan aynı veya farklı gruptan iki ya da daha fazla malzemenin makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşan malzemelerdir (Lubin, 1982; Kaw, 1997). Kompoziti oluşturan malzemeler yapı içindeki arayüzeylerle birbirlerinden ayrılırlar ve kendi özelliklerini korurlar. Fakat kompozit malzemeler bütün olarak incelendiğinde, kendilerini oluşturan malzemelere göre daha üstün özelliklere sahiptirler (Hull ve Clyne, 1996). Bu nedenle mühendislik uygulamaları için ideal malzemeler olarak bilinmektedirler ve kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır (Kainer, 2006; Ekerer, 2007).

Özellikle mühendislik uygulamalarında olmak üzere endüstriyel alanda kompozit malzemelerin kullanımındaki artış, üretilen ürünlerin performanslarındaki artışa ve küresel pazardaki daha üstün özellikli, hafif bileşenli yeni malzeme arayışındaki rekabeti artırmasına bağlıdır. Bununla birlikte kompozit malzemeler, yaygın olarak kullanılan çelik ve alüminyum gibi malzemelerin yerini alabilecek ve üstelik bu malzemelere oranla çok daha iyi performans sergileyebilecek potansiyele sahiptirler. Öyle ki, kompozit malzemelerin çelik malzemelerin yerini almasıyla %60-80 oranında, alüminyum malzemelerin yerini almasıyla ise %20-50 oranında ağırlık tasarrufu sağlanabilmektedir (Akbulut, 1994).

Kompozit malzemeler temel olarak; otomotiv, savunma ve havacılık endüstrilerinde kullanılmaktadır (Ögel ve Kaya, 1992). Özellikle otomotiv endüstrisinde, üstün özellikleri sebebiyle alüminyum matrisli kompozit malzemeler; motor blokları, silindir gömlekleri, pistonlar, fren diski ve balataları, dişliler, pompalar ve valfler olmak üzere oldukça geniş yelpazedeki ürün grubunun üretiminde tercih sebebi olmaktadır. Dolayısıyla bu malzemeler, gittikçe artan bir şekilde kendilerinden önce kullanılan malzeme grubunun yerini almaktadır. Örneğin artık günümüzde motor bloklarındaki silindir gömlekleri için grafit alümina takviyeli alüminyum matrisli kompozitler tercih edilirken, önceden dökme demirden imal edilen fren kampanalarının yerini ise SiC takviyeli Al matrisli kompozitlerden imal edilenler almıştır. Aynı şekilde havacılık endüstrisinde; dişli kutularının üretiminde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> elyaf takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler, jet motoru kanatçıklarında Bor-SiC bileşimi elyaf takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler, helikopter ve roket yapılarında ise grafit elyaf takviyeli Al kompozit malzemeler kullanılmaktadır (Cahn vd., 1993; Ögel, 1997; Hiçyılmaz vd., 1999; Torralba vd., 2003; Soy, 2009; Göde, 2011).

Kompozit malzemelerde yapı, çekirdek olarak adlandırılan takviye malzemesi ile bu malzemenin etrafını saran matris malzemesinden oluşmaktadır. Kompozit malzemelerdeki takviye malzemelerinin temel görevi, kompozite gelen yükü taşımak ve kompozite dayanım kazandırmaktır. Takviye malzemesinden beklenen diğer özellikler ise, kompozitin aşınma dayanımını artırmak, yoğunluğu düşürmek ve kompozite refrakter özellik kazandırmaktır (Lubin, 1982).

Kompozit malzemelerin kendilerinden beklenen fiziksel ve mekanik özellikleri sağlayabilmeleri için matris ve takviye elamanı seçimi önemlidir. Kompozitlerde takviyeler yük taşıyan eleman olduğu için gelen yük önce matrise ardından arayüzey aracılığıyla takviye elamanına iletilir. Bu nedenle matris-takviye arayüzey bağı kuvvetli olmalıdır. Bu bağı kuvvetli olması ise matris-takviye uyumuna ve matrisin ıslatma özelliğinin seçilen takviye elemanı için yeterli olmasına bağlıdır. Ayrıca takviyenin matris içinde homojen olarak dağılması, sadece üretim tekniğine değil malzeme seçimine bağlıdır ve arayüzey bağına güçlü olması açısından önem taşır (Şahin, 2000).

Genellikle kompozitin yapısındaki daha zayıf malzeme olmasına rağmen matris malzemesinin özellikleri, kompozit özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Kelly ve Mortensen, 2001). Buna bağlı olarak kompozit malzemeler, yapıdaki baz malzeme olan matris malzemelerine göre; metal matrisli kompozitler (MMK), polimer matrisli kompozitler (PMK) ve seramik matrisli kompozitler (SMK) olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. (Kelly ve Mortensen, 2001; Teti, 2002).

Metal matrisli kompozitler metal veya metal alaşımı olan bir matris ile takviye elemanının birleşiminden oluşmaktadır. MMK malzemelerde matris malzemesi olarak tercih edilen malzemeler genellikle hafif metaller ve alaşımları olmaktadır. Alüminyum (Al), berilyum (Be), magnezyum (Mg), titanyum (Ti), demir (Fe), nikel (Ni), kobalt (Co), bakır (Cu), çinko (Zn) ve gümüş (Ag) yaygın olarak tercih edilen matris malzemelerinden olmakla birlikte içlerinde en çok Al tercih edilmektedir. Takviye malzemesi olarak en sık kullanılan malzemeler ise düşük yoğunluk, yüksek sertlik, dayanım ve elastiklik modülü gibi özellikleri sebebiyle seramikler olmaktadır. Silisyum karbür (SiC), alümina ( $Al_2O_3$ ), bor karbür ( $B_4C$ ), titanyum karbür (TiC), titanyum diborür ( $TiB_2$ ) ve grafit MMK malzemelerde en sık kullanılan takviye malzemeleridir (Hunt, 2001).

MMK malzemelerde kullanılan takviye malzemeleri, morfolojilerine göre sürekli fiber, kısa fiber-whisker ve partikül olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Takviye morfolojisi seçimi, MMK malzemenin istenen özelliklere ve maliyete uygun olacak şekilde yapılmaktadır. Uygulamada en iyi özellikleri genellikle sürekli fiber takviyeli MMK malzemeler sağlar, fakat bu malzemelerin özellikleri fiber düzeni yönüne bağlı olarak gelişir ve maliyetleri çok yüksektir. Bu nedenle, üretilecek malzemenin özelliklerinde daha orta düzeyde olmasına rağmen izotropik artış sağlayan ve düşük maliyete sahip olan partikül takviyeler daha sık tercih edilmektedir (Hunt, 2001).

Partikül takviyeli MMK malzemelerde takviye malzemesi yapıdaki sert elemandır ve etrafı daha yumuşak ve sünek olan matris malzemesiyle çevrelenmektedir. Bu tür takviye elemanlarıyla katkılanmış MMK malzemelerde yapı, iki fazlı dağılımla mukavemetlendirilen metal alaşım malzemelerinkine benzemektedir. Fakat kompozitlerde malzemeler faz dönüşümüne uğramamaktadır. Partikül takviyeli MMK malzemeler genellikle aşınma dayanımının yüksek olmasının istendiği uygulamalarda tercih edilmekle birlikte yapısal uygulamalarda da kullanım alanı bulmaktadır. Bu malzemeler ile ilk olarak grafit ile takviyelendirilen Al ve alaşımlarının üretimi üzerine deneyler gerçekleştirilmiş ancak bu çalışmalar düşük hacim oranları (<%10) ile sınırlı kalmıştır. Günümüzde ise çok çeşitli takviye elemanları ve yüksek takviye hacim oranlarıyla bu çalışmalar gerçekleştirilmeye ve ilerletilmeye devam etmektedir (Huda vd., 1993a, 1993b).

MMK malzemelerde matris malzemesi olarak tercih edilen malzemeler genellikle hafif metaller ve alaşımları olmakla birlikte en yaygın kullanılanlar Al ve alaşımlarıdır (Hunt, 2001). Alüminyum dünyada oldukça büyük bir rezerve sahip ve demirden sonra en fazla üretilen ve tüketilen metaldir (Dennis ve Tulgar, 1987). Al ve alaşımlarını endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmez yapan özelliklerinin başında düşük yoğunluk ve ergime sıcaklığına sahip olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri, yüksek korozyon direnci ve elektriksel iletkenliğe sahip olmaları gelmektedir. Bu malzemelerin en önemli problemi ise; özelliklerini yüksek sıcaklıklarda büyük oranda yitirmeleridir (Arık vd., 2000). Bu sorunu gidermek amacıyla araştırmacılar tarafından birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar genellikle refrakter özellikte olan  $Al_2O_3$ ,  $ThO_2$ ,  $Y_2O_3$ ,  $TiC$ ,  $SiC$  gibi malzemelerin Al ve alaşımlarına takviye edilmesi ile üretilen Al MMK malzemeler üzerine yapılan çalışmalar olmuştur (Bronsveld vd., 1991; Ibrahim vd., 1991).

Alüminyum metal matrisli kompozit (Al MMK) malzemeler, Al ve alaşımlarının, özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, sert takviye elemanları ile takviyelendirilmesi sonucu elde edilen malzemelerdir (Jun vd., 2004). Al MMK malzemeler hafiflik, düşük ısıl genleşme katsayısı, yüksek aşınma direnci ve dayanım gibi özellikleriyle yeni keşfedilen ve geliştirilmeye devam edilen malzemelerdir (Kainer, 2006). Bu malzemelerdeki özelliklerin kombinasyonu geleneksel malzemelerde elde edilememektedir (Hunt, 2000).

Al MMK malzemelerde takviye elemanı seçimi; uygulamaya, üretim metotlarına ve malzeme maliyetine bağlı olarak yapılmaktadır (Sawtell vd., 1996; Keçeli, 2007). Bu tür malzemelerin üretimi için kullanılan takviye elemanlarının başında  $Al_2O_3$ , SiC,  $B_4C$ , TiC gibi seramikler yer alır (Kumdalı, 2008). SiC ile takviye edilerek üretilen Al MMK (SiC/Al) malzemeler, günümüze kadar üretilen en başarılı MMK sınıfını oluşturmaktadır (Ashby, 1993; Seleznev, 1995). SiC yüksek ısıl iletkenlik, yüksek aşınma ve korozyon direnci, düşük ısıl genleşme katsayısı, sertlik ve refrakter özellikleri ile takviye elemanı seçiminde yaygın olarak tercih edilmektedir (Ergün, 2006). Ayrıca SiC ile takviye edilerek üretilen Al MMK malzemelerin işlenebilirliği, diğer takviye malzemeleriyle üretilenlere göre çok daha iyi olmaktadır (Özkan, 2007). Son yıllarda ise  $B_4C$ , SiC ve  $Al_2O_3$  gibi yaygın olarak tercih edilen takviye malzemeleriyle kıyaslanabilecek düzeydeki mekanik-termal özellikleri ve düşük yoğunluğu ile Al MMK malzemeler için dikkat çeken bir takviye malzemesi haline gelmiştir (Carden, 1996; Keçeli, 2007). Fakat günümüze kadar yapılan çalışmalara genel olarak bakıldığında, SiC veya  $Al_2O_3$  ile takviye edilen Al MMK malzemelere kıyasla,  $B_4C$  ile takviye edilenlerin daha az çalışıldığı görülmektedir. Bu durum,  $B_4C$  tozlarının maliyetinin SiC ve  $Al_2O_3$  gibi malzemelere oranla daha fazla olmasından ileri gelmektedir.

Al MMK malzemeler için üretim yöntemleri; sıvı hal, yarı-katı hal ve toz metalürjisi (katı hal) olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Literatüre bakıldığında pek çok araştırmacının sıvı ve yarı-katı hal yöntemleri ile ilgilendiği görülmektedir. Sıvı hal üretim yöntemlerinde, homojen dağılım ve matris-takviye arası güçlü bir bağ elde etmek için ıslatmanın iyi olması gerekmektedir. Islatma, sıvı haldeki matrisin katı haldeki takviye elemanı üzerine yayılması sonucu ortaya çıkan temas açısı ile ilgilidir ve katının sıvı içinde çözünmesiyle gerçekleşir (German, 2007). Al ve alaşımlarının seramik takviye malzemeleri üzerindeki ıslatma kabiliyetlerinin kötü olduğu bilinmektedir. Bu nedenle seramik takviye malzemeleri ile takviye edilerek üretilen Al MMK malzemeler için üretim yöntemi olarak bir katı hal üretim tekniği olan toz metalürjisi yöntemi tercih edilmektedir (Karabulut, 2011). Toz metalürjisi, matris ve takviye arayüzey kinetiğinin kontrol edilebildiği ve böylece kompozitlerin üretiminde arzu edilen homojen dağılımın sağlanabildiği üretim yöntemidir. (Kumdalı, 2008). Özellikle partikül takviyeli MMK



malzemelerin üretiminde toz metalürjisi yöntemi ile, sıvı hal üretim yöntemlerine kıyasla çok daha iyi mekanik özelliklerin elde edildiği bilinmektedir (Kılıç, 2007; Kalaycıoğlu, 2010).

Toz metalürjisi genel olarak, malzeme tozlarının oda sıcaklığı veya daha yüksek sıcaklıklarda, üretilecek parça şekline uygun kalıp boşluğuna sahip kalıplar içerisinde, istenen basınç değerleri altında şekillendirilmesi ve ardından bağlanma amacıyla bir fırında sinterlenmesi ile gerçekleştirilen üretim yöntemidir (Fayed, 1997). Toz metalürjisi yöntemi ergitme ve döküm işlemlerini içermemesi sebebiyle diğer üretim yöntemlerine göre daha ekonomik bir yöntemdir (Huda, 1995). Ayrıca bir sıvı hal üretim yöntemi olan döküm yönteminde sıklıkla görülen matris-takviye arası kimyasal tepkime ve homojen dağılım problemi, toz metalürjisi yöntemi ile aşılabilmektedir (Akor, 2003; Göde, 2011). Tüm bu özellikleri sayesinde toz esaslı seri üretim parçaları, başta otomotiv, havacılık, uzay ve savunma sanayisi olmak üzere pek çok alanda kullanılmakta ve geleneksel malzemelere kıyasla maliyet ve üretilebilirlik açısından çok daha avantajlı olmaktadır (Kurt, 2004; Ekici, 2012).

Türkiye diğer ülkelerle kıyaslandığında, bor rezervleri bakımından en zengin ülkelerden biridir. Bu sebeple, ülkemize katkı sağlaması amacıyla bu malzeme ve türevlerinin çalışılması, uygulamalarda yer edinecek ürünlerin ortaya koyulması ve böylece bu malzemelerin kullanım alanlarının yaygınlaştırılması oldukça önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, takviye elemanı olarak üstün özellikleri ve sık tercih edilmesi sebebiyle SiC ve yukarıda bahsedilen sebeplerle B<sub>4</sub>C seçilmiştir. Böylece, önceden yaygın olarak çalışılmış olan SiC ile nispeten daha az çalışılmış olan ve sık kullanılan takviye elemanlarıyla rekabet edebilecek düzeydeki özellikleriyle henüz son yıllarda dikkat çekmeyi başaran B<sub>4</sub>C arasında karşılaştırma yapılarak literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır. Matris elemanı olarak, hafiflik ve kolay şekillendirilebilirlik gibi üstün özellikleri ile birçok endüstriyel uygulama alanında yaygın olarak kullanılan Al tercih edilmiştir. Üretim tekniği ise, sıvı hal (döküm) yöntemlerine kıyasla daha iyi özellikler sunan toz metalürjisi yöntemi olarak belirlenmiştir. Takviye malzemeleri matris içine hacimce üç farklı oranda (%8, %16, %24) katkılanmış, ardından elde edilen toz karışımlar sabit basınç altında tek eksenli hidrolik presle kompakt hale getirilerek ham numuneler elde edilmiştir. Daha sonra bu numuneler, üç farklı sinterleme sıcaklığında (540°C, 580°C, 620°C) sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu şekilde üretimi tamamlanan numunelere, analizler için gerekli ön hazırlık işlemleri uygulandıktan sonra, yoğunluk ve sertlik ölçümleri yapılmış, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri alınmış ve EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm ve analizlerin sonuçları değerlendirilerek, farklı

Üretim parametrelerinin bu malzemeler üzerine etkileri incelenmiş ve iki farklı takviye malzemesi arasında karşılaştırmalar yapılarak sonuçlar ortaya konulmuştur.



## 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, II. Dünya savaşı sırasında geleneksel malzemelerin tek başlarına mevcut ihtiyaçları karşılayamaz duruma gelmesiyle araştırılmaya başlanan ve o zamandan günümüze kadar üzerine çalışmalar yürütülen malzeme grubunu oluşturmaktadırlar. Bu malzemelerin giderek daha çok araştırılması ve geliştirilmeye çalışılması, üretilen malzemelerde yüksek dayanım, yüksek elastisite modülü ve düşük yoğunluk özelliklerini bir arada elde edebilmek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Kompozitlerin geleneksel malzemelere oranla daha düşük yoğunluklarda yüksek dayanım ve elastisite modülüne sahip olması, bu malzemeler ile üretilen makine elemanlarının ağırlığının azalmasına, dolayısıyla enerji tasarrufunun ve verimin artmasına yol açmaktadır. Bu durum, tüm hareketli parçalar ve özellikle taşıma araçları için çok önemli bir faktördür. Kompozitler, belli uygulama alanlarında istenen fiziksel ve mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için spesifik özelliklere sahip değişik fazlardaki malzemelerin bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemeler olduklarından çok fazlı malzeme olarak da adlandırılmaktadırlar (Şahin, 2015). Artık günümüzde bu çok fazlı kompozit malzemelerin, hiçbir monolitik metal alaşımın, seramik veya polimerin tek başına sahip olamadığı geniş bir özellik kombinasyonunu sağlama imkanının bulunduğu kabul edilmiştir (Callister ve Rethwisch, 2014: 627).

Kompozit malzemeler çok uzun zamandan beri kullanılmaktadır. Fakat insanların kompozitleri ilk olarak ne zaman kullanmaya başladığına dair kesin bir kayıt bulunmamaktadır. Kullanımlarının en eski kayıtlarından bazıları; kontrplak, kâğıt ve tuğlaları güçlendirmek için saman kullanmalarıyla tanınan Mısırlılara aittir. Benzer şekilde, eski İnk ve Maya medeniyetleri, tuğlaları ve çanak çömlekleri güçlendirmek için bitkisel lifler kullanmışlardır. Kılıç ve zırhlar ise, orta çağda dayanımlarını artırmak amacıyla kaplanmıştı. Buna örnek olarak, çok katlı bir kompozit oluşturmak için tekrar tekrar katlanarak ve yeniden şekillendirilerek üretilen Samuray kılıçları gösterilebilir. Eskimolar, igloları oluştururken buzı güçlendirmek için yosun kullanmışlardır. Otomotiv endüstrisi ise, Chevrolet Corvette ile geniş çapta kompozit kullanımına başlamıştır. Bunların hepsi insan yapımı kompozit malzemelerin örnekleridir. Bambu ve kemik ise doğada var olan hücreli kompozitlerin örnekleridir. Hem doğal hem de insan yapımı kompozit malzemelerin daha çok sayıda başka örnekleri bulunmaktadır (Staab, 1999).

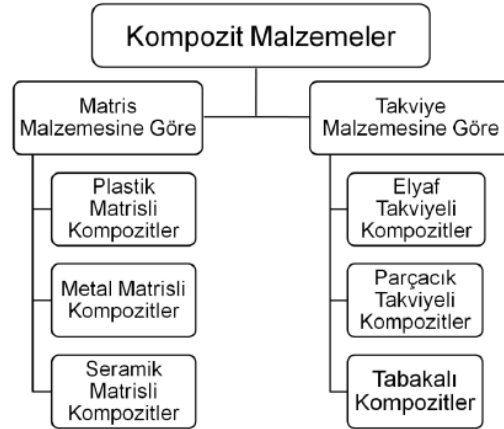
Kompozit malzemeler, birbirine bağlanmış iki veya daha fazla homojen fazın heterojen bir karışımı olarak tanımlanabilir. Bu karışım içinde iki fazın varlığı çıplak gözle kolayca ayırt edilemezse, elde edilen kompozit kendine ait fiziksel ve mekanik özellikleri olan homojen bir materyal olarak kabul edilebilir. Bu malzemeler için pek çok örnek verilebilir. Ahşap gibi birçok

doğal malzeme kompozitlere örnektir. Diğer örnekler; otomobil lastikleri, cam elyaf takviyeli plastikler, kesici alet olarak kullanılan sement karpürler ve selüloz elyaflardan oluşan bir kompozit olan kağıttır. Kompozit bir malzeme ile birden fazla malzeme içeren ve belirli bir işlevi yerine getirmek için tasarlanmış bir mühendislik malzemesi arasında ayırım yapmak bazen zordur. Bu tür iki veya daha fazla malzemedan oluşan bileşimler genellikle, kendini oluşturan bileşenlerin herhangi birinden daha sert olması, negatif bir termal genişleme katsayısına sahip olması veya bileşen materyallerinden herhangi biri tarafından açıkça gösterilmeyen başka bir özelliğe sahip olması gibi kendine özgü özelliklere sahip olması şartıyla bir kompozit olarak adlandırılır (Kelly ve Mortensen, 2001).

Kompoziti oluşturan iki temel bileşen vardır. Bunlar; matris ve takviye olarak adlandırılmaktadır (Schwartz, 1984). Kompozitlerde matrisin görevleri; takviye elemanlarını çevrelemek ve korumak, gelen yükü takviye elemanlarına iletmek, kompozit parçanın son şeklini almasını sağlamaktır. Takviyelerin görevleri ise; kompozite yüksek mekanik özellikler sağlamak, kompozite gelen yükü taşımak ve matrisi istenen yönlerde katkılıandırmaktır (Teti, 2002; Şahin, 2015).

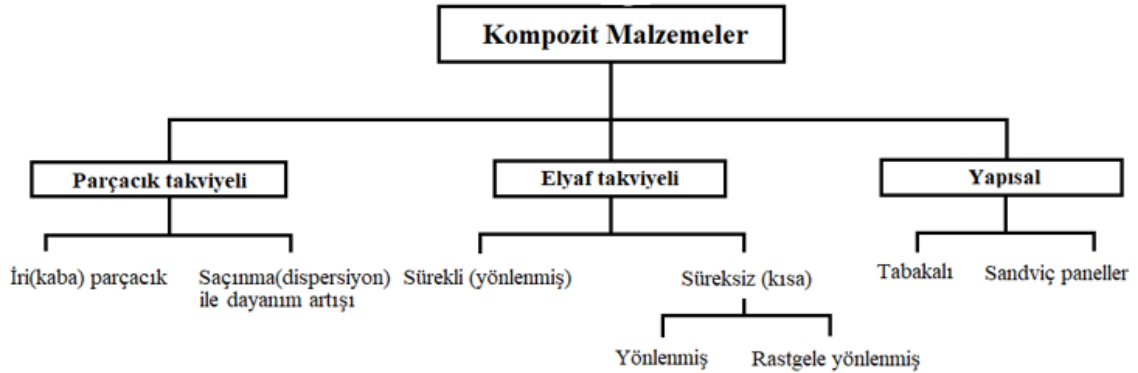
Kompozitlerde matris ve takviyenin özellikleri, hacim oranları, aralarında bulunan bağın durumu mekanik özellikler üzerinde etkili olmaktadır. Ayrıca, takviye elemanının morfolojisi, yapı içindeki yönelimi ve farklı üretim parametreleri gibi diğer değişkenlerde bu özellikleri etkilemektedir. Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan matris ve takviye fazları birbiri içinde çözünmemelidir. Fakat az miktarda gerçekleşen çözünürlük, aralarındaki bağı güçlendirecek olması bakımından bazı durumlarda olumlu da olabilmektedir. Kompozit malzemelerin üzerine gelen yük ve gerilmelerin, matris üzerinden takviye malzemesine iletimi, matris-takviye arayüzeyi aracılığı ile gerçekleşmektedir. Bu sebeple kompozitlerde matris-takviye arayüzeyi ve özellikleri, mekanik ve fiziksel özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir (Hull ve Clyne, 1996).

Kompozitler, üretimlerinde kullanılan matris malzemesinin türüne göre; polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Teti, 2002; Şahin, 2015). Takviye malzemesinin morfolojisine göre ise; elyaf(fiber) takviyeli, parçacık(partikül) takviyeli ve tabakalı(yapısal) kompozitler olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



**Şekil 2.1.** Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Karaman, 2011).

Kompozit malzemelerin takviye malzemesinin morfolojisine göre ayrıntılı olarak sınıflandırılması ise Şekil 2.2.'de gösterilmektedir.



**Şekil 2.2.** Takviye morfolojisine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Callister ve Rethwisch, 2014).

İleri teknoloji uygulamalarında, malzemelerde olması beklenen belli birtakım özellikler mevcuttur. Bu uygulamalar genellikle taşımacılık, havacılık, sualtı ve biyomühendislik alanlarındaki uygulamalar olmaktadır. Örnek olarak, uçak mühendisleri yüksek dayanımlı ve düşük yoğunluğa sahip olmasının yanında aşınma, darbe ve korozyona da dayanıklı olan yapısal malzemelere her geçen gün daha çok ihtiyaç duymaktadırlar. Bunlar, geleneksel malzemelerde aynı anda bir arada elde edilemeyecek özellik bileşimleridir. Bu durum, monolitik malzemelerde dayanımın artmasıyla yoğunluğun da genellikle artıyor olması ve yine aynı şekilde artan dayanım ve rijitlik ile tokluğun azalmasından ileri gelmektedir. Bu bağlamda, yeni kompozitlerin üretimi üzerine çalışmalar yürüten araştırmacılar, mühendisler ve bilim insanları istenen özellikleri aynı

anda bir arada elde edebilmek amacıyla metal, polimer ve seramik malzemeleri bir araya getirerek değişik özellik kombinasyonları sağlamaya çalışmaktadırlar (Callister ve Rethwisch, 2014). Çizelge 2.1.'de farklı malzeme grupları ve bu gruplara ait genel özellikler verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Malzeme türleri ve genel özellikleri.

<b>METALLER</b>	<b>SERAMİKLER</b>	<b>POLİMERLER</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Orta ve yüksek yoğunluk</li> <li>✓ Orta ve yüksek ergime noktası</li> <li>✓ Orta ve yüksek elastik modül</li> <li>✓ Reaktif</li> <li>✓ Sünek</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Düşük yoğunluk</li> <li>✓ Yüksek ergime noktası</li> <li>✓ Çok yüksek elastik modül</li> <li>✓ Reaktif değil</li> <li>✓ Gevrek</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Çok düşük yoğunluk</li> <li>✓ Düşük ergime noktası</li> <li>✓ Çok düşük elastik modül</li> <li>✓ Çok reaktif</li> <li>✓ Sünek ve gevrek</li> </ul>

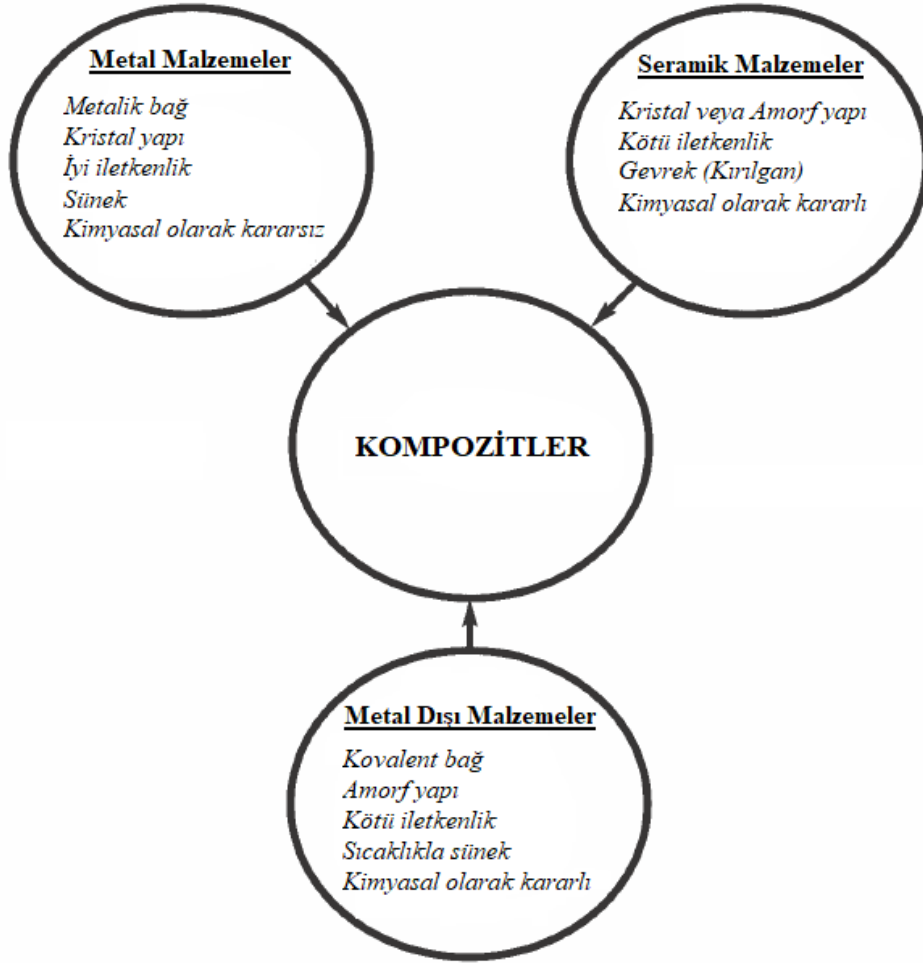
Kompozit malzemelerde farklı malzeme türlerine (metal, seramik, polimer) ait üstün özelliklerin bir araya getirilmesi ile en iyi özelliklerin tek malzemede toplanabilmesi önemli avantajlar oluşturur. Bunlar;

- ✓ Yüksek dayanım
- ✓ Yüksek rijitlik
- ✓ Yüksek yorulma dayanımı
- ✓ Yüksek aşınma direnci
- ✓ Yüksek sıcaklık kapasitesi
- ✓ İyi korozyon direnci
- ✓ İyi ısı iletkenlik
- ✓ Düşük ağırlık

gibi özelliklerin bir arada elde edilebilmesi sonucu ortaya çıkan avantajlar olmaktadır. Genellikle orta – yüksek yoğunluğa sahip olan ve tokluk – dayanım özellik kombinasyonunun diğer malzeme gruplarına kıyasla daha uyumlu olduğu metaller, makine ve metalürji mühendisliği alanlarında en sık tercih edilen malzeme grubunu oluşturmaktadır. Diğer bir malzeme grubunu oluşturan polimerlerin düşük yoğunluk, kolay işlenebilirlik, diğer malzemelerle bir araya getirilerek kullanılabilme ve karmaşık şekle sahip parçaların üretiminin kolay olması gibi avantajları bulunmakla beraber mekanik özellikleri ve termal dayanımlarının düşük olması ve çevresel açıdan birçoğunun kullanımının tehlikeli olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Seramikler ise; termal ve kimyasal etkilere karşı dirençli, yüksek sertlik ve dayanım ile düşük yoğunluğa

sahip fakat aşırı gevrek ve kırılğan olan malzeme grubunu oluşturmaktadır. Yüksek ergime sıcaklığına ve yüksek sertliğe sahip olmaları ise işlenebilirliklerini kısıtlamaktadır (Şahin, 2015).

Gelişen teknolojiye ayak uydurma çabaları sonucu geliştirilen kompozit malzemeler ise dördüncü grup malzemeleri teşkil etmektedirler. Kompozitler, yüksek dayanım ve düşük yoğunluk gibi üstün özellikleri ile özellikle uçak ve uzay sanayisinde vazgeçilmez malzeme grubunu oluşturmaktadırlar (Şahin, 2015). Kompozit malzemelerin kullanımı, üretilecek malzemede olması beklenen belli bir özelliğin, yalnızca kompozit kullanımıyla sağlanabileceği durumlarda zorunlu hale gelmektedir. Kompozit malzemeler kullanılarak elde edilen bu parçaların üretiminde makul bir maliyet-performans ilişkisi olduğu zaman ise bu malzemelerin kullanımı daha da avantajlı hale gelmektedir. Ayrıca, kompozit malzemeler ile çeşitli malzeme gruplarını (metal, metal olmayan, seramik) bir araya getirerek yeni malzeme üretme imkanının sınırsız kombinasyon ve çeşitliliğe fırsat vermesi de bu malzemeler için avantaj olmaktadır. Dolayısıyla bu şekilde oluşan yeni malzemelerin özellikleri de temel olarak oluşturuldukları bileşen malzemelerin özellikleri tarafından belirlenmektedir (Bertholet, 1999; Keçeli, 2007). Şekil 2.3.'te kompozitleri meydana getiren farklı malzeme grupları ve bu gruplara ait genel özellikler verilmiştir.



**Şekil 2.3.** Kompozitleri meydana getiren malzeme grupları ve genel özellikleri (Kainer, 2006).

Kompozit malzemeler gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde gittikçe artan bir şekilde birçok farklı ve yeni alanda tercih edilmektedir. Çok uzun bir süre boyunca, çoğunluk olarak havacılık endüstrisindeki ihtiyaçlara yönelik geliştirilmeye devam eden bu malzemeler son dönemde birçok farklı amaç için yine başta havacılık olmak üzere otomotiv, savunma ve denizcilik endüstrisinde ve sağlık, inşaat, taşımacılık sektörlerinde önemli ölçüde kullanılmaktadır (Işık, 2014). Çizelge 2.2.'de çeşitli kompozit malzemeler ve uygulama alanları verilmiştir.



**Çizelge 2.2.** Kompozit malzemelerin uygulama alanları (Şahin, 2015).

<b>Endüstrisi</b>	<b>Uygulama alanları</b>	<b>Kullanılan kompozit malzemeler</b>
Uçak	Uçak kanatları ve gövdesi, helikopter pervaneleri, iniş ve çıkış kapıları, payandalar döşeme kirişleri, çerçeveler, vantilatör ve türbin kanatları	B/Al, SiC <sub>w</sub> /Al, Gr/Al, Cam/epoksi, C/epoksi, B/epoksi, Kevlar/epoksi, süper alaşımlar
Helikopter	Transmisyon kutusu, giriş destek yapıtları, itici çubuklar, iniş takımları, rotor kanatları arkası	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Mg, Gr/Al, Gr/Mg, B/Al, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al, SiC <sub>w</sub> /Al
Uzay	Uzay yapıtları, antenleri, robot kolları	B/Al, B/Mg, Gr/Mg
Otomotiv	Gövde parçaları, tampon ve çamurluklar, ön ve arka paneller, aks mili, yaylar, itme çubukları ve piston kolları	Kevlar/epoksi, SiC <sub>w</sub> /Al, B/Al
Gemi	Gemi teknesi, gemi güvertesi	Kevlar/epoksi, cam/epoksi
Kimya	Borular, basınçlı kaplar ve tanklar	Cam/epoksi, karbon/epoksi
Spor	Oltalar, golf kulüpleri, yüzme havuzları, tenis raketleri, bisiklet ve motosiklet gövdesi	B/epoksi, C/epoksi, B/Al, Gr/Al, SiC <sub>w</sub> /Al,
Elektrik	Motor fırçaları, kablo ve akü plakaları	Gr/Cu, Gr/Pb, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Pb
Tekstil	Mekikler	B/Al, C/Al, SiC/Al
Tıp	Röntgen masaları, protezler ve tekerlekli sandalyeler	B/Al, SiC/Al
Uçak-Uzay	Uçak frenleri, roket memeleri, türbin pervaneleri, roket çıkış sistemleri	Karbon/karbon kompozit
Diğer alanlar	Makine yatakları	C/Pb, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Pb

## 2.1. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, mevcut malzemelerin kullanımının uygun olmadığı yüksek sıcaklıklarda kullanılmak üzere tasarlanmış olan gelişmiş malzemelerdir (Huda vd., 1995). İsimlerinde de anlaşılacağı üzere bu malzemelerde matris malzemeleri, metaller ve alaşımları olmaktadır (Akbulut, 1994). Mühendislik malzemeleri olarak MMK malzemelere olan ilgi; sertlik, mukavemet, çekme dayanımı ve akma dayanımı gibi mekanik özelliklerde meydana gelen önemli gelişmelere bağlı olarak artmaktadır. Bu gelişmeler ise, metal matris içerisine ilave edilen mikro veya nano boyutlardaki takviyeler sayesinde gerçekleşmektedir (Singh vd., 2015).

Metallerle kıyaslandıklarında MMK malzemelerin pek çok avantajı bulunmaktadır. MMK malzemelerin geleneksel metallere göre üstünlükleri şunlardır (İbrahim vd., 1991):

- ✓ Düşük yoğunluk
- ✓ Yüksek mukavemet ve elastiklik modülü
- ✓ Yüksek tokluk ve darbe dayanımı
- ✓ Yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik
- ✓ Yüksek yüzey sertliği ve yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyet
- ✓ Sıcaklık farklarına ve termal şoklara karşı düşük hassasiyet (İbrahim vd., 1991; Kalemtaş, 2014).

Fakat bu malzemelerin üstün özelliklerinin yanı sıra bir takım sınırlayıcı özellikleri de bulunmaktadır. Bunlar:

- ✓ Zor ve karmaşık üretim süreçleri ve yüksek üretim maliyetleri,
- ✓ Kompozit malzemelerin sünekliğinin metallere oranla düşük olması,
- ✓ Firmalar ve üreticilerin geliştirmekte olan bir malzeme grubu olması nedeniyle kompozitler hakkında metaller kadar bilgi birikimine sahip olmamasıdır (Kalemtaş, 2014).

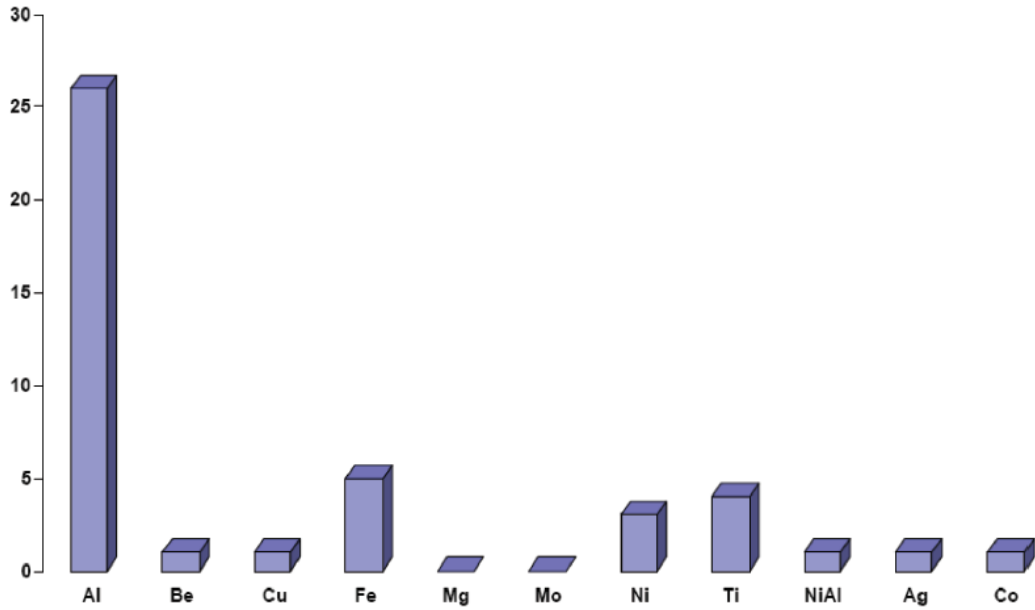
Metal matrisli kompozitler metal matris ve takviye malzemesi olmak üzere iki bileşenden meydana gelmektedir (Srivatsan vd., 1991). Kompozit yapı içinde daha sert olan ve daha yüksek dayanım sergileyen faz *takviye* olarak adlandırılmaktadır (Boutman ve Krack, 1974; Uygur ve Saruhan, 2004). Diğer faz ise baz malzeme olan fakat daha düşük dayanım ve sertlik gösteren *matris* olarak tanımlanır (Srivatsan vd., 1991; Uygur ve Saruhan, 2004).

Metal matrisli kompozitlerde matris ve takviye arası arayüzey kompozitin özellikleri açısından büyük önem taşımaktadır (Clyne ve Withers, 1993). Çünkü bu arayüzey matris-takviye arası yük transferi için bir köprü görevi görmektedir. Yüksek performanslı MMK malzemeler için metal matris ve takviye arası güçlü bir arayüzey arzu edilmektedir. Bu sebeple, bu bölgede oluşacak kırılmalı bir tabakanın oluşumunun önlenmesi önem taşımaktadır. Bu tabakanın oluşumu ise genellikle, takviyenin oksidasyonu ile ya da üretim esnasında ve yüksek sıcaklık koşulları altında meydana gelen reaksiyonların sonucunda gerçekleşmektedir (Lloyd vd., 1990; Rohatgi ve Asthana, 1990; Wang vd., 2004).

Kompozit malzemelerde, matris ve takviyenin özellikleri, hacim oranları ve aralarında bulunan bağın özellikleri üretilen kompozitin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Ayrıca, kompozit yapılarda matris ve takviyenin birbiri içinde çözünmemesi gerekmektedir. Fakat öte yandan, az miktarda gerçekleşecek olan çözünürlük ile de matris ve takviye arası bağ oluşumu olumlu yönde etkilenebilmektedir (Kalemtaş, 2014).

Kompozitlerde takviye malzemesi seçiminde mekanik ve fiziksel özellikler, mikroyapı, morfoloji, kimyasal bileşim ve maliyet gibi özellikler önem taşırken, matris malzemesi seçiminde ise yoğunluk, dayanım, oksidasyon ve korozyon direnci ile süneklik/tokluk oranı gibi parametreler belirleyici olmaktadır (Huda vd., 1995). Metal matrisli kompozitlerde en sık tercih edilen matris malzemeleri düşük yoğunluk, yüksek tokluk ve iyi mekanik özelliklere sahip olmaları sebebiyle genellikle hafif metaller ve alaşımları olmaktadır. Bu malzemeler düşük yoğunlukları ve iyi mekanik özellikleri ile özellikle hafifliğin ön planda olduğu uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır (Kalemtaş, 2014). Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak Alüminyum (Al), Magnezyum (Mg), Titanyum (Ti), Çinko (Zn), Bakır (Cu), Demir (Fe), Nikel (Ni), Gümüş (Ag) gibi metaller ve bu metallerin alaşımları ile süper alaşımlar yaygın şekilde kullanılmaktadır (İbrahim vd., 1991; Keçeli, 2007; Kalemtaş, 2014). Bunların arasında Al, Ti, Mg ve alaşımları diğerlerine kıyasla daha geniş bir kullanım oranına sahiptir (İbrahim vd., 1991).

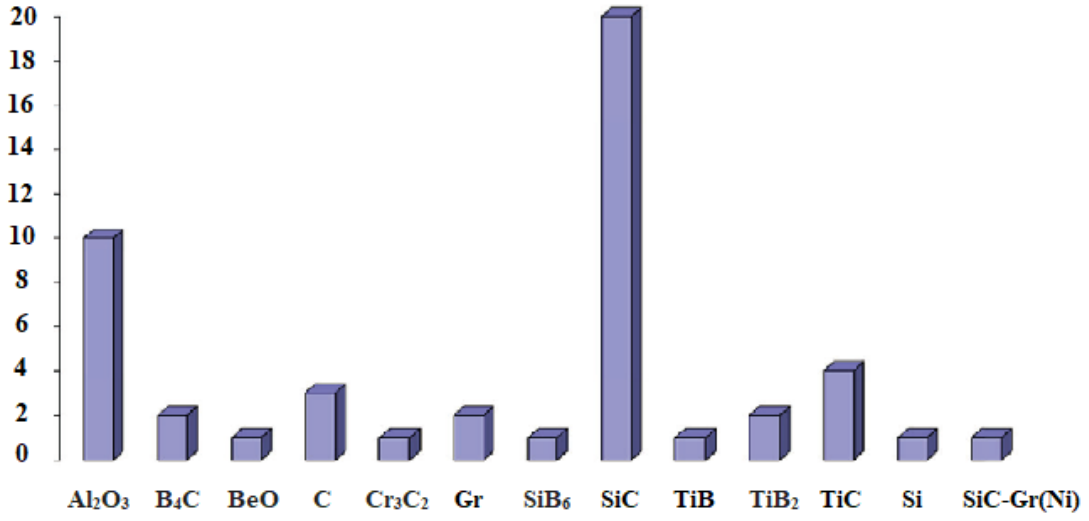
Yapılan araştırmalar yoğunluk, ıslatma kabiliyeti ve maliyet gibi özellikler dikkate alındığında, Al ve alaşımlarının en iyi matris malzemeleri olduğunu ortaya koymaktadır (Akın, 2006; Keçeli, 2007). Özellikle hafifliğin ön planda olduğu taşıma, savunma ve uzay sanayisinde alüminyum en çok tercih edilen matris malzemesi olup, oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Uygur ve Saruhan, 2004). Öyle ki, metal matrisli kompozitler içinde açık ara ile en fazla kullanıma sahip olan malzemeler alüminyum matrisli kompozitlerdir (Hunt, 2001). Bununla ilgili olarak Şekil 2.4.'te metal matrisli kompozitlerin üretiminde endüstriyel firmalar tarafından kullanılan matris malzemelerinin kullanım oranları sunulmuştur.



**Şekil 2.4.** Metal matrisli kompozit üretiminde endüstriyel firmalar tarafından kullanılan matris malzemelerinin kullanım oranları (Kalemtaş, 2014).

Metal matrisli kompozitlerde takviye elemanı seçimi, üretilecek kompozitin özelliklerini belirleyici olması açısından önem taşımaktadır. Bu sebeple takviye elemanının doğru seçilmesi ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Kullanım yerlerine göre değişmekle birlikte, metal matrisli kompozitlerde takviye malzemelerinden beklenen özellikler genel olarak yüksek dayanım, düşük yoğunluk, yüksek elastiklik modülü, yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruma, matrisle uyumlu olma ve ekonomiklik gibi özellikler olmaktadır (Onat, 2015)

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde takviye malzemesi olarak genellikle seramikler kullanılmaktadır. Bunlardan en çok tercih edilenler ise silisyum karbür (SiC), titanyum karbür (TiC), bor karbür (B<sub>4</sub>C) gibi karbürler, alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), silikon dioksit (SiO<sub>2</sub>) gibi oksitler ve titanyum nitrür (TiN), alüminyum nitrür (AlN), silikon nitrür (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) gibi nitrürler olmaktadır. Bunların yanında silisyum (Si), karbon (C), bor (B), molibden (Mo), tungsten-volfram (W) gibi elementel malzemeler de takviye malzemesi olarak kullanılabilir (Uygur ve Saruhan, 2004; Kalemtaş, 2014). Fakat tüm bu takviye malzemelerinin arasından SiC, alüminyum metal matrisli kompozitlerin üretiminde en sık tercih edilen takviye malzemesi olmaktadır (Premkumar vd., 1992; Kalemtaş, 2014). Bu durum Şekil 2.5'te sunulan metal matrisli kompozit üretiminde endüstriyel firmalar tarafından kullanılan takviye malzemelerinin kullanım oranlarından da görülebilmektedir.



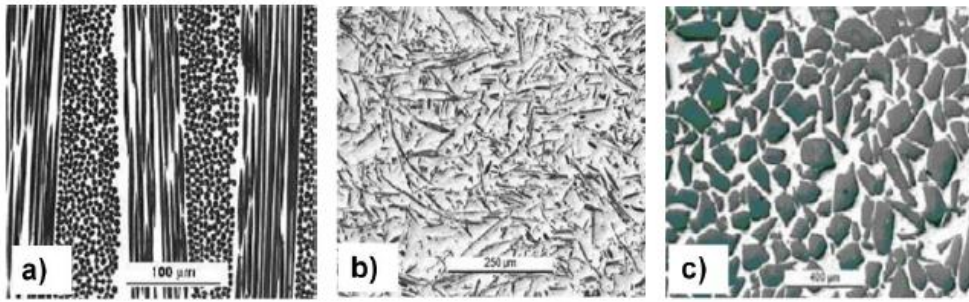
**Şekil 2.5.** Metal matrisli kompozit üretiminde endüstriyel firmalar tarafından kullanılan takviye malzemelerinin kullanım oranları (Kalemtaş, 2014).

Kullanılan takviye malzemelerine göre üretilen metal matrisli kompozit malzemelerin sertliği, kullanım sıcaklığı, aşınma ve korozyon direnci gibi pek çok özelliğini değiştirmek mümkün olabilmektedir (Kalemtaş, 2014). Çizelge 2.3.'te çeşitli takviye malzemelerinin metal matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkisi ve üretilen kompozitlerin uygulama alanları sunulmaktadır.

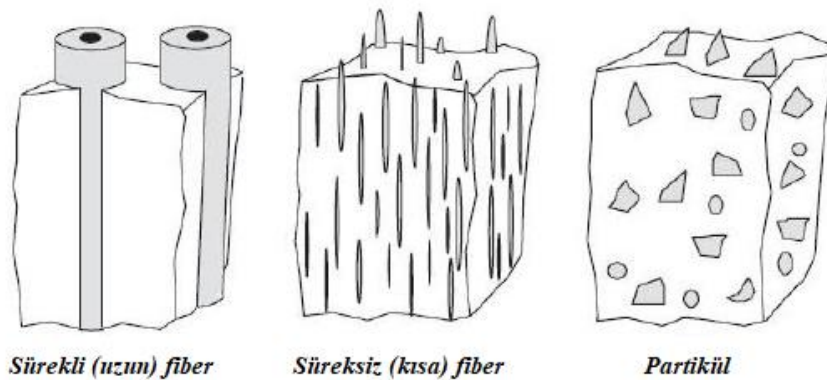
**Çizelge 2.3.** Takviye malzemelerinin MMK malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi ve üretilen kompozitlerin uygulama alanları (Singh vd., 2017).

<b>Takviye</b>	<b>Matris</b>	<b>Metot</b>	<b>Özellikler</b>	<b>Uygulamalar</b>
TiO <sub>2</sub>	Saf Al	Toz metalürjisi	Sertlik, yoğunluk ve aşınma direnci artar, süneklik azalır.	Otomotiv ve havacılık.
ZrB <sub>2</sub>	AA7075	In situ	Sertlik ve çekme gerilmesi artar, yoğunluk azalır.	Otomotiv, havacılık, denizcilik ve nükleer endüstrisi.
SiC	Al	Toz metalürjisi	Yoğunluk ve sertlik değerleri etkilenir.	Otomotiv, havacılık ve savunma.
Grafit	Çinko alaşım (ZA 27)	Vorteks döküm	Süneklik, çekme ve basma dayanımı artar, sertlik azalır.	Motor yatakları, pistonlar, piston segmanları ve silindir gömlekleri.
Al-20Cu-10Mg alaşım	AA 2024	Karıştırma döküm (Stir casting)	Sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı ve elastikiyet modülü artar.	Uçak yapıları, perçinler, kamyon tekerlekleri ve vida makinesi ürünleri.
Uçucu kül (flyash)	Al 6061	Sıkıştırma döküm (Squeeze casting)	Sönümlenme kapasitesi artar.	Otomobil, denizaltı ve havacılık endüstrisi.
Alümina partikül	Çinko alaşım (ZA 27)	Basınçlı döküm (Compo casting)	Sönümlenme kapasitesi artar.	Yatak-rulman ve burç uygulamaları.

