T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ALÜMİNYUM MATRİSLİ NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ELİF ÖZÇATALBAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

ARALIK - 2024
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Elif ÖZÇATALBAŞ tarafından hazırlanan "**ALÜMİNYUM MATRİSLİ NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **02.12.2024** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA Gazi Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Prof. Dr. Arif UZUN Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ Gazi Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Doç. Dr. Selçuk MEMİŞ .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Elif ÖZÇATALBAŞ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALÜMİNYUM MATRİSLİ NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN EKSTRÜZYON YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

ELİF ÖZÇATALBAŞ

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ HAKAN ADA

Bu yüksek lisans tez çalışmasında AA6061 alaşımına üstün mekanik özellikler (mukavemet, sertlik, aşınma direnci) kazandırabilmek için nano boyuttaki seramik tozlardan toz metalurjisi yöntemi kullanılarak sıcak ekstrüzyon yöntemiyle tekli, ikili ve üçlü kompozit malzemeler tel çubuk olarak üretilmiştir. Çalışmada toz metalurjisi metoduyla AA6061 matrise, ağırlıkça %3; %6; %9 oranlarında B_4C, SiC ve TiC nano parçacıklar takviye edilmiş ve biyetler üretilmiştir. Üretilen biyetler daha sonra ekstrüzyon işlemine tabi tutularak tel çubuklar üretilmiştir. Ekstrüzyon ile üretim esnasında; sıcaklık, soğuma hızı ve süresi gibi farklılıklar nedeniyle mekanik özelliklerde oluşabilecek değişimlerin önüne geçmek için üretim sonrasında tüm numunelere eşit şartlarda yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Ekstrüzyon ile üretilen tel çubukların mikroyapısal karakterizasyonu aşamasında; optik mikroskop, SEM, EDS, XRD incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik karakterizasyon aşamasında ise sertlik ve aşınma testleri uygulanmıştır. Ayrıca numunelere yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması sonucunda takviye partiküllerin aşınma ve sertlik davranışını genel olarak olumlu etkilediği yorumu yapılabilir. Özellikle B_4C takviyesinin AA6061 matrisi içinde sertlik ve aşınma dayanımlarını TiC ve SiC takviye elemanlarına kıyasla daha olumlu yönde etkilediği, ayrıca hibrit yapıların yine aşınma ve sertlik davranışının tekli ve üçlü yapıya göre daha olumlu olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aşınmaya bağlı en düşük ağırlık kaybı değerlerinin %91 AA6061 + %4,5 SiC + %4,5 B_4C kompozit malzemeye ait olduğu tespit edilmiş ve 15N yükte iyileşme oranı %131 olarak hesaplanmıştır. Aynı malzemenin sertlik deneyleri sonucunda 75,7 HB ile en yüksek sertlik değeri sergilediği görülmüş ve ana malzemeye kıyasla %53,24 iyileşme olduğu tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER:AA6061, Toz Metalurjisi, Ekstrüzyon, Nanokompozit, Hibrit Kompozit

Aralık 2024, 105 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF ALUMINUM MATRIX NANOCOMPOSITE MATERIALS BY EXTRUSION METHOD

ELİF ÖZÇATALBAŞ

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. HAKAN ADA

In this master's thesis study, to impart superior mechanical properties (strength, hardness, wear resistance) to AA6061 alloy, single, binary and ternary composite materials were produced as wire rods by hot extrusion method using powder metallurgy method from nano-sized ceramic powders. In the study, B_4C, SiC and TiC nanoparticles were reinforced to AA6061 matrix by powder metallurgy method at 3%, 6%, and 9% by weight and billets were produced. The billets that were produced were then subjected to an extrusion process to produce wire rods. During production by extrusion, in order to prevent changes that may occur in mechanical properties due to differences such as temperature, cooling rate and time, all samples were subjected to an ageing process under equal conditions after production. In the microstructural characterization stage of the wire rods produced by extrusion, optical microscopes, SEM, EDS, and XRD examinations were performed. In the mechanical characterization stage, hardness and wear tests were applied. In addition, density measurements were performed on the samples. As a result of the thesis study, it can be commented that reinforcement particles generally affect the wear and hardness behaviour positively. In particular, it was determined that B_4C reinforcement affected the hardness and wear resistance more positively in the AA6061 matrix compared to TiC and SiC reinforcement elements and also that the wear and hardness behaviour of hybrid structures was more positive than single and triple structures. As a result of the experiments, it was determined that the lowest weight loss values due to wear belonged to 91% AA6061 + 4.5% SiC + 4.5% B_4C composite material and the recovery rate at 15N load was calculated as 131%. As a result of the hardness tests of the same material, it was seen that it exhibited the highest hardness value with 75.7 HB and it was determined that there was a 53.24% improvement compared to the main material.

KEYWORDS: AA6061, Powder Metallurgy, Extrusion, Nanocomposite, Hybride Composite

December 2024, 105 Page

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum yüksek lisans tez çalışmamın tüm süreçlerinde yardımını esirgemeyen, değerli fikirleri, bilgi ve deneyimleriyle çalışmalarımı yönlendiren, tezimin gelişmesi ve akademik sürecimde beni her zaman destekleyen, akademik anlamda gelişmemde bana çok şey kazandıran tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA'ya, deneysel çalışmalar yaptığım süreçte bilgi ve deneyimleri ile çalışmamda beni destekleyen ve yardımını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Arif UZUN'a, tez savunması esnasında kıymetli önerileriyle tezimin gelişmesine katkı sağlayan sayın hocam Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye, deneysel çalışmalar yaptığım süreç içerisinde yardımını esirgemeyen sayın hocam Öğr. Gör. Dr. Nihat KAYA'ya, tezimin gerek araştırma gerek deneysel süreçlerinde deneyimleri ve değerli bilgilerinden istifade ettiğim sayın hocam Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ'a, 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında bursiyeri olduğum TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB)'e, FKB-2024-9280 numaralı proje ile sağlanan katkı nedeniyle Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne, tez çalışmamda laboratuvarlarını kullandığım Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü ile Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne ve saygıdeğer hocalarına, uzun ve yorucu olan bu süreçte maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, yanımda olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilir, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ELİF ÖZÇATALBAŞ

Kastamonu, 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ... **ii**
TAAHHÜTNAME ... **iii**
ÖZET ... **iv**
ABSTRACT ... **v**
TEŞEKKÜR ... **vi**
İÇİNDEKİLER ... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ... **xiii**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ... **xiv**
1. GİRİŞ ... **1**
2. TOZ METALURJİSİ (TM) METODU ... **4**
2.1 Tozların Hazırlanması ... 4
2.1.1 Mekanik Öğütme Yöntemi ... 4
2.2 Presleme İşlemi ... 6
2.3 Sinterleme ... 6
3. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARI ... **8**
3.1 Alüminyumun (Al) Genel Özellikleri ... 8
3.2 Alüminyum Alaşımları ... 9
3.3 Dövme Alüminyum Alaşımları ... 10
3.4 Döküm Alüminyum Alaşımları ... 11
3.5 6XXX Serisi Alaşımlar ... 12
3.6 AA6061 ... 12
3.7 Alüminyum Alaşımlarının Yaşlandırılması ... 13
3.8 Alüminyum ve Toz Metalurjisi ... 15
4. KOMPOZİT MALZEMELER (KM) ... **16**
4.1 Toz Metalurjisi (TM) ve Kompozit Malzemeler (KM) ... 17
4.2 Malzeme Matrisine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması ... 17
4.3 Alüminyum Matrisli Nanokompozit Malzemeler (ANKM) ... 19
4.3.1 Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin (AMKM) Mekanik Özellikleri ... 20
4.4 Takviye Elemanlarının Kompozit Malzeme Üzerindeki Etkileri ... 20
4.4.1 Bakır (Cu) ... 21
4.4.2 Silisyum Karbür (SiC) ... 21
4.4.3 Titanyum Karbür (TiC) ... 22
4.4.4 Bor Karbür (B_4C) ... 23
5. EKSTÜZYON YÖNTEMİ ... **25**
5.1 Endirekt Ekstrüzyon ... 26
5.2 Direkt Ekstrüzyon ... 26
5.3 Ana Parametrelerin Ekstrüzyon İşlemine Etkileri ... 27
5.3.1 Ekstrüzyon Oranı ... 27
5.3.2 Çalışma Sıcaklığı ... 28
5.3.3 Ekstrüzyon Hızı ... 28
5.3.4 Malzemenin Akma Gerilmesi ... 28
5.4 Toz Metalurjisi ve Ekstrüzyon ... 29

6. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI 31
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 36
7.1 Toz Karışımların Hazırlanması 36
7.2 Biyetlerin Oluşturulması 39
7.3 Ekstrüzyon Yöntemiyle Kompozit Malzemelerin Üretilmesi 40
7.4 Üretilen Numunelerin Yaşlandırma İşlemine Tabi Tutulması 43
7.5 Numunelerin Deneysel Çalışmalara Hazırlanması 44
8. BULGULAR VE TARTIŞMA 46
8.1 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları 46
8.2 Mikroyapı İncelemeleri 48
8.2.1 Optik Mikroskop İncelemeleri 48
8.2.2 SEM ve EDS incelemeleri 58
8.3 XRD incelemeleri 82
8.4 Sertlik Sonuçları 84
8.5 Aşınma Analizleri 87
9. SONUÇLAR 94
KAYNAKLAR 96
ÖZGEÇMİŞ 105

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 TM metodunun aşamaları 7
Şekil 3.1 AA'ların kullanım alanları 9
Şekil 5.1 Ekstrüzyon yönteminin şematik gösterimi 25
Şekil 7.1 Çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri 36
Şekil 7.2 Tozların karıştırılmadan önceki hali b) Retsch marka PM100 model olan bilyeli öğütücü 39
Şekil 7.3 21 numaralı alaşımın (%94 AA6061; %2 SiC; %2 B_4C; %2 TiC) karıştırma işlemi sonrasındaki SEM görüntüsü 39
Şekil 7.4 a) soğuk presleme işlemi b) presleme sonrasında oluşan biyet 40
Şekil 7.5 Fırın içerisindeki kalıp ve biyetin görüntüsü 41
Şekil 7.6 Olumsuz ekstrüzyon görüntüsü 41
Şekil 7.7 Ekstrüze edilen bir biyetten üretilen tel çubuğun görüntüsü 42
Şekil 7.8 Ekstrüzyon işlemi tamamlanmış numunelerin görüntüsü 43
Şekil 7.9 Yaşlandırma işlemine tabi tutulan numuneler 44
Şekil 7.10 a) Metkon Metapress marka bakalite alma cihazı, b) Bakalite gömülü numune, c) Zımparalama işlemi, d) Parlatılmış numune 45
Şekil 7.11 a)Weck's dağlama çözeltisi, b) Dağlanmış numune 45
Şekil 8.1 Numunelere ait bağıl yoğunluk grafiği 47
Şekil 8.2 Numunelere ait gözeneklilik grafiği 47
Şekil 8.3 AA6061'e ait ekstrüzyon yönündeki OM görüntüleri a)500X, b) 1000X 48
Şekil 8.4 AA6061'e ait ekstrüzyon yönüne dik doğrultuda alınan OM fotoğrafı, 500X büyütme 49
Şekil 8.5 %97 AA6061 + %3 SiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X, b) 1000X 49
Şekil 8.6 %94 AA6061 + %6 SiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X, b) 1000X 50
Şekil 8.7 %91 AA6061 + %9 SiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X, b) 1000X 50
Şekil 8.8 %97 AA6061 + %3 B_4C SiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X, b) 1000X 50
Şekil 8.9 %94 AA6061 + %6 B_4C içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X, b) 1000X 51
Şekil 8.10 %91 AA6061 + %9 B_4C içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme 51
Şekil 8.11 %97 AA6061 + %3 TiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme 52
Şekil 8.12 %94 AA6061 + %6 TiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme 52
Şekil 8.13 %91 AA6061 + %9 TiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme 52
Şekil 8.14 %97 AA6061 + %1,5 SiC +%1,5 B_4C içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme 53

Şekil 8.15 %94 AA6061 + %3SiC +%3 B_4C içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme 53
Şekil 8.16 %91 AA6061 + %4,5 SiC +%4,5 B_4C içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme 53
Şekil 8.17 %97 AA6061 + %1,5 B_4C + %1,5 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme 54
Şekil 8.18 %94 AA6061 +%3 B_4C + %3 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme 54
Şekil 8.19 %91 AA6061 + %4,5 B_4C + %4,5 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme 55
Şekil 8.20 %97 AA6061 + %1,5 SiC + %1,5 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme 55
Şekil 8.21 %94 AA6061 + %3 SiC + %3 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme 56
Şekil 8.22 %91 AA6061 + %4,5 SiC + %4,5 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme 56
Şekil 8.23 %97 AA6061 +% 1 SiC + %1 B_4C +%1 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme 57
Şekil 8.24 %94 AA6061 + %2 SiC + %2 B_4C + %2 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme 57
Şekil 8.25 %91 AA6061 +%3 SiC + %3 B_4C + %3 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme 57
Şekil 8.26 AA6061'e ait SEM görüntüleri a) 5000X, b) 2500X c) 1200X 59
Şekil 8.27 AA6061'e ait EDS grafik ve sonuçları 59
Şekil 8.28 SiC içeren NKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %3 SiC, b) %6 SiC c) %9 SiC 60
Şekil 8.29 %3 SiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 60
Şekil 8.30 %6 SiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 61
Şekil 8.31 %9 SiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 62
Şekil 8.32 B_4C içeren NKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %3 B_4C b) %6 B_4C c) %9 B_4C 63
Şekil 8.33 %3 B_4C içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 63
Şekil 8.34 %6 B_4C içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 64
Şekil 8.35 %9 B_4C içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 65
Şekil 8.36 TiC içeren NKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %3 TiC, b) %6 TiC c) %9 TiC 65
Şekil 8.37 %3 TiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 66
Şekil 8.38 %6 TiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 67
Şekil 8.39 %9 TiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 68
Şekil 8.40 SiC ve B_4C içeren HNKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %1,5 SiC-%1,5 B_4C b) %3 SiC-%3 B_4C c) %4,5 SiC-%4,5 B_4C 69
Şekil 8.41 %1,5 SiC - %1,5 B_4C içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 70
Şekil 8.42 %3 SiC - %3 B_4C içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 71
Şekil 8.43 %4,5 SiC - %4,5 B_4C içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 72
Şekil 8.44 6 B_4C ve TiC içeren HNKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %1,5 B_4C- %1,5 TiC b) %3 B_4C- %3 TiC c) %4,5 B_4C- %4,5 TiC 73
Şekil 8.45 %1,5 B_4C-%1,5 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 74

Şekil 8.46 %3 B_4C-%3 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 75
Şekil 8.47 %4,5 B_4C-%4,5 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 76
Şekil 8.48 SiC ve TiC içeren HNKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %1,5 SiC- %1,5 TiC b) %3 SiC- %3 TiC c) %4,5 SiC- %4,5 TiC 77
Şekil 8.49 %1,5 SiC-%1,5 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 77
Şekil 8.50 %3 SiC-%3 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 78
Şekil 8.51 %4,5 SiC-%4,5 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 78
Şekil 8.52 SiC, B_4C, TiC içeren HNKM'lere ait 5000X büyütmeki SEM görüntüleri a) %1 SiC-%1 B_4C-%1 TiC b) %2 SiC-%2 B_4C-%2 TiC c) %3 SiC-%3 B_4C-%3 TiC 79
Şekil 8.53 %1 SiC-%1 B_4C-%1 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 79
Şekil 8.54 %2 SiC-%2 B_4C-%2 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 80
Şekil 8.55 %3 SiC-%3 B_4C-%3 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları 81
Şekil 8.56 AA6061 ve en yüksek takviye oranına sahip NKM'lerin XRD grafikleri 83
Şekil 8.57 İkili HNKM'lerin XRD grafikleri 83
Şekil 8.58 Üçlü HNKM'lerin XRD grafikleri 84
Şekil 8.59 Sertlik test cihazı ekran görüntüsü 85
Şekil 8.60 Sertlik sonuç grafiği 85
Şekil 8.61 5N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonucuna bağlı ağırlık kaybı grafiği 87
Şekil 8.62 10N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonucuna bağlı ağırlık kaybı grafiği 88
Şekil 8.63 15N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonucuna bağlı ağırlık kaybı grafiği 89
Şekil 8.64 Aşınma testi sonrası AA6061'in SEM görüntüsü 90
Şekil 8.65 Aşınma testi sonrası SiC takviyeli NKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %3 SiC b) %94 AA6061 + %6 SiC + %91 AA6061 + %9 SiC 91
Şekil 8.66 Aşınma testi sonrası B_4C takviyeli NKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %3 B_4C b) %94 AA6061 + %6 B_4C + %91 AA6061 + %9 B_4C 91
Şekil 8.67 Aşınma testi sonrası TiC takviyeli NKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %3 TiC b) %94 AA6061 + %6 TiC + %91 AA6061 + %9 TiC 91
Şekil 8.68 Aşınma testi sonrası SiC ve B_4C takviyeli HNKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %1,5 SiC + %1,5 B_4C b) %94 AA6061+ %3 SiC + %3 B_4C c) %91 AA6061+ %4,5 SiC + %4,5 B_4C 92
Şekil 8.69 Aşınma testi sonrası B_4C ve TiC takviyeli HNKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %1,5 B_4C + %1,5 TiC b) %94 AA6061+ %3 B_4C + %3 TiC c) %91 AA6061+ %4,5 B_4C + %4,5 TiC 92
Şekil 8.70 Aşınma testi sonrası SiC ve TiC takviyeli HNKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %1,5 SiC + %1,5 TiC b) %94

AA6061+ %3 SiC + %3 TiC c) %91 AA6061+ %4,5 SiC + %4,5 TiC 92
Şekil 8.71 Aşınma testi sonrası SiC, TiC ve takviyeli HNKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %1 SiC + %1 B_4C %1 TiC, b) %94 AA6061+ %2 SiC + %2 B_4C %2 TiC c) %91 AA6061+ %3 SiC + %3 B_4C + %3 TiC 93

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 Alüminyum dövme alaşımların kodlandırılması ve ısıl işlem kabiliyeti 10
Tablo 3.2 Döküm Alüminyum alaşımlarının gösterimi 11
Tablo 3.3 AA6061'in kimyasal bileşimi 12
Tablo 3.4 AA6061'in fiziksel ve mekanik özellikleri 13
Tablo 7.1 Çalışmada kullanılan ana matris malzemesi AA6061'in kimyasal kompozisyonu 37
Tablo 7.2 Çalışmada kullanılan tozların genel özellikleri 37
Tablo 7.3 Çalışmada kullanılan tozların karışım oranları 37
Tablo 7.4 Çalışmada kullanılan tozların karışım oranları 38

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	**:** Santigrat derece
Al	**:** Alüminyum
Al_2O_3	**:** Alüminyum oksit
B_4C	**:** Bor karbür
Cu	**:** Bakır
Mg	**:** Magnezyum
Ni	**:** Nikel
Si	**:** Silisyum
SiC	**:** Silisyum karbür
Ti	**:** Titanyum
TiC	**:** Titanyum karbür

Kısaltmalar

AA	**:** Alüminyum alaşım
AA6061	**:** Alüminyum 6061
AMKM	**:** Alüminyum matrisli kompozit malzemeler
EDS	**:** Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
HAMKM	**:** Hibrit alüminyum matrisli kompozit malzemeler
HNKM	**:** Hibrit nanokompozit malzemeler
KM	**:** Kompozit malzeme
MMKM	**:** Metal matrisli kompozit malzemeler
NKM	**:** Nano kompozit malzeme
SEM	**:** Taramalı elektron mikroskop
TM	**:** Toz metalurjisi
Vb.	**:** ve benzeri
XRD	**:** X-ışını Difraksiyonu

1. GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti ve korozyon direnci, kolay şekillendirilebilme özeliklerine sahip olan Alüminyum Alaşımları (AA) sıklıkla kullanılan hafif bir yapı malzemesidir (Dai, vd., 2019; Mavi, vd., 2021; Zhang, vd., 2023; Zhu, vd., 2019). AA6061 esaslı kompozit malzemelerin (KM) farklı takviye elementleriyle alaşımlandırabilmesi ve ana matris olan Alüminyum (Al) matrisinin sahip olduğu yüksek korozyon ve aşınma dirençlerinin yanı sıra iyi kaynaklanabilirliği, işlenebilirliği, yüksek mukavemeti ve düşük maliyetlerle üretime elverişli olması diğer alternatif malzemelere göre kullanımlarını daha avantajlı hale getirmiştir (Awate ve Barve, 2022; Barve, 2022; Li, vd., 2016). Metalurji ve malzeme mühendisliği alanında gerçekleştirilen akademik çalışmalar, ana malzemenin üzerinde yeni kombinasyonlar ile malzemedeki özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla yapılır (Gupta, vd., 2022). Al ve alaşımları takviyelendirildiğinde, elde edilen KM'lerin ana matristen daha işlevsel ve mekanik olarak daha güçlü hale geldiği bilinmektedir. Alüminyum matrisli kompozit malzemeler (AMKM), otomobil sektörünün yanında uzay- havacılık ve savunma sanayinde yoğunlukla kullanılmaktadır (Senthilkumar, vd., 2012). Bunun yanı sıra dişli kutuları, uçak parçaları, pervaneler gibi daha teknolojik uygulama alanlarında da tercih edilen malzemelerdir (Mallikarjuna, vd., 2017; Verma, vd., 2022). Ancak AMKM'ler mikroyapılarındaki zorlu homojenizasyondan kaynaklı düşük aşınma dayanımları sebebiyle bazı endüstriyel alanlarda kullanımda yetersizlik gösterebilmekte ve bu durumları iyileştirmek amacıyla bazı takviye elementlerine gereksinimler oluşabilmektedir (Okumus, vd. 2012). Seramik esaslı parçacıkların yüksek aşınma dayanımı, akma dayanımı, yorulma dayanımı ve sertlik değerlerine sahip olması ve Al esaslı malzemelerle kombine edilebilmesi, bu tür KM'lere olan ilgiyi her geçen gün artırmaktadır (Sinclair ve Gregson, 1997). AA'larnın daha iyi mekanik ve metalurjik özelliklere sahip olması adına silisyum karbür (SiC), titanyum karbür (TiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), bor karbür (B_4C), karbon nanotüpler ve grafit gibi parçacıklar farklı şekil ve boyutlarda takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır (Christy, vd., 2010; Dolata-Grosz ve Wieczorek, 2010; Macke, 2012; Mahendra ve Radhakrishna, 2010; Miracle, 2005; Surappa, 2003). Bu takviye elemanları arasında SiC, B_4C ve TiC gibi parçacıklarla

takviyelendirilen AMKM'ler mukavemet ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri geliştirme hususlarında sıklıkla kullanılır (Christy, vd., 2010; Kumar, vd., 2021; Macke, 2012; Morampudi, vd., 2021; Morampudi, vd., 2022; Ravichandran, vd., 2014; Surappa, 2003; Verma, vd., 2022). Ayrıca seramik esaslı takviyeler diğer takviye elemanlarına nazaran daha yüksek dayanıma sahiptirler ve bu malzemelere hibrit kompozit malzeme (HKM) üretiminde sıklıkla başvurulur (Mohanavel, vd., 2016; Verma, vd., 2022). AA'larına daha güçlü ve daha özgün özellikler kazandırmak adına matris içine ikili takviye elemanı eklenmesi durumunda hibrit alüminyum matrisli kompozit malzemeler (HAMKM) oluşturulmaktadır (Kumar, vd., 2021; Sharun, vd., 2022). Yapılan literatür araştırmalarında son yıllarda, AMKM'lere ikili (hibrit) parçacık takviyesinin malzeme üzerinde mekanik dayanım ve aşınma sürecini iyileştirdiği hususu birçok çalışmada ifade edilmiştir (Jayaprakash, vd., 2021; Kishore, vd., 2019; Muruganandam, vd., 2020; Ravichandran, vd., 2014).

Son zamanlarda, bilim adamları yeni tür metal matrisli nanokompozitleri (MMNK) araştırmaktadır. MMNK'ler termal, mekanik, elektrik, havacılık ve otomobil endüstrileri alanında seramik bazlı geleneksel kompozitlere göre son derece üstün özellikler göstermektedir. Araştırmacılar bu özellikleri belirlemek için yaptıkları araştırmalarda farklı sonuçlar elde etmişlerdir. Literatür araştırmaları bölümünde bahsedilen çalışmalardan da görüleceği üzere; Al matrisli olmak üzere B_4C, SiC ve TiC takviyeli KM'lerin toz metalurjisi (TM) ve ekstrüzyon yöntemiyle üretimi konusunda birbirinden farklı birçok çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışmasında diğer çalışmalardan farklı olarak AA6061 matrisli KM üretiminde, takviye parçacıkları olarak nano boyuttaki SiC, B_4C ve TiC tozlarıyla tekli, ikili ve üçlü KM'ler üretilmiştir. Bu konuda yapılan literatür çalışmaları bilgi dahilinde ya çok az ya da sınırlıdır. Çalışmanın, AA6061 matrisin hem nano boyutta, hem hibrit, hem de seramik özellik gösteren takviye parçacıklarla KM olarak üretilmesiyle, hibrit nanokompozit malzemelerin (HNKM) üretimine farklı bir bakış açısı getireceği düşünülmektedir. Bu çalışma ile özellikle savunma sanayi ve uzay – havacılık endüstrisinde yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğu nedeniyle tercih edilen AMKM'lere SiC, B_4C ve TiC parçacıklarının monolitik veya hibrit olarak katkılanıp sıcak ekstrüzyon yöntemiyle HNKM olarak üretilmiştir. Bu sayede üretilen yenilikçi malzemelere kazandırılan yeni mikroyapısal ve mekanik özelliklerin tespit edilmesi planlanmıştır. Böylece hem

monolitik, hem de hibrit olarak nanopartiküllerle kuvvetlendirilen yeni nesil AMKM'ler yük ve/veya sürtünme durumlarına karşı daha dirençli hale getirilerek, malzemelerin kullanım ömrü arttırılabilecektir. Çalışma bu yönüyle yenilik ve özgün değer açısından literatürdeki birçok çalışmadan farklılık arz etmektedir.

Bu amaçlar doğrultusunda; bu çalışmada, AA6061/B_4C, AA6061/SiC, AA6061/TiC, AA6061/B_4C/SiC, AA6061/B_4C/TiC, AA6061/SiC/TiC ve AA6061/B_4C/SiC/TiC KM'ler öncelikle TM yöntemi ve soğuk presleme ile biyet olarak üretilmiş, sonraki aşamada üretilen biyetler sıcak ekstrüzyon yöntemiyle tel çubuk haline getirilmiştir. En son aşamada ise; tel çubuk halindeki KM'lerin mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonu karşılaştırmalı test ve analizlerle performans değerlendirmesine tabi tutulmuştur.

2. TOZ METALURJİSİ (TM) METODU

TM; otomotiv sistemleri, havacılık, medikal ve elektronik gibi birçok endüstride kullanılan metal parçaların toz halinde iken işlenmesi ve bunların uygun sıcaklıklarda sıkıştırılması ile metal ürün elde etmeye yarayan bir prosestir. Daha az atık üretimi, farklı takviye malzemeleri ile karıştırılması ve özel niteliklere sahip malzeme üretimi konularında diğer üretim yöntemlerine göre daha avantajlıdır. TM'nin sağladığı diğer önemli bir avantaj ise; farklı özelliklerdeki malzemelerin bir araya getirilerek özel uygulamalar için yeni malzemeler üretmektir. Örneğin, yüksek sıcaklığa dayanıklı, yüksek korozyon direncine sahip, hafif ve daha dayanımlı malzemeler bu yöntemle üretilebilir.

2.1 Tozların Hazırlanması

TM kullanımında temel amaç küçük boyutlu parçacıkların daha yüksek yüzey alanlarına sahip olarak oluşturulmasıdır. Bu hususta oluşturulan tozların kalitesi nihai ürünü etkilediğinden ergime ve tutuşma sıcaklıkları, soğuma hızları, özgül ağırlıkları ve ısıl iletkenliklerinin farklı olması farklı toz üretim tekniklerini de ortaya çıkarmıştır. Metalik tozların üretim yöntemleri şunlardır:

- Mekanik öğütme yöntemi,
- Kimyasal yöntemler,
- Elektroliz yöntemi,
- Atomizasyon yöntemleri

2.1.1 Mekanik Öğütme Yöntemi

Bu yöntemde, bir karıştırıcı içerisinde tozların ağırlıkça belirli olan bilyeler vasıtasıyla karıştırılması sağlanır. Karıştırma esnasında tozlar plastik deformasyona uğramaktadır. Bilya ve tozların çarpışması, çarpışan bilyalar arasında biriken tozların

da çarpışması neticesinde kaynama ve kırılma olayları gerçekleşir. Bu kırılma olayı neticesinde tozların boyutları küçülür ve yüzey/hacim oranlarında artış meydana gelir. Karıştırılan tozların üzerinde biriken oksit tabakalarda kırılma olacağından toz yüzeylerindeki filmlerin de kırılması ile beraber tozlar, atomik boyutlarda daha temiz hale gelmektedir. Aktif olan toz parçacıkları kaynak ve kırılma döngülerini sürdürerek homojen bir dağılım sergilemektedir. İki bilya çarpıştığında bilyalar arasında takriben 0,2 mg ağırlığında yaklaşık 1000 parçacık sıkışmaktadır. Mekanik öğütmenin ilk safhalarında toz parçacıkları genellikle yumuşaktır. Toz parçacıklarda aşınmalar meydana geldiğinden atomlar birbirine yaklaşır ve bu sebeple birbirleri arasında kaynama ve büyük parçacıklar haline dönüşme durumu söz konusu olur. Bilyalar vasıtasıyla oluşan çarpışma kuvvetlerinin sonucunda oluşan deformasyonlar devam ettikçe; toz parçacıklarda deformasyon sertleşmesi görülür ve kırılmalar meydana gelir. Bu sürecin devam etmesiyle beraber toz parçacıklarını birleştiren bir kuvvet olmadığından süreç boyunca boyutları küçülmeye devam eder (Uddin, vd., 2015).

Mekanik alaşımlama veya öğütme, metal tozlarının mekanik anlamda karıştırılmasını, öğütülmesini sağlamak adına gerçekleştirilen ve KM oluşturmak adına yapılan önemli bir prosestir. Oluşan KM'de istenilen fazların meydana gelebilmesi için bazı parametrelere dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu parametreler;

- Toz boyutu ve şekli
- Öğütme süresi
- Dönüş hızı
- Presleme basıncı
- Atmosfer kontrolü
- Bilya/toz oranı

şeklindedir. Örneğin toz boyutlarının belirlenmesi sırasında daha küçük toz parçacıklarının seçilmesi ve daha uzun sürelerde karıştırılmasıyla daha homojen bir

mikroyapıya sahip KM üretimi gerçekleştirilebilir. Düzgün ve homojen toz şekilleri, karışmış tozların daha akışkan ve kolay preslenebilme kabiliyetlerini arttırır. Optimum basınçta preslenmiş bir toz karışımı daha yoğun basınca sahip bir biyet oluşturmaktadır. Tozların karıştırılmasında genellikle Azot (N) ve Argon (Ar) gazları vasıtasıyla atmosfer kontrolü sağlanır böylelikle toz yüzeylerindeki oksitlenme ihtimali de önlenir.

2.2 Presleme İşlemi

Karıştırılan tozların kompakt bir forma gelmesini sağlayan presleme işlemi, bir kalıp, iki zımba ve sert bir itici parça ile tozların sıkıştırılmasını içerir. Soğuk presleme oda sıcaklığında gerçekleştirilen bir işlemdir. Çalışma kolaylığı, seri üretim, boyutsal kontrol ve yüksek basınçta sıkıştırma işlemlerinin yapılabilmesi soğuk presin avantajlarındandır (Karomatullozoda, 2018).

Sıcak presleme tekniği ise, tozların sıcaklık ve basınç altında malzemenin kristal yapısında daha düzgün bir form elde edilmesi adına yapılan bir işlemdir. Bu teknikte toz, kalıp ya da ikisi birden sıkıştırma işleminden önce ısıtılmaktadır. Genellikle toz sıkıştırma uygulamalarında tozun ve kalıbın sıcaklığı 150°C olacak şekilde ayarlanır ve 700 MPa basınç altında sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Sıcak presleme işleminde tozlar ergime sıcaklığının yarısı ya da daha üstünde olacak şekilde ısıtılarak kalıp içinde sıkıştırma yapılır.

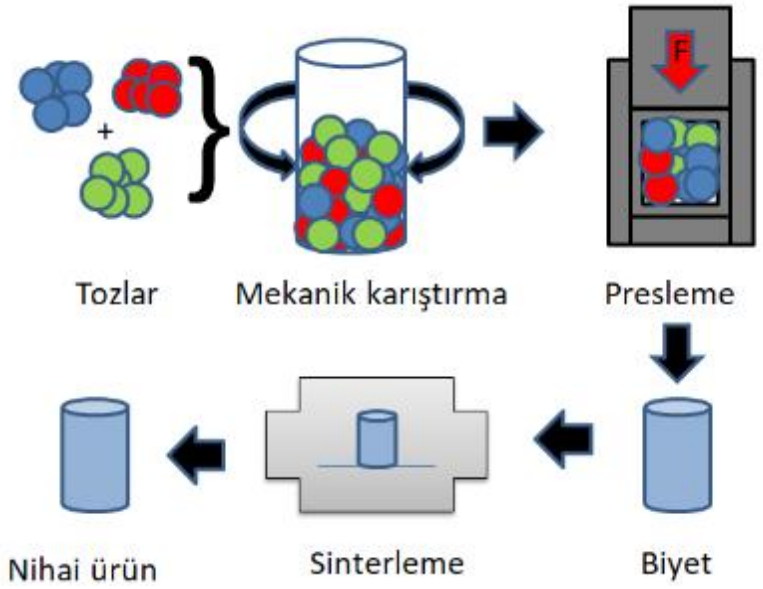
2.3 Sinterleme

Sinterleme ısıl işlemi toz metalin ergime sıcaklık noktasının %70 - %90 aralığındaki bir sıcaklık değerinde, belirli bir sürede ısıtılması ve tutulması işlemidir. Bu işlem atmosferik veya vakumlu ortamlarda yapılabilir (Vavi ve Chak, 2018). Sıkıştırılmış metal tozlarında ham parça içinde atomlar arası bağlar zayıf durumdadır ve malzeme tozları birbirini tutacak kadar yapısal bağa sahiptir. Sinterleme işlemi sonrasında oluşan bağlar malzeme için gerekli dayanımı oluşturur. Ayrıca malzeme içindeki bireysel yapılar kaybolur ve malzeme bütüncül bir karaktere sahip olur. Sinterleme işleminin amaçlarından biri de malzeme üzerindeki gözeneklilik durumunu en aza indirmektir (Mohanavel, vd., 2016). Bununla beraber malzemenin karıştırma ve

presleme işleminde kullanılan yağlayıcıların malzeme matrisinin yapısından atılması ve bununla beraber oluşan yeni malzemenin saflığını koruması da sağlanır (Sharun, vd., 2022).

Sinterleme işleminden önce preslenen tozlarda farklı yüzey alanlarına sahip birçok toz parçacıkları bulunmaktadır. Bu sebeple sadece sıkıştırma işlemi görmüş biyetlerin yüzey alanı oldukça büyüktür. Malzemeye uygulanan sinterleme işlemi sonrasında malzeme içindeki taneler ısının etkisiyle büyür, taneler arasında bağlar oluşur ve malzeme üzerindeki yüzey alanı azalır ve yüzey enerjisi düşer.

Şekil 2.1'de TM metodunun aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



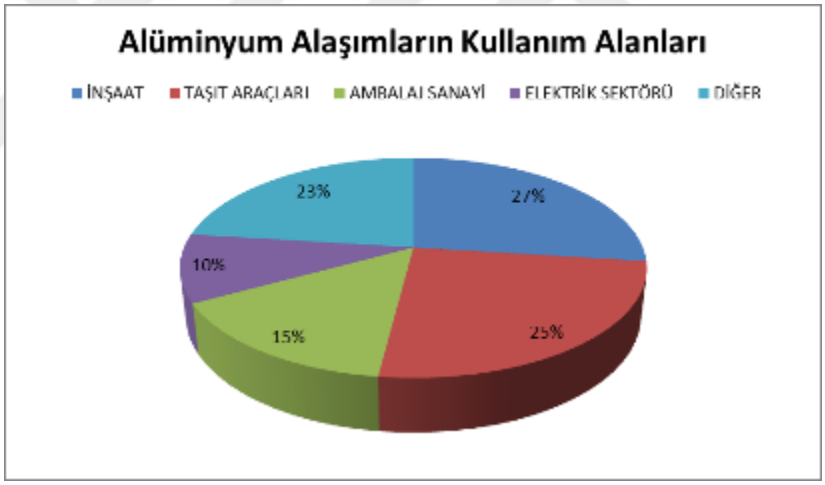
Şekil 2.1 TM metodunun aşamaları

3. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARI

3.1 Alüminyumun (Al) Genel Özellikleri

Al düşük yoğunluğa (2,63 g/cm^3) sahip ve korozyona karşı direnci yüksek bir elementtir. Sahip olduğu özelliklerin yanında fiyatının diğer malzemelere göre daha düşük olması birçok imalat sektöründe kullanılmasına neden olmaktadır. Üzerindeki Al_2O_3 oksit tabakası sayesinde ana metal üzerinde korozyon oluşma durumuna direnç gösterir. Saf haldeki Al'a uygulanan ısıl işlemler ve KM oluşturma işlemleriyle yüksek mukavemet ve dayanım gerektiren sektörlerde kullanımı çok daha fazladır. Bu dayanım 690 MPa'ya kadar çıkabilmektedir. Al alaşımlarının dayanım/yoğunluk oranı yüksek olduğu için; uçak, havacılık, ulaşım sanayiinde yoğunlukla kullanılmaktadır. Al malzemelerin elektrik iletkenliği de (bakır malzemenin yaklaşık %65'i) fazla olduğundan sektörde Bakır (Cu) ile rekabet halindedir. Sahip olduğu bu iletkenlik özelliği sayesinde elektrik iletkenliği/yoğunluk oranı diğer metallere nazaran oldukça fazladır. Bundan dolayı yüksek gerilim hatlarında Cu'nun yerine kullanıldığı da görülmektedir. Al'in sahip olduğu en önemli özelliklerden biri de üzerindeki oksit tabakası nedeniyle gösterdiği yüksek korozyon direncidir. Al malzemeler demir esaslı malzemelere göre daha aktif bir yapıda olmasına rağmen, demir esaslı malzemelere göre çok daha fazla korozyon dayanımı gösterir. Kuru atmosfer ortamında Al'in üzerinde 2,5-3,0 mm Al_2O_3 oksit tabakası oluşmaktadır. Bu tabakanın kalınlığı ortamdaki nem miktarıyla doğru orantılıdır. Ortamdaki nem miktarı arttığında Al üzerinde oluşan oksit tabakanın kalınlığı da artar. Bu tabaka doğal yöntemlerle oluşsa da yapay yöntemler ile de oluşturulabilir. Soğuk bir ortamda deformasyona uğratılabilmesi, ince tabakalar haline getirilebilmesi ve ısı iletiminin fazla olması Al – AA'yı daha avantajlı hale getirmektedir. Al'in oksijene olan ilgisinin yüksek olması, kaynak - lehim işlemlerinin diğer metallere nispeten zor olması, bazlara ve hidroksitlere karşı dayanımının düşük olması Al'in dezavantajlarındandır (Dobrzański, vd., 2005). Al sahip olduğu karakteristik özellikleri sayesinde uzay, havacılık ve savunma sanayi ile metal imalatının çoğu alanında yoğunlukla kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra pencere, kapı imalatı, kablo, perçin, boru üretimi, mutfak aletleri gibi farklı alanlarda da kullanılmaktadır. Al tozunun boya

malzemelerine eklenmesi halinde kaplama yapılacak malzemeler için korozyon kaplama işlemi de yapılabilmektedir. Al alaşımları hafif olması sebebiyle Cu ve çelik üretiminin yerini almıştır. AA'ların günümüzde kullanımı; %27 oranında inşaat, %25 oranında taşıt araçlar, %15 oranında ambalaj sanayi ve %10 oranında da elektrik sektöründedir (Şekil 3.1). Günümüzde üretilen Al'in dörtte biri ulaşım sektöründe kullanılmaktadır. Bunun sebebi Al'in hafif bir malzeme olmasından kaynaklanır. Al düşük yoğunluğa sahip olması sebebiyle ulaşımda istenen hız ve yakıt tüketimi için elverişli ortamlar sağlar. Bir otomobilde yaklaşık olarak 70-90 kg civarında Al kullanılmaktadır. Bunun yerine çelik vb. malzeme kullanımı durumunda kullanılacak malzeme miktarında artış ve maliyet yükselmesi de kaçınılmaz olacaktır. Al, bu özellikleri sayesinde özellikle hava araçları üretiminde de sıklıkla kullanılmaktadır. Örneğin bir uçakta kullanılan metal miktarının yüzde %70'ini Al oluşturmaktadır (Kurtoğlu, 2019; Yalçın ve Gürü, 2012).



