



T.C

**SİVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Al VE CAM MATRİSLİ B₄C SİNER SERAMİK İLE TABAKALI
KOMPOZİT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇAĞATAY KIRIKLAR
(201592061131)**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZER**

**SİVAS
TEMMUZ 2018**

Çağatay KIRIKLAR' ın hazırladığı ve “**Al ve Cam Matrisli B₄C Sinter Seramik ile Tabakalı Kompozit Üretimi ve Karakterizasyonu**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı: **Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZER**

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof.Dr. Recep ÇALIN**

Kırıkkale Üniversitesi

Prof.Dr. Mehmet ŞİMŞİR

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. İsmail ÇELİK

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜR

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu' nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)' nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bütün hakları saklıdır.
Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Çağatay KIRIKLAR, 2018

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu

(Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

26.07.2018

Çağatay KIRIKLAR

TEŞEKKÜR

Çalıőmam süresince bilgi ve deneyimleriyle desteğini esirgemeyen tez danışmanı değerli hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi **ALİ ÖZER**' e,

Laboratuvar olanaklarından yararlanmamı sağlayan hocalarım Prof. Dr. **MEHMET ŞİMŞİR** ve Dr. Öğr. Üyesi **KEMAL ŐAHBUDAK**' a,

Sivas Valilięine, Sivas İl Jandarma Komutanlığı ve Sivas Komando Birlięindeki Subaylar ve keskin niőancılara,

Hayatımın her anında her zaman yanımda olan, her koőulda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve karakterimi kazanmamda en büyük pay sahibi olan sevgili babam **BAYRAM KIRIKLAR** ve sevgili annem **ŐERİFE KIRIKLAR**' a sonsuz sevgi ve teőekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Al VE CAM MATRİSLİ B₄C SİNER SERAMİK İLE TABAKALI KOMPOZİT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Çağatay KIRIKLAR

Yüksek Lisans Tezi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali ÖZER

2018, 73+xiv sayfa

Dünya’ da ve ülkemizde savunma sanayi çok önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle de ülkemizdeki terörü ve coğrafik konumu göze alacak olursak savunma sanayi bir hayli önem kazanmaktadır. Bu deneysel çalışmada ülkemize getirisi olacak dışa bağımlılığı azaltacak ve kolluk kuvvetlerimizin can güvenliğini sağlamaya yönelik bir tez çalışması yürütülmüştür.

Üretilmek istenen kompozitlerde matris malzemesi olarak Al ve Cam kullanılmıştır, bilindiği üzere alüminyum diğer metallere göre hafifliği, alaşımlandırılarak yeterli mukavemete sahip olması, tekrar kullanılabilirliği, yüksek korozyon direnci, yüksek ısı ve elektriksel iletkenliği ve şekillendirilebilirliği gibi özelliklerinden dolayı daha avantajlı olmaktadır. Alüminyum demirden üç kat daha hafif olmasına rağmen alaşımlandırılarak demire yakın mukavemette bir malzemeye dönüştürülebilir bu üstün özelliklerinden faydalanmak ve nihai üründe istenilen mekanik özellikleri elde etmek amacıyla Al kullanılmıştır. Bir diğer matris malzemesi olan cam ise seramik bir malzeme olup camsı faz elde edilmesi amaçlanmıştır bu sayede nihai üründe istenilen darbe direnci kazanımı sağlayacağından ötürü kullanılmıştır.

Al ve cam matrisli B₄C tozları CIP yapıp sinterlenmesi sonucunda döküm ve fiber kaplama ile tabakalı kompozit üretilebilirliği üzerine çalışılmıştır ve üretilen bu kompozitlerin kompozit yoğunlukları ölçülüp gerekli balistik, mekanik testleri yapılmıştır ve XRD’ de fazlar, SEM’ de ise yüzey ve elementel analiz yapılarak gerekli balistik özelliklerin kazanımı incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al7075, B₄C, Sinterleme, Balistik

ABSTRACT

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF LAYERED COMPOSITE B₄C SINTER CERAMICS REINFORCED WITH Al AND GLASS MATRIX

Çağatay KIRIKLAR

Master of Science Thesis, Department Metallurgy and Material Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ali Özer

2018, 73+xiv pages

Defense industry is very important in the world as well as in our country. Especially defense industry is gaining importance due to terror and geographical position in our country. In this experimental study an attempt was carried out to reduce the dependences to other the countries and to ensure the security of our law enforcement officers. Al and glass were used as matrix material in composites which were planned to be produced. Aluminum is advantageous because of its lightweight compared to other metals, having sufficient strength by alloying, repeated usability, high corrosion resistance, high thermal and electrical conductivity and formability. Although aluminum is three times lighter than steel, Al can be alloyed and transformed into a material with strength close to that of steel. Al has been used due to these superior properties and to obtain the desired mechanical properties in the final product. Glass, as another matrix material, is a ceramic material and it is aimed to obtain vitreous phase in the final product is to obtain impact resistance.

Al and glass matrix B₄C powders were processed by powder metallurgy route followed by CIP and sintering. After B₄C sintering, Al was cast as to distinct layers to enable a layered bulk armor. The composite densities were measured, and the necessary ballistic and mechanical tests were carried out. The phases were analyzed in XRD and surface and elemental analysis was performed by SEM to determine the required ballistic properties.

Keywords: Al7075, B₄C, Sintering, Ballistic.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. KOMPOZİT MALZEMELER	1
1.1 Takviye Malzemesine Göre	4
1.1.1 Polimer Matris Kompozitler	4
1.1.2 Metal Matris Kompozitler	7
1.1.3 Seramik Matris Kompozitler	10
1.2 Takviye Yapısına Göre	12
1.2.1 Hibrid kompozitler	12
1.2.2 Taneli kompozitler	14
1.2.3 Lifli kompozitler	16
1.2.4 Tabakalı kompozitler	18
2. BALİSTİK BİLİMİ	22
3. LİTERATÜR TARAMASI	24
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
4.1 Giriş.....	31
4.2 Karışımların Hazırlanması ve Akım Şeması	31
4.3 Öğütme ve Kurutma İşlemi	33
4.4 Karışımların Şekillendirilmesi.....	34
4.4.1 Tek eksenli pres	34
4.4.2 Soğuk İzostatik pres (CIP).....	35
4.5 Sinterleme İşlemi	36
4.6 Döküm İşlemi	37
4.7 Balistik Uygulamaları	39
4.8 Karakterizasyon Teknikleri	41
4.8.1 Yoğunluk ölçümü.....	41
4.8.2 Mikro sertlik ölçümü	42
4.8.4 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleme	44
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	46
5.1 Yoğunluk Sonuçları	46
5.2 Sertlik Sonuçları	46
5.3 XRD Sonuçları	47
5.4 SEM Sonuçları.....	52
5.5 Balistik Sonuçlar.....	62
6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Kompozit Malzeme Tarih Skalası	1
Şekil 1.2 Bazı CFRP, AFRP, GFRP ve yumuşak çeliğin gerilme-gevşeme eğrilerinin kıyaslanması	6
Şekil 1.3 Bazı CFRP, AFRP, GFRP ve Al yük-gevşeme eğrilerinin kıyaslanması.....	6
Şekil 1.4 Bazı GFRP, CFRP ve ARFP kompozitlerin SEM görüntüleri: a) GFRP (poliester matris), b) GFRP (Epoksi matris), c) CFRP (Epoksi matris), d) ARFP (Epoksi matris).....	7
Şekil 1.5 Bazı metal matrisli kompozitlerin tipik takviye malzemeleri ve kullanım alanları	8
Şekil 1.6 Fiber kaplamaların SEM görüntüleri; a) SiC fiberler: ZrO ₂ arayüz kaplamalı, b) Karbon fiberler: ZrO ₂ arayüz kaplamalı(kesit), c) ZrO ₂ arayüz kaplamalı smk' de çekilme (pull-out).....	11
Şekil 1.7 Fiber kaplamaların SEM görüntüleri; a) Karbon fiberler: HfN arayüz kaplamalı, b) Karbon fiberler: ZrO ₂ /HfO ₂ /HfN çok-tabakalı arayüz kaplamalı, c) Karbon fiberler: ZrO ₂ /HfO ₂ çok-tabakalı arayüz kaplamalı.....	11
Şekil 1.8 Farklı arayüz içeren C/SiC kompozitler (fiber kaplama yok); a) 2D C/SiC Kompozit: Üç farklı arafazlı kompozit: CF-SiC, Si-SiC ve CF-CM, b) 2D C/SiC Kompozit: Zayıf arayüzler boyunca çatlamanın yayılması.	11
Şekil 1.9 İzotrop, ortotrop ve anizotrop malzemelerde gerilmeye bağlı davranışlar .	20
Şekil 2.1 Namlu içindeki merminin ateşlenme anı	22
Şekil 2.2 Mermi yolu.....	23
Şekil 2.3 Mühimmatın hedefteki penetrasyonun termal takibi.....	23
Şekil 3.1 400 m/s hızdaki merminin hedefte oluşturduğu hasar yayılımının simülasyonu	24
Şekil 3.2 Çok katmanlı zırhın (MAS) şematik diyagramı	25
Şekil 3.3 İşlevsel dereceli malzemelerin balistik test örneği.....	27
Şekil 4.1 %20 cam katkılı sinter sonrası camlaşan numune	31
Şekil 4.2 Bilyalı değirmen	33
Şekil 4.3 Cam tozunun eleme öncesinin ve sonrasının görüntüsü.....	33
Şekil 4.4 Kurutma işlemi sonrası tozun görüntüsü	34
Şekil 4.5 Pres işleminde kullanılan metal kalıp	35
Şekil 4.6 a) CIP, b) Numune besleme bölmesi	35
Şekil 4.7 a) CIP sonrası elde edilen numuneler, b) altıgen plakaların ölçüleri.....	36
Şekil 4.8 Atmosfer kontrollü fırın.....	36
Şekil 4.9 10A-20A-5C-10C numunelerinin sinter rejim grafiği.....	37
Şekil 4.10 İndüksiyon ocağı ve grafit pota	38
Şekil 4.11 Döküm de kullanılan grafit pota ve 2x3 dizilimdeki numuneler.....	38
Şekil 4.12 İşleme sonrası plaka ölçüleri	39
Şekil 4.13 Balistik Düşüş Kartı.....	40
Şekil 4.14 a) 5.56 x 45 mm mermi, b) HK-33 piyade tüfeği.....	41
Şekil 4.15 a) Hedef plakalar, b) Atış alanı.....	41
Şekil 4.16 Rigaku D-max XRD cihazı	43
Şekil 4.17 a) Mira3XMU FE-SEM (Tescan, Çekya) markalı taramalı elektron mikroskobu, b) SEM cihazının numune tablası ve dedektörlerin yerleşimi.....	44
Şekil 4.18 Quorum Q150R ES Sputter Coater (Au-Pd) kaplama cihazı.....	45