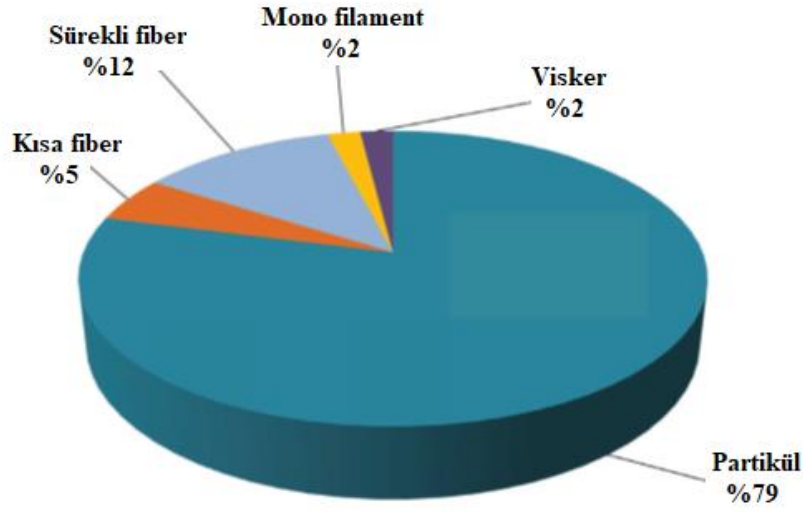
Metal matrisli kompozit malzemeler içinde yer alan takviye elemanlarının şekline göre; sürekli fiber, süreksiz (kısa) fiber ve partikül takviyeli metal matrisli kompozitler olmak üzere sınıflandırılmaktadır (Pul, 2010; Karaman, 2011). Endüstriyel uygulamalar baz alındığında içlerinden en yaygın kullanım alanına sahip olanlar, partikül formlu takviye malzemeleri olmaktadır. Bunun sebebi ise, partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretim ve kullanımlarının fiber takviyeli olanlara kıyasla çok daha kolay ve ucuz olması ve bu malzemelerin özelliklerinin yöne bağlı olmamasıdır (Takei vd., 1991a, 1991b; Kalemtaş, 2014). Şekil 2.6.'da takviye morfolojilerine göre sınıflandırılmış metal matrisli kompozitlerin SEM görüntüleri ve Şekil 2.7.'de bu çeşitli takviye şekillerinin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 2.8.'de ise metal matrisli kompozit üretiminde kullanılan bu takviye elemanı türlerine ait kullanım oranları sunulmuştur.



**Şekil 2.6.** a) sürekli fiber, b) süreksiz (kısa) fiber, c) partikül takviyeli MMK malzemelerin SEM görüntüleri (Pul, 2010).



**Şekil 2.7.** Çeşitli takviye şekillerinin şematik gösterimi (Clyne ve Withers, 1993).



**Şekil 2.8.** Metal matrisli kompozit üretiminde kullanılan takviye elemanı türlerinin oranları (Kalemtaş, 2014).

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde, takviye elemanlarının birçok farklı görevi bulunmaktadır. Örneğin hafif metallerin takviye elemanları ile güçlendirilmesi, bu malzemelerin, özellik olarak düşük ağırlığın önceliğe sahip olduğu uygulamalarda kullanımını mümkün kılmaktadır. Burada ön koşul, bileşenlerin özelliklerini geliştirmek ve üretilen malzemeyi özellik açısından ileriye taşıyabilmektir (Kainer, 2006). Matris malzemesi olarak hafif metallerin tercih edildiği kompozitler için hedeflenen geliştirmeler ise şunlardır:

- ✓ Oda sıcaklığı ve üzerindeki sıcaklıklarda, sertlik korunurken akma ve çekme dayanımının artırılması,
- ✓ Geleneksel malzemeler ve alaşımlarinkine oranla daha yüksek sıcaklıklarda daha fazla sürünme dayanımının sağlanması,
- ✓ Özellikle yüksek sıcaklıklarda yorulma dayanımının artırılması,
- ✓ Termal şok direncinin iyileştirilmesi,
- ✓ Korozyon dayanımının iyileştirilmesi,
- ✓ Elastisite modülünün artırılması,
- ✓ Termal genleşmenin (uzamanın) azaltılması.

Sonuç olarak, bu geliştirmeler ile; bu malzemelerin uygulama alanlarında artış, yaygın kullanılan malzemelerin yerine geçecek yeni malzemelerin keşfedilmesi ve bu malzemelerde kullanılan bileşen özelliklerinin optimizasyonu açısından önemli adımlar atılmış olacaktır (Keçeli, 2007).



### 2.1.1. Partikül takviyeli metal matrisli kompozitler

Son yıllarda metal matrisli kompozit malzemeler ile ilgili geliştirme çalışmaları, mevcut monolitik malzemelerle karşılaştırıldığında daha az maliyetli ve daha gelişmiş özellikli kompozitlerin elde edilmesini sağlayacak olan takviye malzemelerinin keşfi üzerine yoğunlaşmıştır (Srivatsan vd., 1991). Bu duruma bağlı olarak, partikül takviyeli kompozit malzemeler üretim kolaylıkları, nispeten düşük maliyetleri ve karakteristik olarak izotropik olan özellikleri ile önemli ölçüde dikkat çekmişlerdir (İbrahim vd., 1991; Ray vd., 2002). Böylece bu malzemeler, başta endüstriyel, askeri ve uzayla alakalı uygulamalar olmak üzere pek çok farklı alan için ilgi çeken adaylar olmayı başarmışlardır (Srivatsan vd., 1991).

Günümüzde, sürekli fiber takviyeli kompozitlere oranla daha orta düzeyli özelliklere sahip fakat çok daha düşük maliyetli olan partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitler için seri üretim tekniklerinin maliyetini düşürmeye yönelik çalışmalar oldukça önem kazanmıştır. Ayrıca bu malzemeler için işleme, kaynak ve geri dönüşüm gibi ikincil işlemlerin geliştirilmesi, bu malzemelerin kullanımının artırılması açısından büyük önem taşımaktadır (Lindroos ve Talvitie, 1995). SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, alüminosilikat ve grafit gibi düşük maliyetli partikül takviyeler, metal matrisli kompozitlerin maliyetlerini düşürmek amacıyla geliştirilmeye devam eden malzemelerdendir (Cole ve Sherman, 1995). Takviye malzemelerinden SiC, B<sub>4</sub>C ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> temel partikül takviye malzemelerinden olup, çok farklı boyut dağılımlarında ve saflıklarda elde edilebilmektedir (Srivatsan vd., 1991).

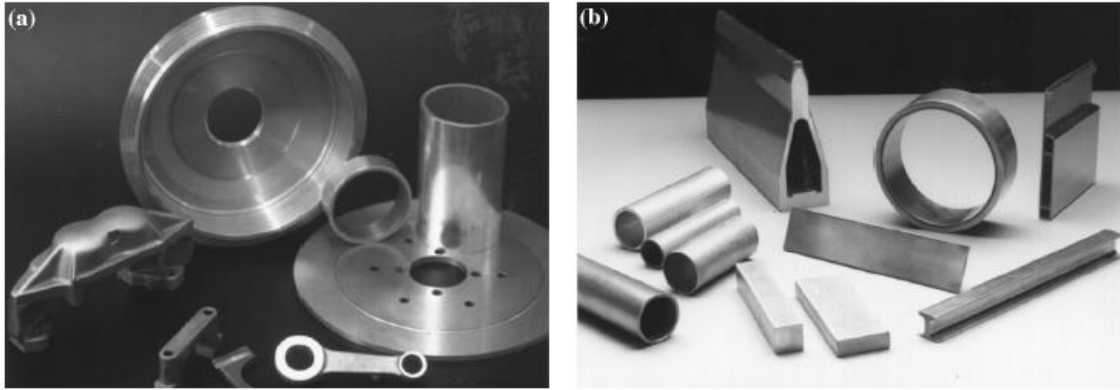
Metal matrisli kompozitler ile ilgili önceki çalışmalar çoğunlukla, Al ve Ti matrisli sürekli fiber takviyeli hibrid malzemelerin özellikleri ve bu malzemelerin geliştirilmesi üzerine olmuştur. Fakat ne yazık ki, umut verici özelliklerine rağmen bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanımı, zor olan üretim süreci ve fiber takviyelerin yüksek maliyetlerine (bor fiberleri için kilogram başına 660\$) bağlı olarak ortaya çıkan yüksek üretim maliyetleri sebebiyle sınır olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak, bu malzemelerin kullanım alanları neredeyse sadece askeri ve çok özel uygulamalar ile sınırlı kalmıştır (İbrahim vd., 1991).

MMK'lerde kullanılan süreksiz takviye malzemeleri hem partikül takviyeleri hem de visker (kedi bıyığı) ve kısa fiberleri içinde bulundurmaktadır. Son yıllarda partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler; uygun maliyetli takviyelerin bulunabilmesi, geri dönüştürülebilir ve tekrar üretilebilir mikroyapı ve özelliklere sahip MMK'lerin üretiminde kullanılacak üretim proseslerinin başarılı bir şekilde geliştirilmesi ve bu malzemeleri işlemede kullanılacak standart veya standarda yakın işleme yöntemlerinin bulunması gibi sebeplerle büyük ölçüde dikkat çekmektedir (Srivatsan vd.,1991). Partikül takviyeli kompozitler, sürekli fiber takviyeli

kompozitlerden 100 kat, visker takviyeli kompozitlerden 5 kat daha ucuza mal edilebilmektedir (Uygur ve Saruhan, 2004). Dahası, sürekli takviyeler ile oluşan fiber hasarı, mikroyapısal olarak uniform olmama, fiber uyumsuzluğu ve arayüzey reaksiyonları gibi problemler süreksiz takviyeler ile önlenmektedir. Ayrıca, otomotiv bileşenlerinde olduğu gibi aşırı yüklemeye veya termal dalgalanmalara maruz kalınan uygulamalarda süreksiz takviyeli MMK'lerin, takviyesiz malzemelere kıyasla dayanım ve sertlikte önemli gelişmeler sağladığı ve izotropiğe yakın özellikler sunduğu tespit edilmiştir. Fakat yine de süreksiz takviyeli MMK'ler tam olarak homojen değildir ve bu malzemelerin özellikleri; bileşen özelliklerine, arayüzey özelliklerine ve takviyenin geometrik şekline bağlı olarak değişmektedir (Srivatsan vd., 1991).

Visker takviyeli kompozitler, sürekli fiber takviyeli kompozitler ile partikül takviyeli kompozitlerin sahip oldukları mekanik özelliklerin ara değerlerine sahiptirler (Uygur ve Saruhan, 2004). Visker takviyeler, partikül takviyelerle benzer şekilde mukavemet ve ısıl kararlılık açısından ilgi çekici özellikler sergilese de bu tür visker takviyeli MMK'lerin kapsamlı şekilde ticarileşebilmesi; mevcut visker takviyelerin hatalı iç yapısı ve SiC visker takviyelerde olduğu gibi partikül kontaminasyonu içerebilen düzensiz bir yüzeye sahip olması, maliyetinin yüksek olması ve sağlıkla ilgili tehditlere sebep olabilmesi gibi nedenlerle engellenmiştir (İbrahim vd., 1991).

Partikül takviyeli MMK'ler dispersiyon sertleşmesi ile dayanımı artırılmış alaşımları ve sermetleri içermektedir. Dispersiyon ile sertleştirilen alaşımlar, tipik olarak %5'in altındaki hacim oranlarında ve düşük mikrometrik boyutlara sahip olan ve zor çözünen partiküller ile metal matris bileşenlerinden oluşmaktadır. Sermetler ise, seramik ve metallerin bileşiminden oluşmaktadır. Sermetler, seramik tanelerinin matrise bağlanması ile oluşan bir yapıya sahiptir. Bu tür malzemelerde metal ve seramik arası bağ, bileşenlerin ortak veya kısmen birbirleri içinde çözünmesiyle ya da her iki bileşende de kısmen çözünen elementlerin ilavesiyle sağlanmaktadır (İbrahim vd., 1991). Şekil 2.9.'da partikül takviyeli kompozit malzemelerden üretilmiş parça örnekleri görülmektedir.



**Şekil 2.9.** Partikül takviyeli kompozit parça örnekleri: a) Döküm fren ve motor bileşenleri, ekstrüzyon silindir gömlekleri, dövme bağlantı çubukları; b) Ekstrüzyon profiller (Degischer, 1997).

Partikül takviyeli MMK'ler mevcut metal ve seramiklerde tek başına bulunmayan eşsiz bir mikroyapı ve özellik bileşimi sunmaktadırlar (Tjong ve Ma, 2000; Keçeli, 2007). Bu özellikler büyük ölçüde; takviye partiküllerin çapına, partikül dağılımına, partiküllerin hacimsel oranına ve matris-takviye arayüzey durumuna bağlı olmaktadır (Srivatsan vd., 1991; Liu vd., 1994). Bu malzemelerin mekanik özelliklerinde optimum kombinasyon, ısı olarak kararlı olan partiküllerin metal matris içine uniform bir şekilde dağılması ile elde edilmektedir (Tjong ve Ma, 2000).

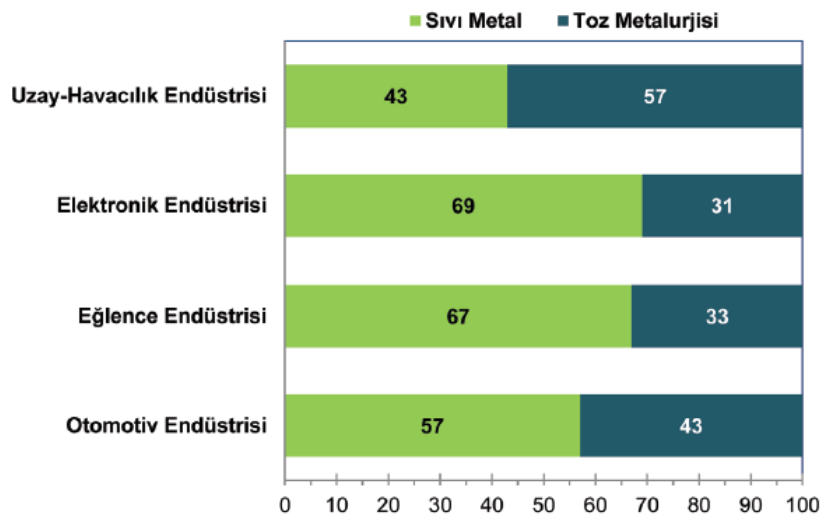
Son olarak, yıllar boyunca partikül takviyeli MMK'lerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini optimize etmek için çeşitli üretim teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler, işlem sırasındaki matris fazına göre sınıflandırılmaktadır. Buna göre üretim teknikleri; sıvı faz, katı faz ve iki fazlı (katı-sıvı) üretim teknikleri olmak üzere üç başlık altında incelenmektedir (Srivatsan vd., 1991). Bu teknikler arasından bir katı faz üretim tekniği olan toz metalürjisi, üretimin düşük sıcaklıklarda gerçekleştirildiği ve böylece matris-takviye arası istenmeyen arayüzey reaksiyonlarının minimuma indirgenebildiği bir yöntem olması sebebiyle avantajlı olmaktadır. Ayrıca takviye olarak visker veya partiküllerin kullanıldığı kompozitlerin toz metalürjisi ile üretimi diğer yöntemlere kıyasla daha kolay gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, aynı takviye malzemelerinin partikül formulu olanları sürekli fiber formulu olanlarına göre çok daha düşük maliyetli olmaktadır. Toz metalürjisinin bir diğer avantajı da takviye malzemelerin dağılımının homojen bir şekilde olmasıdır. Bu durum ise, sadece yapısal özellikleri geliştirmekle kalmayıp aynı zamanda özelliklerin tekrar üretilebilirlik seviyesini de artırmaktadır (Torralba vd., 2003). Konu ile ilgili olarak Çizelge 2.4.'te toz metalürjisi ve döküm yöntemleriyle üretilen MMK'lerin çekme özelliklerine ait karşılaştırma değerleri sunulmuştur.

**Çizelge 2.4.** Toz metalürjisi ve döküm yöntemleriyle üretilen MMK'lerin çekme özelliklerinin karşılaştırılması (Uygur ve Saruhan, 2004).

Kompozit	Elastisite Modülü (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
%25 SiC <sub>p</sub> -6061 (1)	122,7	434	498	3,91
%25 SiC <sub>p</sub> -7091 (1)	117	686	805	2
%25 SiC <sub>p</sub> -2124 (1)	116	420	574	5,4
%20 SiC <sub>p</sub> -2024 (2)	108	419	497	2,5
%15 SiC <sub>p</sub> -7075 (2)	99	581	610	2,5

- (1) Toz metalürjisi yöntemiyle üretilerek ekstrüzyona tabi tutulmuş ve ısıl işlem görmüş.  
(2) Döküm yöntemiyle üretilerek ekstrüzyona tabi tutulmuş ve ısıl işlem görmüş.

Uygulama alanlarına göre döküm (sıvı metal) ve toz metalürjisi yöntemlerine ait kullanım oranları Şekil 2.10.'da verilmiştir. Buna göre; döküm yönteminin en çok elektronik endüstrisinde kullanıldığı görülmektedir. Genel olarak döküm yöntemi toz metalürjisi yöntemine göre daha karmaşık şekilli parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Fakat, küçük partikül boyutları ve yüksek takviye oranları ile yapılacak olan kompozit üretimi için toz metalürjisi daha uygun olmaktadır (Kalemtaş, 2014). Çizelge 2.5.'te ise farklı MMK üretim yöntemlerinin maliyet ve uygulama alanları açısından karşılaştırılması görülmektedir.



**Şekil 2.10.** MMK üretiminde kullanılan toz metalürjisi ve döküm yöntemlerinin uygulama alanlarına göre kullanım oranları (Kalemtaş, 2014).

**Çizelge 2.5.** Farklı MMK üretim yöntemlerinin maliyet ve uygulama alanları açısından karşılaştırılması (Kalemtaş, 2014).

Yöntem	Maliyet	Uygulama	Açıklama
Difüzyonla bağlama	Yüksek	Levha, kanat, mil ve yapısal elemanlar	Matris için levha ve takviye fazı için filaman kullanımı
Toz Metalürjisi	Orta	Küçük dairesel elemanlar, cıvata, piston, valf ve yüksek mukavemetli ısıya dayanıklı malzemeler	Matris ve takviye formları toz halinde ve partikül takviyesi için uygundur. Ergime olmadığından tepkime bölgesi yoktur ve karma yapılı malzemenin mukavemeti yüksektir.
Sıvı metal sızdırma(infiltrasyon)	Düşük-Orta	Rot, tüp ve özelliklerin tek ekseninde maksimum olduğu bağlantı elemanları	Filaman takviyeler kullanılmaktadır.
Sıkıştırırmalı (Basınçlı) döküm	Orta	Piston bağlantı rotları, külbütör kolu, silindir başı gibi otomotiv parçaları	Her tür takviye formu için uygundur ve üretim yelpazesi geniştir.
Püskürtme	Orta	Sürtünme malzemeleri, motor fırçaları, kesme ve taşlama elemanları	Partikül takviyeler kullanılmaktadır. Yüksek yoğunlukta malzemeler üretilmektedir.
Kompo-döküm	Düşük	Otomotiv, uzay, endüstriyel ekipman ve spor malzemeleri ile yatak malzemeleri	Özellikle partikül takviyeler ve süreksiz fiberler takviye formu olarak kullanılır.

### 3. ALÜMİNYUM METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Uzunca bir zamandır, hem ar-ge çalışmaları hem de endüstriyel uygulamalar için MMK'lerin üretiminde en çok tercih edilen matris malzemeleri alüminyum ve alaşımları olmaktadır. Bu durumun en önemli sebebi, Al ve alaşımlarının, MMK'ler için çoğu uygulamanın öncelikli isteği olan düşük yoğunluğa sahip hafif malzemeler olmasıdır. Ayrıca Al ve alaşımları, Ti ve Mg gibi diğer hafif metaller ve alaşımları ile kıyaslandığında daha düşük maliyete sahiptir. Bu gibi üstün özellikleri ile Al ve alaşımları, otomotiv ve havacılıktan, spor ve gündelik kullanıma kadar varan birçok alandaki yaygın kullanımları sebebiyle dayanım, süneklik ve korozif özellikleri iyi bilinen alaşımlardır (Lindroos ve Talvitie, 1995; Torralba vd., 2003). Bununla birlikte, bu malzemelerin çekme dayanımı, ergime sıcaklığı, aşınma dayanımı ve işlenebilirlik-üretilebilirlik gibi özelliklerini çeşitli takviye elemanlarının katkısı ile geliştirmek ve iyileştirmek mümkündür (Kalemtaş, 2014). Böylece bu özellikler, farklı uygulamalarda kullanılmak ve bu uygulamaların gereksinimlerini karşılamak üzere değiştirilip geliştirilebilmektedir (Lindroos ve Talvitie, 1995; Torralba vd., 2003).

Al ve alaşımları düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek elektriksel iletkenlik, yüksek korozyon direnci ve nispeten düşük maliyeti ile MMK'lerde kullanımı giderek artan malzemelerdir (Eliasson ve Sandström, 1995). Bu özelliklerin kombinasyonu mevcut geleneksel malzemeler ile elde edilememektedir (Hunt, 2000). Fakat Al ve alaşımlarının düşük ergime sıcaklığına (~ 660°C) sahip olması, bu malzemelerin maksimum çalışma sıcaklığını ve dolayısıyla kullanımlarını kısıtlayan temel faktör olmaktadır. Yine de düşük özgül ağırlık, yüksek elastisite modülü, yüksek özgül dayanım ve yüksek aşınma direnci gibi özellikleri ile pek çok uygulamada ve uçak yapımında ana malzeme olarak kullanılmaya devam etmektedir (Burg ve Crosky, 2001; Keçeli, 2007).

Al MMK'ler uygun matris-takviye kombinasyonuna ve farklı üretim yöntemlerine bağlı olarak gelişen özellikleri ile çeşitli endüstriyel talepleri karşılamaktadır. Son yıllarda seramik takviyelerin Al MMK'lerin fiziksel, termo-mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine etkisini araştırmak için pek çok çalışma gerçekleştirilmektedir. Bu tür malzemelerde ana yapıyı oluşturan matris Al ve alaşımlarından olmaktadır. Yapı içerisindeki diğer bileşen olan takviyeler ise genellikle SiC, B<sub>4</sub>C, TiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi seramikler olmaktadır. Oluşturulan kompozitin özelliği takviye özelliklerine ve katkı oranına bağlı olarak değişir. Al MMK'ler diğer kompozitlere göre; düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek sıcaklık özellikleri ve ısı kararlılık, iyileştirilmiş rijitlik, sertlik ve aşınma değerleri ile geliştirilmiş sönümleme kapasitesi özellikleri açısından

avantajlı olmaktadır (Prasad ve Rohatgi, 1987; Pan vd., 1990; Lloyd, 1994; Bedir ve Ögel, 2004; Bedir, 2006).

Al MMK'lerin üstün özellikleri metal matris ve sert takviyelerin bileşiminden ileri gelmektedir ve bu özellikler yalnızca matris ve takviye malzemelerinin düzgün seçimi ve uyumu ile elde edilebilmektedir (Lindroos vd., 2004). Al alaşımlarından 2xxx (AlCuMg), 5xxx (AlMg), 6xxx (AlMgSi), 7xxx (AlZnMgCu) serisi ve ıslatma kabiliyetine bağlı olarak özellikle 8xxx (AlLi) serisi Al alaşımları kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Al MMK'lerin üretiminde takviye seçimi uygulamaya, üretim yöntemine ve malzeme maliyetine bağlıdır (Huda vd., 1995). Seramik partikül takviyeler, Al MMK'lerin üretiminde en sık kullanılan takviye malzemeleridir ve genellikle oksit, karbür ve nitrür bileşenlerinden oluşmaktadır (Torralba vd., 2003; Bedir, 2006). Bunların içinde en çok tercih edilenler ise SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olmaktadır. Özellikle SiC, yoğunluğu alüminyumun yoğunluğundan daha yüksek olmasına rağmen, düşük maliyeti ve geniş yelpazedeki kalite mevcudiyeti ile en yaygın kullanılan takviye malzemesidir ve kompozitin elastisite modülü ve çekme dayanımında artışa sebep olmaktadır. Ayrıca, kompozitlere SiC ilavesi ile tribolojik özelliklerde de önemli ölçüde gelişme meydana gelmektedir (Torralba vd., 2003). Bu tür SiC takviyeli Al MMK'ler yüksek mukavemet, yüksek spesifik modül (E/ρ) ve düşük yoğunluğa sahip olup özellikle otomotiv, havacılık ve savunma endüstrisinde önemli ölçüde ilgi çekmektedir (Rao ve Upadhyaya, 1996).

Günümüze kadar yapılan çalışmalara bakıldığında, SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviye edilen Al MMK'lerin aksine B<sub>4</sub>C ile takviye edilenlerin çok daha az çalışıldığı ortaya çıkmaktadır (Keçeli, 2007). Son yıllarda ise B<sub>4</sub>C, düşük yoğunluğu ve SiC ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi yaygın kullanılan mevcut takviye malzemeleriyle kıyaslanabilir mekanik-thermal özellikleri ile ilgi çekmektedir (Huda vd., 1995).

Al MMK'ler içerdikleri takviyelerin şekillerine göre; sürekli fiber, visker-süreksiz fiber ve partikül takviyeli olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Bunların içinde en iyi özellikler, sürekli fiber takviyeler ile üretilen kompozitlerde fiber yönünde elde edilmektedir (Lindroos ve Talvitie, 1995). Dolayısıyla özellikle bu tür anizotropik özelliklerinden faydalanabilecek uygulamalar için ilgi çekici olmaktadır (Rao ve Upadhyaya, 1996). Fakat sürekli fiber takviyelerin maliyetlerinin çok yüksek olması sebebiyle bu kompozit türünün kullanımı sadece, kullanımlarının çok zorunlu olduğu özel uygulamalar ile sınırlı olmaktadır. Bu sebeple günümüzde Al MMK'lerin büyük çoğunluğu partikül takviyeli kompozitlerden oluşmaktadır (Lindroos ve Talvitie, 1995). Fiber kompozitlerle karşılaştırıldığında partikül takviyeli kompozitler, gelişmiş süneklik ve azalmış anizotropik özellikler sunmakta ve ekstrüzyon, dövme,

haddeleme gibi geleneksel tekniklerle ikincil işlemlere tabi tutulabilmektedirler. Ayrıca maliyet-fayda açısından bakıldığı zaman da partikül takviyeli kompozitler genellikle çok daha üstün olmaktadır (Rao ve Upadhyaya, 1996). Sonuç olarak Al MMK'ler için geliştirme çalışmaları şu an için iki alan üzerine yoğunlaşmaktadır. Bunlar; (I) çok özel uygulamalar için üstün özelliklere sahip yüksek maliyetli sürekli fiber takviyeli kompozitler ve (II) daha geniş uygulama alanları için orta düzeyde özelliklere ve düşük maliyete sahip süreksiz takviyeli kompozitlerin seri üretim teknolojileri üzerine yapılan çalışmalardır (Lindroos ve Talvitie, 1995).

### 3.1. Al MMK Kullanım/Uygulama Alanları

Al MMK'ler başta otomotiv, havacılık, uzay, savunma ve elektronik endüstrisinde olmak üzere, yüksek sıcaklık dayanımı ve iyi aşınma direncine gereksinim duyulan uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Al MMK kullanılarak üretilen araçlarda ağırlığın %10 oranında düşürülmesiyle, yakıt tüketiminde %5 tasarruf sağlanmaktadır. Bu sebeple günümüzde dökme demir fren kampanaları ve pistonların yerine Al esaslı kompozitler kullanılmaktadır. Sürtünme dayanımının fazla olmasının istendiği uygulamalar için ise, takviye boyutları artırılarak uygun maliyetli parçalar üretilebilmektedir (Uygur ve Saruhan, 2004).

Otomotiv alanında Al MMK'ler, taşıt ağırlığı ve fren çalışma sıcaklıklarını düşürmeleri sebebiyle; başta fren sistemi elemanlarında olmak üzere motor pistonu, silindir gömlekleri ve fren diski/kampanası gibi parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chung ve Zweben, 2000; Bedir, 2006; Keçeli, 2007). Hafif alaşımlı metal kompozitler, otomotiv mühendisliğinde, motor alanında da yüksek bir uygulama potansiyeline sahiptir. Salınlı yapı birimleri için; supap mekanizması, piston çubuğu ve piston pimlerinde, kapaklar için; silindir kafası ve krank mili ana yatağında, motor bloğu için; kısmi olarak güçlendirilmiş silindir bloklarında kullanılmaktadırlar (Keçeli, 2007). Al MMK'lerin içinde en büyük taneli ve hacimsel orana sahip olanlar genellikle tren ve otomobillerin fren sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu malzemelerden Al MMK fren diskleri Avrupa'da demir yollarında, Amerika'da ise bazı özel araçlarda kullanılmaktadır. Havacılık alanında ise, helikopterlerin pervane kanat kollarında ve uçuş kontrol hidrolik manifoldlarında tercih edilirler (Bedir, 2006). Uzay uygulamaları için yüksek sertlik ve sıfıra yakın termal genleşme katsayısına sahip Al MMK'ler geliştirilmektedir. Al MMK'ler yüksek ısı iletkenliğe, düşük ısı genleşme katsayısına, yüksek özgül dayanıma ve sertliğe sahiptir. Bu özellikleri, Al MMK'lerin 1980'lerin sonlarında uzay uygulamaları için dikkat çekmelerini sağlamıştır. Uçak yapımında ise Al MMK'lerin kullanımı gövde malzemeleri ve motor malzemeleri için olmak üzere iki geniş kategoriye ayrılmıştır (Burg ve Crosky, 2001; Keçeli, 2007).



### 3.2. Al MMK Üretim Yöntemleri

Al MMK'lerin üretimi için çeşitli üretim yöntemleri bulunmaktadır. Bu üretim yöntemleri, üretim sırasındaki metal matris sıcaklığına bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Eğer Al MMK'lerin üretimi likidüs sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta gerçekleştiriliyorsa yöntem bir sıvı faz üretim yöntemi, solidüs sıcaklığının altında bir sıcaklıkta gerçekleştiriliyorsa yöntem bir katı faz üretim yöntemi olarak sınıflandırılmaktadır. Sıcaklığın bu iki sıcaklığın arasında olduğu durumlarda ise yöntem iki fazlı (katı-sıvı) üretim yöntemi olarak sınıflandırılmaktadır (İbrahim vd., 1991; Keçeli, 2007). Döküm (sıvı), toz metalürjisi (katı) ve iki faz (katı-sıvı) gibi üretim yöntemleri ile takviye malzemeleri matris malzeme içerisine ilave edilerek kompozit üretimi gerçekleştirilmektedir (Uygur ve Saruhan, 2004). Partikül takviyeli Al MMK'lerin üretiminde çeşitli döküm yöntemlerini içeren sıvı faz üretim yöntemleri ile bir katı faz üretim yöntemi olan toz metalürjisi en sık kullanılan iki yöntemdir (Lindroos ve Talvitie, 1995).

Üretim teknikleri, kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemede oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Al MMK'lerde matris-takviye arası arayüzey özellikleri kompozitin özelliklerini etkileyen en önemli değişkenlerden biridir. Fakat ne yazık ki, Al MMK'lerde kullanılan partiküller matris tarafından düşük ıslatılabilirliğe sahip olmaktadır. Bu durum, zayıf matris-takviye arayüzeyine sebep olduğu kadar, takviye fazın zayıf dağılımı ile de sonuçlanmaktadır (Liu vd., 1994; Keçeli, 2007). Toz metalürjisi yöntemi, sıvı faz üretim yöntemlerinin aksine düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi ve fazların mikroyapısal kontrolüne imkan sağlaması sebebiyle arayüzey kinetiğinde daha iyi kontrol sağlayan bir yöntemdir (Harrigan, 1998). Toz metalürjisi gibi matris-takviye arası iyi bir arayüzey oluşumuna imkan sağlayan üretim yöntemleri, geleneksel döküm teknikleri ile karşılaştırıldığında çok daha iyi mekanik özellikler sağlamaktadır (Uygur ve Saruhan, 2004). Ayrıca sıvı faz üretim yöntemlerinin aksine toz metalürjisi yöntemi, takviyenin matris içine homojen dağılımını da sağlamaktadır (Rao ve Upadhyaya, 1996). Hem bu özellikler hem de döküm yönteminde sıvı alüminyumun seramik takviye malzemelerini ıslatabilirliğinin düşük olması sebebiyle MMK'ler genel olarak toz metalürjisi yöntemiyle üretilmektedir (Ghosh, 1993; Wang vd., 2004).

Al MMK'lerin yapı ve özelliklerini optimize etmek amacıyla günümüze kadar çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiştir (İbrahim vd., 1991; Keçeli, 2007). Bu yöntemlerin arasında, ıslatmayı artırmak amacıyla, üretim öncesinde takviye partiküllere bir tür yüzey kaplamanın uygulandığı alternatif fakat pahalı yöntemler de bulunmaktadır. Ancak bu tür yöntemlerde takviyelerin ön işleme tabi tutulması, Al MMK'lerin maliyetini artırmış ve böylece ticari kullanımlarını kısıtlamıştır. Ek olarak, son zamanlarda geliştirilen ve tungsten (W), molibden

(Mo), niyobyum (Nb), tantal (Ta) gibi bazı yüksek performans malzemelerinin matris olarak kullanıldığı Al MMK'lerin geleneksel sıvı faz yöntemleri ile üretimi, bu malzemelerin çok yüksek ergime sıcaklıklarına sahip olmaları nedeniyle zor olmaktadır (Liu vd., 1994; Keçeli, 2007). Bu durum dikkate alındığında, Al MMK'lerin üretimi için toz metalürjisi yöntemi ön plana çıkmış ve en önemli üretim yöntemlerinden biri haline gelmiştir (Keçeli, 2007).

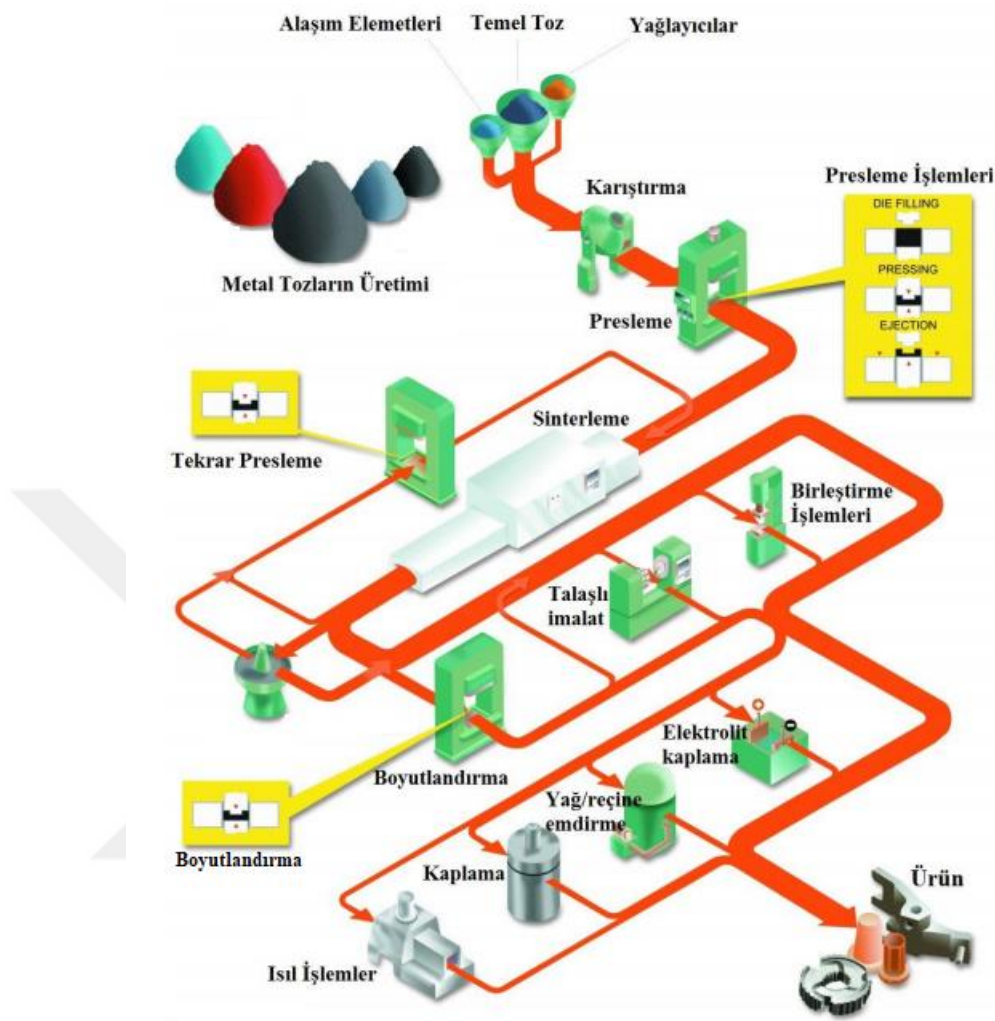
Toz metalürjisi, SiC takviyeli Al MMK'lerin üretiminde kullanılan yöntemlerden biridir. Toz metalürjisi ergime sıcaklıklarının altındaki düşük üretim sıcaklıklarında gerçekleştirildiğinden, bu yöntemle üretilen Al-SiC kompozitlerde istenmeyen arayüzey reaksiyonları ve zararlı intermetalik fazların oluşumu dökümle üretilenlere kıyasla daha ihmal edilebilir düzeyde olmaktadır (Rao ve Upadhyaya, 1996).

#### 4. TOZ METALÜRJİSİ

Toz metalürjisi, tozların çeşitli işlemlerden geçirilerek yararlı mühendislik malzemelerine dönüştürülmesini sağlayan bir üretim yöntemidir. Çoğu parçacıklı üretim sistemi eski tarihi kaynaklı olmasına rağmen, teknik ürünler için tozların değerlendirilip kullanılması ancak yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren başlamıştır. Seramik terimi Yunanca “keramos” kelimesinden gelir ve kil esaslı sinterlenmiş çömlek anlamına gelmektedir. Tarihin eski dönemlerinden beri seramik eşyalara pişirilerek mukavemet kazandırılmaktadır. Günümüzde tuğlalar, beyaz seramik gereçleri ve sağlık gereçleri için hala bu teknik kullanılmaktadır. Tozlardan metal parçaların üretilmesi ise ilk olarak İnkalar tarafından mücevher üretiminde kullanılmak üzere gerçekleştirilmiştir. Diğer bir tarihi örnek ise Hindistan’daki 6,5 tonluk Delhi sütunudur ve indirgenmiş demir tozları kullanılarak yapılmıştır. Daha yakın tarihi örnek olarak ise bakır, gümüş ve kurşun gibi tozlardan üretilen madeni paralar gösterilebilir. Fakat tozların kullanımında dönüm noktası olarak kabul edilen kullanım alanı, Coolidge tarafından tungsten tozları kullanılarak üretilen ısıya dayanıklı lamba flamanları olmuştur (German, 2007).

Geleneksel toz metalürjisi, en basit tanımıyla, kuru partiküller halindeki katı metal, alaşım veya seramiklerin, önceden belirlenen bir şekle ve daha fazla işlem gerektirmeden çoğu durumda kullanılmasına izin verecek özelliklere sahip mühendislik bileşenlerine dönüştüğü üretim yöntemidir. Bu yöntemdeki temel aşamalar; toz üretimi, tozların sıkıştırılması (preslenmesi, kompakt hale getirilmesi) ve ham numunenin, ana bileşeninin ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa ısıtılması ile istenen özelliklerin geliştiği sinterleme aşamalarından oluşmaktadır (Thümmler ve Oberacker, 1993). Şekil 4.1.’de toz metalürjisi yöntemine ait üretim aşamaları görülmektedir.

Sinterleme, tozlara uygulanan ve toz partiküllerinin bağlanmasını sağlayan bir ısı işlemidir. Sinterleme öncesi parçaya ham parça adı verilir. Bu işlem sonrasında ise sağlam ve kullanışlı katı form elde edilmektedir. Sıkıştırma ve sinterleme aşamalarından sonra önemli olan nokta elde edilen mikroyapı özellikleridir. Toz metalürjisi yönteminin en önemli avantajlarından biri mikroyapı kontrolüdür. Bu avantaj belli uygulamaların ihtiyaçlarına yönelik üretim yapılabilmesi hususunda özellikle önemli olmaktadır. Diğer üretim yöntemleri ise, uygulamaya yönelik mikroyapı sağlama konusunda toz metalürjisi ile rekabet edememektedir.



Şekil 4.1. Toz metalürjisi üretim aşamaları (Öztürk ve İcin, 2015).

Toz metalürjisi, döküm yöntemlerinde olduğu gibi net şekilli parça üretimine imkan tanımaktadır. Fakat toz teknikleri, sadece düşük ergime sıcaklıklarına sahip metallere uygulanabilen döküm yönteminden farklı olarak hemen hemen her malzemeye uygulanabilmektedir. Bundan dolayı toz metalürjisi ile üretilen kompozitler, yüksek sıcaklık seramikleri, bazı polimerler, bakırlı çelikler, refrakter metallere, geniş bir dağılım gösteren intermetalikler, sementler ve karışık fazlı bileşimlerin çoğu döküm yöntemiyle üretilmemektedir. Toz metalürjisi, aynı ürünü tekrar tekrar kopyalamaya uygun kalıp boşlukları sayesinde seri üretim yapılmasına imkan sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntemde, karmaşık şekilleri son boyuta getirebilme ve şekil verebilme özelliği önemli ölçüde ekonomik yarar sağlar. Bununla birlikte, yüksek oranda malzeme kullanımı (malzeme kaybının az olması) ve nispeten daha düşük enerji

tüketimi sağlayan otomasyonun toz tekniklerinde kullanılabilmesi de ekonomik yönden kazanç sağlamaktadır.

Toz metalürjisinde geniş uygulama bulan alanlardan bir tanesi, kompozit üretimi amacıyla birbirleri içerisinde çözünmeyen tozları çeşitli oranlarda karıştırmaktır. Bu şekilde üretilen malzemelerde, fazların boyut, şekil ve miktarı bakımından mikroyapı kontrolü sağlanabilmesi ile özelliklerin isteklere göre elde edilmesi sağlanabilmektedir. Bu yöntemde kullanılan toz partiküllerinin boyutu için uygun birim,  $10^{-6}$  m olan, mikrometredir ( $\mu\text{m}$ ). Toz metalürjisinde kullanılan pek çok mühendislik parçacığının boyutu 0,1 ile 200  $\mu\text{m}$  aralığında değişir. Bu partiküller, sıvı ile katı arasında bir davranış sergiler. Tozlar, yerçekimi etkisi ile sıvılar gibi akar ve böylece bir kabı veya kalıbı doldurur. Aynı zamanda tüm tozlar, gazlar gibi sıkıştırılabilir özellik gösterir ve uygulanan deformasyon sonucunda ise katılar gibi davranır. Tozların sertliği arttıkça, sıkıştırmak için gereken basınç da artar. Yumuşak tozlar tam yoğunluğa yakın olacak şekilde preslenebilir, fakat sert tozlarda istenen şekil polimerlerin katkısıyla elde edilebilmektedir.

Toz esaslı parçalar önceden sadece ucuzluk sebebiyle tercih edilirken, günümüzde daha çok homojenlik, üretilebilirlik ve üstün özellikler gibi sebeplerle kullanım alanı bulmaktadır. Aynı zamanda düşük üretim maliyeti ve yüksek performans ikilisi sayesinde bu yöntem çok farklı alanlarda büyüme imkanı bulabilmektedir. Son zamanlarda bu yöntem ile üretilen yeni bileşimler, jet motorundan biyomedikal protezlere kadar, farklı alanlarda istenen özellikleri sağlayabilmek amacı ile genellikle kompozit malzemeler olmaktadır (German, 2007).

Toz metalürjisi yöntemi ile gerçekleştirilecek üretimde 6 anahtar tasarım faktörü göz önünde bulundurulmaktadır. Bunlar; boyut, şekil, toleranslar, malzeme, özellikler ve miktar-maliyet başlıkları altında verilmektedir.

**Boyut.** Üretim yöntemlerinin fiziksel durumuna ve ticari üretim ekipmanlarının fiziksel limitlerine bağlı olarak, üretilecek parça boyutları belli kritik sınırlara sahip olmaktadır. Örneğin metal enjeksiyon kalıplama gibi bazı toz teknikleri için ürün boyutları oldukça kısıtlı olmakta iken, sıcak izostatik presleme gibi toz teknikleri için önemli bir kısıtlama olmamaktadır.

**Şekil.** Toz metalürjisi, karmaşık şekillerin üretimine imkan veren esnek bir üretim yöntemidir. Bu yöntemde karmaşık şekillerin üretilebilmesi için, tozları kompakt (sıkıştırılmış, katı) hale getirirken kullanılan yöntem belirleyici olmaktadır. Presleme aşamasında kalıp, tozların şekil verilerek katı hale getirildiği parçadır. Dolayısıyla kalıp üretiminin kolay olması ve ham

(sinterlenmemiş) numunenin kalıptan kolay çıkarılabilir olması gibi ölçütler çoğu durumda üretilecek parça için izin verilebilecek şekil karmaşıklığını belirleyici olmaktadır.

**Toleranslar.** Toz metalürjisinde, tüm nete yakın veya net şekilli imalat yöntemlerinde zorlu bir özellik olan, boyutsal toleransların kontrolü karmaşık bir konudur. Bu toleranslar toz karakteristikleri, presleme parametreleri ve sinterleme döngüsü gibi proses parametreleri tarafından belirlenmektedir. Sinterleme sırasındaki yoğunlaşma miktarı ve buna bağlı olarak meydana gelen büzüşmenin homojenliği, çoğu toz metalürjisi ürününde boyutsal toleransları kontrol eden faktörler olmaktadır. Geleneksel (pres-sinter) toz metalürjisi parçalarında, sinterleme sırasındaki boyut değişimi çok küçük miktarlarda gerçekleştiğinden bu parçalar, toleranslarda en geniş dağılımı gösteren sıcak izostatik presleme ile üretilen parçalara kıyasla, tipik olarak en dar dağılımda boyut toleranslarına sahip olmaktadır.

**Malzeme.** Toz metalürjisi uygulamalarında toz şekli, boyutu ve saflığı gibi faktörler önemli olmaktadır. Bazı katılaştırma (presleme) işlemleri veya adımları için tozların düzgün ve küresel şekilli parçacıklar halinde olması arzu edilirken, bazıları için çok daha düzensiz toz şekilleri istenmektedir. Neredeyse tüm malzeme ve alaşımlar toz formunda bulunabilmektedir. Sement karbürler, bakır-tungsten kompozitler ve refrakter metaller (tungsten, molibden, tantal vb.) gibi bazı malzemeler için toz metalürjisi tek geçerli üretim yöntemi olmaktadır.

**Özellikler.** Toz metalürjisinde ürünlerin mekanik ve fiziksel özellikleri direkt olarak yoğunluk, ham malzeme (toz) özellikleri ve üretim koşullarından (çoğunlukla sinterleme aşaması) etkilenmektedir. Toz metalürjisi malzemeleri tam yoğunluktan saptıkça, özelliklerde düşüş görülmektedir.

**Miktar-Maliyet.** Toz metalürjisi yönteminin ekonomik olarak uygulanabilirliği, tipik olarak üretilecek parça sayısına bağlı olmaktadır. Örneğin geleneksel pres-sinter toz tekniği için üretim miktarı, ekipman yatırımını karşılayabilmesi açısından en az 1000-10000 parça arası olmaktadır. İzostatik işlemlerde ise ekonomik yönden uygulanabilirlik, tam tersine, 1-10 parça gibi çok daha düşük miktarlarda uygun olabilmektedir (ASM Handbook, 1998).

Toz metalürjisi daha öncede bahsedildiği gibi partikül takviyeli MMK'lerin üretiminde en çok kullanılan yöntemdir (Liu vd., 1994; Huda vd., 1993a; Keçeli, 2007). Partikül takviyeli MMK'lerin üretiminde metal/alaşım tozların partikül formu takviye malzemeleri ile karıştırılması çok yönlü bir tekniktir (Clyne, 2001). Temel olarak bu yöntemde, önceden alaşımlanmış veya karıştırılmış olan tozlar istenen şekle uygun kalıp boşluğuna sahip bir kalıp içinde sıkıştırılır ve katı hale getirilir. Daha sonra elde edilen ham parça, bir ısıl işlem fırınında

mevcut mekanik bağları metalürjik bağlara dönüştürmek ve böylece tozları daha güçlü bir bağ ile birbirlerine bağlamak amacıyla sinterleme işlemine tabi tutulur (Newkirk ve Kohser, 2004).

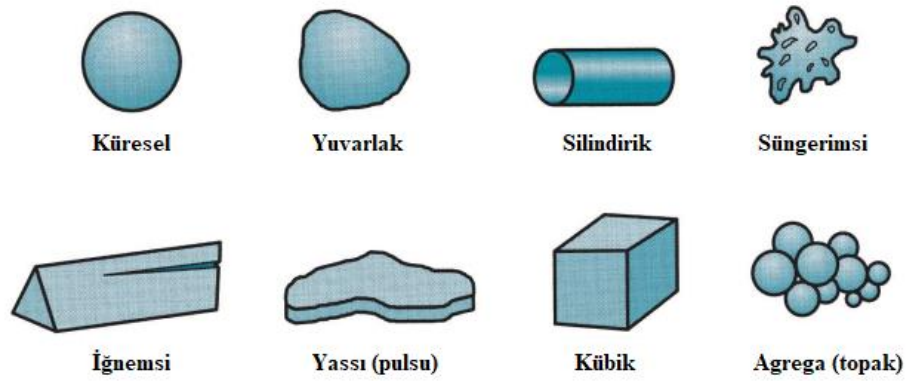
Toz metalürjisi yönteminin pek çok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajların başında, bu tekniğin ergitme ve döküm gibi süreçleri içermemesi ve böylece bu şekilde üretim gerçekleştiren diğer tekniklere göre daha ekonomik olması yer almaktadır (Huda vd., 1995). Ergime sıcaklığı yüksek olan metaller, toz metalürjisi ile kolaylıkla şekillendirilebilir. Döküm, gibi alışlagelmiş üretim tekniklerinde yaşanan oksidasyon, segregasyon, gaz absorpsiyonu ve yüksek yoğunluk farkından dolayı alaşım oluşturmama gibi birçok problem toz metalürjisi yöntemi ile kolaylıkla ortadan kaldırılabilir (Baksan ve Gürler, 2003). Dahası, karmaşık şekle sahip parçalar bu yöntemle üretim sonrası ek işlemlere gerek kalmaksızın kolay bir şekilde üretilebilmektedir. Aynı zamanda yataklar ve filtreler gibi gözenekli parçalar da bu yöntemle daha iyi özelliklere sahip olacak şekilde üretilmektedir. Havacılık uygulamaları gibi oldukça kritik uygulama yerlerinde kullanılan tam yoğunluklu ürünlerin üretimi için de toz metalürjisi tekniği oldukça yaygın bir şekilde tercih edilmektedir (Keçeli, 2007).