Şekil 3.1 AA'ların kullanım alanları

3.2 Alüminyum Alaşımları

Saf Al'in belirli alanlar dışında endüstride kullanımı kısıtlıdır. Al, saf halden daha çok alaşım halinde kullanılır. Saf Al'e alaşım elementlerinin eklenmesiyle AA'lar elde edilir. Alaşım elementleri eklenmesinin başlıca sebepleri arasında; malzemenin kaynak yeteneğini, mekanik dayanımını ve korozyon direncini arttırmak gelebilir. Al'e eklenen bazı takviye malzemeleri, malzemenin akışkanlığını artırarak, yırtılma eğilimini de azaltmaktadır (Metin, 1973). Günümüzde düşük yoğunluğunun yanı sıra, yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci, kolay işlenebilirlik, geri

dönüştürülebilme, yüksek seviyede ısı ve elektrik iletimine sahip olabilme gibi üstün özellikleri sayesinde AA'lar imalat sanayiinde birçok kullanım alanına sahiptir (Dai, vd., 2019; Mavi, vd., 2021; Zhu, vd., 2019). AA'lar kendi aralarında iki sınıfa ayrılmaktadır.

3.3 Dövme Alüminyum Alaşımları

Dövme AA'lar genellikle çok iyi işlenebilme özelliğine sahiptir (Bican ve Pul, 2021). Simgeleme metodu, Alüminyum Birliği tarafından hazırlanan ve alaşımları kodlamak adına kullanılan bir metottur. Bu metot 4 rakamdan oluşur. Baştaki iki rakam temel alaşım elementinin hangi elementi içerdiğini ifade etmektedir. Sondan kullanılan 2 rakam ise %99 oranının noktadan sonraki değerini göstermektedir. Alüminyum dövme alaşımlarının kodlandırılması ve ısıl işlem kabiliyetleri Tablo 3.1'de verilmiştir (Ök, 2021).

Tablo 3.1 Alüminyum dövme alaşımların kodlandırılması ve ısıl işlem kabiliyeti

Seri	Temel alaşım elementi	Isıl işlem kabiliyeti
1XXX	>%99 saflıkta Al	Yok
2XXX	Cu	Var
3XXX	Mn	Yok
4XXX	Si	Yok
5XXX	Mg	Yok
6XXX	Si-Mg	Var
7XXX	Zn	Var
8XXX	Diğer elementler	Var

Numaralandırılan alaşımlarda birinci rakam alaşımın türünü, ikinci rakam alaşım kompozisyonun değişim değerini, son iki rakam ise farklı alaşımları tanımlamak adına kullanılmaktadır (Ünal, 1987). Al matrisine ilave edilen takviye elementleri mukavemeti iki şekilde arttırmaktadır.

- Deformasyon yolu ile sertleşen alaşımlarda katı eriyik olarak çözülüp sertlik artışı sağlamak

- Yaşlandırma ısıl işlemi kabiliyeti olan alaşımlarda yüksek sıcaklıkta katı eriyik olarak çözünüp daha düşük sıcaklıkta çökelerek sertlik artışı sağlamak (Ayvaz, 2010).

3.4 Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm AA'lar silisyum (Si) içeren gruplardan gelir. Alaşım içerisinde Si'nin bulunmasından dolayı malzeme düşük ergime noktasına sahip olur ve iyi akışkanlık gösterir bu da malzemeye iyi dökülebilme kabiliyeti sağlar. 2XX.X, 3XX.X ve 7XX.X alaşımlarına ise ısıl işlem uygulanabilmektedir (Davis, 1993). Dövme alaşımlarında olduğu gibi bazı döküm alaşımlarına da ısıl işlemler uygulanabilmektedir. Bu özelliklerin yanı sıra Al döküm alaşımlar yüksek korozyon direnci ve yüksek mukavemet değerlerine sahip olabilmektedir (Öksüz, 1996).

Tablo 3.2 Döküm Alüminyum alaşımlarının gösterimi

Seri	Temel alaşım elementi	Isıl işlem kabiliyeti
1XX.X	>%99 saflıkta Al	Yok
2XX.X	Al-Cu	Var
3XX.X	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Yok
4XX.X	Al-Si	Yok
5XX.X	Al-Mg	Yok
6XX.X	Al-Si-Mg	Var
7XX.X	Al-Zn	Var
8XX.X	Al - Diğer elementler (Kalay-Lityum)	Var
9XX.X	Al - Diğer elementler	Yok

Döküm AA'ların simgelenmesinde yine 4 rakam kullanılmaktadır. Dövme alaşımlarının simgelendirilmesinden farklı bu alaşımlar kodlanırken üçüncü rakamdan sonra bir nokta konulmaktadır. Döküm Al alaşımları kodlanırken 1XX.X serisinde baştan 2. ve 3. rakamlar Al'in saflık değerini gösterir ve sonuncu rakam ise ürünün şeklini ifade eder. 2XX.X ve 9.XXX serileri arasındaki rakamlar özel alaşım sıralama sayısı olarak kullanılmaktadır. Dördüncü basamak ise döküm (0) veya külçe (1,2) bilgilerini vermektedir (Cardarelli, 2010).

3.5 6XXX Serisi Alaşımlar

6XXX serisi alaşımlar; içerisinde Si ve Mg ihtiva eden alaşımlardır. İyi korozyon direnci, kabul edilebilir mukavemet değerleri, kaynaklanabilirlik, kolay şekillendirilebilme ve ısıl işlem yapılabilme gibi karakteristik özellikleri sayesinde yapı, inşaat, denizcilik, makine ve proses ekipmanları olarak endüstriyel alanlarda yoğunlukla kullanılan malzemelerdir (Ghali, 2010; Kaufman, 2006).

Malzemede tavlama sırasında Si çözünerek yapı içinde magnezyum silikat (Mg_2Si) bileşimi oluşmaktadır. 6XXX serilerinde sıklıkla kullanılan malzemelerin 6060, 6061, 6063 ve $AlMg_2Si$ olduğu söylenebilir (Yılmaz, 2011).

6XXX serisi alaşımlar çökeltiye alındıklarında matris içerisindeki Mg_2Si parçacıkları çökelir. Bu sayede malzeme içerinde belirli bir mukavemet ve sertlik değeri elde edilmiş olur. Fakat bu değerler 2XXX ve 7XXX alaşımlarına nazaran daha düşüktür (Öksüz, 1996).

3.6 AA6061

AA6061 düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti ve korozyon direnci, iyi tokluk değeri sayesinde uzay havacılık, savunma, otomobil, dişli çark üretimi, kamyon yayları üretimi gibi birçok endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olan bir alaşımdır (Gui, vd., 2000). AA6061'in kimyasal bileşimi Tablo 3.3'teki gibidir.

Tablo 3.3 AA6061'in kimyasal bileşimi

Bileşen	Al	Cu	Cr	Mg	Si	Mn (Maks.)	Fe (Maks.)	Ti (Maks.)	Zn (Maks.)
Ağırlıkça (%)	95,8-98,6	0,15-0,4	0,04-0,35	0,8-1,2	0,4-0,8	0,15	0,7	0,15	0,25

AA6061'in içeriğindeki elementlerin özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Demir (Fe), alaşımların içinde düşük miktarlarda bulunması durumunda alaşımın sertliğini ve dayanımını arttırır. Döküm sırasında çatlama meyilini azaltır.

- Cu, Al matrisin içinde %12 oranına kadar bulunduğunda malzemenin dayanımını arttırır. Yüksek miktarlarda kullanımı malzemede gevreklik meydana getirmektedir.

- Si, döküm işlemlerinde metalin akışkanlığını güçlendirir ve aşınma direncini yükseltir.

- Mg, Al-Si alaşımlarında katı çözelti sertleşmesine sebep olur, böylece malzemenin sertlik değerini arttırmış olur.

- Çinko (Zn), matris içinde yüksek miktarda Zn bulunması malzemenin soğuma sırasında çekme ve sıcak çatlama eğilimlerinin artmasına sebebiyet verir. Diğer elementlerle kullanıldığında malzeme dayanımını iyi yönde etkilerken, döküm işlerini zorlaştırmaktadır.

- Mangan (Mn), demir ile beraber matris içine eklendiğinde döküm prosesini kolaylaştırır. Metal alaşımlarda çekme mukavemetini azaltabilir

AA6061'in fiziksel ve mekanik özellikleri (URL-1, 2024) Tablo 3.4'e göre sıralanmıştır;

Tablo 3.4 AA6061'in fiziksel ve mekanik özellikleri

Yoğunluk (g/cm^3)	2,7
Sertlik (HV)	107
Esneklik modülü (GPa)	68,9
Özgül ısı (J/(g°C))	0,8936
Kesme mukavemeti (MPa)	207
Çekme mukavemeti (MPa)	310
Akma dayanımı (MPa)	270

3.7 Alüminyum Alaşımlarının Yaşlandırılması

Yüksek mukavemet değerlerine sahip Al alaşımlarının ayrıca yaşlandırılabiliyor olmaları endüstriyel kullanımda Al'in tercih edilmesini sağlamıştır. Ayrıca bu

yaşlandırılabilen alaşımların mukavemet/yoğunluk oranlarının yüksek olması havacılık ve uzay sanayiinde bu malzemelerin yoğunlukla kullanılmasını sağlamıştır. AA'ları diğer alaşımlara göre avantajlı hale getiren özellikler ise;

- Yüksek korozyon dayanımı,
- İyi elektrik iletkenliği,
- Yüzey işlenebilirliği,
- Deformasyon yeteneğinin yüksek olması

gibi özelliklerdir. AA'ların yaşlandırma işlemine tabi tutulmadan endüstride konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılmasının mümkünlüğü yoktur. Bazı endüstriyel uygulamalarda yaşlandırma işlemi sayesinde mukavemet değerlerinde gerekli olan sonuca yaklaşılmaya çalışılırken, bağlantı uygulamaları ve perçin üretimi gibi diğer durumlarda yaşlandırma işleminin sadece sonucundan değil, mekanizmanın devreye girme safhalarından da yararlanılmaktadır (Demirci, 2004).

Yaşlandırma işlemi genellikle iki aşamadan oluşur. Bunlar çözündürme ve yaşlandırma işlemleridir. Öncelikle, alaşım ergime derecesinin altında yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak belirli bir sürede malzeme içinde bulunan elementlerin çözünmüş bir halde katı çözeltiden ayrılması sağlanır. Ardından, alaşım sıcaklığı düşürülerek malzeme yaşlandırma safhasına geçirilir. Bu aşamada çözünmüş olan elementler, matris içinde belirli bir dağılım ile yeniden oluşur ve böylece malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanır.

Al alaşımlarına uygulanan yaşlandırma işlemleri, atomik düzeyde meydana gelen değişiklerle doğrudan ilişki gösterir. Bu süreçte, matris içinde bulunan Al-Cu, Al-Zn, Al-Mg-Si alaşımları gibi yaygın kullanılan bileşimlerde yaşlandırma sonrası oluşan çökelti fazları, mekanik dayanımı önemli oranda arttırır. Bu çökeltiler malzeme içindeki dislokasyon hareketlerini de engelleyerek, malzemenin sertliğini önemli oranda arttırır.

3.8 Alüminyum ve Toz Metalurjisi

Alüminyum nanokompozit malzemeler (ANKM), mühendislik ve malzeme bilimleri alanlarında önemli bir yere sahiptir. Bu malzemeler hafifliği, yakıt verimliliği konusundaki avantajları, yüksek mukavemetleri göz önüne alınarak birçok endüstriyel alanda kullanılan malzemelerdir. Otomobil sektöründe kullanılan elemanların büyük bir çoğunluğu TM yöntemi kullanılarak imal edilen parçalardır (Schubert, vd., 2005). Çeliğe nazaran kıyaslandığında AMK'lerin yüksek mukavemet/yoğunluk oranları, yüksek korozyon performansı ve diğerlerine kıyasla daha iyi plastik şekil verme özellikleri sayesinde avantajlı malzemeler olduğu görülmektedir. Al levha ürünlerinin diğer imalat malzemelerine göre daha hafif olması otomobil endüstrisinde ciddi yakıt tasarrufları sağlamaktadır (Hagen, 2001). Bununla beraber elektronik endüstrisinde ANKM'ler yüksek ısı iletkenliklerine sahip olduklarından ısı yönetimi ve soğutma sistemlerinde sıklıkla kullanımına başvurulan malzemelerdir. Ayrıca ANKM'lerde Al matrisin sağladığı mekanik dayanım, malzemenin maruz kalabileceği titreşim ve darbelere karşı direnç gösterir. ANKM'lerin TM ile üretilmesi, çeşitli kullanım alanlarında malzemenin özelleştirilerek ve malzemenin işlenebilirliğini arttırarak daha etkin malzeme üretilmesi sağlanır. TM yöntemi sayesinde Al matriste homojen bir dağılım sergileyen takviye elemanları malzemenin mekanik özelliklerinde ve performans özelliklerinde iyileşmeye sebep olur. TM yöntemi ile üretilen Al bazlı kompozitlerin sinterleme süreçlerinin optimize edilebilme olanağı olduğundan bu yöntem daha az enerji kullanımı ve daha az maliyetle verimli ve işlevsel malzemeler üretme imkânı sunar. Sonuç olarak TM yöntemi Al ve diğer malzemeler için önemli bir üretim yöntemidir.

4. KOMPOZİT MALZEMELER (KM)

Kompozit sözcük anlamı olarak, iki veya daha fazla parçadan oluşturulan bir malzeme olarak tanımlanır. KM özetle makro ölçüde birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin bir ara yüzey doğrultusunda bir araya gelen malzeme şekli anlamına gelmektedir. KM'lerde malzemeyi oluşturan bileşenler genellikle kendi karakteristik özelliklerini korumaktadır (Rosato. 1997). Fakat bu yeni malzemeler genellikle bireysel bileşenlerine kıyasla daha üstün performans özellikleri göstermektedir. Modern anlamda KM'lerin gelişimine ve kullanımına 2. Dünya Savaşı sırasında 20. yüzyılın ortalarında hafif ama dayanıklı malzeme arayışı sırasında havacılık ve uzay sanayileri için ihtiyaç duyulmuştur. Genel itibariyle malzemeler, metal, seramik ve organik malzemeler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılır. Bu malzemelerin karakterlerine göre bazı üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Bu malzemeler, ilerleyen teknolojik gelişmelerle birlikte iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle daha üstün bir malzeme elde edilmek amacı ile toplanması ile makro düzeyde birleştirilir (Kaya, 1995). Kompozitler, geleneksel malzemelerin; mukavemet, estetik görünüş, aşınma dayanımı, ağırlık, maliyet, iletkenlik, ısı yalıtımı, korozyon direnci özelliklerini geliştirmek ve iyileştirmek amacı ile üretilmektedir.

Bir KM genellikle iki yapı elemanından oluşur. Bunlar; matris malzemesi ve takviye elemanıdır. Matris; kompoziti oluşturan ana malzeme iken (polimer, metal ve seramikler), takviye elemanı ise; matris için mekanik özelliklerin arttırılması vasıtasıyla yapı içine eklenir. Takviye faz, üretimde matris fazının tane büyüklüğünü kontrol eder ve yükleri paylaşır. Matris ve takviye fazlarını birbirine bağlayan bağ, ara yüzey bağıdır. Ara yüzey bağı, genellikle kırılgan bir özellikte olmasına karşın, faz içinde oluşan herhangi bir kuvveti, kırılmaya uğramadan çözülmeyle takviye fazına iletir. KM'lerdeki en önemli bölge ara yüzey bölgesidir. Bu bölge malzeme üzerindeki elastikiyet modülünü büyük ölçüde etkileyen ve malzemenin dayanıklılığını büyük ölçüde şekillendiren bölgedir (Qu, 1993).

4.1 Toz Metalurjisi (TM) ve Kompozit Malzemeler (KM)

TM, KM üretimi açısından kritik bir role sahiptir. Özellikle TM ile üretilen KM'ler hafif, dayanıklı ve özel kullanıma sahip ürünlerdir. KM'ler yüksek sıcaklık dayanımı, düşük ağırlık, yüksek mukavemet gibi özelliklere sahip olan malzemelerdir. TM yöntemiyle üretilen MMKM'ler otomobil ve havacılık endüstrilerinde yüksek performansa sahip parçalar olarak öne çıkmaktadır. KM'ler farklı fiziksel ve kimyasal özellikler taşıyan iki veya daha fazla materyalin bir araya gelmesi ile oluşan ve taşıdığı malzemelerin bileşenlerinin özelliklerini daha da geliştirerek ortaya daha yeni ve üstün özellikler kazanmış malzemelerdir. Gelecek perspektife bakılacak olursa bu malzemeler, ileri teknoloji yöntemleriyle geliştirilebilir ve modern mühendislikte önemli bir rol oynayarak yaygınlaşacaktır. TM yöntemi ile üretilen ANKM'ler, modern malzeme mühendisliği adına önemli ve yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu malzemeler, Al matrisinin içine nano boyutta ve belirli ağırlıklarda yerleştirilerek sıkıştırılır ve ardından ısıl işlemlere tabi tutulurlar. TM yönteminin üretim sürecinin esnek olması karmaşık geometriler elde edilme hususunda kolaylık sağlar. TM sayesinde üretilen KM'lerin homojenizasyonu diğer yöntemlere göre daha yüksek olduğundan malzeme içerisindeki mikroyapı kontrolleri sağlanmaktadır. ANKM'ler yüksek korozyon direncine sahip olduklarından zorlu çevresel şartlara maruz kalınacak olan uygulamalarda daha avantajlı bir kullanıma sahiptir. TM yöntemi ile üretilmiş ANKM'ler malzeme israfını en az seviyeye düşürerek, hem çevresel sürdürülebilirlik, hem de geri dönüşüm açısından daha verimli malzemelerdir.

4.2 Malzeme Matrisine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

KM'lerin kullanım alanlarına ve üretim tekniklerine göre matrisleri metal, seramik, polimer matrislerden oluşabilir. Metal matrisli kompozit malzemeler (MMKM), metal bir matrisin içine bir veya daha fazla takviye elemanı eklenmesi ile oluşan malzemelerdir. Bu kompozitler, metal matrisin malzemeye sağladığı mukavemet ve işlenebilirlik özelliklerinin üzerine takviye elemanlarının sağladığı hafiflik, sertlik ve yüksek dayanım gibi diğer mekanik özelliklerin avantajlarını KM'de bir araya getirirler (Boutman ve Krack, 1974). MMKM'ler ana malzemesi çeşitli metal ve metal alaşımları olan malzemeler olup yapı içine gömülen ikinci fazın farklı geometrilerde

olması mümkündür. 1970'li yılların ardından MMKM'ler birçok araştırmanın odağı haline gelmiş ve çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmıştır (Evert ve Arsenault, 1991).

KM'lerin üretimi sırasında kimyasal etkileşim sebebiyle matris ve takviye arasında ara faz olarak isimlendirilen bir yapı meydana gelir. Bu yapı ne kadar küçük boyutta olursa malzemenin çekme, uzama, kırılma ve tokluk mekanizmalarında değişim görülür. Bununla beraber oluşan kompozitteki malzemelerin şekli, boyutu, takviye oranları ve malzemedeki mikro yapı dağılımları malzemenin mekanik özelliklerinde belirleyici bir rol oynar. MMKM'lerin kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yüksek elastikiyet modülü ve çekme dayanımı
- Uygun tokluk değeri
- Malzemedeki yüzeysel çatlaklara karşı düşük duyarlılık ve yüksek aşınma direnci
- Talaşlı imalata uygun bir zemin olması sebebiyle malzemede kolay üretim ve şekillendirilebilirlik.

Seramik kompozitler, seramik matris ile bir veya birden fazla takviye elemanının birleşmesiyle oluşan malzemelerdir. Seramik matrisli kompozit malzemeler, seramik matris sayesinde malzemenin yüksek sıcaklığa dayanıklı ve hafif olması (d=1,5-3,0) ile yüksek sertliğe sahip olması sebebiyle oldukça kullanışlı malzemelerdir. Bu kompozitler yüksek sıcaklık ortamında çalışılması gereken parçalara ihtiyaç duyulan durumlarda kullanılırlar. Bu malzemeler sert ve kırılgan olduklarından süneklik ve toklukları düşüktür. Bu sebeple malzemeye takviye edilecek elemanların malzemenin mekanik özelliklerini arttırarak kırılma dayanımlarının iyileştirilmesi amaçlanır. Seramik kompozitler yüksek sıcaklıklara dayanma özelliklerine sahip olmakla beraber rijit ve gevrek yapıdadır. Ayrıca bu malzemeler çok iyi yalıtkan özellik gösterirler (Seydibeyoğlu, 2012).

Polimer kompozitler, polimer matris üzerine bir veya birden fazla takviye elemanının eklenmesi ile oluşan gelişmiş bir malzeme türüdür. Polimer matrisli kompozit

malzemelerin matrisinin polimer olmasından kaynaklı hafifliği ve işlenebilirliği kolaydır. Malzeme üzerine eklenen takviye elemanlarının genellikle liflerin, sağladığı güç ve sertliğin kombinasyonu ile malzemeler daha işlevsel hale gelir. Birim kütle başına yük kapasitesi yüksek olan bu kompozitler genellikle termoset ve termoplastik yapıdadır (Vasiliev ve Morozov, 2001). Termoset polimerler, sıvı halde bulunurlar ve ısıtıldıklarında sertleşip kalıcı hale gelen malzemelerdir. Termoset reçineler izotropiktir. Isıl direnci en yüksek polimerler olup lif takviyeli kompozit yapımında düşük viskoziteye sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedir (Itoh, vd., 2002). Termoplastik matrisler ısı ile eritilebilen sünek yapıya sahip matrislerdir. Bu kompozitler ısıtılıp şekil almaya müsait malzemelerdir, bu sayede tekrar şekil verdirilebilirler. Malzeme içyapıları amorf veya yarı kristal yapıda olabilir. Amorf yapıda olan termoplastiklerin molekülleri gelişigüzel bir dizilim gösterir. Bunun yanı sıra malzemedeki kristal bölgede ise malzemeler sıkı paketlenmiş düzenli bir yapıda olurlar (Kaya, 1995).

Endüstriyel ihtiyaçları karşılama anlamında KM'lerin gelişimi, nanoteknoloji ve biyomimetik gibi alanların gelişmesiyle evrimleşmektedir. Bu bağlamda nanomalzemelerin kullanımı, kompozit üzerinde daha iyi mekanik ve fiziksel özellikler gösterirken çevre dostu ve daha sürdürülebilir malzeme arayışına da katkı sağlayacaktır.

4.3 Alüminyum Matrisli Nanokompozit Malzemeler (ANKM)

Son yüzyılda birçok tipte Al matrisine sahip kompozitler geliştirilmiştir. 1990 ve sonrasında Al matrisli seramik vb. parçacık takviyeli KM'lerin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Son yıllarda nano matrislere nano yapıda parçacık takviye elemanları eklenerek yüksek mekanik ve metalografik özelliklere sahip malzemeler üretme çalışmaları artmaktadır. Al ve alaşımlarının yüksek mukavemet, talaş kaldırılabilme özellikleri ve yüksek korozyon direnci sayesinde endüstriyel alanlarda kullanımı oldukça fazladır. Bu sebeple Al ve matrisleri uzay, havacılık ve otomotiv gibi yüksek mukavemet ile beraber düşük ağırlığa sahip ürünlerin üretiminde ihtiyaç duyulan malzemeler haline gelmiştir. Al esaslı parçacıkların mikro ve nano boyutta uygulamaları özellikle uçak ve savunma sanayilerinde mükemmel fiziksel ve kimyasal

özellikleri göstermesi malzemenin mikro yapısal özelliklerini değiştirmektedir. Bu kapsamda SiC, Al alaşımları için kullanımı mümkün en kapsamlı araştırılan ve geliştirilen takviye elemanlarındandır. AMKM'leri imal etme hususunda genel olarak döküm ve toz metalurjisi teknolojileri kullanılmaktadır (Ayan, 2013). Al profil ekstrüzyonu ve levha haddeleme gibi ikincil prosesler, malzemede istenen metalografik ve mekanik özellikleri elde etmek ve kalıcı şekil verme amacıyla kullanılan proseslerdir. Ekstrüzyon, karmaşık şekilli profil ve parçaların üretiminde kullanılan önemli bir işlemdir (Yurt, 2019). Al-B_4C KM'lerin nükleer santrallerde nötron emici olarak kullanıldığı bilinmektedir. Askeri tank imalatında Al matrise eklenen SiC takviyesi tankın palet kısmında kullanılarak üretilen tankın ağırlığında düşüşler elde edilmiştir.

4.3.1 Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin (AMKM) Mekanik Özellikleri

AMKM'ler, hafiflik ve yüksek mekanik özelliklere sahip olması sebebiyle birçok endüstride tercih edilmektedir. Yüksek çekme ve basma dayanımlarına sahip olmakla beraber eğilme ve darbe dayanımları da diğer malzemelere göre dikkat çekecek seviyede güçlüdür. Al matrisli malzemelerin takviye elemanları ile daha da geliştirilmesi sanayii ortamlarında ihtiyaç duyulan bir malzeme olmasına sebebiyet verir. Bu kompozitlerin diğer Al alaşımlarına göre birçok avantajı vardır. Bunlar; mukavemet, sertlik, ağırlık, termal iletim, elektrik iletkenliği, korozyon dayanımı, enerji absorbe direnci olarak sıralanabilir. AMKM'ler düşük yoğunluğu sayesinde yakıt tüketimi ve karbon ayak izi gibi çevresel olaylar için kullanılması daha avantaj sağlayan malzemelerdir. Bununla beraber bu malzemelerin mekanik yorulma dayanımları, kullanılan takviye elemanlarının cinsine, boyutuna ve ağırlıklarına bağlı değişiklik gösterebilir ve bu sebeple malzeme üretim aşamasında dikkatli bir seçim yapılması gerekebilir.

4.4 Takviye Elemanlarının Kompozit Malzeme Üzerindeki Etkileri

Al matrisine takviye edilen elementlerin malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hususunda önemli bir görevi vardır. Bu takviye elementleri genellikle

seramik, metal veya lif formunda olabilmektedir ve matrisin performansını arttırmak amacı ile kullanılmaktadır. MMKM'lerde kullanım alanına bağlı olarak malzemeden yüksek dayanım, yüksek sertlik, matrisle kimyasal uyumluluk, işlenme ve üretim kolaylığı beklenilmektedir. Bu bazda MMKM'lerin içine sıklıkla eklenen takviye elemanları TiC, B_4C, SiC gibi karbürlü yapılardır.

4.4.1 Bakır (Cu)

Al ile alaşım yapılırken başlıca kullanılan element Cu'dur. Cu, AA'ların sertlik değerini arttıran bir elementtir. Döküm alaşımlarında mukavemet artışı sağlamak için en fazla %12 oranında kullanılmaktadır. Dövme alaşımlarında ise %3-%5 oranlarında kullanılmaktadır. Kullanılan Cu'nun fazlası malzemedeki sertliği arttırır ve bu artış malzemeyi gevrekleştireceğinden malzemede işleme güçlükleri doğurur ve malzemenin iletkenliği ve malzemenin korozyona karşı direncini düşürür. Cu'nun Al alaşımlarına karşı çözünürlüğü sıcaklığa bağlı olarak artmaktadır. Bu nedenle Cu'nun kullanıldığı AA'larda malzemeyi sertleştirmek adına malzemeye yaşlandırma işlemi (çökelme sertleşmesi) uygulanabilmektedir (Sun, 1998). Al-Cu kompozitlerde Cu miktarı %5,5'e kadar arttırılırsa malzemenin mukavemetinde artışlar meydana gelir. Daha yüksek oranlarda Cu takviyesi malzemenin mekanik özelliklerinde düşmeye sebep olabilir. Cu malzemedeki mukavemet ve sertlik değerini arttırırken, malzemenin korozyon direncini düşürebilir.

4.4.2 Silisyum Karbür (SiC)

Seramik malzemeler içerisinde en yüksek dayanıma sahip malzemelerden birisi de sinterleme ısıl işlemi görmüş SiC'dir (Öztürk, 2007). SiC yüksek sertliğe sahip, aşındırıcı bir malzemedir ve çok yüksek sürünme dayanımına sahiptir. Al alaşımlarında Cu'dan sonra en çok kullanılan element Si'dir. Al'nin içerisinde bulunması gereken maksimum miktarı %13 olmalıdır. Eğer bu oranın üzerinde kullanılırsa malzemenin işlenmesinde büyük zorluklar ortaya çıkmaktadır. Cu, Ni ve Mg ile malzemeye katıldığında alaşımın ısıl işlem görebilmesi sağlanır. Ancak bu alaşımların çekme mukavemetleri düşüktür ve mukavemet artışı Si artışı ile orantılıdır (Aydın, 2002). Si'nin Al malzeme üzerindeki etkileri ile alaşımda korozyona karşı

gösterilen direnci, kaynak kabiliyeti ve akışkanlık özelliklerinde artış görünür. Bu özellikler alaşıma daha iyi bir işlenebilirlik sağlamaktadır. Malzemenin içine ilave edilen Si sıvı Al üzerinde akışkanlığı arttıracağından sıcak çatlama eğiliminin azaldığı gözlemlenmektedir. İğne şeklindeki Si faz çekme mukavemetini arttırmanın yanı sıra süneklik, darbe ve yorulma mukavemetini düşürmektedir (Sun, 1998). Al-Si alaşımların içlerinde "Fe" ve "Mg" var ise malzemenin sünekliği düşebilir. Matris içine Si takviyesi ile malzemede tane küçültme ve modifikasyon işlemlerinde iyi işlenme özelliği sağlayabilir. SiC parçacıklar düşük yoğunluklu ve ucuz hammaddelerden elde edilebildiğinden takviye elemanı olarak tercih edilmektedir (Karabulut, 2011).

4.4.3 Titanyum Karbür (TiC)

Titanyum AA'larda kullanıldığında çekme mukavemetini ve sünekliliği arttırıcı etkiler gösterir. Titanyumun malzeme üzerinde tane küçültücü etkisi olduğundan malzeme üzerinde mukavemet artışına etki etmektedir. Malzeme üzerindeki en iyi etkisi bor ile kullanıldığında ortaya çıkar. Malzemeye katılacak titanyum miktarı %20'yi geçmemelidir (Sun, 1998). Korozyon direnci yüksek olan titanyum özellikle deniz suyu gibi agresif ortamlarda kompozitlerin kullanım ömrünü uzatmaktadır. Düşük yoğunluklu bir metal olmasından dolayı malzemenin ağırlığını arttırmadan mukavemetinde iyileşme sağlar. Bu da hafif ama dayanımlı malzeme gereksinimi duyan uygulamalar için idealdir. AA6061 matrisine eklenen TiC malzemenin elastikiyet modülünü arttırarak matristeki çatlak oluşumunu azaltır ve malzemenin yorulma dayanımını arttırır. Bu sayede tekrarlı yükleme koşullarında kullanılacak olan parçaların ömrü uzamış olur. TiC parçaları Al matris içinde sertleştirici bir görev görür. Bu nedenle kompozitin sertlik ve aşınma dirençleri değerlerinde artış meydana gelir. Özellikle yüksek yük ve sürtünmeye maruz kalacak parçalar için bu özellikler çok önemli bir rol oynar. Matris içine ilave edilen TiC takviyesi kompozitin elastite modülünü arttırır ve daha yüksek yüklerde daha az plastik şekil değiştirme görülür. Bu özellik sayesinde TiC kullanımı hassas ölçüm aletleri ve yapısal eleman uygulamalarında kullanılabilir. Bununla beraber titanyumun yüksek maliyeti kompozit üretim maliyetlerini arttırabilir bu sebeple bu malzemenin avantajlarının malzeme maliyetine göre değerlendirilmesi önerilir.

4.4.4 Bor Karbür (B_4C)

B_4C, yüksek sertlik, düşük ağırlık ve mükemmel termal özellikleri sayesinde endüstride özellikle askeri uygulamalarda kullanılan seramik bir malzemedir. Asgari uygulamalarda hafifliği ve dayanıklılığı sayesinde zırh yapımı için kullanılması idealdir. B_4C, nötronları absorbe edebildiğinden nükleer reaktörlerde kontrol çubuğu olarak kullanılır. B_4C'nin sertliği çok yüksektir. Bu sebeple yüksek aşınmaya maruz kalacak ve aşınmaya dayanaklı makine parçalarının malzemelerinde kullanılmaktadır (Karaçay, 2008).

B_4C, bir matrise eklenmesi gereken takviye elemanı olarak malzemeden beklenen birçok yüksek özelliğe sahiptir. 2,52 g/cm^3 yoğunluğa, 2445°C ergime sıcaklığına sahiptir. Bu özelliklerle beraber yüksek rijitlik, aşınma, darbe dirençleri sayesinde Al için mükemmel bir takviye fazıdır (Karabulut, 2011).

B_4C endüstride birçok kullanım alanına sahiptir. Bunlar;

- Malzeme ve metalurji endüstrisinde,
- Nükleer enerji endüstrisinde,
- Makine ve makine elemanlarının yüzey işlemlerinde,
- Savunma sanayinde kullanılmaktadır (Özdemir, 2006).

AMKM'lerde takviye elemanları olarak Al_2O_3, SiC, TiC, B_4C gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu takviyeler arasında B_4C takviye edilmiş kompozitlerde yüksek sertlik, yüksek dayanım, düşük yoğunluk, yüksek rijitlik ve iyi termal kararlılık görülmesi mümkündür. B_4C; takviye edildiği KM'lerde yapının kimyasal inertliği sebebi ile Al ve AA'lar için kullanılması iyi sonuçlar verecek bir takviye malzemesidir (Toptan, 2006).

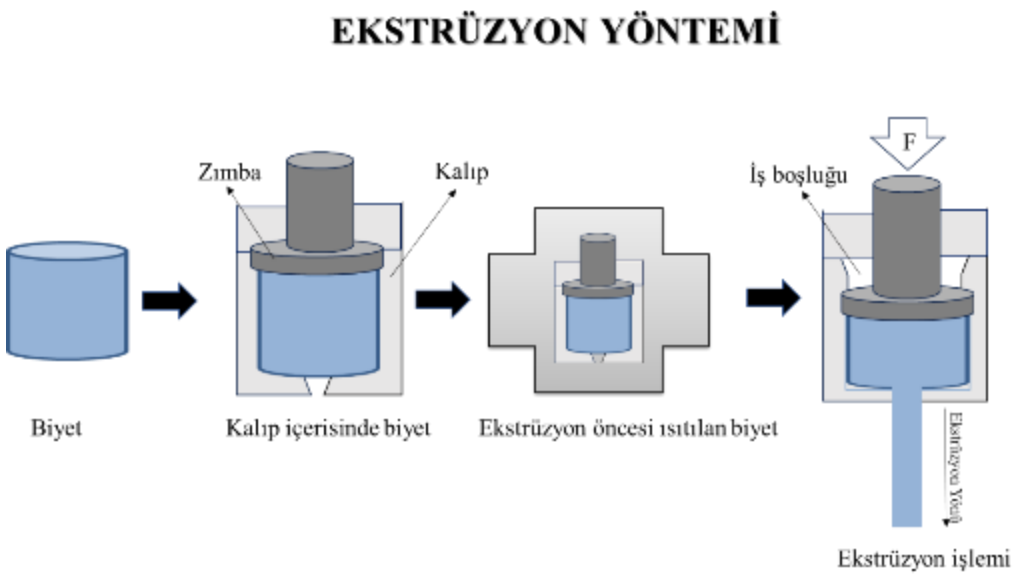
Ülkemiz bor cevheri bakımından zengin bir ülkedir. Bu sebeple bor ürünlerinin üretimi ve kullanımı büyük bir önem arz etmektedir. B_4C düşük yoğunluğu, yüksek sertliği ve

yüksek elastite modülüne sahip olduğundan dolayı nükleer endüstrilerde kum veya abrasif püskürtme nozulları, zırh malzemeleri gibi yüksek aşınma ve sıcaklığın olduğu endüstrilerde kullanılması kaçınılmaz olan bir takviye malzemesidir (Çanakçı, 2006).

5. EKSTÜZYON YÖNTEMİ

Ekstrüzyon esasında dolaylı bir basma işlemidir. Kütük adındaki metal matrisli bir kütlenin basınç ile birlikte kendinden daha küçük ebatta bir kalıp içinden akmasının sağlandığı plastik şekil verme işlemidir. Kullanılan basma kuvvetleri, biyet, kovan ve kalıp arasındaki tepkilerden oluşmaktadır ve bu değer çok yüksektir. Biyet, kovan ve kalıbın arasında tepki oluşmasıyla biyetin içinde oluşan yüksek gerilim malzemenin içyapısında çatlakların oluşmasını önler. Biyetin döküm yapısını değiştirmek için kullanılan en başarılı yöntem ekstrüzyon işlemidir. Bu proseste biyet sadece basma gerilmesine tabi tutulmuş olur.

Ekstrüzyon işlemi, işlemin yapılma tarzı ve işlemde kullanılan alaşıma bağlı yüksek sıcaklık ortamlarında da gerçekleştirilebilir. Sıcak ekstrüzyon yöntemi genellikle Al, Cu, çelik gibi metallerin yanında bazı termoplastik polimerlerin şekillendirilmesi işlemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Sıcak ekstrüzyon yönteminde biyet işlem öncesi ısıtıldığı için malzemedeki plastik şekil değiştirme işlemi daha kolay bir biçimde gerçekleşir (Saha, 2005). Şekil 5.1'de ekstrüzyon yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.1 Ekstrüzyon yönteminin şematik gösterimi

5.1 Endirekt Ekstrüzyon

Endirekt ekstrüzyon, bir malzemenin kalıp içinde itme veya çekme hareketleri ile şekillendirilmesi işlemidir. Bu süreçte kalıp ve kovan hareketli iken biyet süreç içinde sabit kalmaktadır (Saha, 2005). Bu işlemde, kalıp boş zımbaya yerleştirilir ve sonrasında kovan içine itilir. Hem kalıp, hem de biyet içinde kovan hareket edebilir ve bu sayede ekstrüzyon sırasında biyet ve kovan çekirdeği arasındaki sürtünme kuvveti en aza inmiş olur. Endirekt ekstrüzyon işleminde metal akışı daha homojen halde gerçekleşmektedir. Bu sayede malzeme formunun daha yüksek kalitede olması sağlanır. Bu işlemde çekirdek ile biyet arasında sürtünme olmadığından daha uzun biyetler basmaya olanak artacaktır. Endirekt ekstrüzyon işlemi, diğer yöntemlere karşı kıyaslandığında daha uzun ürün profili, daha az çapak oluşumu ve yüksek ürün kaliteleri elde etme avantajları sağlar (Saha, 2005).

5.2 Direkt Ekstrüzyon

Direkt ekstrüzyon, genellikle metal veya polimer malzemelerin bir kalıp vasıtasıyla doğrudan şekillendirilmesi işlemidir. Bu süreçte işlem öncesi ısıtılmış biyet kovanın içine yerleştirilir ve zımba yardımı ile kalıptan çıkarılabilir. Zımba ve biyetin akış yönü aynı doğrultudadır. Süreç boyunca biyet ve kovan çekirdeği birbirine temas ettiğinden zımbanın sürtünme gücüne karşı daha fazla basınç uygulanması söz konusu olmaktadır. Bu proseste biyetin tümü ekstrüze edilemediğinden "Araiş" olarak nitelendirilen bir kısım (ıskarta) her basım çemberinde atılarak geri dönüşüm için ayrılır. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre en büyük dezavantajı işlem sırasında basım gücünün daha fazla gereksiniminden kaynaklanır. Bu sebeple çekirdek ve kovan hasarları diğer yöntemlere göre daha yüksektir. Ayrıca bu yöntemin ekstrüzyon hızı düşüktür. Fakat bu yöntem profil çeşitliliği ve genişliği açılarından daha fazla seçenek sunmaktadır. Direkt ekstrüzyonun avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Elde edilen üründe istenen uzunluk, çap ve kalınlıklarda imal edilebilme
- Kolay düzenlenebilen takım elemanları
- İçi dolu ve içi boş çeşitli profil imalatı

Direkt ekstrüzyon yöntemi, bazı dezavantajları olmasına rağmen endüstriyel uygulamalar için daha basit takım malzemeleri kaynaklı ve daha basit takım düzenlemeleri sayesinde çok yaygın kullanılmaktadır. Üretilen nihai ürünlerde istenen şekil ve dolulukta olması bu yöntemin sıklıkla kullanılmasında etkileyici bir rol oynar.

5.3 Ana Parametrelerin Ekstrüzyon İşlemine Etkileri

Ekstrüzyon süreci etkileyen birkaç faktör mevcuttur. Bu faktörler arasında ekstrüzyon oranı, çalışma sıcaklığı, ekstrüzyon hızı, malzemenin akma dayanımı gibi etkenler ekstrüzyon işlemini önemli ölçüde etkilemektedir. Kullanımı son derece maliyetli olan ekstrüzyon düzeneklerinin doğru bir şekilde kullanılması hedefleniyorsa bu parametreler hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olunması gerekir.

5.3.1 Ekstrüzyon Oranı

$$Ekstrüzyon\ Oranı(E.R) = A_C/nA_e \tag{5.1}$$

olarak tanımlanan ekstrüzyon oranı; genel olarak ekstrüzyonun en belirleyici parametresidir. Yukarıdaki eşitlikte n simetrik çıkışların sayısını, A_c biyet kesit alanını, A_e ise elden edilen ürün kesit alanı anlamına gelmektedir. Bir malzemenin ekstrüzyon oranı, o malzemenin ekstrüzyon ile şekillenmesi sırasında harcanacak olan mekanik enerjinin miktarının doğrudan bir göstergesi olacaktır.

Bir malzemenin plastik gerinimi düşük ise kullanılan ekstrüzyon oranı da düşük olacaktır. Yani ekstrüzyon sürecinde yapılan iş miktarı da düşük olacaktır. Düşük ekstrüzyon oranında şekillendirilen Al, döküm Al yapısına benzer büyük taneli yapıya sahip olur. Bu tarzda kaba taneleri olan yapılar mekanik olarak iyi değildir, bu sebeple ekstrüzyon oranının 10'dan düşük olduğu malzemelerin benzer literatür çalışmalarında belirtilen değerlere uyacağı kesin değildir.