Şekil 5.1 (a) 10C , (b) 10A takviyeli Al plakalarının kesit mikro sertlik (HV) grafiği	47
Şekil 5.2 24 saat bilyalı değirmende öğütülmüş, a) Cam, b) Al, c) B ₄ C tozlarının XRD paternleri	48
Şekil 5.3 1000 °C' de 1 saat sinterlenmiş a) saf B ₄ C, b) Ağırlıkça %5 cam matrisli, c) Ağırlıkça %10 cam matrisli kompozitlerin XRD paternleri	49
Şekil 5.4 1000 °C' de 1 saat sinterlenmiş a) Ağırlıkça %5 cam matrisli, b) Ağırlıkça %10 cam matrisli kompozitlerin XRD paternleri	50
Şekil 5.5 1000 °C' de 1 saat sinterlenmiş a) saf B ₄ C, b) Ağırlıkça %10 Al matrisli, c) Ağırlıkça %20 Al matrisli kompozitlerin XRD paternleri	51
Şekil 5.6 a) %99 saflıkta Alüminyum tozu ve 24 saat bilyalı değirmende öğütülmüş; b) B ₄ C, c) Cam tozlarının SEM görüntüleri	53
Şekil 5.7 24 saat bilyalı değirmende öğütülmüş; a) %20Al-%80B ₄ C, b) %10Al-%90B ₄ C, c) %5Cam-%95B ₄ C, d) %10Cam-%90B ₄ C tozlarının SEM görüntüleri	56
Şekil 5.8 1000 °C'de sinterlenmiş katkısız B ₄ C numunelerinin SEM görüntüsü	57
Şekil 5.9 1000 °C'de sinterlenmiş %10Al katkılı B ₄ C numunelerinin SEM görüntüsü	58
Şekil 5.10 1000 °C'de sinterlenmiş %20Al katkılı B ₄ C numunelerinin SEM görüntüsü	59
Şekil 5.11 1000 °C'de sinterlenmiş %5 Cam katkılı B ₄ C numunelerinin SEM görüntüsü	60
Şekil 5.12 1000 °C'de sinterlenmiş %10 Cam katkılı B ₄ C numunelerinin SEM görüntüsü	61
Şekil 5.13 100 metreden atışları yapılan, a) 20A zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 20A zırh plakasının mermi çıkış yönü	62
Şekil 5.14 100 metreden atışları yapılan, a) 10A zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 10A zırh plakasının mermi çıkış yönü	62
Şekil 5.15 100 metreden atışları yapılan, a) 5C zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 5C zırh plakasının mermi çıkış yönü	63
Şekil 5.16 100 metreden atışları yapılan, a) 10C zırh plakasını mermi giriş yönü, b) 10C zırh plakasının mermi çıkış yönü	63
Şekil 5.17 50 metreden atışları yapılan, a) 20A zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 20A zırh plakasının mermi çıkış yönü	64
Şekil 5.18 50 metreden atışları yapılan, a) 10A zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 10A zırh plakasının mermi çıkış yönü	64
Şekil 5.19 50 metreden atışları yapılan, a) 5C zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 5C zırh plakasının mermi çıkış yönü	65
Şekil 5.20 50 metreden atışları yapılan, a) 10C zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 10C zırh plakasının mermi çıkış yönü	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Polimer bazlı kompozitlerin sınıflandırma sistemi.....	4
Çizelge 1.2 Metal Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	7
Çizelge 1.3 Smk'lerin takviye malzemelerine göre sınıflandırılması.....	10
Çizelge 4.1 Hazırlanan karışımların ağırlık yüzdesi (%ağ.) cinsinden kompozisyonları.....	31
Çizelge 4.2 10A-20A-5C-10C kodlu kompozitlerin akım şeması.....	32
Çizelge 4.3 7075 serisi Al'nin a) kimyasal bileşimi, b) mekanik özellikleri.....	37
Çizelge 4.4 HK-33 Piyade tüfeğinin özellikleri.....	40
Çizelge 4.5 Kullanılan Merminin Özellikleri.....	40
Çizelge 5.1 1000°C' de sinterlenen 10A-20A-5C-10C altıgen numunelerin yüzde cinsinden ortalama Arşimet yoğunluk – sertlik değerleri.....	46



SİMGELER DİZİNİ

Al	Alüminyum
B₄C	Bor karbür
°C	Santigrat derece
µm	Mikrometre
dk	Dakika
MPa	Mega Pascal
HV	Vickers sertlik değeri
P	Uygulanan yük
g	Gram
SiC	Silisyum karbür
ZrO₂	Zirkonyum oksit
m	Kütle
d	Yoğunluk
V	Hacim
Na	Sodyum
Si	Silisyum
C	Karbon
V_m	Matris hacim oranı
V_t	Takviye hacim oranı
d_m	Matris yoğunluğu
d_t	Takviye yoğunluğu
Al₂O₃	Alümina
C	Karbon
mA	Miliamper
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
Zn	Çinko
Mg	Magnezyum
KHz	Kilo Hertz
m²	Metrekare

KISALTMALAR DİZİNİ

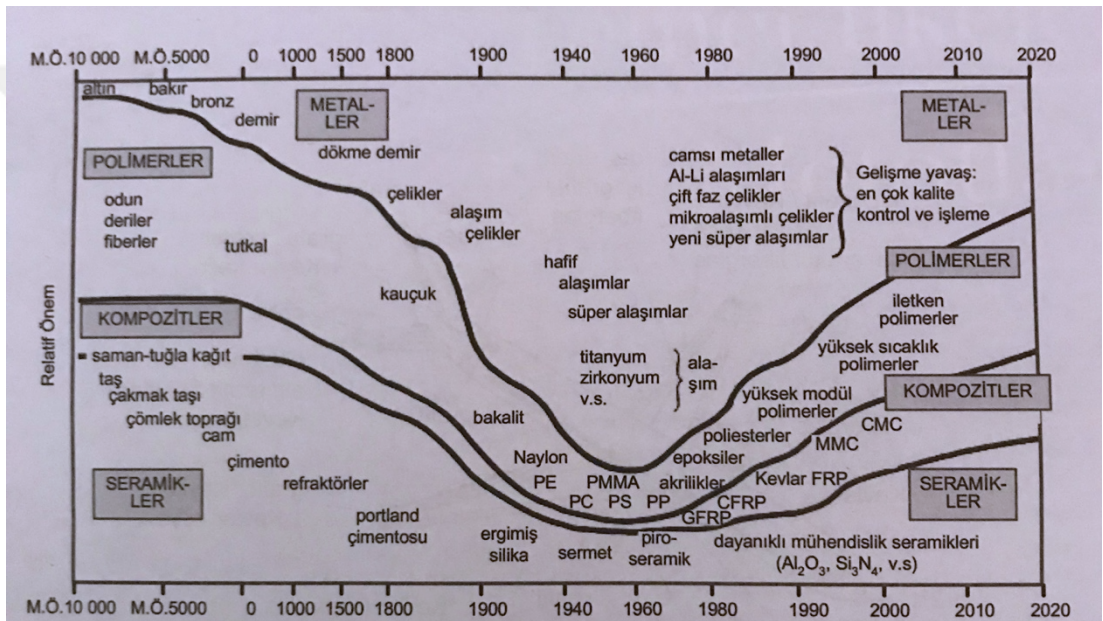
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskop
BSE	:	Geri Saçılımlı Elektron
SE	:	İkincil Elektron
XRD	:	X-ışını Kırınımı
CIP	:	Soğuk İzostatik Pres
PMK	:	Polimer Matrisli Kompozit
SMK	:	Seramik Matrisli Kompozit
MMK	:	Metal Matrisli Kompozit
atm	:	Atmosfer
FMJ	:	Tam Metal Ceket
rpm	:	1 dakika içerisindeki dönüş/devir hızı



1.KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, belirli amaca yönelik olarak en az iki farklı maddenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme bileşimidir. Bu bileşimdeki amaç, bileşenlerin hiçbirinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Farklı bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerinden daha iyi özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir.

Kompozit malzemeye, “Çok Bileşenli Malzeme, Çok Fazlı Malzeme, Donatılı Malzeme ve Pekiştirilmiş Malzeme” gibi isimler de verilmiştir. [1]



Şekil 1.1 Kompozit Malzeme Tarih Skalası (zaman skalası lineer değildir) [4]

Kompozitlerin gelişmesi 1940'lerde üç önemli etkenden dolayı hızlanmıştır. Birincisi, uçak, helikopter ve roketler gibi askeri araçlarda yüksek kuvvette ve hafif malzemelere olan talebin artması, ikinci neden hızla büyüyen polimer endüstrisinin çok çeşitli alanlarda gelişmesiyle farklı yapılarda, hafif ve yüksek mekanik özelliklere sahip malzeme talebinin meydana gelmesidir. Sonuncu ise çok yüksek kuvvetle bazı malzemelerin (cam fiber gibi) keşfedilmesi ve potansiyel güçlerin özellikle askeri amaçlı kullanılmasının incelenmesidir.