Toz metalürjisi yönteminin üstün özelliklerine bakıldığında ileriki yıllarda giderek artan bir şekilde kullanılacağı şüphesizdir. Paslanmaz çelik ve alüminyum ile bakır ve bakır esaslı alaşımların toz pazarı 2000 yılından beri giderek genişlemektedir. Alüminyum tozları boyalar, kaplamalar, patlayıcılar, katı füze ve roket yakıtlarında, toz metal parçalarda ve kompozit malzeme üretiminde giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Son yıllarda ise toz metalürjisi ile üretilmiş alüminyum parçalar özellikle otomobil üreticilerinin ilgisini üzerine çekmektedir. Avrupa'da da toz metal parça üretimi her geçen yıl artmaktadır. Bu sebeple üreticiler bu alanda üretim yapacak yeni tesislerin yatırımına ilgi göstermektedir. Bu alanda özellikle General Motors, Ford, Daimler-Chrysler, Toyota, Honda, BMW, Volkswagen gibi otomotiv firmaları önemli adımlar atmaktadır. Sonuç olarak, bu sektörde global bir gelişme olduğu açıkça söylenebilmektedir (Baksan ve Gürler, 2003).

Toz metalürjisi yöntemi ile parça üretimi çeşitli aşamalardan oluşmaktadır. Bu aşamalar; toz üretimi ve karakterizasyonu, karıştırma, sıkıştırma (presleme), sinterleme ve son işlemler olmak üzere adlandırılmaktadır (Baksan ve Gürler, 2003).


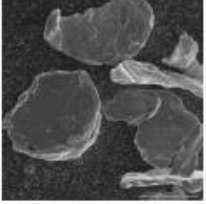

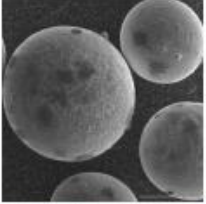



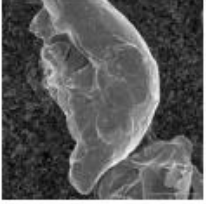

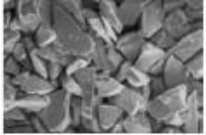

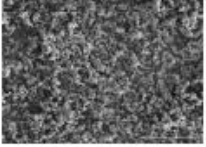

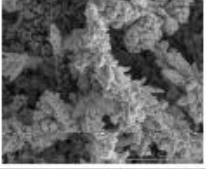

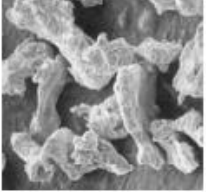


#### 4.1. Toz Üretimi ve Karakterizasyonu

Toz metalürjisi tekniğinde üretimde kullanılacak başlangıç tozlarının özellikleri işlemin başarılı olması bakımından büyük önem taşır. Bu tozların saflıkları ve kimyasal özelliklerinin yanında, şekli, boyutu, boyut dağılımı ve yüzey özellikleri gibi özellikleri de ayrıca önem taşımaktadır (Sağırılı, 1990; Newkirk ve Kohser, 2004). İşlem sırasından bağımsız olarak tüm toz metalürjisi parça üretim teknikleri, toz halindeki ham malzeme ile başlamaktadır. Dolayısıyla başlangıç tozlarının özellikleri, üretilen parça özelliklerini doğrudan etkilemekte ve belirlemektedir. Tozlar, çok ince parçacıklara bölünmüş katılardır. Tozların boyutları genellikle 1 mm'den küçük ve 0,1-200  $\mu\text{m}$  aralığında olmaktadır. Toz şekilleri ise küreselden iğnemsiyeye kadar çok farklı şekillerde olabilmektedir. Toz partiküllerinin şekilleri; tozların yüzey alanı, akışkanlığı ve sıkıştırma sonrası yoğunluğu gibi özellikleri üzerinde etkili olduğundan oldukça önemlidir (Liu vd., 1994; Keçeli, 2007). Şekil 4.2. ve 4.3.'te toz metalürjisi yönteminde kullanılan farklı toz parçacık şekilleri verilmiştir.



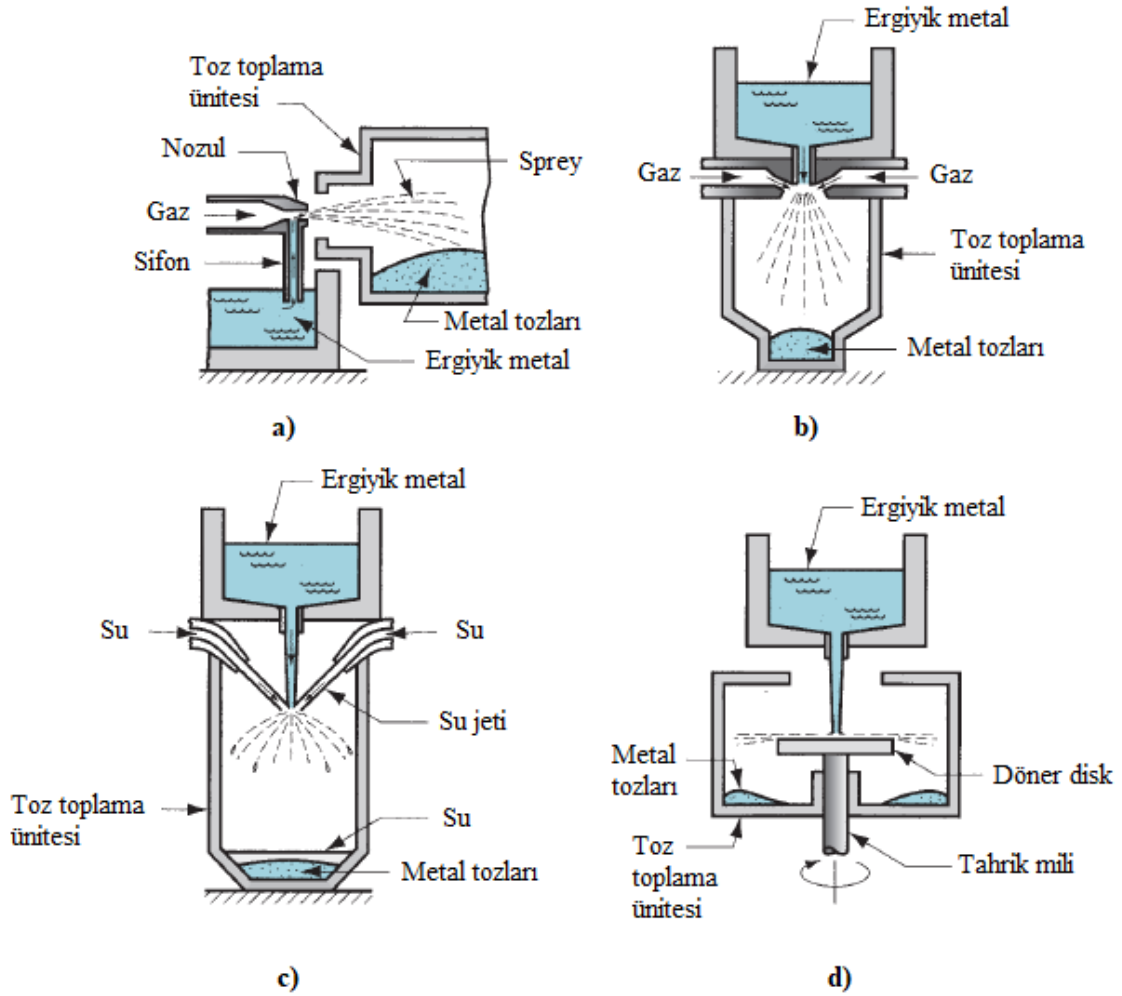
Şekil 4.2. Toz metalürjisi parçacık şekilleri (Groover, 2010).



<b>Yassı (pulsu)</b> (mekanik ufalama)		
<b>Küresel</b> (atomizasyon, karbonil (Fe))		
<b>Yuvarlak (dairesel)</b> (atomizasyon, kimyasal ayrıştırma)		
<b>Düzensiz şekilli</b> (atomizasyon, kimyasal ayrıştırma)		
<b>Köşeli</b> (mekanik parçalanma, karbonil (Ni))		
<b>Gözenekli (süngerli)</b> (oksitlerin indirgenmesi)		
<b>Dendritik</b> (elektroliz)		
<b>Çubuksu düzensiz</b> (kimyasal ayrıştırma, mekanik ufalanma)		
<b>İğnemsî</b> (mekanik ufalanma)		

Şekil 4.3. Farklı toz partikül şekilleri (Skotnicova vd., 2014).

Metal tozların üretimi için mekanik, kimyasal, elektrolitik yöntemler ve atomizasyon yöntemleri olmak üzere 4 ana yöntem bulunmaktadır. Bunların arasında en yaygın kullanılan yöntem, atomizasyon yöntemidir. Atomizasyon yöntemi en basit anlatımla, ergiyik metali püskürtme veya dağıtma yoluyla küçük parçalara ayırarak toz hale getirme şeklinde gerçekleştirilen toz üretim yöntemidir. Bu yöntemi uygulamanın birkaç farklı yolu bulunmaktadır. Bunlardan biri, akan ergiyik metal üzerine basınçlı su püskürtülerek gerçekleştirilen yöntemdir ve su ile atomizasyon yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde sıvı metal çok hızlı bir şekilde soğuduğundan düzensiz şekle sahip tozlar elde edilmektedir. Ayrıca bu yöntemde kullanılan su, bazı metaller üzerinde korozif etkiye de sahip olabilmektedir. Diğer atomizasyon yöntemi, akan ergiyik metal üzerine basınçlı inert gaz gönderilerek gerçekleştirilen ve genellikle daha iyi toz özellikleri sunan gaz atomizasyon yöntemidir. Bu yöntemde sıvı metal, su ile atomizasyon yöntemine göre daha yavaş bir hızda soğuduğundan daha düzgün ve küresel şekilli parçalar elde edilmektedir. Bir diğer atomizasyon yöntemi ise, ergiyik metalin döner bir disk üzerine gönderildiği ve böylece sıvı metalin merkezkaç kuvvetinin etkisi ile bulunduğu kabın duvarlarına çarpıp soğuyarak toz üretiminin gerçekleştirildiği döner disk (santrifüj) atomizasyon yöntemidir (Clyne, 2001). Şekil 4.4.'te metalik tozların üretimi için kullanılan çeşitli atomizasyon yöntemleri verilmiştir.



**Şekil 4.4.** Metalik tozların üretimi için kullanılan çeşitli atomizasyon yöntemleri: a) ve b) İki farklı (yatay-dikey) gaz atomizasyon yöntemi; c) Su atomizasyon yöntemi; d) Döner disk atomizasyon yöntemi (Groover, 2010).

Mekanik yöntemler ile gerçekleştirilen toz üretimi, kullanılan 4 ana toz üretim yönteminden bir tanesidir. Bu yöntemde, tozun üretileceği malzemenin kırma, çarpma ve öğütme gibi işlemlerle mekanik olarak parçalanmasıyla toz üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla kullanılan makineler; kırıcılar ve kaba-ince öğütücüler olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Kırıcılar genellikle cevher hazırlamada kullanılırken, kaba ve ince öğütücüler ile birkaç mikrona kadar değişen boyutlarda toz üretimi gerçekleştirilmektedir (Baksan ve Gürler, 2003). Toz üretimi için kullanılan bir başka ana üretim yöntemi, kimyasal indirgeme yöntemidir. Bu yöntem, metallerin elementel tozlara indirgenmesini sağlayan çeşitli kimyasal reaksiyonlar sayesinde gerçekleştirilmektedir. Elektrolitik yöntemler ile gerçekleştirilen toz üretiminde ise, metali ayırmak için elektrik akımının kullanıldığı elektroliz işlemi kullanılır. Bu yöntem ile çok ince ve

yüksek saflıkta tozlar üretilebilmektedir. Bu yöntemde sistem, anotun üretilecek toza ait metalden olacağı şekilde kurulmaktadır. Böylece elektrik akımı ile metal anottan ayrılarak katota taşınır ve daha sonra kolayca yıkanıp kurutularak toz hale getirileceği ince bir film tabakası halinde katot üzerinde birikir (Newkirk ve Kohser, 2004).

## 4.2. Karıştırma ve Harmanlama

Toz metalürjisinde uygun malzeme seçimi gerçekleştirildikten sonra harmanlama ve karıştırma işlemleri yapılır. Harmanlama, aynı kimyasal bileşime sahip farklı boyutlardaki tozların karıştırılması iken, karıştırma farklı kimyasal bileşime sahip tozlardan alaşım yapmak üzere gerçekleştirilen karıştırma işlemidir (Newkirk ve Kohser, 2004; Keçeli, 2007). Toz metalürjisi ile üretimde kullanılacak farklı tozların birbirleri içerisinde homojen bir dağılım gösterecek şekilde karıştırılması bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Böylece bu aşamada, çeşitli elementel metal tozları ve mekanik özellikleri iyileştirmek amacıyla ilave edilecek olan tozlar uygun karıştırıcılar ile harmanlanarak veya karıştırılarak homojen toz karışımları veya alaşımları elde edilir (Akın, 2006; Kumdalı, 2008). Yani karıştırma işleminde önceden alaşımlanmış tozlar kullanılmaksızın, karıştırma esnasında alaşım yapma imkanı bulunmaktadır (Baksan ve Gürler, 2003). Bu işlemin gerçekleştirilmesinin ana sebebi, taşıma sırasındaki titreşime bağlı olarak oluşan segregasyonu (ayrışmayı) ortadan kaldırmaktır. Çünkü segregasyon ile ince tanelerin çökmesi ve büyük tanelerin yukarıda kalması daha sonra gerçekleştirilecek olan presleme ve sinterleme aşamalarında problemlere neden olabilmektedir (Tan ve Zhang, 1998; German, 2007; Kumdalı, 2008).

Karıştırma işleminde karıştırıcı tipi ve karıştırma süresi karışımın kalitesini etkileyen önemli parametrelerdir. Karışım süresinin yeterli olması, karışımın homojen bir şekilde elde edilebilmesi bakımından önem taşır. Fakat burada optimum süreyi belirlemek önemlidir. Çünkü, belli bir süreden sonra karıştırma işlemi devam etse de etkisi olmamaktadır (Sağırılı, 1990; Kumdalı, 2008). Karıştırıcı içindeki tozun hacmi de verimliliği etkiler. Karıştırıcının içi tozla dolduruldukça tozların göreceli hareketliliği engellenir. Karıştırıcının hacim olarak %20'si veya %40'ının toz hacmi olarak kullanımı genelde uygun olarak kabul edilmektedir. Dönme hızı da karıştırma verimliliğine büyük oranda etki etmektedir. Yavaş dönme hızları verimli karışım için gereken süreyi uzatırken, hızlı olan dönme hızları ise tozlarda merkezkaç kuvveti etkisiyle akış ve karışmayı engellemektedir (German, 2007).

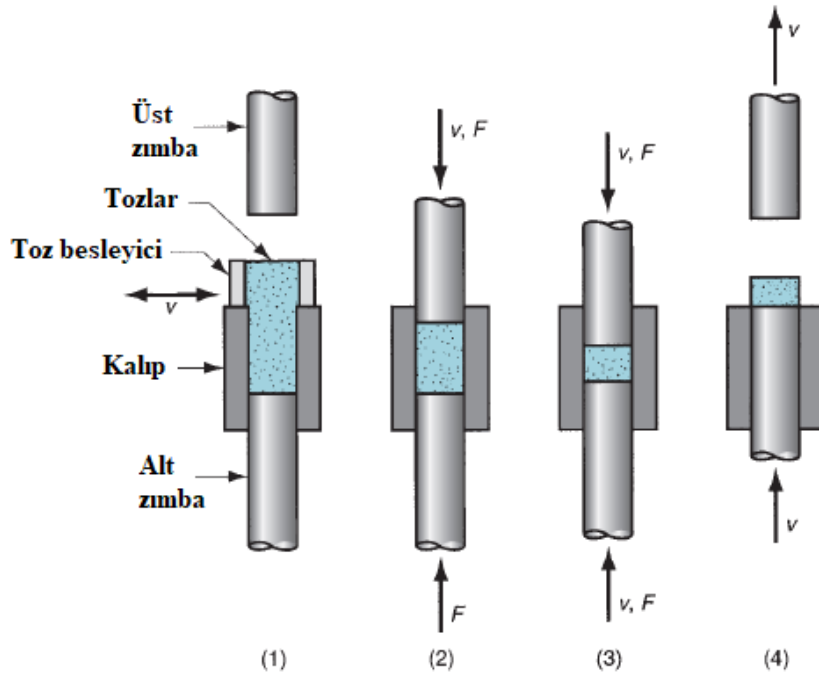
### 4.3. Sıkıştırma (Presleme)

Toz metalürjisi yönteminde harmanlama ve karıştırma işlemlerini, tozların ham parça halini aldığı sıkıştırma (presleme) işlemi takip eder (Liu vd., 1994; Keçeli, 2007). Bu işlem, tozların yoğunluğunu ve üretilen parça boyunca yoğunluğun homojen dağılımını belirleyen aşama olduğundan, toz metalürjisi yöntemindeki en önemli ve kritik aşamalardan biridir. Çünkü nihai ürün özellikleri büyük ölçüde yoğunluğa bağlı olmakta ve iyi özellikler ancak homojen bir yoğunluk dağılımı ile elde edilebilmektedir (Newkirk ve Kohser, 2004; Keçeli, 2007). Sıkıştırma işlemi şu amaçlarla gerçekleştirilmektedir;

- ✓ Tozları istenen şekilde katı hale getirmek,
- ✓ Sinterleme sonrası oluşabilecek herhangi bir boyutsal değişimi göz önünde bulundurarak üretilen parçaya istenen boyutları mümkün olduğu kadar vermek,
- ✓ Parçaya istenen seviyede gözeneklilik vermek,
- ✓ Daha sonra gerçekleştirilecek işlemler için yeterli dayanıma sahip ham parça oluşturmak (Upadhyaya, 1999; Keçeli, 2007).

Geleneksel sıkıştırma yöntemlerinde basınç genellikle tek bir yönde uygulanmaktadır ve bu da çoğunlukla homojen olmayan basınç ve yoğunluk dağılımına sebep olmaktadır (Liu vd., 1994; Keçeli, 2007). Bu işlem için genellikle mekanik ve hidrolik presler ile sert kalıplar kullanılmaktadır (Newkirk ve Kohser, 2004; Keçeli, 2007). Sıkıştırma sırasında metal tozları arasında sadece fiziksel (mekanik) bağlar meydana gelmektedir. Sıkıştırılmış metal tozlarına ham parça denilmektedir ve oldukça fazla gözeneklilik içermektedir (Liu vd., 1994; Keçeli, 2007).

Sıkıştırma; serbest haldeki toz partiküllerine istenen şekle sahip kalıp boşluğuna sahip bir kalıp içinde yük uygulanarak yoğunluk kazandırma ve katı ham parça haline getirme işlemi olarak tanımlanabilir. Bu işlemde ana amaç tozlara ham yoğunluk ve mukavemetin kazandırılmasıdır. Farklı sıkıştırma yöntemlerinin bulunmasıyla birlikte sıkıştırma işlemi genellikle sert (çelik-karbür) kalıplar içinde, 300-800 MPa aralığında değişen basınçlar altında, aksel olarak gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sonrası tozlar, kalıptan çıkarılabilecek yeterli mukavemete sahip ham parçalar halini almaktadır (Baksan ve Gürler, 2003; Kumdalı, 2008). Sıkıştırma işleminden sonra parça, elle tutulabilir bir mukavemet kazanmış olsa da esas mukavemet sinterlemeden sonra kazanılmaktadır. Sıkıştırma sonrası ise sıkıştırılmış tozlar ham parça, yoğunluk ham yoğunluk, mukavemet ise ham mukavemet olarak adlandırılmaktadır (German, 2007). Şekil 4.5.'te toz metalürjisi yönteminde uygulanan sıkıştırma işlemine ait aşamalar görülmektedir.

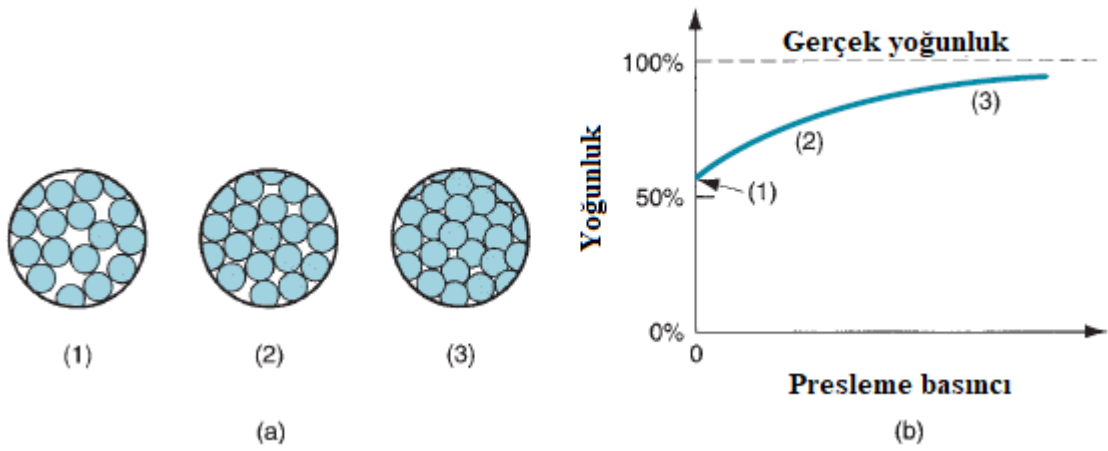


**Şekil 4.5.** Toz metalürjisinde presleme aşamaları: (1) kalıp boşluğunun tozla doldurulması, (2) başlangıç, (3) sıkıştırma sırasındaki üst ve alt zımbaların son konumları, (4) parçanın çıkarılması (Groover, 2010).

Sıkıştırma işleminde tozlar kalıba doldurulduklarında belli bir yoğunluğa sahiptirler. Bu yoğunluğa görünür yoğunluk denilmektedir. Tozların görünür yoğunluğu toz şekline, toz boyutu ve dağılımına, katkı maddelerine ve kısmen de kalıp şekline bağlı olmaktadır. Sıkıştırma basıncının artmasıyla elde edilen ham parçanın yoğunluğu artar, gözenekliliği ise azalır. Sıkıştırma sonucunda ise tozlarda, uygulanan yükten dolayı gerçekleşen deformasyonla birlikte ham yoğunluk elde edilir. Sinterleme öncesi elde edilen ham yoğunluk için, parçanın dağılmadan elle taşınabildiği yoğunluk miktarı yeterli olmaktadır (Ekşi ve Kurt, 1999; Kumdalı, 2008).

Sıkıştırma işleminde tozlar kalıp içerisine yerçekimi etkisiyle serbest ve düzensiz bir şekilde yığılarak dolar. Bu durumda tozlar arasında büyük boşluklar bulunur. Kalıbın titreştirilmesi sonucu bu tozlar kalıp içerisinde daha yüksek yoğunluklu, sıkı bir düzene girerler. Bu ilk evreye paketleme evresi denilmektedir. Bu evreden sonra kalıp ve pres hareketleriyle tozların sıkıştırıldığı presleme evresi gelmektedir. Bu evrede belli bir basınç sonrası tozlar, önce elastik sonra plastik olmak üzere şekil değişimine uğrarlar. Şekil değiştirme kabiliyeti olmayanlar veya çok zayıf olanlar ise kırılırlar. Bu deformasyonların sonucunda tozlar kenetlenerek kümeler oluştururlar. Bu sırada bir yandan da oksit tabakaları kırılmaktadır. Bu evreye ise elastik ve plastik şekil değiştirme evresi denilmektedir. Sıkıştırma sırasında şekil değişimine uğrayan ve

birbirlerine kenetlenen tozların temas alanları da artmaktadır. Yani sıkıştırma sonucu toz partiküller arası adezyon kuvveti de artar. Dolayısıyla sıkıştırma işlemi devam ettikçe deformasyon yeteneği gittikçe azalan hatta kaybolan tozlar, birbirlerine soğuk kaynak olur ve böylece sıkıştırma işlemi tamamlanır (Sağırılı, 1990; Palacı, 2001; Kumdalı, 2008). Şekil 4.6.'da sıkıştırma sırasında uygulanan basıncın etkisi ve buna bağlı olarak tozların yoğunluğundaki değişim görülmektedir.



**Şekil 4.6.** (a) Sıkıştırma sırasında uygulanan basıncın etkisi: (1) kalıba doldurulan başlangıçtaki gevşek tozlar, (2) paketlenme, (3) parçacıkların deformasyonu; (b) Presleme basıncına bağlı olarak tozların yoğunluğundaki değişim. Bu grafikte 1, 2 ve 3 adımları, (a)'daki 1, 2 ve 3 adımlarına karşılık gelmektedir (Groover, 2010).

Sıkıştırma işlemi tek veya çift etkili presler ile gerçekleştirilmektedir. Tek etkili preslerde üst zımba hareketli, alt zımba sabittir. Bu şekilde gerçekleştirilen preslemede kuvvet tek bir yönden uygulanır. Dolayısıyla kuvvetin daha az iletildiği orta kısımlarda yoğunluk daha düşük olmaktadır. Maksimum yoğunluk ise basıncın uygulandığı taraf olan üst zımbanın alt bölgesinde elde edilmektedir. Bu durum, yani homojen olmayan yoğunluk dağılımı, tek etkili preslemenin dezavantajıdır. Bu sebeple bu tip presleme, sadece ince parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Kalınlığı fazla olan parçaların üretiminde ise bu tip preslemenin kullanımı uygun olmamaktadır (Sağırılı, 1990; Kumdalı, 2008).

Sıkıştırma işleminde bir diğer presleme tekniği ise çift etkili preslemedir. Bu tip preslemede alt ve üst zımbanın her ikisi de hareketlidir, kalıp ise sabittir. Bu presleme genellikle kalınlığı fazla olan parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Fakat ince parçaların üretimi de bu

presleme ile gerçekleştirilebilmektedir. Çift etkili preslemenin avantajı, üretilen parça içindeki yoğunluk dağılımının homojene yakın olmasıdır.

**İzostatik presleme:** Bu preslemede basınç, bir gaz ya da sıvı aracılığıyla parçaya her yönden ve eşit miktarda olacak şekilde uygulanmaktadır. Böylece, parçada her yönde eşit büzülme, eşit yoğunluk ve eşit mukavemet dağılımı sağlanmaktadır.

**Sıcak presleme:** Bu preslemede ise, tozların preslenmesi ve sinterlenmesi aynı anda gerçekleşmektedir. Bu yöntemle tozların yanı sıra daha önce ön şekillendirme yapılmış parçalar da preslenebilmektedir (Sağırılı, 1990; Akın, 2006; Kumdalı, 2008).

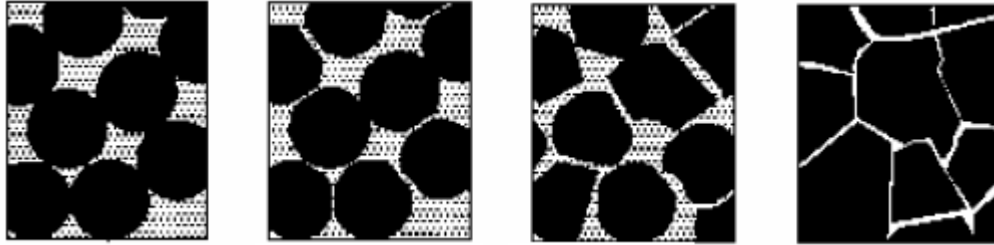
Sıkıştırma işleminde dikkat edilmesi gereken durumlardan biri, toz ile kalıp duvarları arasında oluşan sürtünmedir. Çünkü bu durum, tozlar üzerinde düzensiz bir basınç dağılımına sebep olmakta ve böylece üretilen parça homojen bir yoğunluk dağılımı gösterememektedir. Ayrıca sürtünme, ham parçanın kalıptan kolay çıkartılmasını da engellemektedir. Bu nedenle, bu durumu önlemek, sürtünmeyi azaltmak, sıkıştırılabilirliği artırmak ve homojen bir yoğunluk dağılımı elde edebilmek amacıyla yağlayıcılar kullanılmaktadır. En çok kullanılan yağlayıcılar çinko stearat, stearik asit ve asetonur. Ayrıca kalıp duvarlarının da tozlardan çizilmemesi ve aşınmaması için çok sert olması gerekmektedir. Bu sebeple sıkıştırma işleminde genellikle çok sert metal veya karbür kalıplar kullanılmaktadır (Ekşi ve Kurt, 1999; German, 2007; Kumdalı, 2008).

#### 4.4. Sinterleme

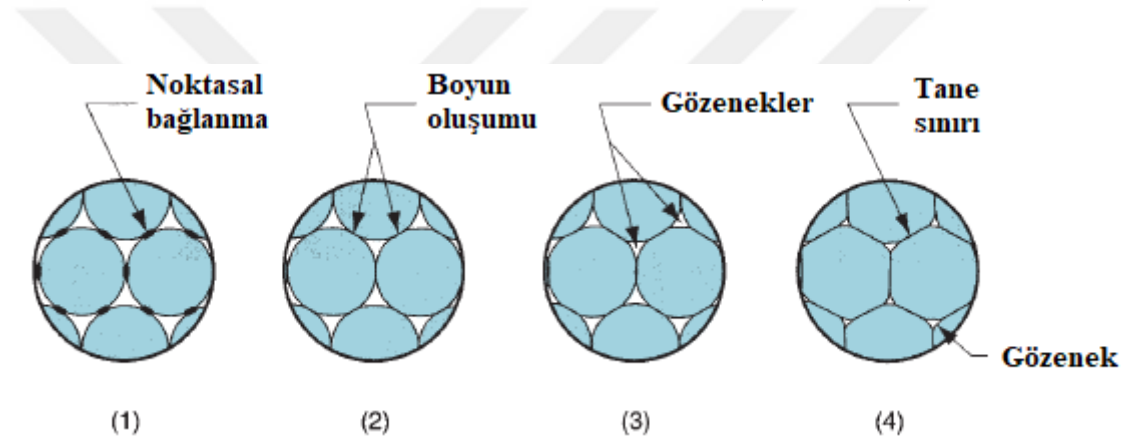
Sinterleme, parçacıkların birbirine bağlanmasını sağlayarak önemli ölçüde mukavemet artışına ve özelliklerin iyileşmesine sebep olan ısı işlemidir. Sinterleme, yüksek sıcaklıklarda atomların yayınımları ile gerçekleşmektedir ve birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda birbirine bağlanmasını sağlar. Bu bağlanma mikroyapısal olarak, temas eden parçacıklar arasında meydana gelen boyunlaşma ile gerçekleşmektedir. Bu boyunlaşma, mukavemetin ham mukavemete göre artmasını ve diğer birçok faydalı özelliğin gelişmesini sağlamaktadır (German, 2007). Sinterleme, metal ve seramik tozlarından yoğunluğu kontrol edilebilen malzemeler ve bileşenler üretmek amacıyla ısı enerjisi uygulanarak gerçekleştirilen bir ısı işlemidir (Kang, 2005). Bu işlemde ön şekillendirilmiş (preslenmiş) tozların belli bir sıcaklık ve süre sonunda aralarındaki bağ kuvvetinin artması ve böylece presleme sonrası elde edilen ham parçanın mukavemetinin artırılması sağlanmaktadır. Dolayısıyla toz metalürjisinin en önemli üretim aşamalarından bir tanesidir (Kumdalı, 2008). Şekil 4.7., 4.8. ve 4.9.'da sinterleme



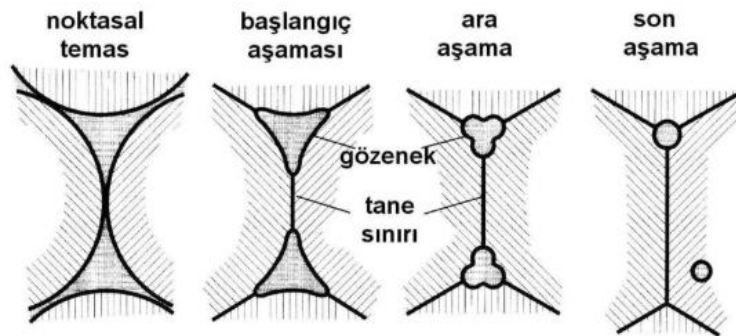
aşamaları ve yapıda meydana gelen değişimler görülmektedir. Şekil 4.10.'da ise sinterleme mekanizmasının SEM ile görünüşü verilmiştir.



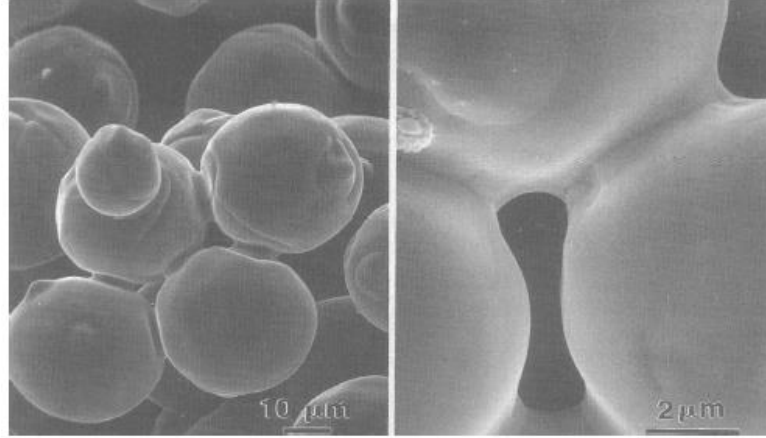
Şekil 4.7. Katı hal sinterlemesinin aşamaları (Palacı, 2001).



Şekil 4.8. Mikroskobik ölçekte sinterleme: (1) temas noktalarında partikül bağlanması başlar, (2) temas noktaları “boyunlara” dönüşür, (3) parçacıklar arasındaki gözeneklerin büyüklüğü azalır, (4) boyunlu bölgelerin yerinde parçacıklar arasında tane sınırları gelişir (Groover, 2010).



Şekil 4.9. Sinterleme aşamalarına göre gözenek yapısındaki değişim (ASM Handbook Vol. 7, 1998).



**Şekil 4.10.** Sinterleme mekanizmasının SEM ile görünüşü (Keçeli, 2007).

Sinterleme işleminde, önceden preslenen ve ham parça haline getirilen tozlar, belli sıcaklıklarda (genellikle  $T > 0,5T_e$  (K)) ısıtılma tabii tutulur (Chen, 2000; Keçeli, 2007). Sinterlemenin temel amacı, sıkıştırma sonrası elde edilen ham parçadaki gözenekliliği azaltmaktır (Upadhyaya, 1999). Sinterleme işlemi ile malzemede birtakım değişiklikler meydana gelmektedir. En büyük değişimler;

- ✓ Mukavemet ve elastiklik modülü
- ✓ Sertlik ve kırılma tokluğu
- ✓ Elektriksel ve ısıtılma iletkenlik
- ✓ Sıvı ve gaz geçirgenliği
- ✓ Ortalama tane sayısı, boyutları ve şekli
- ✓ Tane boyutları ve şeklinin dağılımı
- ✓ Ortalama gözenek boyutları ve şekli
- ✓ Gözenek boyutları ve şeklinin dağılımı
- ✓ Kimyasal bileşim ve kristal yapı

gibi özelliklerde meydana gelmektedir (Keçeli, 2007).

Sonuç olarak, gerçekleştirilen model deneylerden ve preslenmiş tozların belli sıcaklıklarda sergilediği davranışlardan yola çıkılarak sinterleme ile;

- ✓ Parçacıklar arası temas alanının zamanla arttığı,
- ✓ Tanelerdeki keskin köşelerin ve temas noktalarının yuvarlandığı,
- ✓ Çoğu durumda, parçacık merkezlerinin birbirine yaklaştığı ve bütünsel bir yoğunluk artışının meydana geldiği,

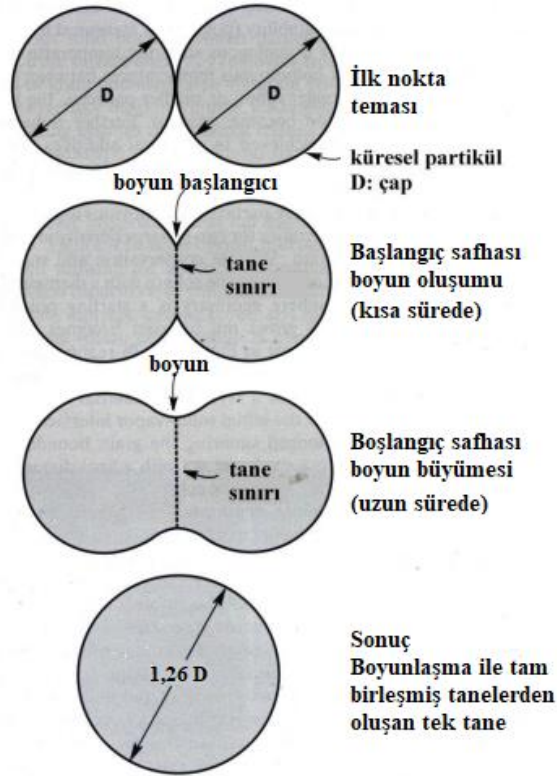
- ✓ Tanelerde birleşme ile büyümenin, gözeneklerde ise küçülmenin arttığı, dolayısıyla yapıda gözenek hacminin azaldığı öne sürülmektedir (Keçeli, 2007).

Şekil 4.11.'de sinterlemede nokta teması ile başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli verilmiştir.

Sinterleme işlemi temel olarak katı faz sinterleme ve sıvı faz sinterleme olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Sinterleme sıcaklığı, ana malzemenin ergime sıcaklığının altında ise katı faz sinterleme, bileşenlerden en az birinin ergime sıcaklığının üzerinde ise sıvı faz sinterleme olarak adlandırılmaktadır (Kumdalı, 2008).

Sinterlemede başarılı bir yoğunlaşma için doğru sinterleme sıcaklığını belirlemek oldukça önemlidir. Yüksek sıcaklıklar daha hızlı yoğunlaşmaya yardımcı olsa da kabalaşma oranını da artırmaktadır. Artan kabalaşma oranı ise, büyük tanelerin içinde gözeneklerin hapsolmesine ve böylece anormal tane büyümesine sebep olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak da yoğunlaşma daha hızlı gerçekleşmesine rağmen nihai yoğunluk sınırlı kalmaktadır (Upadhyaya, 1999; Keçeli, 2007).

Sonuç olarak sinterleme, pek çok değişkene bağlı olan oldukça karmaşık bir toz metal üretim aşamasıdır. Bu nedenle tüm bu değişkenler ve sonuçları iyi hesaplanarak gerçekleştirilmelidir.



**Şekil 4.11.** Sinterlemede nokta teması ile başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli (German, 2007).

#### 4.5. Son İşlemler

Toz metalürjisinde üretilen parçalara, sinterleme sonrası isteğe veya gerekliliğe bağlı olarak bazı son işlemler uygulanabilir. Bu işlemler genellikle gözeneklerin doldurulması, yağ emdirme, tekrar presleme ve/veya tekrar sinterleme, yüzey sertleştirme, yüzey kaplama, son ölçüye getirme, talaş kaldırma, çapak alma, ısıl işlem, birleştirme ve montaj gibi işlemler olmaktadır (Baksan ve Gürler, 2003; Akın, 2006; Kumdalı, 2008).

## 5. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Kumdalı çalışmasında, toz metalürjisi ile üretilen Al matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit malzemeler için değişik üretim parametrelerinin sonuçlarını saptayarak, bu parametrelere ait optimum değerleri belirlemeyi hedeflemiştir. Bu amaçla, üretilen numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine takviye oranının, takviye tane boyutunun, takviye tozlara uygulanan kurutmanın ve pres basıncının, sinterleme sıcaklığı ve atmosferinin etkisini incelemiştir. Yapılan deneylerin sonucunda optimum üretim parametrelerini; 800 MPa presleme basıncı, atmosferik sinterleme ortamı ve 590°C sinterleme sıcaklığı olarak belirlemiştir. Malzemelere uygulanan kurutmanın önemli bir etkisinin olmadığını ve atmosferik ortamda yapılan sinterlemenin argon ortama kıyasla daha fazla sertlik artışı sağladığını tespit etmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı ile sertlik ve yoğunluk değerlerinin arttığını belirlemiştir. Takviye tane boyutu ile matris tane boyutu arasında artan boyut farkının, takviye tozların matris tanelerinin arasında birikmesi ile sonuçlandığını ve burada topaklanmaya sebep olarak sinterlemeyi ve dolayısıyla malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini ifade etmiştir. Belli bir değere kadar (800 MPa) artan presleme basıncı ile sertliğin arttığı fakat bu değerden sonra azaldığı sonucunu elde etmiştir. Yine aynı şekilde takviye oranı için de belli bir orana kadar sertliğin arttığını, fakat %25 katkılı numunelerde azaldığını saptamıştır. Ayrıca bu oranda (%25) takviye edilen numunelerin oldukça poroz bir yapıya sahip olduğunu, yapılarında B<sub>4</sub>C tanelerinin bulunması gereken yerlerde boşlukların bulunduğunu ve çalışma esnasında bu numunelerin dağıldığını belirtmiştir (Kumdalı, 2008).

Kevenlik yaptığı çalışmada, farklı takviye oranlarının ve sinterleme sıcaklıklarının toz metalürjisi yöntemiyle üretilen SiC takviyeli Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrisli kompozit malzemeler üzerine etkisini incelemiştir. Gerçekleştirilen araştırmalar ve deneyler sonucunda, takviye oranının artması ile sertlik, yoğunluk ve gözenekliliğin arttığını, çapraz kırılma dayanımının ise azaldığını tespit etmiştir. Artan sinterleme sıcaklığıyla ise sertlik, yoğunluk ve çapraz kırılma dayanımının arttığını, gözenekliliğin azaldığını belirlemiştir. T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan numunelerde de benzer sonuçlar elde edildiğini belirtmiştir. Fakat bu işlemin uygulanmadığı numunelerin daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu belirlemiştir (Kevenlik, 2013).

Karaman, yaptığı çalışmada, takviye oranı, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresinin toz metalürjisi ile üretilen MgO katkılı Al matrisli kompozitler üzerine etkisini araştırmıştır. Gerçekleştirdiği yoğunluk, sertlik ve çapraz kırılma dayanımı ölçümlerinin sonucunda, optimum değerlerin 630°C sıcaklığında 4 saat süreyle yapılan sinterleme sonunda elde edildiğini tespit etmiştir. Sinterleme sıcaklığı ve süresindeki artış ile yapıda gözenekliliğin azaldığını, mekanik

özelliklerin geliştiğini belirlemiştir. Artan takviye oranıyla yapıda sertlik ve gözenekliliğin arttığını, çapraz kırılma dayanımının ise artan mikro çatlak etkisi sebebiyle azaldığını belirtmiştir. Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilen mikroyapı incelemeleri sonucunda, MgO tanelerinin yapıda homojen olarak dağıldığını ve segregasyon olmadığını gözlemlemiştir. Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan kırık yüzey incelemeleri sonucunda, kırılmanın zayıf ıslatma nedeniyle Al – MgO arayüzeylerinde gerçekleştiğini öne sürmüştür. Yine bu incelemeler sonucunda, gözeneklerin yüzey enerjisini düşürme eğilimleriyle küresel hale gelip çoğunlukla tane sınırlarında ve MgO tanelerinin çevresinde toplandığını ifade etmiştir. Artan gözenekliliğin ise mikro çatlak etkisini artırarak çapraz kırılma dayanımını düşürdüğünü belirtmiştir (Karaman, 2011).

Kalaycıoğlu çalışmasında, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen SiC ile takviye edilmiş Al2017 matrisli kompozit malzemelerde takviye oranı ve takviye tane boyutunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda, presleme basıncının artmasıyla gözenekliliğin azaldığını ve mekanik özelliklerin iyileştiğini tespit etmiştir. Takviye tane boyutunun küçülmesiyle sıkıştırılabilirliğin arttığı ve dolayısıyla ham yoğunluğun arttığı sonucuna varmıştır. Artan takviye oranıyla ise sertlik ve gözenekliliğin arttığını, yoğunluğun azaldığını belirlemiştir (Kalaycıoğlu, 2010).

Işık yaptığı çalışmada, değişik takviye oranlarında yapılan SiC takviyesinin A413 alüminyum alaşım matrisli kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi ile aşınma davranışı üzerine etkisini araştırmıştır. Gerçekleştirilen yoğunluk, sertlik, aşınma ölçümleri ile SEM ve EDS analizlerinin sonucunda, takviye malzemenin matris içinde homojen dağıldığı ve bunun kompozitin özelliklerini iyi yönde etkilediği sonucuna varmıştır. Araştırmanın odak parametresi olan aşınmanın beklenen davranışı gösterdiğini, artan takviye oranı ve azalan aşındırıcı yüzey parçacık boyutları ve yük ile aşınma dayanımının artış gösterdiğini gözlemlemiştir. Takviye malzemenin matris içindeki oranının artmasıyla kompozit malzemelerin sertlik değerinde artış olduğunu ve en yüksek sertlik değerinin en yüksek takviye oranı olan %21 SiC takviyeli kompozit numunelerinden elde edildiğini ifade etmiştir. Aynı şekilde en yüksek aşınma dayanımı değerlerinin de yine en yüksek takviye oranları olan %12 ve %21 SiC katkılı numunelerden elde edildiğini tespit etmiştir. Aşınma sonuçlarını değerlendirerek, aşınma miktarının uygulanan yük ve aşındırıcı diskin boyutlarına göre değiştiğini belirtmiştir. SEM ile yapılan incelemeler sonucunda, artan yük ve aşındırıcı disk pürüzlülüğünün numune yüzeylerindeki çizikleri artırdığını ve yüksek yüklerde kopmalar şeklinde aşınmaların gerçekleştiğini gözlemlemiştir (Işık, 2014).

Ay çalışmasında, toz metalürjisi yöntemi ile Al7075 alaşımına farklı oranlarda Ti ve B<sub>4</sub>C takviye edilerek üretilen kompozit malzemelerin aşınma davranışlarını incelemiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, artan Ti takviye oranıyla yoğunluğun ve sertliğin arttığını, artan B<sub>4</sub>C takviye oranıyla ise sertliğin arttığını fakat yoğunluğun azaldığını belirlemiştir. Hem Ti hem de B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde artan takviye oranıyla ağırlık kayıplarının azaldığını gözlemlemiştir. En yüksek sertliğin en yüksek takviye oranları olan %6 Ti ve %9 B<sub>4</sub>C takviye oranlarında takviyelenen kompozit numunelerinden elde edildiğini tespit etmiştir. Aşınma testleri sonucunda ise, artan kayma mesafesiyle ağırlık kayıplarının yani aşınmanın arttığını ve ardından yapılan SEM incelemeleri değerlendirildiğinde test sırasında yüzeyden kopan parçaların tekrar yüzeye kaynaklandığını ve bu durumun artan takviye oranlarıyla fazlalaştığını belirtmiştir (Ay, 2014).

Selvakumar vd. yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile üretilen, farklı takviye oranlarında SiC ile takviye edilen Al-4%Cu matrisli kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Deneyler sonucunda artan SiC takviye oranıyla sertliğin arttığını, ısı iletkenliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. Basma dayanımının %7,5 SiC takviye oranına kadar artış gösterdiğini, bu değerden sonra kompozitin kırılma özelliği göstermesi sebebiyle değerlerde düşüş görüldüğünü ifade etmişlerdir. Aşınmanın ise %7,5 SiC takviye oranına kadar azalma gösterdiğini, fakat bu orandan fazla yapılan takviyelerde matrisle takviye arasındaki bağın zayıflaması sebebiyle arttığını belirlemiştir. Sonuç olarak, havacılık ve otomotiv uygulamaları için istenen mekanik özelliklerin, %7,5 SiC takviyeli Al-4%Cu matrisli kompozit malzemeler ile elde edildiğini belirtmişlerdir (Selvakumar vd., 2017).

Venkatesh ve Harish çalışmalarında, toz metalürjisi tekniğiyle, farklı oranlarda ve tane boyutlarında SiC katkı olarak üretilen Al kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Gerçekleştirdikleri incelemeler sonucunda, sinterleme sonrası hem yoğunluğun hem de sertliğin arttığını doğrulamışlardır. Yine aynı özelliklerin hem takviye oranına hem de takviye tane boyutuna bağlı olarak değiştiğini tespit etmişlerdir. Sinterleme sonrası uygulanan ısı işleminin sertliği ve yoğunluğu artırdığını belirlemiştir. Isıl işlem sonrası yoğunluğun, artan SiC takviye oranı ve azalan SiC tane boyutu ile arttığı sonucuna varmışlardır. Isıl işlem sonrası sertliğin ise, artan takviye oranıyla arttığını fakat azalan tane boyutu ile düştüğünü saptamışlardır. Sonuç olarak sinterleme sonrası uygulanan ısı işleminin kompozit malzeme özelliklerini etkilediği kanısına varmışlardır (Venkatesh ve Harish, 2015).

Güleryüz vd. yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle, farklı oranlarda B<sub>4</sub>C ile takviye edilerek üretilen Mg matrisli kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini

incelemişlerdir. Sertlik ve basma dayanımı değerlerini optimize etmek için gereken optimum takviye oranını araştırmışlardır. Yaptıkları araştırmaların sonucunda, kompozitlerin sinterleme sonrası yoğunluğunun, artan  $B_4C$  oranıyla azaldığını tespit etmişlerdir.  $B_4C$  ile takviye edilen Mg matrisli kompozit numunelerinin sertliklerinin takviye edilmeyen Mg numunelerine kıyasla daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Gerçekleştirilen XRD analizleri sonucunda, kompozitlerin yapısında  $Al_2O_3$ , MgO ve  $MgB_2$  fazlarının oluştuğunu belirlemişlerdir. Basma testi değerlendirildiğinde ise en iyi sonucun %3 oranında takviye edilen kompozitlerden elde edildiğini, bu durumun artan takviye oranıyla yapıdaki arayüzey bağlarının zayıflaması sebebiyle ortaya çıktığını ifade etmişlerdir (Güleryüz vd., 2012).

Purohit vd. çalışmalarında, ürettikleri yatay bilyalı değirmeni kullanarak mekanik olarak alaşımladıkları, farklı oranlarda SiC katkılı Al kompozit malzemeleri, toz metalürjisi yöntemiyle üreterek özelliklerini ve mekanik olarak alaşımlanan Al-SiC tozların şekillerindeki değişimi incelemişlerdir. Yapılan testler ve analizler sonucunda, artan takviye oranıyla yoğunluk, gözeneklilik, sertlik, basma dayanımı ve endirekt çekme dayanımı değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Tozların mekanik olarak alaşımlanmasının, Al-SiC kompozitlerin basma ve endirekt çekme dayanımı ile sertliğini artırdığını ifade etmişlerdir. Al-SiC tozlarının 12 saat boyunca mekanik alaşımlanması sonucu homojen dağılımlı kompozit yapı elde edildiğini belirlemişlerdir. Ayrıca mekanik alaşımlamanın ara aşamalarında tozlar üzerinde yapılan SEM incelemeleri sonucu, işlem sırasında çelik bilyaların etkisiyle tozların birbirlerine soğuk kaynaklandığını ardından kırıldığını ve daha sonra tekrar kaynaklandığını ve bu adımların işlem boyunca tekrarlandığını gözlemlemişler ve bunun sonucu olarak SiC partiküllerin Al matris içine gömülerek dağıldığını ifade etmişlerdir (Purohit vd., 2012).