Eğer ekstrüzyon oranı yüksek ise durum tam tersine döner. Biyeti kalıp içinde itmek için gereken basınç, malzemenin yüksek plastik gerilimini nedeniyle daha fazla olacaktır. Sanayide kullanılan sert malzemeler için ekstrüzyon oranları 10 ile 35 arasında olurken yumuşak malzemeler için bu oran 10 ile 100 arasında olur. Fakat bu

oranların üretim için net değerler olarak düşünülmesi mantıklı olmayacaktır. Çünkü malzeme şekline göre bu değerler değişiklik gösterebilmektedir.

5.3.2 Çalışma Sıcaklığı

Malzemelerin akma dayanımları sıcaklık artışıyla azalmaktadır. Bu durum malzeme içerisinde plastik şekil verme işlemini kolaylaştırır. Ekstrüzyon işlemi sıcak şekillendirme işlemidir. Ekstrüzyon işlemi oda sıcaklıklarında şekil değiştirme kabiliyeti düşük olan, metal ve alaşımlar için yüksek sıcaklıkta yapılan bir işlemdir, bu sayede malzemenin şekil değiştirmesi için gereken kuvvet azalmış olur. Sıcaklığın artışı malzeme üzerinde şekil değiştirmeyi kolaylaştırır, fakat işlem aşamasında malzemenin içindeki bölgesel sıcaklıklar yükselirse, bu malzeme üzerinde kısmı ergimelere sebebiyet verebilir. Bu durum ekstrüzyon hızını düşürmektedir. Ekstrüzyon sürecindeki değişiklikler, biyet sıcaklığı, biyetten kovana iletilen ısı miktarı ve kovan ile kalıp arasındaki şekil değişikliği nedeniyle oluşan sürtünme kaynaklı ısı oluşmasına bağlıdır.

5.3.3 Ekstrüzyon Hızı

Metallerin ekstrüzyon işlemine vereceği tepki deformasyon hızını etkileyebilmektedir. Koç (baskı) hızındaki artış ekstrüzyon basıncında da artışa neden olmaktadır ve bu ekstrüzyon sürecinde meydana gelen sıcaklıkta bir artış meydana getirir. Bunun sebebi koç hızı ile ekstrüzyon hızının doğru orantılı olmasından kaynaklanır. Koç hızı azaldığı sürece, ortaya çıkan ısı daha iyi dağılmaktadır. Ekstrüzyon işlemi yapılırken hacmin korunması gerekliliği ile koç hızı ve ekstrüzyon arasındaki ilişki ekstrüzyon hızının belirlendiği bir faktör olacaktır. Aşağıdaki denklemde R_E ekstrüzyon oranı, V_Z koç hızı olarak ifade edilir (Yaşar, 2024).

$$V_E = V_Z x R_E \tag{5.2}$$

5.3.4 Malzemenin Akma Gerilmesi

Akma gerilmesi malzemenin plastik şekil değişikliğine uğramadan önce dayanabildiği maksimum gerilim değeridir. Ekstrüzyon sürecinde malzemenin akma dayanımı,

işlem sırasında kullanılacak olan kuvvetin hesaplamasında önemli bir rol oynar. Malzemelerin akma dayanımı aşağıdaki faktörler aracılığı ile belirlenmektedir.

- Malzeme türü ve geometri yapısı

- Ergime sıcaklığı, şekil değiştirme miktarı, diğer adıyla gerinim ve deformasyon hızı (Asa, 2010).

5.4 Toz Metalurjisi ve Ekstrüzyon

Yüksek performanslı ve daha hafif malzemelerin üretiminde TM ve ekstrüzyon işlemleri önemli rol almaktadır. Sıcaklık ve basınç altındaki tozların şekillendirilmesi ile malzeme üretimi TM işlemini ifade eder. Ekstrüzyon işlemi ise bir malzemeyi belirli bir kesit elde etmek amacıyla, kalıp içerisinden iterek geçirilmesi şeklinde tanımlanır. Bu iki süreç kısaca üretilen ve karıştırılan tozların belirli bir sıcaklık ve basınç altında karakterizasyon kazandırma işlemlerinin tamamlanıp ardından şekillendirilmesi ile gerçekleşir. TM ve ekstrüzyon işlemleri birbirini tamamlayarak birçok endüstriyel uygulama alanında yenilikçi çözümler sunar.

TM işleminin ilk aşaması tozların üretilmesi ve ardından tozlara belirli bir karakterizasyon kazandırmaktır. Toz malzeme ile kompozit ürün üretim süreçlerinde önemli olan faktörler tozun boyutu, şekilleri ve kimyasal saflığı elde edilecek olan ürünün özelliklerini kritik derecede etkilemektedir. Üretilen tozların karıştırılması sırasında homojen dağılmış bir mikroyapı görebilmek adına tozlar mekanik karıştırıcılar vasıtası ile belirli toz ve bilye oranlarında karıştırılırlar. Hazırlanan tozlar belirli basınçlar halinde sıkıştırılarak biyet adı verilen malzemelere dönüşür.

Ekstrüzyon işlemi; hazırlanmış olan biyetlerin uygun sıcaklıkta ısıl işlem görmesinin ardından yüksek basınç altında TM ile üretilen parçanın şekillendirilmesini sağlamaktadır. Bu yöntem karmaşık geometriye sahip parçaların üretilmesinde büyük bir kolaylık sağlar. Ayrıca ekstrüzyon işlemi sırasında malzemelerin içyapısında homojenizasyon meydana gelir. Ekstrüzyon işlemi sırasında biyet içindeki tozların sıkışması ve malzemenin plastik deformasyona uğramasından dolayı malzeme içerisindeki gözeneklilik miktarı düşer ve malzeme yoğunluğu artar.

TM ve ekstrüzyon sonrasında malzemelerin performansları olumlu yönde etkilenir. Ekstrüzyon işlemi sırasında basınç ve sıcaklık altında malzeme içindeki parçacıkların birbirlerine tutunması kolaylaşır ve böylelikle tozların birbirlerine bağlanması sayesinde üretilen malzemenin dayanıklılığı ve işlenebilirliği hususunda önemli bir artış olur. Bununla beraber ekstrüzyon ile üretilen malzemelerin kolaylıkla daha özel ve işleve uygun şekillendirilmesi söz konusudur.

Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla TM ve ekstrüzyon işlemlerinin kullanımı daha az malzeme israfı ve enerji tüketimi gerektirdiğinden çevresel atıkta azalma ve maliyet konularında da avantajlıdır. Ekstrüzyon yöntemi ile malzeme üretim hızı fazla olduğundan, büyük ölçekli üretim gerektiren ve sürdürülebilir endüstrilerde kullanımı her geçen gün artmaktadır.

Sonuç olarak ekstrüzyon yöntemi ve TM'nin ilişkisi, modern malzeme üretiminde diğer yöntemlere göre performanslı, dayanımlı, hafif malzemeler üretirken daha verimli ve daha az atıklı ve çevre dostu bir üretimi desteklemektedir.

6. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

AA6061 takviyeli ve SiC/B_4C/TiC takviyeli nanokompozit malzemelerin toz metalurjisi ve ekstrüzyon yöntemiyle üretilmesine ilişkin literatür çalışmalarında aşağıdaki dikkat çekici çalışmalar tespit edilmiş olup, sırasıyla raporlanmıştır.

Mahdavi (2011) yaptığı çalışmada; SiC parçacıkları içeren AA6061/SiC ve AA6061/SiC/Gr kompozitlerin birleştirilmesi için yeni bir işleme tekniği olan in situ TM (IPM) yöntemini kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre; Al/10SiC kompozitlerin gözeneklilik ve sertliğinin %5 hacim grafit ilavesiyle azaldığı, artan SiC parçacık boyutunun, her iki tip kompozitin gözenekliliğini, sertliğini, hacim kaybını ve sürtünme katsayısını azalttığı, hibrit kompozitlerin daha düşük sürtünme katsayısı ve aşınma oranları sergilediği, aşınma mekanizmasının, ince SiC parçacıkları içeren Al/10SiC kompozitinde çoğunlukla yapışkan ve mikro-kesmeden, SiC parçacık boyutunun artmasıyla belirgin bir şekilde aşındırıcı ve delaminasyon aşınmasına dönüştüğü, takviyesiz alaşım için ana aşınma mekanizmasının yapışkan aşınma olduğu ve tüm hibrit kompozitlerin esas olarak aşınma ve delaminasyon mekanizmaları ile aşındığını tespit edilmiştir.

Karakoç vd. (2019), sıcak ekstrüzyon yöntemiyle ürettikleri B_4C ve SiC takviyeli AA6061 KM'leri inceledikleri çalışmada, B_4C ve SiC parçacıkların genel olarak matris içerisinde homojen olarak dağıldığını, üretilen kompozitlerdeki sertlik değerlerinin ortalama 50 HB ve en yüksek sertlik değerinin %12 B_4C takviye oranında 76 HB olduğunu ve yine en yüksek aşınma direncinin %9 B_4C + %3 SiC matrisli KM'de oluştuğunu gözlemlemiştir.

Pul (2019), yaptığı çalışmada, TM yöntemi kullanarak AA7075 matrisine %5; %10 ve %20 oranlarda SiC, B_4C ve TiB_2, takviye elemanlarını ekleyerek KM'lerin mekanik özelliklerini (yoğunluk, sertlik, kırılma ve aşınma) incelemiş ve tüm numunelerin optik mikroskop görüntülerini ve mikroyapılarını görüntülemiştir. Yapılan çalışma sonucunda en yüksek yoğunluk (%94,5), kırılma dayanımı (1418 N) ve en düşük aşınmaya bağlı ağırlık kaybının (0,164 g) SiC ihtiva eden KM'lerde olduğu görülürken, en yüksek sertlik değerinin (72,14 HBW) ise TiB_2 ihtiva eden KM'lerde

olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonunda artan gözeneklilik değerlerinin malzeme üzerinde mekanik özellikleri etkileyen en önemli faktör olduğu değerlendirilmiştir.

Yağmur ve Pul (2022), Vorteks yöntemi uygulayarak hibrit kompozit deney numunelerini ürettiği çalışmada, KM içerisindeki takviye elemanı olan B_4C' nin istenilen şekilde homojen bir dağılım sergileyemediğini ve B_4C fazlarında topaklanmalar elde ettiğini belirtmiştir. Ayrıca üretilen KM'de gözenekli bölgelerin varlığından da bahsetmiştir. Bu sebeple KM'lerde işlenebilme üzerine bazı tutarsız sonuçlar oluşmuştur.

Pul ve Baydaroğlu (2020), AA7075 matrisine SiC ve B_4C takviye elemanlarını %40; %20 ve %10 oranlarında ekleyerek ürettiği KM'lerin mekanik özelliklerini belirlemek adına yoğunluk, abrasif aşınma ve çapraz kırılma deneylerini gerçekleştirmiş ve numunelerin mikroyapı ve mikroskop görüntüleri almıştır. Üretilen KM'lerin modellenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile balistik performansları incelenmiştir. Balistik analiz sonuçlarına bakıldığında %10 oranda takviyelendirilmiş KM'ler herhangi bir başarım göstermezken, takviye oranlarının artmasıyla başarım miktarı artmıştır. Sertlik, aşınma ve balistik analizler beraber ele alındığında %40 oranda takviye içeren malzemenin bu tür KM'ler için uygun olmadığı, %20 oranda takviye içeren KM'lerin ise balistik açıdan optimum sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Türkoğlu (2022) çalışmasında, farklı üretim parametrelerinin, mikro ve nano boyuttaki takviye elemanlarıyla üretilen AMKM'lerin (AA6061-TiC, AA6061-MWCNT, AA6061-GNP, AA6061-TiC-MWCNT, AA6061-TiC-GNP, AA6061-MWCNT-GNP) özelliklerini makine öğrenmesi metodu kullanarak deneysel ve istatiksel olarak incelemiştir. KM'lerin üretimi için TM ve sıcak presleme metotları kullanılmıştır. KM'lerin SEM-EDS, Micro-T, Raman spektroskopisi, yoğunluk, sertlik, aşınma ve iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Micro-CT analizleri ile doğrulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek sertlik değerinin AA6061-TiC-GNP içeren KM'de 98 HV değeri olarak, aşınma sonuçlarında ise en iyi sonuçların takviyesiz alaşıma oranla dayanımı 33,33 kat daha fazla olan AA6061-TiC-GNP kompozit grubunda elde edildiği tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar ve yapay sinir ağı

modellerinin sonuçları karşılaştırılmış ve oluşturulan modelin doğruluk payının yüksek olduğu saptanmıştır.

Dorri Moghadam vd. (2015), yaptığı derleme çalışmasında, farklı uygulamalarla üretilen KM'lerin matris ve takviye bağlantısının uygun olmadığı durumlarda takviye elemanı olarak kullanılan seramik parçacıklarının yapıdan kolayca ayrılabildiği saptanmıştır. Bu sebeple matristen ayrılan bu yapılar kayma yüzeyleri arasında sıkışıp üçüncü cisim olarak hareket etmiş ve KM'lerin aşınma değerlerini arttırmıştır. Üretilen KM'lerde karbon esaslı takviyeler, Al_2O_3 ve SiC gibi seramik esaslı takviyelerle kıyaslandığında yağlayıcı yapısı sayesinde daha iyi tribolojik özelliklere sahip olmuşlardır.

Mazaheri vd. (2013) yaptığı çalışmada, Al matrise, TiC, B_4C gibi malzemeleri karıştırma döküm tekniği kullanılarak takviyelendirmiş ve bu safhada döküm sürecine uygun olmayan ıslatabilirlilik ve takviye elemanlarının yapı içinde kötü dağılımları gibi zorluklardan bahsedilmiştir. Malzemenin kırılma karakterini incelemek adına çekme ve sertlik testleri uygulanmış, şekil değişikliğine karşı direnç saptanmıştır. Bu hususta kompozit iç yüzey ayrılmasının en yaygın kırılma mekanizması olduğu bildirilmiştir. Ayrıca matris-takviye yüzeylerinde Al_4C_3 gibi gevrek fazların varlığına değinilmiş ve bu fazların kırılma arayüzeyini zayıflattığı bildirilmiştir.

Samal vd. (2019) yaptığı çalışmada, 5XXX serisi Al alaşımı olan AA5052 alaşımını TiC fazı ile güçlendirmeyi amaçlamışlardır. KM üretiminde karıştırmalı döküm yöntemi kullanılmış olup, kullanılan matris malzemesi pota içinde 800°C' de ergitilmiş ve üzerine takviye grupları eklenerek belirli bir süre karıştırılmıştır. Yapılan karıştırma işlemi sonrasında ergiyik karışım kalıp içine boşaltılmıştır. Üretilen malzeme üzerinde yapılan deneysel çalışmalar neticesinde %9 TiC takviye elemanı kullanılan kompozitte takviyesiz malzemeye kıyasla sertlikte %32; çekme dayanımında %78 ve akma dayanımında %116 artış tespit edilmiştir.

Mohapatra vd. (2016) çalışmasında, sıcak pres yöntemi kullanarak saf Al'ye farklı yüzdesel ağırlıklarda TiC, ilmenit ($FeTiO_3$) sentezlenerek imal edilmiştir. TiC'nin düşük yoğunluğa sahip olması bu üretim yöntemi için tercih edilme sebebi olarak

gösterilmiştir. 325 mesh altı Al tozları ve ortalama tane boyutu 10 µm olan hacimce %5-20 TiC tozları ön karıştırma yapılmasının ardından, 10 mm çaplı kalıp içerisinde 400°C sıcaklıkta, 400 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Oda sıcaklığına kadar soğutulan numuneler metalografik işlemlerden geçirildikten sonra SEM ile mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıda herhangi bir büyük porozite varlığı saptanmamış olup, TiC dağılımının kısmen tek tip olduğu bildirilmiştir. Mekanik testler sonucunda akma ve çekme dayanımı değerlerinin %20 TiC takviyeli kompozitte 205 MPa ve 360 MPa olarak tespit edilmiştir. TiC takviyesinin mekanik özelliklere ciddi oranda katkısı olduğu bildirilmiş ancak malzeme matrisi içerisindeki dağılımının iyileştirilebileceği değerlendirilmiştir.

Sivananth vd. (2014) yaptığı çalışmada, otomotiv endüstrisinde faaliyet göstermek üzere Al/TiC KM'lerin üretimi gerçekleştirilmiş ve yük taşıma kapasitesi bakımından yeni bir malzeme türü olabileceği düşünülmüştür. Ağırlıkça üç farklı sırayla %10; %12 ve %15 takviye oranlarındaki kompozitlere 325 mesh matris Al içine karıştırma döküm yoluyla TiC tozlar takviyelendirilmiştir. Oluşan KM'lerin yorulma ve çekme analizleri ASTM standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen numunelerin üretiminde Al/TiC KM'lerde TiC takviyesi kullanılması ile malzemenin performansının iyileştiği gözlemlenmiştir.

Murthy ve Singh (2015) yaptıkları çalışmalarda, AA6061'e 100 nm boyutunda TiC malzemesini takviyelendirmiştir. Üretim, karıştırma döküm yöntemi kullanılarak yapılmış olup, %2; %4 ve %6 oranlarında TiC takviyeleri kullanılmıştır. 800°C'de pota içerisinde ergitilen AA6061 malzemesi paslanmaz çelik mekanik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Karıştırıcının dönüş hızı 450 dev/dk olarak ayarlanmıştır. 400°C'de ön ısıl işleme tabi tutulan takviye grupları pota içerisine dökülmüştür. Testlere neticesine göre, AA6061 ve TiC arayüzeyinin kabul görebilecek şekilde oluşum gösterdiği görülmüştür. TiC takviyesinin korozyon direncini olumlu yönde değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Shivaramu ve Umashankar (2019), Al/Si alaşımını karbon nanotüp (CNT) ile ağırlıkça 0,25 - 1 oranlarında TM yöntemi kullanılarak takviyelendirmişlerdir. Prosese uygun üretilen KM'lere farklı aşınma parametrelerinde aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma

dayanımları analiz edildikten sonra, aşınma mesafesi 500 m'den 1000 m'ye çıkarıldığında aşınma oranının düşüş yaşadığını gözlemlemişlerdir. Bununla beraber maksimum aşınma direncinin ağırlıkça %0,75 oranına sahip çok duyarlı karbon nanotüp (MWCNT) eklenmiş kompozitte olduğu gözlemlenmiştir.

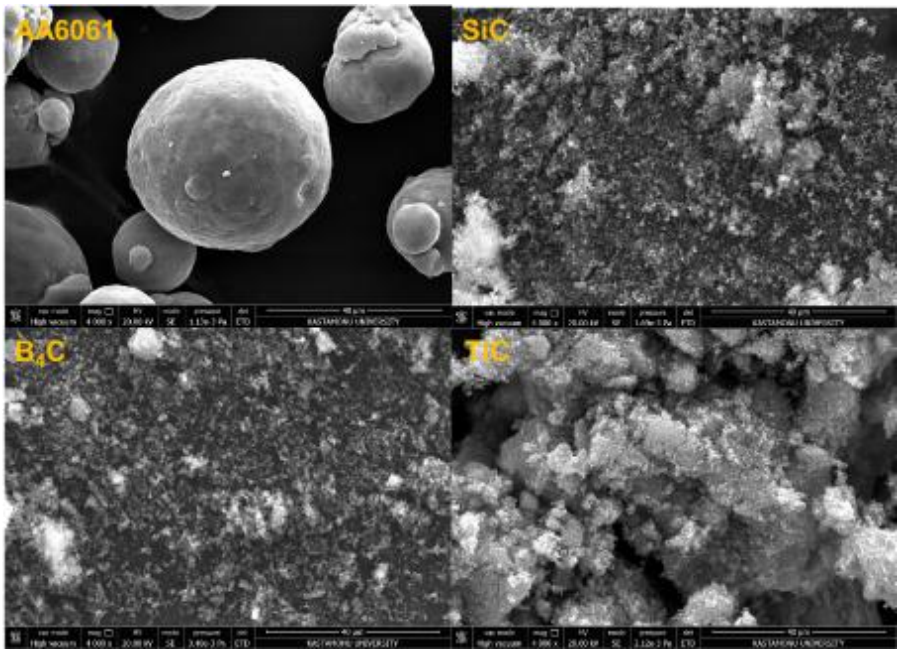
Bains vd. (2016) yaptığı çok yönlü derleme çalışmasında, MMK'lerin değerlendirmesini gerçekleştirmiştir. Diğer üretim yöntemlerine göre TM yönteminin AMKM üretimi için en optimum yöntem olduğunu rapor etmiştir. Bu yöntemin homojen bir mikroyapı elde edilmesinde büyük bir üretim kolaylığı sağladığını bildirmiştir. Özellikle karıştırmalı döküm yönteminin ve infiltrasyon yönteminin üretim aşamasında malzemede ciddi boşluk sorunları oluşturduğu belirlenmiştir.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında AA6061/SiC, AA6061/ B_4C, AA6061/TiC, AA6061/SiC/B_4C, AA6061/SiC/TiC, AA6061/B_4C/TiC, AA6061/SiC/B_4C/TiC kompozit malzemeler TM ve ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş, numuneler daha sonra mikroyapısal ve mekanik karakterizasyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında yapılan test ve analizler Kastamonu Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında bulunan cihaz ve ekipmanlarla gerçekleştirilmiştir.

7.1 Toz Karışımların Hazırlanması

Çalışmada kullanılan tozlar Nanografi Nano Teknoloji A.Ş. firmasından temin edilmiş olup, SEM görüntüleri Şekil 7.1'de, çalışmada kullanılan ana matris malzemesi AA6061'in kimyasal kompozisyonu Tablo 7.1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan tozların genel özellikleri tablo ise 7.2'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan AA6061 mikron boyutta tozlardan oluşmakta olup, kullanılan takviyeler (SiC, B_4C ve TiC) ise nano boyutta tercih edilmiştir.



Şekil 7.1 Çalışmada kullanılan tozların SEM görüntüleri

Tablo 7.1 Çalışmada kullanılan ana matris malzemesi AA6061'in kimyasal kompozisyonu

Si	Mn	Cr	Zn	Mg	Cu	Ti	Fe	Al
0,4-0,8	≤0,15	0,04-0,35	≤0,25	0,8-1,2	0,15-0,40	≤0,15	≤0,7	96

Tablo 7.2 Çalışmada kullanılan tozların genel özellikleri

Malzeme	**Saflık (%)**	**Boyut**	**Yoğunluk (g/cm^3)**
AA6061	>99,5	15-53 µm	2,5-2,9
SiC		50-70 nm	3,32
B_4C		40-60 nm	2,52
TiC		35-55 nm	4,5

Çalışmada matris malzemesi olarak kullanılan AA6061 tozları, SiC, B_4C ve TiC takviye parçacıklarıyla tekli, ikili ve üçlü kompozit olarak ağırlıkça yüzde 3; 6 ve 9 oranlarında karıştırılmıştır. Çalışmada kullanılacak olan AA6061 miktarı için yapılan hesaplamalarda AA6061'in yoğunluğu 2,7 g/cm^3 olarak alınmıştır. 10^{-4} hassasiyetinde terazide tartılan tozlar karışım olarak hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan karışım tozlara ait deney düzeneği Tablo 7.3 ve Tablo 7.4'te verilmiştir.

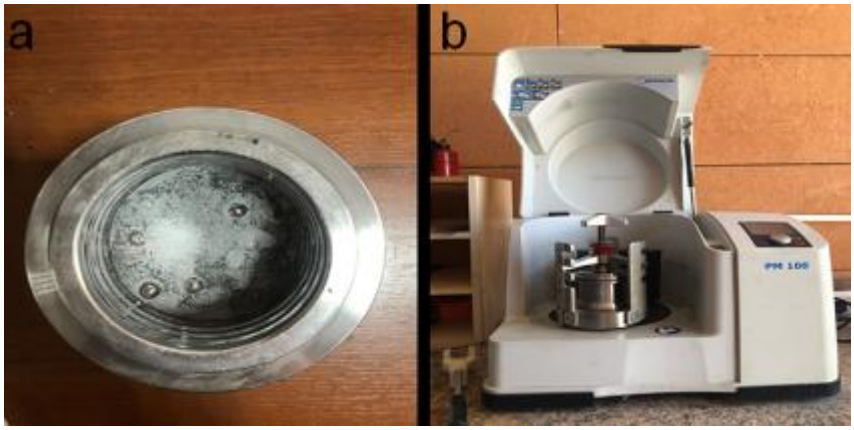
Tablo 7.3 Çalışmada kullanılan tozların karışım oranları

Numune No	Ağırlıkça %			
	AA6061	SiC	B_4C	TiC
1	100	0	0	0
2	97	3	0	0
3	94	6	0	0
4	91	9	0	0
5	97	0	3	0
6	94	0	6	0
7	91	0	9	0
8	97	0	0	3
9	94	0	0	6

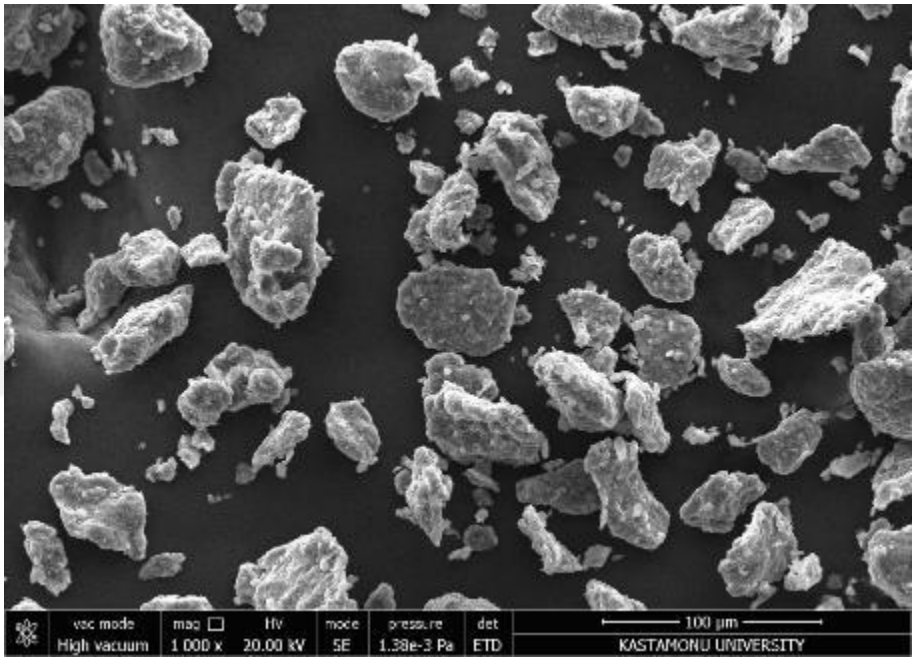
Tablo 7.4 Çalışmada kullanılan tozların karışım oranları

Numune No	Ağırlıkça %			
10	91	0	0	9
11	97	1,5	1,5	0
12	94	3	3	0
13	91	4,5	4,5	0
14	97	0	1,5	1,5
15	94	0	3	3
16	91	0	4,5	4,5
17	97	1,5	0	1,5
18	94	3	0	3
19	91	4,5	0	4,5
20	97	1	1	1
21	94	2	2	2
22	91	3	3	3

Bu tez çalışmasında, ekstrüzyonla tel çubuk üretimi için Ø25 mm çapında ve 55 mm yüksekliğinde silindirik biyetler üretilmiştir. Biyetlerin oluşturulmasında kullanılacak tozların miktarı (ağırlığı), biyetlerin hacmi ve tozların yoğunluğuna bağlı olarak belirlenmiştir. Tablo7.3'te belirtilen deney düzeneğine uygun olarak hazırlanan toz karışımları Retsch marka PM100 model bilyeli öğütücüde karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırma işleminde homojen bir karışım elde edebilmek için, 1/5 toz/bilya oranında, Ø10 mm çapında bilyalar kullanılarak, 350 rpm dönme hızı ve 90 dakika karıştırma süresinde tozların karıştırılması sağlanmıştır. Bir deney grubuna ait tozların karıştırılmadan önceki hali ile karıştırma işleminin yapıldığı cihaz Şekil 7.2'de, karıştırma işlemi sonrası SEM görüntüsü ise Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.2 Tozların karıştırılmadan önceki hali b) Retsch marka PM100 model olan bilyeli öğütücü



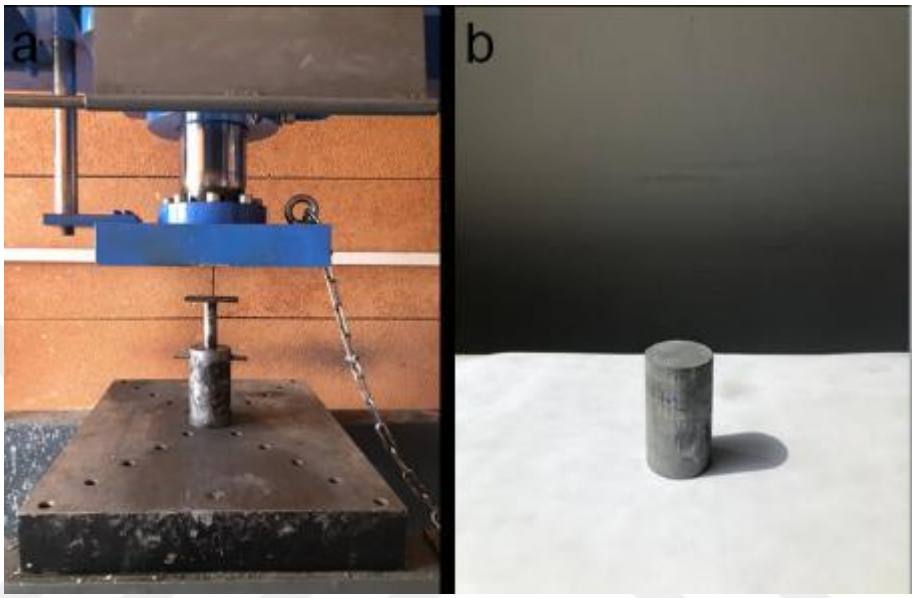
Şekil 7.3 21 numaralı alaşımın (%94 AA6061; %2 SiC; %2 B_4C; %2 TiC) karıştırma işlemi sonrasındaki SEM görüntüsü

Hazırlanan tozlar, karıştırılırken her yarım saatlik karıştırma işleminden sonra 10 dakika dinlendirilmiştir. Toz parçacıklarının topaklanmaması ve kalıpta sıvanma meydana gelmemesi için yağlayıcı olarak her karıştırma işleminde tozlara 0,5 gr. stearik asit ilave edilmiştir.

7.2 Biyetlerin Oluşturulması

Tablo 7.3 ve 7.4'te verilen karıştırma oranlarında hazırlanan tozlar, Ø25 mm çapında bir kalıp içerisinde, yüksekliği 55 mm olacak şekilde sıkıştırılarak biyet olarak

üretilmesi sağlanmıştır. Tozlar sıkıştırılırken kalıba zarar vermemek ve daha düzgün formda biyet oluşturmak için Sumidera 460 kalıp yağlayıcısı ile yağlanmıştır. Hazırlanan tozlar kalıba alındıktan sonra 120 ton kapasiteli Hidroliksan marka hidrolik preste 420 MPa basınçta soğuk pres işlemi görerek sıkıştırılmıştır. Şekil 7.4'te soğuk presleme işlemi ve sonrasında bir biyetin üretimine ait görüntü verilmiştir.



Şekil 7.4 a) soğuk presleme işlemi b) presleme sonrasında oluşan biyet

Sıkıştırılan tozlar, Ø25 mm çapında 55 mm uzunluğunda bir biyet formu oluşturulmuştur. Oluşan biyetler bir sonraki aşamada ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur.

7.3 Ekstrüzyon Yöntemiyle Kompozit Malzemelerin Üretilmesi

Ekstrüzyon işleminde sıkıştırma işlemiyle toz formdan elde edilen biyetler ile Ø6 mm çapındaki ekstrüzyon kalıbı arasında oluşacak sürtünme ve gerilimleri azaltmak için kalıp, Sumidera 460 kalıp yağlayıcısı ile yağlanmıştır. Bu sayede fırınlama işleminden sonra daha kaliteli ekstrüzyon yapılmış ve daha düzgün yüzeye sahip tel çubukların üretilmesi sağlanmıştır. Daha sonra biyetler yağlanan kalıp içerisine yerleştirilmiş ve Thermnevo marka fırında 530°C'de 3 saat boyunca ısıtılarak sıcak ekstrüzyon işlemine hazır hale getirilmiştir. Fırınlanan kalıp içerisindeki bir biyete ait görüntü Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.5 Fırın içerisindeki kalıp ve biyetin görüntüsü

3 saat bekleme süresi sonunda fırından alınan biyetler hızlı bir şekilde bekletilmeden Hidroliksan marka 120 ton kapasiteli preste ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Deneyler öncesinde yapılan pilot uygulamalarda 530°C sıcaklığın ekstrüzyon işleminde kalıp ve malzeme arasında sürtünmeyi arttırdığı ve uygun olmadığı tespit edilmiştir. 530°C'de ekstrüze edilen bir biyetten oluşturulan tel çubuğun görüntüsü Şekil 7.6'da verilmiştir.



Şekil 7.6 Olumsuz ekstrüzyon görüntüsü

Şekil 7.6'da verilen görüntü incelendiğinde tel çubuğun çam dalını andıran kırıntılı bir yapıda oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durumun önüne geçmek için biyetlerin 530°C'de 3 saat fırında ısıtıldıktan sonra ekstrüzyon sıcaklığı için daha uygun olduğu tespit edilen 450°C'ye fırın içerisinde soğuması beklenerek ekstrüzyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. 530°C'de 3 saat ısıtılan ve 450°C'de ekstrüze edilen tel çubukların üretiminin başarıyla gerçekleştiği tespit edilmiştir. Üretimi gerçekleşen örnek bir tel çubuğa ait görüntü Şekil 7.7'de üretilen tel çubukların tümünün gösterildiği fotoğraf ise Şekil 7.8'de verilmiştir.



Şekil 7.7 Ekstrüze edilen bir biyetten üretilen tel çubuğun görüntüsü



Şekil 7.8 Ekstrüzyon işlemi tamamlanmış numunelerin görüntüsü

7.4 Üretilen Numunelerin Yaşlandırma İşlemine Tabi Tutulması

Al alaşımlarının endüstride kullanımları yaşlandırılmış malzemelerden oluştuğundan ve ayrıca deneysel çalışmalar sürecinde yaşanılabilecek olan ısı kayıpları ve bu sebeple üretim sırasında oluşabilecek farklılıkların önüne geçmek, numunelerin eşit ve aynı şartlarda değerlendirilmesi amacıyla ekstrüze edilen tüm alaşımlar yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur.

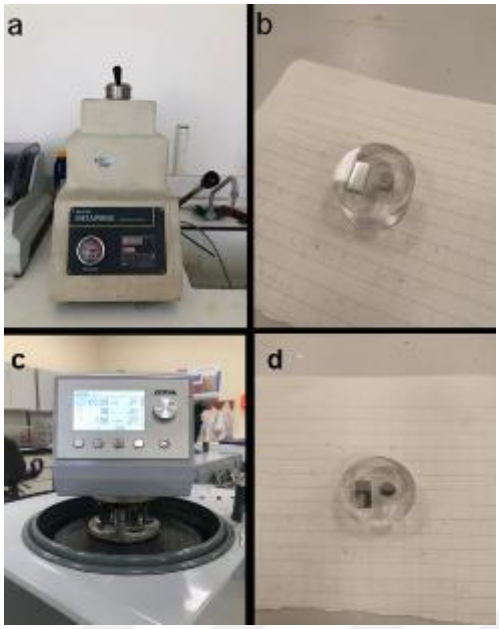
Ekstrüzyon işlemi sonrasında oluşan numuneler öncelikle Thermnevo marka fırında 530°C'de 2 saat çözündürme işlemi görmüş ve ardından su verme ile hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Yapılan literatür araştırmalarında (Akyüz ve Şenaysoy, 2014; Al-Saadı ve Tunay, 2017) 6000 serisi farklı AA'lar üzerindeki yaşlandırma işlemlerinde 6 saat yaşlandırılmış numunelerin iyi sonuçlar verdiği görüldüğünden, alaşımların mekanik özelliklerini geliştirmek için Thermnevo marka fırında 180°C sıcaklıkta 6 saat süre ile yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin fırındaki görüntüsü Şekil 7.9'da verilmiştir.



Şekil 7.9 Yaşlandırma işlemine tabi tutulan numuneler

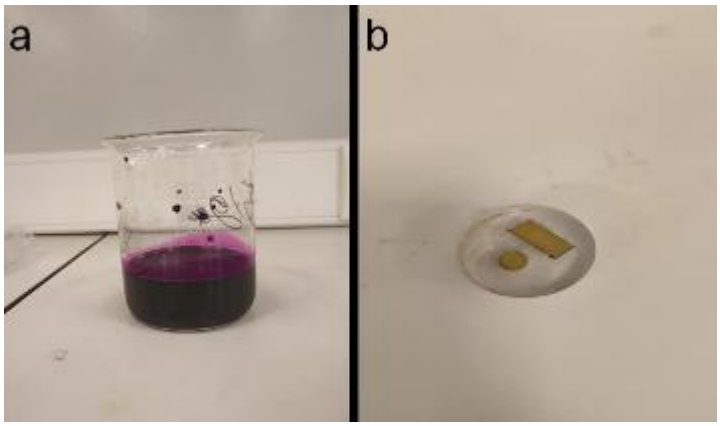
7.5 Numunelerin Deneysel Çalışmalara Hazırlanması

Yaşlandırılan numuneler öncelikle Metkon Metapress marka bakalite alma cihazında çapı Ø30 mm olacak şekilde 170°C sıcaklıkta bakalite gömülmüştür. Ardından ATM marka Saphir 250 model zımpara cihazında sırasıyla 300; 450; 600; 800; 1200; 2500 gritlik zımparalarla 30N basınçta ters yönlü zımparalama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Zımparalanan numunelere daha sonrasında 3 ve 1 µm solüsyonlarla parlatma işlemi uygulanmıştır. Numunelerin bakalite alma işlemi, bakalite alınmış numune görüntüsü, zımparalama ve parlatma işlemleri ile parlatılmış bir numunenin görüntüsü Şekil 7.10'da verilmiştir.



Şekil 7.10 a) Metkon Metapress marka bakalite alma cihazı, b) Bakalite gömülü numune, c) Zımparalama işlemi, d) Parlatılmış numune

Yüzeyleri parlatılan numuneler Weck's dağlama çözeltisi (%95; Su (H_2O); %4 Potasyumpermanganat ($KMnO_4$), %1 Sodyumhidroksit) hazırlanarak damlatma yöntemi ile 25–40 saniye aralığında dağlanmıştır (Şekil 7.11). Farklı takviye kullanımları nedeniyle alaşımlar arasında yapısal farklılıklar olması dağlama sürelerinde farklılıklar göstermiştir. Dağlama süresinin tespitinde numuneler 5'er saniyelik zaman dilimlerinde kademeli olarak mikroskop altında incelenmiş ve ideal dağlama süresi tespit edilmeye çalışılmıştır. Hazırlanan numuneler deneysel çalışmalar aşamasına geçmeden önce vakumlu desikatörde muhafaza edilmiş ve böylece numuneler üzerindeki olası korozyon riski engellenmiştir.



Şekil 7.11 a)Weck's dağlama çözeltisi, b) Dağlanmış numune

8. BULGULAR VE TARTIŞMA

TM ve ekstrüzyon metoduyla üretilen AA6061 matrisli ve SiC, B_4C ve TiC takviyeli tekli ve ikili (hibrit) kompozitler yoğunluk ölçümü, mikroyapı incelemeleri (optik mikroskop, SEM, EDS, XRD), sertlik ve aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki başlıklar altında verilmiştir.

8.1 Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

TM yöntemi ile üretilen malzemelerin ekstrüzyon ve yaşlandırma işlemleri sonrasında bağıl yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin bağıl yoğunluk ve gözeneklilik değerleri aşağıda grafiklerde (Şekil 8.1 ve Şekil 8.2) verilmiştir. Teorik yoğunluk, deneysel yoğunluk ve bağıl yoğunluklar aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır.