Kompozit malzemeler dört evrede irdelenmektedir.

- İlk evre (1940'lar): Cam fiber takviyeli kompozitler
- İkinci evre (1960'lar): Yüksek performanslı kompozitler
- Üçüncü evre (1970-1980'): Yeni Pazar araştırmaları ihtiyaçları
- Dördüncü evre (1990'lar): Hibrid malzemeler, nanokompozitler.

1783: İlk balon uğuruldu. Kompozit malzeme olarak keten fabrikler ve kâğıt (J.M. ve J.E. Montgolfier, 25 Nisan), ipek fabrikler ve kauçuk (J.A. Charles ve F.P. Rozier, 1 Aralık) kullanıldı.

1839: Doğal kauçuğun gum ve sülfürle vulkanizasyonuyla pnömatik lastik yapıldı (Charles Goodyear). 1887' de pnömatik bisiklet lastiği (John Boyd Dunlop, 1887) ve 1895'de pnömatik sökülebilir araba lastiği (A. & E. Michelin) yapıldı.

1839: Polistiren elde edildi (E.Simon)

1862: İlk plastikler kâğıt hamurundan elde edilen nitroselülozla üretildi.

1870: Nitroselüloz + kamfor (John Wesley Hyatt).

1872: Poli(vinil klorür) üretildi.

1878,1879: Ampulde kullanılan fiber üretildi: Filament, pamuk ipliğinin karbonizasyonuyla yapıldı (Joseph Wilson Swan, 1879). Filament olarak karbonize bambu kıymıkları kullanıldı (Thomas Alva Edison, 1879).

1884-89-98: Üre formaldehit üretildi. İlk yapay ipek fiber "Rayon", kâğıt hamurundan rejenere selülozik filamentler çekilerek üretildi (Hilaire de Chardonnet). Polikarbonat üretildi (A. Einhorn).

1903: İlk uçak yapıldı ve uğuruldu: Deneme uğuşları: Samuel P. Langley (7 Ekim, 8 Aralık), ilk uçağın başarıyla uğurulması: O. ve W. Wright (17 Aralık)

1907: Fenol formaldehit reçinesi üretildi (S. Smith). Bakalit elde edildi: fenol formaldehit + pamuk (Leo Baekeland).

1935: Polietilen (PE) üretildi (R.Gibson, E. Fawcette). Naylon; fiber yapılabilen poliamid keşfedildi (Wallace H. Carothers). (1943'de naylondan uçak lastiği yapıldı).

1938: Epoksi reçinelerin ilk patenti alındı (P.Castan). Epoksi + cam fiber kompozit yapıldı (C. Ellis).

1942: Fiberglas kayıklar üretildi (Ray Green). 1944'de ilk cam fiber takviyeli kompozit GFRP radar anteni yapıldı (TBM Avenger Torpede Bomber). 1953'de İlk GFRP araba kasası yapıldı (Chevrolet Corvette).

1959-69: Boron ve karbon fiberler üretildi. İlk boron fiber üretildi, C.P.Talley (1959). Grafit whisker yapıldı; mikroyapı kontrolüyle çok yüksek elastik modüllü karbon fiber elde edilebileceği ispatlandı, Roger Bacon (1960). Kömür katranından (zift) karbon fiber yapıldı, Sugio Otani (1963). Petrol ziftinden karbon fiber yapıldı, Leonard S. Singer (1965). Rayondan karbon fiber üretildi, R.Bacon (1969).

1969: İlk cam fiber takviyeli uçak; The Eagle AC-7

1970'ler: Karbon fiberler spor malzemeleri yapımında kullanılmaya başlanmıştır. Grafit tenis racketleri, golf sopaları v.s. gibi.

1990'lı yıllar: Uzay araçlarında metal matris kompozitler uygulanmaya başlandı. [2]

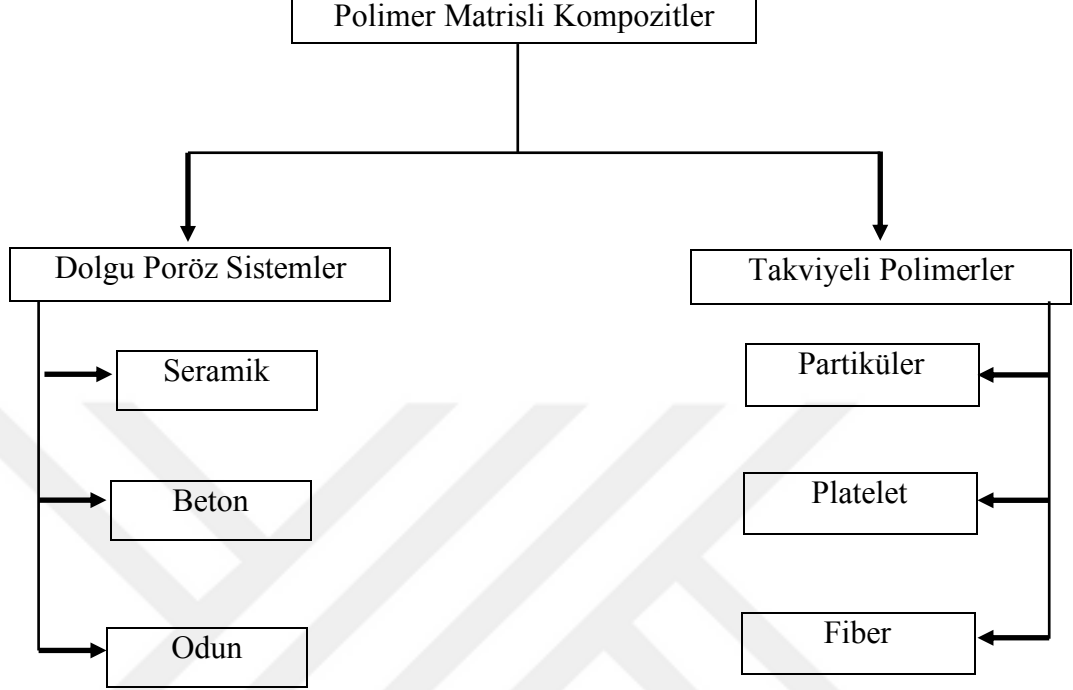
Kompozitler, istenilen uygulama alanına göre hazırlanabilen, mükemmel mekanik ve fiziksel özelliklere sahip çok fonksiyonlu malzemelerdir; birçoğu yüksek sıcaklıkta korozyon, oksidasyon ve aşınmaya dirençlidir. Bu özellikleriyle malzeme bilimine, takviyesiz malzemelerle mümkün olmayan geniş bir malzeme dizaynı alanı açmıştır. Kompozit teknolojisinin gelişmesiyle aynı zamanda, monolitik versiyonları mekanik ve termal şoklara karşı dayanıksız olan tüm kuvvetli malzemeler, seramikler, çeşitli alanlarda kullanılabilen önemli kompozit malzemelere evrilmiştir (askeri üniformalar, askeri zırhlar vb.). Kompozit malzemelerin diğer bir avantajı da üretim proseslerinin çoğunun büyük ve kompleks yapılara uygulanabilmesidir.

Katı malzemeler dört sınıfta toplanır; polimerler, metaller, seramikler ve karbon. Her sınıfın kendine özgü özellikleri olduğundan, kompozitler yönünden bu dört sınıftaki malzemeler hem "takviye" hem de "matris" malzemeleridir. Bu durum tek bir monolitik malzemenin sağlayamayacağı çok değerli özelliklerde sınırsız sayıda yeni malzemeler elde edilmesine imkân sağlamaktadır. [3]

1.1 Takviye Malzemesine Göre

1.1.1 Polimer Matrisli Kompozitler

Çizelge 1.1 Polimer bazlı kompozitlerin sınıflandırma sistemi



Kompozitteki ilk faz matristir: süreklidir ve esnek, dispers (takviye) fazı tutar ve uygulanan yükün dağıtılmasını sağlar, dispers faz genellikle matristen daha kuvvetlidir, matris içinde sürekli veya rastgele düzenlemelerde bulunmaktadır.

Polimer matrisli kompozitler matris olarak bir polimer reçine ve takviye ortamı olarak da fiberler ve/veya diğer takviye malzemeler içeren kompozitlerdir. Takviye faz ve matris arasındaki etkileşim kuvvetli kimyasal bağlardan zayıf sürtünme kuvvetlerine kadar farklı şekillerde olmaktadır. Arayüz olarak tanımlanan bu tür etkileşimler takviyelerin uygun malzemelerle kaplanarak kullanılmasıyla kontrol altında tutulmaktadır.

Polimer matrisli kompozitler, kompozit uygulamalarında en çok tercih edilen kompozit çeşididir; fabrikasyon prosesleri kolaydır. Gerilme kuvveti, sıklığı, kırılma ve çatlama dayanıklılığı yüksektir, aşınmaya delinmeye ve korozyona karşı dirençlidir. Pmk'lerin önemli dezavantajları termal dirençleri düşük ve termal genleşmelerinin yüksek olmasıdır. Yüksek performans fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler hafifliği, korozyona dirençleri, yorulmaya dayanıklılıkları ve kolay montaj edilebilmeleri gibi sebeplerle çok çeşitli alanlarda tercih edilen malzemelerdir.