Jeevan vd. yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile ürettikleri Al-SiC kompozitlerin presleme, sinterleme ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, artan SiC oranıyla sertlik ve basma dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Tozların preslenmesi sırasında, nihai ürünün şekil ve kalitesinin başlangıç toz karışımının özelliklerine bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Buna bağlı olarak istenen kompozit özelliklerini elde etmek için basım öncesi toz karışımın dikkatli bir şekilde hazırlanması gerektiğini ve boyutlandırma için uygun toleransların seçilmesinin önemini vurgulamışlardır (Jeevan vd., 2012).

Topçu vd. çalışmalarında, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen, farklı oranlarda  $B_4C$  katkılı Al matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Takviye malzemesi olarak  $B_4C$  tercih edilmesinin sebebini,  $B_4C$ 'nin diğer sık tercih edilen takviye malzemelerinden olan SiC ve  $Al_2O_3$ 'e göre daha yüksek sertlik ve daha düşük yoğunluğa sahip olması olarak ifade etmişlerdir.



Gerçekleştirilen çentik darbe deneyleri ve sertlik testleri sonucunda, artan takviye oranıyla sertliğin arttığını, darbe dayanımının ise azaldığını tespit etmişlerdir. Sürünme deneyiyle ise yüksek sıcaklık deformasyon davranışı araştırılmış, bu deneyin sonucunda sürünme direncinin B<sub>4</sub>C takviyesi ile artış gösterdiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca tüm B<sub>4</sub>C oranlarında, artan sinterleme sıcaklığıyla numune yoğunluklarının teorik yoğunluk değerlerine yaklaştığını belirlemişlerdir. Artan takviye oranı ve sinterleme sıcaklığıyla darbe dayanımında düşüş olduğunu belirlemiş ve sinterleme sıcaklığının %15 üzeri B<sub>4</sub>C takviye oranlarında etkisini kaybettiğini saptamışlardır (Topçu vd., 2009).

Çanakçı ve Varol yaptıkları çalışmada, mekanik alaşımlamanın B<sub>4</sub>C katkılı Al2024 matrisli kompozit malzemelerin üretimine ve özelliklerine olan etkisini araştırmışlardır. Toz karışım, farklı mekanik alaşımlama sürelerinde, yüksek enerjili bilyalı öğütücü ile üretilmiştir. Alaşımlama süresi ve presleme basıncına bağlı olarak sertlik değişimleri incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, kompozitlerin sertliğinin artan alaşımlama süresi, takviye oranı ve presleme basıncı ile arttığını tespit etmişlerdir. Yoğunluk değerlerinin ise artan alaşımlama süresi ile azaldığını, fakat artan presleme basıncı ile arttığını saptamışlardır. SEM mikrografları değerlendirilerek, artan alaşımlama süresi ile B<sub>4</sub>C partiküllerinin Al2024 matris yapı içinde daha uniform bir dağılım sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak, mekanik alaşımlama ile sıvı faz üretim metotları kullanılmadan takviye malzemesinin homojen dağılımının sağlandığını ve böylece kompozit özelliklerinde önemli ölçüde gelişme elde ettiklerini belirtmişlerdir (Çanakçı ve Varol, 2012).

Karamış vd. yaptıkları çalışmada, farklı seramik takviye malzemeleri (SiC, B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ile, farklı takviye tane boyutları ve oranlarında katkılanan AA2124 matrisli kompozitleri, toz metalürjisi yöntemini kullanarak üretmiş ve bu malzemelerin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Kompozit malzemelerle karşılaştırmak için katkısız AA2124 ve GGG40 numunelerini de tribolojik testlere tabi tutmuşlardır. Yapılan incelemeler sonucunda, %10 oranında B<sub>4</sub>C ve SiC takviyeli iki kompozitin de aşınma oranlarının GGG40 malzemesine kıyasla daha düşük olduğunu saptamışlardır. En iyi aşınma performansının, SiC için 20 µm tane boyutunda ve %30 takviye oranında, B<sub>4</sub>C için ise %10 takviye oranında elde edildiğini belirlemişlerdir. Aşınma dayanımının, artan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranıyla azaldığını, SiC ve B<sub>4</sub>C için ise tam tersi olarak artan takviye oranlarıyla arttığını tespit etmişlerdir. Takviye tane boyutlarının, kompozitlerin aşınma oranları üzerinde önemli etkisi olduğunu ve takviye tane boyutunun matris tane boyutundan küçük olması durumunda aşınma oranının artan takviye tane boyutuyla azaldığını, takviye tane boyutunun matris tane boyutundan büyük olması durumunda ise aşınma oranının artan takviye tane boyutuyla arttığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak, minimum aşınma

oranı için matris ve takviye tane boyutlarının birbirine yakın olması gerektiği kanısına varmışlardır (Karamış vd., 2012).

Raja ve Sahu çalışmalarında, toz metalürjisi ile üretilen Al-B<sub>4</sub>C kompozitlerin farklı takviye oranlarında soğuk presleme davranışları ve sertliklerinin değişimini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda, en yüksek oran olan %20 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin daha yüksek sertlik değerine sahip olduğunu saptamışlardır. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, takviye partiküllerinin yapıda güzel dağılım ve bağlanma gösterdiği sonucuna varmışlardır. Yoğunluk değerlerinin, artan B<sub>4</sub>C takviye oranıyla azaldığını, bu durumun B<sub>4</sub>C'nin düşük yoğunluğuna bağlı olarak geliştiğinin ifade etmişlerdir. Sertlik değerlerinin ise, artan B<sub>4</sub>C takviye oranı yüzdesiyle arttığını belirtmişlerdir (Raja ve Sahu, 2014).

Ay vd. yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Al7075-B<sub>4</sub>C kompozitlerin sertlik ve aşınma özelliklerine, B<sub>4</sub>C takviye oranının etkisini incelemişlerdir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, takviye fazın yapıda homojen olarak dağılmadığını ve belli bölgelerde yoğunlaştığını gözlemlemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, artan B<sub>4</sub>C oranıyla sertliğin arttığını fakat yoğunluğun azaldığını, aşınma testlerinin sonucunda ise en düşük aşınma oranının, en yüksek takviye oranına sahip olan %9 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerden elde edildiğini saptamışlardır. Aşınma oranının, artan B<sub>4</sub>C takviye oranıyla azaldığını, artan kayma mesafesiyle ise arttığını belirlemişlerdir (Ay vd., 2016).

Kumar vd. çalışmalarında, toz metalürjisi yöntemi ile, farklı toz boyutu ve hacim oranlarında Ni ve SiC takviye ederek ürettikleri saf Al matrisli kompozitlerin, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, Ni ve SiC takviyesinin kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirdiğini, sertliğin uygulanan pres basıncı altında %35 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Artan SiC oranıyla kompozit sertliğinin arttığını, maksimum sertlik artışının %87'lik artış değeri ile %8 SiC takviyeli kompozitlerden elde edildiğini saptamışlardır. Mikroyapı incelemeleri değerlendirildiğinde, takviye malzemelerin matris içinde homojen dağılım gösterdiğini belirlemişlerdir. Aşınma dayanımının, artan SiC oranıyla arttığını ifade etmişler ve aşınma oranının, 5 N yük altında 5000 m kayma mesafesi için değerlendirildiğinde, 200 µm'den 50 µm'ye kadar düştüğünü saptamışlardır. Maksimum aşınma dayanımının ise, %90'lık dayanım artışıyla %8 SiC takviyeli kompozitlerden elde edildiğini belirlemişlerdir. Genel sonuç olarak, SiC takviyesinin saf Al' un mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmede önemli ölçüde etkili olduğu kanısına varmışlardır (Ravi Kumar vd., 2017).

Çelik ve Seçilmiş yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile ürettikleri farklı oranlarda B<sub>4</sub>C katkılı saf Al matrisli kompozitlerin aşınma davranışlarını incelemiştirler. Üretilen kompozitlerin farklı uygulama yükleri ve kayma mesafelerinde aşınma deneyleri ile sertlik deneylerini gerçekleştirerek sonuçları yorumlamışlardır. Yapılan deneyler ve incelemeler sonucunda, artan B<sub>4</sub>C oranı ile sertliğin arttığını, aşınma oranının ise azaldığını saptamışlardır. Maksimum sertliğin 68,1 HV değeri ile en yüksek takviye oranı olan %16 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerden elde edildiğini, minimum sertliğin ise 48,5 HV değeri ile saf Al'dan elde edildiğini belirtmişlerdir. Aşınma oranının, artan kayma mesafesi ve uygulanan yük ile arttığını, artan B<sub>4</sub>C oranıyla ise azaldığını, en düşük ve en yüksek ağırlık kayıplarının 14,8 mg ve 138,2 mg olduğunu ve bunların sırasıyla saf Al ve %16 B<sub>4</sub>C takviyeli Al' dan elde edildiklerini tespit etmişlerdir. Artan B<sub>4</sub>C takviye oranıyla sürtünme katsayısının azaldığını, en yüksek sürtünme katsayısının 0,577 değeri ile saf Al' dan, en düşük sürtünme katsayısının ise 0,375 değeri ile en yüksek takviye oranına sahip olan %16 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerden elde edildiğini saptamışlardır. Mikroyapı incelemelerini değerlendirerek, takviye partiküllerin matris içerisinde homojen olarak dağıldığını, fakat atmosferik ortamda gerçekleştirilen sinterleme sebebiyle kompozit numunelerin dış yüzeylerinde oksitlerin oluştuğunu belirlemişlerdir (Çelik ve Seçilmiş, 2017).

Çolak ve Turhan yaptıkları çalışmada, Al-Si/B<sub>4</sub>C kompozit malzemeleri, toz metalürjisi yöntemini kullanarak üretmişler, mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştirler. Deneyler sonucunda, takviyesiz numunelerle kıyaslandığında B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerin daha sert olduğunu ve sertliğin artan B<sub>4</sub>C takviye oranıyla arttığını tespit etmişlerdir. En yüksek sertlik değerinin, en yüksek takviye oranı olan %20 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit numunesinden elde edildiğini belirlemişlerdir. Takviye oranının artması ve takviye tane boyutunun küçük olmasına bağlı olarak porozite değerlerinde artış olduğunu saptamışlardır. Gerçekleştirilen SEM incelemeleri sonucu, tüm numunelerde matris içindeki takviye dağılımının homojen olduğunu gözlemlemişlerdir. XRD analizlerinin sonucunda ise, numunelerde B<sub>4</sub>C, Al<sub>3,21</sub>Si<sub>0,47</sub>, AlB<sub>10</sub>, Al<sub>8</sub>B<sub>4</sub>C<sub>7</sub> fazlarının oluştuğunu belirlemişlerdir (Çolak ve Turhan, 2016).

Ayvaz ve Çetinel çalışmalarında, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al esaslı kompozitlerde, farklı matris kompozisyonlarının ve B<sub>4</sub>C takviye oranlarının, kompozitin mikroyapı, sertlik ve yoğunluk özelliklerine etkisini incelemiştirler. Ayrıca farklı sinterleme sürelerini ve presleme basınçlarını kullanarak, üretim şartlarının etkisini de belirlemeyi hedeflemişlerdir. Deneyler sonucunda, presleme basıncının artmasıyla yoğunluk ve sertliğin arttığını, B<sub>4</sub>C takviye oranının artmasıyla ise yoğunluğun azaldığını, sertliğin arttığını tespit etmişlerdir. Sinterlemenin, 60 dk. süreyle gerçekleştirildiğinde, yapıdaki poroziteleri etkin bir

şekilde gideremediği, yetersiz kaldığı belirlenmiştir. Matris kompozisyonuna yapılan Mg ilavesinin ise, sertlik ve yoğunluğu düşürdüğü saptanmıştır (Ayvaz ve Çetinel, 2014).

Gökmeşe ve Karadağ yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle üretilen B<sub>4</sub>C ve SiC takviyeli AA2014 matrisli hibrit kompozit malzemelerin, mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda, artan B<sub>4</sub>C ve SiC oranlarında sinterleme sonrası yoğunluk değerlerinin azaldığını, sertlik değerlerinin arttığını, fakat %15 B<sub>4</sub>C ve %15 SiC içeren tek seramik faz takviyeli kompozitlerin sertliğinin, B<sub>4</sub>C-SiC takviyeli hibrit kompozitlere kıyasla daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. En yüksek sertlik değerinin %15 B<sub>4</sub>C takviyesi ile 86 HV olarak elde edildiğini, en düşük sertlik değerinin ise hiçbir takviye içermeyen AA2014 alaşımından 53 HV olarak elde edildiğini belirtmişlerdir. Hibrit kompozitlerde, sertliğin orta seviyede (68 HV) olduğunu saptamışlardır. Mikroyapı incelemeleri değerlendirildiğinde ise, AA2014 matris yapısında B<sub>4</sub>C ve SiC takviye partiküllerinin tane ve tane sınırlarına yakın bölgelerde kümelenildiğini gözlemlemişlerdir (Gökmeşe ve Karadağ, 2018).

Karaşoğlu ve Karaoğlu çalışmalarında, toz metalürjisi ile üretilen SiC takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerde, yağlayıcı olarak kullanılan çinko stearat katkısının, sinterleme yardımcısı olarak Mg katkısının ve sinterleme atmosferi olarak azot ortamın, malzemenin yoğunluğuna, sertliğine, iç yapısına ve basma dayanımlarına etkisini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, yağlayıcı ilavesiyle ham ve sinter sonrası yoğunlukların düştüğünü, buna bağlı olarak sertlik ve mukavemetin de düştüğünü tespit etmişlerdir. Sinterleme yardımcısı olarak ilave edilen Mg, %1 oranında ilave edildiğinde yüksek yoğunluk değerleri elde edildiğini, bu oranın %3'e çıkarılmasıyla ise yoğunluk değerlerinin azaldığını, buna rağmen Mg oranının artmasıyla sertlik ve mukavemetin artmaya devam ettiğini belirlemişlerdir. Sinterleme atmosferi olarak hava yerine azot ortamın kullanılmasının ise; yoğunluk, sertlik ve mukavemeti artırdığını saptamışlardır (Karaşoğlu ve Karaoğlu, 2014).

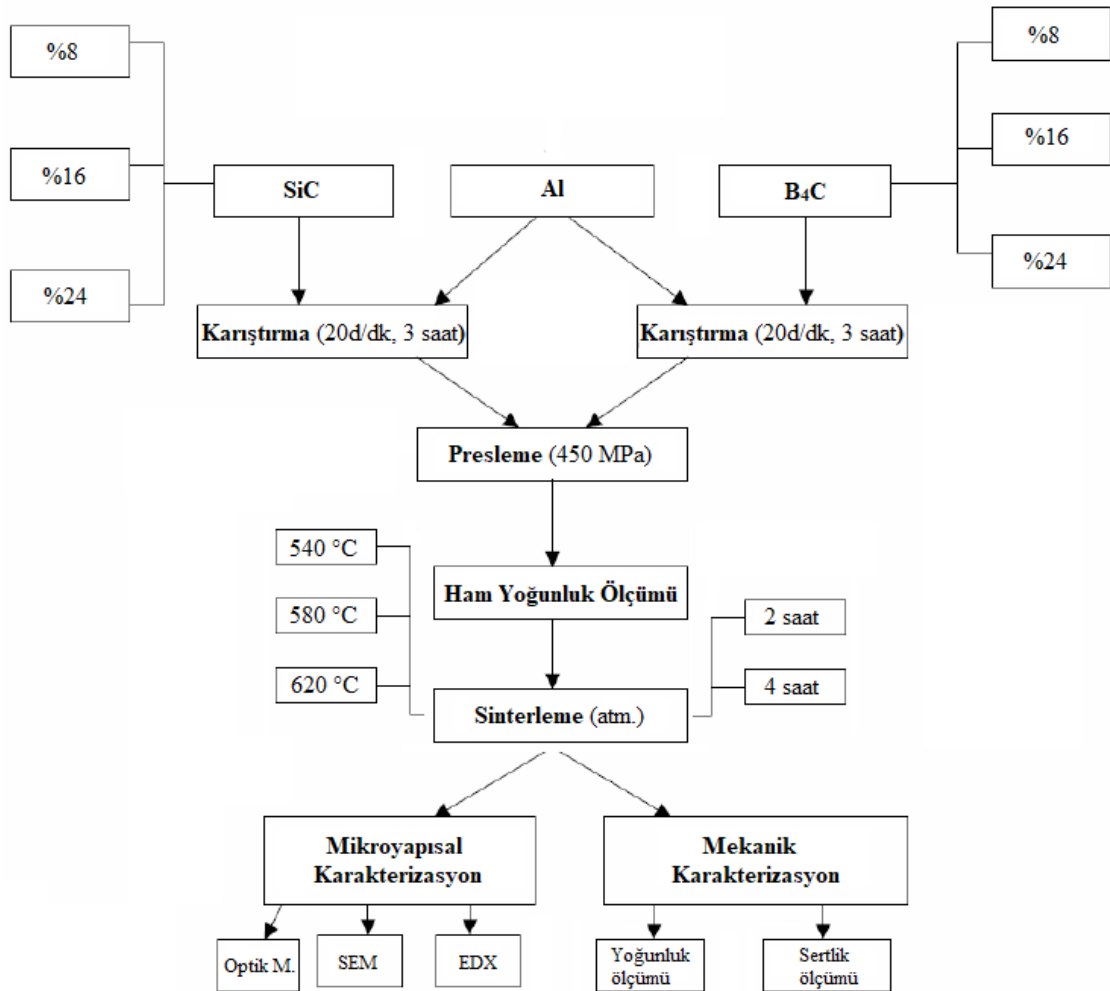
Taşcı vd. yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi ile üretilen ağırlıkça farklı oranlarda B<sub>4</sub>C takviyeli AA2014 matrisli kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri ile aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, artan B<sub>4</sub>C takviye oranına bağlı olarak sertlik değerlerinde artış olduğunu, en yüksek sertlik değerinin 90 HV olarak en yüksek takviye oranı olan %8 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerden elde edildiğini belirlemişlerdir. Kompozitlerin aşınma direncinin ise, artan takviye oranları ile arttığını, aşınma testleri sonrası ağırlık kayıplarının artan takviye oranı ile birlikte azalma gösterdiğini tespit etmişlerdir. Yapılan mikroyapı incelemeleri ile de takviye fazın matris yapısı boyunca dağılımının uygun homojenlikte olduğunu gözlemlemişlerdir (Taşcı vd., 2013).

Karabulut ve ıtak alışmalarında, SiC takviyeli Al matrisli kompozit malzemeleri, mekanik alaşımlama yöntemi ile farklı mekanik alaşımlama sürelerinde üreterek, mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mikroyapı incelemelerinden yola çıkarak, üretilen kompozit numunelerin homojen bir dağılıma sahip olduğu sonucuna varmışlardır. Gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda, artan mekanik alaşımlama süresiyle sertliğin arttığını, toz boyutu ve yoğunluğun ise azaldığını tespit etmişlerdir. Al malzemeye SiC takviye edilmesiyle, üretilen yeni malzemelerin sertliğinin arttığını, fakat saf Al' dan üretilen numunelerin daha yoğun ve daha az gözenekli olduğunu belirlemişlerdir (Karabulut ve ıtak, 2011).

Orhan vd. yaptıkları çalışmada, toz metalürjisi ile üretilen ve sıcak preslenen ağırlıkça farklı oranlarda B<sub>4</sub>C takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitler soğuk presleme ile kompakt hale getirildikten sonra, porozitelerin daha da aza indirgenmesi için 500-550°C' de sıcak presleme ile tekrar preslenmiştir. Deneyler sonucunda, matris içinde takviye dağılımlarının homojen olduğunu, artan takviye oranı ile sertliğin arttığını, 550 C' de gerçekleştirilen sıcak presleme ile artan takviye oranlarında numune yoğunluklarının azaldığını belirlemişlerdir (Orhan vd., 2007).

## 6. MATERYAL VE METOD

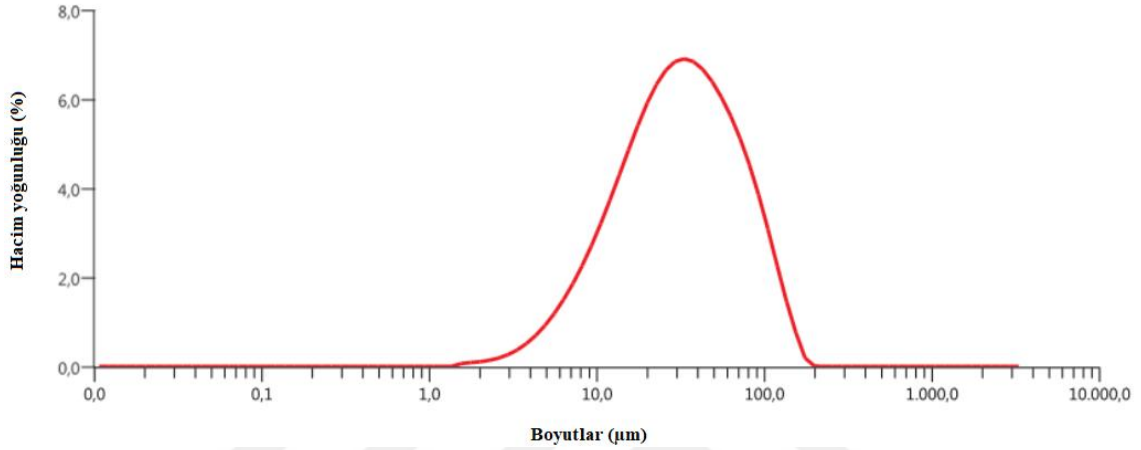
Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile farklı oranlarda farklı takviye elemanları ile katkılandırılmış hafif metal matrisli kompozit malzemeler çeşitli üretim parametreleri değiştirilerek üretilmiş ve bu değişkenlerin malzeme özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla matris malzemesi olarak Al, takviye malzemeleri olarak ise SiC ve B<sub>4</sub>C seçilmiştir. Üretim esnasında karıştırma süresi ve presleme basıncı gibi parametreler sabit tutulurken, SiC ve B<sub>4</sub>C katkı yüzdeleri, sinterleme sıcaklıkları ve sinterleme süreleri gibi parametreler değiştirilerek üretilen numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla elde edilen numunelerin yoğunluk ve sertlik ölçümleri yapılmış, optik mikroskop, SEM ve EDX ile gerekli mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneysel prosedürü gösteren akış çizelgesi Şekil 6.1.'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Bu araştırmanın deneysel prosedürünü gösteren akış çizelgesi.

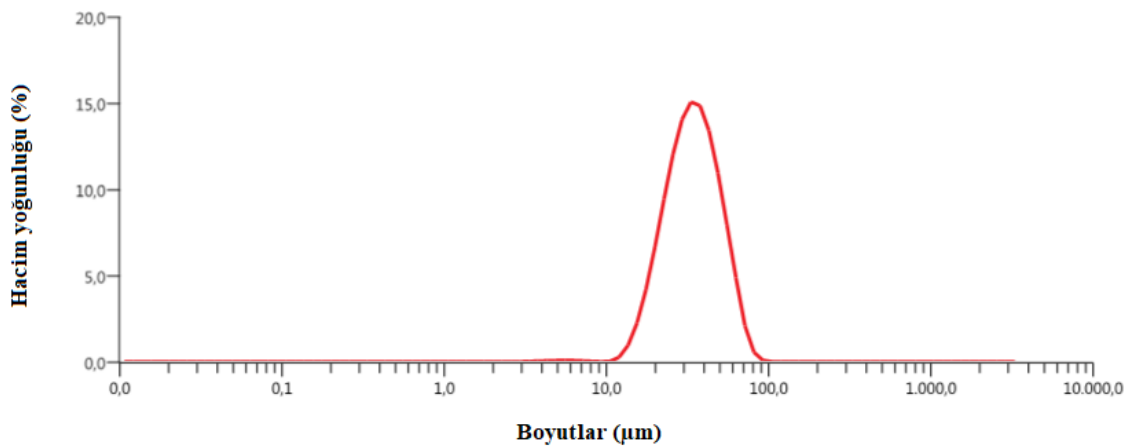
### 6.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Deneilerde matris malzemesi olarak, boyut dağılımı Şekil 6.2.'de verilen, Ege Nanotek firmasından temin edilen, ortalama 40  $\mu\text{m}$  boyut ve %98 üzeri saflıktaki saf Al tozları kullanılmıştır. Ayrıntılı Al toz boyut analiz raporu EK-1'de sunulmuştur.



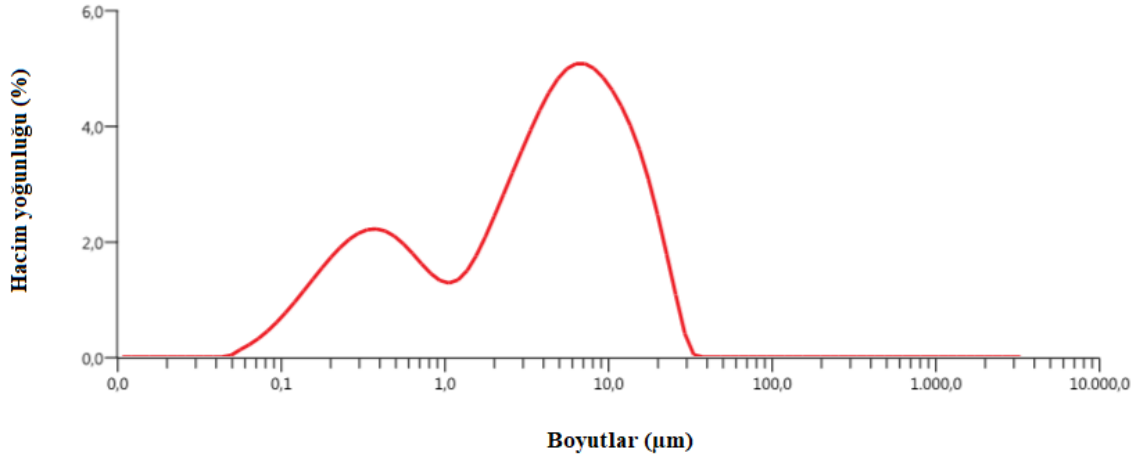
Şekil 6.2. Deneilerde kullanılan Al tozunun boyut dağılımı.

Deneilerde takviye malzemesi olarak, boyut dağılımı Şekil 6.3.'de verilen, Ege Nanotek firmasından temin edilen, ortalama 36  $\mu\text{m}$  boyut ve %98 saflıktaki SiC tozları kullanılmıştır. Ayrıntılı SiC toz boyut analiz raporu EK-2'de sunulmuştur.



Şekil 6.3. Deneilerde kullanılan SiC tozunun boyut dağılımı.

Deneylerde bir diğer takviye malzemesi olarak, boyut dağılımı Şekil 6.4.'de verilen, Ege Nanotek firmasından temin edilen, ortalama 6  $\mu\text{m}$  boyut ve %96 üzeri saflıktaki  $\text{B}_4\text{C}$  tozları kullanılmıştır. Ayrıntılı  $\text{B}_4\text{C}$  toz boyut analiz raporu EK-3'te sunulmuştur.



**Şekil 6.4.** Deneylerde kullanılan  $\text{B}_4\text{C}$  tozunun boyut dağılımı.

Çalışmada kullanılan malzemeler ait genel özelliklerden olan yoğunluk, ergime sıcaklığı ve sertlik değerleri Çizelge 6.1.'de sunulmuştur.

**Çizelge 6.1.** Deneylerde kullanılan malzemelerin genel özellikleri.

Malzeme	Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Ergime Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )	Sertlik (HV, $\text{kg}/\text{mm}^2$ )
Al	2,7	660	16,7
SiC	3,21	2750	2600
$\text{B}_4\text{C}$	2,52	2450	3200



## 6.2. Deney Numunelerinin Üretilmesi

### 6.2.1. Toz karışımların hazırlanması

Deneysel çalışmaların başlangıcında, üretilecek numuneler için presleme öncesi kalıba doldurulacak toz miktarı hesaplanmıştır. Yani istenen ölçülerde deney numunelerinin üretilebilmesi için gerekli olan toz karışımlarının ağırlık hesapları yapılmıştır. Bu miktar, toz karışımın yoğunluğuna ve üretilecek numune boyutlarına bağlıdır. Deneylerde üretilecek numuneler silindirik numuneler olup boyutları; çap 12mm ve yükseklik 22 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Buna bağlı olarak da üretilecek numune hacmi sabit olup eşitlik 6.1'den  $2,49 \text{ cm}^3$  olarak hesaplanmıştır. Bu değerden yola çıkarak ise üretilecek numune ağırlıkları adet başına olmak üzere eşitlik 6.2'den hesaplanmış ve Çizelge 6.2.'de her malzeme grubu için ayrı ayrı olacak şekilde verilmiştir. Eşitlik 6.3 ile ise farklı oranlarda takviye elemanları ile takviye edilerek üretilen kompozit malzeme gruplarının yoğunlukları hesaplanmıştır.

$$V = \pi r^2 h \quad (6.1)$$

$$W = \rho \cdot V \quad (6.2)$$

$$\rho_{kar} = [(\%W)_1 * \rho_1] + [(\%W)_2 * \rho_2] + \dots + [(\%W)_n * \rho_n] \quad (6.3)$$

Burada;

V: Hacim ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

W: Ağırlık (g)

$\rho$ : Yoğunluk ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$\rho_{kar}$ : Toz karışımının teorik yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$(\%W)_n$ : n bileşenin karışım içindeki ağırlık yüzdesi

$\rho_n$ : n bileşenin yoğunluğu ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Bu değerlere bakıldığında, bir adet numune için kalıba doldurulacak toz miktarının yaklaşık 7 gram olduğu saptanmıştır. Değişen her parametre için 3 adet numune üretilip bu numunelerden alınan ölçüm değerlerinin aritmetik ortalaması değerlendirmeye alındığından, saf Al grubu için 18, Al-%8SiC grubu için 18, Al-%16SiC grubu için 18, Al-%24SiC grubu için 18, Al-%8B<sub>4</sub>C grubu için 18, Al-%16B<sub>4</sub>C grubu için 18, Al-%24B<sub>4</sub>C grubu için 18 olmak üzere

toplamda 126 numune üretilmiştir. Her numune için adet başına ağırlık ortalama 7 g olarak alındığından, üretilecek her grubun ağırlığı 126 g olarak hesaplanmıştır. Fakat kalıba doldurma sırasında oluşabilecek veya presleme sırasında tozun kalıp duvarlarına sıvanması ile gerçekleşebilecek kayıplar dikkate alınarak, her grup için karışım ağırlığı 200 g olarak belirlenmiş ve toz karışımları 200 g'lık karışımlar halinde hazırlanmıştır. Bu karışımlar, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi Malzeme Laboratuvarında bulunan 0,0001 g hassasiyete sahip Shimadzu marka elektronik terazide tartılarak hazırlanmıştır. Şekil 6.5.'de kullanılan hassas teraziler görülmektedir. Homojen dağılımlı toz karışımları elde etme amacıyla yapılan karıştırma işlemleri de yine Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi Malzeme Laboratuvarında bulunan V şekilli karıştırıcıda, 20 d/dk. hızda, 3 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.6.'da kullanılan V şekilli karıştırıcı verilmiştir.

**Çizelge 6.2.** Toz karışımların yoğunluk ve ağırlıkları.

<b>Malzeme</b>	<b>W<sub>SiC/B4C</sub> (g)</b>	<b>W<sub>Al</sub> (g)</b>	<b>W<sub>kar</sub> (g)</b>	<b><math>\rho_{kar}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Al (Saf)	-	6,723	6,723	2,7
Al-%8SiC	0,546	6,277	6,823	2,74
Al-%16SiC	1,108	5,814	6,922	2,78
Al-%24SiC	1,685	5,337	7,022	2,82
Al-%8B <sub>4</sub> C	0,535	6,153	6,688	2,686
Al-%16B <sub>4</sub> C	1,064	5,587	6,651	2,671
Al-%24B <sub>4</sub> C	1,588	5,028	6,616	2,657



**Şekil 6.5.** Toz karışımların hazırlanmasında kullanılan hassas terazi.



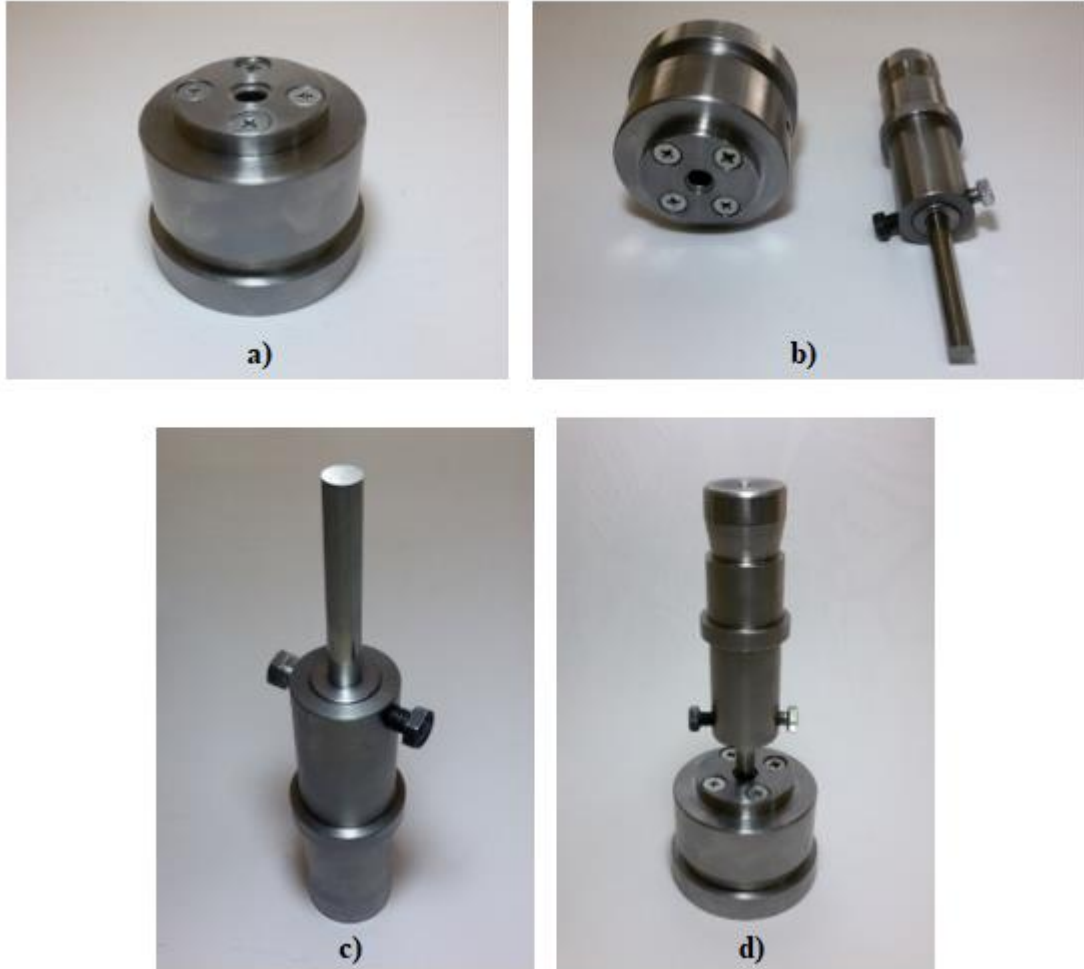
**Şekil 6.6.** Toz karışımların karıştırılmasında kullanılan karıştırıcı.

### **6.2.2. Toz karışımların preslenmesi**

Presleme işlemi öncesi, toz karışımları preslemede ve böylece ham numunelerin üretiminde kullanılacak olan kalıbın hazırlık çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tasarımı SolidWorks programında yapılan kalıbın üretimi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi atölyesinde bulunan TAKSAN TTU 500 marka tornada gerçekleştirilmiştir. Kalıp üretim aşamaları Şekil 6.7.'de, üretilen kalıp ve kullanılan zımba Şekil 6.8.'de verilmiştir. Kalıba ait çizimler EK-4'te sunulmuştur.



**Şekil 6.7.** Kalıp üretimi; a) İşlenmek üzere torna aynasına bağlanmış olan kalıp malzemesi. b) ve c) Kalıp malzemesinde kalıp boşluğunun oluşturulması.

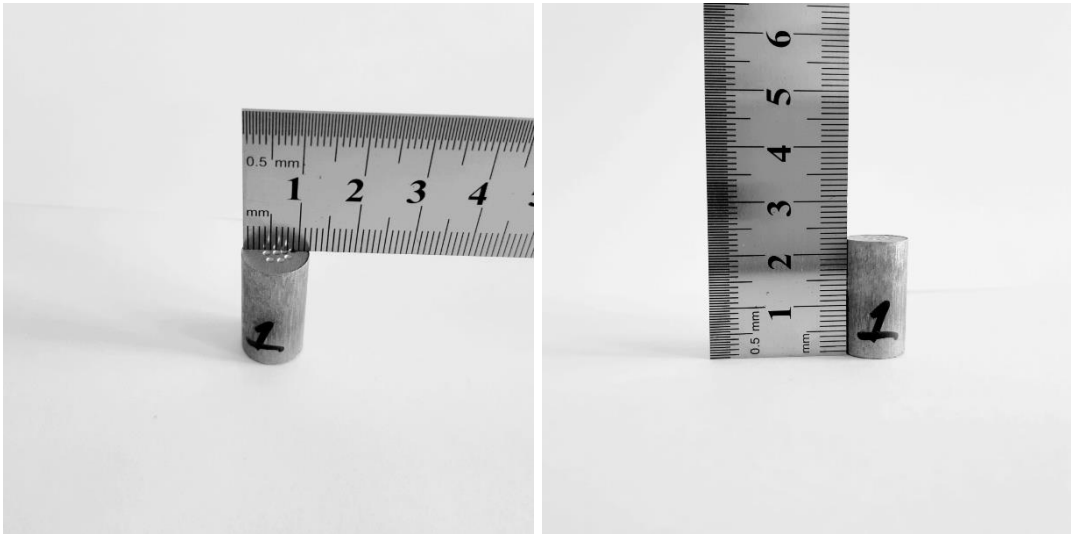


**Şekil 6.8.** Tozların preslenmesinde kullanılan; a) kalıp, b) kalıp ve zımbanın ayrı hali, c) zımba, d) kalıp ve zımbanın presleme esnasındaki hali.

Hazırlanan toz karışımları, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi atölyesinde bulunan 80 tonluk hidrolik preste tek yönlü ve aksenal olarak, 450 MPa basınç altında presleme işlemine tabi tutulmuş ve bu şekilde ham numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen ham numuneler Şekil 6.10.'da verilmiştir. Presleme basıncı seçiminde yapılan literatür çalışmaları ve gerçekleştirilen ön deneyler belirleyici olmuştur. Presleme işlemi öncesi kalıp duvarları ve zımbanın çevresi, sürtünmeyi ve kalıp aşınmasını azaltmak, numunelerin presleme sonrası kalıptan daha kolay çıkmasını sağlamak amacıyla çinko stearat ile yağlanmıştır. Presleme işleminde kullanılan hidrolik pres Şekil 6.9.'da verilmiştir.



Şekil 6.9. Tozların preslenmesinde kullanılan hidrolik pres.



Şekil 6.10. Presleme sonrası elde edilen numuneler.



### 6.2.3. Ham numunelerin sinterlenmesi

Presleme işlemi sonrası elde edilen ham numunelerin sinterleme öncesi ham yoğunluk ölçümleri yapılmış ve ardından numuneler sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemi, atmosfer kontrolsüz, elektronik göstergeli ve sıcaklık artış takibi yapılabilen Nabertherm marka ısı işlem fırınında gerçekleştirilmiştir. Sinterlemenin gerçekleştirildiği fırın ve sinterlenen numuneler Şekil 6.11.'de verilmiştir. Sinterleme; 540°C, 580°C, 620°C olmak üzere üç farklı sinterleme sıcaklığında, 2 ve 4 saat olmak üzere iki farklı sinterleme süresinde gerçekleştirilmiştir. Böylece, değişen sinterleme parametrelerinin üretilen kompozit malzemelerin özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir.



**Şekil 6.11.** Sinterleme işleminde; a) Kullanılan fırın. b) ve c) Sinterlenmek üzere fırın içerisine yerleştirilmiş olan numuneler.

### 6.3. Deney Numunelerine Uygulanan Testler

Üretilen numuneler, mikroyapı ve mekanik özelliklerinin tayininin yapılabilmesi için çeşitli testlere tabi tutulmuştur. Bu testler; yoğunluk ölçümü ve sertlik ölçümü gibi mekanik testler ile optik mikroskop, SEM ve EDX ile yapılan mikroyapı inceleme testlerinden oluşmaktadır. Bu testler öncesi numunelere çeşitli metalografik numune hazırlama işlemleri uygulanmıştır.

#### 6.3.1. Yoğunluk ölçümü

Yoğunluk ölçümleri, sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası olmak üzere iki defa gerçekleştirilmiştir. Bunun amacı sinterleme ile yoğunluk değerlerindeki değişimi ortaya koymaktır. Yoğunluk ölçüm işlemleri, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Simav Teknoloji Fakültesi Malzeme Laboratuvarında bulunan Shimadzu marka 0,0001 g hassasiyetli elektronik terazi ile Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Yani numuneler önce havada sonra suda tartılmış, ardından havadaki ağırlığın hava ve sudaki ağırlıkların farkına bölünmesi ve suyun yoğunluğu ile çarpılmasıyla deneysel yoğunluk değeri hesaplanmıştır. Bu hesaplama için Eşitlik 6.4 kullanılmıştır. Daha sonra numunelerin hesaplanan teorik yoğunlukları ve sinterleme sonrası deneysel yoğunlukları kullanılarak Eşitlik 6.5 ile % gözeneklilik oranları ve Eşitlik 6.6 ile yoğunluk yüzdeleri hesaplanmıştır. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan hassas terazi ve yoğunluk ölçüm kiti Şekil 6.12.'de verilmiştir.

$$\rho_{deneyysel} = \frac{W_{hava}}{W_{hava} - W_{su}} * \rho_{su} \quad (6.4)$$

$$\%gözenek = \frac{\rho_{teorik} - \rho_{deneyysel}}{\rho_{teorik}} * 100 \quad (6.5)$$

$$\% \rho = \frac{\rho_{deneyysel}}{\rho_{teorik}} * 100 \quad (6.6)$$

Burada;

$\rho_{deneyysel}$ : Deneysel yoğunluk ( $g/cm^3$ )

$\rho_{su}$ : Su yoğunluğu ( $g/cm^3$ )

$W_{hava}$ : Havadaki ağırlık (g)



$W_{su}$ : Sudaki ağırlık (g)

$\rho_{teorik}$ : Teorik yoğunluk ( $g/cm^3$ )

%gözenek: Gözeneklilik yüzdesi

% $\rho$ : Yoğunluk yüzdesi



**Şekil 6.12.** Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan hassas terazi ve yoğunluk ölçüm kiti.

### 6.3.2. Sertlik ölçümü

Sertlik ölçümleri, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezinde bulunan Metkon Duroline-M marka mikrosertlik ölçüm cihazında Vickers (HV) cinsinden gerçekleştirilmiştir. Optimum sonuçlar elde etmek amacıyla, her numune için yüzeydeki üç farklı noktadan ölçüm alınıp bu değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak sertlik değeri olarak belirlenmiştir. Kullanılan sertlik ölçüm cihazı Şekil 6.13.'te verilmiştir.



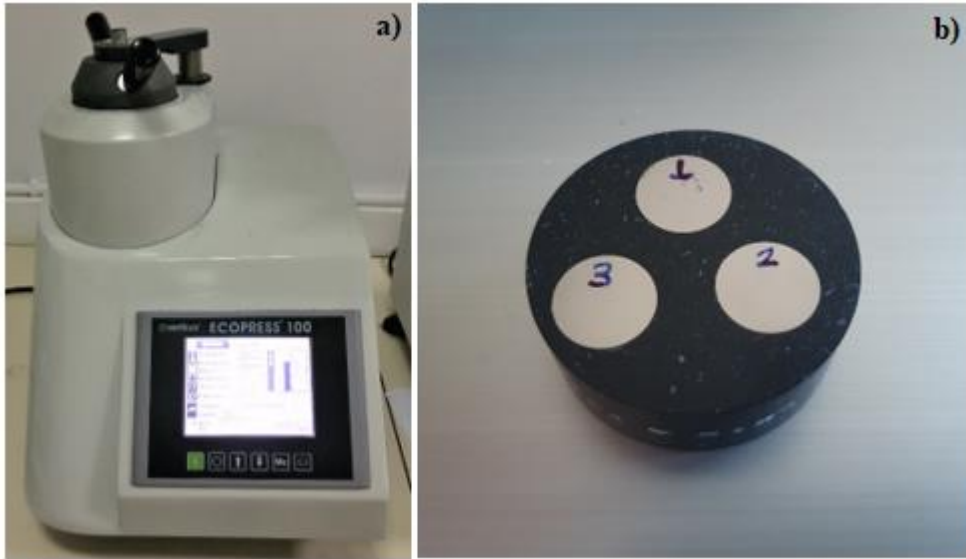
Şekil 6.13. Sertlik ölçümlerinde kullanılan cihaz.

### 6.3.3. Optik Mikroskop, SEM ve EDX ile mikroyapı incelemeleri

Üretilen numunelerin mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları; optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDX) ile incelemeleri gerçekleştirilerek yapılmıştır. Bu çalışmalardan önce numunelere gerekli metalografik numune hazırlama işlemleri uygulanmıştır. Metalografik numune hazırlama işlemleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezinde gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler, yapılacak mikroyapı incelemeleri için gerekli hazırlıkların (bakalite alma, zımparalama, parlatma) yapılabilmesi amacıyla öncelikle Metkon Micracut 201 marka kesme cihazı ile kesilerek bakalite alma işlemi için uygun boyutlara getirilmiştir. Kullanılan kesme cihazı Şekil 6.14.'de verilmiştir. Ardından numuneler, Metkon Ecopress 100 marka numune kalıplama presi ile bakalite alınmıştır. Kalıba alma işleminin yapıldığı cihaz ve bakalite alınmış numuneler Şekil 6.15.'de verilmiştir. Bakalite alınan numuneler Metkon Forcimat marka zımparalama makinesinde, sırasıyla 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 gritli zımparalar ile zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Numunelere son olarak Metkon Digiprep Accura marka parlatma cihazında, 1 mikronluk alümina süspansiyon ve parlatma keçesi ile parlatma işlemi uygulanmış ve böylece mikroyapı incelemeleri için metalografik numune hazırlama işlemleri tamamlanmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemlerinin gerçekleştirildiği cihazlar Şekil 6.16.'da verilmiştir.



Şekil 6.14. Numunelerin kesildiği kesme cihazı.



Şekil 6.15. a) Kalıba alma işleminin yapıldığı cihaz. b) Bakalite alınmış numuneler.



**Şekil 6.16.** a) zımparalama ve b) parlatma işlemlerinin gerçekleştirildiği cihazlar.

Hazırlığı biten numunelerin x10, x20, x50 ve x100 büyütme oranlarındaki mikroyapı görüntüleri, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezinde bulunan Leica marka optik mikroskop ile elde edilmiştir. Numunelerin x100, x250, x500 ve x1000 büyütme oranlarındaki mikroyapı görüntüleri ile enerji dağılım spektrometresi (EDX) analizleri ise Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Jeol JSM 5600 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile elde edilmiştir. Kullanılan optik mikroskop Şekil 6.17.'de, taramalı elektron mikroskobu ise Şekil 6.18.'de verilmiştir.



**Şekil 6. 17.** Mikroyapı görüntülerinin elde edilmesinde kullanılan optik mikroskop.



**Şekil 6.18.** Mikroyapı görüntüleri ve EDX analizlerinin elde edilmesinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM).

## **6.4. Test Sonuçları**

### **6.4.1. Yoğunluk ölçüm sonuçları ve değerlendirilmesi**

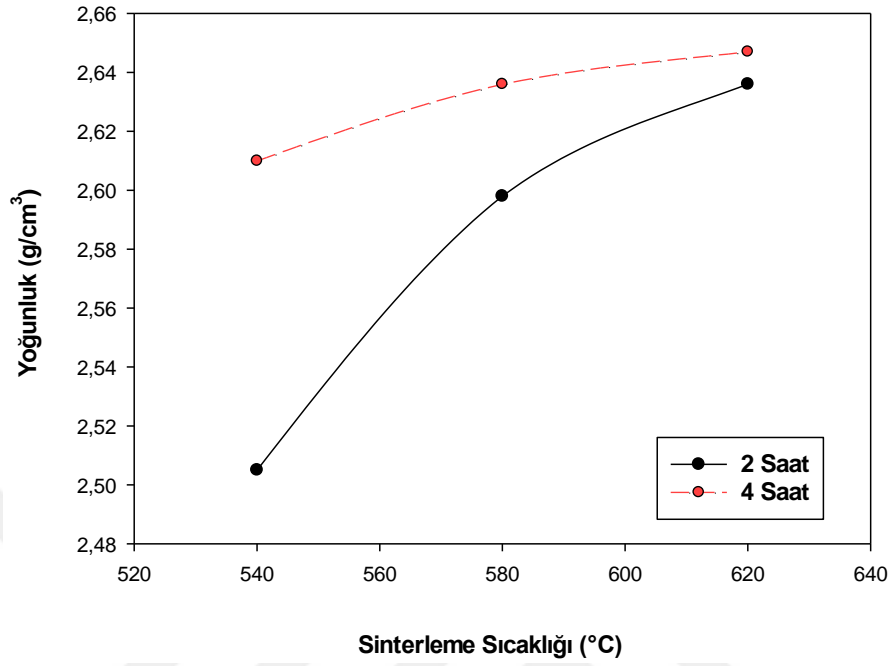
Üretilen numunelere yapılan yoğunluk ölçüm işlemleri, sinterleme öncesi ham yoğunlukların ölçümü ve sinterleme sonrası gerçek yoğunluk değerlerinin ölçümü olmak üzere iki kere gerçekleştirilmiştir. Bunun amacı, sinterleme sonrası numunelerde meydana gelen yoğunluk değişimlerini gözlemleyebilmektir. Farklı oranlarda takviyeler ile üretilen numuneler, üç farklı sinterleme sıcaklığında ve iki farklı sinterleme süresinde sinterleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Her farklı üretim grubu için üç adet numune üretilmiş olup, yoğunluk ölçümü yapılırken bu üç numunenin yoğunluk değerleri ölçülmüş ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak o gruba ait ortalama yoğunluk değeri elde edilmiştir. Yoğunluk ölçümleri Shimadzu marka 0,0001 g hassasiyetli terazide Arşimet prensibine göre gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen yoğunluk ölçümlerinin sonuçları, SiC takviyeli Al matrisli kompozit numuneleri için Çizelge 6.3.'te ve B<sub>4</sub>C takviyeli Al matrisli kompozit numuneleri için Çizelge 6.4.'te verilmiştir.