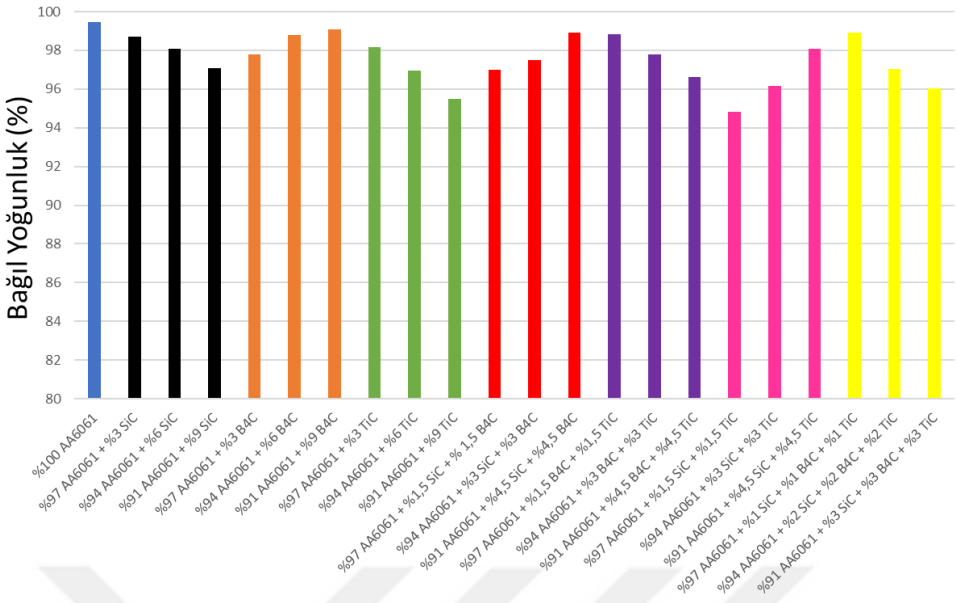
$$\rho_T = [(\%w_m.\rho_m) + (\%w_{R1}.\rho_{R1}) + (\%w_{R2}.\rho_{R2}) + (\%w_{R3}.\rho_{R3}) \quad (8.1)$$

$$\rho_E = \left[\frac{m_D}{(m_s - m_{SIW})}\right]\rho_W \quad (8.2)$$

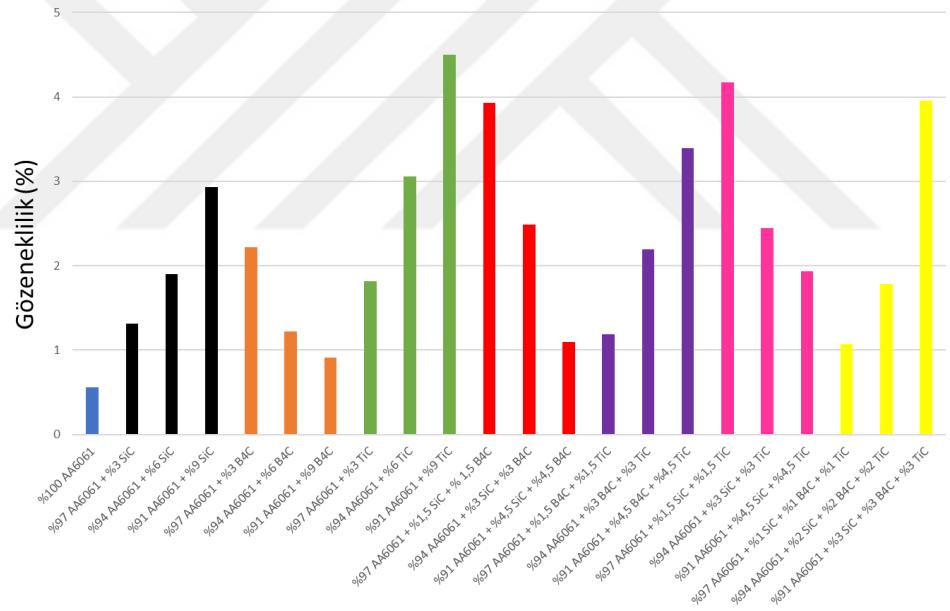
$$\%\rho_R = \frac{Deneysel\ yoğunluk\left(\frac{gr}{cm^3}\right)}{Teorik\ yoğunluk\left(\frac{gr}{cm^3}\right)} \times 100 \quad (8.3)$$

$$\%P = [1 - (\rho_E / \rho_T)]\ x\ 100 \quad (8.4)$$

Eşitliklerdeki ρ_T teorik yoğunluğu, ρ_E deneysel yoğunluğu, ρ_R bağıl (relativ) yoğunluğu ρ_m matris malzemesinin yoğunluğunu, ρ_{R1} birinci takviye malzemesinin yoğunluğunu, ρ_{R2} ikinci takviye malzemesinin yoğunluğunu, ρ_{R3} üçüncü takviye malzemesinin yoğunluğunu, ρ_w suyun yoğunluğunu, w_m matris malzemesinin ağırlıkça % oranını, w_{R1} birinci takviye malzemesinin ağırlıkça % oranını, w_{R2} ikinci takviye malzemesinin ağırlıkça % oranını, w_{R3} üçüncü takviye malzemesinin ağırlıkça % oranını, m_D kompozitin kuru kütlesini, m_S kompozitin suya doymuş kütlesini, m_{SIW} ise kompozitin suda asılı kütlesini ifade etmektedir.



Şekil 8.1 Numunelere ait bağıl yoğunluk grafiği



Şekil 8.2 Numunelere ait gözeneklilik grafiği

Verilen grafikler incelendiğinde; geleneksel TM yöntemiyle üretilen MMK'lara kıyasla ekstrüzyon yöntemiyle üretilen kompozitlerin bağıl yoğunluklarının yüksek, gözeneklilikleriniin ise düşük olduğu tespit edilmiştir. Ana matris malzemesi AA6061'in bağıl yoğunluğu ve gözenekliliğinin sırasıyla %99,44 ve %0,55 olduğu hesaplanmıştır. Takviye malzemesi olarak kullanılan SiC'nin ana matris olan AA6061'e göre yoğunluğunun fazla olması sebebiyle oluşan AA6061-SiC numunelerinin bağıl yoğunluk oranlarında düşüş, gözeneklilik değerlerinde kademeli

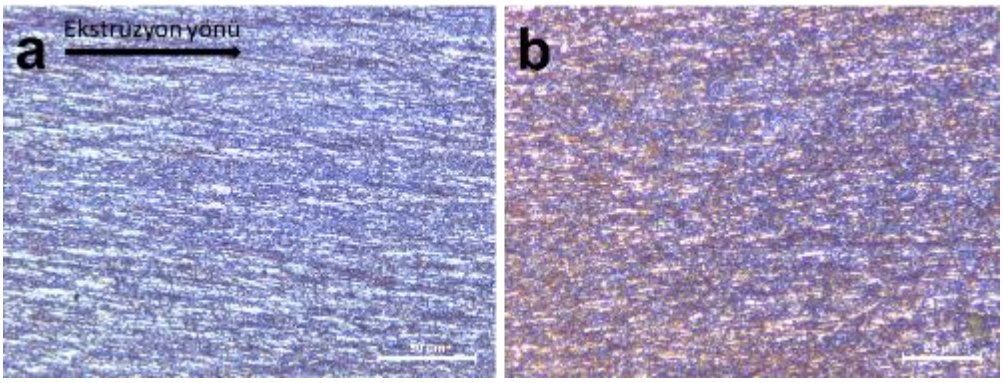
bir artış gözlemlenmiştir. Bununla beraber takviye malzemesi olarak kullanılan B_4C'nin yoğunluğunun ana matris olan AA6061'e göre düşük olması diğer takviye türlerine göre gözeneklilik değerlerinde kademeli olarak bir düşüş meydana getirmiştir. TiC'ün AA6061'e nazaran yoğunluğunun çok daha yüksek olması nedeniyle de ana malzeme ve AA6061-TiC numuneleri için gözeneklilik değerlerinde artışlara rastlanmıştır.

8.2 Mikroyapı İncelemeleri

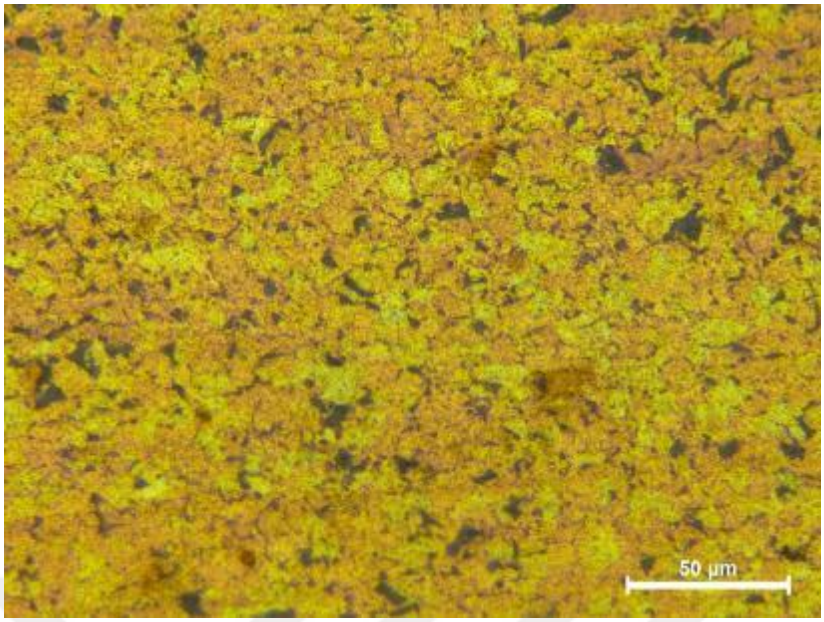
Kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri kapsamında sonuçların birbirini desteklemesi için numunelere hem optik mikroskop incelemeleri hem de SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin optik mikroskop ve SEM incelemeleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

8.2.1 Optik Mikroskop İncelemeleri

Takviyesiz AA6061 ve AA6061 matrisli NKM'ler ve HNKM'lerin optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 8.3 ve Şekil 8.25 aralığında verilmiştir. Takviyesiz AA6061'e ait ekstrüzyon yönündeki OM görüntüleri Şekil 8.3'te, ekstrüzyon yönüne dik doğrultudaki OM görüntüsü ise Şekil 8.4'de verilmiştir.



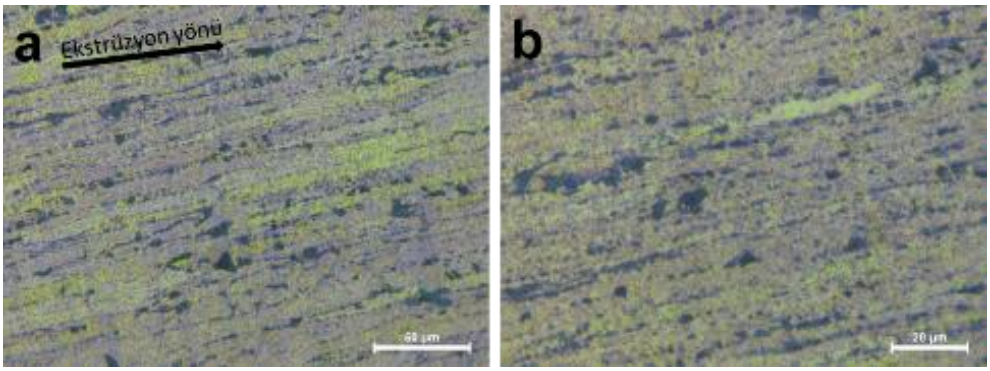
Şekil 8.3 AA6061'e ait ekstrüzyon yönündeki OM görüntüleri a)500X, b) 1000X



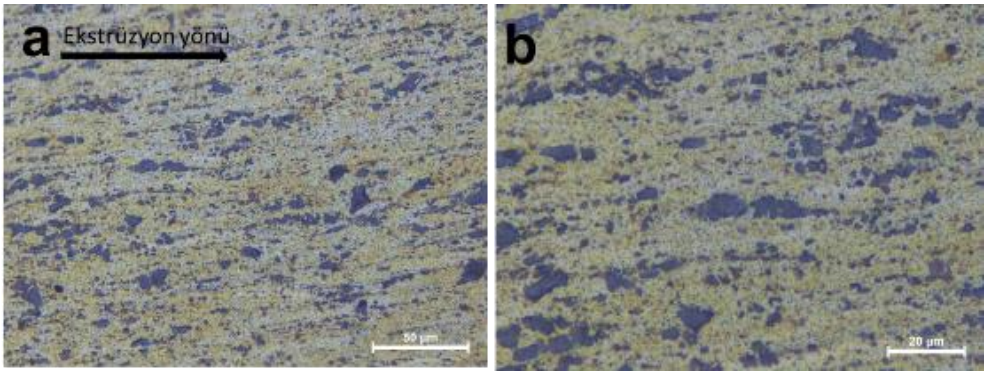
Şekil 8.4 AA6061'e ait ekstrüzyon yönüne dik doğrultuda alınan OM fotoğrafı, 500X büyütme

Şekil 8.3'te verilen görüntüler incelendiğinde; malzemenin içyapısında tanelerin ekstrüzyon yönünde yönlendiği gözlenmektedir. Şekil 8.4'te verilen görüntüler incelendiğinde ise tanelerin genel olarak eş eksenli bir formda ekstrüzyon nedeniyle sıkışarak oluştuğu görülmektedir. Her iki görüntü birlikte değerlendirildiğinde; gözeneklilik değerinin de düşük olduğu söylenebilir. Buna sebep olarak kompozit malzemenin ekstrüzyon yöntemi ile yüksek yoğunluklu ve takviyesiz olarak üretilmesi gösterilebilir. NKM'ler ve HNKM'lerin ekstrüzyon yönündeki optik mikroskop görüntüleri ise sırasıyla Şekil 8.5 ve Şekil 8.25 arasında verilmiştir.

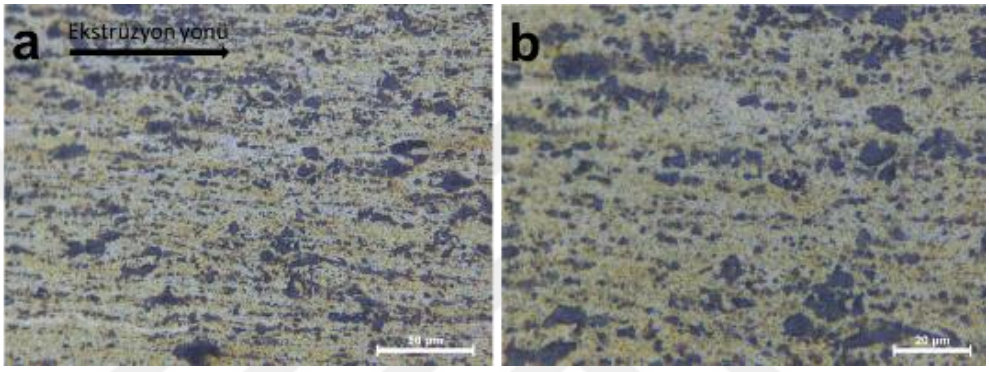
Şekil 8.5 – Şekil 8.7 arasında SiC takviyeli AA6061 matrisli NKM'lerin OM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.5 %97 AA6061 + %3 SiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X, b) 1000X



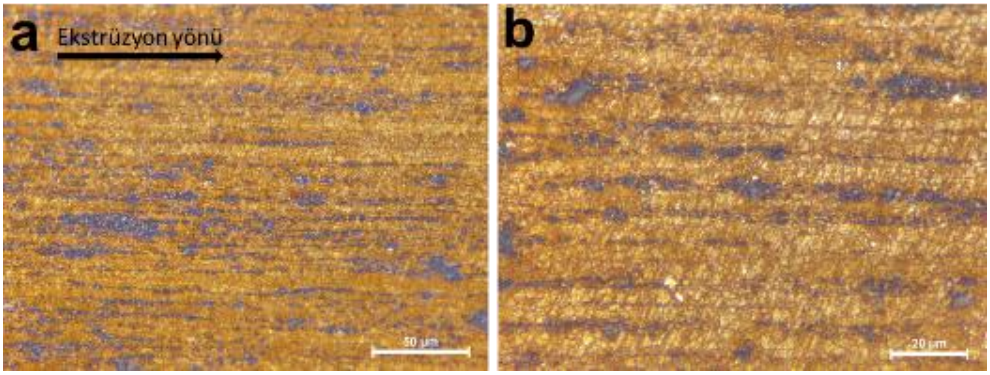
Şekil 8.6 %94 AA6061 + %6 SiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X, b) 1000X



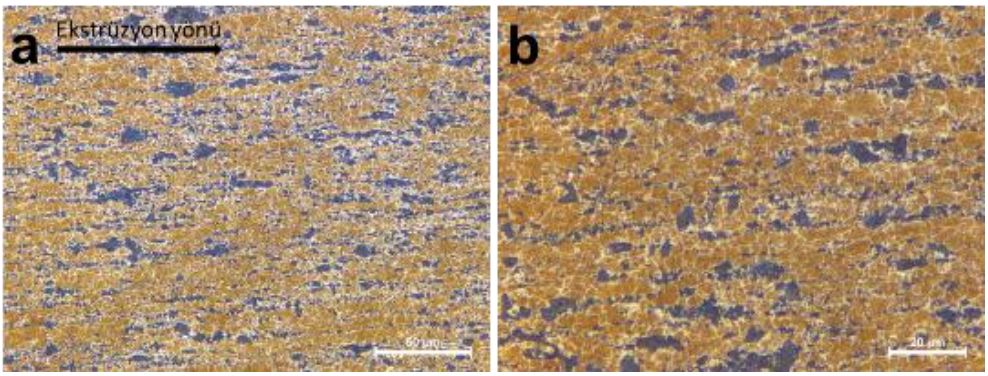
Şekil 8.7 %91 AA6061 + %9 SiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X, b) 1000X

Şekil 8.5 – Şekil 8.7 arasında verilen görüntüler incelendiğinde; SiC takviye oranı arttıkça OM görüntülerinde koyu ve siyah bölgelerin varlığı artmıştır. OM görüntülerinde SiC takviyeli NKM'lerin ekstrüzyon yönünde uzamış ve deforme olmuş tanelere sahip olduğu görülmüştür. Malzeme üzerinde görülen koyu bölgelerin matris içerisindeki farklı fazlar olduğu düşünülmektedir.

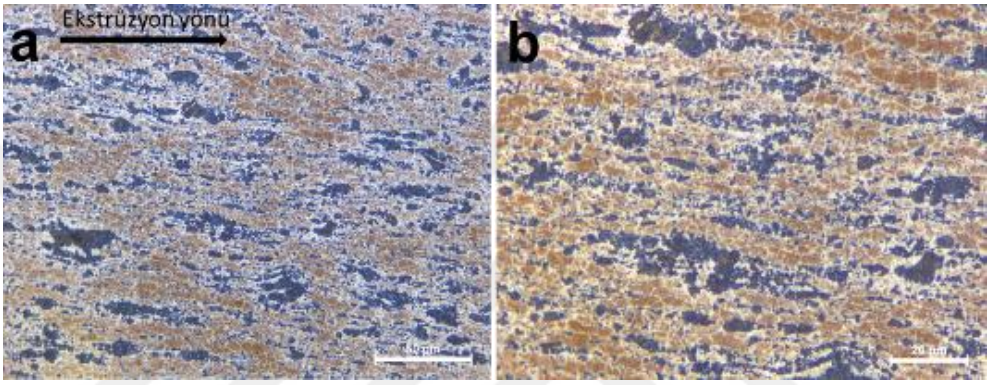
Şekil 8.8 – Şekil 8.10 arasında ise B_4C takviyeli AA6061 matrisli NKM'lerin OM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.8 %97 AA6061 + %3 B_4C SiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X, b) 1000X



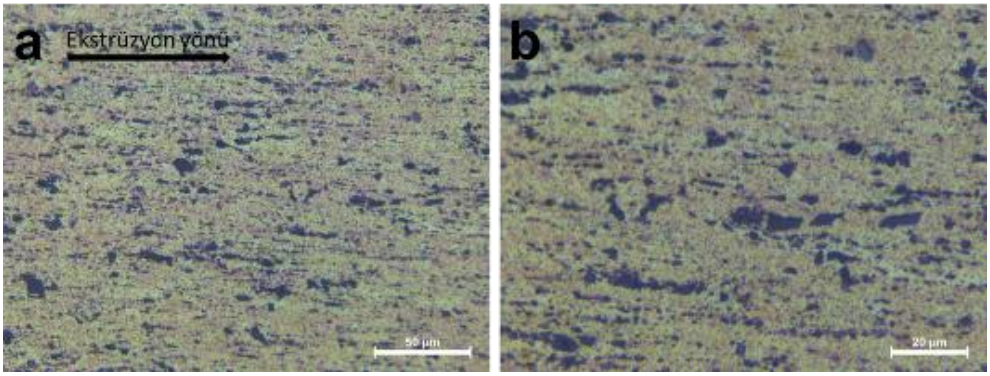
Şekil 8.9 %94 AA6061 + %6 B_4C içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X, b) 1000X



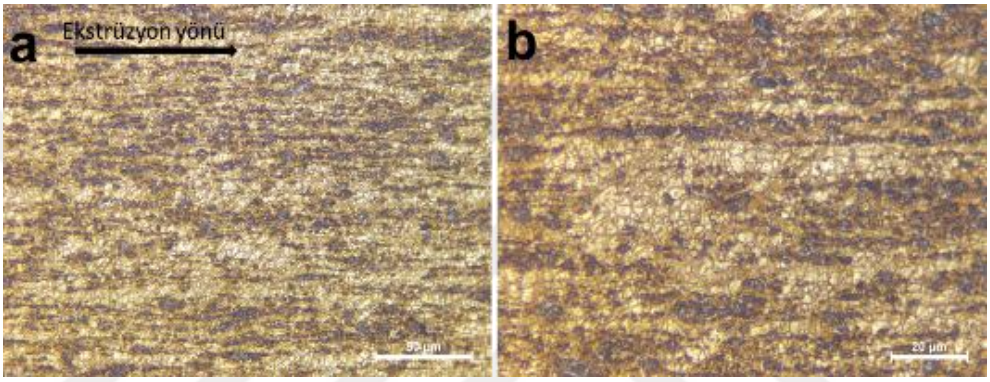
Şekil 8.10 %91 AA6061 + %9 B_4C içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme

Şekil 8.8-Şekil 8.10 arasında verilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, Malzemedeki B_4C takviye elemanlarının homojen olarak dağıldığı ve tanelerin de ekstrüzyon yönünde uzadığı tespit edilmiştir. Artan takviye oranına bağlı olarak görüntülerdeki siyah ve koyu bölgelerde artışlar gözlemlenmiştir. Yapılan yoğunluk ölçümlerinde B_4C'nin yoğunluğuna bağlı olarak takviye partikül artışıyla birlikte NKM'nin gözeneklilik değerlerinde düşüşler görüldüğü belirlenmiştir. Bu durum yapıda boşlukların ve gözeneklerin az olduğunu ve takviye partikül artışıyla yoğunluğun düştüğünü ortaya koymaktadır.

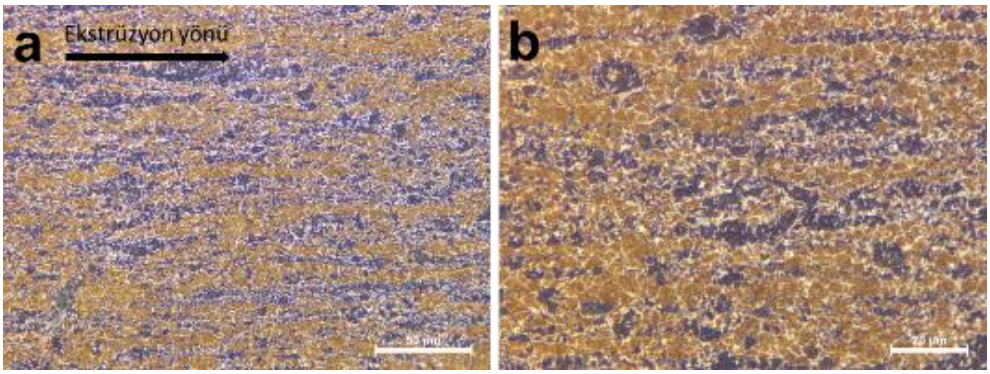
TiC takviyeli AA6061 matrisli NKM'lerin OM görüntüleri ise Şekil 8.11 – Şekil 8.13 arasında verilmiştir.



Şekil 8.11 %97 AA6061 + %3 TiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme



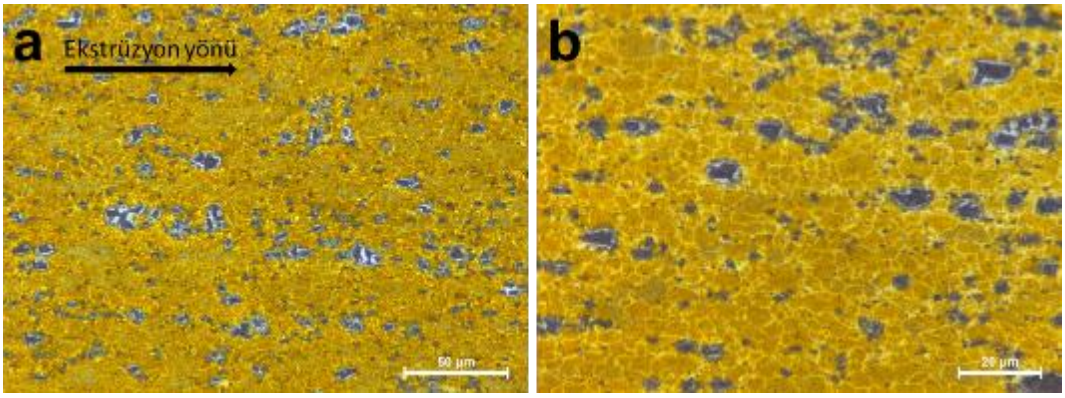
Şekil 8.12 %94 AA6061 + %6 TiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme



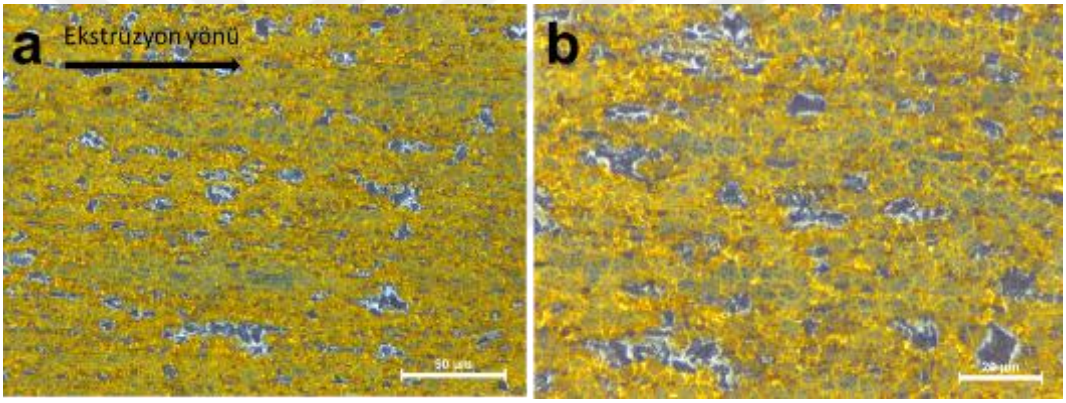
Şekil 8.13 %91 AA6061 + %9 TiC içeren NKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme

Şekil 8.11-8.13'te sırasıyla %3 – 6 ve 9 oranlarında TiC takviyesi yapılmış NKM'lere ait 500X ve 1000X büyütmelerde OM görüntüleri verilmiştir. NKM'lere ait taneler ve tane sınırları net bir şekilde görünmektedir. NKM'lerin OM görüntüleri incelendiğinde malzeme içerisindeki TiC oranın artmasıyla birlikte malzeme içerisindeki koyu bölgelerde artışlar meydana gelmiştir. Bu nedenle koyu bölgeler TiC varlığını işaret etmektedir.

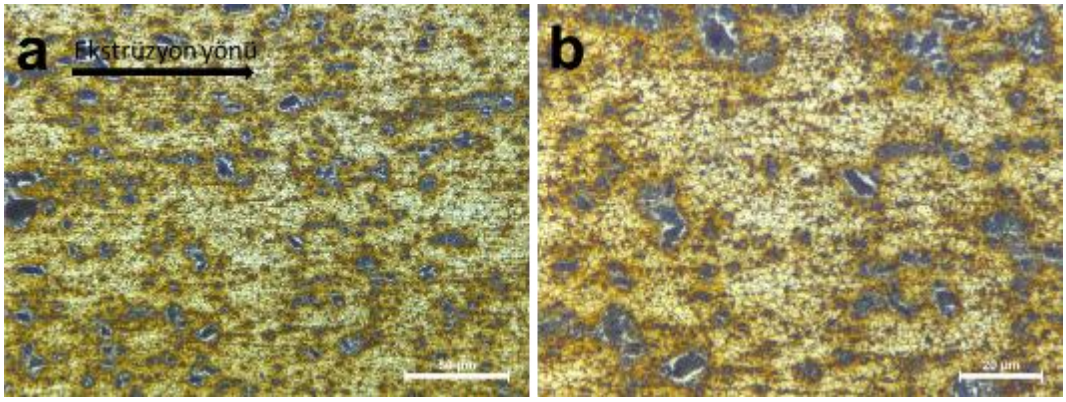
SiC ve B_4C takviyeli AA6061 matrisli HNKM'lerin OM görüntüleri ise Şekil 8.14 – Şekil 8.16 arasında verilmiştir.



Şekil 8.14 %97 AA6061 + %1,5 SiC +%1,5 B_4C içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme



Şekil 8.15 %94 AA6061 + %3SiC +%3 B_4C içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme

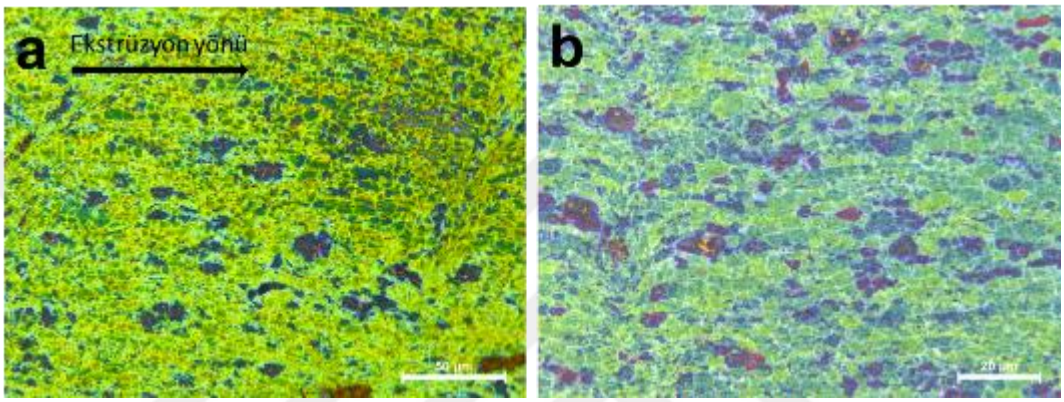


Şekil 8.16 %91 AA6061 + %4,5 SiC +%4,5 B_4C içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme

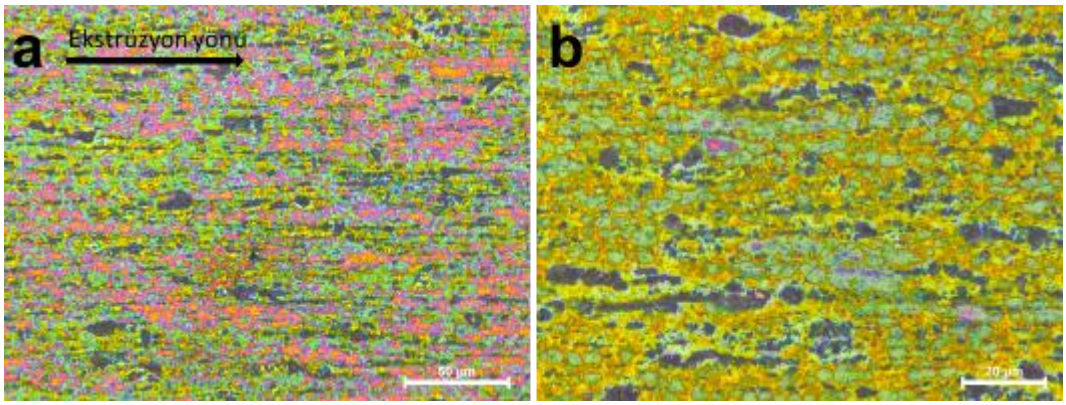
Şekil 8.14-8.16'da sırasıyla %1,5 – 3 – 4,5 takviye oranlarında SiC ve B_4C takviye elemanları eklenmiş HNKM'lerin görüntüleri verilmiştir. OM görüntüleri

incelendiğinde malzeme tanelerinin ekstrüzyon yönünde uzadığı görülmüştür. Malzeme üzerindeki koyu bölgelerin matris içerisindeki takviye elamanlarına ait olduğu düşünülmektedir. Takviye oranı arttıkça koyu bölgelerin varlığı dikkat çekmektedir.

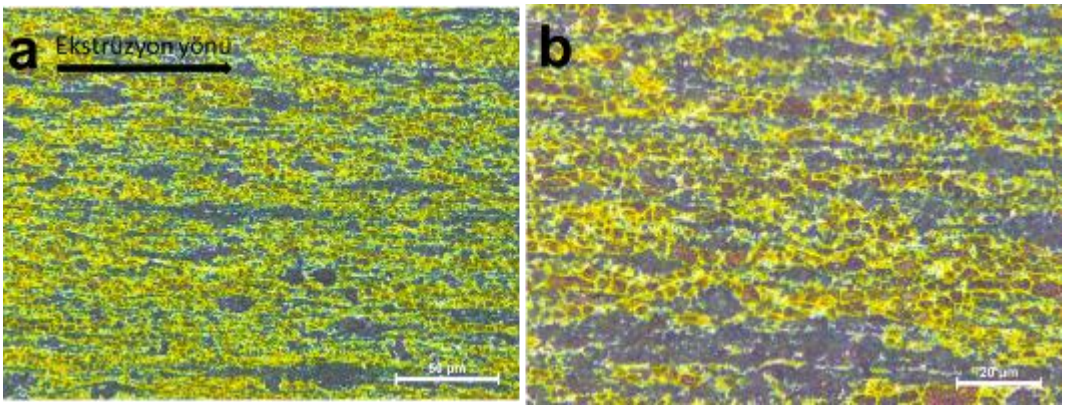
B_4C ve TiC takviyeli AA6061 matrisli HNKM'lerin OM görüntüleri ise Şekil 8.17 – Şekil 8.19 arasında verilmiştir.



Şekil 8.17 %97 AA6061 + %1,5 B_4C + %1,5 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme



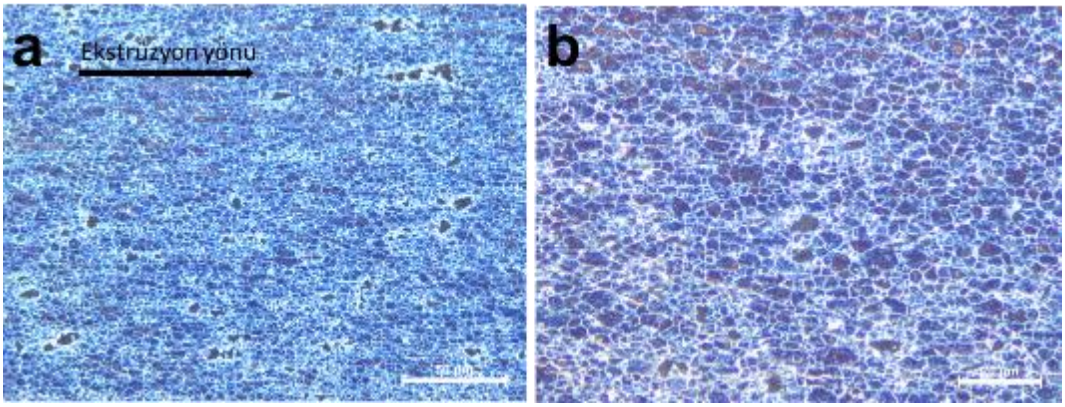
Şekil 8.18 %94 AA6061 +%3 B_4C + %3 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme



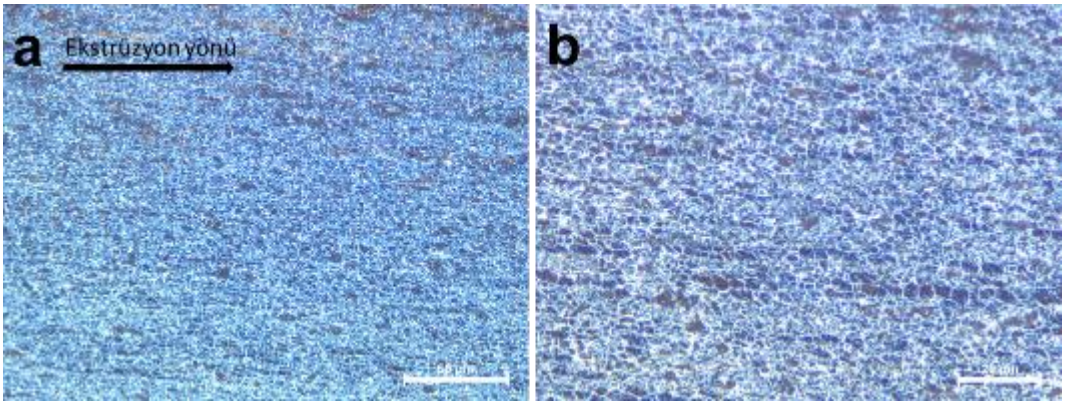
Şekil 8.19 %91 AA6061 + %4,5 B_4C + %4,5 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a)500X büyütme, b) 1000X büyütme

Şekil 8.17-8.19'da B_4C ve TiC takviyeli HNKM'lere ait görüntüler verilmiştir. Malzeme içerisindeki taneler ekstrüzyon yönünde uzama göstermişlerdir. Malzeme içerisinde görülen koyu bölgelerin takviye fazlara ait olduğu düşünülmekte olup, takviye oranı arttıkça koyu bölgelerin varlığının arttığı tespit edilmiştir.

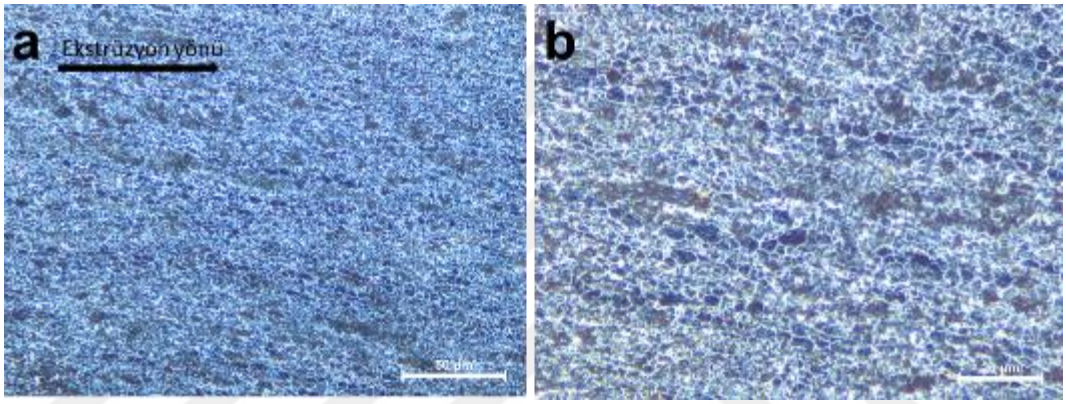
SiC ve TiC takviyeli AA6061 matrisli HNKM'lerin OM görüntüleri ise Şekil 8.20 – Şekil 8.22 arasında verilmiştir.



Şekil 8.20 %97 AA6061 + %1,5 SiC + %1,5 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme



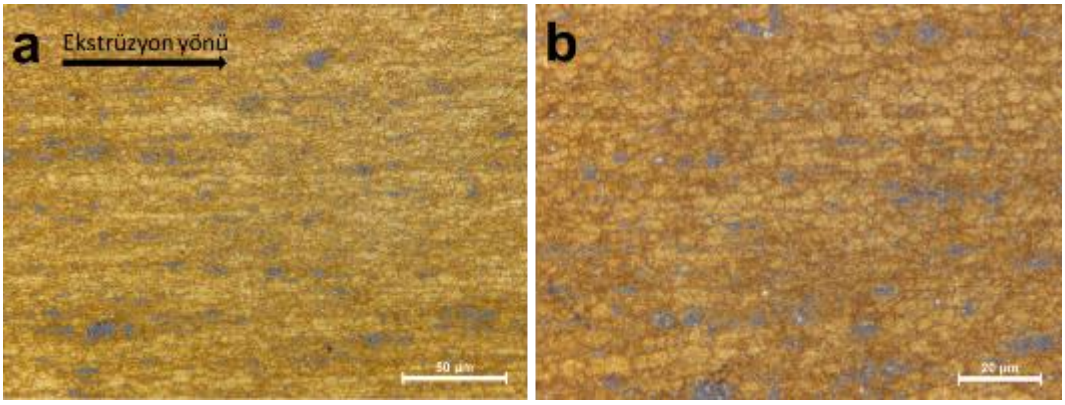
Şekil 8.21 %94 AA6061 + %3 SiC + %3 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme



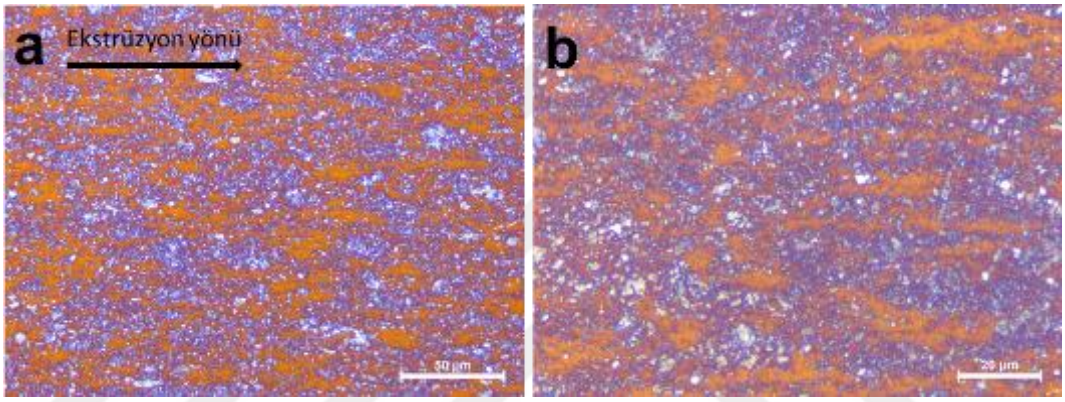
Şekil 8.22 %91 AA6061 + %4,5 SiC + %4,5 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme

Şekil 8.20-8.22'de SiC ve TiC takviyeli HNKM'lerin OM mikroskop görüntüleri incelendiğinde HNKM içerisindeki taneler net bir şekilde gözlemlenmektedir. HNKM içerisindeki taneler ekstrüzyon yönünde uzamakta olup, takviye oranı arttıkça koyu bölgelerin varlığı da artmıştır.