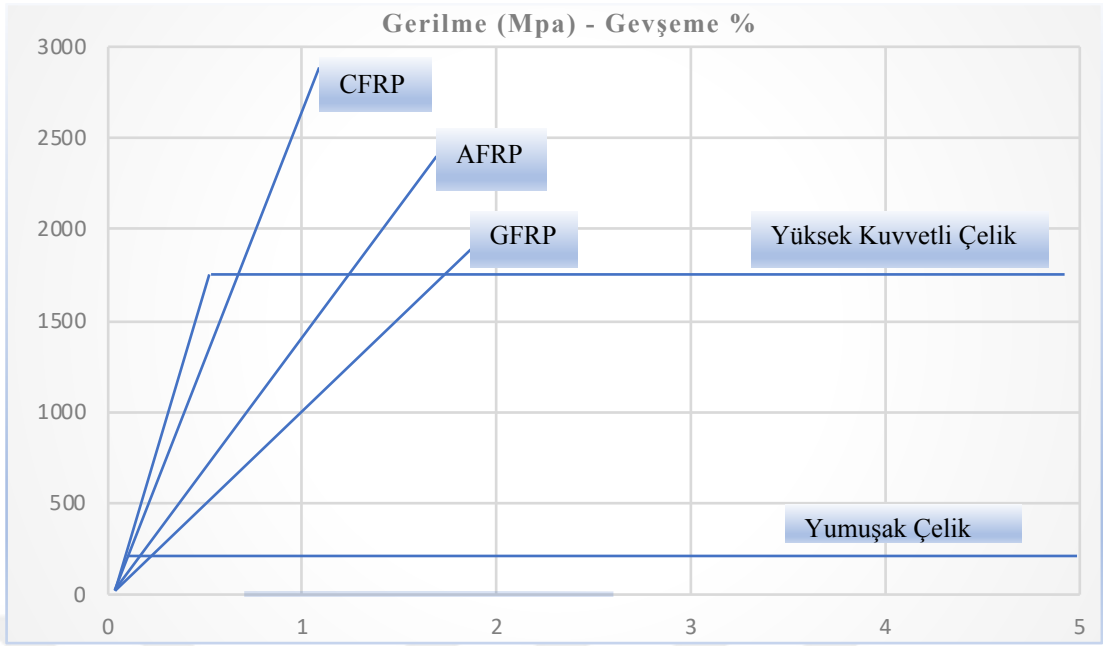
Kullanım alanları arasında uzay araçları, savunma endüstrisi ve uçak yapıları, elektronik paketlenme malzemeleri, medikal ekipmanlar ev gereçleri gibi çeşitli örnekler verilmektedir. [5]

En önemli polimerik kompozitler doğada mevcuttur; “doğal kompozitler” olarak adlandırılmaktadırlar; örneğin odun, lignin matriste selüloz fiberlerin yer aldığı doğal bir kompozittir. [6]

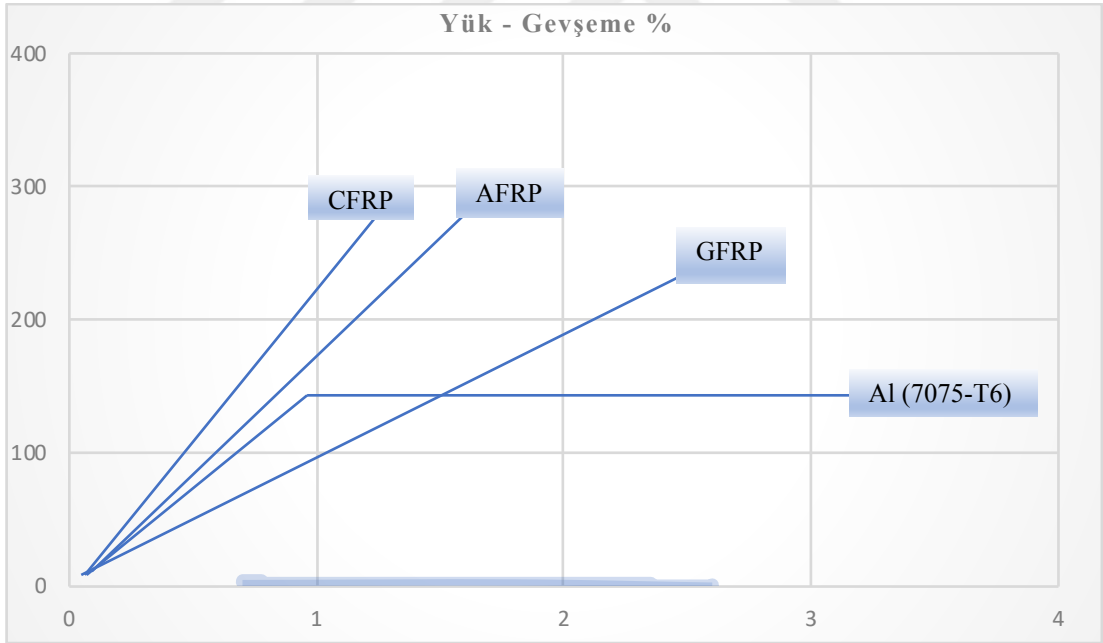
Takviye malzemesi partiküller, flaklar, fiberler veya laminatlar olabilir. Partiküller için tercih edilen herhangi bir yönlendirme yapılmaz, matris malzemelerin özelliklerini geliştirmesi ve/veya maliyeti düşürmesi üzerinde durulur; küresel, kübik, platelet veya düzgün veya düzensiz geometrik formlarda olmaktadır. Partikülata takviyelerinin boyutları her yönde yaklaşık olarak eşittir. Polimerlerin sıklığı, kuvveti ve kırılma dayanımı düşüktür. Bu özellikler mikro/nano-SiO₂, cam, Al₂O₃, Mg(OH)₂ ve CaCO₃ partiküller, karbon nanotüpler ve tabakalı silikatlar gibi organik partiküllerle takviyeleriyle artırılmaktadır. Teknolojik olarak en önemli polimer matris kompozitler, dispers fazın bir fiber formda olduğu kompozitlerdir. [7-8]

Fiber takviyeli PMK'ler içerdikleri takviye malzemelerine göre dört sınıfta bulunurlar;

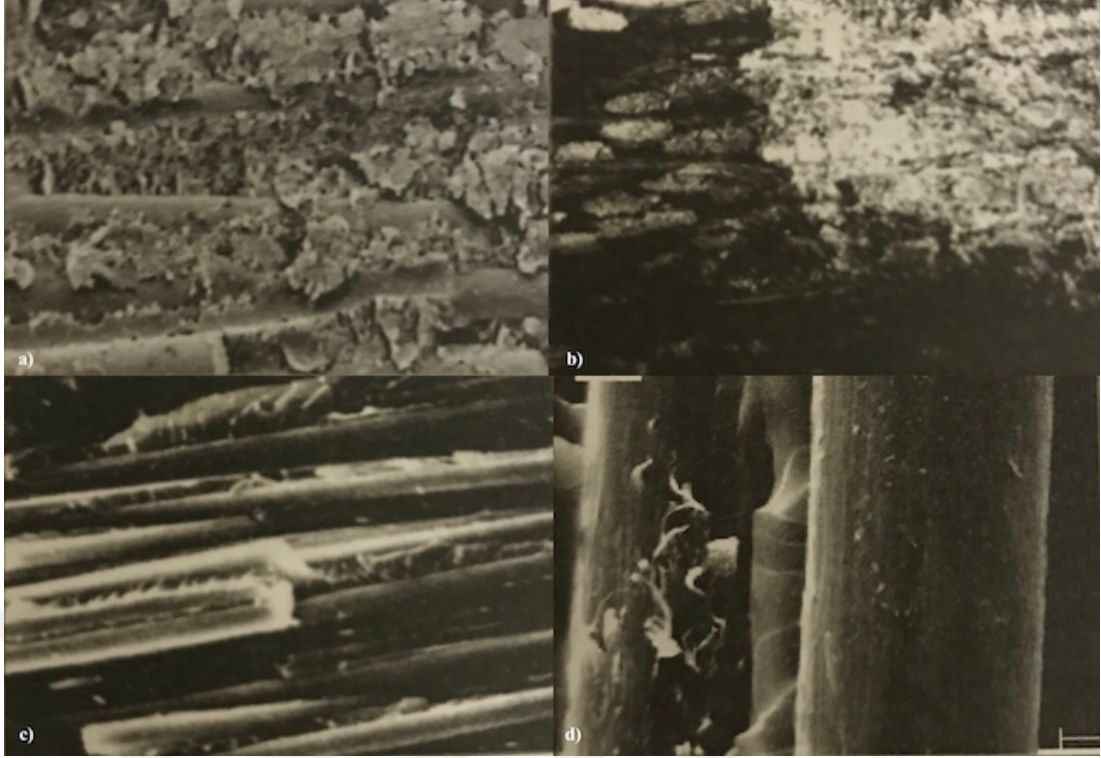
- Cam Fiber-Takviyeli Polimer Kompozitler (GFRP)
- Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler (CFRP)
- Aramid Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler (AFRP)
- Diğer Fiber Takviyeli Polimerler.