**Çizelge 6.3.** SiC takviyeli Al matrisli kompozit numunelerine ait yoğunluk ölçüm değerleri.

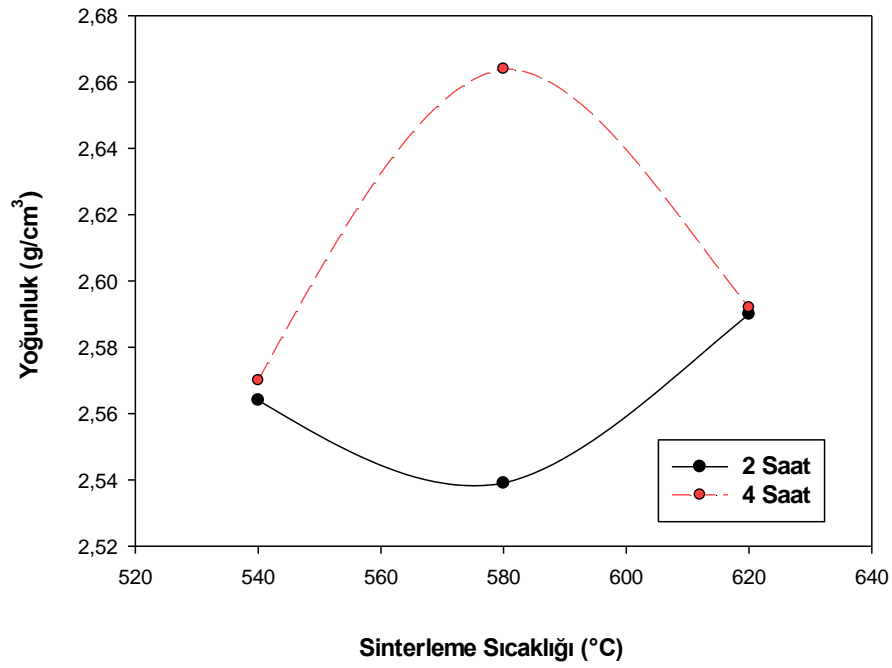
Malzeme	SiC Takviye Oranı (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Ham Yoğunluk (S.Ö.) (g/cm <sup>3</sup> )	Gerçek Yoğunluk (S.S.) (g/cm <sup>3</sup> )	Teorik Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	DeneySEL Yoğunluk (%)	Gözeneklilik (Porozite) (%)			
Al	0	540	2	2,450	2,505	2,700	92,781	7,219			
			4	2,543	2,610		96,683	3,317			
		580	2	2,503	2,598		96,232	3,768			
			4	2,506	2,636		97,616	2,384			
		620	2	2,532	2,636		97,621	2,379			
			4	2,533	2,647		98,040	1,960			
		Al - SiC	8	540	2		2,494	2,564	2,741	93,562	6,438
					4		2,552	2,570		93,808	6,192
				580	2		2,509	2,539		92,669	7,331
					4		2,568	2,664		97,221	2,779
				620	2		2,543	2,590		94,521	5,479
					4		2,546	2,592		94,606	5,394
16	540			2	2,525	2,571	2,782	92,490		7,510	
				4	2,404	2,578		92,719		7,281	
	580			2	2,527	2,577		92,687		7,313	
				4	2,518	2,583		92,930		7,070	
	620			2	2,527	2,578		92,735		7,265	
				4	2,525	2,592		93,242		6,758	
	24		540	2	2,535	2,596		2,822	92,046	7,954	
				4	2,525	2,598			92,144	7,856	
			580	2	2,532	2,600			92,206	7,794	
				4	2,589	2,606			92,413	7,587	
			620	2	2,536	2,608			92,493	7,507	
				4	2,543	2,616			92,770	7,230	

Yoğunluk ölçüm sonuçlarına bakıldığında, artan SiC takviye oranı, sinterleme sıcaklığı ve süresiyle numunelerin yoğunluk değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir. Bu durum için, artan SiC oranlarında SiC'ün yoğunluğunun Al'un yoğunluğundan fazla olması sebebiyle yoğunluk değerlerinde genel bir artış olduğu, artan sinterleme sıcaklığı ve süresinde ise ergime sıcaklığına yaklaşılacak sıcaklıklarda atomların bağ koparma enerjilerinin artmasıyla Al taneleri arasında difüzyonun arttığı, dolayısıyla gözeneklerin küçüldüğü, buna bağlı olarak da yoğunluğun arttığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, sinterleme sıcaklığı ve süresinin artmasıyla gözenekliliğin azaldığı, yoğunluğun arttığı ve hesaplanan teorik yoğunluk değerlerine yaklaştığı belirlenmiştir. Şekil 6.19-22'de sırasıyla saf Al ve %8, %16, %24 oranlarında SiC takviyeli Al numunelerine ait yoğunlukların sinterleme sıcaklığına bağlı değişimleri görülmektedir. Topçu vd., Kevenlik ve Venkatesh ve Harish tarafından yapılan çalışmalarda da bu sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir (Topçu vd., 2009; Kevenlik, 2013; Venkatesh ve Harish, 2015).

Gözeneklilik değerlerine bakıldığında, en az gözenekliliğin %1,960 ile saf Al numunelerinde 620°C'de 4 saat gerçekleştirilen sinterleme sonucu elde edildiği, en yüksek gözenekliliğin ise %7,954 ile %24 SiC takviyeli kompozit numunelerinde 540°C'de 2 saat gerçekleştirilen sinterleme sonucu elde edildiği görülmektedir. Bunun sebebinin, artan SiC oranı ile Al' un yapıda çoğalan SiC taneleri etrafından gerçekleşen difüzyonunun güçleşmesi ve buna bağlı olarak bu taneleri bağlamada güçlük çekmesi olduğu düşünülmektedir. Yani artan takviye oranlarında gözenekliliğin genel olarak arttığı ve bu durumun sebebinin gözeneklerin genellikle takviye tanelerinin çevresinde oluşmasından ileri geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, yapıdaki takviye tanelerin refrakter özellikli olması ve ısı iletkenliğinin düşük olması sebebiyle artan takviye oranları, sinterleme sırasında ısı iletimini ve dolayısıyla sinterleme mekanizmasını engelleyici etki yaparak difüzyonu azaltmakta ve böylece gözeneklerin küçülmesini ve azalmasını engellemektedir. Artan takviye oranı ile gözenekliliğin artmasının bir diğer sebebi ise, sertliği yüksek ve dolayısıyla sıkıştırılabilirliği düşük olan takviye tanelerinin yapıdaki miktarının artmasıyla kompozitin genel sıkıştırılabilirliğinin azalmasından ileri gelmektedir. Sonuç olarak, artan sinterleme sıcaklığı ve süresi ile gözenekliliğin azaldığı, artan takviye oranlarıyla ise arttığı belirlenmiştir. Dolayısıyla artan takviye oranı ile gözenekliliğin artmasına bağlı olarak yoğunluğun azaldığı belirlenmiştir. Şekil 6.23-26'da sırasıyla saf Al ve %8, %16, %24 oranlarında SiC takviyeli Al numunelerine ait gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimleri görülmektedir. Şekil 6.27. ve 6.28.'de ise sırasıyla 2 ve 4 saat sinterlenen SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun takviye oranına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Kalaycıoğlu, Karaman, Purohit vd. ve Kevenlik tarafından yapılan çalışmalarda da bu sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir (Kalaycıoğlu, 2010; Karaman, 2011; Purohit vd., 2012; Kevenlik, 2013).

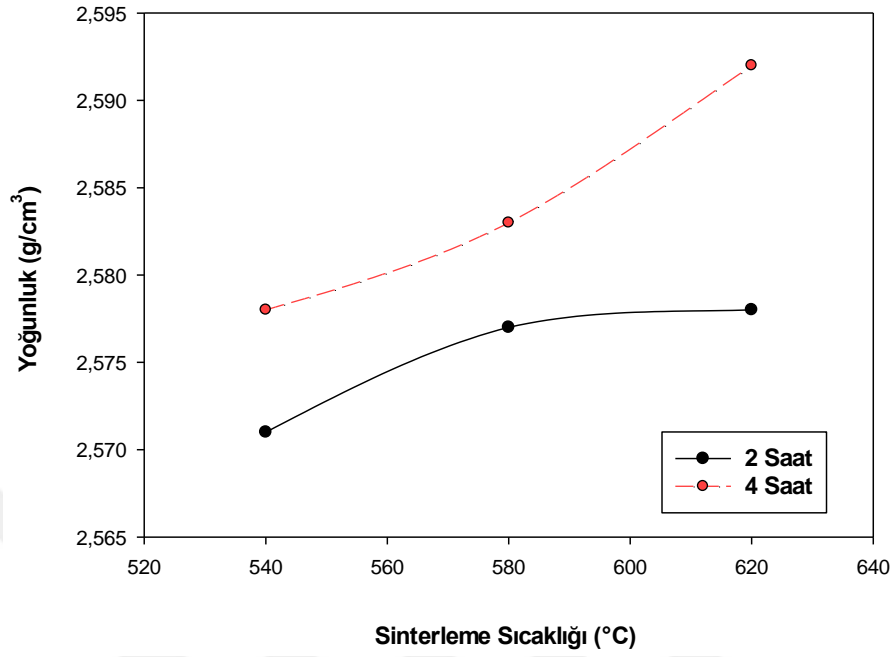


Şekil 6.19. Saf Al numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.

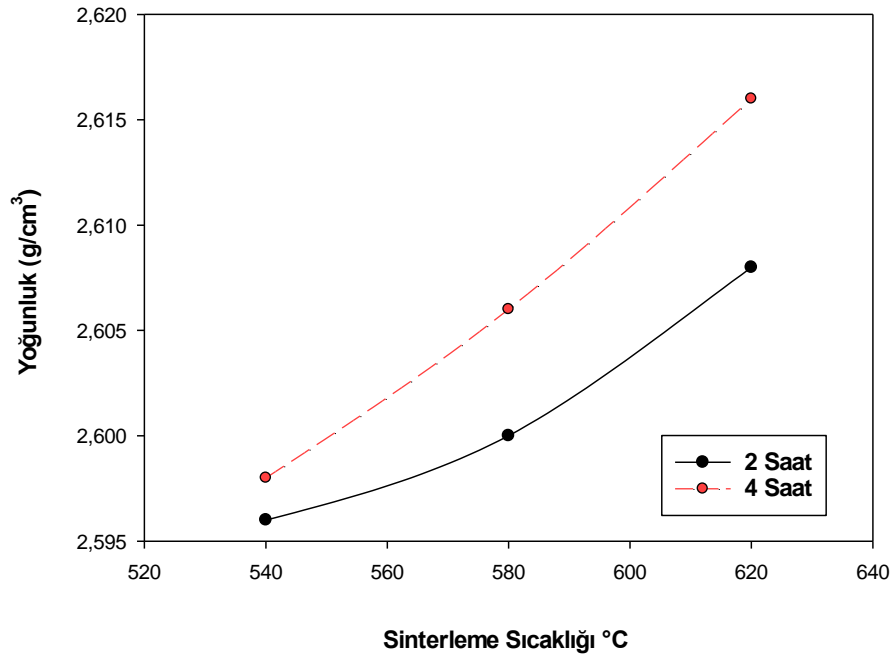


Şekil 6.20. %8 SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.

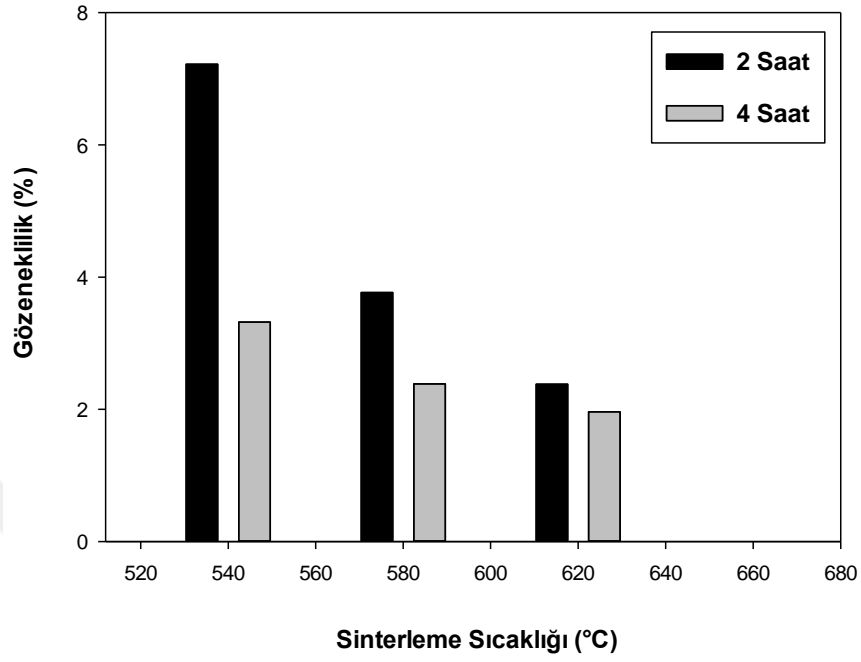




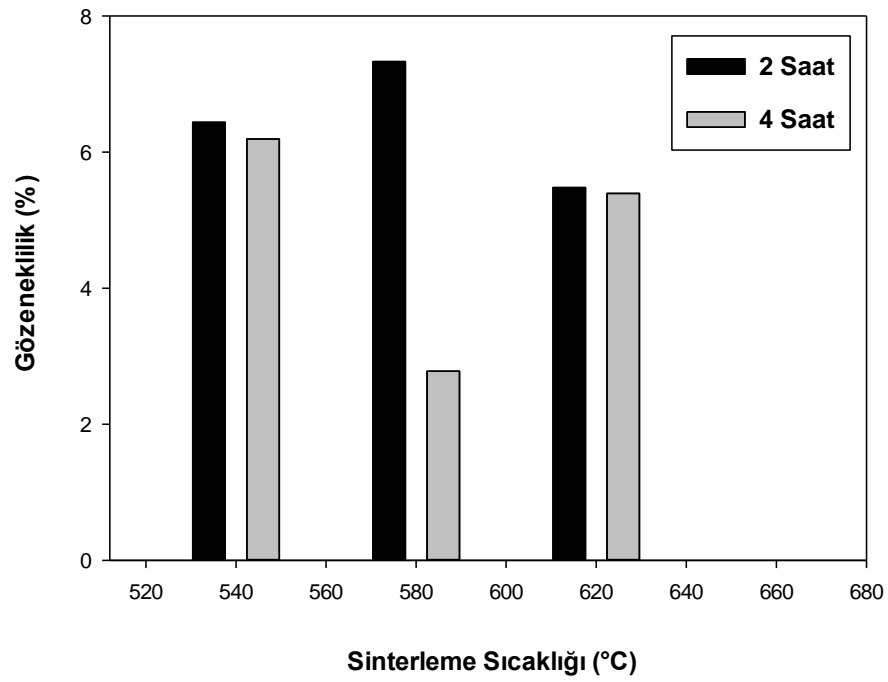
Şekil 6.21. %16 SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



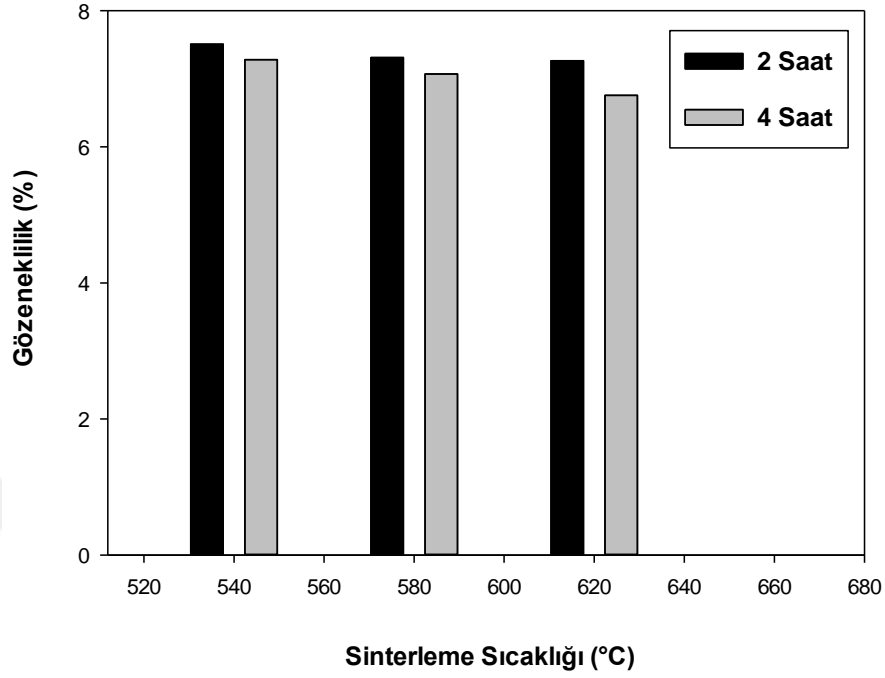
Şekil 6.22. %24 SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



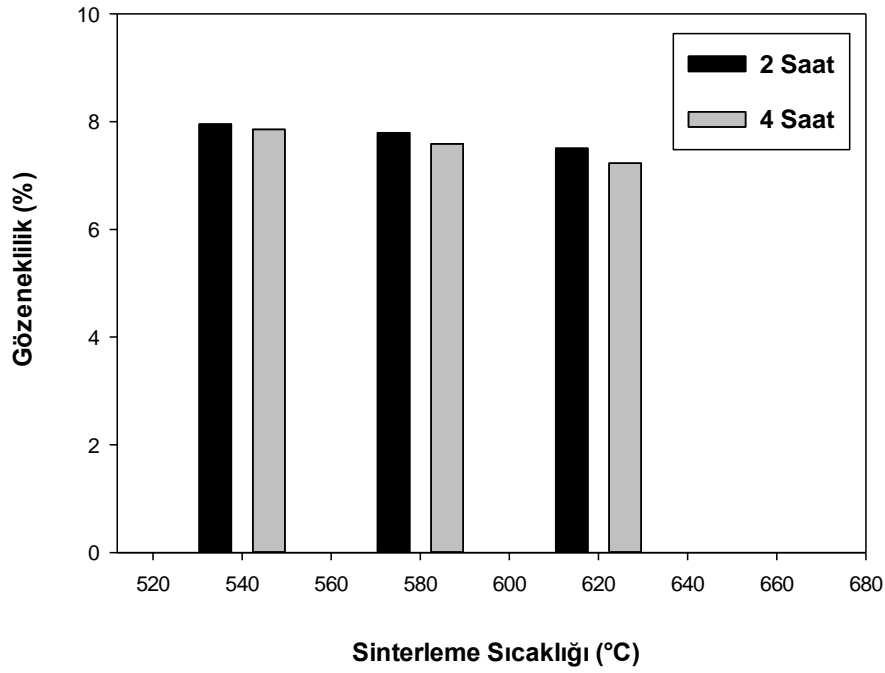
Şekil 6.23. Saf Al numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



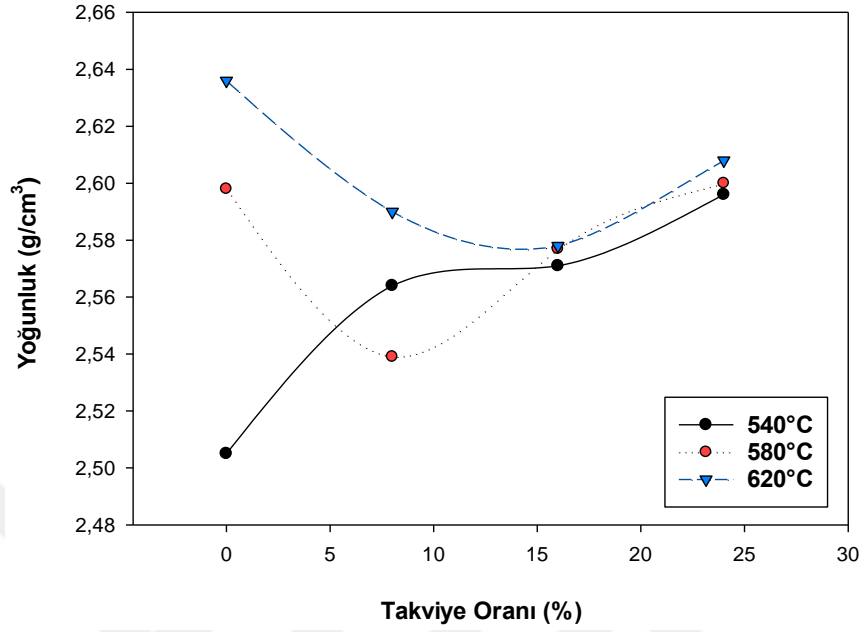
Şekil 6.24. %8 SiC takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



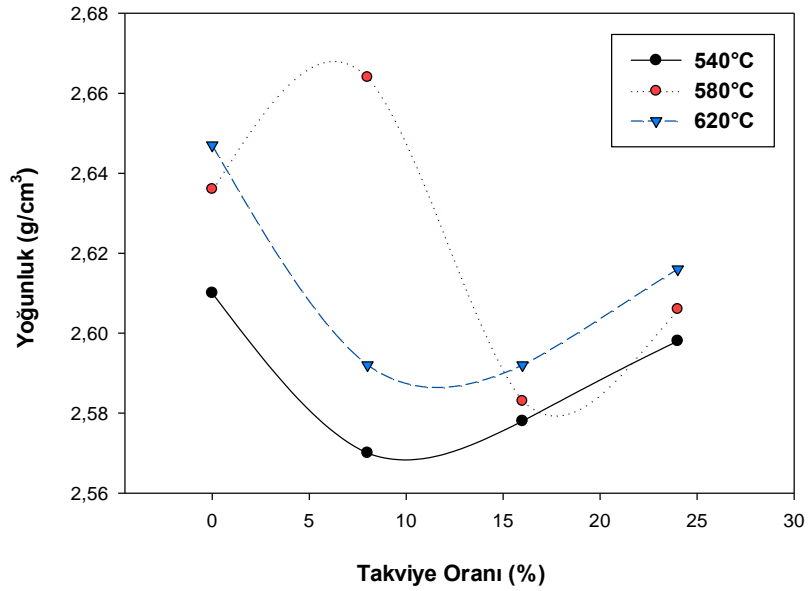
Şekil 6.25. %16 SiC takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 6.26. %24 SiC takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 6.27. 2 saat sinterlenen SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun takviye oranına bağlı değişimi.



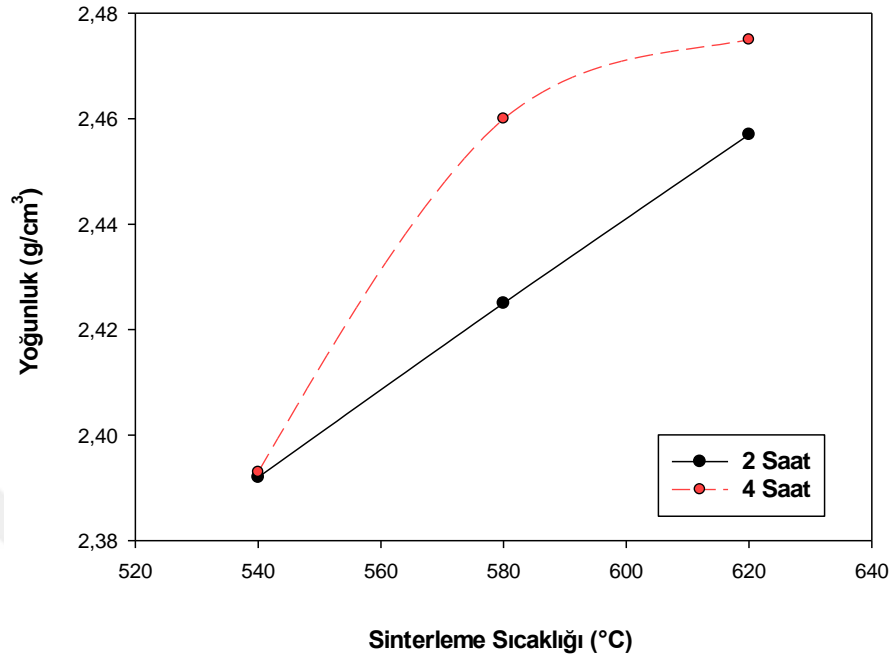
Şekil 6.28. 4 saat sinterlenen SiC takviyeli numunelerde yoğunluğun takviye oranına bağlı değişimi.

**Çizelge 6.4.** B<sub>4</sub>C takviyeli Al matrisli kompozit numunelerine ait yoğunluk ölçüm değerleri.

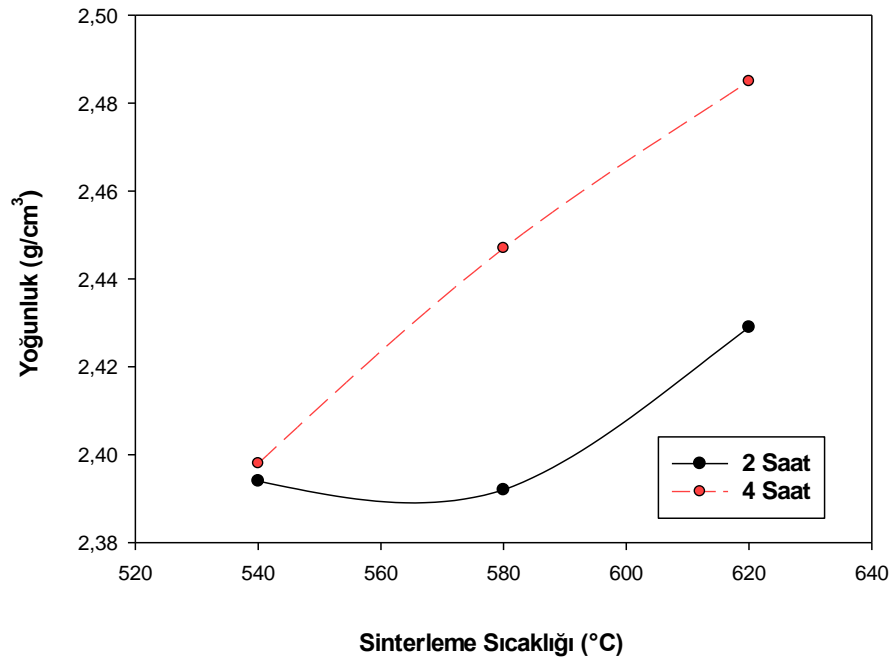
Malzeme	B <sub>4</sub> C Takviye Oranı (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Ham Yoğunluk (S.Ö.) (g/cm <sup>3</sup> )	Gerçek Yoğunluk (S.S.) (g/cm <sup>3</sup> )	Teorik Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Deneysel Yoğunluk (%)	Gözeneklilik (Porozite) (%)			
Al	0	540	2	2,450	2,505	2,700	92,781	7,219			
			4	2,543	2,610		96,683	3,317			
		580	2	2,503	2,598		96,232	3,768			
			4	2,506	2,636		97,616	2,384			
		620	2	2,532	2,636		97,621	2,379			
			4	2,533	2,647		98,040	1,960			
		Al - B <sub>4</sub> C	8	540	2		2,381	2,392	2,686	89,054	10,946
					4		2,366	2,393		89,092	10,908
				580	2		2,355	2,425		90,295	9,705
					4		2,382	2,460		91,597	8,403
				620	2		2,354	2,457		91,469	8,531
					4		2,370	2,475		92,157	7,843
16	540			2	2,371	2,394	2,671	89,617		10,383	
				4	2,382	2,398		89,767		10,233	
	580			2	2,352	2,392		89,567		10,433	
				4	2,360	2,447		91,626		8,374	
	620			2	2,316	2,429		90,927		9,073	
				4	2,410	2,485		93,036		6,964	
24	540		2	2,352	2,373	2,657	89,299	10,701			
			4	2,392	2,395		90,132	9,868			
	580		2	2,344	2,347		88,345	11,655			
			4	2,416	2,435		91,632	8,368			
	620		2	2,399	2,435		91,657	8,343			
			4	2,347	2,393		90,077	9,923			

B<sub>4</sub>C takviyeli numuneler için yoğunluk ölçüm sonuçlarına bakıldığında, artan sinterleme sıcaklığı ve süresiyle numunelerin yoğunluk değerlerinde artış olduğu, gözeneklilik oranlarında ise azalma olduğu görülmektedir. Bu durum SiC için de önceden bahsedildiği gibi, ergime sıcaklığına yaklaşılacak sıcaklıklarda atomların bağ koparma enerjilerinin artması ve böylece Al taneleri arasında difüzyonun artmasına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Artan B<sub>4</sub>C takviye oranlarında ise SiC' ün tersine, B<sub>4</sub>C' ün yoğunluğunun Al' un yoğunluğundan az olması sebebiyle yoğunluk değerlerinde genel bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu durumun artan takviye oranına bağlı olarak da oluştuğu, artan takviye oranı ile sıkıştırılabilirliğin ve bağlanmanın zayıfladığı, böylece gözenekliliğin arttığı yorumu yapılmıştır. Sonuç olarak, sinterleme sıcaklığı ve süresinin artmasıyla gözenekliliğin azaldığı, yoğunluğun arttığı ve hesaplanan teorik yoğunluk değerlerine yaklaşıldığı belirlenmiştir. Şekil 6.29-31'de sırasıyla %8, %16, %24 oranlarında B<sub>4</sub>C takviyeli Al numunelerine ait yoğunlukların sinterleme sıcaklığına bağlı değişimleri görülmektedir. Kumdalı, Karaman ve Kevenlik tarafından yapılan çalışmalarda da bu sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir (Kumdalı, 2008; Karaman, 2011; Kevenlik, 2013).

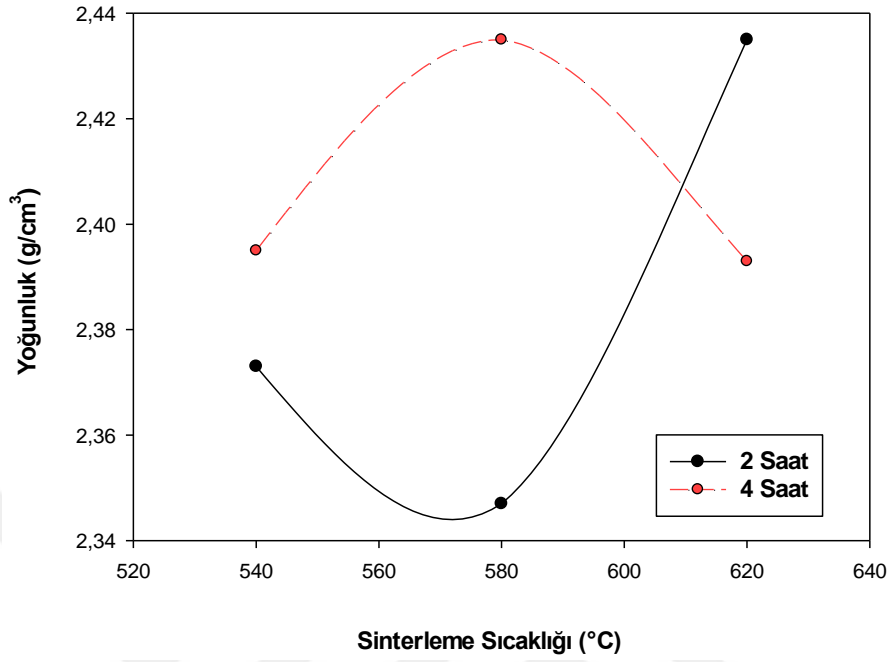
Gözeneklilik değerlerine bakıldığında, en az gözenekliliğin %1,960 ile saf Al numunelerinde 620°C'de 4 saat gerçekleştirilen sinterleme sonucu elde edildiği, en yüksek gözenekliliğin ise %11,655 ile %24 B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit numunelerinde 580°C'de 2 saat gerçekleştirilen sinterleme sonucu elde edildiği görülmektedir. Bunun sebebinin, B<sub>4</sub>C oranının artması ile Al' un yapıda çoğalan B<sub>4</sub>C taneleri etrafından gerçekleşen difüzyonunun güçleşmesi ve buna bağlı olarak bu taneleri bağlamada güçlük çekmesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, yapıdaki takviye tanelerin refrakter özellikli olması ve ısıl iletkenliğinin düşük olması sebebiyle artan takviye oranları, sinterleme sırasında ısı iletimini ve dolayısıyla sinterleme mekanizmasını engelleyici etki yaparak difüzyonu azaltmakta ve böylece gözeneklerin küçülmesini ve azalmasını engellemektedir. Artan takviye oranı ile gözenekliliğin artmasının bir diğer sebebi ise, sertliği yüksek ve dolayısıyla sıkıştırılabilirliği düşük olan takviye tanelerinin yapıdaki miktarının artmasıyla kompozitin genel sıkıştırılabilirliğinin azalmasından ileri gelmektedir. Sonuç olarak, artan sinterleme sıcaklığı ve süresi ile gözenekliliğin azaldığı, artan B<sub>4</sub>C takviye oranlarıyla ise arttığı belirlenmiştir. Dolayısıyla artan takviye oranı ile gözenekliliğin artmasına bağlı olarak yoğunluğun azaldığı belirlenmiştir. Şekil 6.32-34'de sırasıyla %8, %16, %24 oranlarında B<sub>4</sub>C takviyeli Al numunelerine ait gözenekliliklerin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimleri görülmektedir. Şekil 6.35. ve 6.36.'da ise sırasıyla 2 ve 4 saat sinterlenen B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde yoğunluğun takviye oranına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Kalaycıoğlu, Karaman, Purohit vd. ve Kevenlik tarafından yapılan çalışmalarda da bu sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir (Kalaycıoğlu, 2010; Karaman, 2011; Purohit vd., 2012; Kevenlik, 2013).



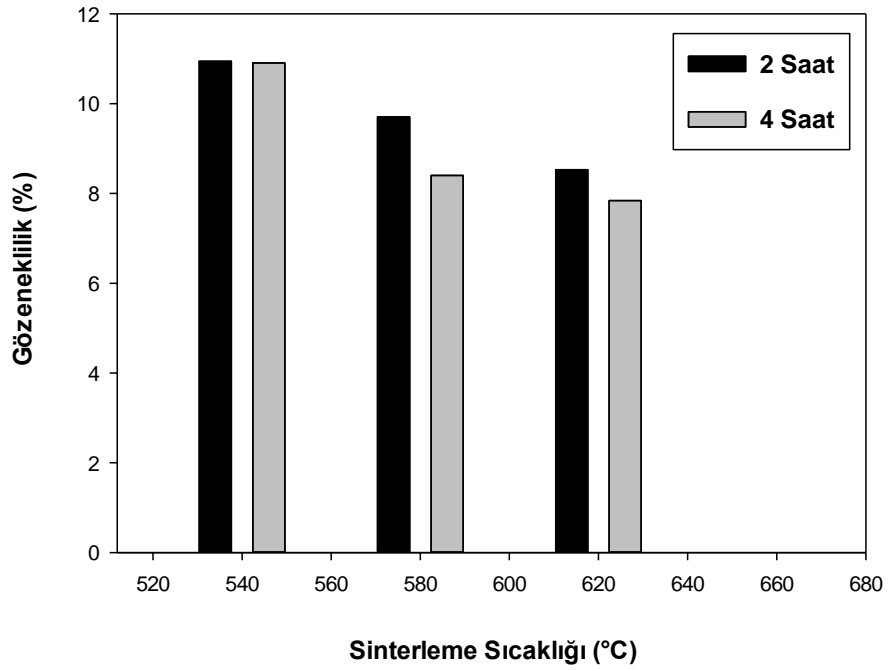
Şekil 6.29. %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 6.30. %16 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.

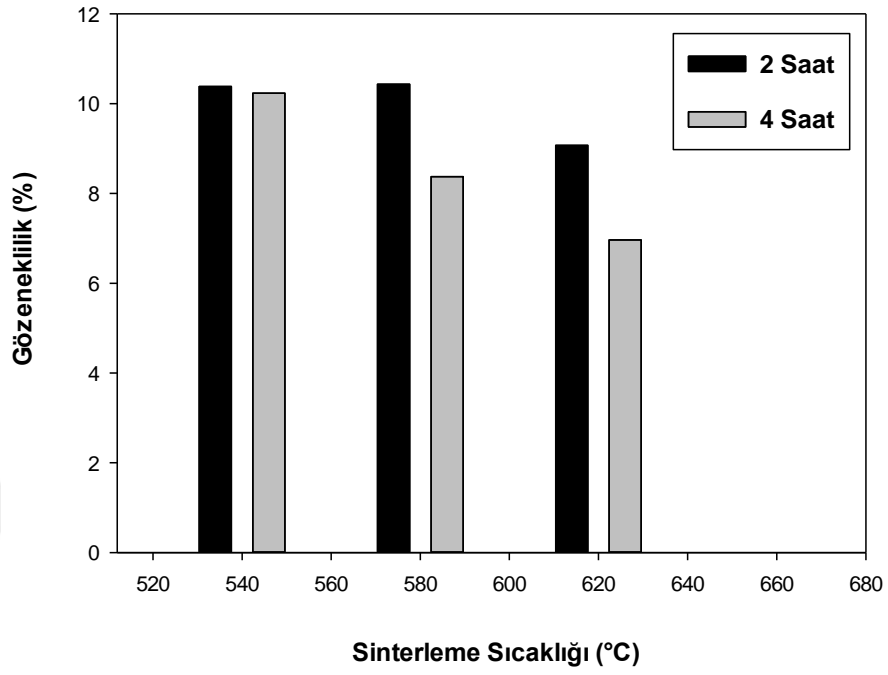


Şekil 6.31. %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde yoğunluğun sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.

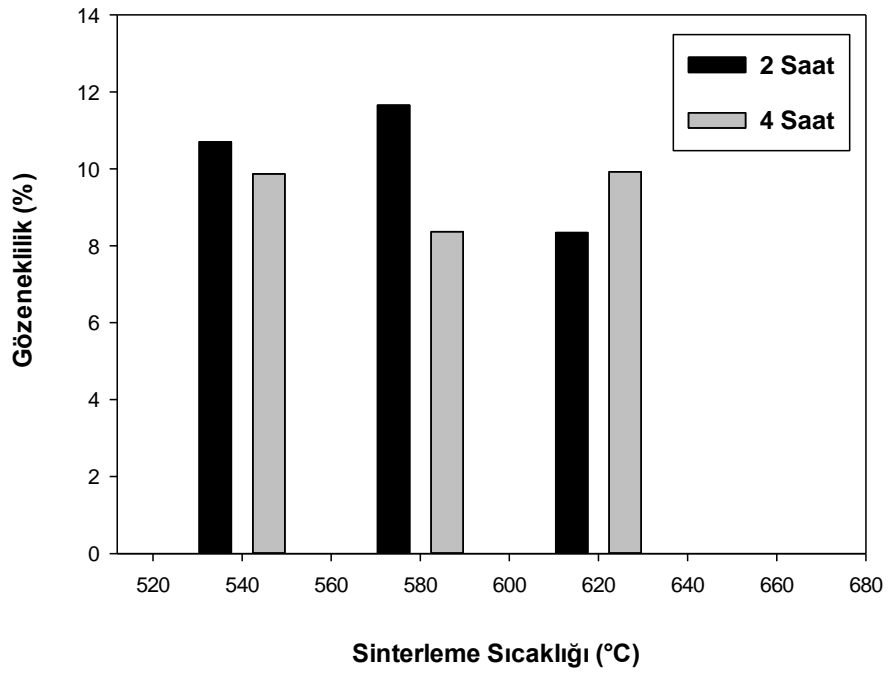


Şekil 6.32. %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.

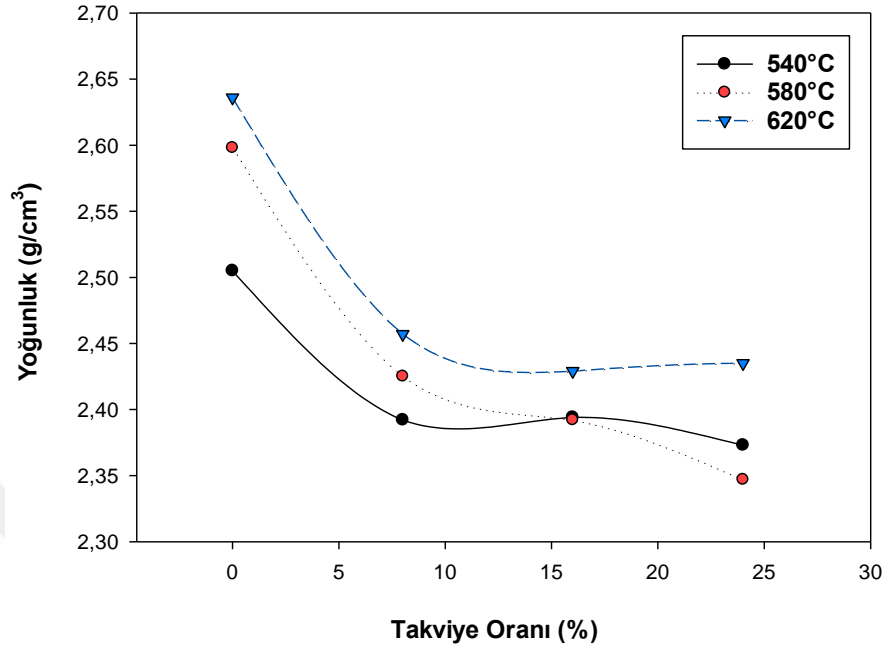




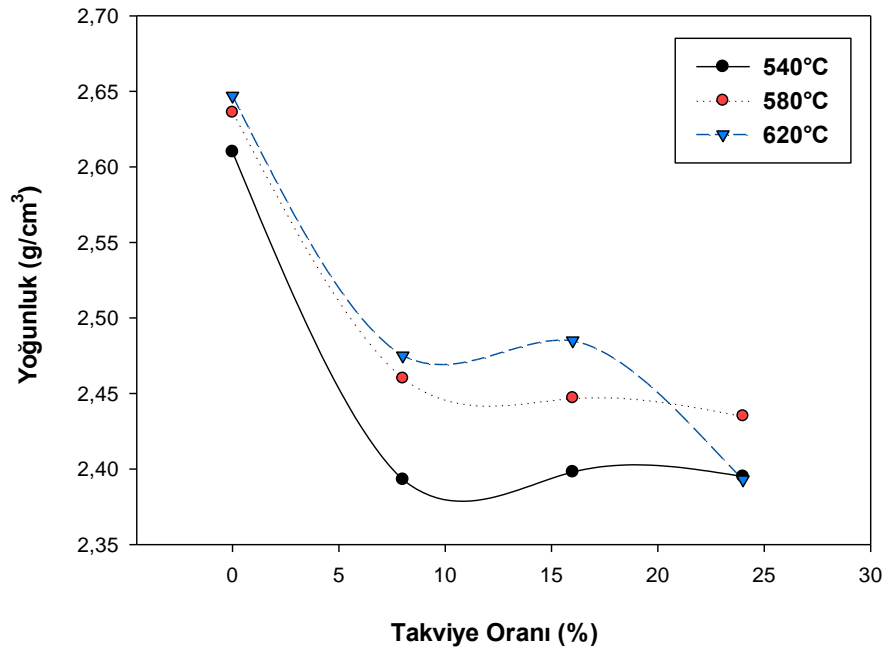
Şekil 6.33. %16 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 6.34. %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde gözenekliliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 6.35. 2 saat sinterlenen B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde yoğunluğun takviye oranına bağlı değişimi.



Şekil 6.36. 4 saat sinterlenen B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde yoğunluğun takviye oranına bağlı değişimi.

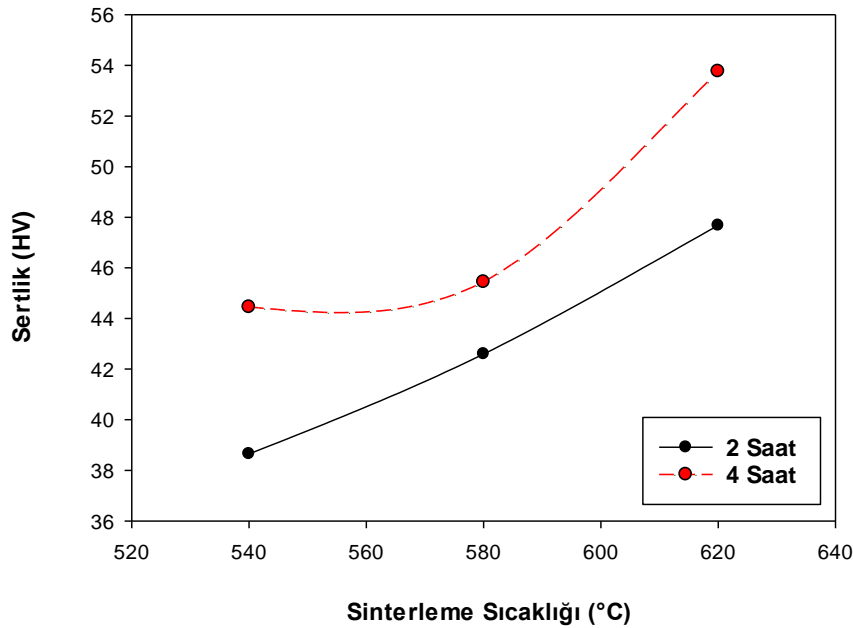
#### 6.4.2. Sertlik ölçüm sonuçları ve değerlendirilmesi

Deneyleer gerçekleştirilirken her farklı üretim grubu için üç adet numune üretilmiş olup, yoğunluk ölçümü yapılırken bu üç numunenin yoğunluk değerleri ölçülmüş ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak o gruba ait ortalama yoğunluk değeri elde edilmiştir. Bu yoğunluk ölçümlerine bakılarak her gruptaki üç numuneden optimum değerlere sahip olan belirlenerek sertlik ölçümü ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirmek üzere seçilmiş ve gerekli numune hazırlık işlemlerine tabi tutulmuştur. Hazırlık işlemlerinin ardından numunelerin sertlik ölçümleri Metkon Duroline-M marka mikrosertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Optimum sonuçlar elde etmek amacıyla, her numunenin üç farklı noktasından ölçüm alınarak elde edilen değerlerin ortalaması hesaplanmış ve o numuneye ait sertlik değeri olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen sertlik ölçümlerinin sonuçları, SiC takviyeli Al matrisli kompozit numuneleri için Çizelge 6.5.'de ve B<sub>4</sub>C takviyeli Al matrisli kompozit numuneleri için Çizelge 6.6.'da verilmiştir.

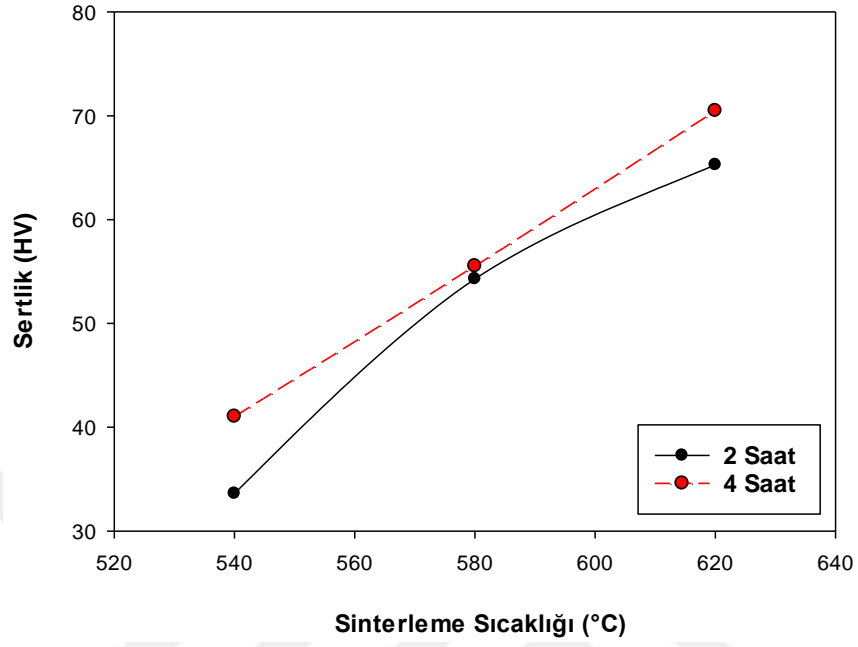
Çizelge 6.5. SiC takviyeli Al matrisli kompozit numunelerine ait sertlik ölçüm değerleri.

Malzeme	Takviye Oranı (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Sertlik (HV)			Sertlik Ortalaması (HV)
Al	0	540	2	41,120	37,830	37,000	38,650
			4	43,870	45,510	43,960	44,447
		580	2	40,010	43,560	44,210	42,593
			4	45,720	44,770	45,840	45,443
		620	2	46,660	45,610	50,780	47,683
			4	55,630	52,090	53,590	53,770
Al - SiC	8%	540	2	30,970	30,740	39,150	33,620
			4	39,510	42,800	40,790	41,033
		580	2	45,770	67,790	49,280	54,280
			4	53,350	60,920	52,330	55,533
		620	2	67,780	65,790	62,260	65,277
			4	62,110	71,350	78,010	70,490
	16%	540	2	44,100	27,170	33,150	34,807
			4	38,780	42,240	44,300	41,773
		580	2	47,420	46,810	57,630	50,620
			4	69,080	53,990	47,780	56,950
		620	2	55,430	62,500	74,180	64,037
			4	53,800	71,110	70,950	65,287
	24%	540	2	40,930	46,790	43,530	43,750
			4	50,410	41,860	40,200	44,157
		580	2	64,300	54,050	74,160	64,170
			4	55,650	94,890	76,530	75,690
		620	2	60,650	109,920	104,780	91,783
			4	108,270	98,770	68,430	91,823

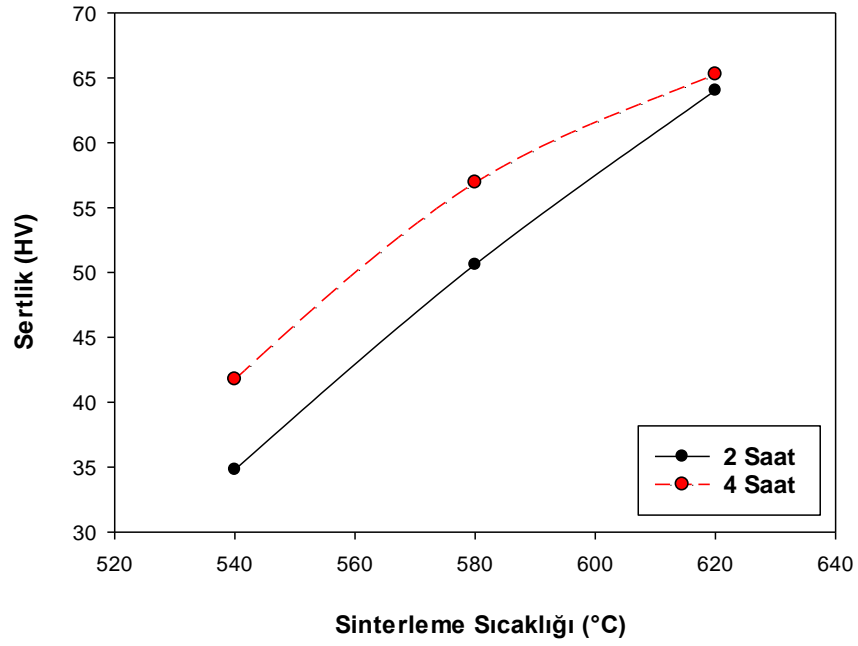
SiC takviyeli kompozit numuneleri için sertlik ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, artan SiC takviye oranı, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresi ile numunelerin sertliklerinde artış olduğu belirlenmiştir. Bu durumun, artan SiC oranlarında sertliği matrise göre çok daha yüksek olan SiC' ün yapıdaki miktarının artmasına bağlı olarak ortaya çıktığı söylenebilmektedir. Daha önce yapılan yoğunluk ölçüm değerlendirmelerinde, artan takviye oranlarına bağlı olarak yapıdaki gözenekliliğin arttığı belirlenmiştir. Fakat burada artan takviye oranının, yapıdaki gözenekliliği artırmasına rağmen, sertliğe daha çok etki ederek aynı anda sertliği de artırdığı değerlendirilmiştir. Artan sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresi ile sertlik artışının ise, sıcaklığın artmasına bağlı olarak difüzyonun artması ve taneler arası boyunlaşmanın kolaylaşarak fazlalaşarak bağlanmanın artması, taneler arasında ve tane sınırlarında yoğun olarak bulunan gözeneklerin küçülmesi, böylece daha mukavim ve yoğunluğu teorik yoğunluğa daha yakın bir yapının elde edilmesi sonucu olduğu düşünülmektedir. Şekil 6.37-40'ta sırasıyla saf Al ve %8, %16, %24 oranlarında SiC takviyeli Al numunelerine ait sertliklerin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimleri görülmektedir. Şekil 6.41. ve 6.42.'de ise sırasıyla 2 ve 4 saat sinterlenen SiC takviyeli numunelerde sertliğin takviye oranına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Bu sonuçlar Keçeli, Kevenlik, Işık, Venkatesh ve Harish ve Selvakumar vd. tarafından da benzer şekilde elde edilmiştir (Keçeli, 2007; Kevenlik, 2013; Işık, 2014; Venkatesh ve Harish, 2015; Selvakumar vd., 2017).