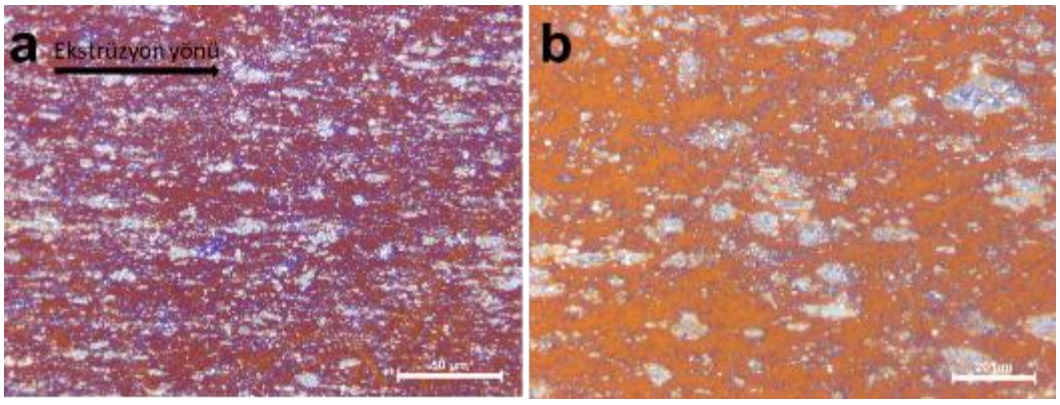
SiC, B_4C ve TiC takviyeli AA6061 matrisli üçlü HNKM'lerin OM görüntüleri ise Şekil 8.23 – Şekil 8.25 arasında verilmiştir.



Şekil 8.23 %97 AA6061 +% 1 SiC + %1 B_4C +%1 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme



Şekil 8.24 %94 AA6061 + %2 SiC + %2 B_4C + %2 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme



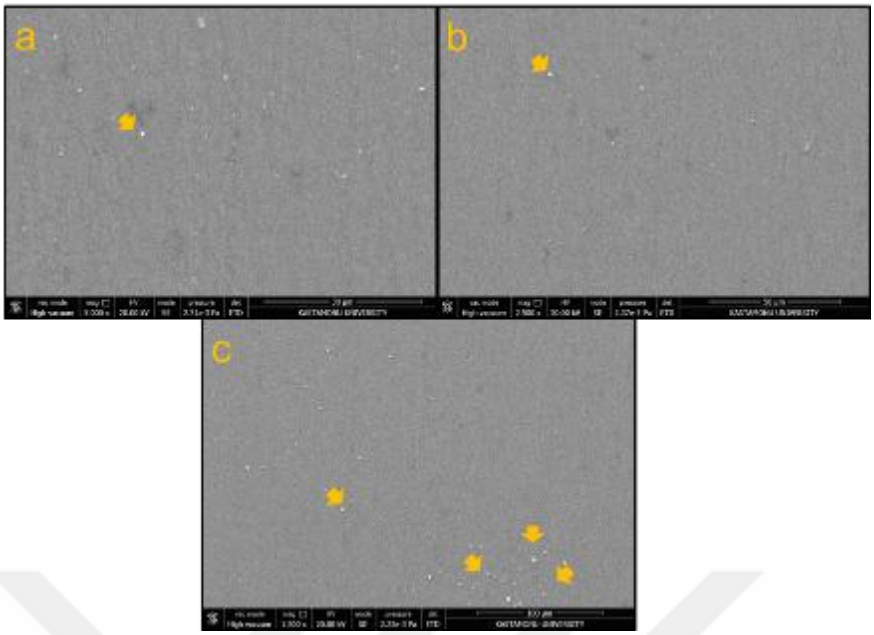
Şekil 8.25 %91 AA6061 +%3 SiC + %3 B_4C + %3 TiC içeren HNKM'ye ait OM görüntüleri a) 500X büyütme, b) 1000X büyütme

Şekil 8.23 – Şekil 8.25 arasında verilen üçlü HNKM'lerin mikroyapıları incelendiğinde de diğer mikroyapılara benzer görüntülerin elde edildiği tespit edilmiş olup, takviye oranları arttıkça koyu bölgelerde artışlar gözlemlenmiştir. Taneler ayrıca ekstrüzyon yönünde uzama göstermiştir.

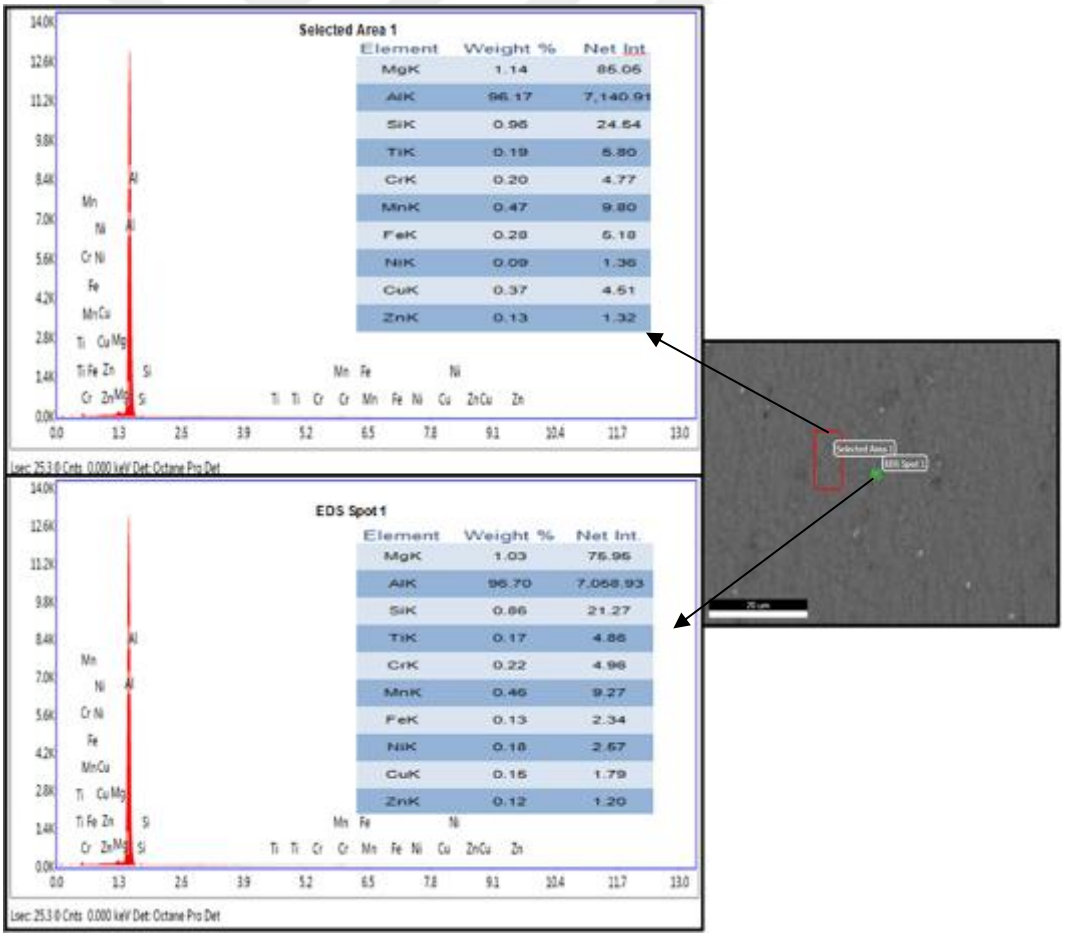
Genel olarak NKM'ler ve HNKM'lerin optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde malzeme içindeki tanelerin ve tane sınırlarının net bir şekilde görüldüğü gözlemlenmiştir. Malzeme tanelerinin küçük olmasının sebebi malzemenin ekstrüzyon yöntemi ile sıkıştırılarak üretilmesinden kaynaklanmaktadır. NKM'ler ve HNKM'lerde oluşan taneler ekstrüzyon yönünde uzamıştır. Malzemeler ekstrüzyon yöntemi ile üretildiğinden malzeme üzerindeki gözeneklilik ve boşlukların diğer yöntemlerle üretilen malzemelere nazaran daha az olduğu ve bu sebeple görüntülerde rastlanan koyu bölgelerin boşluk veya gözenek olmadığı ve NKM'lerin ve HNKM'lerin içerisindeki takviye parçacıkları veya yaşlanma nedeniyle oluşabilecek intermetalik fazlar olabileceği düşünülmektedir. Üretilen NKM'ler ve HNKM'lerin OM görüntülerinin renkli bir görünümde olmasının sebebi, numunelerin Weck's dağlama solüsyonu ile dağlanmasından kaynaklanmaktadır.

8.2.2 SEM ve EDS incelemeleri

AA6061 ve AA6061 matrisli NKM ve HNKM'lerin SEM görüntüleri Şekil 8.26, Şekil 8.28; Şekil 8.32; Şekil 8.36; Şekil 8.40; Şekil 8.44; Şekil 8.48 ve Şekil 8.52'de verilmiştir. Takviyesiz AA6061'e ait ekstrüzyon yönündeki SEM görüntüleri Şekil 8.26'da , EDS analizleri ise Şekil 8.27'de verilmiştir. SEM görüntülerinden alınan alan taramalı EDS analiz sonuçları SiC takviyeli NKM'ler için Şekil 8.29 - Şekil 8.31 arasında, B_4C içeren NKM'ler için Şekil 8.33 - Şekil 8.35 arasında, TiC içeren NKM'ler için Şekil 8.37 - Şekil 8.39 arasında verilmiştir. İkili HNKM'lerde SiC ve B_4C içeren HNKM'lerin EDS analizleri Şekil 8.41 - Şekil 8.43 arasında, B_4C ve TiC içeren HNKM'ler için Şekil 8.45 - 8.47 arasında, SiC ve TiC içeren HNKM'ler için Şekil 8.49 - Şekil 8.51 arasında verilmiştir. Üçlü HNKM'lerin EDS analizleri ise Şekil 8.53 - Şekil 8.55 arasında verilmiştir. Tüm EDS incelemelerinde Al, Mg, Si, Mn, Fe, Cr, Cu, Zn, Ni, Ti, B, C, O elementlerine bakılmıştır. EDS incelemeleri noktasal ve alan taramalı olarak gerçekleştirilmiştir. Bazı SEM görüntülerinde partikül olduğu düşünülen bölgelere noktasal analizler gerçekleştirilerek partiküllerin varlığı tespit edilmeye çalışılmıştır.

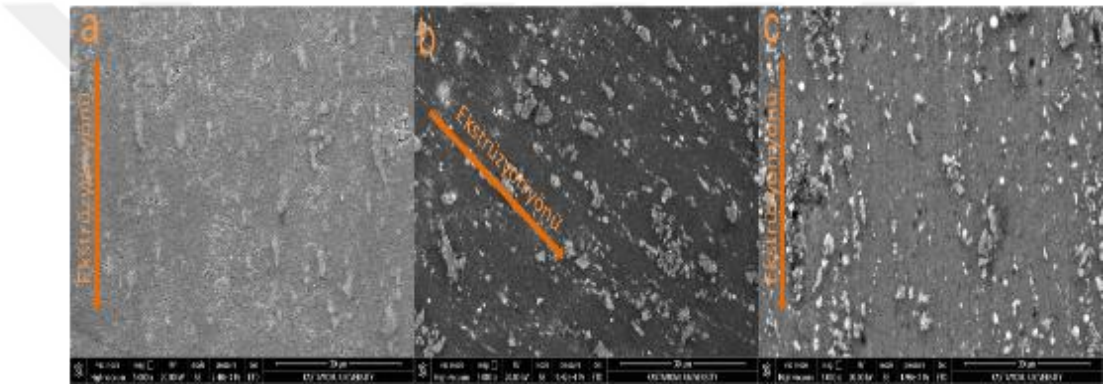


Şekil 8.26 AA6061'e ait SEM görüntüleri a) 5000X, b) 2500X c) 1200X

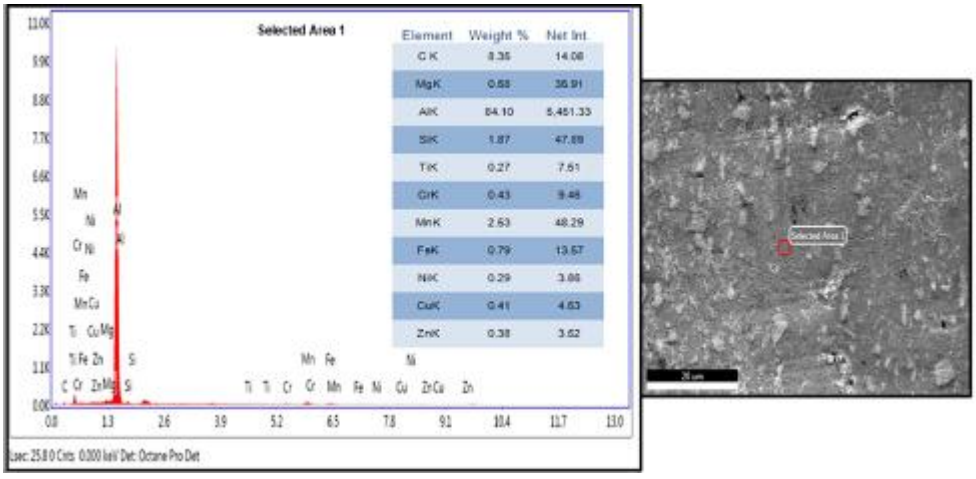


Şekil 8.27 AA6061'e ait EDS grafik ve sonuçları

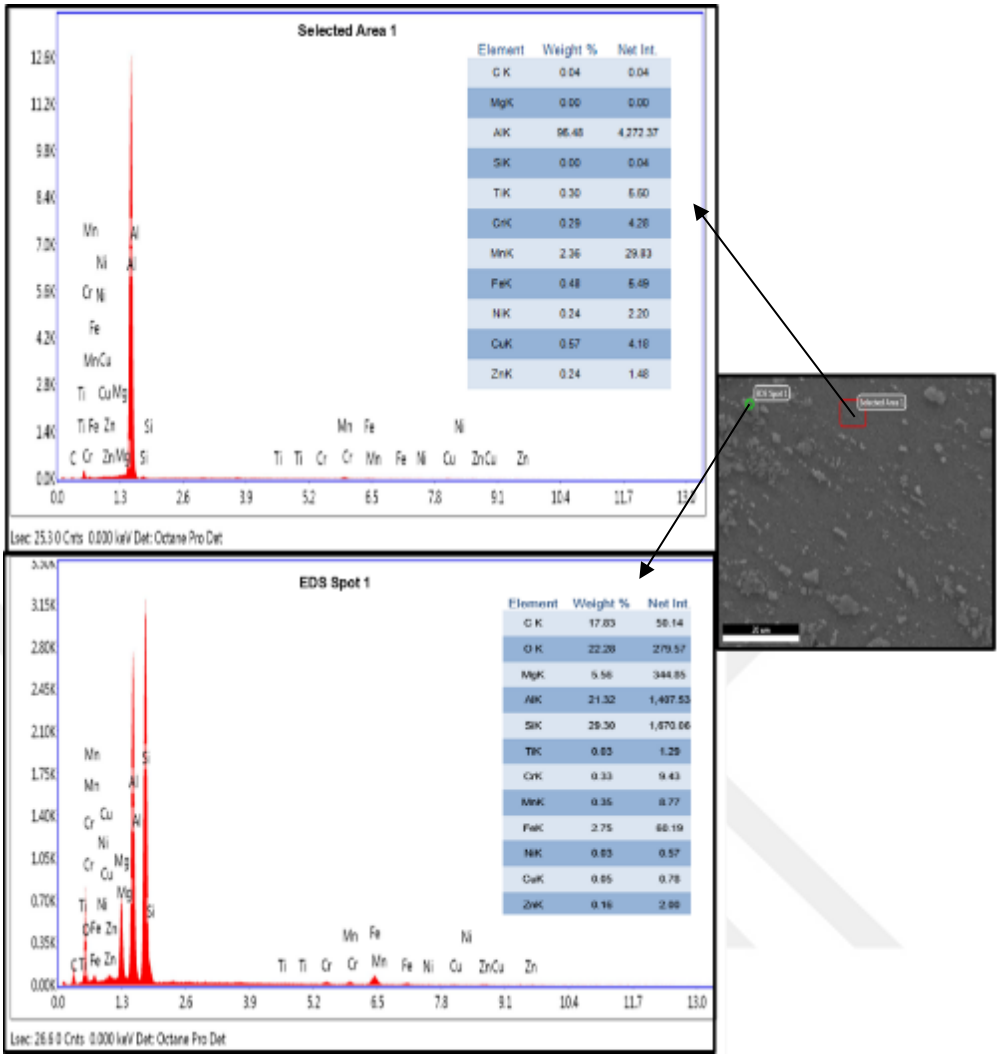
Şekil 8.26'da takviyesiz AA6061'in 5000X, 2500X, 1200X büyütme değerlerine ait görüntüleri verilmiştir. Malzemede takviye elemanı olmadığından farklı türde takviye benzeri yapılara rastlanılmamıştır. Malzeme içerinde açık renkte noktasal bölgelerin varlığı görülmüştür. Şekil 8.27'de AA6061'e yapılan EDS analiz sonuçları hem alan taramalı olarak hem de SEM'de malzeme içerisinde görülen açık renkli yapıdan noktasal olarak alınmıştır. Alan taramalı EDS analizinde AA6061'in içinde olan elementler ve pikleri görülmüştür. Açık renkli noktadan alınan EDS analizi sonucunda ise açık renkli bölgenin malzeme içerisindeki çökelen Al fazına ait olduğu düşünülmektedir.



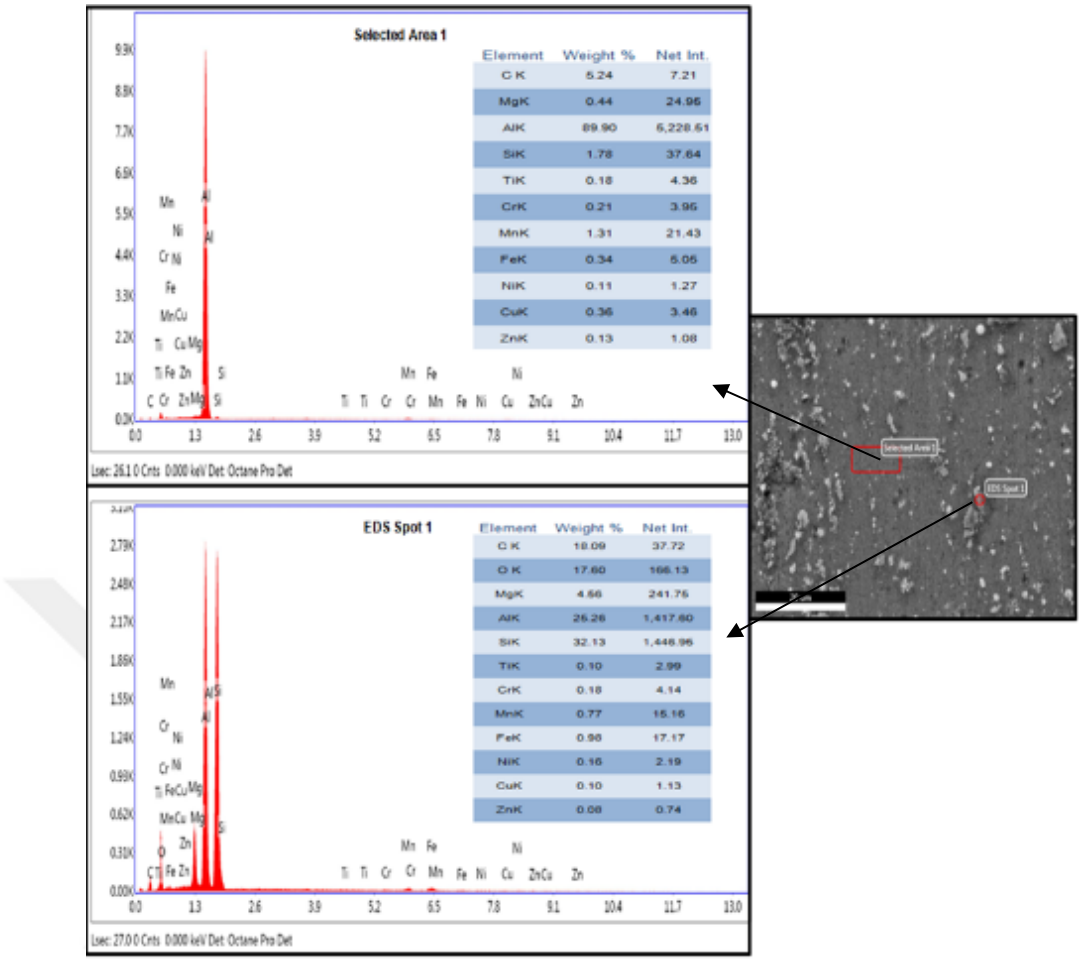
Şekil 8.28 SiC içeren NKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %3 SiC, b) %6 SiC c) %9 SiC



Şekil 8.29 %3 SiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

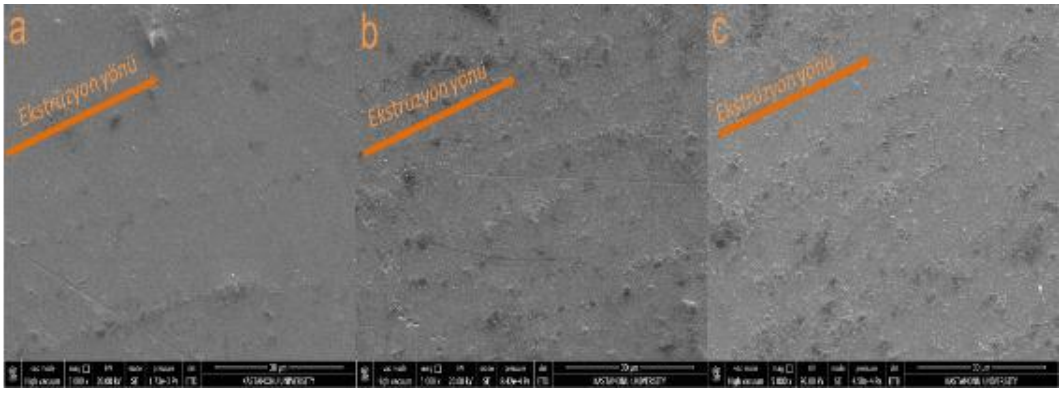


Şekil 8.30 %6 SiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

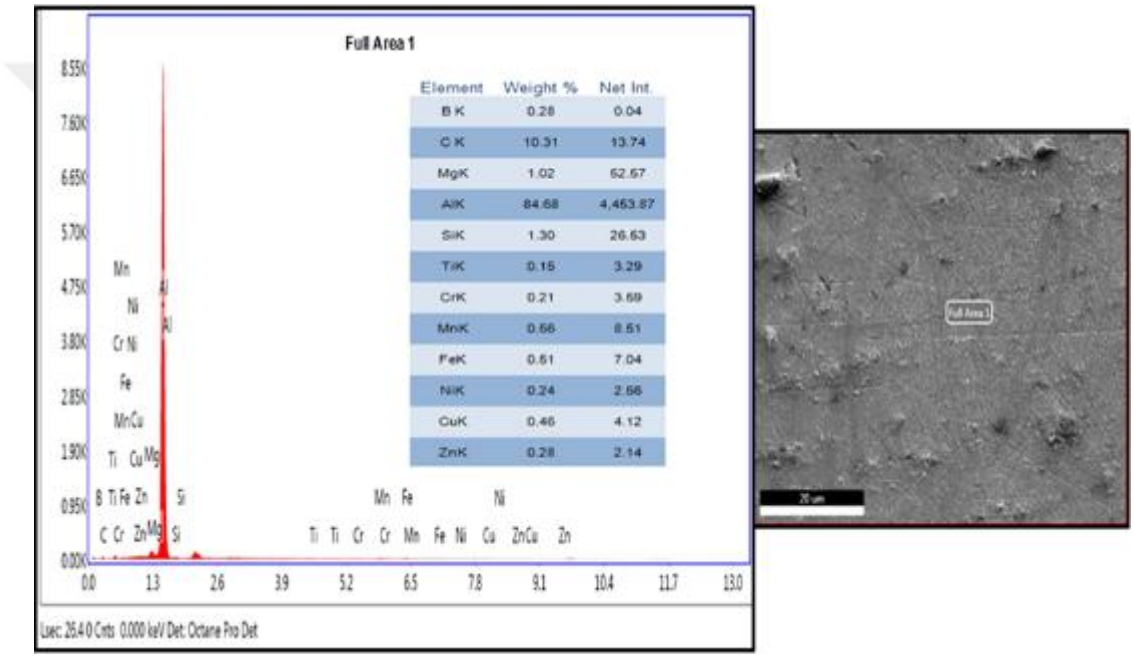


Şekil 8.31 %9 SiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

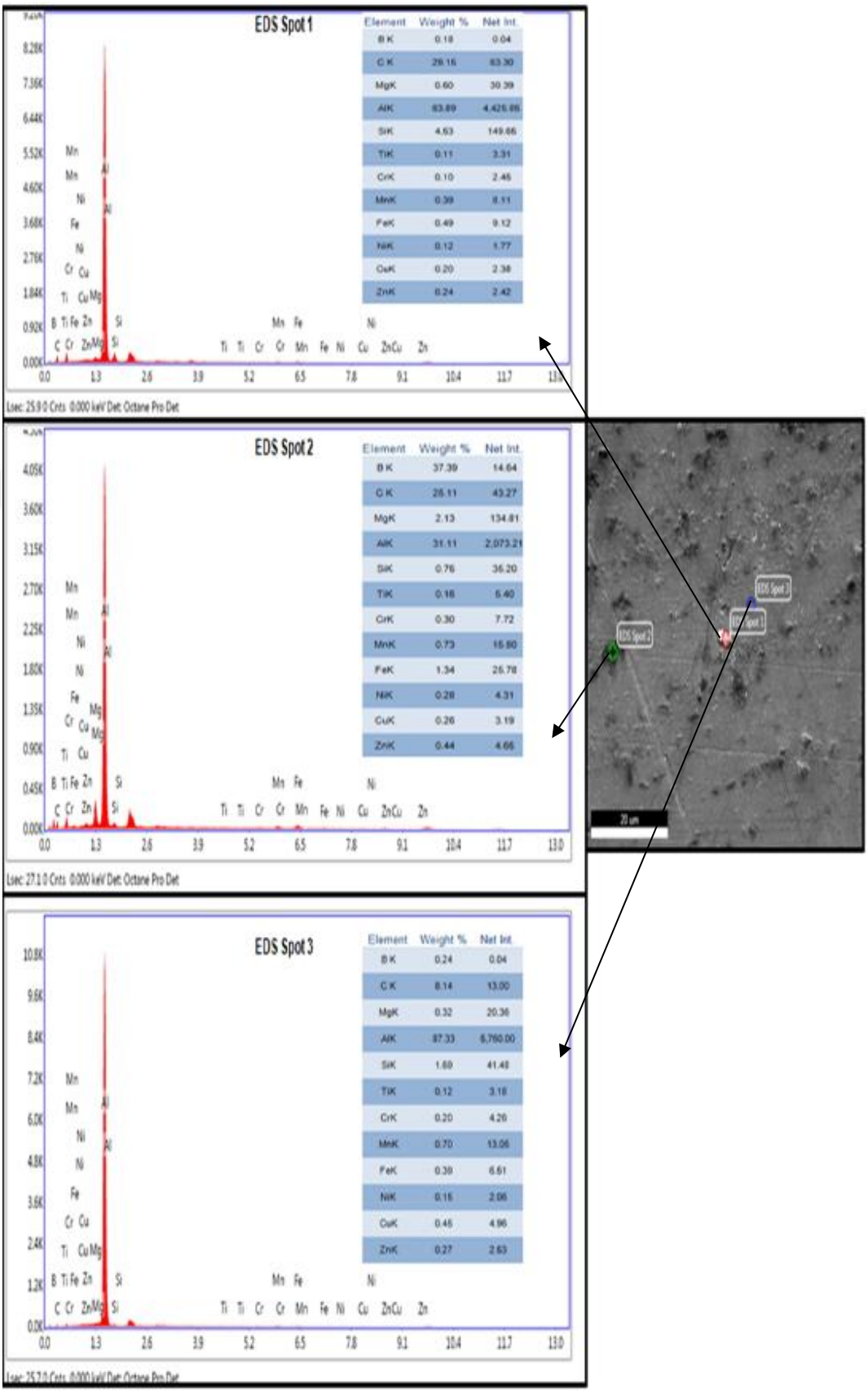
Şekil 8.28 incelendiğinde AA6061 matrisine eklenen sırasıyla %3; %6; %9 takviye oranlarında SiC parçacıkları içeren malzemelerin 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. Verilen görüntü incelendiğinde malzeme içerisindeki tanelerin ekstrüzyon yönünde uzağı tespit edilmiştir. Malzemede takviye oranın artmasıyla beraber malzeme üzerinde oluşan farklı yapılarda artış meydana gelmiş ve bu artış takviye partiküllerin varlığıyla ilişkilendirilmiştir. Şekil 8.29- Şekil 8.31 arası incelendiğinde malzeme içerisine takviye edilen SiC partiküllerinin artmasıyla EDS analizlerinde de SiC oranlarının artışına rastlanmıştır.



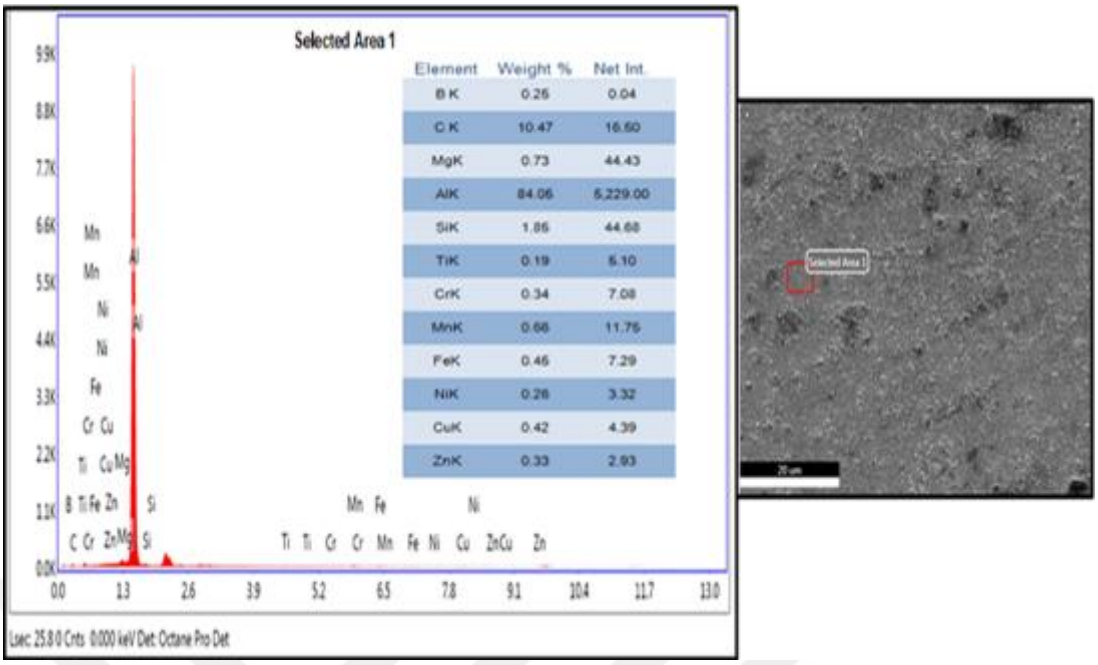
Şekil 8.32 B_4C içeren NKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %3 B_4C b) %6 B_4C c) %9 B_4C



Şekil 8.33 %3 B_4C içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

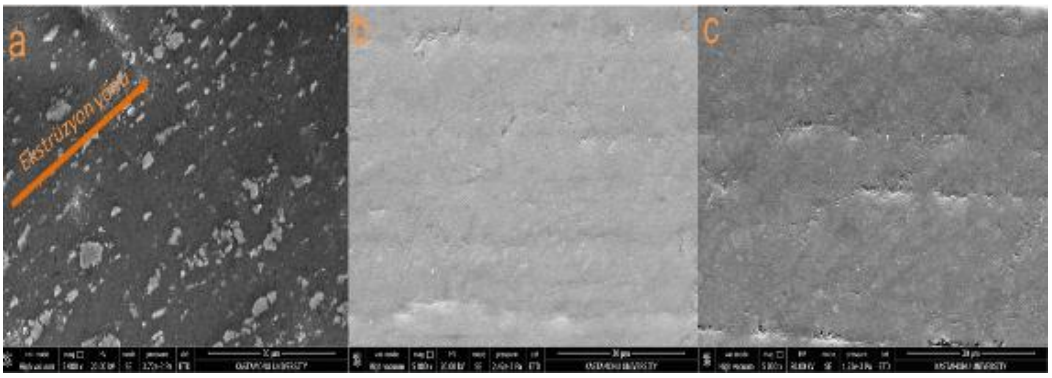


Şekil 8.34 %6 B_4C içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

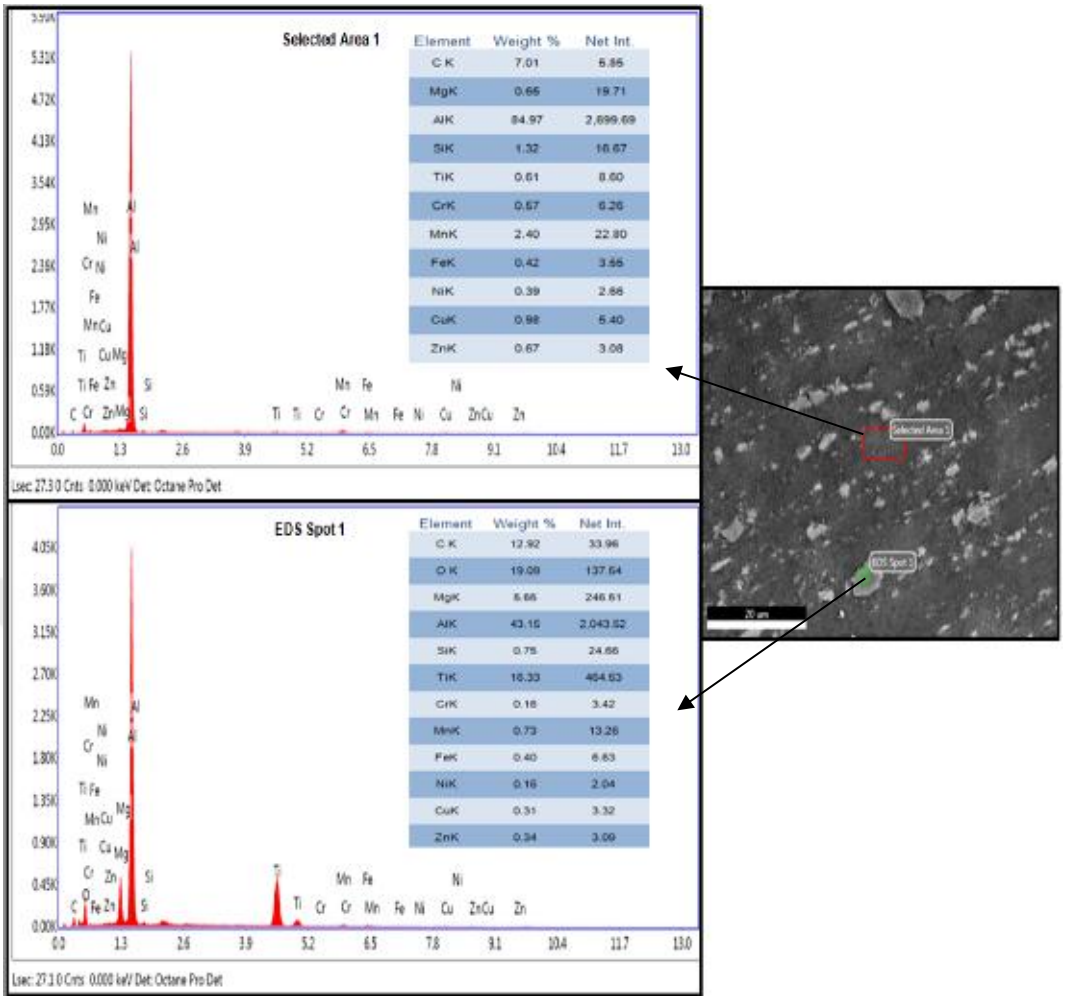


Şekil 8.35 %9 B_4C içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

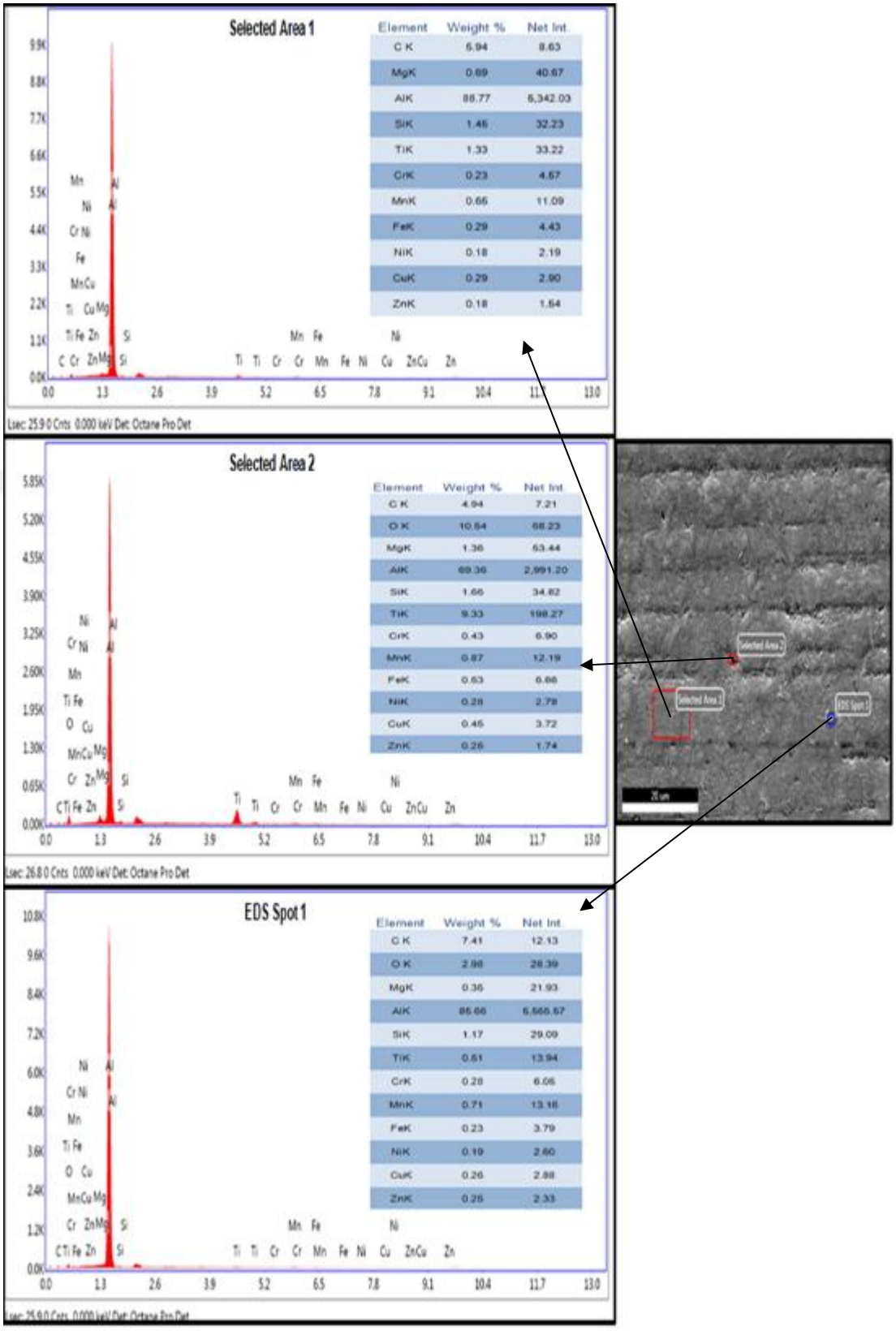
Şekil 8.32'de sırasıyla %3 - 6 - 9 takviye oranlarında B_4C parçacıkları içeren NKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri verilmiştir. B_4C takviye oranlarının artmasıyla beraber malzemedeki gözeneklilik değerlerinin azaldığı hem SEM görüntülerinde hem de yapılan gözeneklilik değerleri tablosunda da yansımaktadır. Şekil 8.33 - Şekil 8.35 arası EDS analizleri incelendiğinde B_4C piklerine rastlanmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında da (Şenel, 2020) saf Al'a eklenen B_4C takviyesinin malzeme üzerindeki gözeneklilik değerliğini azalttığı söylenebilir. Bu durumun sebebinin B_4C'nin yoğunluğunun AA6061'e göre daha düşük yoğunluğa sahip olmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