Şekil 1.2 Bazı CFRP, AFRP, GFRP ve yumuşak çeliğin gerilme-gevşeme eğrilerinin kıyaslanması



Şekil 1.3 Bazı CFRP, AFRP, GFRP ve Al yük-gevşeme eğrilerinin kıyaslanması

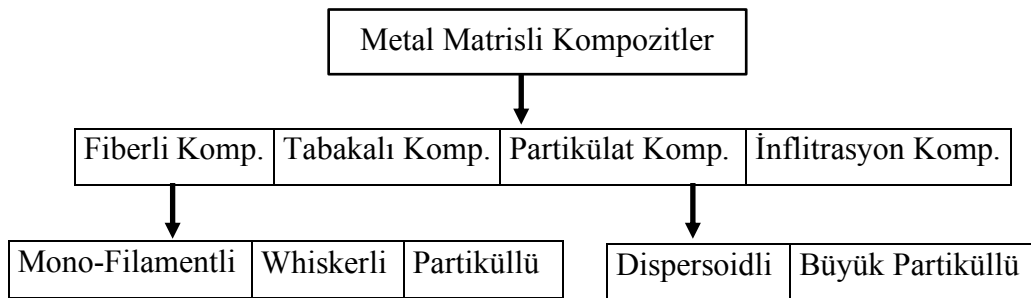


Şekil 1.4 Bazı GFRP, CFRP ve ARFP kompozitlerin SEM görüntüleri: a) GFRP (poliester matris), b) GFRP (Epoksi matris), c) CFRP (Epoksi matris), d) ARFP (Epoksi matris)

En çok kullanılan fiber takviyeli cam, karbon ve aramidlerdir. Diğer fiberler arasında, kullanımı sınırlı veya fazla yaygın olmayan ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiberlerle, boron, silisyum karbür ve alüminyum oksit fiberler sayılabilir. Şekil 1.2 ve şekil 1.3’ de CFRP, AFRP, GFRP kompozitlerin gerilme-gevşeme ve yük-gevşeme eğrilerinin çelik ve alüminyumla kıyaslanmaları, Şekil 1.4’ de aynı kompozitlerin SEM görüntüleri verilmektedir. [7-8]

1.1.2 Metal Matris Kompozitler

Çizelge 1.2 Metal Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması



Metal matrisli kompozitler, esneyebilen bir metal matris ile takviye malzemelerden oluşan kompozitlerdir: matris her zaman bir metal olarak tanımlansa da metaller ve hafif metal alaşımlarıdır. Metal matris kompozitlerin çalışma sıcaklıkları 200-800 °C dolaylarındadır; bu sebepten dolayı yüksek sıcaklık uygulamaları gerektiren ortamlara uygundur. Pek çok pmk' e kıyasla mmk' lerin mekanik özellikleri, transvers kuvveti ve sertliği, kayma ve sıkıştırma kuvveti daha fazladır; ayrıca, yüksek sıcaklığa uyumu polimer matrisli kompozitlerden daha yüksektir. Metal matrisli kompozitler önemli miktarda su absorblamazlar, alevlenmezler, elektrik ve ısıl iletkenlikleri iyidir. En önemli dezavantajları takviye malzemeyle kimyasal ve mekanik uyumluluğunun zayıflığı ve reçine matrislere kıyasla işleme koşullarının daha zor olmasıdır. [9]

	Kompozit türü	Tipik takviye malzemesi	Kullanım alanları
Alüminyum matris kompozitler	Partikülat	Al ₂ O ₃ veya SiC tanecikler	Otomotiv parçaları (piston, itici mil, fren komponentleri); hızlı trenlerde fren motoru, bisiklet, golf, elektronik malzemeler; yüksek voltaik elektrik kablo sistemlerinde.
	Uzun-fiber takviyeli	Al ₂ O ₃ , SiC, grafit, vs. sürekli fiberler	
	Kısa-fiber takviyeli	Süreksiz Al ₂ O ₃ fiberler	
Magnezyum matris kompozitler	Partikülat	SiC tanecikler	Yarış arabaları, hafif otomotiv fren sistemleri, uçak parçaları (dişli kutusu, transmisyon, kompresör ve motor).
Titanyum matris kompozitler	Partikülat	TiB ₂ ve TiC tanecikler	Bazı jet uçaklarının dişli sistemlerinde türbin motoru komponentleri (fan kanadı, piston, senkronizasyon segmanı, bağlantı parçası, şaft, disk), otomotiv motor komponentleri, sürücü parçalar, genel makine parçaları.
	Uzun-fiber takviyeli	Sürekli monofilament SiC fiberler	
Bakır matris kompozitler	Partikülat	SiC tanecikler	Hibrid modüller, elektronik röleler, elektrik iletici malzemeler ve diğer elektrik ve elektronik komponentler.
	Uzun-fiber takviyeli	Sürekli C fiberler, SiC, W, paslanmaz çelik 304	

Şekil 1.5 Bazı metal matrisli kompozitlerin tipik takviye malzemeleri ve kullanım alanları

Alüminyum, magnezyum, titanyum ve bakır gibi metallerin alaşımları matris olarak kullanılan süper alaşımlardır. Takviye malzemeler partiküller, sürekli ve süreksiz fiberler ve whiskerler olabilmektedir; bunlar, hacimce %10-60 arasında kullanılmaktadırlar. Bilindik sürekli fiberler karbon, silikon karbid, boron, alüminadır. Süreksiz fiberler genellikle silikon karbid whiskerler, kesilmiş fiberler (alümina ve karbon) ve partiküllerdir (SiC ve Al₂O₃). [10]

Sürekli fiberlerle takviyeli mmk'lerin pmk'lerden önemli bir avantajı, tek-yönlü transvers kuvvetin daha fazla olmasıdır; dolayısıyla mmk'lerde tek yönlü konfigürasyonların kullanılması tercih edilmektedir. Genellikle, kompozitlerin aksiyal modülleri, matris olarak kullanılan monolitik baz metallerinkinden çok daha yüksek, transvers kuvvetleri ise matris malzemelerden daha düşüktür.

Süreksiz fiber takviyeli mmk'lerin önemli kullanım alanlarından biri iç yanmalı motor bileşenleridir. Takviye fiberlerin (süreksiz alümina, alümine-silika, karbon fiberler gibi) malzemenin (alümina) aşınma direncini ve yüksek sıcaklıklardaki kuvvetini artırması ve yorulma özelliğini yükseltmesi istenmektedir. Aşınma direncinin yükseltilmesiyle mmk'ler, motor bloklarındaki dökme demir zıvanaların ve dökme demir piston segmanlarının yerini almıştır.

Partikül takviyeli metal matrisli kompozitler mühendislik uygulamalarında özellikle önemli bir kompozit sınıfıdır. Önemli bir örnek genellikle kesme aletleri ve kalıpların yapılmasında kullanılan, tungsten karbid partikül takviyeli kobalt matrisli bir metal matrisli kompozittir; bu kompozite çoğu kez sermet ya da sermentli karbid denilmektedir. Sermet kırılğan bir seramik malzeme olan monolitik tungsten karbiden çok daha yüksek kırılma dayanımına sahiptir. [10-11]

Matris-takviye sistemleri yüksek sıcaklıklarda reaktiftirler, dolayısıyla kompozit yüksek sıcaklıklarda işleme sırasında veya servis uygulamalarda bozulabilmektedir. Bu tür sorunlar takviyenin koruyucu bir malzemeyle kaplanmasıyla veya matris alaşım kompozisyonunun modifiye edilmesiyle çözülmektedir. [12]

1.1.3 Seramik Matris Kompozitler

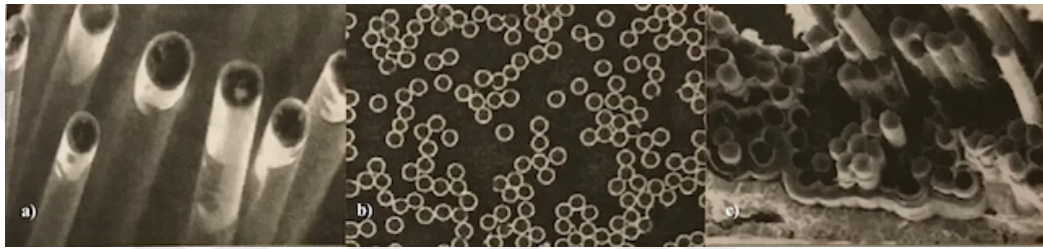
Çizelge 1.3 Smk'lerin takviye malzemelerine göre sınıflandırılması

Seramik Matris Kompozitler		
Fiber Takviyeli Smk'ler	Whisker Takviyeli Smk'ler	Partikül Takviyeli Smk'ler
Fiberler: SiC, C, ZrO ₂	Whiskerler: SiC, Si ₃ N ₄ , B ₄ C, ZrO ₂	Partiküller: SiC, ZrO ₂ , B ₄ C, BN, AlN, Al ₂ O ₃ , TiB ₂ , ZrB ₂
Matrisler: Si ₃ N ₄ , SiC, Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ .SiO ₂	Matrisler: Al ₂ O ₃ , Karbon, Al ₂ O ₃ . ZrO ₂ , Kordlerit, Mullit, Mullit.ZrO ₂ , Si ₃ N ₄ , ZrO ₂ ,	Matrisler: Al ₂ O ₃ , Si ₃ N ₄ , Silanol, YTZP.Mullit, SiC, Korderit, Y ₂ O ₃

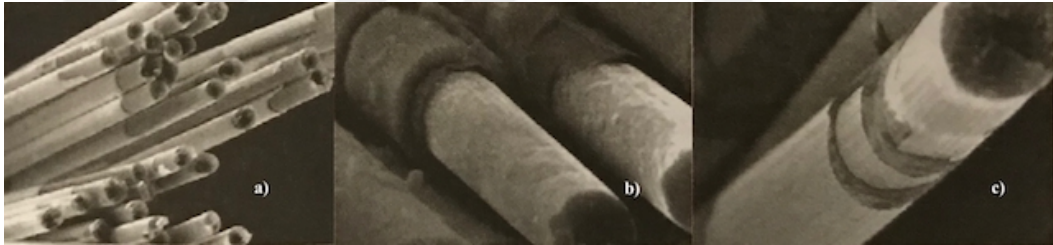
“Seramik” kelimesi geniş bir inorganik malzemeler grubunu kapsamaktadır; silika bazlı camlar, kristalin seramikler, intermetalikler ve karbon gibi. Bunların tümü yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapısal malzemelerdir. Kimyasal bağları genellikle bir kovalent hibrid ve iyoniktir; dolayısıyla ergime noktaları yüksek, kimyasal stabiliteleri yüksek, elastik modülleri yüksek ve atomik hareketlilikleri düşüktür. Bu özelliklerinin sonucu olarak çok serttirler ve kaymaya dirençlidirler, fakat kırılırlar. [13]