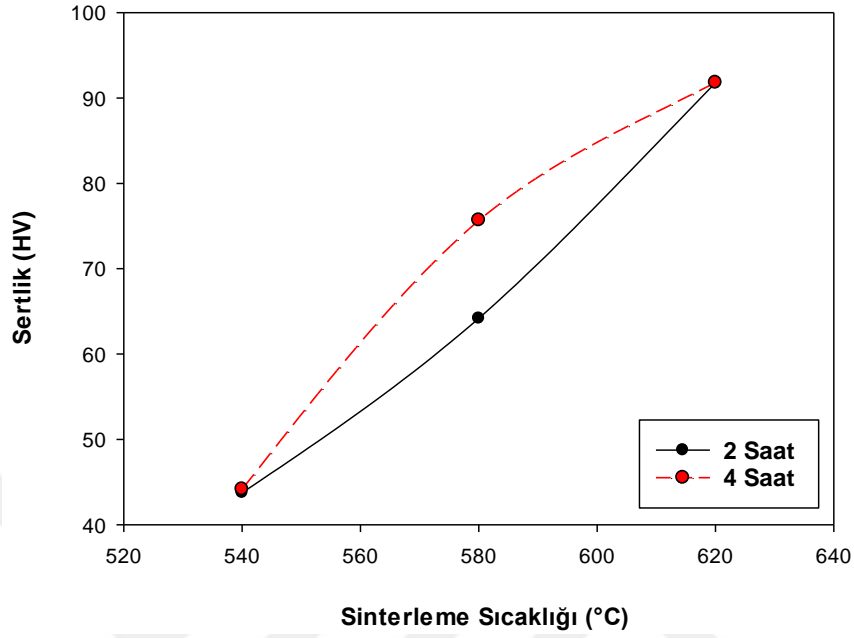
Şekil 6.37. Saf Al numunelerinde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



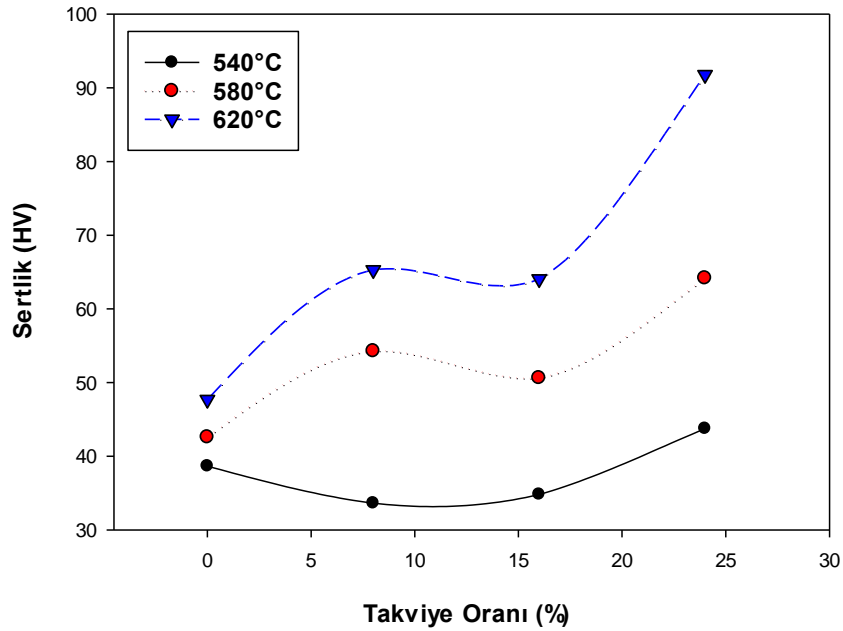
Şekil 6.38. %8 SiC takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



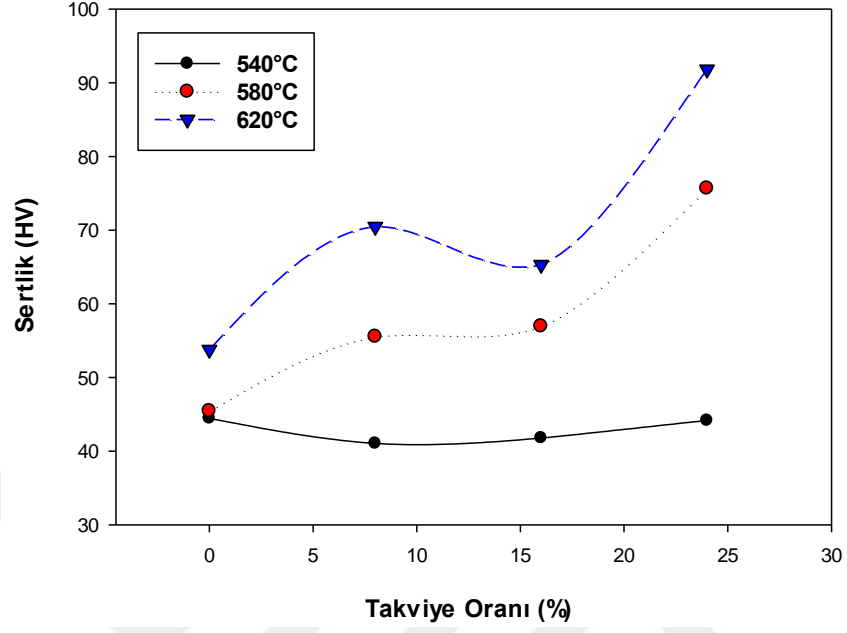
Şekil 6.39. %16 SiC takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 6.40. %24 SiC takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 6.41. 2 saat sinterlenen SiC takviyeli numunelerde sertliğin takviye oranına bağlı değişimi.



Şekil 6.42. 4 saat sinterlenen SiC takviyeli numunelerde sertliğin takviye oranına bağlı değişimi.

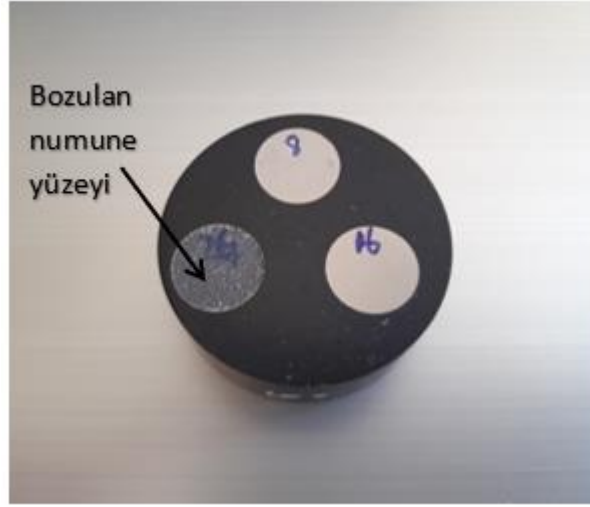


**Çizelge 6.6.** B<sub>4</sub>C takviyeli Al matrisli kompozit numunelerine ait sertlik ölçüm değerleri.

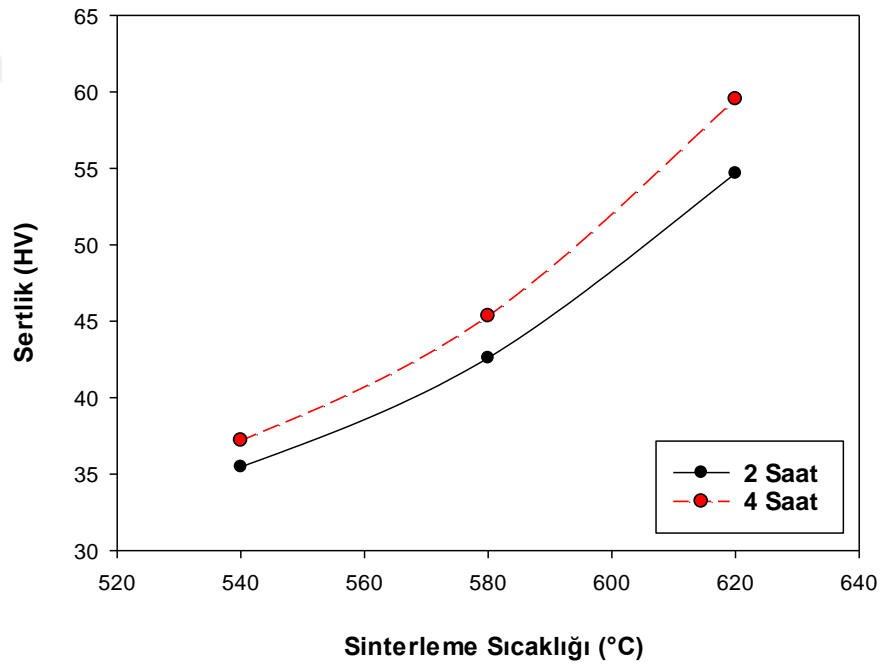
Malzeme	Takviye Oranı (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Süresi (saat)	Sertlik (HV)			Sertlik Ortalaması (HV)
Al	0	540	2	41,120	37,830	37,000	38,650
			4	43,870	45,510	43,960	44,447
		580	2	40,010	43,560	44,210	42,593
			4	45,720	44,770	45,840	45,443
		620	2	46,660	45,610	50,780	47,683
			4	55,630	52,090	53,590	53,770
Al - B <sub>4</sub> C	8%	540	2	39,090	34,780	32,550	35,473
			4	34,690	35,720	41,200	37,203
		580	2	41,380	40,540	45,860	42,593
			4	50,870	45,010	40,120	45,333
		620	2	47,640	57,850	58,530	54,673
			4	58,040	55,220	65,350	59,537
	16%	540	2	19,440	23,550	18,310	20,433
			4	26,090	26,790	27,950	26,943
		580	2	20,540	23,810	30,200	24,850
			4	28,180	28,070	36,320	30,857
		620	2	44,790	26,210	30,700	33,900
			4	53,030	51,360	47,340	50,577
	24%	540	2	30,160	24,270	32,510	28,980
			4	55,240			55,240
		580	2	34,910	37,950	38,880	37,247
			4	26,160	18,630	25,900	23,563
		620	2	21,310			21,310
			4	30,060	29,490		29,775

B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit numuneleri için sertlik ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, artan sinterleme sıcaklığı ve süresiyle sertliğin arttığı, fakat artan B<sub>4</sub>C oranlarında, %8 takviye oranının üzerindeki %16 ve %24 takviye oranlarında, numunelerin sertliklerinde düşüş olduğu belirlenmiştir. Hatta sertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri için gerçekleştirilen numune hazırlık işlemleri sırasında, %24 oranında B<sub>4</sub>C takviyeli kompozit numunelerinin bazılarında zımparalama esnasında yüzeyden kopmalar ve dağılmalar meydana gelmiştir. Dolayısıyla bu numunelerden geçerli sertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri elde edilememiştir. Bu nedenle, %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerden dağılan numunelere ait olan bazı sertlik ölçüm değerleri Çizelge 6.6.'da verilememiştir. Bu numunelerden bir tanesi Şekil 6.43'de verilmiştir. Şekil 6.44-46'da sırasıyla %8, %16, %24 oranlarında B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde sertliğin sıcaklığa bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 6.47. ve 6.48.'de ise sırasıyla 2 ve 4 saat sinterlenen B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde sertliğin takviye oranına bağlı olarak değişimi görülmektedir.

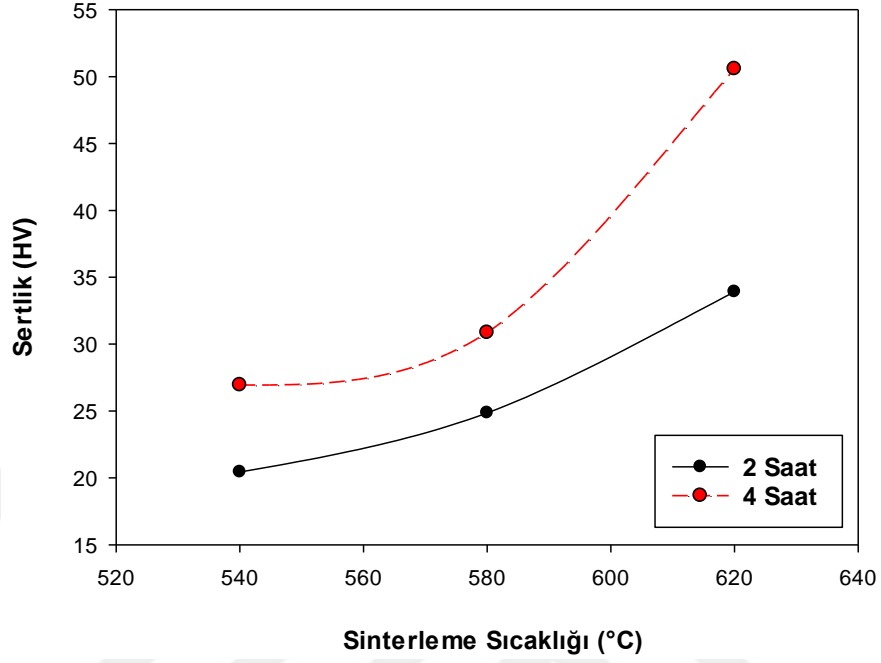
Bu numuneler saf Al numuneleri ile kıyaslandığında bile sertliklerinde belirgin bir artış görülmediği, sadece 620°C'de 2 ve 4 saat sinterlenen %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde daha yüksek sertlik değerleri elde edildiği, %16 ve %24 takviyeli olanlarda ise saf Al'dan bile düşük değerlerin elde edildiği belirlenmiştir. Bu durumun, artan B<sub>4</sub>C oranı ile yapıda sertliği matrise göre oldukça yüksek olan B<sub>4</sub>C' ün miktarının artmasına ve böylece tozların sıkıştırılabilirliğinin azalmasına bağlı olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir. Presleme basıncının bu numuneler için yetersiz kalması sebebiyle bu numunelerde kompaktlanmanın etkin bir şekilde gerçekleşmediği ve basıncın artırılması ile bu durumun giderilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca refrakter özellikte olan ve ısı iletkenliği düşük olan B<sub>4</sub>C oranı yapıda arttıkça, sinterlemeyi zorlaştırarak Al' un difüzyonunu azaltması ve böylece B<sub>4</sub>C tanelerindeki ıslatmanın azalmasına bağlı olarak bağlanmanın zayıf olması ile de sertliklerde düşüş olduğu düşünülmektedir. Yani artan B<sub>4</sub>C faz içeriğinin taneler arası bağlanma ve reaksiyon kabiliyetinin zayıflamasına sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca B<sub>4</sub>C tanelerinin ortalama boyutunun (6 µm), SiC tanelerin ortalama boyutuna (36 µm) göre çok daha küçük olması ve Al matrisin ortalama boyutundan (40 µm) uzaklaşmasının da bu durum üzerinde etkili olduğu, matris ve takviye tane boyutlarının birbirinden uzaklaşmasının iyi bir karışım elde edilmesine engel olduğu, B<sub>4</sub>C tanelerinin Al tane sınırlarına biriktiği ve böylece bağlanmayı engelleyerek zayıf bir yapı oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Buradan matris ve takviye tane boyutlarının birbirine yakın seçilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır. Bu sonuçlar Kumdalı, Güteryüz vd. ve Ay vd. tarafından da benzer şekilde elde edilmiştir (Kumdalı, 2008; Güteryüz vd., 2012; Ay vd., 2016).



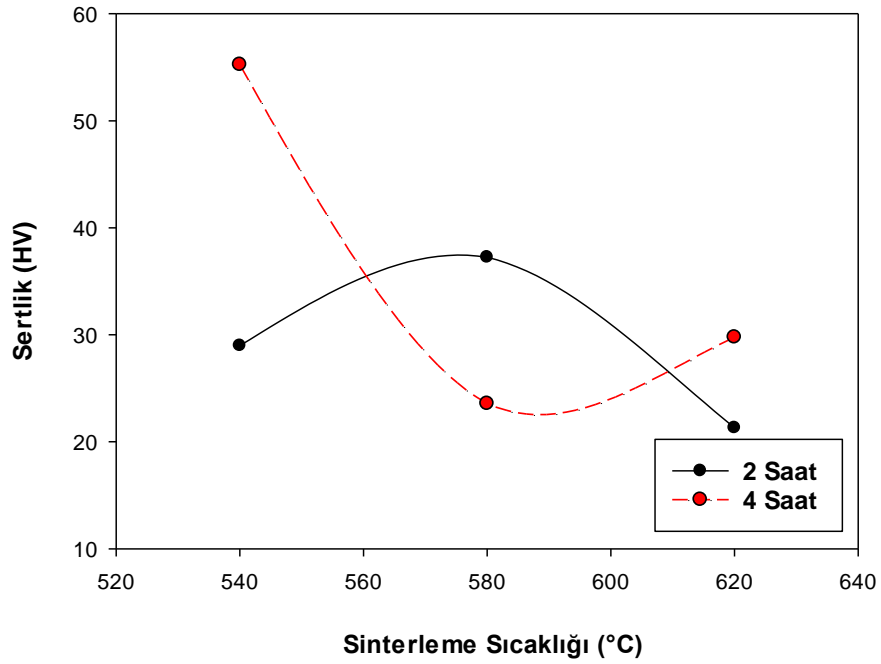
**Şekil 6.43.** Yüzeiden kopma ve dağılmaların meydana geldiği %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerden bir tanesi.



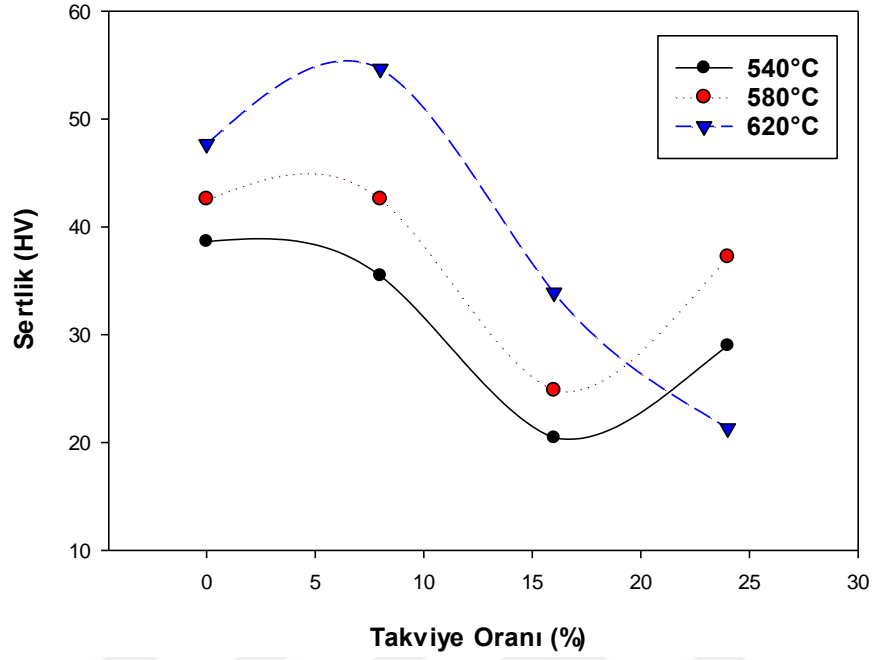
**Şekil 6.44.** %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



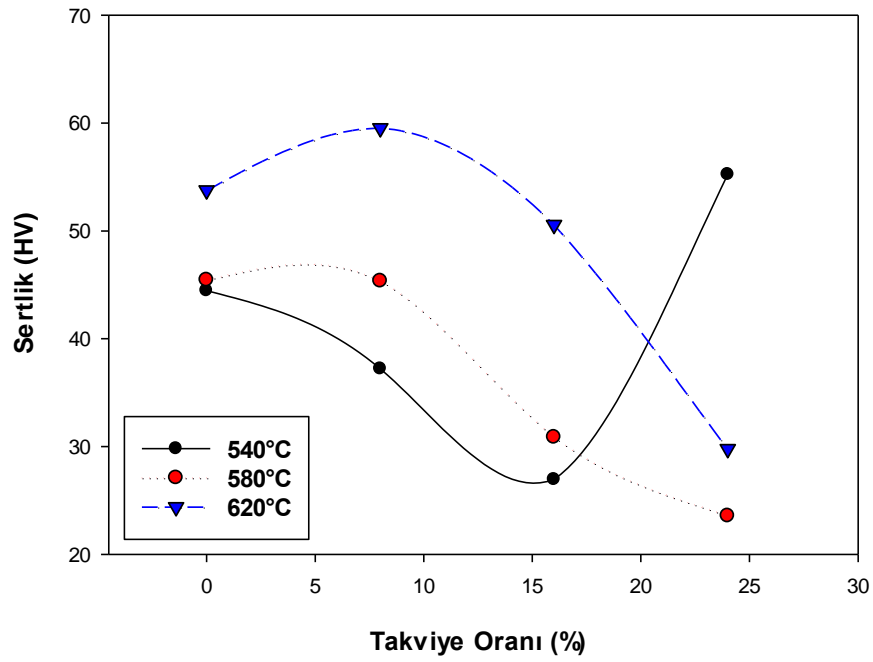
Şekil 6.45. %16 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 6.46. %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde sertliğin sinterleme sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 6.47. 2 saat sinterlenen B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde sertliğin takviye oranına bağlı değişimi.



Şekil 6.48. 4 saat sinterlenen B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde sertliğin takviye oranına bağlı değişimi.

### 6.4.3. Mikroyapı incelemeleri ve değerlendirilmesi

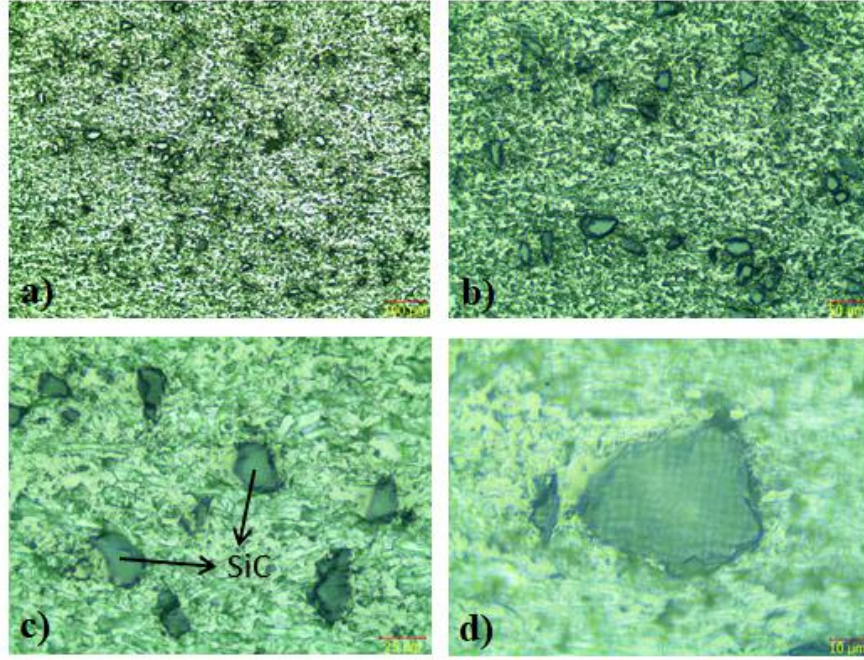
Mikroyapı incelemeleri gerçekleştirmek amacıyla farklı üretim gruplarına ait numunelerden optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı görüntüleri alınmış ve elementel bileşimlerini doğrulamak amacıyla enerji dağılım spektrometresi (EDX) analizleri gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla sadece farklı parametrelerden en yüksek ve en düşük olanların görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.49-56'da sırasıyla 540 ve 620 °C'de 2 ve 4 saat sinterlenen %8 ve %24 oranlarında SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Şekil 6.57-64'de ise sırasıyla 540 ve 620 °C'de 2 ve 4 saat sinterlenen %8 ve %24 oranlarında B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Şekil 6.65-72'de sırasıyla 540 ve 620 °C'de 2 ve 4 saat sinterlenen %8 ve %24 oranlarında SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 6.73-80'de ise sırasıyla 540 ve 620 °C'de 2 ve 4 saat sinterlenen %8 ve %24 oranlarında B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri görülmektedir.

Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde her iki takviye için de karıştırma süresinin yapıda homojen bir dağılım elde edilmesi açısından yeterli geldiği belirlenmiştir. SiC ve B<sub>4</sub>C takviyeleri, takviye edildikleri tüm oranlarda yapıda topaklanmadan, homojen bir şekilde dağılmışlardır. Fakat %24 oranında B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde, sertlik ölçümleri değerlendirmelerinde de önceden bahsedildiği gibi numune hazırlık aşamasında yüzeyden kopmalar ve dağılmalar meydana gelmiştir. Bu numunelerde bu durumun ortaya çıkma sebebi, matris takviye boyutu arasındaki farktan dolayı ince olan B<sub>4</sub>C tanelerinin Al tane sınırlarında birikerek sinterlemeyi zorlaştırdığı, artan takviye oranlarında bu durumun daha da arttığı ve yapıda artan sert fazın sıkıştırılabilirlik ve bağlanmayı zayıflattığı şeklinde yorumlanmıştır. Bu numunelere ait mikroyapı incelemelerinde bu durum, sağlam olan numunelere ait görüntülerle olan farklılıklarından dolayı net bir şekilde görülebilmektedir. Şekil 6.59., Şekil 6.60., Şekil 6.63. ve Şekil 6.64.'de bu numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

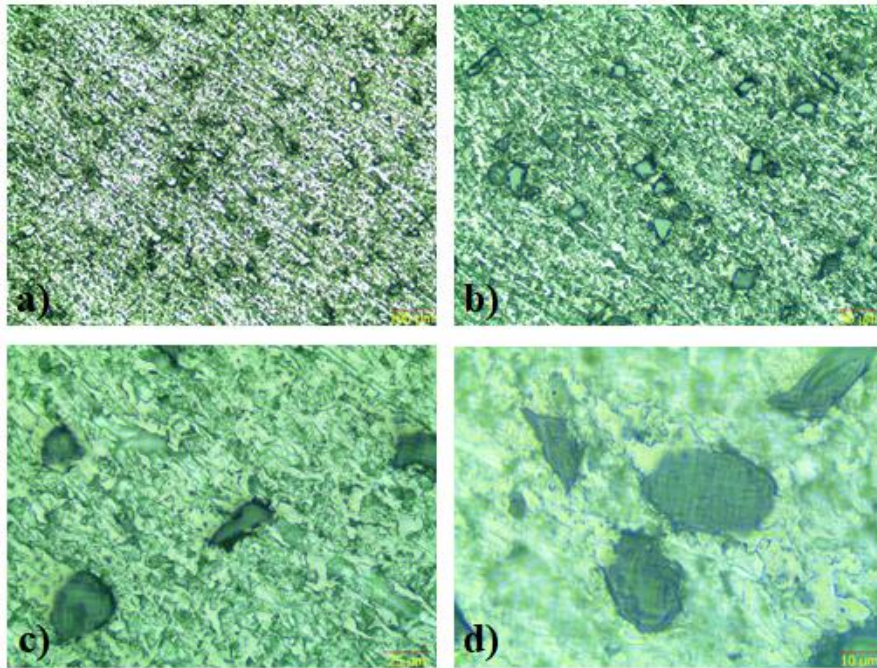
SiC için %8 ve %24 takviye oranlarında takviye edilen numunelere ait mikroyapı görüntülerinden, artan takviye oranlarında SiC' ün yapıdaki artışı net bir şekilde görülebilmektedir. Artan takviye oranı ile yapıdaki gözeneklilik artışı da belirgin bir şekilde fark edilmektedir. Şekil 6.51.' de gösterildiği üzere yapıda gözenek oluşumu genellikle, matris (Al) tane sınırlarında ve matris (Al) - takviye (SiC) arayüzeylerinde meydana gelmiştir. Özellikle gözeneklilik oranı daha fazla olan %24 SiC takviyeli numunelere ait görüntülerde, sinterleme süresindeki artışın gözenekliliği azalttığı net bir şekilde görülebilmektedir.

B<sub>4</sub>C için ise sadece %8 takviyeli numunelerden sağlıklı mikroyapı görüntüleri elde edilebilmiş, %24 takviyeli olanlarda meydana gelen yüzeysel bozukluk nedeniyle elde edilen görüntüler değerlendirmeye alınmamıştır. Bu bozukluk, metalografik numune hazırlama aşamasında gerçekleştirilen zımparalama işlemlerinde numune yüzeylerinden kopma ve dağılımların meydana gelmesi, işlem esnasında yüzeyden kopan B<sub>4</sub>C parçalarının yüzeyi çizmesi ve yüzeyde bu çiziklere ve kopan parçalara ait boşlukların meydana gelmesi ile ortaya çıkmıştır. Bu numunelere ait görüntüler, etkin sonuç alınamasa da örnek olması açısından paylaşılmıştır.