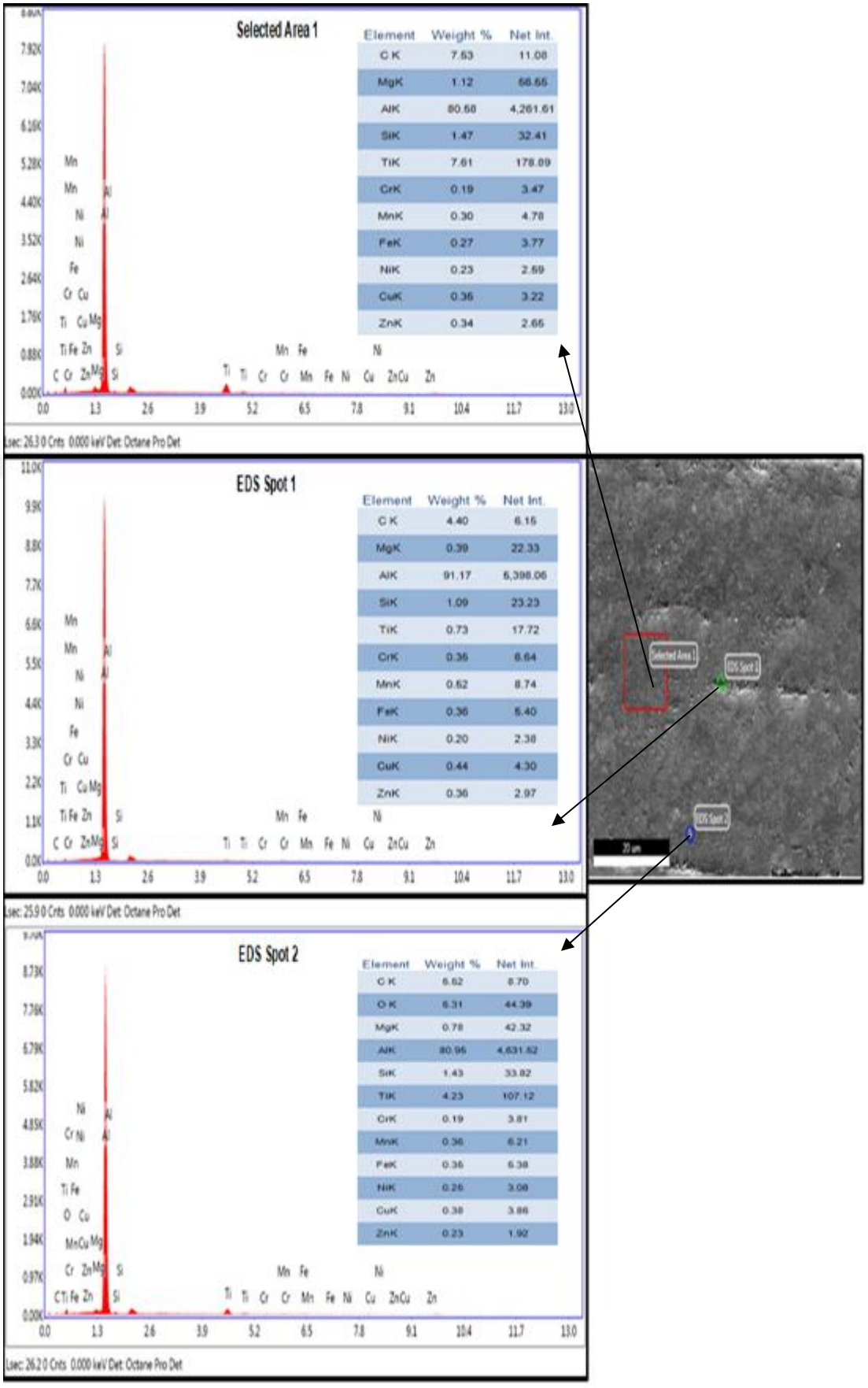
Şekil 8.36 TiC içeren NKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %3 TiC, b) %6 TiC c) %9 TiC



Şekil 8.37 %3 TiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

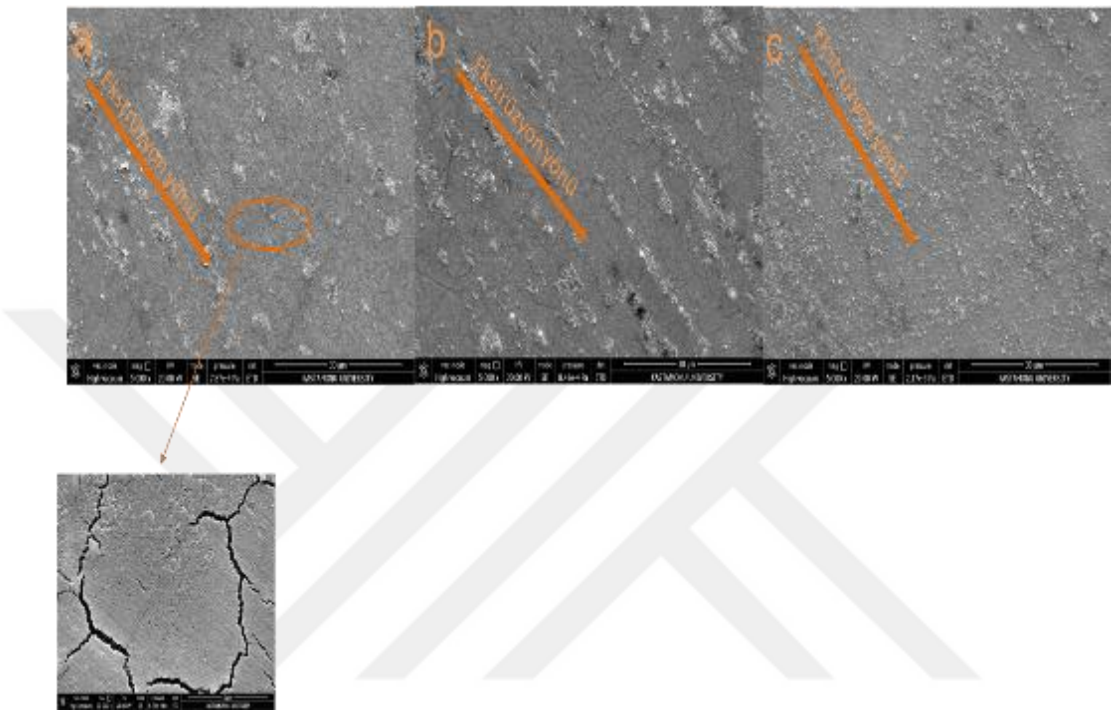


Şekil 8.38 %6 TiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

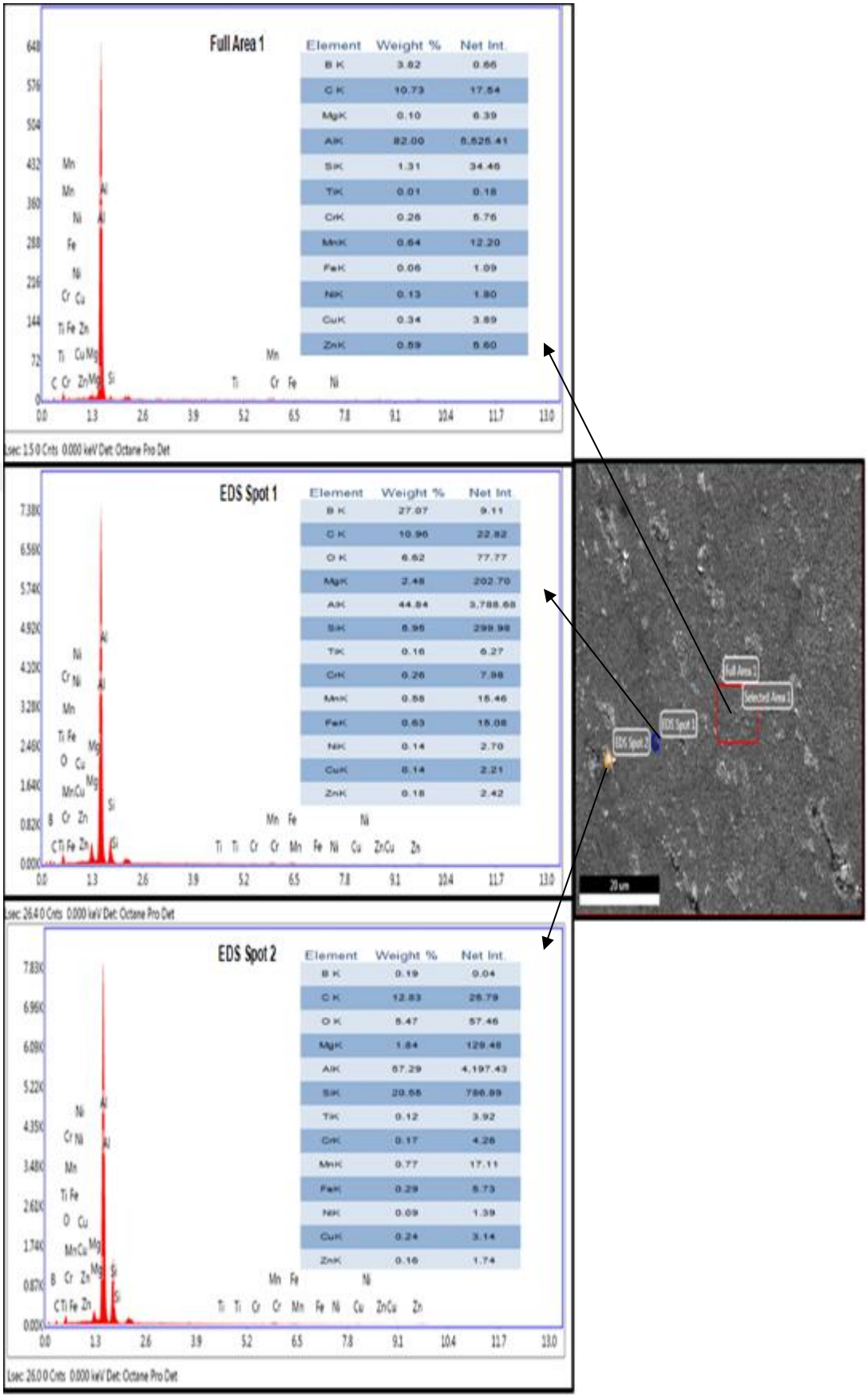


Şekil 8.39 %9 TiC içeren NKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

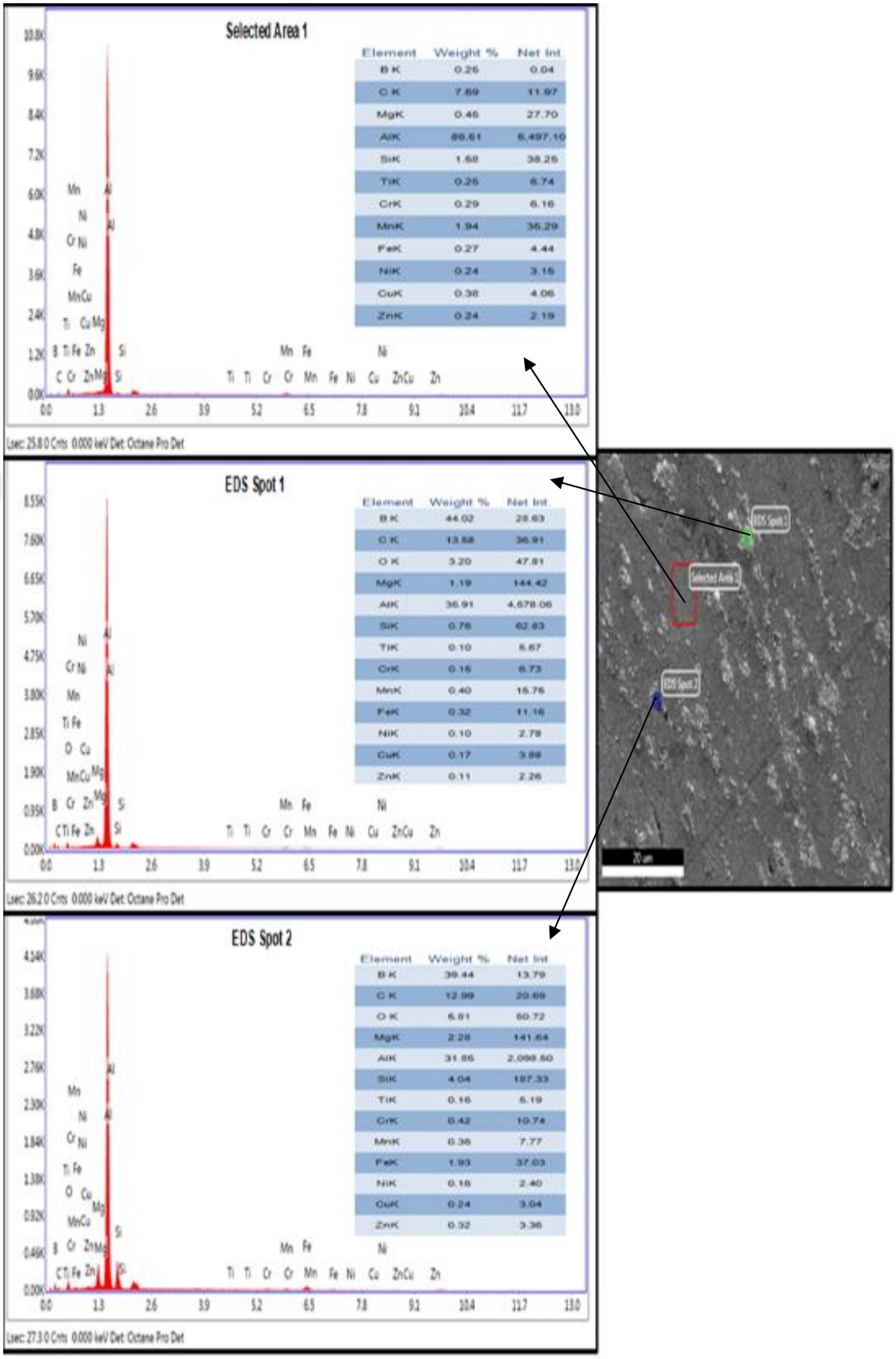
Şekil 8.36 incelendiğinde malzeme üzerindeki TiC miktarının artmasıyla farklı yapıların varlığında artışlar gözlemlenmiştir. EDS analizleri neticesinde malzemede ekstrüzyon yönünde uzayan yapıların TiC'e ait olduğu ve Ti içeren pik değerlerinde bir artış meydana geldiği gözlemlenmektedir.



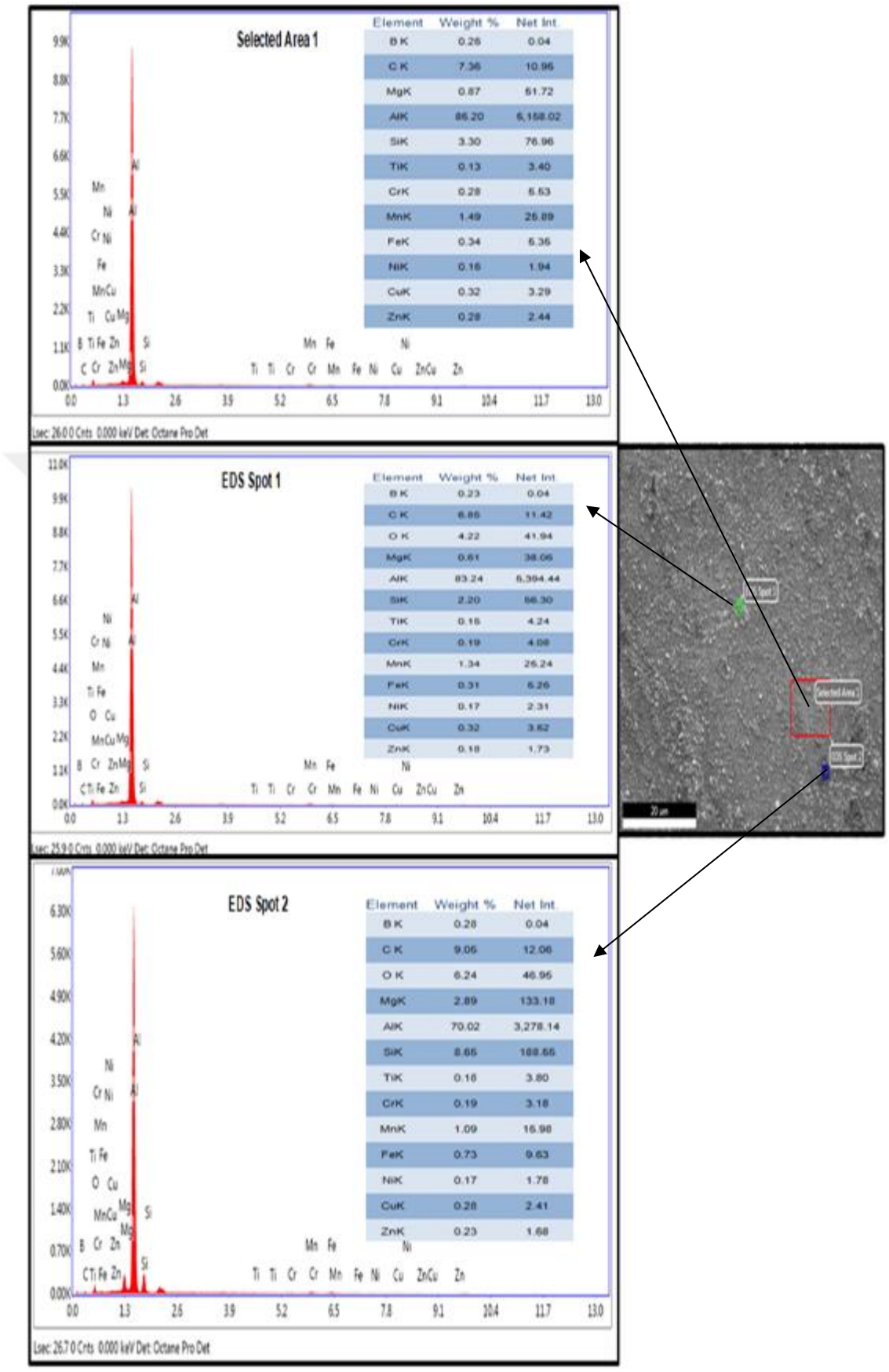
Şekil 8.40 SiC ve B_4C içeren HNKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %1,5 SiC-%1,5 B_4C b) %3 SiC-%3 B_4C c) %4,5 SiC-%4,5 B_4C



Şekil 8.41 %1,5 SiC - %1,5 B_4C içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

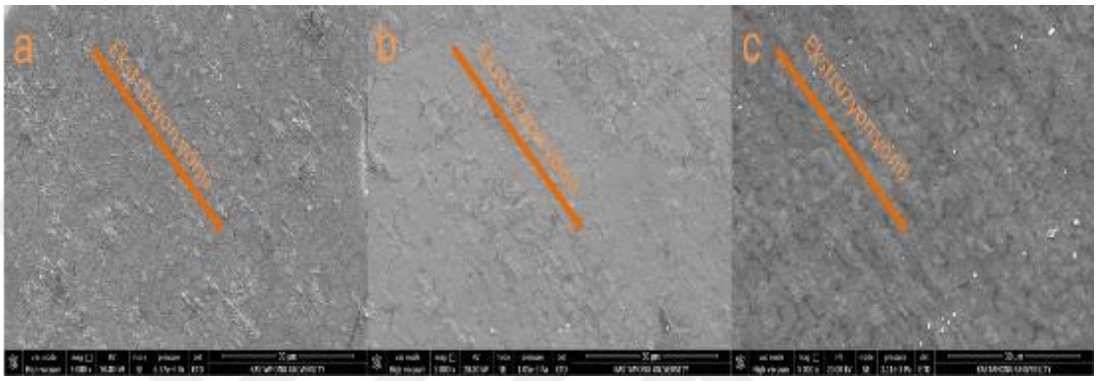


Şekil 8.42 %3 SiC - %3 B_4C içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

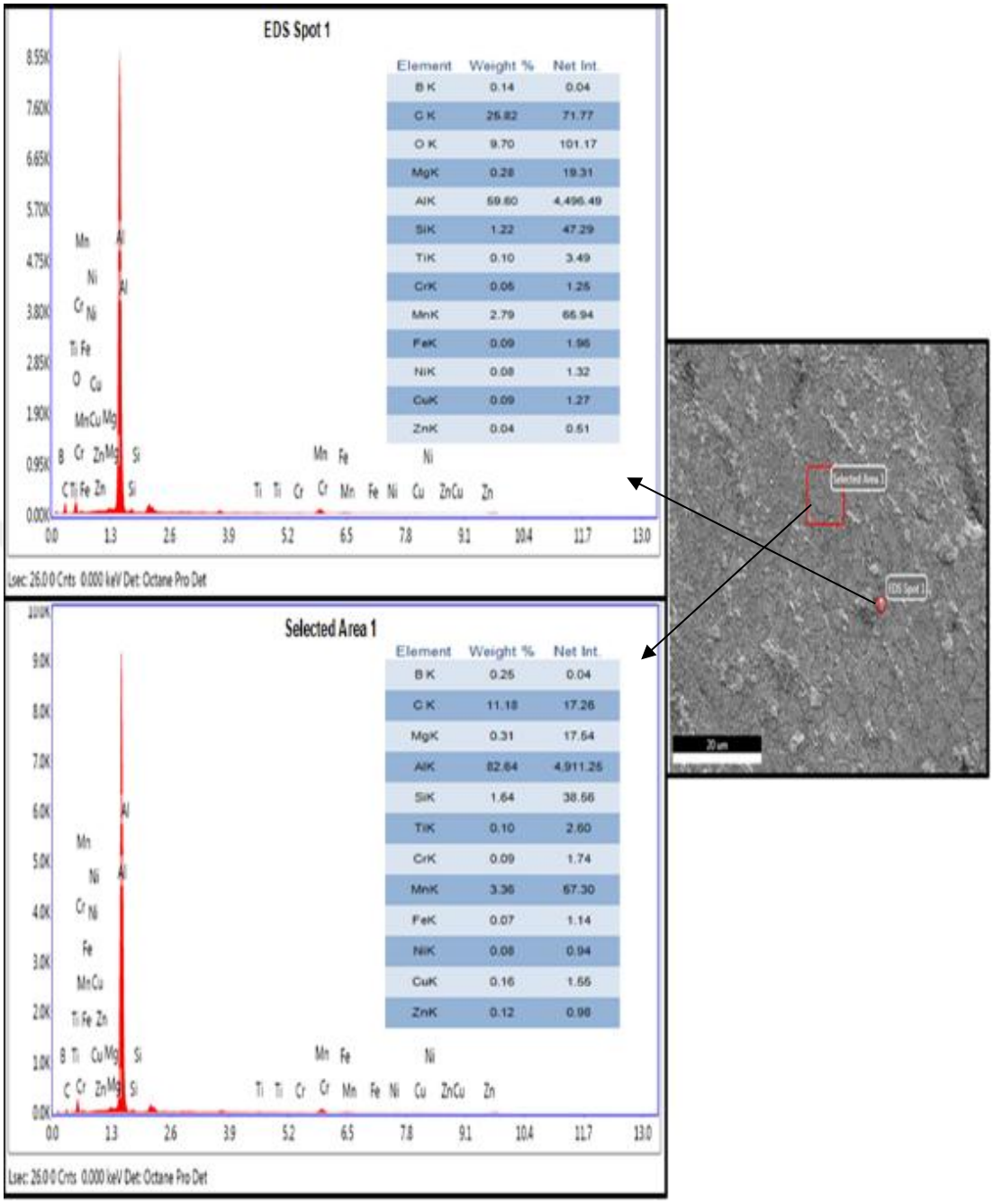


Şekil 8.43 %4,5 SiC - %4,5 B_4C içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

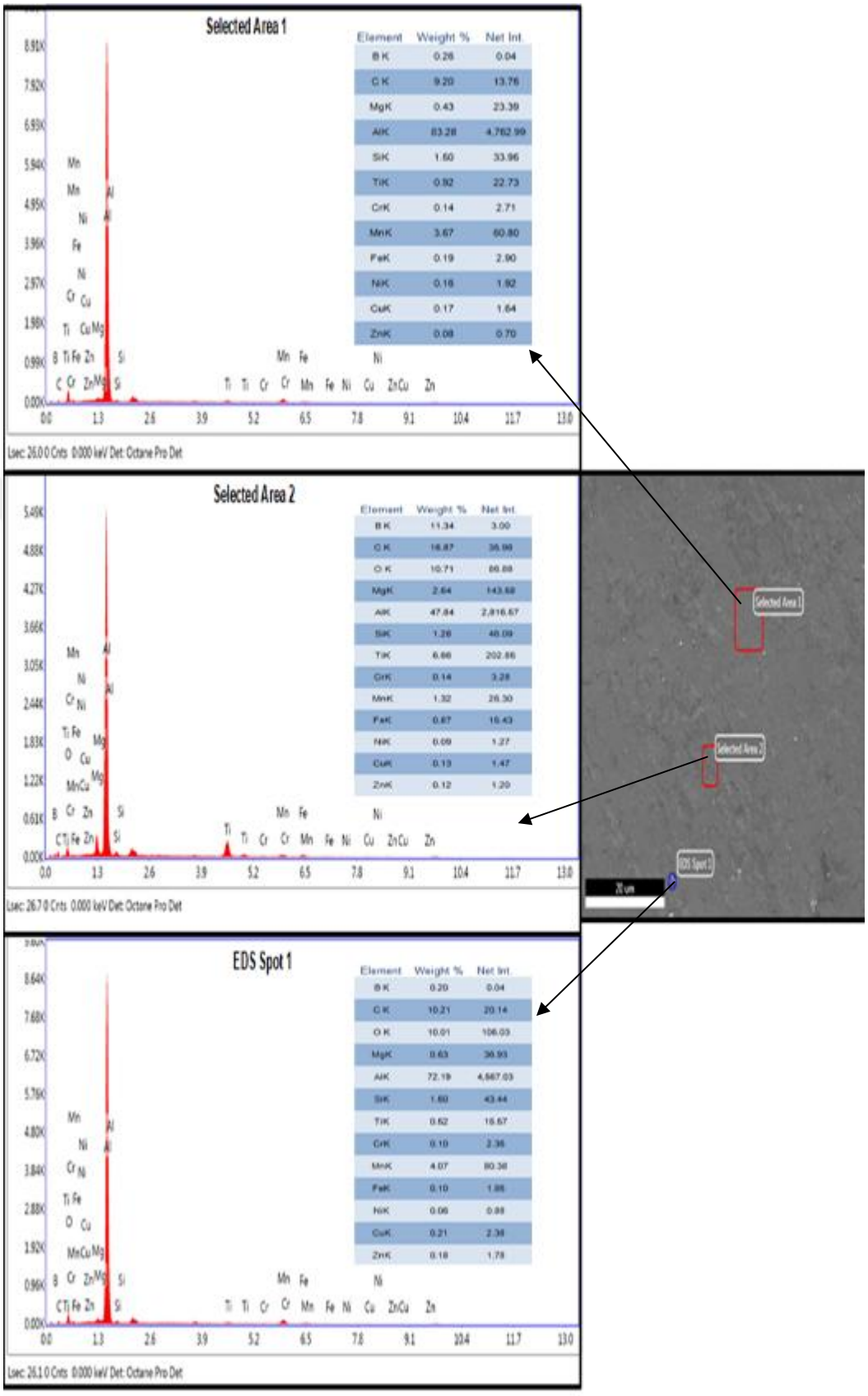
Şekil 8.40 incelendiğinde malzeme içerisindeki tanelerin ekstrüzyon yönünde uzadığı gözlemlenmektedir. Malzeme yüzeyinde görülen açık renkli noktasal bölgeler gözlemlenmektedir. Malzeme içerisinde takviye oranlarının artmasıyla beraber malzemelerdeki çatlak ve gözenekli yapıların azaldığı hem gözeneklilik grafiğinde hem de SEM görüntülerine de yansımaktadır. Şekil 8.41, Şekil 8.42, Şekil 8.43 incelendiğinde SiC ve B_4C piklerinin varlığı tespit edilmiştir.



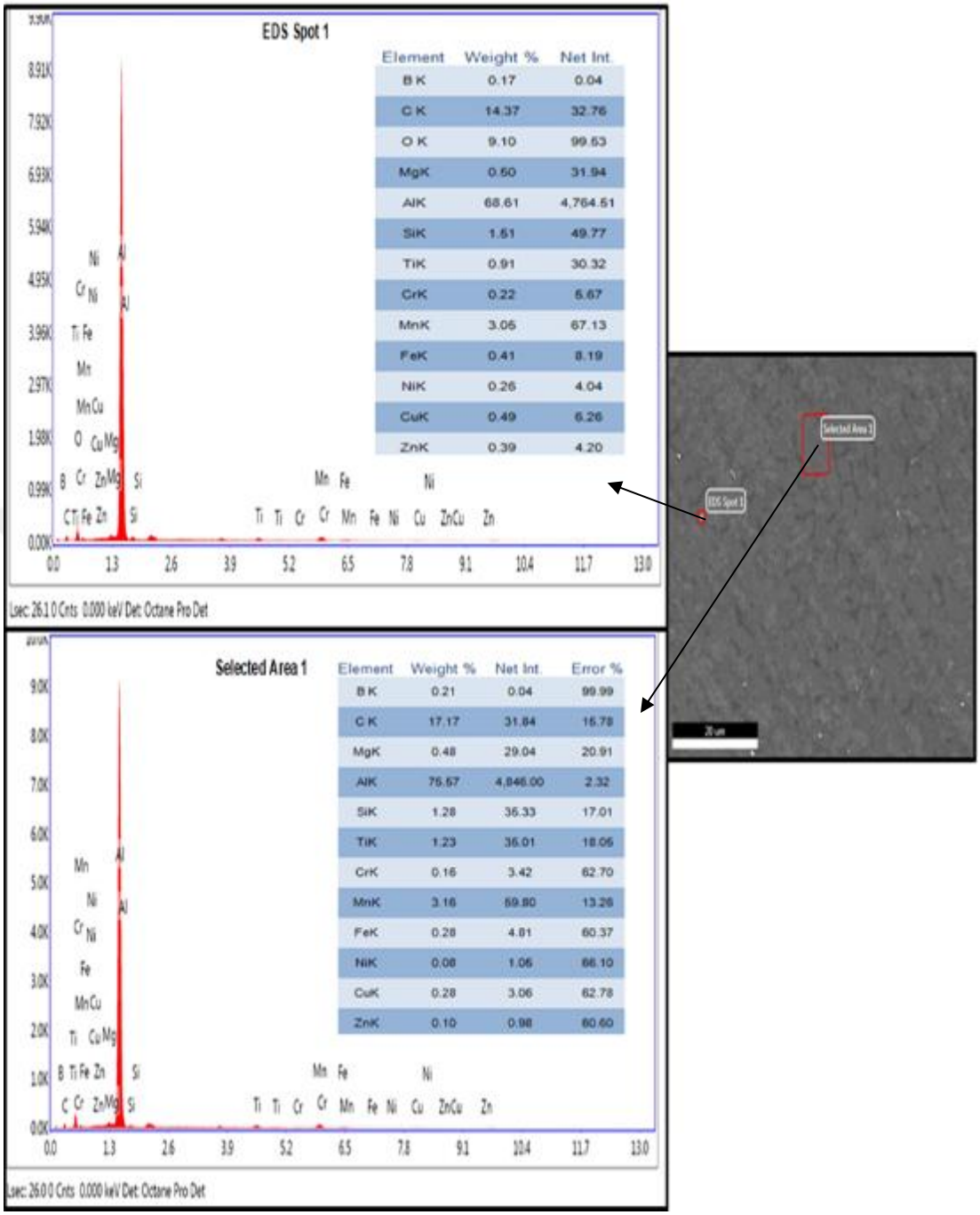
Şekil 8.44 6 B_4C ve TiC içeren HNKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %1,5 B_4C- %1,5 TiC b) %3 B_4C- %3 TiC c) %4,5 B_4C- %4,5 TiC



Şekil 8.45 %1,5 B_4C-%1,5 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

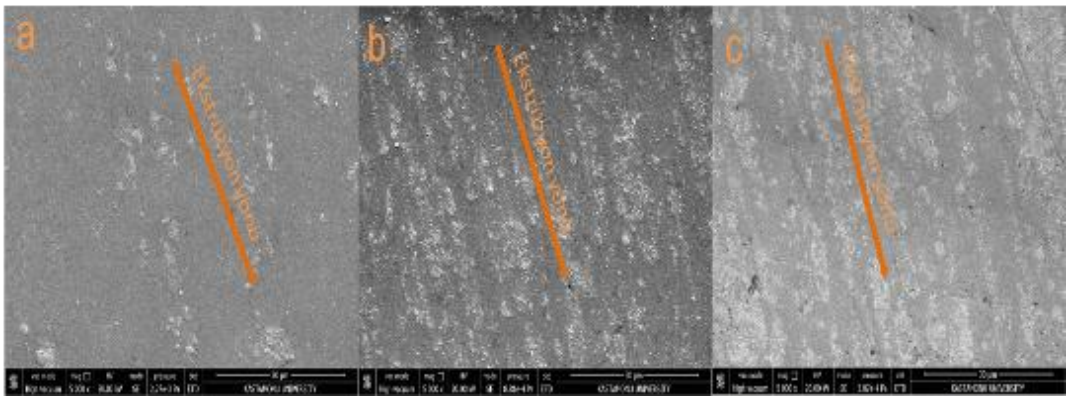


Şekil 8.46 %3 B_4C-%3 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

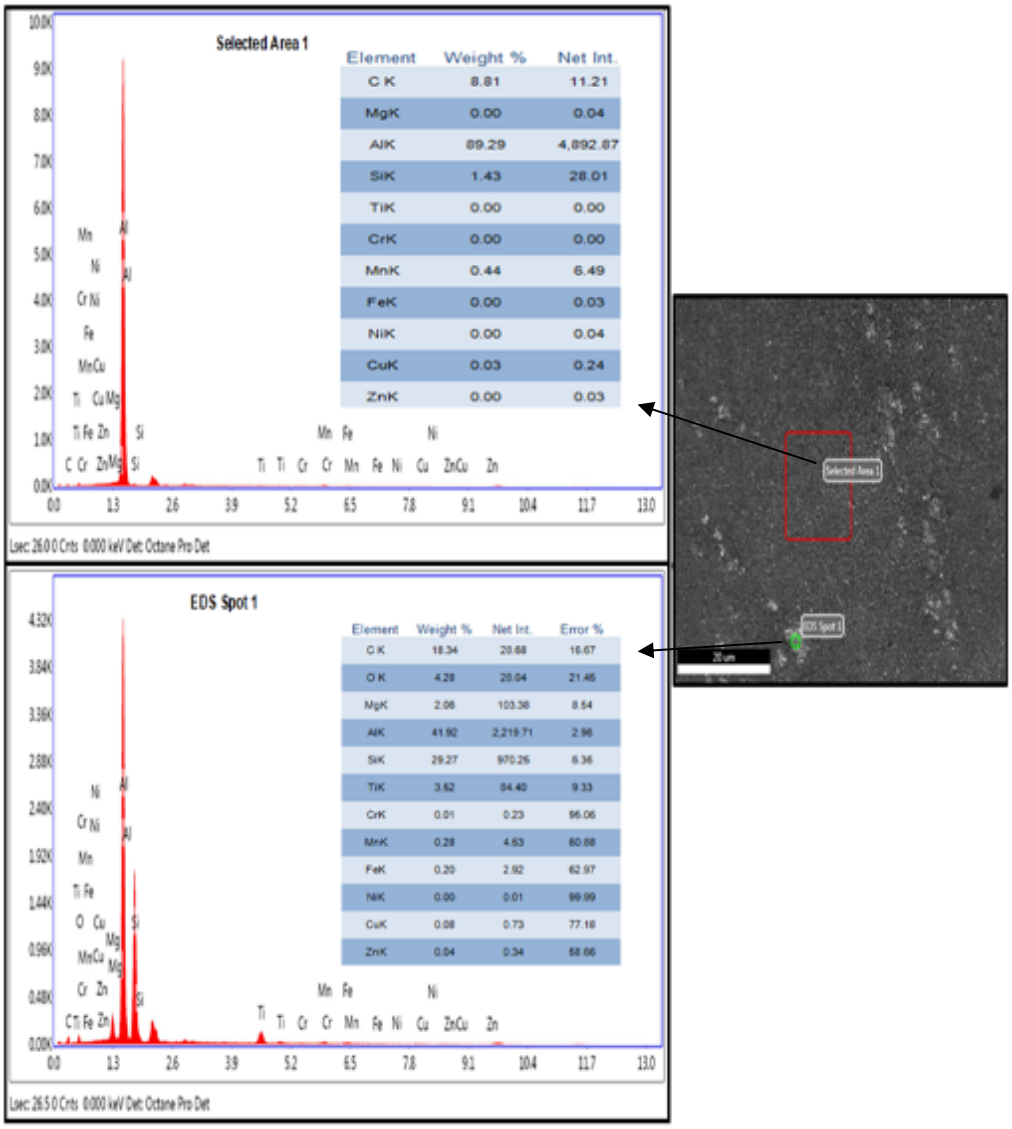


Şekil 8.47 %4,5 B_4C-%4,5 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

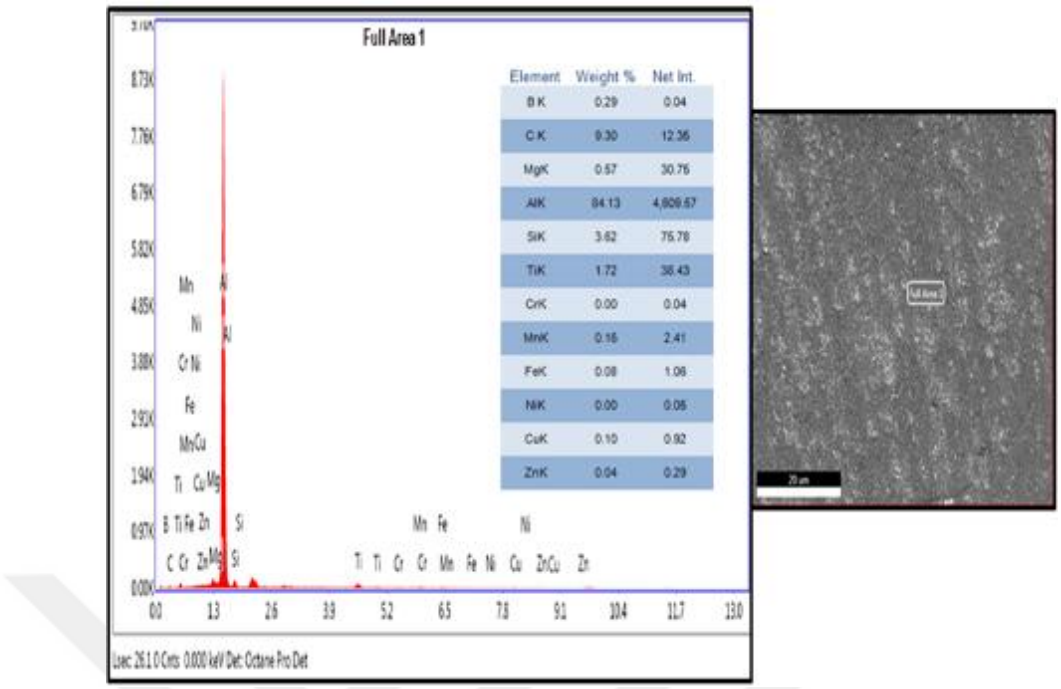
Şekil 8.44 incelendiğinde B_4C ve TiC içeren HNKM'lerin görüntülerinde tanelerin ekstrüzyon yönünde uzadığı gözlemlenmiş ve malzeme üzerinde farklı bir faza ait olduğu düşünülen açık renkli noktasal alanlara rastlanmıştır. Farklı oranlara ait SiC ve B_4C takviyeli HNKM'lerde bu noktasal bölgeye EDS testi alınmış ve bu bölgenin ısıl işlem sonrasında çökelen bir Al fazına ait olduğu tespit edilmiştir.