Genel olarak Kompozitteki fiber miktarının artması malzemenin kuvvetini ve çatlama dayanımını da yükseltmektedir. Kompozit, mevcut matris ile bu matrisin kuvvetini, sıklığını ve dayanıklılığını artıran bir veya daha fazla takviye malzemesinin oluşturduğu bir kombinasyondur. Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasına uygun olarak, bir smk, seramik matrisle takviye fazların oluşturduğu iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzemedir. SiC ve Si₃N₄ gibi seramik fiberlerle baz malzeme olarak polisilanlar tercih edilmektedir. Sürekli fiberler, kıyılmış (chopped) fiberler, whiskerler, plateletler veya partiküllerle takviye edilmiş seramik veya cam matrisli smk'ler, mühendislik yapısal malzemelerin üretimlerine uygun kompozitlerdir. Yüksek sıcaklık uygulamaları sınırlı olmasına karşın, askeri, uzay ve ticari alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Başka smk'ler de mevcuttur; örneğin nanokompozitler (reaktif tozlardan üretilmektedir) ve elektroseramikler gibi, smk'ler düşük yoğunluk, yüksek modül, yüksek kuvvet, yüksek dayanım ve yüksek sıcaklarda kuvvetini koruma özelliklerinin tümünü bünyesinde birleştirebilen nadir malzemelerdir. Smk'ların çoğunun korozyona ve erozyona dayanıklılıkları yüksektir. Seramikler genellikle yüksek derecede sıkı ve serttir, aşınmaya, korozyona ve

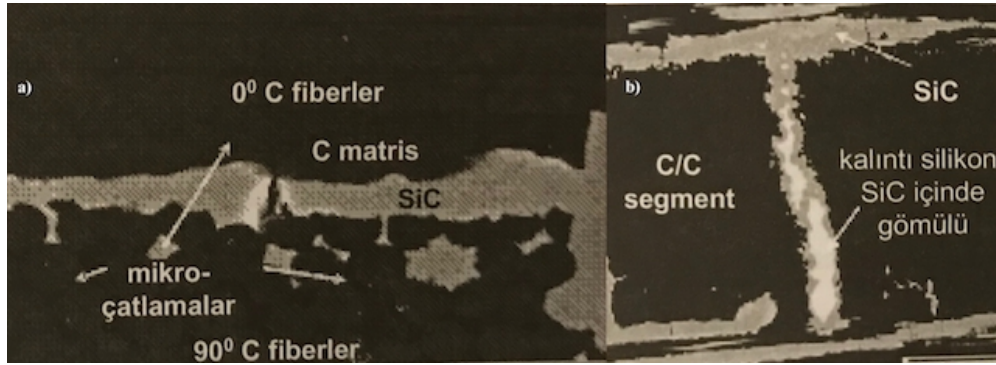
oksidasyona dayanıklıdır, yüksek sıcaklıklarda işlenebilir; ancak yüksek gerilme kuvveti uygulanan malzemelerde kullanımı sorunlar yaratabilmektedir. Seramiklerin çatlama dayanımı çok düşüktür, dolayısıyla minik çatlamalara ve hasarlara karşı çok hassastır; büyük gerilimlerde dağılır, termal ve mekanik şoklara direnç gösterememektedir. Örneğin; betonda, takviye çubuklar çelikten veya polimer matris kompozitlerden yapılarak bu olumsuzluk azaltılmaktadır. Seramik matris kompozitlerde seramik matrislerin fiber, whiskerler ve partiküllerin birleşmesiyle matrisin çatlama dayanımı yükselir, kuvvet dağılımı azalır, termal ve mekanik şoklara karşı direnç artar. Çatlama direncindeki en yüksek sonuç sürekli fiber takviye malzemelerle elde edilmektedir. [14]



Şekil 1.6 Fiber kaplamaların SEM görüntüleri; a) SiC fiberler: ZrO_2 arayüz kaplamalı, b) Karbon fiberler: ZrO_2 arayüz kaplamalı(kesit), c) ZrO_2 arayüz kaplamalı smk' de çekilme (pull-out)



Şekil 1.7 Fiber kaplamaların SEM görüntüleri; a) Karbon fiberler: HfN arayüz kaplamalı, b) Karbon fiberler: $ZrO_2/HfO_2/HfN$ çok-tabakalı arayüz kaplamalı, c) Karbon fiberler: ZrO_2/HfO_2 çok-tabakalı arayüz kaplamalı



Şekil 1.8 Farklı arayüz içeren C/SiC kompozitler (fiber kaplama yok); a) 2D C/SiC Kompozit: Üç farklı arafazlı kompozit: CF-SiC, Si-SiC ve CF-CM, b) 2D C/SiC Kompozit: Zayıf arayüzler boyunca çatlamanın yayılması.

Matris ve takviye fiberler arasındaki etkileşim nedeniyle bir seramik kompozitin dayanıklılığı, monolitik haldeki matris malzemeye kıyasla, daha yüksektir. Bu etki, matris-fiber arayüzdeki kırma-sapmasının bir sonucudur; matris boyunca ilerleyen bir çatlama fibere ulaştığında, arayüzdeki zayıf bağlanma nedeniyle kaydırılır ve fiberin çatlama önlenir ve fiberler kırılan matrise köprü kurmaktadır. Kırma-sapması mekanizmasının etkisi matris-fiber bağlanma kuvvetine bağlıdır. Bağlanma kuvveti çok büyükse fiberler matris içinde kayamaz ve kırılmaktadır.

Seramik matris kompozitlerin üretiminde kullanılan infiltrasyon proseslerinin çoğunda matris ve fiberler arasındaki bağlar kuvvetlidir; bunun nedeni malzemeler arasındaki kimyasal etkileşimler veya malzemelerin birbirleri içine difüzyon etkileridir. Debonding etkisinin oluşabilmesi için fiberler ve matris bir arayüz ile birbirlerinden ayrılır ve etkileşimleri önlenir. Herhangi bir fiber takviyeli smk sisteminde, ultraviyole ile aktiflendirilmiş kimyasal buhar depozisyon yöntemiyle oksitler, nitridler ve karbidlerden tek veya çok tabakalı fiber arayüz kaplamaları yapılabilir (Şekil 1.6-1.7-1.8). Ultraviyole ışık, konvensiyonel ısı kaynağına kıyasla kimyasal reaksiyonların aktivitesini artırmaktadır. [15-16]

1.2 Takviye Yapısına Göre

1.2.1 Hibrid kompozitler

Hibrid malzemelerin geçmişi tam olarak tanımlanmasa da eski dünyada organik ve inorganik komponentlerin karışımlarının varlığı bilinmektedir. Tarihsel kalıntılar binlerce yıl öncesinde inorganik pigmentler ve diğer inorganik ve organik komponentlerden hazırlanan boyaların kullanıldığını göstermektedir. Yani, hibrid malzemeler ve hatta nanoteknoloji, 20. yüzyılın sonu ile 21. yüzyılın başlarında geliştirilmeye başlanan bir buluş olmaktan çok, yüzyıllardır var olan teknolojiler denilmektedir. Bilim adamlarının bu konulara eğilmeleri özellikle yeni fiziko-kimyasal karakterizasyon metotlarının devreye girmesiyle başlamıştır.

Hirbid malzemeler moleküler boyutlarda organik ve inorganik komponentlerden oluşmaktadır. Malzeme bilimcilerin olası hibrid yapılara odaklanması, geçmişine bakıldığında, biyomineralizasyon çalışmalarıyla başlamıştır; böylece, “biyomimetizm” olarak adlandırılan yeni bir dizayn belirlemiştir.

Yumuşakça kabukları, kemikler, odun, canlı organizmalar tarafından yapılan pek çok malzemedeki organik ve inorganik komponentleri bir arada bulunmaktadır. Biyolojik makromoleküller protein ve mineral fazların her seviyedeki (nano skaladan başlayarak

makroskopik skalaya kadar) özel bir kompozittir. Örneğin sedef, organik protein tabakalarla kalsiyum karbonat kristal tabakalardan oluşan bir sandviç malzemedir. Kemikte kallojen fiberler matris fazdır; takviye malzeme ise küçük, çubuk şeklindeki hidroksiapatit $[Ca_{10}(HPO_4)_6(OH)_2]$ kalsiyum fosfat bazlı inorganik bir maddedir. Burada doğa, küçük boyutlardaki takviye fazların matrisle ilişkisini gösteren bir model sunmuştur. Mmk'ler ve smk'ler çoğu kez küçük takviye fazlar (SiC gibi) içeren mimetik dizaynlardır. [17]

Organik polimerlerde dolgu malzeme olarak inorganik malzemeler kullanılırken inorganik ve organik malzemeler karışımları uygulamaya alınmıştır. İnorganik-organik hibridlerin üretimi kolay olduğundan malzeme kimyasının çeşitli dallarında uygulanır. Birbirlerine benzemeyen malzemelerin herhangi bir kombinasyonu bir hibrid olarak düşünülebilir. Klasik bir örnek bir metal veya balpeteği veya sert bir plastik köpüğün, bazı yüksek performans FRP ince kabuklara bağlanmasıyla elde edilen yapısal kararlılığı sağlamaktadır. Diğer bir örnek olarak fiber takviyeli reçine laminantlarla alüminyum levhaların kombinasyonudur. [18]

Pozitif ve negatif hibrid etkisi, hibrid karışma kuralından pozitif veya negatif sapma olarak tanımlanır. Hibrid etkisi terimi genellikle iki veya daha fazla tipte fiber içeren bir kompozitin özelliklerinde gözlenen sinerjetik bir gelişme için kullanılmaktadır.

Karışım Kuralı: Bir kompozitin içerdiği matris ve dispers fazın hacim ağırlığı ortalamasına bağlı olarak özelliğini değerlendirme metodudur. Değerlendirme de yoğunluk, termal genişleme katsayısı, elastik modülü, kayma modülü, poisson's oranı ve gerilme kuvveti testleri dikkate alınır (yoğunluk dışındaki ölçmeler boylamasına veya fiber boyunca ve enlemesine veya fibere dik yönde yapılmaktadır). Fiberlerin etkinliğinin, izogerilim altında kompozitin modülünü yükseltmede çok az olduğunu gösteren eşitlik de "ters ve düz karışma" kuralı olarak tanımlanmaktadır.