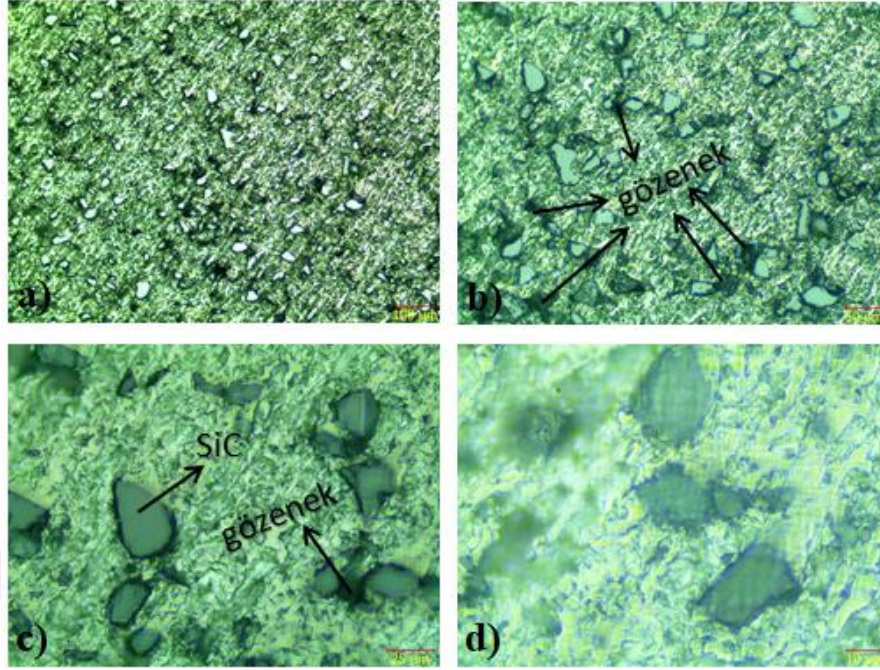


**Şekil 6.49.** 540 °C’de 2 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.

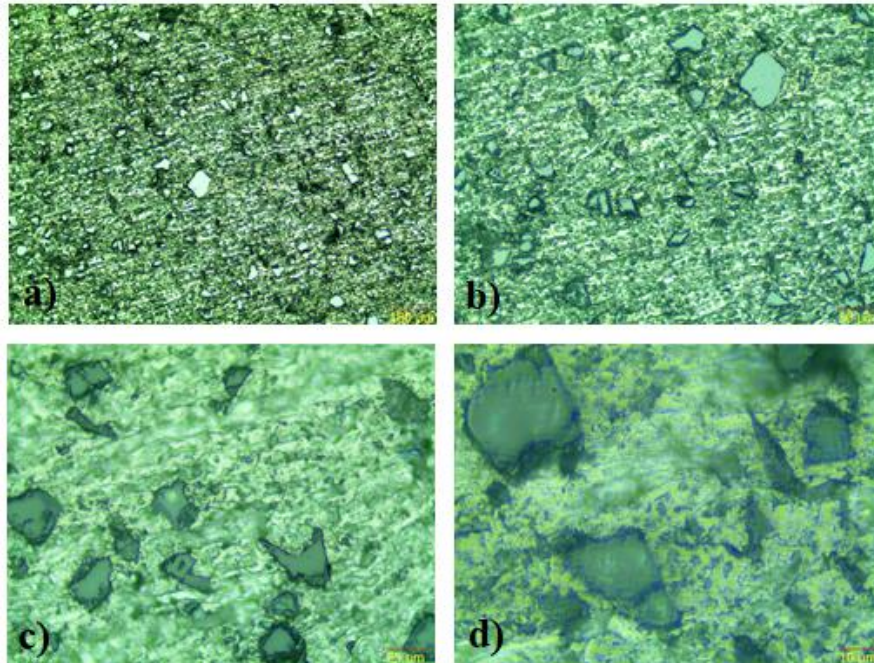


**Şekil 6.50.** 540 °C’de 4 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.



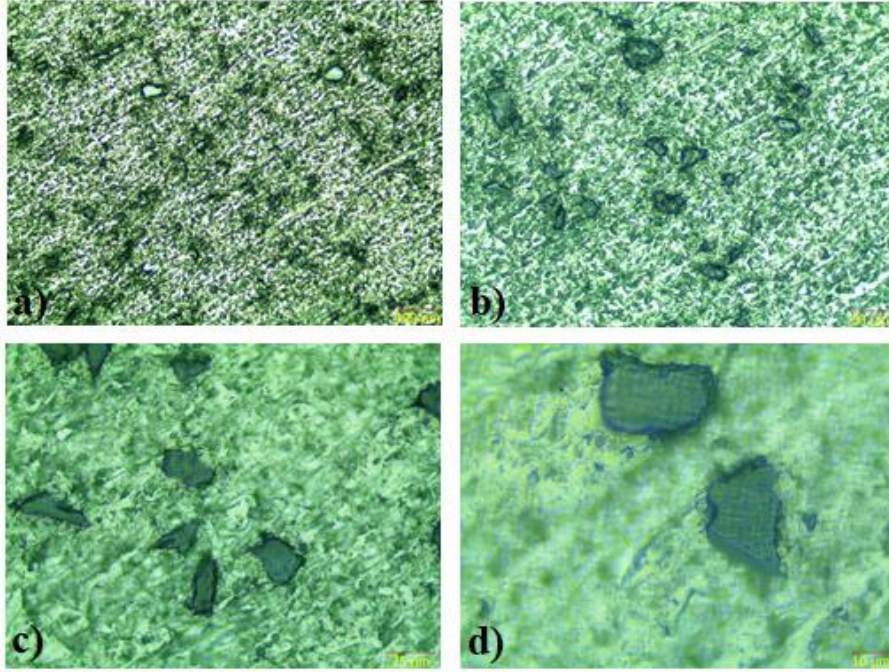


**Şekil 6.51.** 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.

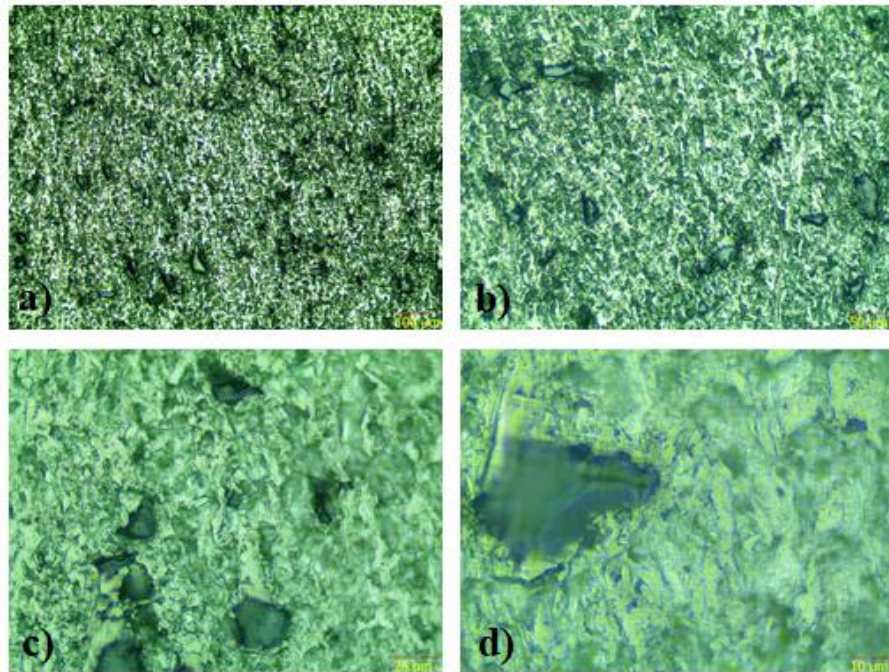


**Şekil 6.52.** 540 °C’de 4 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.



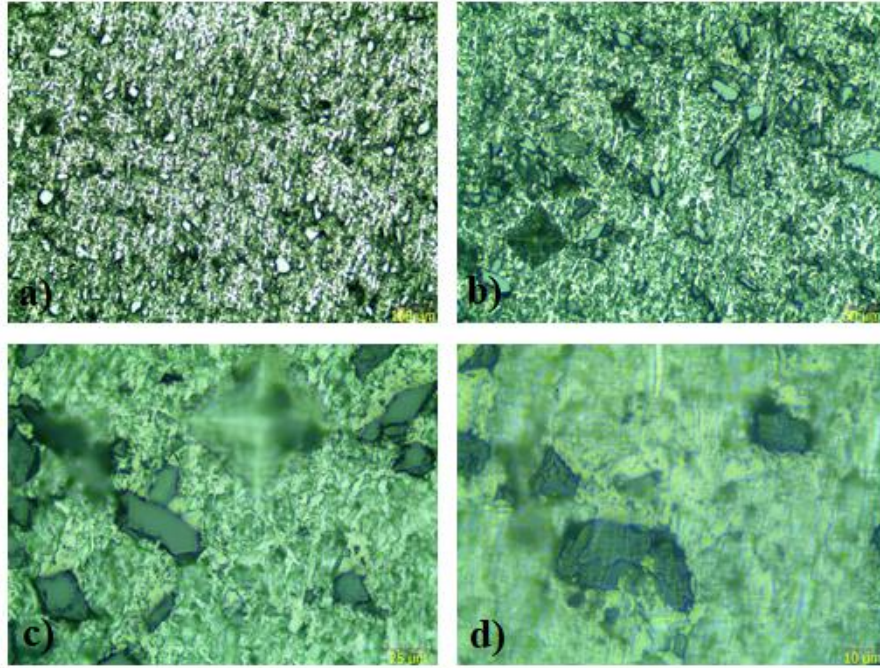


**Şekil 6.53.** 620 °C'de 2 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.

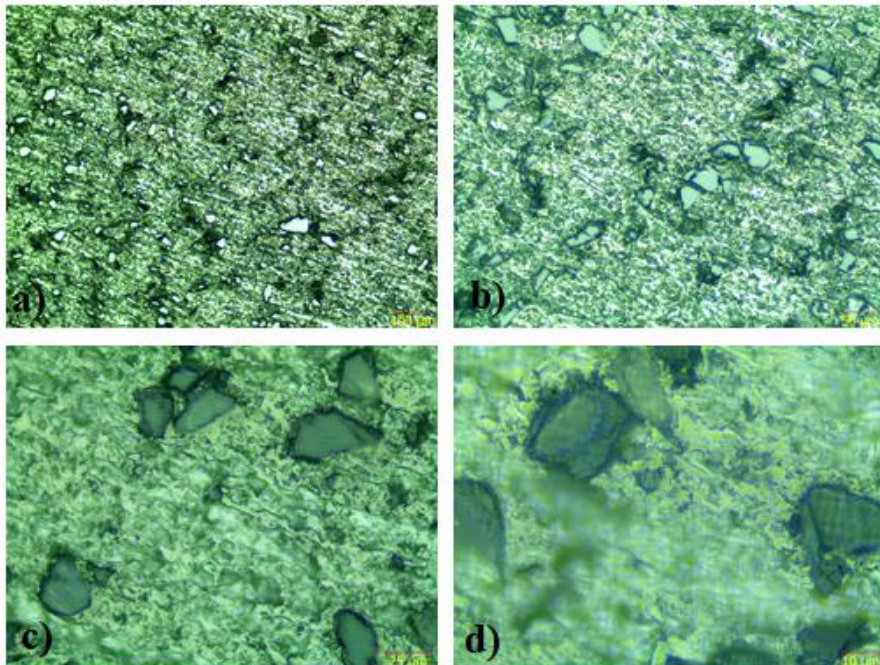


**Şekil 6.54.** 620 °C'de 4 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.



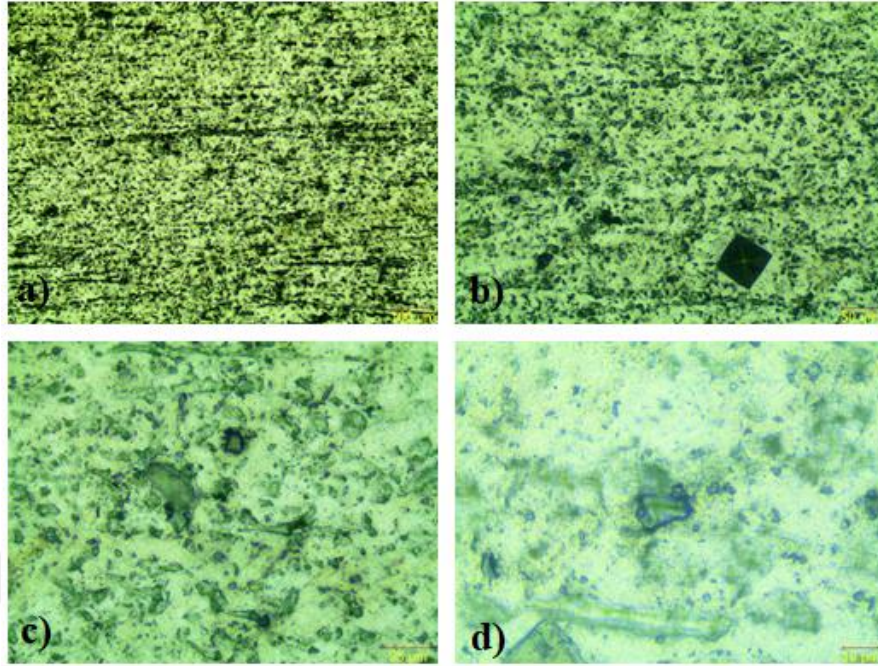


**Şekil 6.55.** 620 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.

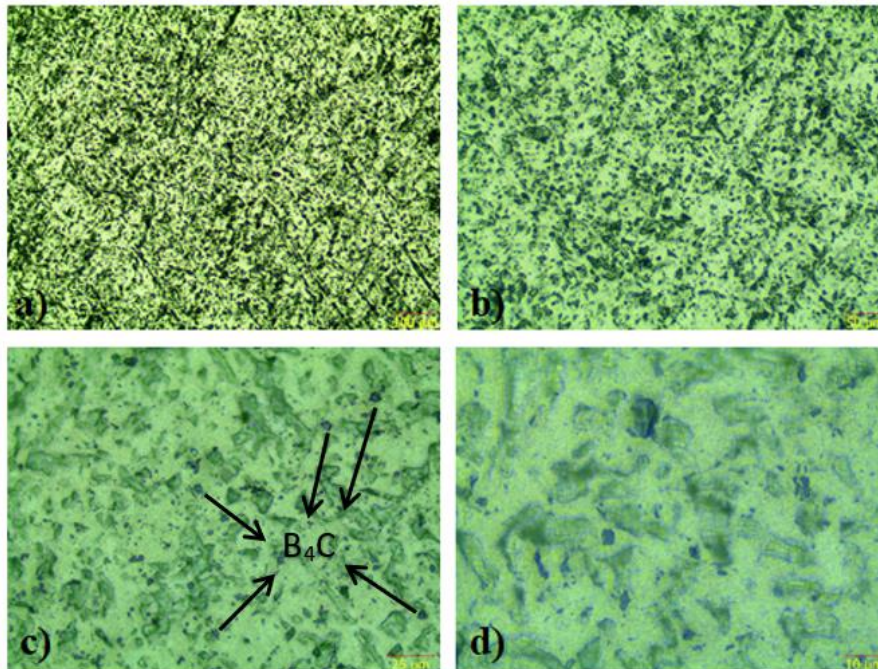


**Şekil 6.56.** 620 °C’de 4 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.



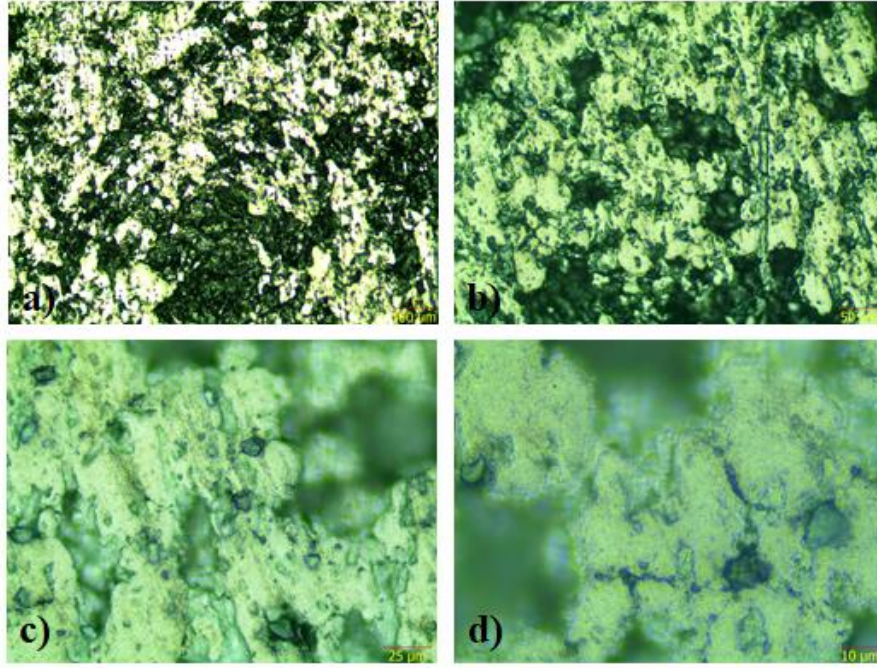


**Şekil 6.57.** 540 °C'de 2 saat sinterlenen %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.

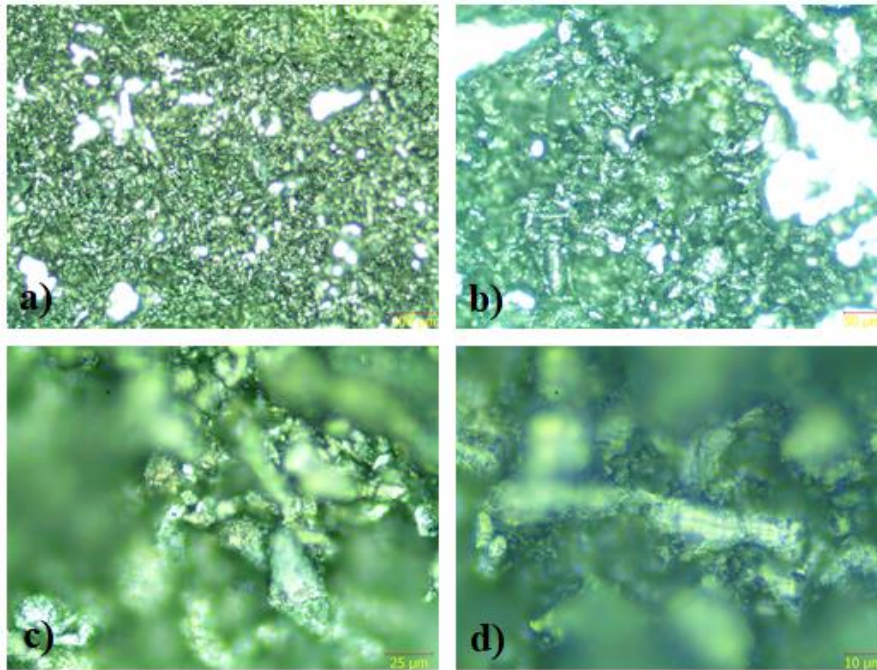


**Şekil 6.58.** 540 °C'de 4 saat sinterlenen %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.



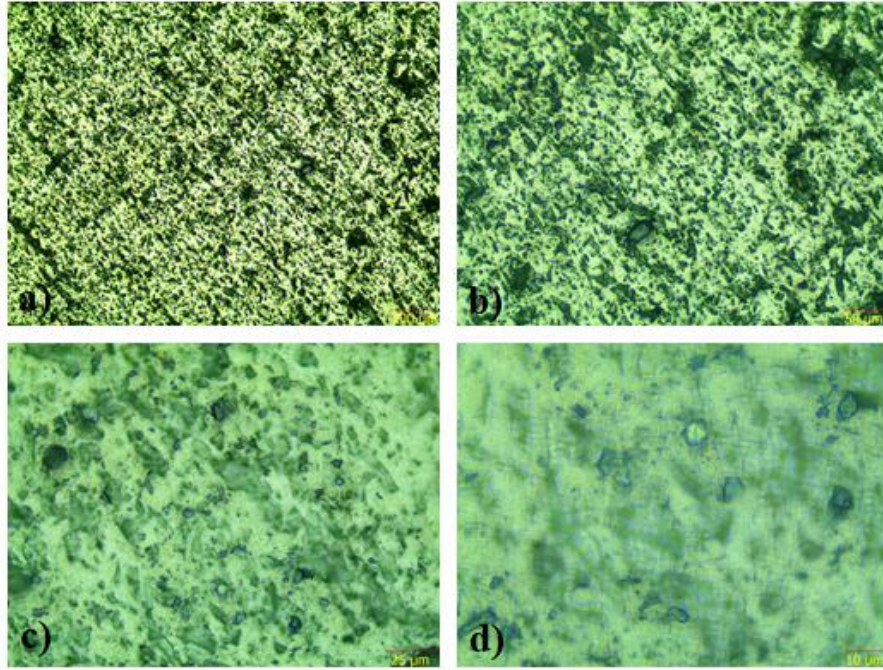


**Şekil 6.59.** 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.

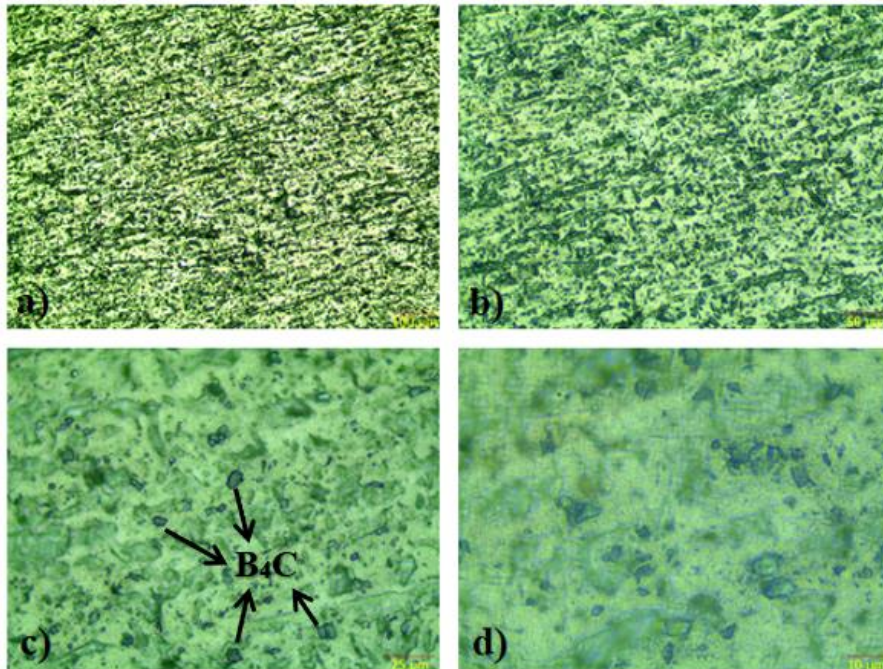


**Şekil 6.60.** 540 °C’de 4 saat sinterlenen %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.



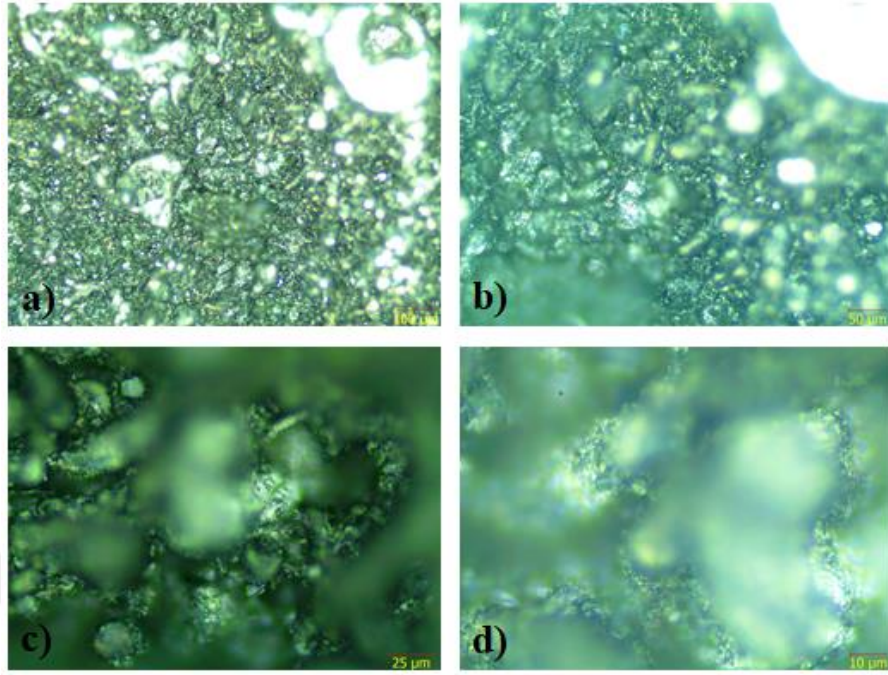


**Şekil 6.61.** 620 °C’de 2 saat sinterlenen %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.

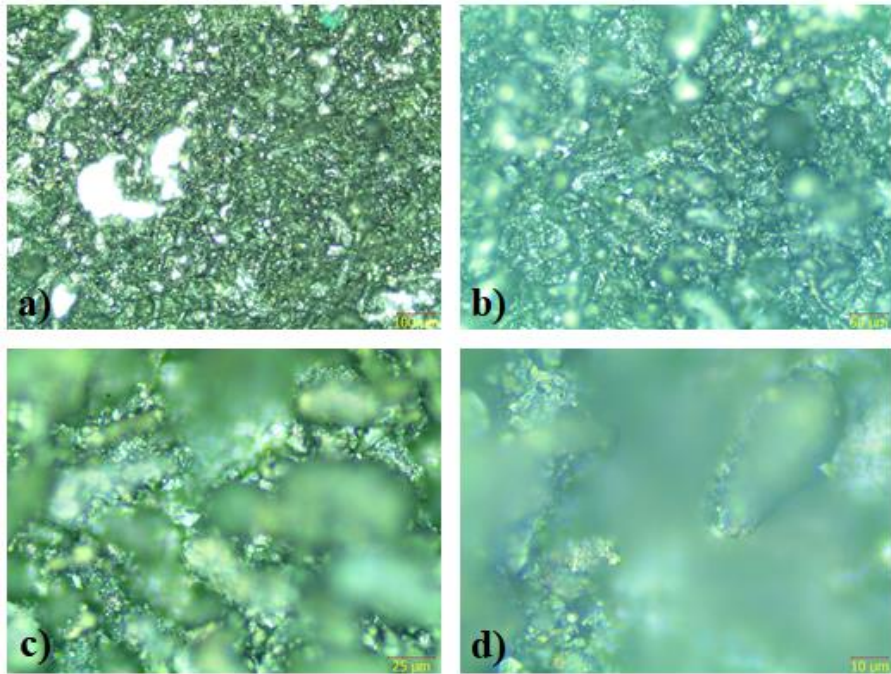


**Şekil 6.62.** 620 °C’de 4 saat sinterlenen %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.

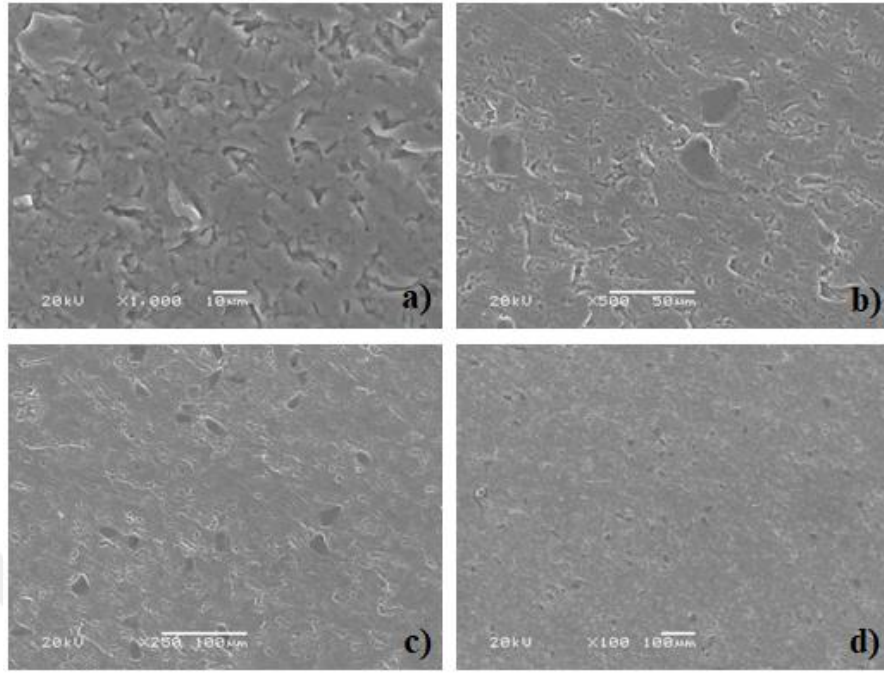




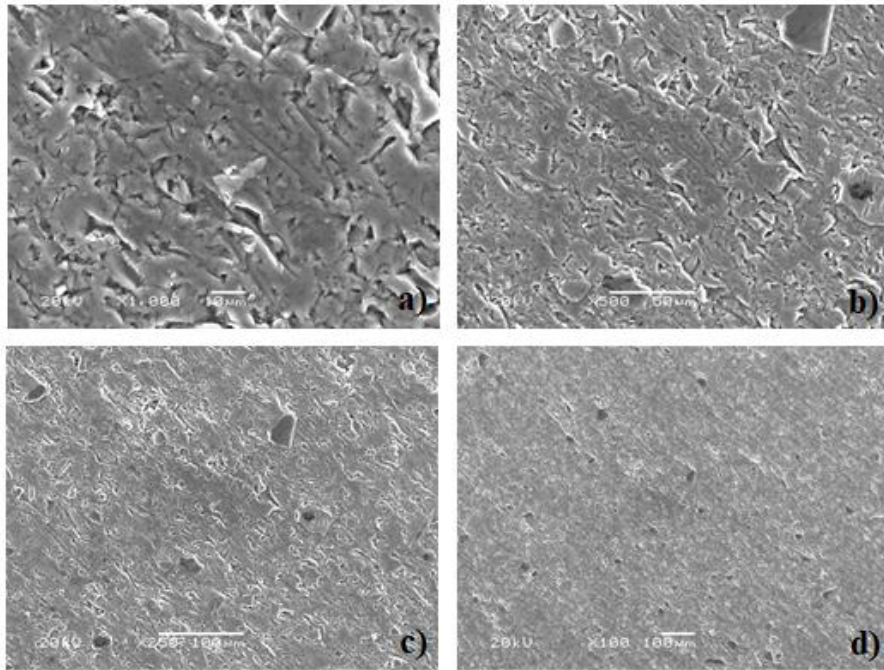
**Şekil 6.63.** 620 °C'de 2 saat sinterlenen %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.



**Şekil 6.64.** 620 °C'de 4 saat sinterlenen %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait optik mikroskop görüntüleri; a) x10 büyütme, b) x20 büyütme, c) x50 büyütme, d) x100 büyütme.

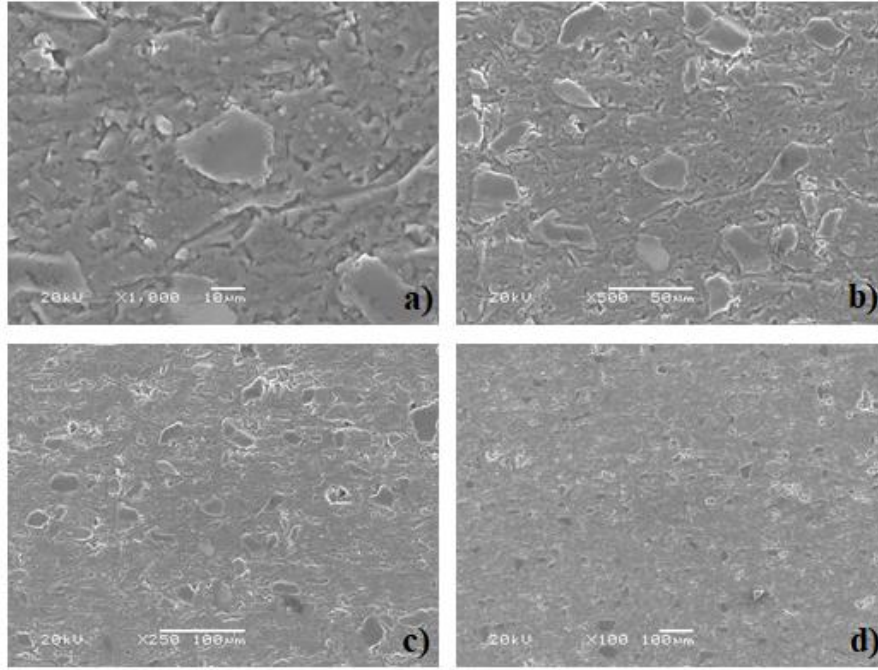


**Şekil 6.65.** 540 °C'de 2 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

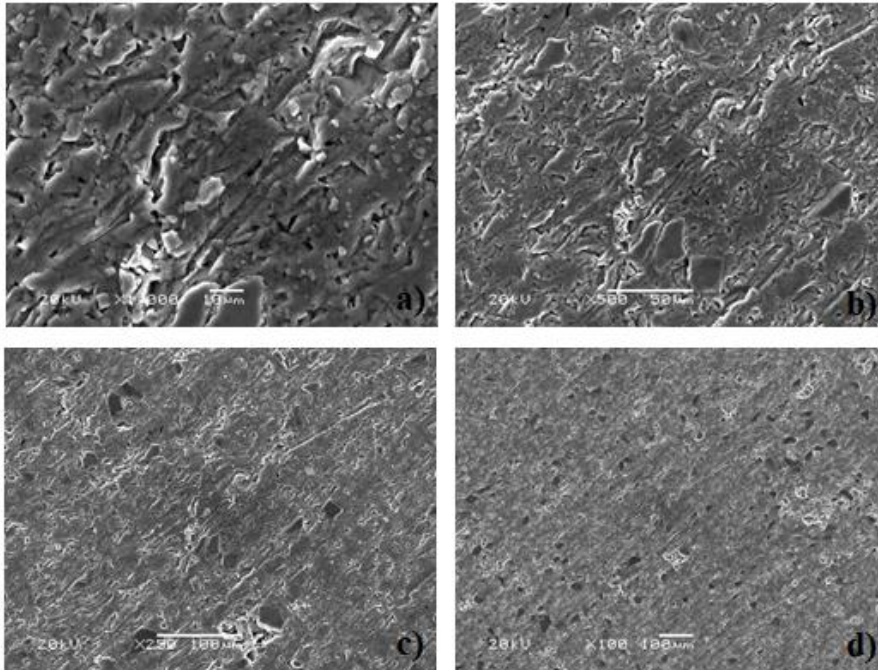


**Şekil 6.66.** 540 °C'de 4 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

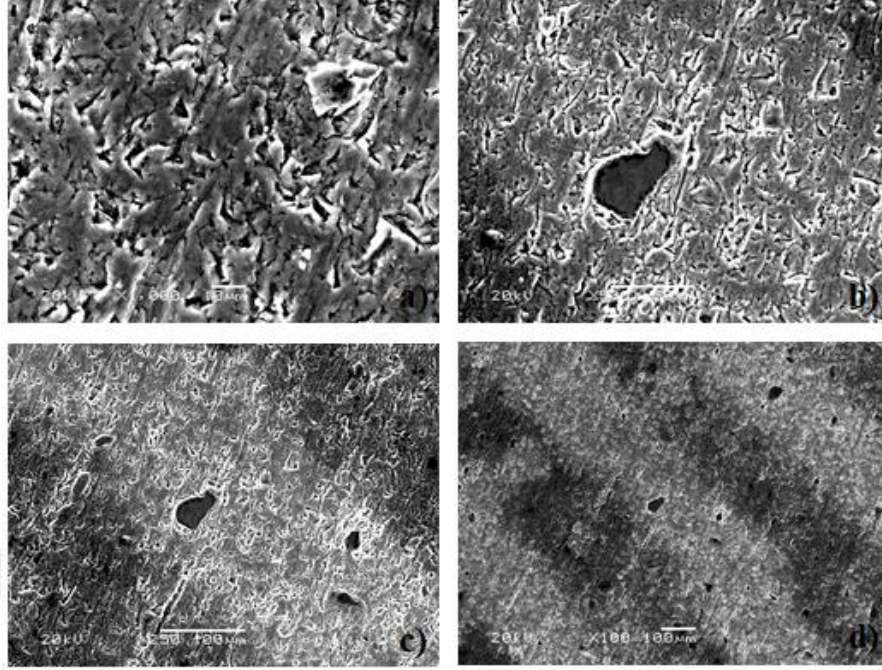




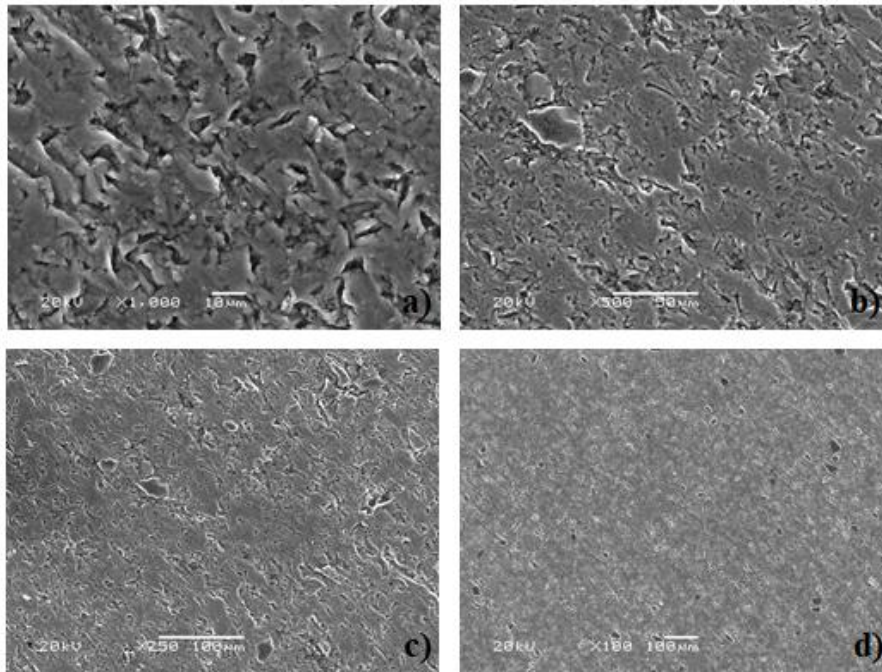
**Şekil 6.67.** 540 °C'de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.



**Şekil 6.68.** 540 °C'de 4 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

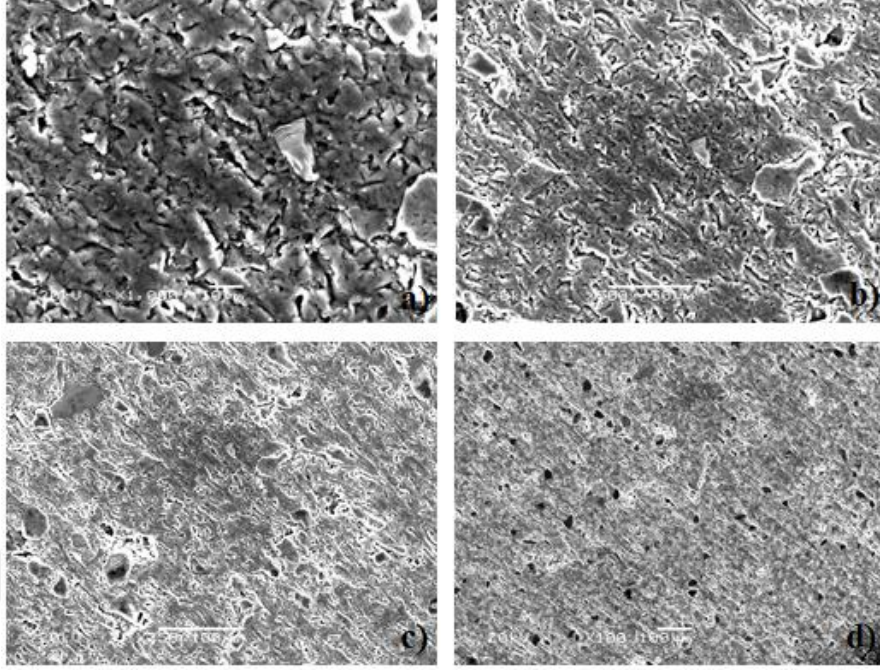


**Şekil 6.69.** 620 °C’de 2 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

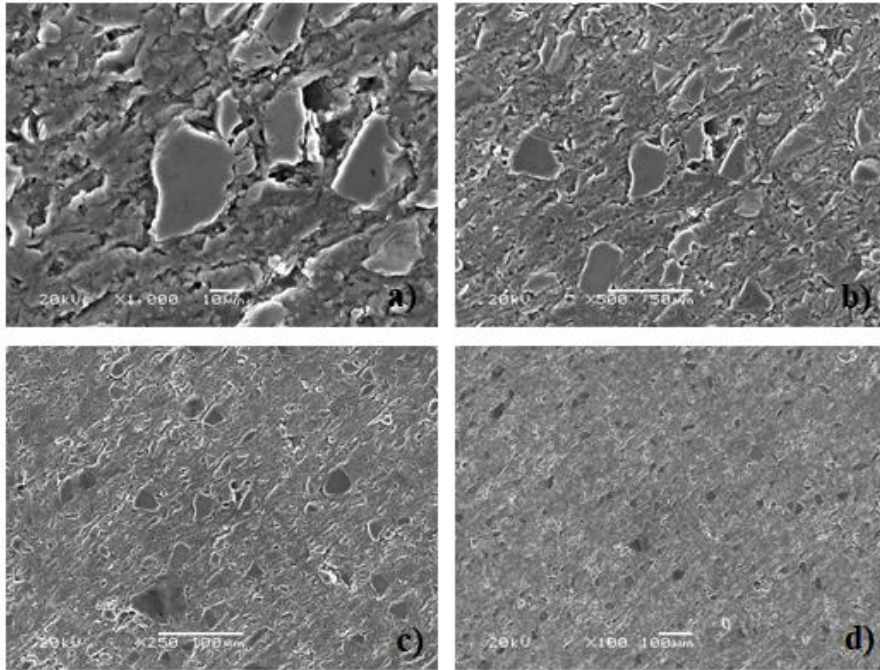


**Şekil 6.70.** 620 °C’de 4 saat sinterlenen %8 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

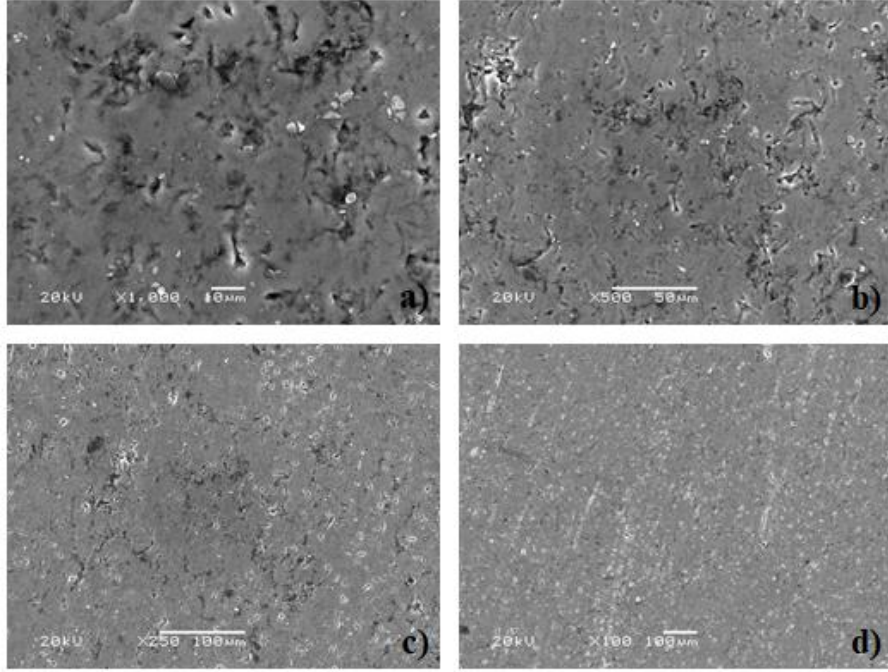




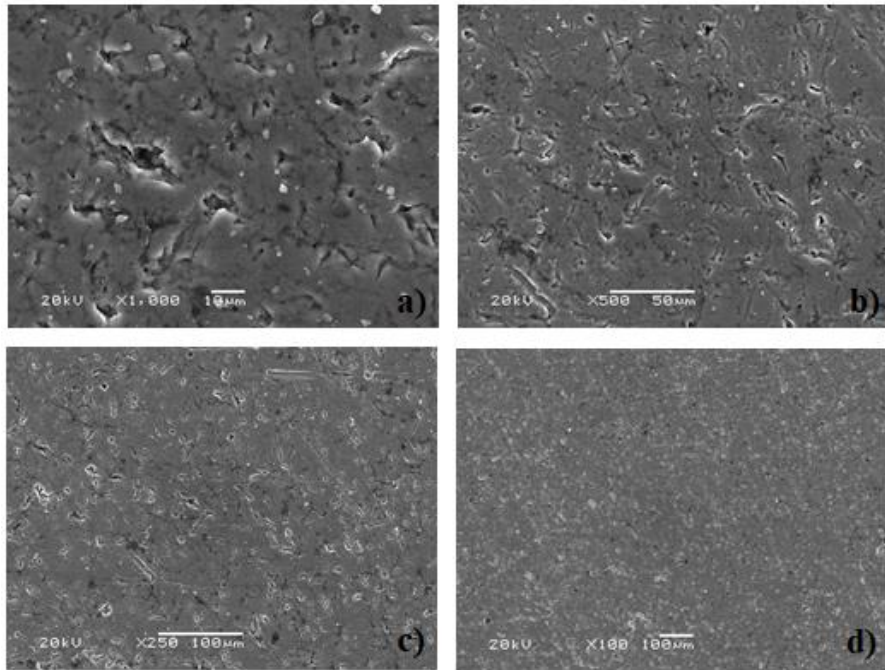
**Şekil 6.71.** 620 °C'de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.



**Şekil 6.72.** 620 °C'de 4 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

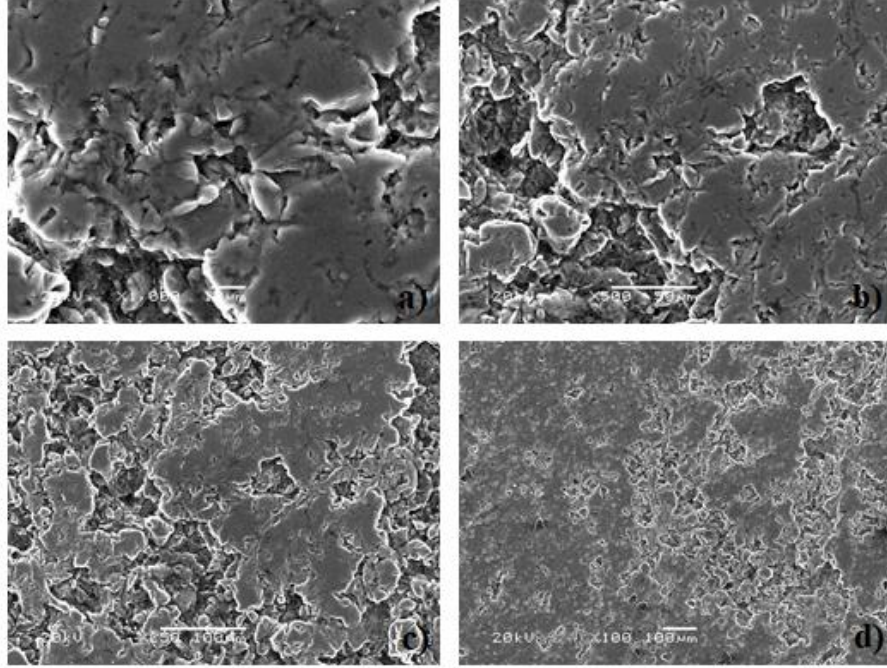


**Şekil 6.73.** 540 °C’de 2 saat sinterlenen %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

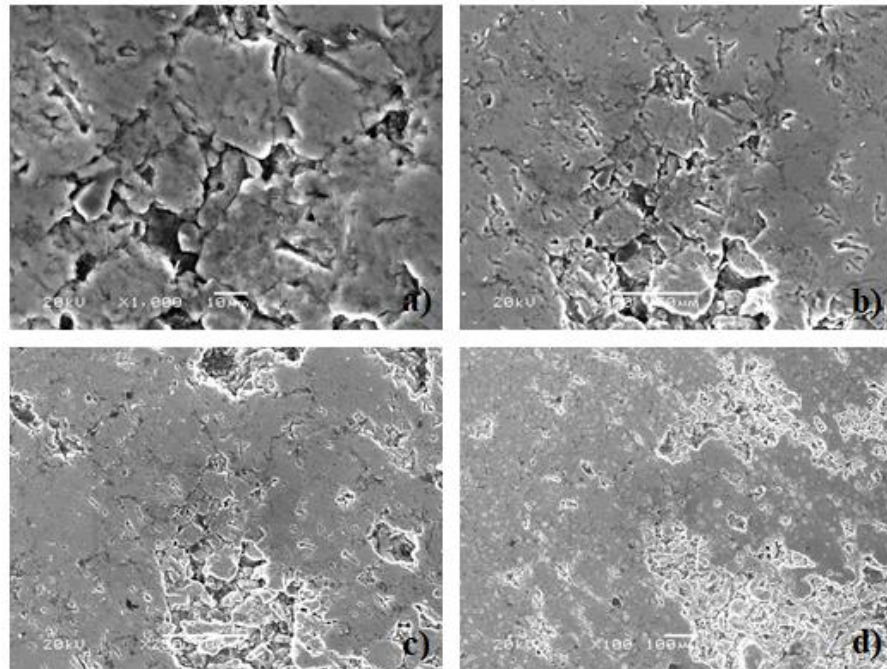


**Şekil 6.74.** 540 °C’de 4 saat sinterlenen %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

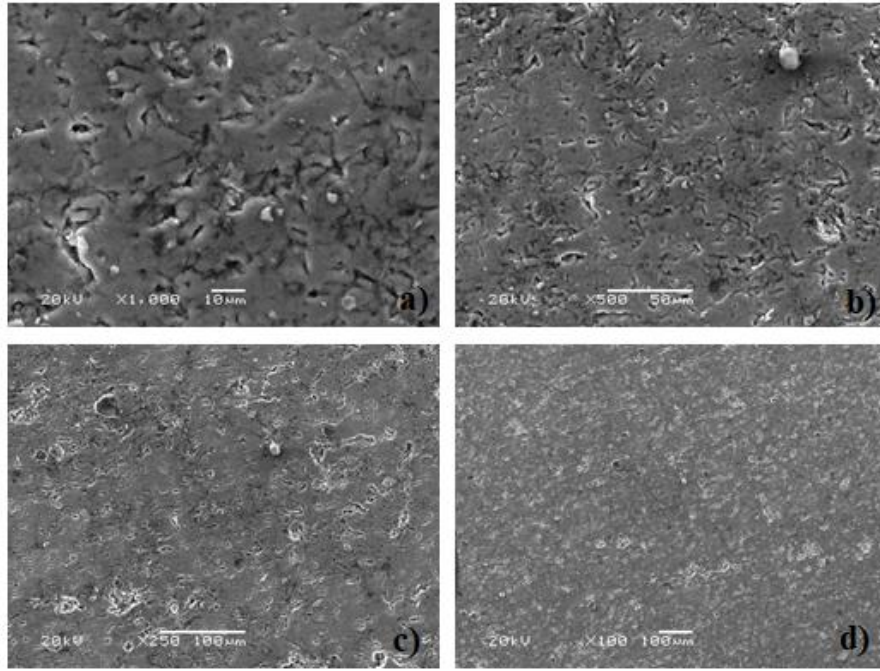




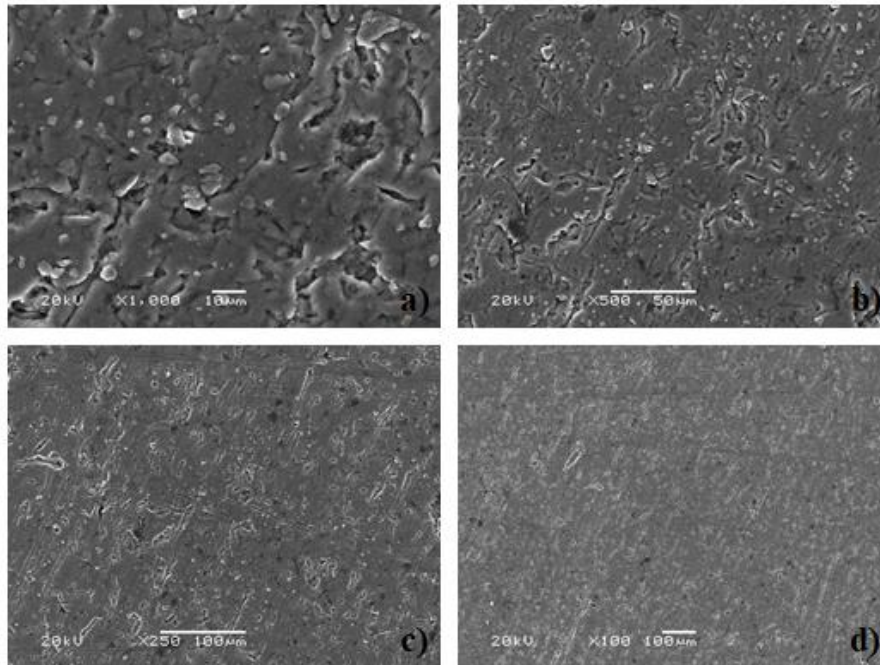
**Şekil 6.75.** 540 °C'de 2 saat sinterlenen %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.



**Şekil 6.76.** 540 °C'de 4 saat sinterlenen %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

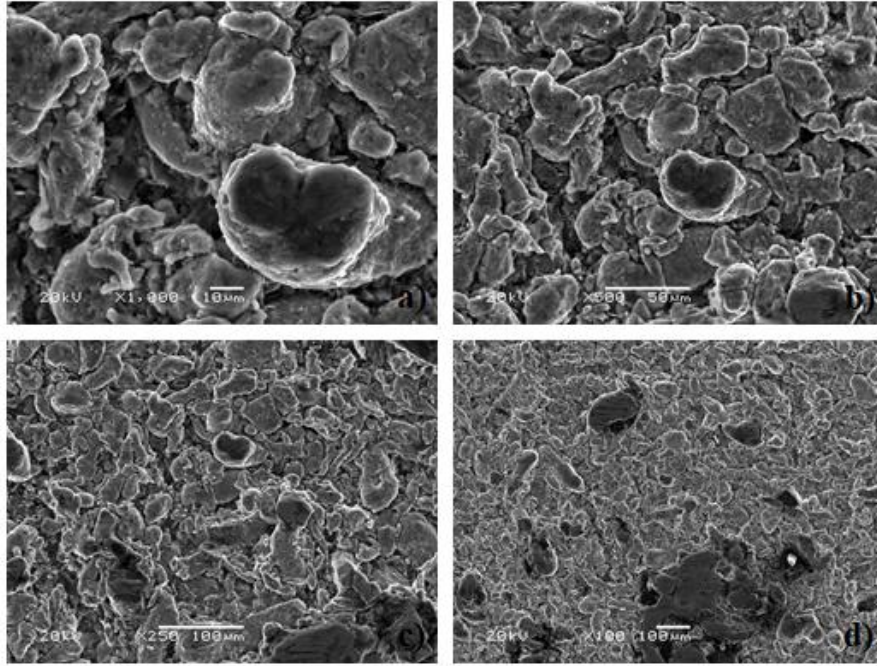


**Şekil 6.77.** 620 °C’de 2 saat sinterlenen %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

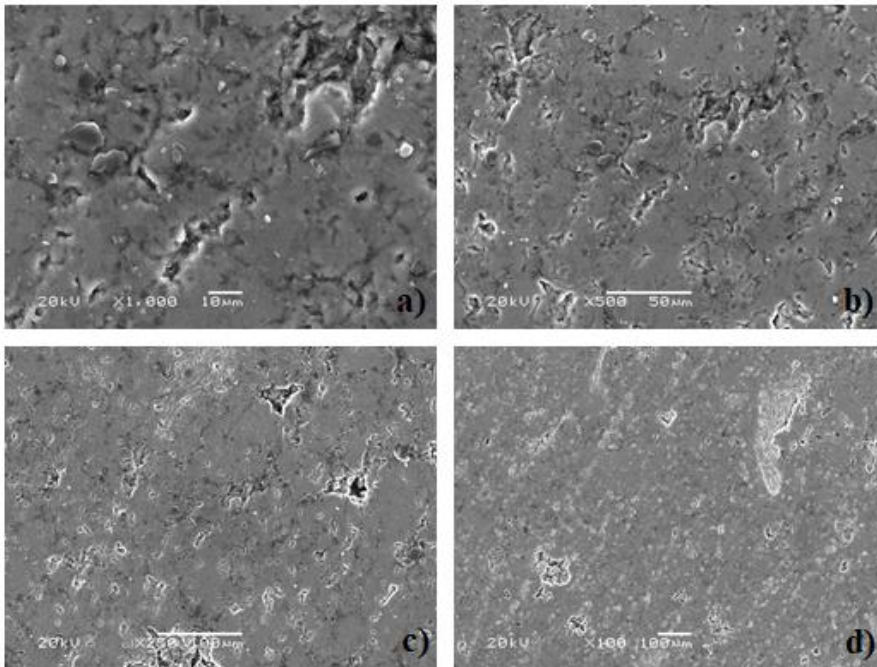


**Şekil 6.78.** 620 °C’de 4 saat sinterlenen %8 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.



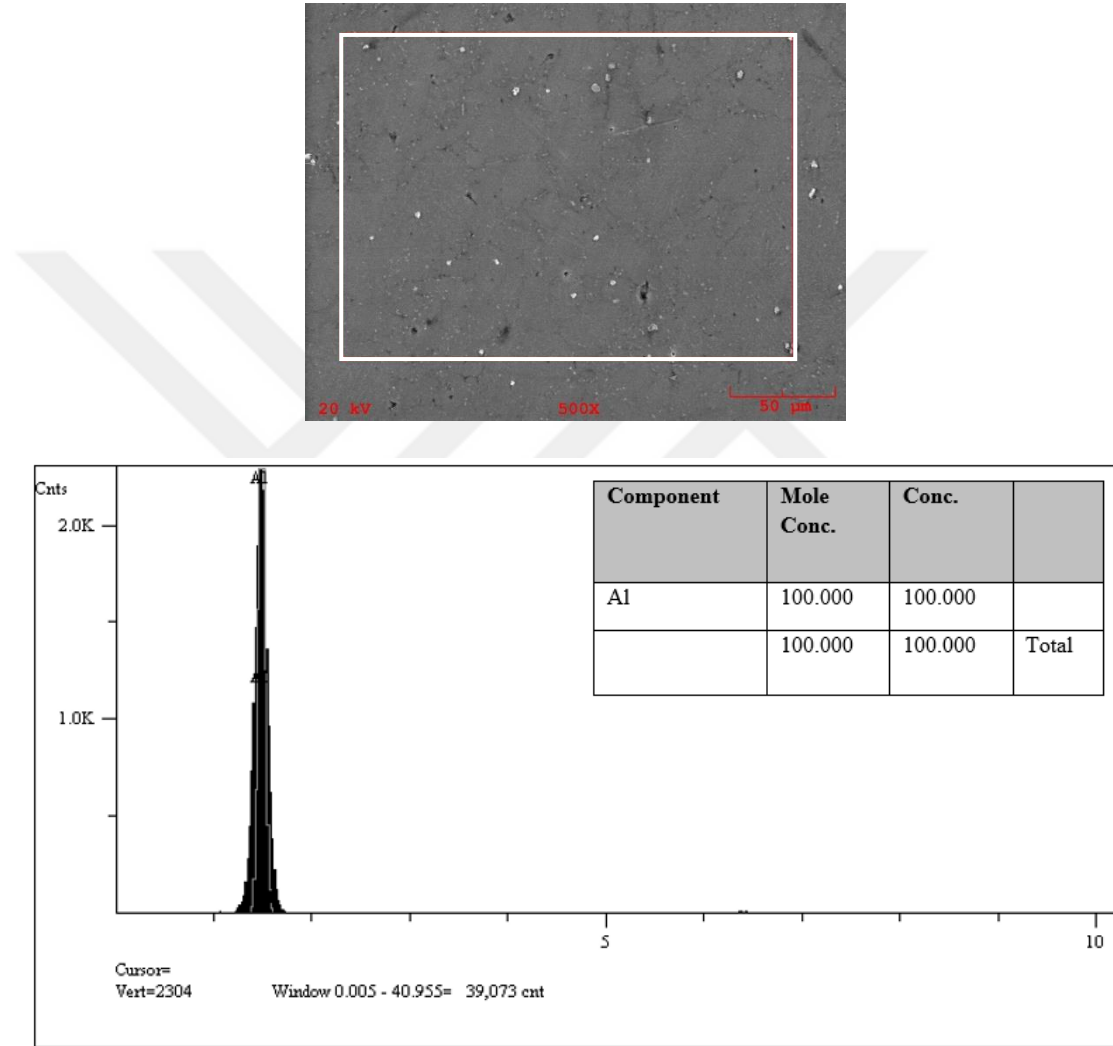


**Şekil 6.79.** 620 °C'de 2 saat sinterlenen %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.



**Şekil 6.80.** 620 °C'de 4 saat sinterlenen %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri; a) x1000 büyütme, b) x500 büyütme, c) x250 büyütme, d) x100 büyütme.

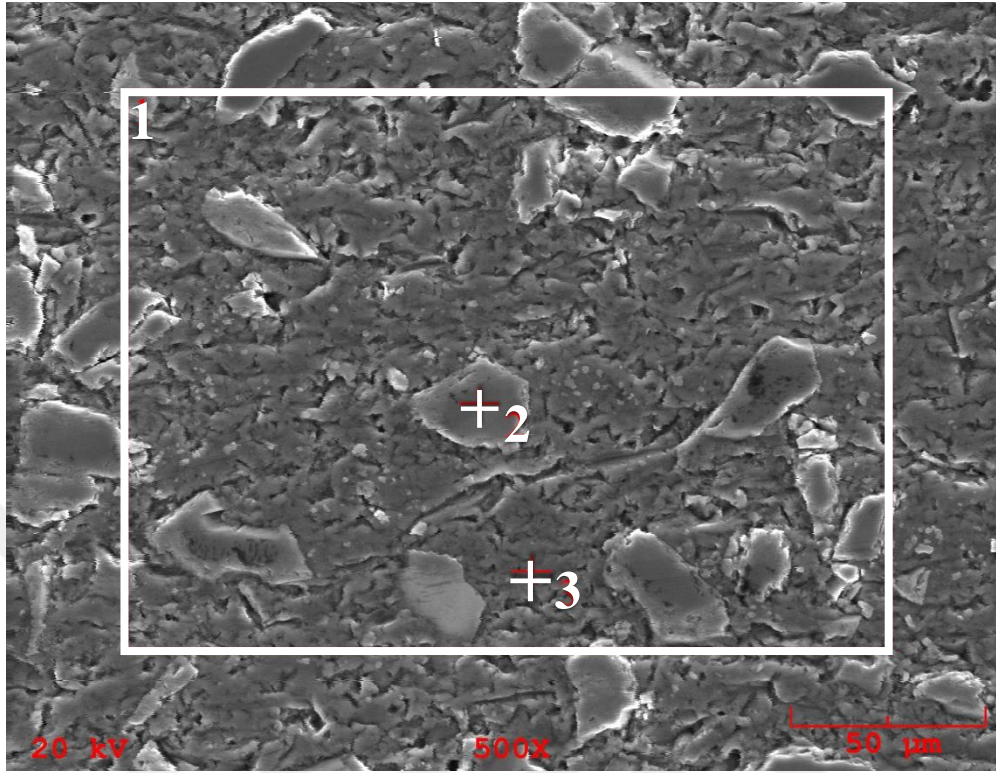
Optik mikroskop ve SEM ile mikroyapı görüntüleri alınan numunelerin, elementel bileşimlerini doğrulamak amacıyla enerji dağılım spektrometresi (EDX) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 540°C’de 2 saat sinterlenen numunelerden saf Al, %24 SiC ve %24 B<sub>4</sub>C olmak üzere birer tanesi seçilerek EDX analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.81. 540 °C’de 2 saat sinterlenen saf Al numunesine ait EDX analiz raporu.

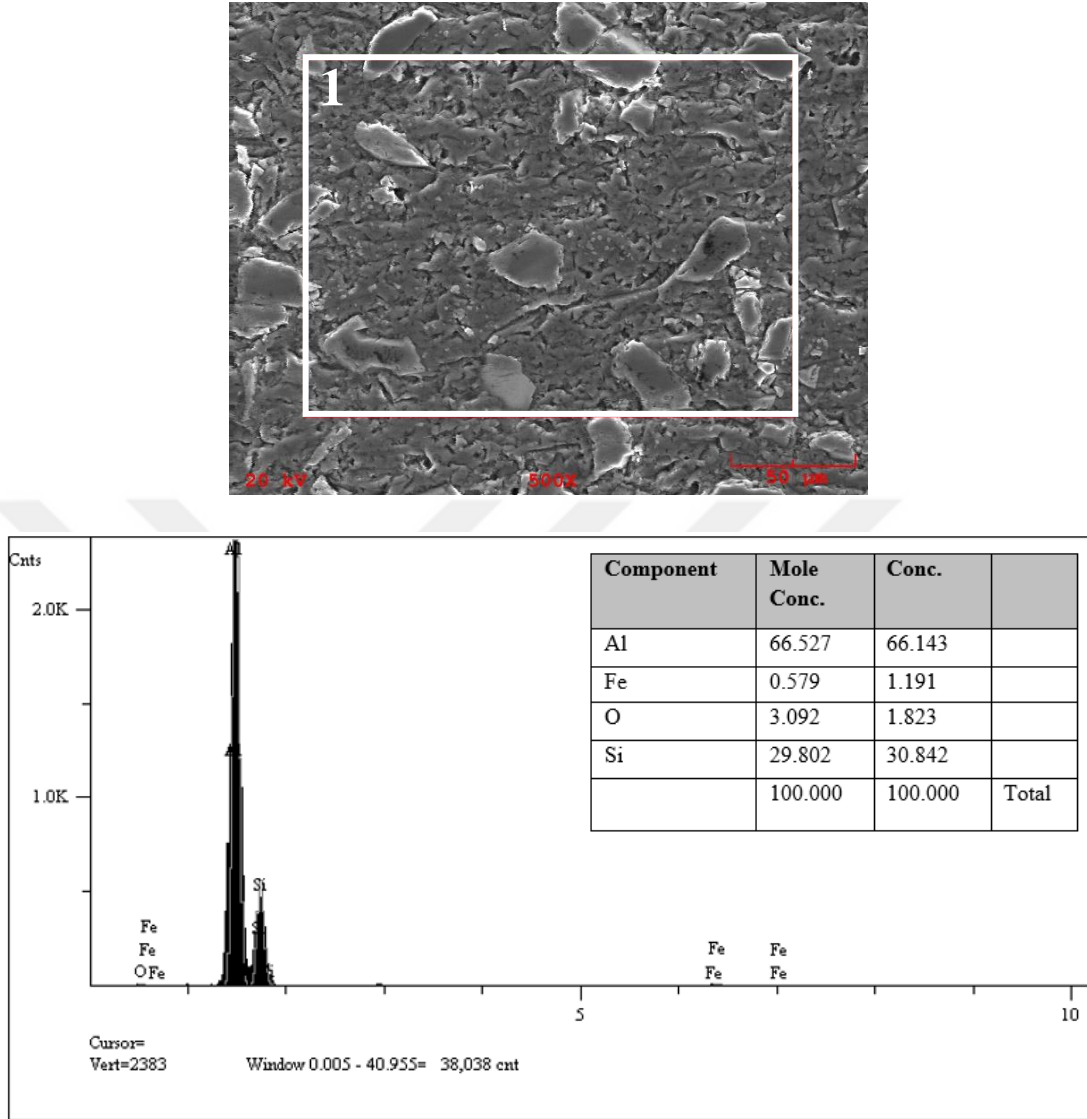
Şekil 6.81.’de sunulan saf Al numunesine ait EDX analiz sonuçlarından, yapının %100 Al’dan oluştuğu ve hiçbir impürite(safsızlık) içermediği görülmektedir.



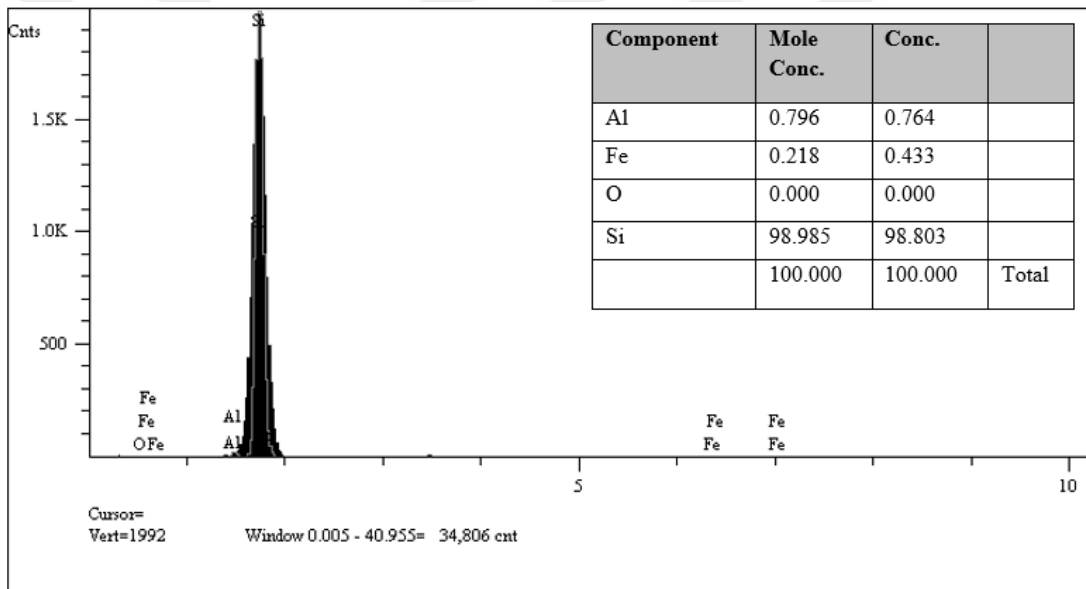
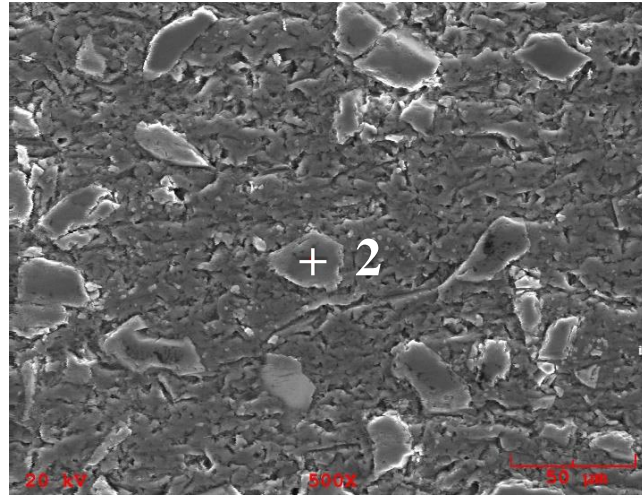


**Şekil 6.82.** 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takviyeli numunelere ait EDX analizi için ölçüm alınan bölgeler.