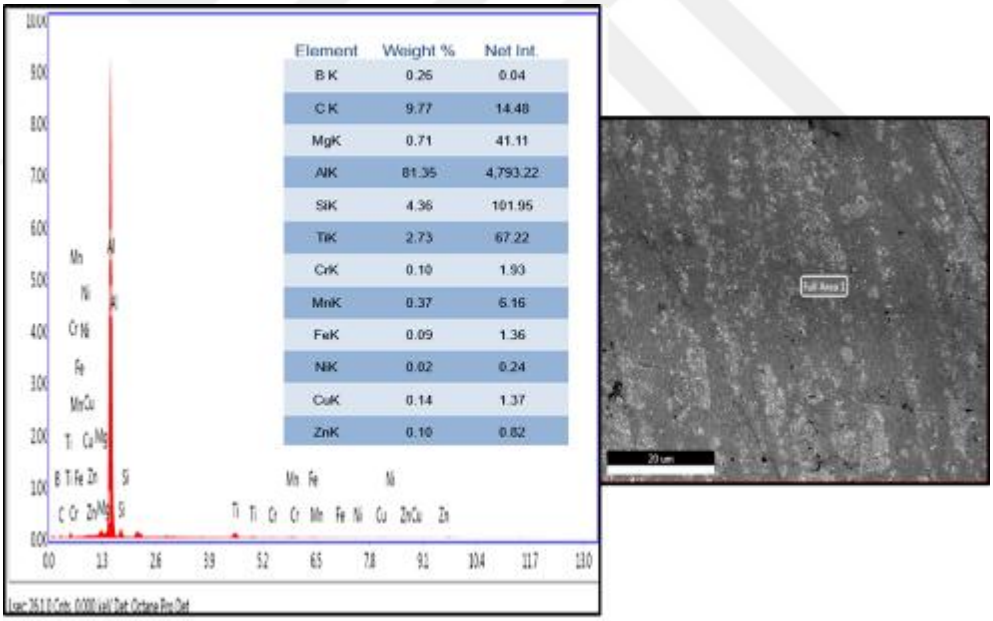
Şekil 8.48 SiC ve TiC içeren HNKM'lere ait 5000X büyütmedeki SEM görüntüleri a) %1,5 SiC- %1,5 TiC b) %3 SiC- %3 TiC c) %4,5 SiC- %4,5 TiC



Şekil 8.49 %1,5 SiC-%1,5 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

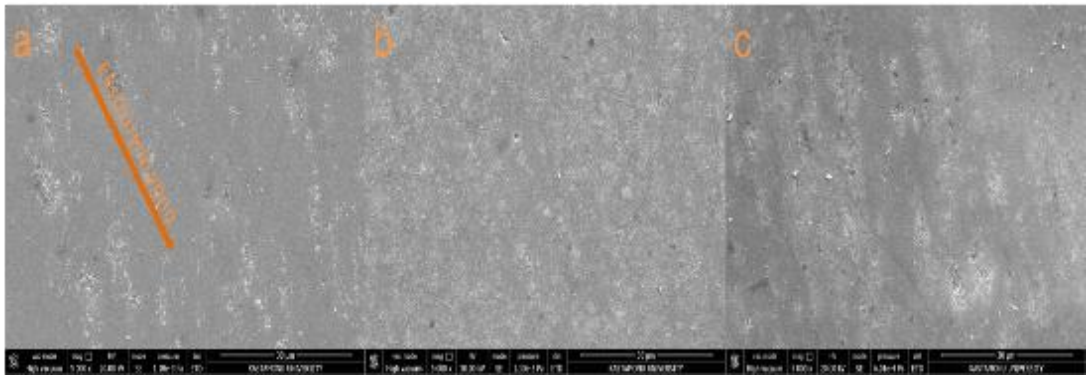


Şekil 8.50 %3 SiC-%3 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

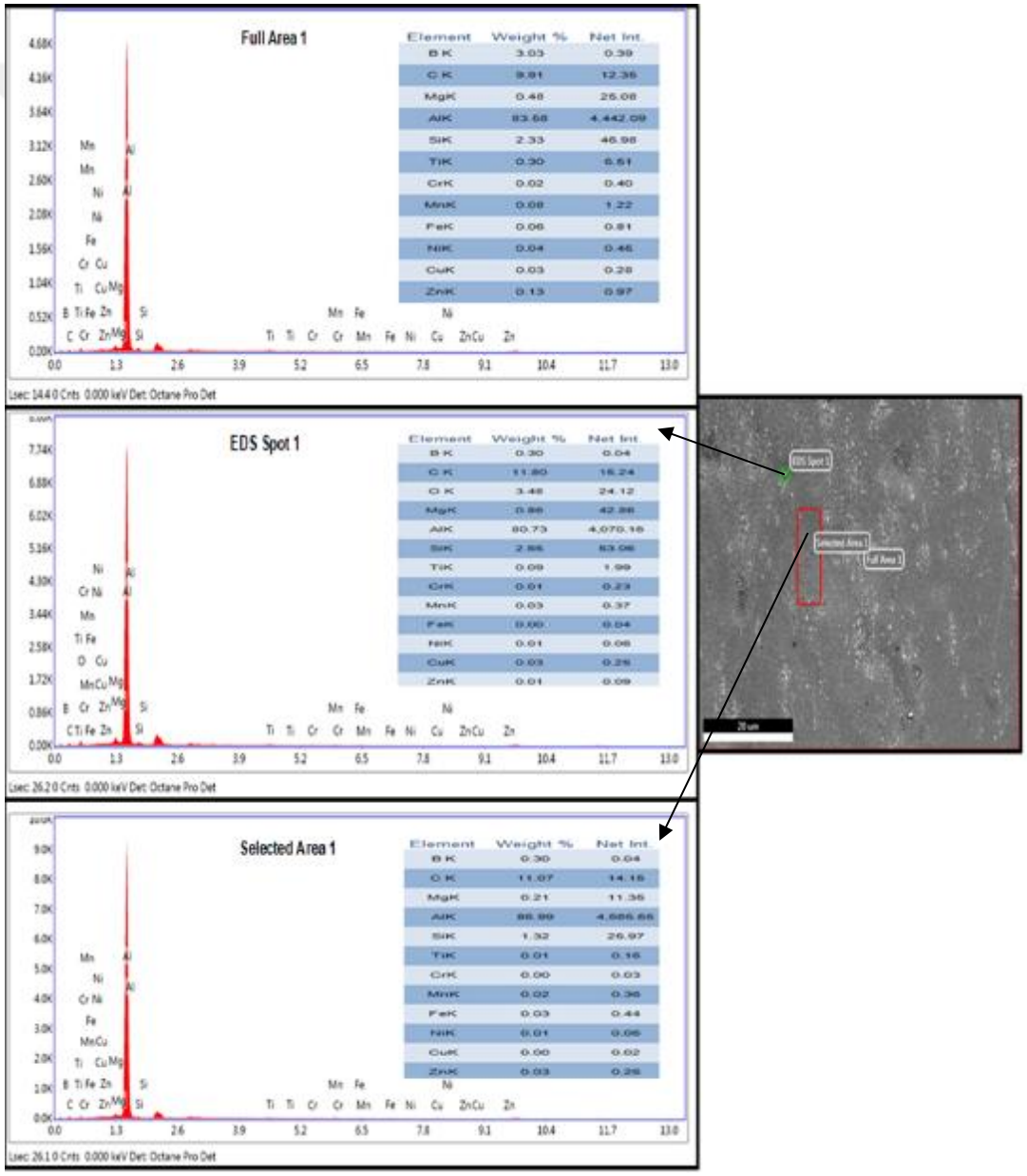


Şekil 8.51 %4,5 SiC-%4,5 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

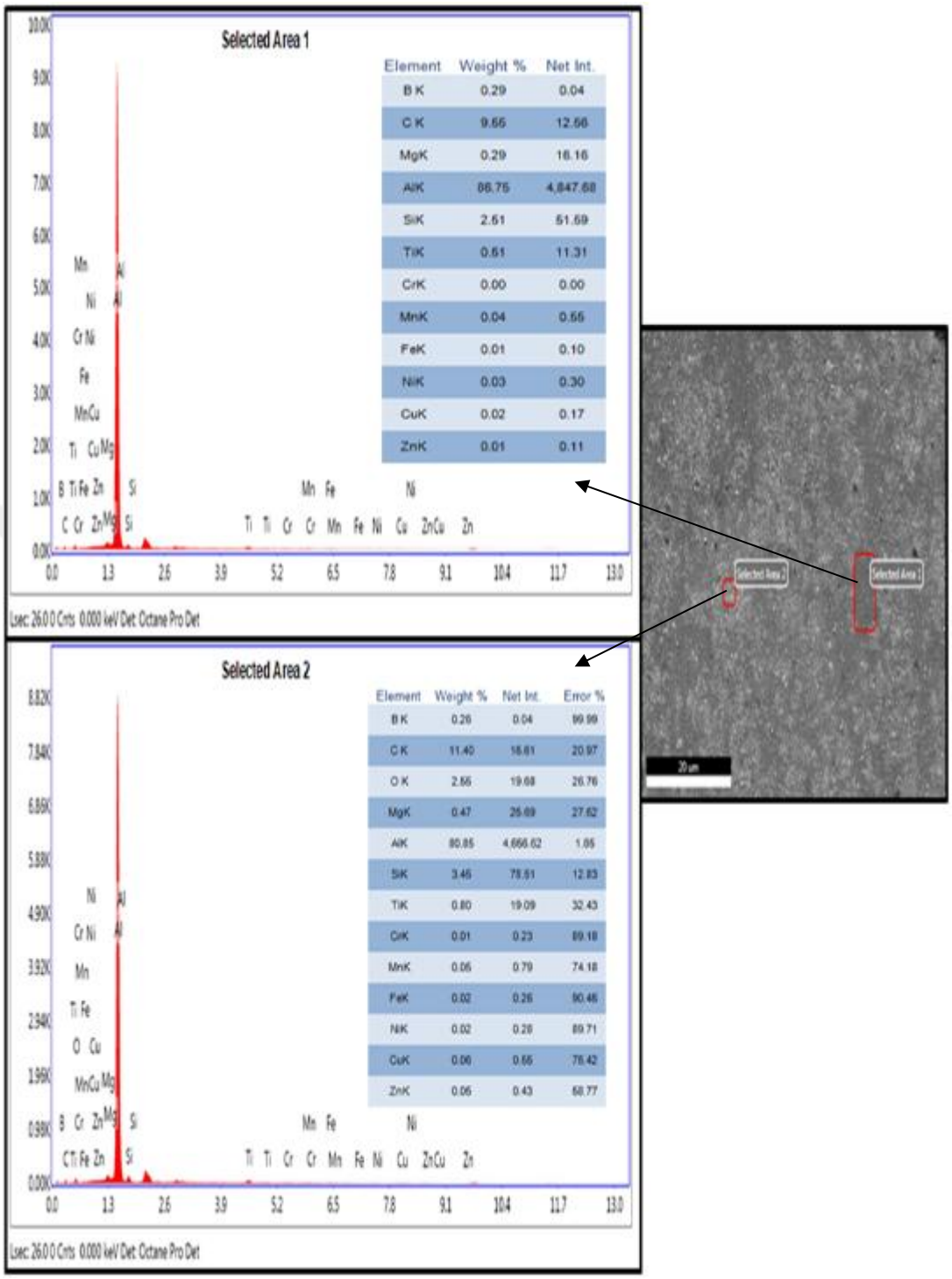
Şekil 8.48 incelendiğinde farklı takviye oranlarına ait HNKM'lerin tümünde malzeme içerisindeki tanelerin ekstrüzyon yönünde uzadığı tespit edilmiştir. HNKM içerisindeki takviye oranı artışıyla beraber malzemede ekstrüzyon yönünde uzayan tanelerin yapı içerisinde arttığı söylenebilir. Yapılan EDS analizi sonuçlarında HNKM'ler içerisindeki takviye oranlarının artmasıyla SiC ve TiC'ye ait piklerde de artış meydana gelmiştir.



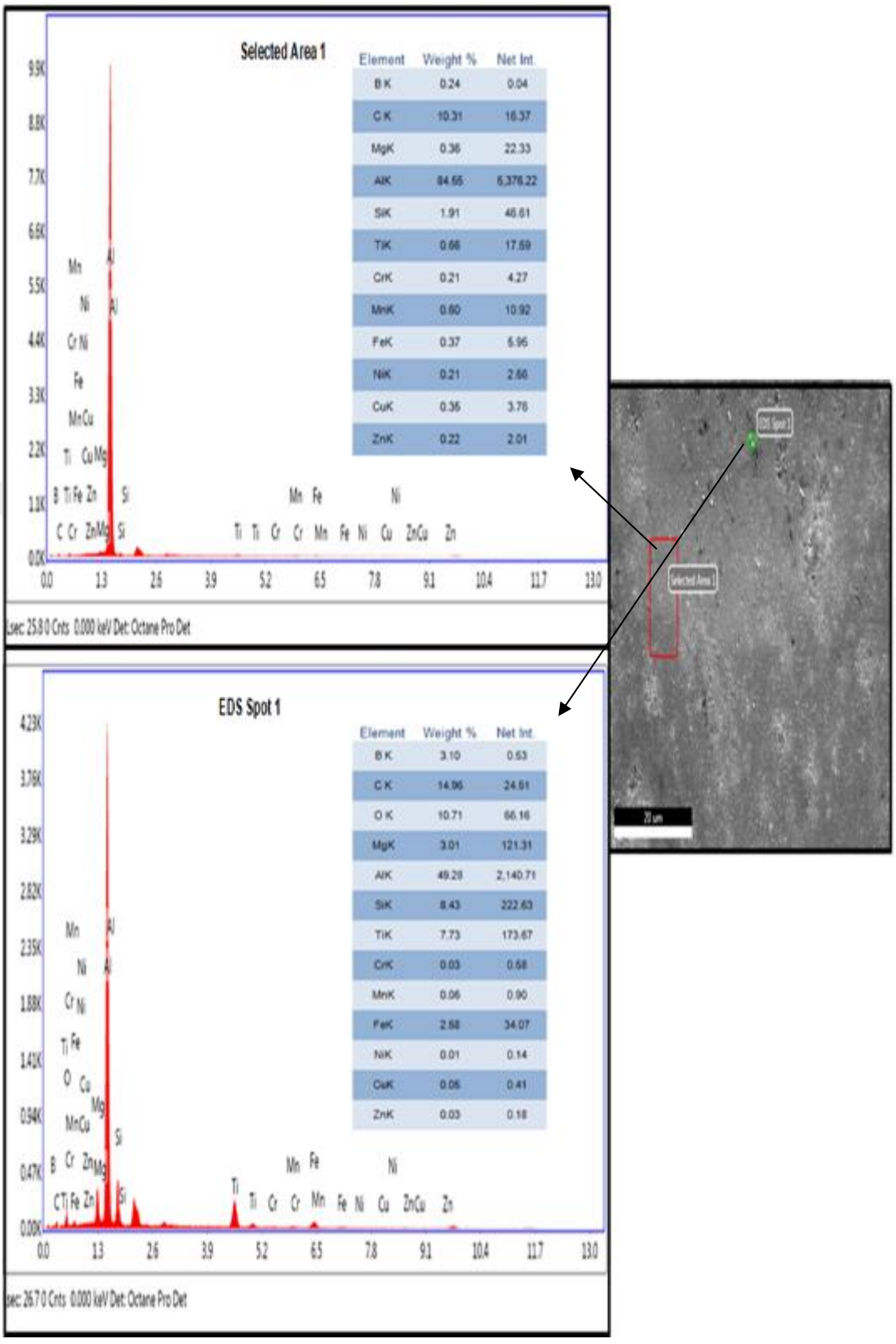
Şekil 8.52 SiC, B_4C, TiC içeren HNKM'lere ait 5000X büyütmeki SEM görüntüleri a) %1 SiC-%1 B_4C-%1 TiC b) %2 SiC-%2 B_4C-%2 TiC c) %3 SiC-%3 B_4C-%3 TiC



Şekil 8.53 %1 SiC-%1 B_4C-%1 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları



Şekil 8.54 %2 SiC-%2 B_4C-%2 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları



Şekil 8.55 %3 SiC-%3 B_4C-%3 TiC içeren HNKM'ye ait EDS grafik ve sonuçları

Şekil 8.52'de verilen üçlü kompozit malzemelerin SEM incelemelerinde takviye oranının artılıyla farklı yapıların matris üzerindeki yoğunluğunun arttığı tespit

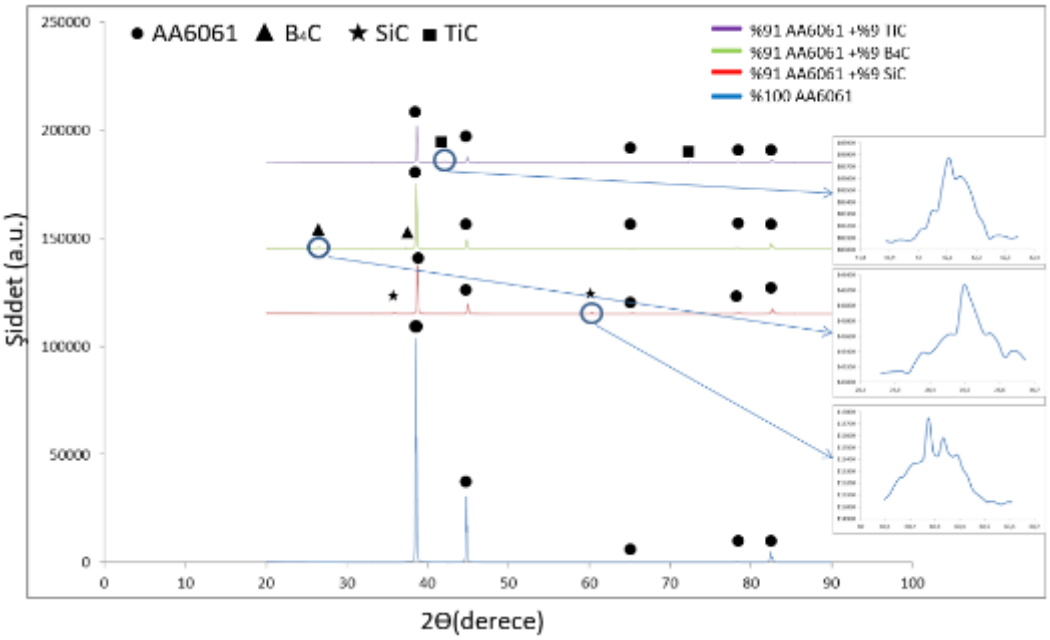
edilmiştir. Dolayısıyla oluşan farklı yapıların takviye partiküllerin varlığıyla ilişkili olduğu belirlenmiştir. EDS analizlerinde takviye partikül miktarları arttıkça bu partiküllere ait elementlerin oranlarında artışlar gözlemlenmiştir.

Çalışmada üretilen NKM'ler ve HNKM'lerin 5000X büyütmelerine ait SEM görüntüleri sonucunda genel olarak NKM'ler ve HNKM'ler içerisindeki tanelerin ekstrüzyon yönünde uzadığı gözlemlenmiştir. Bazı SEM görüntülerinde ekstrüzyon nedeniyle oluşan mikro çatlaklar da gözlemlenmiştir. Takviye oranının artmasıyla birlikte mikro çatlakların da azaldığı görülmüştür. Bu durum ekstrüzyonla tel çubuk üretiminde iyi bir takviye matris arayüzeyi oluştuğunun da göstergesidir. AA6061'in EDS sonuçlarında AA6061'in içinde bulanan elementlerin pikleri görülmüştür. AA6061 kendi içinde Si, Ti elementleri de barındıran bir alaşımdır. SiC ve TiC takviyeli HNKM gruplarında Si, Ti piklerinin ana malzemeye kıyasla arttığı gözlemlenmiş olup, bu durum takviye partiküllerin varlığıyla ilişkilendirilebilir. SiC, B_4C ve TiC takviyeleri ile üretilmiş kompozit malzemelerde takviye parçacıklarının malzemenin ekstrüzyon yönünde boşluk, gözenek veya tane sınırı gibi bölgelerde kümeleştiği söylenebilir. Bu noktalara yapılan EDS analizleri bu durumu doğrulamaktadır. Genel olarak içinde takviye elemanı olan HNKM'lerin EDS sonuçlarından elde edilen ana takviye elementleri (Si, B, Ti, C) takviyesiz AA6061'e nazaran artış göstermiştir.

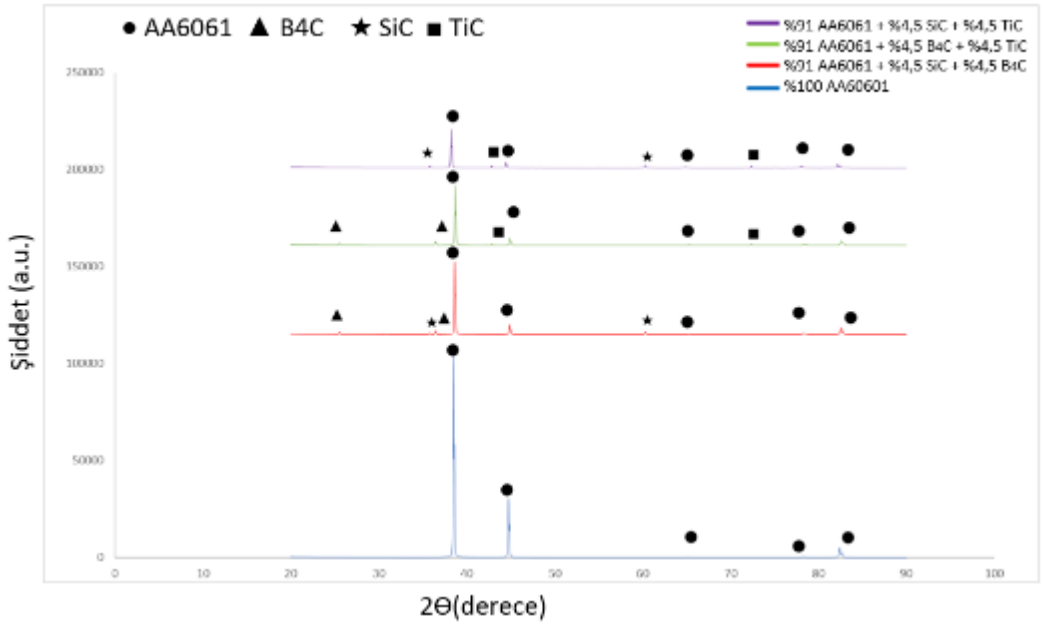
8.3 XRD incelemeleri

Mikroyapı incelemelerinin ardından numunelere 20-90° aralığında XRD analizleri yapılmıştır. Numunelerin XRD grafikleri Şekil 8.56, Şekil 8.57 ve Şekil 8.58'de gösterilmiştir. Tüm numunelere XRD analizi uygulanmış olup, genel olarak analiz sonuçları benzerlik teşkil ettiği için en yüksek takviye oranındaki malzemelere ait analizler grafik olarak sunulmuştur. Tüm grafiklerde %9 takviye oranının kullanıldığı NKM'ler HNKM'ler için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

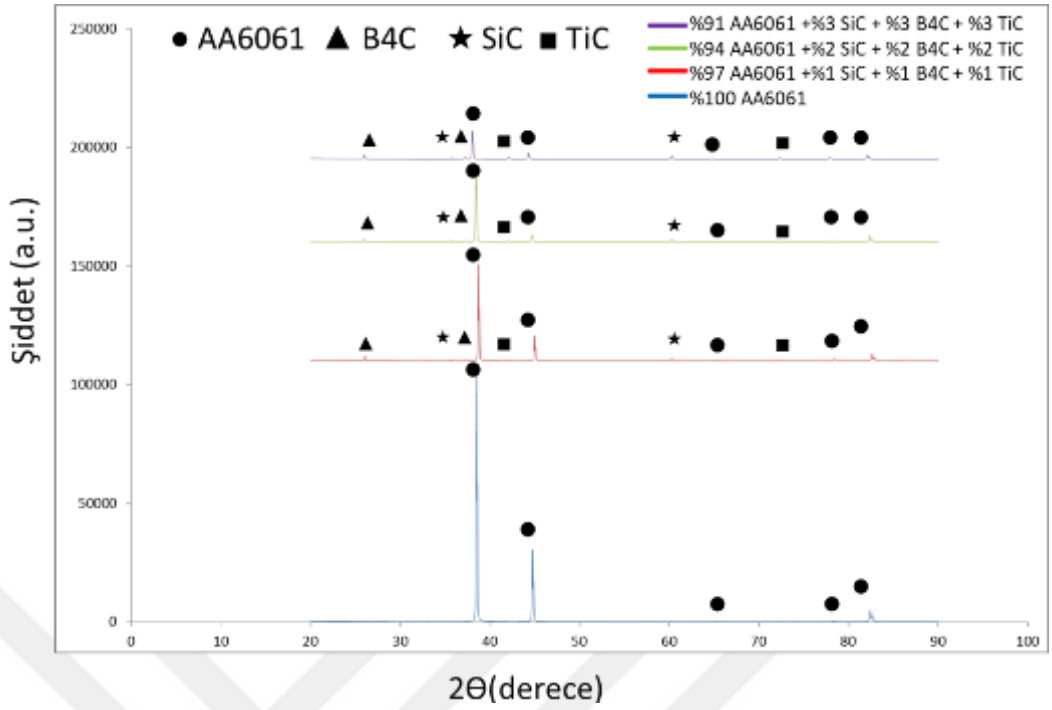
Şekil 8.56'da NKM'lere (AA6061/SiC, AA6061/B_4C, AA6061/TiC) ait, Şekil 8.57'de ikili HNKM'lere (AA6061/SiC/B_4C, AA6061/SiC/TiC, AA6061/B_4C/TiC) ait, Şekil 8.58'de ise üçlü HNKM'lere (AA6061/SiC/B_4C/TiC) ait XRD grafikleri verilmiştir.



Şekil 8.56 AA6061 ve en yüksek takviye oranına sahip NKM'lerin XRD grafikleri



Şekil 8.57 İkili HNKM'lerin XRD grafikleri

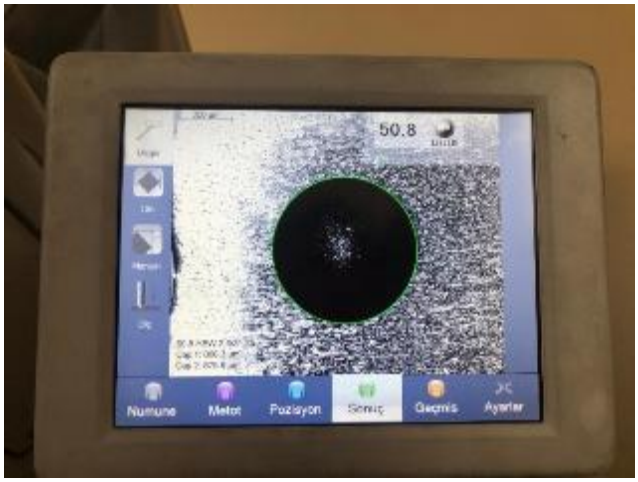


Şekil 8.58 Üçlü HNKM'lerin XRD grafikleri

NKM'ler ve HNKM'lerin XRD grafikleri incelendiğinde genel olarak takviye içerikleri ve oranlarının artmasıyla ana matris malzemesi olan AA6061'in piklerinde azalmalar gözlemlenmiştir. XRD piklerinde en yüksek Al pikleri sırasıyla 38,520°; 44,760; 65,253°; 78,140° ve 82,410° 2Θ açı konumlarında tespit edilmiştir. Sırasıyla SiC pikleri 36,040°; 60,290°; B_4C pikleri 25,510°; 36,490°; TiC pikleri ise 42,880°; 72,390° 2Θ açı konumlarında oluşmuştur. Bu çalışmadan elde edilen XRD verileri benzer akademik çalışmalar (Baviera, vd., 2001; El-Kady ve Fathy, 2014; Melendez, vd., 2018; Selvam, vd., 2013; Sivasankaran, vd., 2011) ile mukayese edildiğinde matris ve takviye partiküllerinde gözlemlenen piklere yakın açı değerlerinde analiz sonuçları tespit edilmiştir. NKM'ler ve HNKM'ler üzerinde gerçekleştirilen EDS analizlerinde de Al pikleri, Si, pikleri, B pikleri, Ti pikleri, tespit edilmiştir. Bu durum yapılan XRD analizini EDS analizleriyle desteklemiştir.

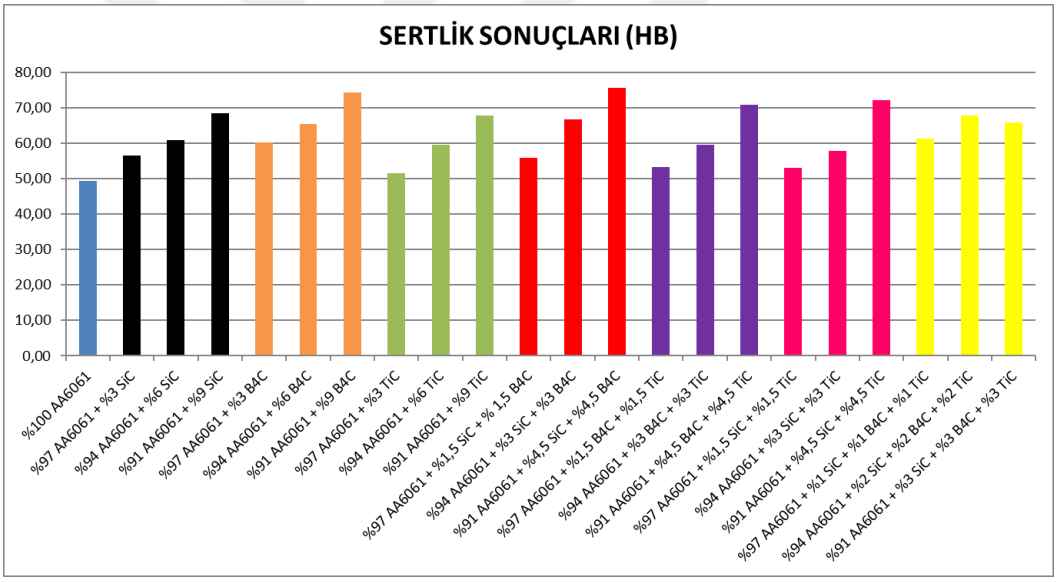
8.4 Sertlik Sonuçları

Numuneler üzerinde gerçekleştirilen sertlik ölçümlerinde Brinell yöntemi kullanılmıştır. Yapılan deneylerde numuneler 2,5 mm batıcı uç ile 15,625 kg yük altında teste tabi tutulmuştur. Sertlik testi esnasında cihazdan alınan ekran görüntüsü Şekil 8.59'da verilmiştir.



Şekil 8.59 Sertlik test cihazı ekran görüntüsü

AA6061 matrisli NKM'ler ve HNKM'lerin sertlik testlerinden elde edilen sonuç grafiği ise Şekil 8.60'da verilmiştir



Şekil 8.60 Sertlik sonuç grafiği

Verilen sertlik grafiği incelendiğinde takviyesiz AA6061'in sertlik sonuçlarının takviye eklenen NKM'ler ve HNKM'lerden daha düşük olduğu görülmektedir. Yapılan deneyde ana malzemede sertlik değeri 49,4 HB olarak ölçülmüştür. Malzeme gruplarında takviye oranları arttıkça malzemelerdeki sertlik değerlerinde genel olarak artışlar olduğu tespit edilmiştir. NKM gruplarının sertlik değerleri incelendiğinde takviye elemanı olarak B_4C kullanılan malzemelerin ana matris üzerinde sertlik değerlerini diğer takviyelerden daha çok arttırdığı tespit edilmiştir. Yapılan literatür araştırmaları da (Hasan, vd., 2023; Pul ve Baydaroğlu, 2020) bu sonucu

desteklemektedir. Tekli kompozitlerde en yüksek sertlik sonucu 74,40 HB ile AA6061 + %9 B_4C NKM'de, en düşük sertlik sonucu ise; 51,57 HB ile AA6061 + %3 TiC NKM'de ölçülmüştür. AA6061 + %9 B_4C NKM'de görülen en yüksek sertlik değeri ana malzeme ile mukayese edildiğinde NKM'nin sertlik değerinin ana malzemeye göre %50,61 iyileşme gösterdiğini ortaya çıkarmıştır.

İkili HNKM'lerde ise en yüksek sertlik sonucu 75,7 HB ile %91 AA6061 + %4,5 SiC + %4,5 B_4C HNKM'de, en düşük sertlik sonucu ise 53,10 HB ile AA6061 + %1,5 SiC + %1,5 TiC HNKM'de ölçülmüştür. En yüksek sertlik sonucunun tespit edildiği %91 AA6061 + %4,5 SiC + %4,5 B_4C HNKM, ana matris ile mukayese edildiğinde ise sertlik değerlerinde %53,24 değerinde iyileşme görülmüştür. İkili HNKM grupları incelendiğinde ise SiC-B_4C takviyeli HNKM'lerin diğer ikili takviyelere göre daha yüksek bir sertlik sergilediği tespit edilmiştir.

Üçlü HNKM'lerde ise en yüksek sertlik sonucu 67,8 HB ile %94 AA6061 + %2 SiC + %2 B_4C + %2 TiC HNKM'de, en düşük sertlik sonucu ise 61,20 HB ile %97 AA6061 + %1 SiC + %1 B_4C + %1 TiC HNKM'de ölçülmüştür. Ana matris AA6061'in sertliği ile en yüksek sertliği gösteren %94 AA6061 + %2 SiC + %2 B_4C + %2 TiC malzeme mukayese edildiğinde sertlik değerlerinde %37,25 iyileşme görülmüştür. NKM'lerde ve ikili HNKM'lerde malzemede takviye oranı arttıkça malzemenin sertlik değerlerinde genel olarak bir artış gerçekleşmiştir. Fakat üçlü HNKM'lerde sertlik artışı, tekli ve hibrit yapılardaki sertlik artışından daha düşük oranda gerçekleşmiştir. Üçlü HNKM gruplarında sertlik dağılımı diğer HNKM gruplarına göre farklılık göstermiş ve içerisinde %2 SiC/B_4C/TiC oranı ihtiva eden HNKM'nin sertlik değerinin diğer üçlü HNKM'lerden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

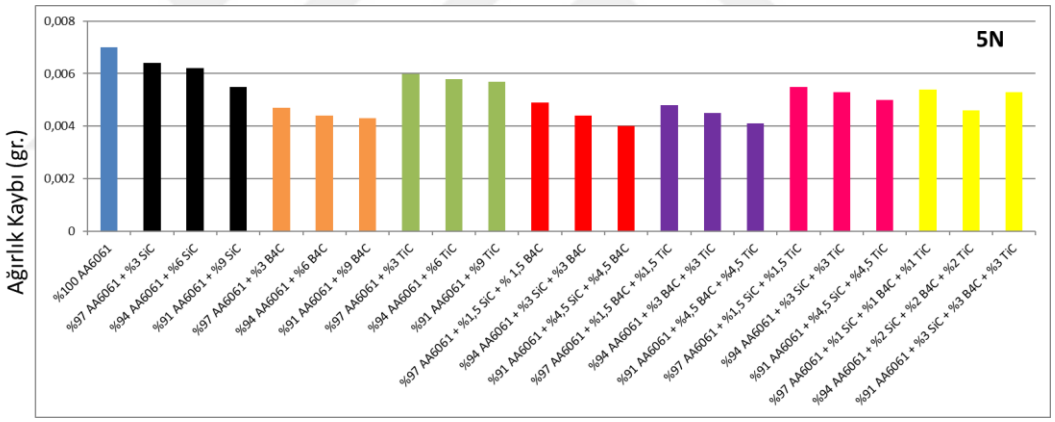
NKM'lerin gözeneklilik grafikleri incelendiğinde, NKM içerisinde yüzdece SiC ve TiC miktarları arttıkça malzemedeki gözeneklilik değerlerinde artış meydana gelmiştir. Fakat sertlik grafiklerinde yüzdece SiC ve TiC artışları NKM'lerin sertlik değerlerinin iyileşmesine neden olmuştur. Gözeneklilik değerlerinin artmasına karşın NKM'lerin sertliğinin artmasının sebebinin SiC ve TiC sert takviye partiküllerinin

matris içerisinde dirençli bir tabaka oluşturmasıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir.

8.5 Aşınma Analizleri

Hazırlanan Ø6 mm çapındaki aşınma numunelerine Tribometer marka T10/20 model cihazda pin-on-disk yöntemi kullanılarak 5N, 10N, 15N yükler altında 1,2 m/s hızda 1200 m aşındırma mesafesinde kuru kayma aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma testi öncesi ve sonrasında numunelerin ağırlıkları kaydedilmiş ve ardından ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Aşınma testi sonrasında numunelerden elde edilen ağırlık kayıplarına bağlı grafikler verilmiştir.

5 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerinden elde edilen ağırlık kaybı grafiği Şekil 8.61'de verilmiştir.

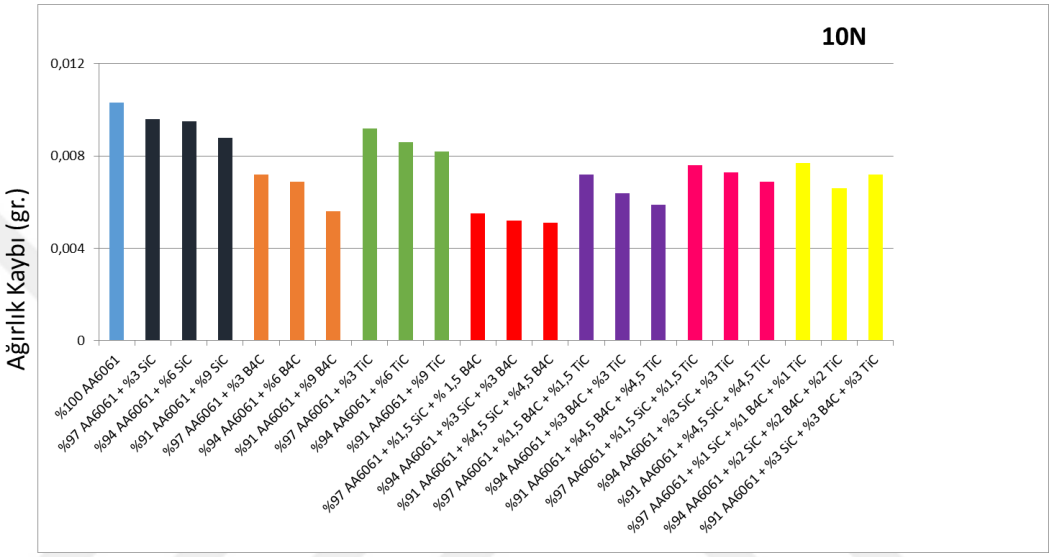


Şekil 8.61 5N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonucuna bağlı ağırlık kaybı grafiği

5 N yük uygulanarak pin-on disk yöntemi ile gerçekleştirilen aşınma testlerinin sonucunda AA6061 alaşımının ağırlık kaybı 0,0072 gr. olarak ölçülmüştür. Genel olarak NKM veHNKM gruplarında takviye oranları arttıkça malzemelerin aşınmaya karşı gösterdiği direnç artmış ve bunun sonucunda ağırlık kayıpları azalmıştır. NKM'lerde 0,0043 gr. ile %9 B4C takviyeli NKM'nin ağırlık kaybı, diğer NKM'lere kıyasla daha düşük sonuç vermiştir. İkili HNKM'lerde ise 0,0040 gr. ile %91 AA6061+ %4,5 SiC+ %4,5 B4C reçeteli HNKM diğer hibrit yapılardan daha düşük ağırlık kaybı sonucu vermiştir. Üçlü HNKM'lerde ise; 0,0046 gr. ile %94 AA6061 + %2 SiC + %2 B_4C + %2 TiC HNKM diğer kombinasyonlara göre daha iyi aşınma

dayanımı göstermiştir. Aşınma dayanımlarında ana malzemeye göre %9 B_4C takviyeli NKM %62,79; %4,5 SiC+ %4,5 B_4C takviyeli HNKM %75; %2 SiC + %2 B_4C + %2 TiC HNKM ise %52,17 iyileşme göstermiştir.

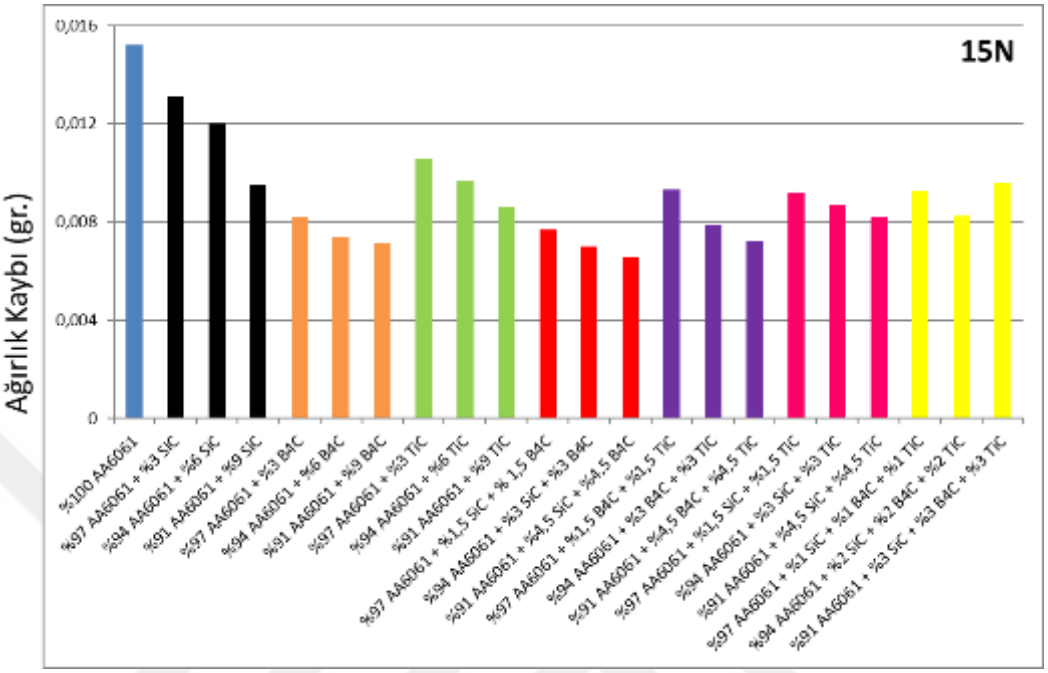
10 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerinden elde edilen ağırlık kaybı grafiği Şekil 8.62'de verilmiştir.