Düz:

$$E = (E_m \times V_m) + (E_f \times V_f) \quad [1.1]$$

Ters:

$$E = \frac{E_m \times E_f}{(V_m \times E_f) + (V_f \times E_m)} \quad [1.2]$$

Sinertejik kuvvetlendirme: Hibrid kuvveti karışma kuralının dışına çıkar ve genellikle “sinerjestik kuvvetleme” olarak tanımlanmaktadır.

Böyle bir durumda örneğin:

- Yüksek modüllü fiberlerin düşük gevşeme, düşük modüllü fiberlerin yüksek gevşeme göstermelerine karşın, hibrid de bir araya geldiklerinde çökmedeki gevşeme değerleri birbirleriyle kıyaslanabilir seviyelere ulaşmaktadır.
- Düşük uzamalı fiberlerin çökme gevşemesi yükseltilebilir; bunun için tek tek oluşan kritik fiber kırıklar kompozit içinde düzgün olarak dağıtılarak izole edilmektedir. [19]

Bir hibrid malzeme, moleküler skalada karıştırılmış iki parça içeren bir malzemedir. Genellikle bunlardan biri inorganik, diğeri organik yapıdadır. İnorganik ve organik kısımların bağlanmasındaki olası etkileşimlere göre hibrid malzemeler iki grup altında toplanır;

- Sınıf I Hibrid Malzemeler: İki faz arasında zayıf etkileşimler bulunur; Van derWaals, hidrojen bağları veya zayıf elektrostatik etkileşimler.
- Sınıf II Hibrid Malzemeler: Komponentler arasında kuvvetli kimyasal bağların olduğu hibrid malzemelerdir.

İnorganik ve organik bloklar arasında kuvvetli etkileşimler olmaması durumunda “blend’ler” (harman ve karışım oluşmaktadır). Tipik bir örnek olarak organik polimerlerle inorganik kümeler veya partiküller arasındaki kuvvetli (kovalent) etkileşim verilebilir. Bir organik ve organik ağ yapının kuvvetli kimyasal etkileşim olmaksızın ilişkilenebilmesi “interpenetrating ağ yapı (IPN)” olarak tanımlanmaktadır. Örneğin, bir organik polimerde bir sol-jel malzemenin oluşturulması. Bu iki örnekte de sınıf I hibridlere girmektedir, sınıf II hibridler farklı inorganik yapı malzemelerinin (kümeler gibi) organik polimerlere kovalent bağlarla bağlanmasıyla veya organik polimerlerin birbirleriyle kovalent bağlar oluşturmasıyla oluşmaktadır. [20]

1.2.2 Taneli kompozitler

Kompozit malzemenin önemli bir grubunu “taneli kompozit malzeme” oluşturmaktadır. “Tanelerle donatılı kompozit malzeme” diye de adlandırılan bu kompozit grubu, özellikle yapı alanında ayrı bir öneme sahiptir. Günümüzde, başta yapı sektörü olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılan ve vazgeçilmez bir öneme sahip olan beton ve özel türleri, taneli kompozitlerin çok önemli bir grubunu

oluşturmaktadır. Hatta, geniş anlamıyla beton malzeme adı, taneli kompozitleri tanımlamaktadır. Taneli kompozit malzeme, çeşitli kaynaklardan elde edilen parçaların, bunları bağlayıcı nitelikte ki bir malzeme içinde dağılı olarak yer aldıkları malzeme grubudur. Burada, taneler dağılı fazı, bağlayıcı ise matris malzemesini oluşturmaktadır. Bağlayıcı fazı oluşturan matris malzemesi için “sürekli faz” da denilmektedir. Taneli kompozitlerin üretiminde kullanılan “taneli malzeme”, karışımın yapısı içinde homojen dağılı olarak yer aldığı varsayılan “dağılı fazı” oluşturmaktadır. Taneli malzemeyi meydana getiren tanelerin ortalama boyutları birbirine yakın olabileceği gibi, genellikle karşılaşıldığı üzere, taneler farklı büyüklüklerde de olabilmektedir. Bir bağlayıcı ile bir araya getirilerek, bütünü oluşturan bu malzemelere “agrega” adı verilmektedir. Taneli kompozitler çeşitli tanelerin bir bağlayıcı ile bağlanarak bir arada tutulduğu aglomere niteliğindedir. Bu oluşum içinde, genellikle sert taneler, sünek bir matris malzemesi bağlanarak, bir araya getirilmekte ve malzeme üretilmektedir. Bu tür malzemeye örnek olarak, çimento ve agrega ile yapılmış çeşitli özelliklere sahip betonlar, polimer bağlayıcı ile agrega karışımları, kırmataş ile asfalt karışımları, doğal hafif agrega ile alçı hamuru karışımları gibi malzemeler verilebilir. [21]

Tanelerle donatılmış olan kompozit malzemedede, kullanılan tane çapı genelde $1\mu\text{m}$ 'den daha büyüktür ve genellikle milimetre ile anılmaktadır. Taneciklerle güçlendirilmiş olan kompozitlerde ise tanecik boyutu çok daha küçük olup, $0.01-0.1\mu\text{m}$ arasında değişmektedir. Bu gruba giren kompozit malzemedede, dağılı fazın hacim oranı, toplam hacme genelde %25 ve üstünde değerler almaktadır. [22]

Taneciklerle güçlendirilmiş kompozitlerde matris malzemesinin asıl yük taşıyıcı faz olmasına ve dağılı taneciklerin genelde dolaylı yollardan, örneğin dislokasyonların hareketini engelleyerek matrisin dayanımını artırmasına, dolayısıyla daha güçlü bir kompozit elde edilmesine karşılık, tanelerle donatılı kompozitlerde matris malzemesi genelde yardımcı yük taşıyıcı niteliğindedir ve dağılı fazı oluşturan taneler matrisin şekil değiştirmesini engellerler. Buna örnek olarak, karayollarının kaplanmasında kullanılan asfalt verilebilir. Viskoz ve düşük mukavemetli bir petrol ürünü olan asfaltın sert ve kırılğan nitelikte sahip kırmataş agrega ile bir araya getirilmesiyle yapılan yol kaplama malzemesi, hem matris malzemesinden gelen süne klik özelliğini taşımaktadır, hem de kullanım yeri ve amacı yönünden yeterli mukavemete sahip olmaktadır. [23]

Taneli kompozit malzemede, yük altında dağılı fazda etkili olan gerilmenin üst düzeyi (σ_p) için genelde $\sigma_p \leq \sigma_{pu}$ şeklinde bir sınır verilebilir. Taneciklerle güçlendirilmiş olan kompozitlerde, dağılı fazda meydana gelen en yüksek gerilme düzeyi (σ_p), bu fazı oluşturan taneciklerin kırılma gerilmesinin (σ_{pu}) çok altında kalmaktadır ($\sigma_p \ll \sigma_{pu}$). Yine benzer şekilde, karışım sonunda elde edilen kompozit malzemenin akma sınırı gerilmesinin matrisi oluşturan malzemenin akma sınırı gerilmesi oranı ($\sigma_{c,a} / \sigma_{m,a}$), taneli kompozitlerde 2-25 değerleri arasında bulunurken, taneciklerle güçlendirilmiş olan kompozit malzemelerde aynı değer genelde daha düşük, 2-15 mertebesinde kalmaktadır. Burada, $\sigma_{c,a}$ kompozitin, $\sigma_{m,a}$ ise matrisin akma sınırındaki gerilmeleri ifade etmektedir. Taneli kompozitlerin ana maddeleri, çok çeşitli kaynaklardan elde edilen, karışım üretiminde kullanılacak niteliklere sahip olan parçacıklar ve bağlayıcılardır. Ayrıca, üretilmesi hedeflenen kompozitin mekanik özelliklerinin kontrol edilebilmesi amacıyla, karışımlarda zaman zaman katkı maddeleri de kullanılabilir. [24]

1.2.3 Lifli kompozitler

Liflerle donatılı kompozitler, kompozit malzemelerin önemli bir grubunu oluşturmaktadır. Bilindiği gibi, her malzeme çeşitli olumlu ve olumsuz özellikleri bir arada sahiptir. Tasarımcı ve üretici, amaçlarına uygun malzemeyi seçerken oluşturulan malzemeler arasında, niteliklere her yönüyle değerlendirerek, içinde bulunulan koşullar altında en uygun olan malzemeyi seçmeyi hedeflemektedir. Kompozit malzeme üretimi mevcut temel malzemelerin olumsuz yanlarının iyileştirilmesi ve böylelikle kullanım alanının genişletilmesi, çok yönlü kullanımın sağlanması yönünde önemli bir adımı oluşturmaktadır. Değişik malzemelerin liflerle donatılarak çeşitli özelliklerini iyileştirmeye yönelik çalışmaların teorik yönüyle ele alınışının epeyce yeni olmasına karşın, ilk uygulamaların çok eskilere dayandığı bilinmektedir. Alçı hamurunda bitkisel lifler ile at kuyruğu ve yelesi gibi hayvansal liflerin, kılların kullanılması, asbest lifleri gibi inorganik malzeme kullanılarak çimento bağlayıcılı malzemelerin donatılması vb.