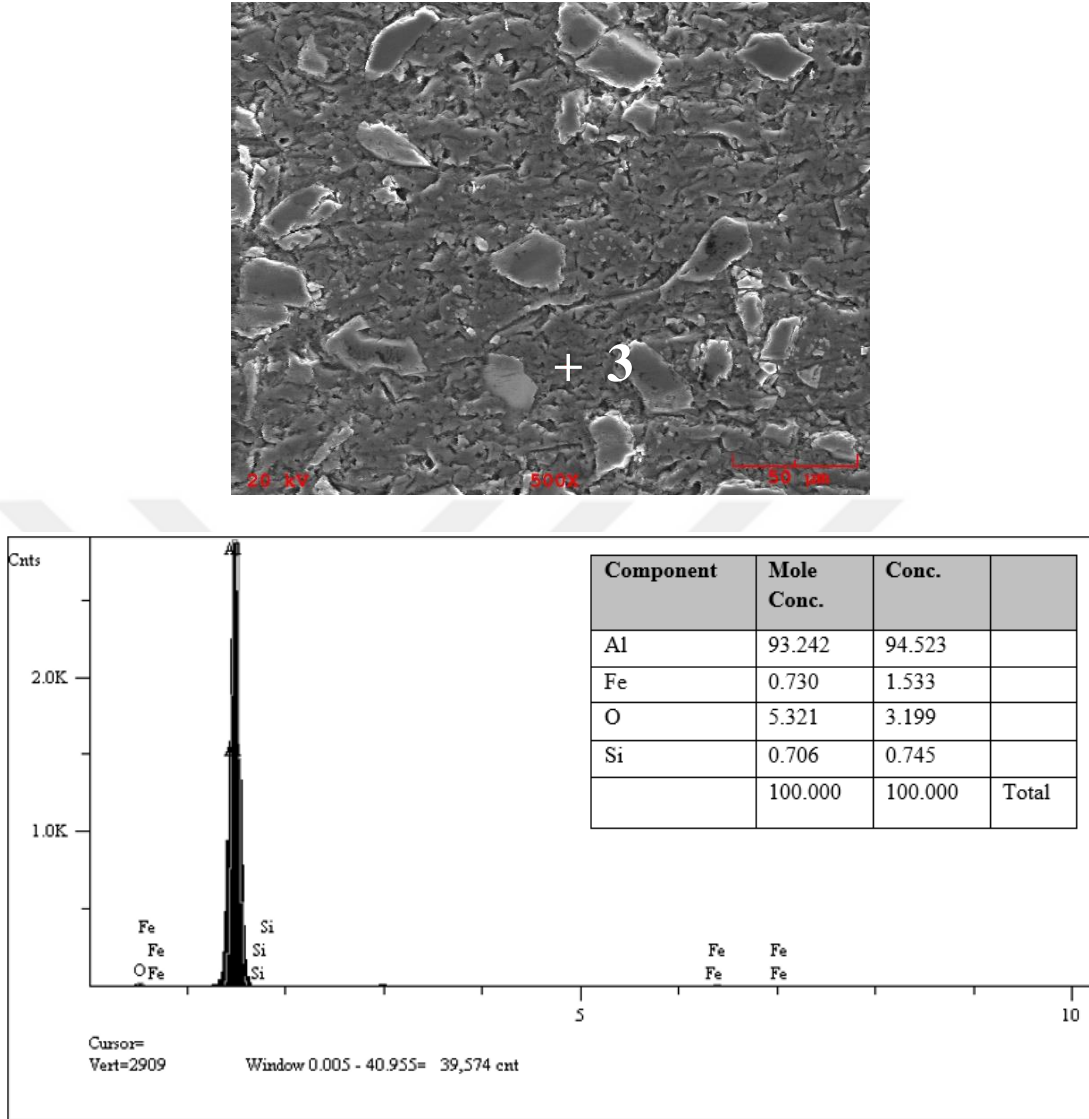
Şekil 6.82.’de EDX analizi için %24 SiC takviyeli numuneden ölçüm alınan numaralandırılmış bölgeler görülmektedir. Burada 1 ile numaralandırılan bölge genel alan taraması, 2 ile işaretlenen nokta yapıdaki SiC tanesi üzerinden alınan bir nokta, 3 ile işaretlenen nokta ise matris olan Al üzerinden alınan bir noktadır. Bu numuneye ait seçilen bölgelerden elde edilen EDX analiz raporu incelendiğinde de sonuçların beklendiği gibi olduğu Şekil 6.83., Şekil 6.84. ve Şekil 6.85. ile görülebilmektedir.



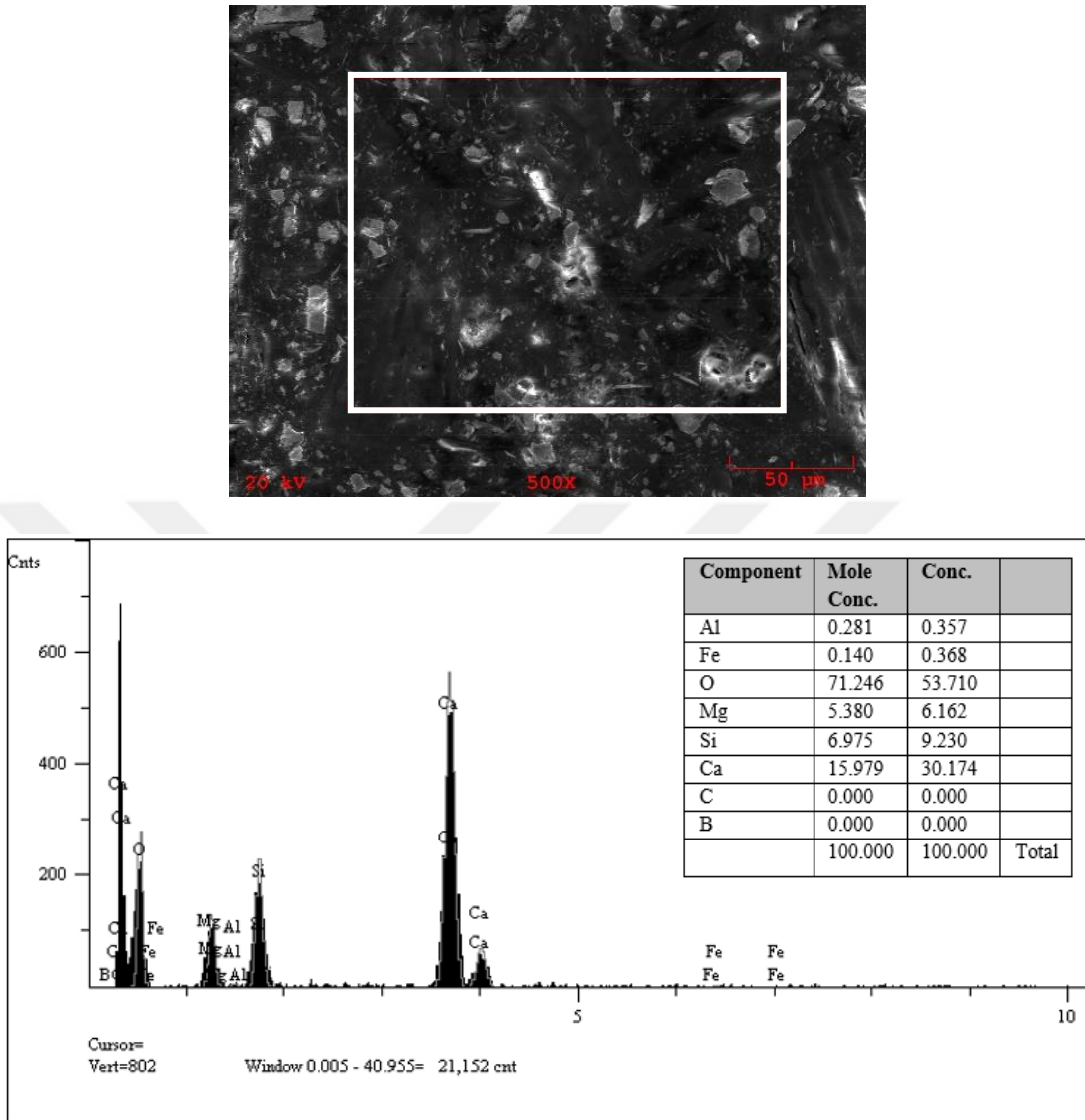
**Şekil 6.83.** 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takiyeli numunelere ait EDX analizinde 1 numaralı bölgeye (genel tarama) ait analiz raporu.



**Şekil 6.84.** 540 °C'de 2 saat sinterlenen %24 SiC takiyeli numunelere ait EDX analizinde 2 numaralı bölgeye (SiC) ait analiz raporu.



**Şekil 6.85.** 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 SiC takiyeli numunelere ait EDX analizinde 3 numaralı bölgeye (Al) ait analiz raporu.



**Şekil 6.86.** 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait EDX analizinde genel alana ait analiz raporu.

B<sub>4</sub>C için gerçekleştirilen EDX analizlerinde, hem cihaz yetersizliğinden (cihaz karbon altı elementleri belirlemede yetersiz kaldığı için Bor element olarak seçilse de okunamadı) hem de yüzeylerdeki problemlerden dolayı sağlıklı analizler gerçekleştirilememiştir. Yine de Şekil 6.86.’da 540 °C’de 2 saat sinterlenen %24 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait analiz raporu sunulmuş olup, görüldüğü gibi net sonuçlar elde edilememiştir. Öyle ki, genel tarama olmasına rağmen Al yüzdesi % 0,357 olarak görülmektedir. Bu nedenle, değerlendirme açısından bu sonuçlar dikkate alınmamıştır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 3 farklı takviye oranında, 3 farklı sinterleme sıcaklığında ve 2 farklı sinterleme süresinde üretilen kompozit numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu farklı üretim parametrelerinin bu özellikler üzerine etkisi değerlendirilerek elde edilen sonuçlar şu şekilde yorumlanmıştır:

- ✓ Numunelerde artan sinterleme sıcaklığı ve süresiyle sertlik ve yoğunluk artmış, gözeneklilik ise azalmıştır. Bu durumun artan sinterleme sıcaklığının atomlar arası difüzyonu hızlandırması sebebiyle taneler arası bağlanmanın artması ve böylece gözeneklerin küçülmesi sonucu meydana geldiği yorumlanmıştır.
- ✓ Artan takviye oranlarında numunelerde gözeneklilik artmış, yoğunluk azalmış ve dolayısıyla teorik yoğunluk değerlerinden uzaklaşmıştır. Sadece SiC numunelerinde, SiC' ün yoğunluğunun Al' dan yüksek olması sebebiyle yoğunluk için rakamsal olarak bir artış oluşmuş, genel olarak bakıldığında ise teorik yoğunluk değerlerinden artan takviye oranı ile uzaklaşmıştır.
- ✓ Alınan mikroyapı görüntülerinden 3 saat olarak belirlenen karıştırma süresinin yapıda homojen bir dağılım elde edilmesi açısından yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Mikroyapı görüntülerinden de artan takviye oranlarında gözenekliliğin arttığı ve bu gözeneklerin çoğunlukla matris tane sınırları ve matris-takviye arayüzeylerinde meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır.
- ✓ Artan takviye oranlarında sertlik değerleri ise, SiC takviyeli numuneler için artmış, B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerde ise %8'den fazla olan takviye oranlarında etkin bir artış görülmemiştir. Bu durumun B<sub>4</sub>C tanelerinin aşırı sert olması sebebiyle sıkıştırılabilirliği azaltmasından ve B<sub>4</sub>C taneleri ile Al taneleri arasındaki boyut farkından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Matris ve takviye tane boyutlarının birbirinden uzaklaşmasının iyi bir karışım elde edilmesine engel olduğu, B<sub>4</sub>C tanelerinin Al tane sınırlarına biriktiği ve böylece bağlanmayı engelleyerek zayıf bir yapı oluşmasına sebep olduğu anlaşılmıştır. Buna bağlı olarak da matris ve takviye tane boyutlarının birbirine yakın seçilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen veriler ışığında daha sonra gerçekleştirilecek çalışmalar için şu öneriler verilebilir:

- ✓ B<sub>4</sub>C ile takviyelenen numunelerde Al matrisle boyut farklılığından ve yüksek takviye oranlarından dolayı meydana gelen problemleri gidermek açısından, birbirine yakın matris-takviye boyutlarında ve daha düşük (%10'a kadar) takviye oranlarında Al matrisli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin üretimi gerçekleştirilebilir ve sonuçlar karşılaştırılabilir.

- ✓ Aynı koşullarda üretilen numunelere daha yüksek presleme basınçları uygulanarak sonuçları değeriendirilebilir veya farklı bir üretim yöntemi kullanılabilir.
- ✓ Üretilen numuneler için aşınma testleri gerçekleştirilerek sonuçları değeriendirilebilir.



## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acılar, M. (2002). Al/SiC Kompozitlerin Vakum İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Akbulut, H. (1994). Alümina Fiber Takviyeli Al-Si Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı-Özellik İlişkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akın, G. (2006). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Alüminyum Matrisli Bor Karbür Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akoral, E. (2003). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Al-SiC Kompozit Malzeme Üretimi ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Arik, H., Turker, M., ve Saritas, S. (2000). Investigation of mechanical properties of in situ Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> reinforced aluminium based composites by mechanical alloying technique. In Powder Metallurgy World Congress and Exhibition, Kyoto, 44, 543-549.
- Ashby, M. F. (1993). Criteria for selecting the components of composites. *Acta metallurgica et materialia*, 41(5), 1313-1335.
- ASM Handbook: Volume 7 Powder Metal Technologies and Applications. (1998). Ohio: ASM International.
- Ay, H. (2014). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen AA7075 Alüminyum Alaşımına Ti ve B<sub>4</sub>C İlavesinin Aşınma Davranışı Üzerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Ay, H., Özyürek, D., Yıldırım, M., ve Bostan, B. (2016). The Effects of B<sub>4</sub>C Amount on Hardness and Wear Behaviours of 7075-B<sub>4</sub>C Composites Produced by Powder Metallurgy Method. *Acta Physica Polonica, A.*, 129(4), 565-568.
- Ayvaz, M., ve Çetinel, H. (2014). Farklı Matris Kompozisyonları ve Takviye Oranları İçin Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 45-53.
- Baksan, B., Gürler, R. (2003). Toz Metalurjisinin Savunma Sanayiinde Uygulanması. Osmangazi Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü, Eskişehir.
- Bedir, F. (2006). Alüminyum Kompozitlerin Üretimi, Karakteristik Özellikleri ve Endüstriyel Uygulamaları. *Mühendis ve Makine*, 47(554), 28-35.
- Bedir, F., ve Ögel, B. (2004). SiCp Katkılı Al Kompozitlerin Sertlik, Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, 11. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, Antalya, 979-988, 13-15.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Bertholet, J. (1999). Composite materials: Mechanical behavior and structural analysis. New York: Springer.
- Boutman, L.J. ve Krack, R.H. (1974). Composite Materials (Vol.4). London: Academic Press.
- Bronsveld, P. M., Bruinsma, P., De Hosson, J. T., Sargent, M. A., ve Alsem, W. H. M. (1991). Microstructural analysis of hot isostatically pressed Al-SiC. *Materials Science and Engineering: A*, 135, 77-81.
- Burg, T., ve Crosky, A. (2001). Materials for Aeronautical Engineering Published Course Materials. University of New South Wales, Australia.
- Cahn, R. W., Haasen, P., Kramer, E. J., ve Chou, T. W. (1993). *Materials Science and Technology A Comprehensive Treatment: Structure and Properties (Vol. 13)*. Weinheim: VCH, 244-284.
- Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2014). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği [Materials Science and Engineering] (8. Baskı)* (C. Bindal, K. Genel, M. Demirkol, R. Artır, M. Bakkal, S. A. Parasız, Çev.; K. Genel, Ed.). Ankara: Nobel.
- Carden, R. A. (1996). Metal matrix compositions and method of manufacture thereof. U.S. Patent No. 5,486,223. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Chen, I. W. (2000). Low temperature processing and kinetics of ceramics and ceramic matrix composites with large interfacial areas. Department of Energy, Basic Energy Sciences. Final Technical Report, Philadelphia, USA.
- Chung, D. D. L., ve Zweben, C. (2000). Composites for electronic packaging and thermal management in *Comprehensive Composite Materials*. Amsterdam: Elsevier, 6, 701-725.
- Clyne, T. W. (2001). Metal Matrix Composites: Matrices and Processing. In *Encyclopedia of Materials: Science and Technology, Composites: MMC, CMC, PMC* (A. Mortensen, Ed.), New York: Elsevier, 1-14.
- Clyne, T. W., ve Withers, P. J. (1993). An introduction to metal matrix composites. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cole, G. S., ve Sherman, A. M. (1995). Light weight materials for automotive applications. *Materials Characterization*, 35(1), 3-9.
- Çanakçı, A., ve Varol, T. (2012). Production and microstructure of AA2024-B4C metal matrix composites by mechanical alloying method. *Usak University Journal of Material Sciences*, 1(1), 15-22.
- Çelik, Y. H., ve Seçilmiş, K. (2017). Investigation of wear behaviours of Al matrix composites reinforced with different B4C rate produced by powder metallurgy method. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2218-2224.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- 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.
- Çolak, N. Y., ve Turhan, H. (2016). Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilen Al-Si/B4C Kompozit Malzemenin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 259-266.
- Degischer, H. (1997). Innovative light metals: metal matrix composites and foamed aluminium. *Materials & Design*, 18(4-6), 221-226.
- Dennis, W. H., Tulgar, H. (1987). Demirden Gayrı Metaller Metalurjisi. İstanbul: İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi.
- Ekerer, F.A. (2007). Alümina-SiC Partikül Destekli T/M Al-Matriksli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Ekici, E. (2012). Alüminyum Matrisli B4C Takviyeli ve Grafit Katkılı Kompozitlerin Üretilmesi, Mekanik Özellikleri ve Frezede İşlenebilirliğinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ekşi, A., ve Kurt, A. (1999). Metal ve Seramik Tozların Bilgisayar Kontrollü Tek Eksenli Kalıpta Preslenmesi. Ankara ODTÜ, II. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 557-565.
- Eliasson, J., ve Sandström, R. (1995). Applications of aluminium matrix composites. In *Key Engineering Materials* (Vol. 104-107, pp. 3-36). Trans Tech Publications.
- Ergün, N. (2006). Reaktif Sıcak Presleme Yöntemiyle B4C/SiC Kompozitlerinin Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fayed, M. E., ve Otten, L. (1997). *Handbook of Powder Science & Technology* (2nd ed.). New York: Chapman & Hall.
- Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M., Altunpak, Y. (2015). Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri (4. Baskı). Ankara: Seçkin.
- German, R. M. (2007). Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri: İşlemler, Malzemeler, Ürünler, Özellikler ve Uygulamalar. Ankara: Türk Toz Metalurjisi Derneği.
- Ghosh, A. K. (1993). *Solid-State Processing in Fundamentals of Metal-Matrix Composites*. Oxford: Butterworth Heinemann, 23-41.
- Göde, C. (2011). TM ile Üretilmiş Alumix-231 SiCp ve B4Cp Kompozitlerin Farklı Üretim Yöntemlerinin Mekanik Özelliklere Etkisi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Gökmeşe, H., ve KARADAĞ, H. B. (2018). Toz Metal AA 2014-SiC-B4C Kompozit/Hibrit Malzemelerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6(2), 385-398.

Groover, M. P. (2010). Particulate Processing of Metals and Ceramics: Powder Metallurgy. In Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 344-368.

Guleryuz, L. F., Ozan, S., Uzunsoy, D., ve Ipek, R. (2012). An investigation of the microstructure and mechanical properties of B4C reinforced PM magnesium matrix composites. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 51(7-8), 456-462.

Harrigan Jr, W. C. (1998). Commercial processing of metal matrix composites. Materials Science and Engineering: A, 244(1), 75-79.

Hiçyılmaz, N., Aydın, Ş., ve Sarıtaş, S. (1999). Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Alüminyum Esaslı Tanecikli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri. Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, ODTÜ-1999, 621-629.

Huda, D., El Baradie, M. A., ve Hashmi, M. S. J. (1993a). Metal-matrix composites: Manufacturing aspects. Part I. Journal of materials processing technology, 37(1-4), 513-528.

Huda, D., El Baradie, M. A., ve Hashmi, M. S. J. (1993b). Metal-matrix composites: Materials aspects. Part II. Journal of Materials Processing Technology, 37(1-4), 529-541.

Huda, M. D., Hashmi, M. S. J., ve El-Baradie, M. A. (1995). MMCs: materials, manufacturing and mechanical properties. In Key Engineering Materials, 104-107, 37-64.

Hull, D., ve Clyne, T. W. (1996). An Introduction to Composite Materials (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Hunt, W. H. (2000). Particulate Reinforced MMC's in Comprehensive Composite Materials (A. Kelly, C. H. Zweben, Eds.). Amsterdam: Elsevier, 3, 701-715.

Hunt, W. H. (2001). Metal Matrix Composites: Applications. In Encyclopedia of Materials: Science and Technology. (2nd ed.). Amsterdam: Elsevier, 5442-5446.

Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., ve Lavernia, E. J. (1991). Particulate reinforced metal matrix composites-a review. Journal of Materials Science, 26(5), 1137-1156.

Işık, E. (2014). SiC Takviyeli Al-12Si Matrisli Kompozitin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Jeevan, V., Rao, C. S. P., ve Selvaraj, N. (2012). Compaction, sintering and mechanical properties of Al-SiCp composites. International Journal of Mechanical Engineering and Technology., 3(3), 565-573.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

Jun, D., Yao-hui, L., Si-rong, Y., ve Wen-fang, L. (2004). Dry sliding friction and wear properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and carbon short fibres reinforced Al-12Si alloy hybrid composites. *Wear*, 257(9-10), 930-940.

Kainer, K. U. (2006). *Metal Matrix Composites: Custom-Made Materials for Automotive and Aerospace Engineering* (1st ed.). Weinheim: Wiley-VCH.

Kalaycıoğlu, A. S. (2010). SiC Tane Katkılı Alüminyum Kompozitlerin Toz Metalurjisi ile Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Kalemtaş, A. (2014). Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech&Composites*, 22, 18-30.

Kang, S. J. L. (2005). *Sintering: Densification, Grain Growth, and Microstructure*. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann.

Karabulut, H. (2011). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC ve B<sub>4</sub>C Takviyeli Al Matrisli Kompozit Üretiminde Mekanik Alaşımlama Süresini Kompozit Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Karabulut, H., ve Çıtak, R. (2011). Alüminyum Matrisli ve SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Farklı Mekanik Alaşımlama Sürelerinde Üretilmesi ve Karakterize Edilmesi. In 6th International Advanced Technologies Symposium. Elazığ. Bildiriler Kitabı, 527-530.

Karaman, Y. (2011). Toz Metalurjisi Yöntemi ile MgO Takviyeli Al Esaslı Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

Karamış, M. B., Cerit, A. A., Selçuk, B., ve Nair, F. (2012). The effects of different ceramics size and volume fraction on wear behavior of Al matrix composites (for automobile cam material). *Wear*, 289, 73-81.

Karaşoğlu, M., ve Karaoğlu, S. (2014). Toz Metalurjisi ile Üretilen Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Proses ve Malzeme Değişkenlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 55(649), 17-23.

Kaw, A. K. (1997). *Mechanics of Composite Materials* (3rd ed.). Boca Raton: CRC Press, 61-65.

Keçeli, Z. (2007). Characterization Investigations of Powder and Sintered Al-SiC and Al-B<sub>4</sub>C Composites Developed via Mechanical Alloying. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kelly, A., ve Mortensen, A. (2001). *Composite Materials: Overview* (No. LMM-CHAPTER-2001-001, pp. 1361-1371). Elsevier Science.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

Kevenlik, O. F. (2013). Toz Metalurjisi Yöntemi ile SiC Takviyeli Al 2014 Esaslı Kompozit Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

Kılıç, E. F. (2007). Alüminyum Alaşımli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kumar, S. (2016). Fabrication and Machining Studies of Al(6351)-SiC-B<sub>4</sub>C Hybrid Metal Matrix Composite, Ph.D. Thesis, Kalasalingam Academy of Research and Education, Tamil Nadu.

Kumdalı, F. (2008). Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kurt, A.O. (2004). Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme. Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 4-34.

Lindroos, V. K., ve Talvitie, M. J. (1995). Recent advances in metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 53(1-2), 273-284.

Lindroos, V., Hellman, J., Lou, D., Nowak, R., Pagounis, E., Liu, X. W., ve Penttinen, L. (2004). Designing with metal-matrix composites in *Handbook of Mechanical Alloy Design* (G. E. Totten, L. Xie, K. Funatani, Eds.). New York: Marcel Dekker.

Liu, Y. B., Lim, S. C., Lu, L., ve Lai, M. O. (1994). Recent development in the fabrication of metal matrix-particulate composites using powder metallurgy techniques. *Journal of Materials Science*, 29(8), 1999-2007.

Lloyd, D. J. (1994). Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites. *International materials reviews*, 39(1), 1-23.

Lloyd, D. J., Lagace, H. P., ve McLeod, A. D. (1990). Interfacial phenomena in metal matrix composites. In *Controlled Interphases in Composite Materials* (1st ed.) (H. Ishida, Ed.). New York: Elsevier Science Publishing, 359-376.

Lubin, G. (1982). *Handbook of Composites* (1st ed.). New York: Van Nostrand Reinhold Company.

Newkirk, J. W. ve Kohser, R. A. (2004). Designing with Powder Metallurgy Alloys. In *Handbook of Mechanical Alloy Design* (G. E. Totten, L. Xie, K. Funatani, Eds.). New York: Marcel Dekker, 641-667.

Onat, A. (2015). Kompozit Malzemeler. Ders notu, Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü, Sakarya Meslek Yüksek Okulu, Sakarya Üniversitesi, Sakarya. Erişim adresi: [http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/78375/31395/kompozit\\_malzemeler\\_ders\\_notu.pdf](http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/78375/31395/kompozit_malzemeler_ders_notu.pdf)

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Orhan, A., Gür, A. K., ve Çalgılı, U. (2007). Al Matrisli B4C Takviyeli Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretimi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 8-13.
- Ögel, B. (1997). Kompozit Malzemelerde Son Gelişmeler ve İleriye Dönük Beklentiler. 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 33, 639-650.
- Ögel, B., Kaya, G. (1992). Alüminyum-SiC Kompozitlerin Konvansiyonel Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretimi. 2. National PM Conference, Ankara, 631-635.
- Özkan, S. (2007). Alüminyum Matriksli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşım Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Öztürk, S. ve İcin, K. (2015). Toz Metalurjisi Deneyi. Laboratuvar Föyü, Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon.
- Palacı, Y. (2001). Alüminyumun Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pan, Y. M., Fine, M. E., ve Chang, H. S. (1990). Wear mechanism of aluminium based metal matrix composite under rolling and sliding contraction in technology of composite materials. *ASM International*, 93-101.
- Prasad, S. V., ve Rohatgi, P. K. (1987). Tribological properties of Al alloy particle composites. *JOM*, 39(11), 22-26.
- Premkumar, M. K., Hunt, W. H., ve Sawtell, R. R. (1992). Aluminum composite materials for multichip modules. *Journal of Materials*, 44(7), 24-28.
- Pul, M. (2010). Al Matrisli MgO Takviyeli Kompozitlerin İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretilmesi ve İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Purohit, R., Rana, R. S., ve Verma, C. S. (2012). Fabrication of Al-SiCp composites through powder metallurgy process and testing of properties. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(3), 420-437.
- Raja, T., ve Sahu, O. P. (2014). Effects on Microstructure and Hardness of Al-B4C Metal Matrix Composite Fabricated through Powder Metallurgy. *International Journal of Mechanical Engineering*, 1(1), 1-5.
- Rao, C. S., ve Upadhyaya, G. S. (1996). 2014 and 6061 aluminium alloy-based powder metallurgy composites containing silicon carbide particles/fibres. *Materials & Design*, 16(6), 359-366.
- Ravi Kumar, V., Dileep, B. P., ve Vital, H. R. (2017, July). Tribological and mechanical characterization of Al-Ni-SiC metal matrix composites. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1859, No. 1, p. 020020). AIP Publishing.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

Ray, A. K., Venkateswarlu, K., Chaudhury, S. K., Das, S. K., Kumar, B. R., ve Pathak, L. C. (2002). Fabrication of TiN reinforced aluminium metal matrix composites through a powder metallurgical route. *Materials Science and Engineering: A*, 338(1-2), 160-165.

Rohatgi, P. K., ve Asthana, R. (1990). Interfacial aspects of processability and property development in discontinuously reinforced cast metal matrix composites. In *Controlled Interphases in Composite Materials* (1st ed.) (H. Ishida, Ed.). New York: Elsevier Science Publishing, 637-651.

Sağırılı, A. (1990). Mekanik Eksantrik Toz Metal Presi ve Toz Metal Teknolojisi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Sawtell, R. R., Hunt Jr, W. H., Rodjom, T. J., Hilinski, E. J., ve Milsom, J. H. (1996). Method of producing structural metal matrix composite products from a blend of powders. U.S. Patent No. 5,561,829. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Schwartz, M. M. (1984). *Composite Materials Handbook* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.

Seleznev, M. L., Cornie, J. A., Mason, R. P., ve Ryals, M. A. (1995). High Volume Fraction Ceramic Reinforced Aluminium Matrix Composites for Automotive Applications: mechanical properties and microstructural characterization. Technical paper, MMCC Inc..

Selvakumar, V., Muruganandam, S., ve Senthilkumar, N. (2017). Evaluation of mechanical and tribological behavior of Al-4% Cu-x% SiC composites prepared through powder metallurgy technique. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(5), 1305-1315.

Singh, M., Rana, R. S., Purohit, R., Sahu K. (2015). Development and analysis of al-matrix nano composites fabricated by ultrasonic assisted squeeze casting process. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3697-3703.

Singh, S., Gangwar, S., ve Yadav, S. (2017). A Review on Mechanical and Tribological Properties of Micro/Nano Filled Metal Alloy Composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(4), 5583-5592.

Skotnicova, K., Kursá, M., ve Szurman, I. (2014). *Powder Metallurgy* (University Textbook). Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava.

Soy, U. (2009). Metal Matrisli Kompozit Malzemeler Ders Notları, Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Sakarya.

Srivatsan, T. S., Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A., ve Lavernia, E. J. (1991). Processing techniques for particulate-reinforced metal aluminium matrix composites. *Journal of Materials Science*, 26(22), 5965-5978.

Staab, G. H. (1999). *Introduction to composite materials. Laminar composites*. Boston: Butterworth-Heinemann.

Şahin, Y. (2000). *Kompozit Malzemelere Giriş* (1. Baskı). Ankara: Gazi.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Şahin, Y. (2015). Kompozit Malzemelere Giriş (3. Baskı). Ankara: Seçkin.
- Takei, T., Hatta, H., ve Taya, M. (1991a). Thermal expansion behavior of particulate-filled composites I: single reinforcing phase. *Materials Science and Engineering: A*, 131(1), 133-143.
- Takei, T., Hatta, H., ve Taya, M. (1991b). Thermal expansion behavior of particulate-filled composites II: multi-reinforcing phases (hybrid composites). *Materials Science and Engineering: A*, 131(1), 145-152.
- Tan, M. J., ve Zhang, X. (1998). Powder metal matrix composites: selection and processing. *Materials Science and Engineering: A*, 244(1), 80-85.
- Taşcı, U., Gökmeşe, H., ve Bostan, B. (2013). AA 2014 Al Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mikro Yapı ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 1(4), 161-168.
- Teti, R. (2002). Machining of composite materials. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 51(2), 611-634.
- Thümmeler, F., ve Oberacker, R. (1993). *Introduction to Powder Metallurgy*. London: The Institute of Materials.
- Tjong, S. C., ve Ma, Z. Y. (2000). Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 29(3-4), 49-113.
- Topcu, I., Gulsoy, H. O., Kadioglu, N., ve Gulluoglu, A. N. (2009). Processing and mechanical properties of B4C reinforced Al matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 482(1-2), 516-521.
- Torralba, J. D., Da Costa, C. E., ve Velasco, F. (2003). P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1-2), 203-206.
- Upadhyaya, G. S. (1999). *Sintered Metallic and Ceramic Materials: Preparation, Properties, and Applications*. New York: Wiley.
- Uygur, İ., ve Saruhan, H. (2004). Alüminyum esaslı metal matris kompozit malzemelerin mekanik özellikleri. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 167-174.
- Venkatesh, B., ve Harish, B. (2015). Mechanical properties of metal matrix composites (Al/SiCp) particles produced by powder metallurgy. *International journal of engineering research and general science*, 3(1), 1277-84.
- Wang, X., Jha, A., ve Brydson, R. (2004). In situ fabrication of Al<sub>3</sub>Ti particle reinforced aluminium alloy metal-matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 364(1-2), 339-345.





**EKLER**

# EK-1 Al Toz Boyut Ölçüm Raporu

## Analysis

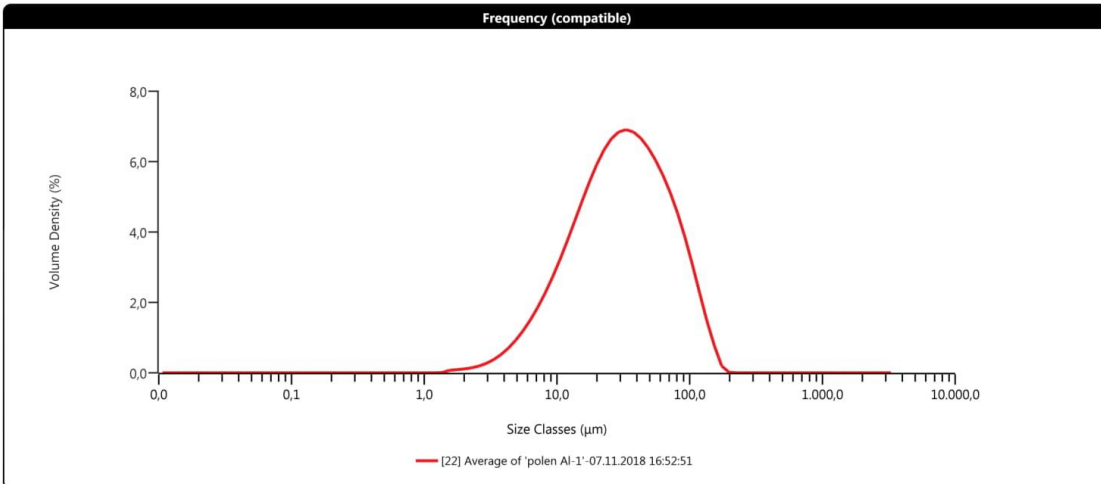
Created by: Malvern Instruments Ltd  
Last edited: 13.04.2012 18:12:51



Measurement Details	
<b>Sample Name</b> Average of 'polen Al-1'	<b>Measurement Date Time</b> 07.11.2018 16:52:51
<b>Operator Name</b> cas	<b>Analysis Date Time</b> 07.11.2018 16:52:51
<b>SOP File Name</b> HydroEV.cfg	<b>Result Source</b> Averaged

Analysis	
<b>Particle Name</b> Alumina	<b>Particle Refractive Index</b> 1,780
<b>Dispersant Name</b> Water	<b>Dispersant Refractive Index</b> 1,330
<b>Particle Absorption Index</b> 0,100	<b>Laser Obscuration</b> 14,97 %
<b>Weighted Residual</b> 1,11 %	<b>Scattering Model</b> Mie
<b>Analysis Model</b> General Purpose	<b>Analysis Sensitivity</b> Normal

Result	
<b>Concentration</b> 0,0399 %	<b>Span</b> 2,450
<b>Uniformity</b> 0,748	<b>Result Units</b> Volume
<b>Specific Surface Area</b> 300,1 m <sup>2</sup> /kg	<b>Dv (10)</b> 9,46 µm
<b>D [3;2]</b> 20,0 µm	<b>Dv (50)</b> 31,0 µm
<b>D [4;3]</b> 40,2 µm	<b>Dv (90)</b> 85,4 µm



Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0,0100	0,00	0,0679	0,00	0,460	0,00	3,12	0,31	21,2	5,29	144	0,64	976	0,00
0,0114	0,00	0,0771	0,00	0,523	0,00	3,55	0,43	24,1	5,55	163	0,13	1110	0,00
0,0129	0,00	0,0876	0,00	0,594	0,00	4,03	0,58	27,4	5,71	186	0,00	1260	0,00
0,0147	0,00	0,0995	0,00	0,675	0,00	4,58	0,77	31,1	5,77	211	0,00	1430	0,00
0,0167	0,00	0,113	0,00	0,767	0,00	5,21	0,99	35,3	5,71	240	0,00	1630	0,00
0,0189	0,00	0,128	0,00	0,872	0,00	5,92	1,25	40,1	5,56	272	0,00	1850	0,00
0,0215	0,00	0,146	0,00	0,991	0,00	6,72	1,55	45,6	5,34	310	0,00	2100	0,00
0,0244	0,00	0,166	0,00	1,13	0,00	7,64	1,88	51,8	5,04	352	0,00	2390	0,00
0,0278	0,00	0,188	0,00	1,28	0,00	8,68	2,26	58,9	4,69	400	0,00	2710	0,00
0,0315	0,00	0,214	0,00	1,45	0,06	9,86	2,67	66,9	4,28	454	0,00	3080	0,00
0,0358	0,00	0,243	0,00	1,65	0,07	11,2	3,12	76,0	3,79	516	0,00	3500	0,00
0,0407	0,00	0,276	0,00	1,88	0,09	12,7	3,58	86,4	3,22	586	0,00		
0,0463	0,00	0,314	0,00	2,13	0,12	14,5	4,06	98,1	2,58	666	0,00		
0,0526	0,00	0,357	0,00	2,42	0,16	16,4	4,51	111	1,89	756	0,00		
0,0597	0,00	0,405	0,00	2,75	0,22	18,7	4,93	127	1,22	859	0,00		



# EK-2 SiC Toz Boyut Ölçüm Raporu

## Analysis

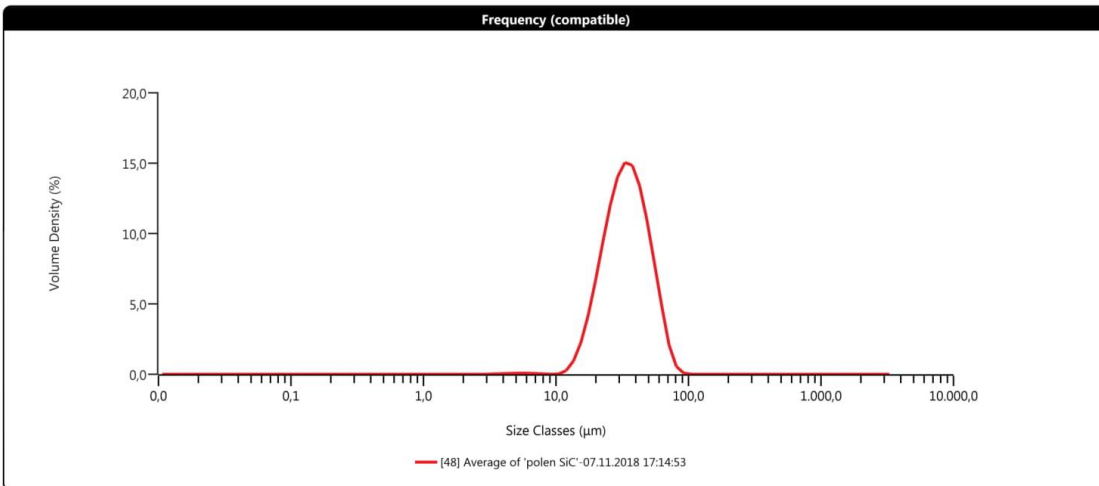
Created by: Malvern Instruments Ltd  
Last edited: 13.04.2012 18:12:51



Measurement Details	
<b>Sample Name</b> Average of 'polen SiC'	<b>Measurement Date Time</b> 07.11.2018 17:14:53
<b>Operator Name</b> cas	<b>Analysis Date Time</b> 07.11.2018 17:14:53
<b>SOP File Name</b> HydroEV.cfg	<b>Result Source</b> Averaged

Analysis	
<b>Particle Name</b> Silica (RI 1.45, AI 0.1)	<b>Particle Refractive Index</b> 1,450
<b>Dispersant Name</b> Water	<b>Dispersant Refractive Index</b> 1,330
<b>Particle Absorption Index</b> 0,100	<b>Laser Obscuration</b> 5,64 %
<b>Weighted Residual</b> 1,54 %	<b>Scattering Model</b> Mie
<b>Analysis Model</b> General Purpose	<b>Analysis Sensitivity</b> Normal

Result	
<b>Concentration</b> 0,0226 %	<b>Span</b> 1,019
<b>Uniformity</b> 0,312	<b>Result Units</b> Volume
<b>Specific Surface Area</b> 194,8 m <sup>2</sup> /kg	<b>Dv (10)</b> 20,2 µm
<b>D [3;2]</b> 30,8 µm	<b>Dv (50)</b> 33,8 µm
<b>D [4;3]</b> 35,8 µm	<b>Dv (90)</b> 54,6 µm



Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0,0100	0,00	0,0679	0,00	0,460	0,00	3,12	0,02	21,2	7,85	144	0,00	976	0,00
0,0114	0,00	0,0771	0,00	0,523	0,00	3,55	0,03	24,1	10,06	163	0,00	1110	0,00
0,0129	0,00	0,0876	0,00	0,594	0,00	4,03	0,05	27,4	11,76	186	0,00	1260	0,00
0,0147	0,00	0,0995	0,00	0,675	0,00	4,58	0,06	31,1	12,64	211	0,00	1430	0,00
0,0167	0,00	0,113	0,00	0,767	0,00	5,21	0,06	35,3	12,46	240	0,00	1630	0,00
0,0189	0,00	0,128	0,00	0,872	0,00	5,92	0,06	40,1	11,24	272	0,00	1850	0,00
0,0215	0,00	0,146	0,00	0,991	0,00	6,72	0,04	45,6	9,16	310	0,00	2100	0,00
0,0244	0,00	0,166	0,00	1,13	0,00	7,64	0,02	51,8	6,62	352	0,00	2390	0,00
0,0278	0,00	0,188	0,00	1,28	0,00	8,68	0,00	58,9	4,06	400	0,00	2710	0,00
0,0315	0,00	0,214	0,00	1,45	0,00	9,86	0,00	66,9	1,64	454	0,00	3080	0,00
0,0358	0,00	0,243	0,00	1,65	0,00	11,2	0,18	76,0	0,38	516	0,00	3500	0,00
0,0407	0,00	0,276	0,00	1,88	0,00	12,7	0,75	86,4	0,04	586	0,00		
0,0463	0,00	0,314	0,00	2,13	0,00	14,5	1,83	98,1	0,00	666	0,00		
0,0526	0,00	0,357	0,00	2,42	0,00	16,4	3,45	111	0,00	756	0,00		
0,0597	0,00	0,405	0,00	2,75	0,00	18,7	5,54	127	0,00	859	0,00		



# EK-3 B<sub>4</sub>C Toz Boyut Ölçüm Raporu

## Analysis

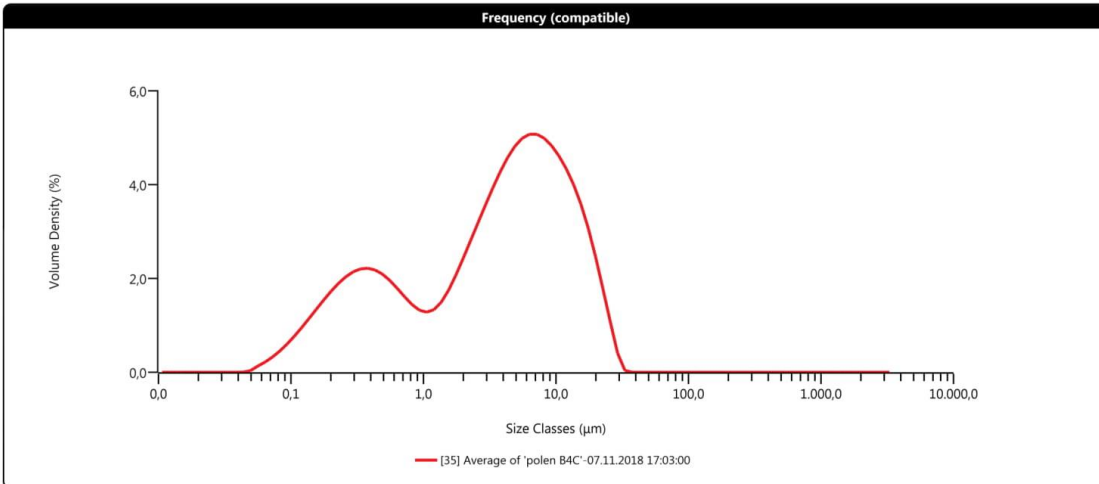
Created by: Malvern Instruments Ltd  
Last edited: 13.04.2012 18:12:51



Measurement Details	
<b>Sample Name</b> Average of 'polen B4C'	<b>Measurement Date Time</b> 07.11.2018 17:03:00
<b>Operator Name</b> cas	<b>Analysis Date Time</b> 07.11.2018 17:03:00
<b>SOP File Name</b> HydroEV.cfg	<b>Result Source</b> Averaged

Analysis	
<b>Particle Name</b> Borosilicate Glaze	<b>Particle Refractive Index</b> 1,540
<b>Dispersant Name</b> Water	<b>Dispersant Refractive Index</b> 1,330
<b>Particle Absorption Index</b> 0,100	<b>Laser Obscuration</b> 35,95 %
<b>Weighted Residual</b> 1,11 %	<b>Scattering Model</b> Mie
<b>Analysis Model</b> General Purpose	<b>Analysis Sensitivity</b> Normal

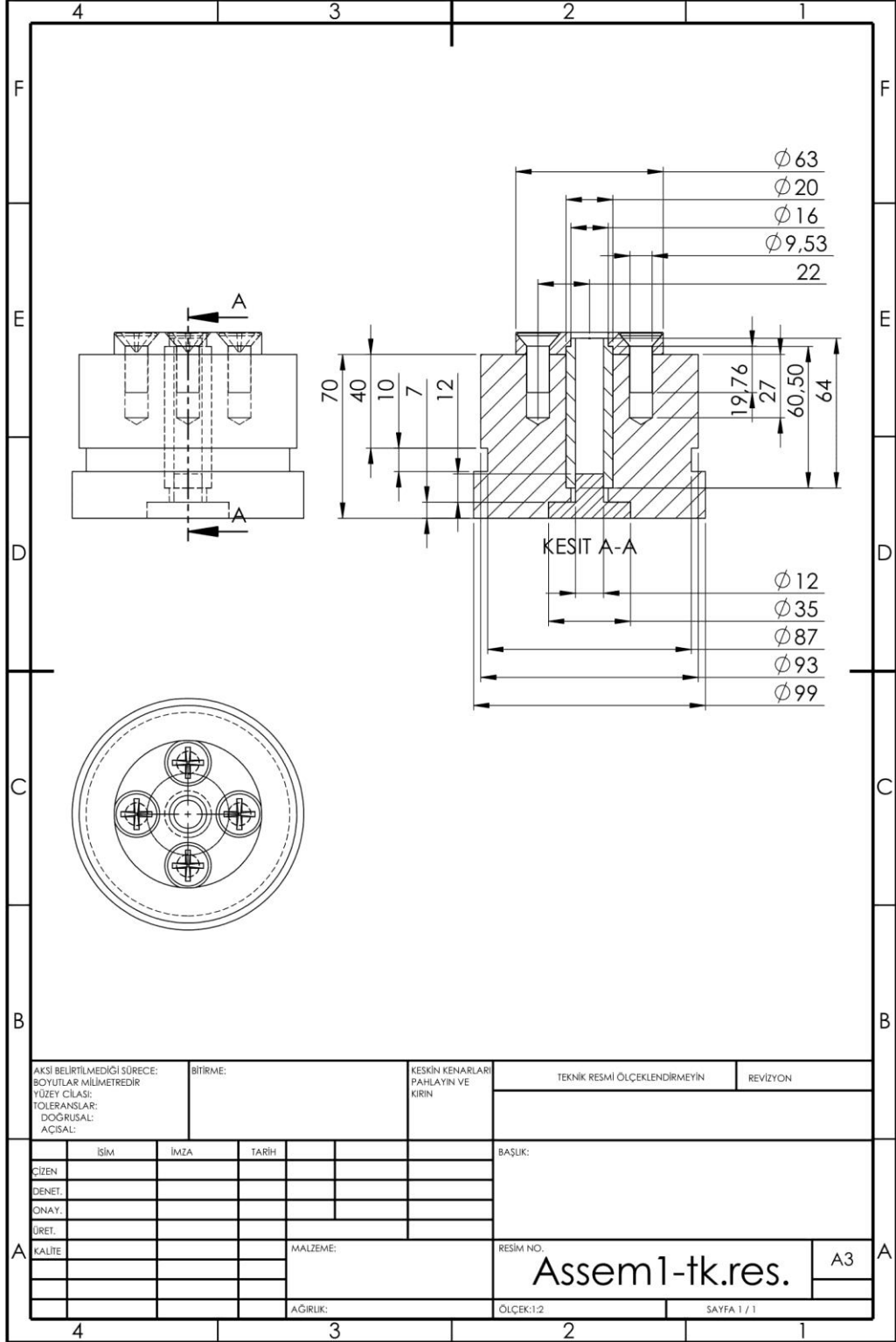
Result	
<b>Concentration</b> 0,0139 %	<b>Span</b> 3,595
<b>Uniformity</b> 1,116	<b>Result Units</b> Volume
<b>Specific Surface Area</b> 7459 m <sup>2</sup> /kg	<b>Dv (10)</b> 0,257 µm
<b>D [3;2]</b> 0,804 µm	<b>Dv (50)</b> 4,01 µm
<b>D [4;3]</b> 5,84 µm	<b>Dv (90)</b> 14,7 µm



Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In	Size (µm)	% Volume In
0,0100	0,00	0,0679	0,27	0,460	1,75	3,12	3,27	21,2	1,48	144	0,00	976	0,00
0,0114	0,00	0,0771	0,37	0,523	1,63	3,55	3,56	24,1	0,90	163	0,00	1110	0,00
0,0129	0,00	0,0876	0,50	0,594	1,49	4,03	3,81	27,4	0,32	186	0,00	1260	0,00
0,0147	0,00	0,0995	0,64	0,675	1,34	4,58	4,02	31,1	0,01	211	0,00	1430	0,00
0,0167	0,00	0,113	0,79	0,767	1,20	5,21	4,16	35,3	0,00	240	0,00	1630	0,00
0,0189	0,00	0,128	0,96	0,872	1,10	5,92	4,24	40,1	0,00	272	0,00	1850	0,00
0,0215	0,00	0,146	1,12	0,991	1,06	6,72	4,24	45,6	0,00	310	0,00	2100	0,00
0,0244	0,00	0,166	1,28	1,13	1,10	7,64	4,17	51,8	0,00	352	0,00	2390	0,00
0,0278	0,00	0,188	1,44	1,28	1,24	8,68	4,03	58,9	0,00	400	0,00	2710	0,00
0,0315	0,00	0,214	1,58	1,45	1,45	9,86	3,85	66,9	0,00	454	0,00	3080	0,00
0,0358	0,00	0,243	1,70	1,65	1,73	11,2	3,62	76,0	0,00	516	0,00	3500	0,00
0,0407	0,00	0,276	1,79	1,88	2,03	12,7	3,34	86,4	0,00	586	0,00		
0,0463	0,02	0,314	1,84	2,13	2,34	14,5	3,00	98,1	0,00	666	0,00		
0,0526	0,11	0,357	1,85	2,42	2,66	16,4	2,57	111	0,00	756	0,00		
0,0597	0,18	0,405	1,82	2,75	2,97	18,7	2,06	127	0,00	859	0,00		



EK-4 Kullanılan Kalıbın Teknik Resmi



Resim 4.1. Kullanılan kalıbın teknik resmi.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :ŞANLI, Polen  
Doğum tarihi ve yeri :09/09/1992 İzmir  
E-mail :polen.sanli@dpu.edu.tr

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora		
Yüksek Lisans		
Lisans	Uludağ Üniversitesi	2014
Lise	Karşıyaka Lisesi	2010

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-	Dumlupınar Üniversitesi	Araştırma görevlisi

Yabancı Dil :İngilizce (YDS:91,25)

### Yayımlar