Şekil 8.62 10N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonucuna bağlı ağırlık kaybı grafiği

10 N yük altında gerçekleşen aşınma testleri sonucunda Şekil 8.76'da verilen ağırlık kayıplarından da görüleceği üzere hibrit kompozit malzemelerdeki kayıpların ana malzemeye göre daha az olduğu tespit edilmiştir. 10 N yük altında takviyesiz AA6061'in ağırlık kaybının 0,0103 gr. olduğu hesaplanmıştır. NKM ve HNKM gruplarında takviye elemanı oranları artışıyla beraber aşınma kayıplarında da azalış meydana gelmiştir. NKM grupları incelendiğinde en düşük aşınma ağırlık kaybının %9 B_4C takviyeli malzemede 0,0056 gr. olduğu tespit edilmiştir. İkili HNKM'lerde ise 0,0051 gr. ile %91 AA6061+ %4,5 SiC+ %4,5 B_4C reçeteli HNKM diğer hibrit yapılardan daha düşük ağırlık kaybı sonucu vermiştir. Üçlü HNKM grupları incelendiğinde ise en düşük aşınma ağırlık kaybı değeri 0,0066 gr. ile %94 AA6061 + %2 SiC + %2 B_4C + %2 TiC reçeteli HNKM'de ölçülmüştür. Aşınma dayanımlarında ana malzemeye göre %9 B_4C takviyeli NKM'de %83,92, %4,5 SiC+ %4,5 B_4C takviyeli HNKM'de %101, %2 SiC + %2 B_4C + %2 TiC HNKM'de ise %56,06 iyileşme göstermiştir.

15 N yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerinden elde edilen ağırlık kaybı grafiği ise Şekil 8.63'de verilmiştir



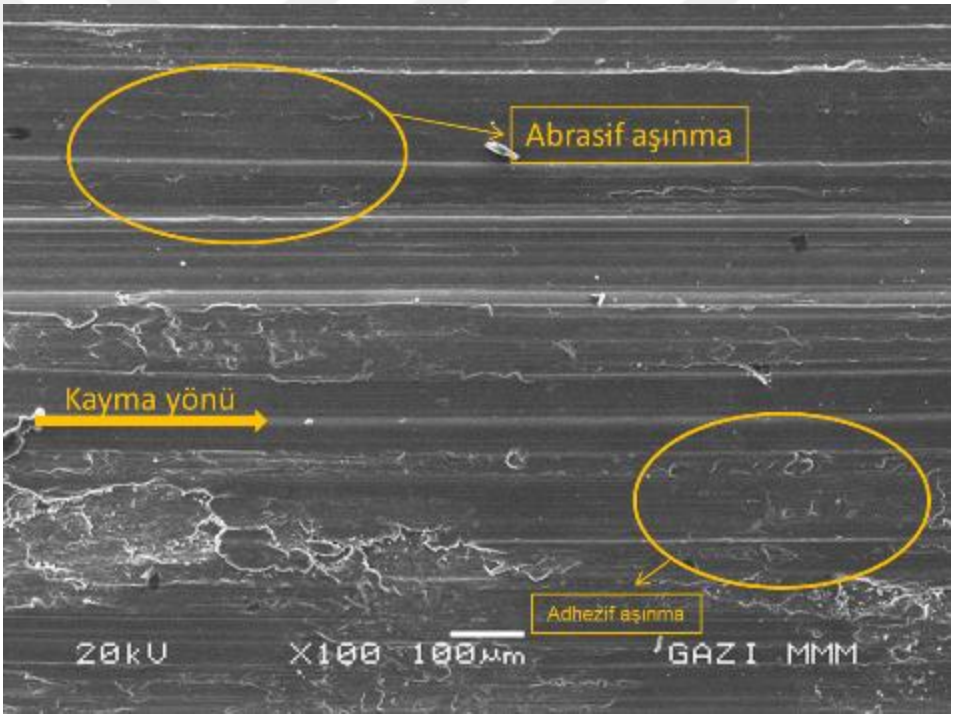
Şekil 8.63 15N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonucuna bağlı ağırlık kaybı grafiği

15N basınç altında gerçekleştirilen aşınma test sonuçları incelendiğinde malzemelerin 5N ve 10N basınç altında teste tutulmuş malzemelere göre daha fazla aşındığı ve daha fazla ağırlık kaybına uğradığı görülmektedir. Takviyesiz AA6061'in aşınmaya bağlı ağırlık kaybı 0,0152 gr. olarak hesaplanmıştır. Tekli kompozit grupları incelendiğinde en düşük ağırlık kaybı 0,0071 gr. ile %9 B_4C takviyeli NKM'de, ikili HNKM'lerde en düşük ağırlık kaybı 0,0065 gr. ile %91 AA6061 + %4,5 SiC + %4,5 B_4C reçeteli NKM'de, üçlü HNKM gruplarında ise en düşük ağırlık kaybı 0,0082 gr. ile %94 AA6061 + %2 SiC + %2 B_4C + %2 TiC reçeteli HNKM'de görülmüştür. Aşınma dayanımlarında ana malzemeye göre %9 B_4C takviyeli NKM de %76,74; %4,5 SiC+ %4,5 B_4C takviyeli HNKM de %131; %2 SiC + %2 B_4C + %2 TiC HNKM de ise %84,24 iyileşme göstermiştir.

5N; 10N; 15N yükler altında gerçekleştirilen aşınma testi sonuçları genel olarak incelendiğinde aşınma grafikleri hem kendi aralarında hem de NKM'ler ve HNKM'lerin mikrosertlik sonuçları ile tutarlılık göstermektedir. En yüksek aşınma kayıpları beklendiği şekilde 15N yük altında gerçekleştirilen test sonuçlarında, en

düşük aşınma kayıpları ise 5N yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerinde gerçekleşmiştir. Aşınma analizleri sonucunda malzeme içindeki takviye oranlarının artmasıyla malzeme üzerindeki aşınma kayıplarında kademeli olarak bir düşüş meydana gelmiştir. Yapılan literatür araştırmaları da bu düşüşü destekler niteliktedir. (Kocaman ve Ateş, 2023; Özeker, 2021; Saleh, vd., 2022; Şişmir, vd., 2011; Veeresh Kumar, vd., 2021).

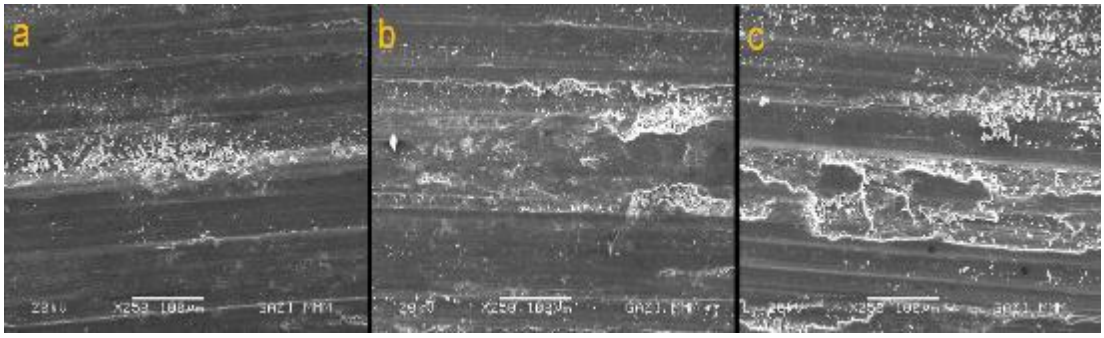
Aşınma testine bağlı ağırlık kayıpları incelendikten sonra numunelerin mikroyapılarını detaylı olarak inceleyebilmek adına SEM görüntüleri alınmış ve aşınma yüzey incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 8.64'de takviyesiz AA6061'in aşınma sonrası SEM görüntüsü verilmiştir.



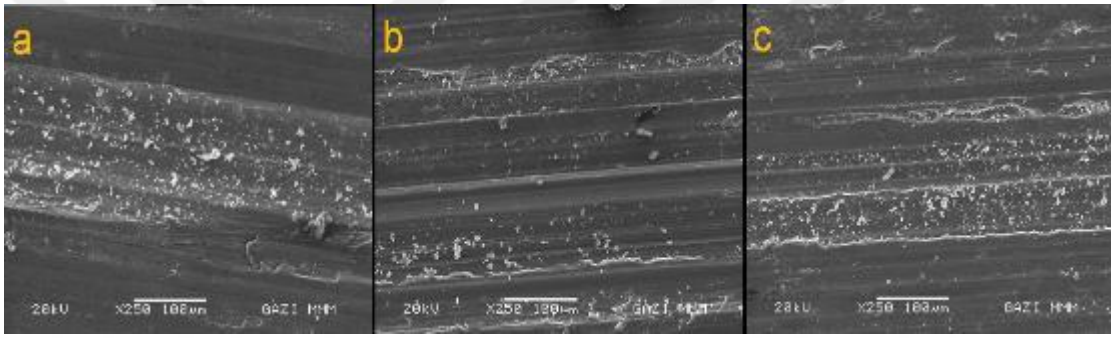
Şekil 8.64 Aşınma testi sonrası AA6061'in SEM görüntüsü

Şekil 8.64'te görüldüğü üzere takviyesiz AA6061'in aşınma izleri net bir şekilde görülmektedir. Numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde mikroyapıda genel olarak hem abrasif hem de adhezif aşınma mekanizmalarının birlikte bir yüzey hasarı oluşturduğu görülmektedir. Paralel çizgiler, abrasif aşınmanın, çatlaklar ve yüzey pürüzlülüğü ise adhezif aşınmanın tipik özellikleridir.

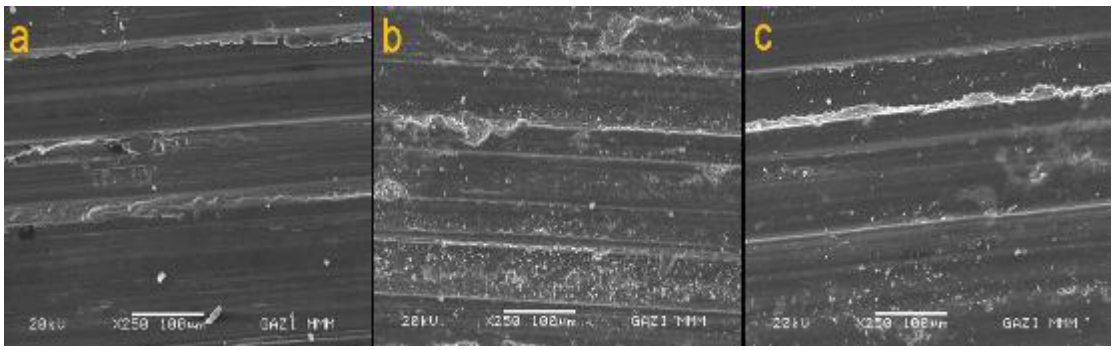
Şekil 8.65 – Şekil 8.71 arasında ise NKM'ler ve HNKM'lere ait aşınma testi sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.



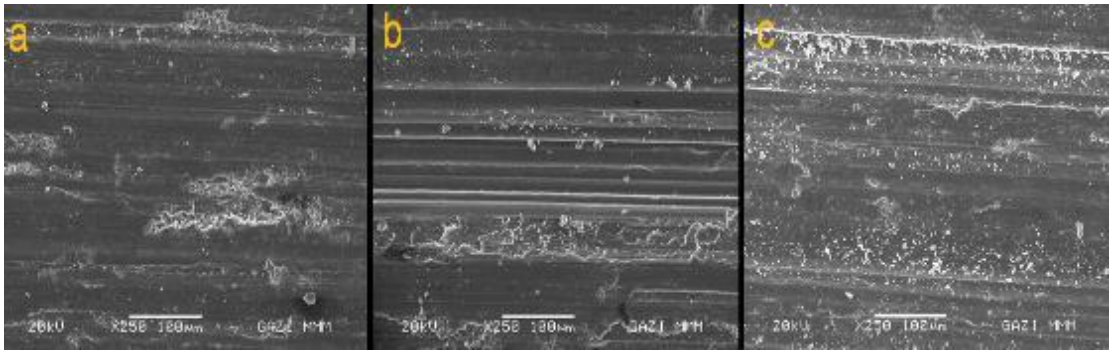
Şekil 8.65 Aşınma testi sonrası SiC takviyeli NKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %3 SiC b) %94 AA6061 + %6 SiC + %91 AA6061 + %9 SiC



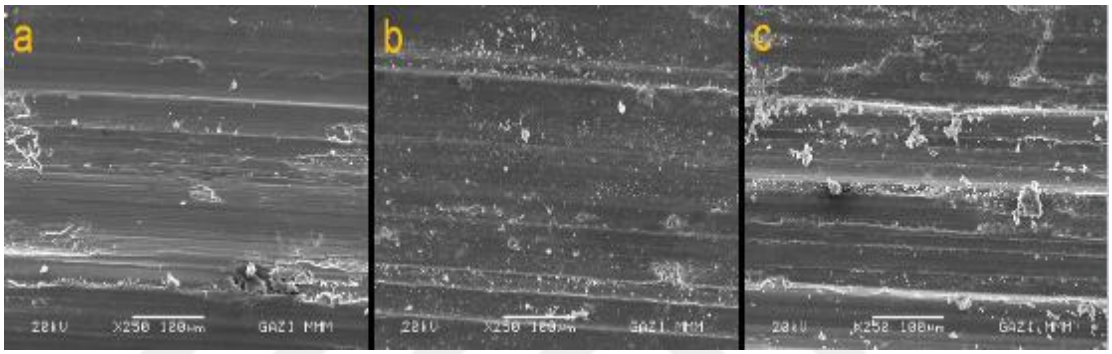
Şekil 8.66 Aşınma testi sonrası B_4C takviyeli NKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %3 B_4C b) %94 AA6061 + %6 B_4C + %91 AA6061 + %9 B_4C



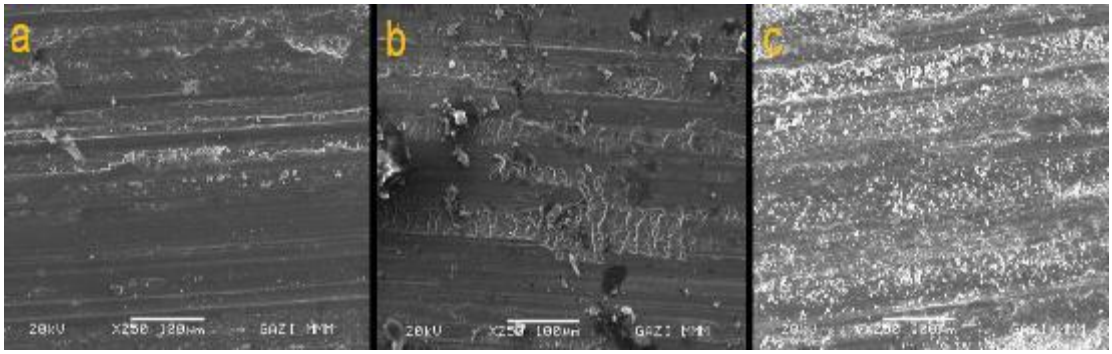
Şekil 8.67 Aşınma testi sonrası TiC takviyeli NKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %3 TiC b) %94 AA6061 + %6 TiC + %91 AA6061 + %9 TiC



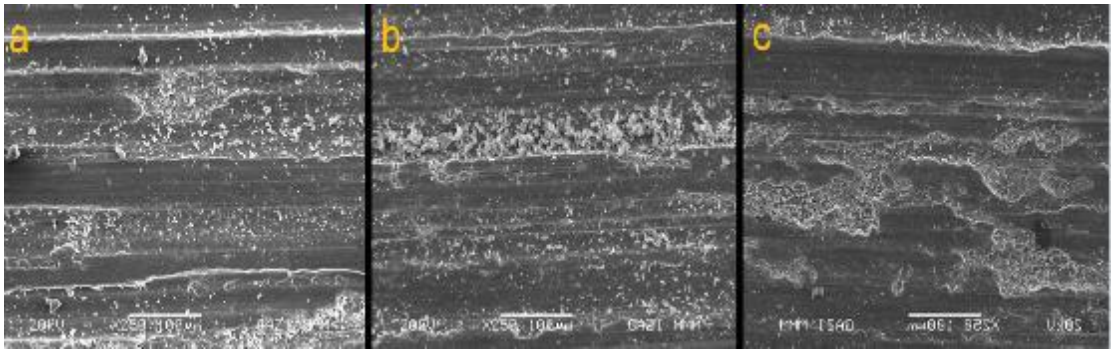
Şekil 8.68 Aşınma testi sonrası SiC ve B_4C takviyeli HNKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %1,5 SiC + %1,5 B_4C b) %94 AA6061+ %3 SiC + %3 B_4C c) %91 AA6061+ %4,5 SiC + %4,5 B_4C



Şekil 8.69 Aşınma testi sonrası B_4C ve TiC takviyeli HNKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %1,5 B_4C + %1,5 TiC b) %94 AA6061+ %3 B_4C + %3 TiC c) %91 AA6061+ %4,5 B_4C + %4,5 TiC



Şekil 8.70 Aşınma testi sonrası SiC ve TiC takviyeli HNKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %1,5 SiC + %1,5 TiC b) %94 AA6061+ %3 SiC + %3 TiC c) %91 AA6061+ %4,5 SiC + %4,5 TiC



Şekil 8.71 Aşınma testi sonrası SiC, TiC ve takviyeli HNKM'lerin SEM görüntüleri a) %97 AA6061+ %1 SiC + %1 B_4C %1 TiC, b) %94 AA6061+ %2 SiC + %2 B_4C %2 TiC c) %91 AA6061+ %3 SiC + %3 B_4C + %3 TiC

Şekil 8.65-8.71'de aşınmaya bağlı SEM görüntüleri incelendiğinde B_4C takviyeli NKM'lerin aşınma izlerinin diğer malzeme gruplarındaki izlere nazaran daha düşük olduğu görülmüştür. Bu noktada ağırlık kaybı verileri ile SEM görüntülerindeki aşınma izlerinin birbirlerini destekler nitelikte olduğu tespit edilmiştir. NKM'ler ve HNKM'lerin aşınma izleri aynı doğrultuda olup NKM'ler ve HNMK'ler genel olarak abrazif aşınma göstermiştir. Takviye oranı arttıkça da aşınma izlerinin genişlik ve derinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Söz konusu durum yine aşınma kayıplarıyla tutarlılık sergilemiştir. NKM'ler ve HNKM'ler içerisindeki takviye oranlarının artmasıyla beraber sertlik değerleri de artmış ve buna bağlı olarak aşınma deneylerindeki ağırlık kayıplarında da iyileşmeler görülmüştür. Tekli NKM gruplarında SiC ve TiC takviyeli malzemelerin takviye oranı artışıyla malzemedeki gözeneklilik değerlerinin artmasına karşın aşınmaya bağlı ağırlık kayıplarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Bu durumun malzeme içerisine takviye edilen parçacıkların malzemenin yüzey pürüzlüğünü azaltması ve bu yolla aşındırıcı disk ile arasındaki sürtünmeyi azaltması nedeniyle oluştuğu düşünülmüştür. Ayrıca takviye partiküllerinin malzemelerin sertliğini arttırmasıyla matris içerisinde bir bariyer oluşturduğu ve bu durumun aşınma yoluyla oluşacak deformasyonları engellediği söylenebilir.

9. SONUÇLAR

Bu çalışmada TM ve ekstrüzyon metotları kullanılarak AA6061 matrisine SiC, B_4C, TiC nano parçacıkları eklenerek üretilen NKM'ler ve HNKM'lerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri araştırılmış olup, çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Ana matris malzemesi AA6061'in bağıl yoğunluğu ve gözenekliliğinin sırasıyla %99,44 ve %0,55 olduğu hesaplanmıştır. SiC-TiC'nin AA6061'e nazaran yoğunluklarının daha yüksek olması nedeniyle de ana malzeme ve AA6061-SiC, AA6061-TiC numuneleri için gözeneklilik değerlerinde artışlara rastlanmıştır. B_4C'nin yoğunluğunun ana matris olan AA6061'e göre düşük olması, diğer takviye türlerine göre gözeneklilik değerlerinde kademeli olarak bir düşüş meydana getirmiştir.

- OM görüntüleri incelendiğinde SiC ve TiC miktarı arttıkça matris üzerinde mikro boyutta yapısal bozulma ve boşluk oluşumlarının arttığı gözlemlenmiştir. OM görüntülerinde NKM'lerdeki ve HNKM'lerdeki tanelerin ekstrüzyon yönünde ilerlediği gözlemlenmiştir.

- Takviyesiz AA6061 alaşımında en yüksek Al pikleri sırasıyla 38,520°; 44,760°, 65,253°; 78,140° ve 82,410° 2Θ açı konumlarında gerçekleşmiştir. HNKM'lerde SiC pikleri 36,040° ve 60,290° 2Θ açılarında, B_4C pikleri 25,510° ve 36,490° 2Θ açılarında, TiC pikleri ise 42,880° ve 72,390° 2Θ açı konumlarında rastlanmıştır.

- Deneylerde ana malzeme sertlik sonucu 49,4 HB olarak ölçülürken en yüksek sertlik değeri ise 75,7 HB ile %91 AA6061 + %4,5 SiC + %4,5 B_4C reçeteli HNKM'de olduğu görülmektedir. En yüksek sertlik sonucunun tespit edildiği %91 AA6061 + %4,5 SiC + %4,5 B_4C HNKM, ana matris ile mukayese edildiğinde ise sertlik değerlerinde %53,24 değerinde iyileşme görülmüştür.

- 5-10-15N yükleri altındaki aşınma sonuçları hem kendi aralarında hem de NKM'ler ve HNKM'lerin mikrosertlik sonuçları ile tutarlılık göstermektedir. HNKM'lerde

ise aşınmaya bağlı en düşük ağırlık kaybı değerlerinin %91; AA6061 + %4,5 SiC + %4,5 B_4C reçeteli malzemeye ait olduğu görülmektedir. AA6061 alaşımının ağırlık kaybı 5 N yük altında 0,0072 gr., 10N yük altında 0,0103 gr., 15N yük altında 0,0152 gr. olarak hesaplanmıştır 5N, 10N, 15N yük altında gerçekleştirilen aşınma analizleri neticesinde aşınmaya bağlı iyileşme oranları ise sırasıyla %75; %101 ve %131 olarak hesaplanmıştır.

- Genel olarak SiC, B_4C, TiC takviyelerinin malzemenin mekanik özelliklerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

Akyuz, B. & Şenaysoy, S. (2014) Alüminyum Alaşımlarında Yaşlandırma İşleminin Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerindeki Etkisi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi,* 1 (1), 2148-2330

Al-Saadı, H. I. A. & Tunay, R. F. (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 525-532. https://doi.org/10.21923/jesd.287005

Asa, S. (2010). AA6061 İşlem Alaşımının Homojenizasyon Prosesinin Ekstrüzyon Kabiliyetine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Awate, P., & Barve, S. (2022). *Microstructural observation and mechanical properties behavior of Al2O3/Al6061 nanocomposite fabricated by stir casting process*. Engineering Research Express. https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac54ed

Ayan, S. M. (2013). Alüminyum Ekstrüzyon Profil Tasarım Prensipleri ve Ürün Tasarım İyileştirme Tavsiyeleri -Pratik İyileştirme Önerileri. *6. Alüminyum Sempozyumu, Bildiriler Kitabı* (s. 214-225) İstanbul.

Aydın, B. (2002). AA2014 Alaşımında Yaşlandırma Isıl İşleminin İşlenebilirlik Üzerindeki Etkilerininin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Ayvaz, M. (2010). İki Farklı Alüminyum Alaşımının, Tıg Kaynak Yöntemi Kullanılarak İki Farklı Elektrot Teli ile Kaynatılması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa.

Bains, P.S., Sidhu, S.S., & Payal, H.S. (2016). Fabrication and Machining of Metal Matrix Composites: A Review, Mater. *Manuf. Process*, 31 (5), 553– 573

Barve, P.P.A.S.B. (2022). *Graphene/al6061 nanocomposite selection using topsıs and exprom2 multi-criteria decision-making methods*. Materials Today Proceedings, 62. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.069

Baviera, P., Harel, S., Garem, H., & Grosbras, M. (2001). *Elaboration and structure of nanostructured TiC: a XRD and HRTEM study*. Scr. Mater. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(01)00963-0

Bican, O., & Pul, M. (2021). Farklı Alüminyum Alaşımlarının Tornalanmasında Alaşım Cinsinin Kesici Takım Davranışı, Talaş Biçimi ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi,* 3(1), 9-17. https://doi.org/10.46387/bjesr.787725

Boutman, L.J. & Krack, R.H. (1974). *Composite Materials, Vol. 4*. Academic Press Ine. Ltd. London

Cardarelli, F. (2001). Materials Handbook — a concise desktop reference. *Materials & Design*, 22, 2-7. ISBN 1-85233-168-2. 595

Christy, T.V., Murugan, N., & Kumar, S.S. (2010). A Comparative Study on the Microstructures and Mechanical Properties of Al 6061 Alloy and the MMC Al 6061/TiB2/12P. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering,* 9, 57-65.

Çanakçı, A. (2006), AA2024 Matrisli B_4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.

Dai, W., Li, C., He, D., Jia, D., Zhang, Y., & Tan, Z. (2019). *Mechanism of residual stress and surface roughness of substrate on fatigue behavior of micro-arc oxidation coated AA7075-T6 alloy.* Surface and Coatings Technology, 380, 125014. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125014

Davis, J. R. (1993). *Aluminum and aluminum alloys.* ASM international.

Demirci, A. H. (2004). *Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi, Seçilmiş Temel Kavramlar ve Endüstriyel Uygulamalar.* Alfa Yayınları

Dobrzański, L.A., Włodarczyk, A., & Adamiak, M. (2005). Structure, properties and corrosion resistance of PM composite materials based on EN AW-2124 aluminum alloy reinforced with the Al2O3 ceramic particles. *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 27-32.

Dolata-Grosz, A., & Wieczorek, J. (2007). Tribological properties of hybrid composites containing two carbide phases. *Archives of materials science and engineering*, 28, 149-155.

Dorri Moghadam, A., Omrani, E., Menezes, P. L., &Rohatgi, P. K. (2015). Mechanical And Tribological Properties Of Self-Lubricating Metal Matrix Nanocomposites Reinforced By Carbon Nanotubes (Cnts) And Graphene - A Review, Compos. *Part B Eng*. 77, 402–420.

El-Kady, O., & Fathy, A. (2014). *Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites*. Mater. Des. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.049

Evert, R.K. & Arsenault, R.J. (1991). *Metal Matrix Composites; Mechanism and Properties, Academic Press Ine*. San Diego, USA p.262

Ghali, E. (2010). *Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: understanding, performance, and testing*. John Wiley & Sons, e-book, 121–175

Gui, M., Kang, S.B., & Lee, J.M. (2000). Wear of spray deposited Al–6Cu–Mn alloy under dry sliding conditions. *Wear*, 240, 186-198.

Gupta, A., Renu, Ranjan Kumar, S., Goswami, C., & Singh, T. (2022). *Wear behavior of Al6061 nanocomposite reinforced with nanozirconia.* Materials Today: Proceedings, 48 (Part 5), 1112–1116. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.508

Hagen, E. (2001). The Aluminum Market at the Beginning of a New Century, 6th *International Secondary Aluminum Congress* of the OEA

Hasan, L.K., Jiaad, S.M., Salman, K.D., Al-Maliki, W.A., Alobaid, F., & Epple, B. (2023). *Wear Characteristics of (Al/B4C and Al/TiC) Nanocomposites Synthesized via Powder Metallurgy Method*. Applied Sciences.

Itoh, M., Inoue, K., Hirayama, N., Sugimoto, M., & Seguchi, T. (2002). Fiber reinforced plastics using a new heat-resistant silicon based polymer. *Journal of materials science*, 37 (17), 3795-3801.

Jayaprakash, S., Siva Chandran, S., Sathish, T., Gugulothu, D., Ramesh, R., Sudhakar, M., & Subbiah, R. (2021). *Effect of Tool Profile Influence in Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminium Alloys (AA5083 and AA7068)*. Advances in Materials Science and Engineering. https://doi.org/10.1155/2021/7387296

Karabulut, H. (2011). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Al2O3, SiC ve B_4C Takviyeli Al Matrisli Kompozit Üretiminde Mekanik Alaşımlama Süresinin Kompozit Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Karaçay, E. (2008). Bor Karbür Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

Karakoç, H., Ovalı, İ., Dündar, S. & Çıtak, R. (2019). Wear and mechanical properties of Al6061/SiC/B4C hybrid composites produced with powder metallurgy. *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (6), 5348-5361. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.002

Karomatullozoda, L. (2018). Demir Alaşımı Parçaların Toz Metalurjisi Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, *Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antalya.

Kaufman, J. G. (2006). *Mechanical Engineers Handbook: Materials and Mechanical Design, 3rd edition,* Online ISBN:9780471777441, John Wiley & Sons, InTech, ebook, 59-115

Kaya, A.İ. (1995). Atık KAğıtlardan Geri Kazanılmış Liflerden Kompozit Malzeme Üretim Olanaklarının Araştırılması. Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta.

Kishore, P.V., Kumar, P.M., & Dinesh, D. (2019). Wear analysis of Al 5052 alloy with varying percentage of tungsten carbide. *Internatıonal Conference On Materıals*, Manufacturıng And Machınıng 2019. https://doi.org/10.1063/1.5117965

Kocaman, R., & Ateş, S. (2023). Al6061 Matrisli SiC Al2O3 ve Kömür Cürufu Tozu Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Sertlik ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 598-609.

Kumar, S.D., Ravichandran, M., Jeevika, A., Stalin, B., Kailasanathan, C.K., & Karthick, A. (2021). Effect of ZrB2 on microstructural, mechanical and corrosion behaviour of aluminium (AA7178) alloy matrix composite prepared by the stir casting route. *Ceramics International*, 47, 12951-12962.

Kurtoğlu, B. (2019). Sıcak Ekstrüzyon Yöntemi Kullanılarak Alüminyum Alaşımı Talaşların Geri Dönüşümü ile Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu.

Li, S., Su, Y., Zhu, X., Jin, H., Ouyang, Q., & Zhang, D. (2016). Enhanced mechanical behavior and fabrication of silicon carbide particles covered by in-situ carbon nanotube reinforced 6061 aluminum matrix composites. *Materials & Design*, 108, 309-318. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.021

Macke, A. (2012). *Metal Matrix Composites Offer Automotive Industry Opportunity to Reduce Vehicle Weight, Improve Performance*. AM&P Technical Articles.

Mahendra, K.V., & Radhakrishna, K. (2010). Characterization of Stir Cast Al-Cu-(fly ash + SiC) Hybrid Metal Matrix Composites. *Journal of Composite Materials*, 44, 1005 - 989.

Mallikarjuna, B., Shivanand, H.K., Reddy, H.K., & Ahamadsab, M.H. (2017). Evaluation of Impact Properties of Fly Ash and S-Glass Reinforced Al-4046 Hybrid Metal Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, 4, 12285-12290.

Mavi, A., Kaplan, Y., & Aksöz, S. (2021). Effects of Aging and Deep Cryogenic Treatment on Wear Behavior of Al7075 Alloy. *Journal Of Trıbology-Transactıons Of The Asme*, 143 (12), 121702-121709.

Mazaheri, Y., Meratian, M., Emadi, R., & Najarian, A. R. (2013). Comparison of microstructural and mechanical properties of Al-TiC, Al-B 4C and Al-TiC-B 4C composites prepared by casting techniques. *Mater. Sci. Eng. A*, 560, 278– 287.

Melendez I.M., Arevalo, C., Soriano E.M.P, Kitzmantel M., & Neubauer, E. (2018). *Microstructural and XRD analysis and study of the properties of the system Ti-TiAl-B4C processed under different operational conditions*. Metals. https://doi.org/10.3390/met8050367

Metin, O. (1973). Alüminyum-Silisyum Alaşımlarında Silisyumun Malzeme Mukavemetine Etkisi. Bitirme Ödevi, *İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi*, İstanbul.

Miracle, D.B. (2005). Metal matrix composites – From science to technological significance. *Composites Science and Technology, 65*, 2526-2540.

Mohanavel, V., Rajan, K., & Ravichandran, M. (2016). Synthesis, characterization and properties of stir cast AA6351-aluminium nitride (AlN) composites. *Journal of Materials Research*, 31(24), 3824-3831. (https://doi.org/10.1557/jmr.2016.460)

Mohapatra, S., Chaubey, A. K., Mishra, D. K., & Singh, S. K. (2016). Fabrication of Al–TiC composites by hot consolidation technique: its microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials research and Technology*, 5(2), 117-122.

Morampudi, P., Venkata Ramana, V., Prasad, C.V., SriramVikas, K., & Rahul (2022). Physical, mechanical and corrosion properties of Al6061/ZrB2 metal matrix nano composites via powder metallurgy process. *Materials Today: Proceedings*, 59 (3), 1708-1713.

Morampudi, P., Venkata Ramana, V.S.N., Bhavani, K., Amrita, M. & Srinivas, V. (2021). The Investigation of Machinability and Surface Properties of Aluminium Alloy Matrix Composites. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53(4), 210412.

Murthy, H. A., & Singh, S. K. (2015). Influence of TiC particulate reinforcement on the corrosion behaviour of Al 6061 metal matrix composites. *Advanced Materials Letters*, 6(7), 633-640.

Muruganandam, D., Jayapriya, J., Suresh, M., Chitradevi, S.T., Puthilibai, G., & Sudhakar, M. (2020). Simple study on behavior of composites with augmentation of Silicon carbide on Al6061 aluminium alloy based on mechanical properties. *Materials Today: Proceedings*, 33(7), 4573-4577. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.189

Okumus, S.C., Aslan, S., Karslioglu, R., Gultekin, D., & Akbulut, H. (2012). Thermal Expansion and Thermal Conductivity Behaviors of Al-Si/SiC/graphite Hybrid Metal Matrix Composites (MMCs). *Materials Science*, 18, 341-346.

Ök, İ. (2021). 5XXX Alüminyum Alaşımları Üzerine Uygulanacak Fosfatlama İşlemi ve Organik Kaplamalar ile Cass Testi ve Çevrimsel Korozyon Direncini Artıran Proses Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,* Bursa.

Öksüz, C. (1996). Yüksek Mukavemetli (2024, 6061, 7075) Alüminyum Alaşımlarının Jominy Yöntemi ile Suverme Duyarlılığı. Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Özdemir, T. (2006). Bor Karbür Esaslı Seramik Metal Kompozitlerinin Ultrases Dalga Hız Metodu ile Ortalama Tanecik Boyutlarının Tayini. Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon.

Özeker, M.B. (2021). Pin On Disk Metodu ile B_4c Oranının Alüminyum Matrisli ve B_4c Takviyeli Toz Metal Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışı Üzerine Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Ankara.

Öztürk, M. (2007). SiC İlaveli Alümina Seramik Kompozitler. Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.

Pul, M. (2019). Alüminyum 7075 Matrisli Kompozitlerde SiC, B_4C ve TiB2 Takviye Elemanlarının Mekanik Özelliklere Etkilerinin Karşılaştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7, 180-193.

Pul, M., & Baydaroğlu, V. (2020). B_4C/SiC Katkılı Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerin İncelenmesi ve Balistik Performanslarının Modellenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(2), 383-392.

Qu, J. (1993). The effect of slightly weakened interfaces on the overall elastic properties of composite materials. *Mechanics of Materials*, 14(4), 269-281

Ravichandran, M., Naveen Sait, A., & Anandakrishnan, V. (2014). Al–TiO2–Gr powder metallurgy hybrid composites with cold upset forging. *Rare Metals, 33*, 686-696.

Rosato, D. V. (1997). *Designing with reinforced composites*. Hanser Gardner Publications

S. Mahdavi, (2011). Effect of the SiC particle size on the dry sliding wear behavior of SiC and SiC–Gr-reinforced Al6061 composites, *Journal of Materials Science*, 46, 7883–7894.

Saha, P. K. (2005). *Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojisi*. (E. Keleşoğlu ve Y. Erarslan, Çev.), ASM International The Materials Information Society, Ege Basımevi, İstanbul.

Saleh, B., Ma, A., Fathi, R., Radhika, N., Ji, B., & Jiang, J. (2022). *Wear characteristics of functionally graded composites synthesized from magnesium chip waste*. Tribology International 174 Article ID 107692.

Samal, P., Vundavilli, P. R., Meher, A., & Mahapatra, M. M., (2019). Influence of TiC on dry sliding wear and mechanical properties of in situ synthesized AA5052 metal matrix composites. *J. Compos. Mater*, 53 (28–30), 4323–4336.

Schubert, T., Weißgärber, T., Kieback, B., Balzer, H., Neubing, H.-C., Baum, U., & Braun, R. (2005). Aluminium PM 'is a challenge that industry can overcome'. *Metal Powder Report,* 60(3), 32-37. https://doi.org/10.1016/S0026-0657(05)00370-X

Selvam J.D.R., Smart D.S.R., & Dinaharan I., (2013) *Microstructure and some mechanical properties of fly ash particulate reinforced AA6061 aluminium alloy composites prepared by compocasting.* Mater. Des. https://doi.org/10.1016/ j.matdes.2013.01.053

Senthilkumar, N., Kalaichelvan, K., & Elangovan, K. (2012). Mechanıcal Behavıour Of Alumınum Partıculate Epoxy Composıte - Experımental Study And Numerıcal Sımulatıon. *International Journal Of Mechanical And Materials Engineering*, 7(3), 214-221.

Seydibeyoğlu M. Ö. (2012). *A Novel Partially Biobased Pan-Lignin Blend As A Potential Carbon Fiber Precursor*. Biomed Research International

Sharun, V., Rajasekaran, M., Kumar, S. S., Tripathi, V., Sharma, R., Puthilibai, G., Sudhakar, M. S., & Negash, K. (2022). *Gelişmekte olan çelik koruma kaplama teknikleri üzerine çalışma. Study on developments in protection coating techniques for steel.* Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2843043.

Shivaramu, H. T., & Umashankar, K. S. (2019). Dry sliding wear behaviour of multi walled carbon nanotubes reinforced aluminium composites produced by powder metallurgy technique. *Materials Research Express*, 6(11), 1150d7.

Sinclair, I., & Gregson, P.J. (1997). Structural performance of discontinuous metal matrix composites. *Materials Science and Technology*, 13, 709 - 726.

Sivananth, V., Vijayarangan, S., & Rajamanickam, N. (2014). Evaluation of fatigue and impact behavior of titanium carbide reinforced metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 597, 304-313.

Sivasankaran S., Sivaprasad K., Narayanasamy R., & Satyanarayana P.V. (2011). *X-ray peak broadening analysis of AA6061100−x −xwt. % Al2O3 nanocomposite prepared by mechanical alloying.* Mater. Charact. https://doi.org/10.1016/ j.matchar.2011.04.017

Sun, Y. (1998). Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları. Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul.

Surappa, M.K. (2003). Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana*, 28, 319-334.

Şenel, M. C. (2020). Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretilen Saf Al ve Al-B_4C, Al-Al2O3 Kompozitlerin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin Karşılaştırılması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 783-795. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.689359

Şimşir, M., Öksüz, K. E., & Şahin, Y. (2011). Investigation of the wear behavior of B4C reinforced Fe/Co matrix composites produced by hot press. Procedia Engineering

Toptan, F. (2006). Alüminyum Matrisli B_4C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi ile Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

Türkoğlu, T. (2022). TiC, Karbon Nanotüp ve Grafen Takviyeli 6061 Alüminyum Esaslı Hibrit Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi, Özelliklerinin İncelenmesi ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,* Balıkesir.

Uddin, M.S., Hall, C., & Murphy, P.J. (2015). Surface treatments for controlling corrosion rate of biodegradable Mg and Mg-based alloy implants. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(5),053501. https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/5/053501

URL-1. (2024). *Aluminum 6061-T6.* https://asm.matweb.com, Erişim Tarihi: 20.10.2024

Ünal, N. (1987). Alüminyum Alaşımları ve Isıl işlemleri. Bitirme Ödevi, *İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi*, İstanbul.

Vani, V. V., & Chak, S. K. (2018). The effect of process parameters in Aluminum Metal Matrix Composites with Powder Metallurgy. *Manufacturing Review*, 5(7), 1-7. https://doi.org/10.1051/mfreview/2018001

Vasiliev, V.V., & Morozov, E.V. (2001). *Mechanics and Analysis of Composite Materials. Elsevier Science Ltd.*, Oxford. https://www.elsevier.com/books/mechanics-and-analysis-of-composite-materials/vasiliev/978-0-08-042702-7

Veeresh Kumar, G., Pramod, R., Hari Kiran Reddy, R., Ramu, P., Kunaal Kumar, B., Madhukar, P., Chavali, M., Mohammad, F., & Khiste, S.K. (2021). *Investigation of the Tribological Characteristics of Aluminum 6061-Reinforced Titanium Carbide Metal Matrix Composites*. Nanomaterials, 11.

Verma, A., Singh Chauhan, S., & Prakash Dwivedi, S. (2022). Review paper on thermal expansion and tribological behavior of composite materials. Materials Today: Proceedings.

Yağmur, S., & Pul, M. (2022). Al 6061/B4C/GNP Hibrit Kompozitin İşlenmesinde Takım Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(2), 816-828. https://doi.org/10.29137/umagd.1096103

Yalçın, H., & Gürü, M. (2012). *Malzeme Bilgisi*. Palme Yayıncılık, Ankara.

Yaşar, A. (2024). Alüminyum Ekstrüzyon Kalıp Tasarımında Bilgisayar Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne.

Yılmaz, H. (2011). AA5754 VE AA6061 Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.

Yurt, O.E. (2019). Ekstrüzyon Yöntemi ile Üretilen Parçacık Takviyeli Alüminyum Kompozit Profillerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu.

Zhang, P., Liu, J., Gao, Y., Liu, Z., & Mai, Q. (2023). *Effect of heat treatment process on the micro machinability of 7075 aluminum alloy*. Vacuum, 207, 111574. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111574

Zhu, L., Liu, Z., & Zhang, Z. (2019). Investigation on strengthening of 7075 aluminum alloy sheet in a new hot stamping process with pre-cooling. The International *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 4739–4746. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03890-0