Malzemenin liflerle donatılması, öncelikle mekanik dayanımları daha iyi olan kompozit malzeme üretmeye yöneliktir. Malzemeler, özellikle çekme, eğilme ve çarpma dayanımları gibi mekanik dayanımlarının iyileştirilmesi, gevrek kırılma özelliğinin kısmen giderilmesi amacıyla lifler, teller, çubuklar veya değişik yapıda

örgü malzemeye donatılmaktadır. Liflerle donatılı kompozit malzeme de en basit haliyle iki fazlı bir kompozit olarak ele alınabilir. Kompozitin sürekli fazını, lifleri bir arada tutan ve kompozit içindeki hacim oranının yüksekliği nedeniyle kompozitin ana bileşeni olarak da düşünebileceğimiz matris malzemesi oluşturmaktadır. Bu matris içinde, donatı olarak kullanılan malzeme ikinci bir fazdır. Donatının etkinliği, donatı malzemesinin E-modülünün matrisin E-modülünden çok daha yüksek olmasına bağlıdır. Matrisin ve lif fazının E-modülü değerlerinin birbirine yakın olması halinde, lif fazı taşınmaya yeterince katılamamakta ve dolayısıyla kompozit amaçlanan özelliklere sahip olamamaktadır. Lifli kompozitlerde lifin taşınmaya katılabilmesi için matris üzerindeki mekanik etkinin life iletilmesi gerekmektedir. Burada lifle matris arasında herhangi bir kimyasal bağ yoktur ve iletim kayma kuvvetiyle olmaktadır. Dolayısıyla lifle matris arasında, meydana gelebilecek kayma gerilmelerine dayanabilecek düzeyde bir aderansın bulunması gerekmektedir. Ayrıca, fazlar arasında kimyasal etkileşimin olmaması ve yine fazların ısı genişmesi değerlerinin kompozitin yapısını bozacak düzeyde farklılık taşımaması da muhtemeldir. Lifli kompozitlerde özellikle çekme, eğilme, çarpma dayanımlarında önemli artışlar olmaktadır. Dolayısıyla bu tip kompozit malzemede, sözü edilen çekme, eğilme gibi gerilmelerin birim ağırlığa oranı da diğer malzemelere göre çok daha yüksektir bu sebeple savunma endüstrisinde çok fazla tercih edilmemektedir. [25]

Lifli kompozitler, fazların hacim oranları ve dağılımı açısından taneli kompozitlerden önemli farklılıklar göstermektedir. Taneli kompozitlerde sürekli fazı oluşturan matris içerisinde parçalı malzeme dağılı faz olarak yer alır ve genellikle kompozitin yapısı içerisinde bu dağılı faz önemli bir yer tutmaktadır. Taneli kompozitlere göre bir diğer fark, bağlanan fazın matris içindeki boyutu ve konumuyla ilgilidir. Taneli malzemede dağılı faz, üç boyutu birbirine yakın parçalar şeklinde olmaktadır. Boyutları, çeşitli nedenlerle üstten sınırlanmaktadır. Örneğin, genelde binalarda betonarmede kullanılan en büyük tane 31,5 mm'lik elekten geçen gruptur. Buna karşılık, lifli kompozitlerin üretiminde kullanılan liflerin boyları çok farklı olabilmektedir. Kompozitte, belirli boyda lifler kullanıldığı gibi, gereksinime ve koşullara bağlı olarak donatım, kompoziti tümüyle kateden sürekli lifler de yapılabilmektedir. [21-23]

Liflerle donatılı kompozit malzeme, matrisin ve lif fazının özelliklerine bağlı olarak;

- Sünek matrisli ve kırılğan lifli kompozitler,
- Kırılğan matrisli ve sünek lifli kompozitler,

şeklinde, iki ana başlık altında ele alınmaktadır.

Sünek matrisli ve kırılğan matrisli kompozitler: Bu kompozit türünde malzemenin matris fazını epoksi, polyester, fenolik reçine, melamin reçinesi gibi organik maddeler oluşturmaktadır. Bu kompozitlerde, matris malzemesine oranla daha kırılğan özellikler taşıyan cam ve seramik esaslı lifler, asbest lifleri, yüksek dayanımlı çelik teller kullanılır. Donatıda kullanılan lifin hacm oranı diğer gruba göre daha yüksek olup, %20-80 arasında değişmektedir. Bu tip sünek matrisli ve kırılğan lifli kompozitlere örnek olarak, yaygın üretimi ve çok yönlü kullanımı olan cam lifi donatılı polyester reçinesi gösterilebilmektedir. Bu malzeme bizim ülkemizde ve dilimizde uzun yıllar, sadece donatıyı belirterek “Fiberglass” adıyla anılmıştır, günümüzde “cam takviyeli plastik” (CTP) adı yaygınlaşmıştır.

Kırılğan matrisli ve sünek lifli kompozitler: Bu tür kompozitin matris fazını tamamen organik değil inorganik (çimento, alçı vb.) bağlayıcılar kullanılarak da üretilmektedir. İhtiyaca göre bazı organik esaslı lifler kullanılmakla birlikte, metal ve cam liflerinin kullanımı da yaygındır. Kırılğan matrisli bu kompozitlerde, kullanılan donatının hacim oranı sünek matrisli kompozitlerin çok daha altında kalmaktadır. Spesifik uygulamalar dışında, cam, metal ve bitkisel esaslı lifler için bu oran %0,5-5,0 arasında değişmektedir. [26]

1.2.4 Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozit malzemeler, değişik özelliklere sahip birden çok malzemenin bir yapıştırıcıyla birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Bu tür kompozitler, “Lamine Kompozit Malzeme” şeklinde de isimlendirilmektedir. Çeşitli tabakaların birbirlerine yapıştırılmaları şeklinde üretimin bir sonucu olarak, tabakalı kompozit malzemeler, yapısal nitelikleri bakımından diğer kompozit malzeme türlerinden farklılık göstermektedir. Diğer kompozit malzeme türlerinde, taneli kompozitlerde ve lifli kompozitlerde yapılan sürekli faz ve dağılı faz veya matris ve faz gibi niteleme ve ayırmalar, tabakalı malzeme için aynı anlamda genelde kullanılmaktadır.

Tabakalı kompozit malzemeler, çeşitli yönlerden farklılıklar gösteren tabakaların bir araya getirilmesiyle üretilmektedir. Bu farklılık mukavemet-darbe dayanımı (savunma endüstrisi), yük altında dayanç, ısı iletimi, gözeneklilik, ağırlık, yüzey sertliği, korozyon veya diğer dış etkilere karşı direnç gösterme gibi çok çeşitli yönlerden olabilmektedir. Tabakalı kompozitlerde genelde kompoziti oluşturan farklı özelliklere sahip tabakalardan her biri, kompoziti iki yönden kat etmektedir. Bu tabakalar, herhangi bir teknikle veya yapıştırıcıyla bir araya getirilmektedir. Tabakalı

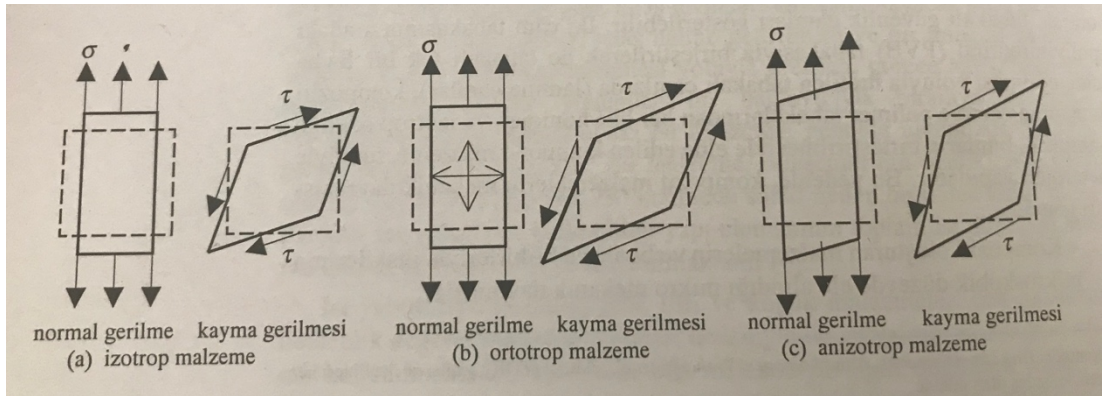
kompozitler en az iki tabakadan oluşurlar. Ancak, dayanım ve mekanik özelliklerin özellikle önem taşıdığı ve kompozitin tabakaların düzlemindeki birbirine dik iki ayrı doğrultusunda birbirine yakın özelliklerin beklendiği hallerde, malzemenin hedeflenen bu özelliklere sahip olabilmesi için en az üç veya daha fazla tabaka kullanılmaktadır. Bu tabakaları oluşturan malzemeler farklı olabileceği gibi aynı tür malzemeden de yapılabilmektedir. Doğal olarak, kompozitin üretiminde kullanılacak malzemenin seçimi, hedeflenen özelliklere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Örneğin, personel koruyucu zırh olması öngörülen malzemede, kişiyi hayati yaralanmadan koruması, mermiye karşı mukavim olması gibi beklenen özelliklerin sağlanabilmesi için yapıya eklenecek tabakaların seramik-metal-polimer malzeme seçimine ve mekanik özelliklerine göre belirlenip uygulanması, yangına dayanıklı olması öngörülen malzemede, yanmayı geciktirici ve ısı iletimini kısıtlayıcı seramik tabakanın, ısıl direncin önemli olduğu hallerde ısı iletkenliği düşük, yalıtım özelliği olan malzeme tabakalarının sisteme eklenmesi gibi uygulamalar kimya endüstrisinde, savunma sanayinde vb. alanlarda yapılmaktadır.[3-5]

Kompozit malzemelerin mekanik davranışları diğer birçok malzemeye uymamaktadır, uygulamada kullanılan malzemelerin birçoğu homojen ve izotrop özellikler göstermektedir. Buna karşılık kompozit malzemeler genelde heterojen ve anizotrop yapıya sahiptirler. Heterojen malzemede, malzemenin özellikleri bir noktadan başka bir noktaya geçildiğinde değişir. Buna benzer şekilde, anizotrop bir malzemede de özellikler, bir noktada değişen doğrultuya göre farklılık gösterir. Bu değişim, birbirine dik üç düzlemde yer alan veya üç doğrultuya göre farklılık gösterir. Bu değişim, birbirine dik üç düzlemde yer alan veya üç doğrultudaki özellikler olarak ele alınabilir. Uygulama da kullanılan birçok kompozit malzeme, yapıları bakımından heterojen niteliğe sahiptirler. Bu özellikteki bir kompozit malzemeye örnek olarak, bina ve personel koruyucu olması adına savunma endüstrisinde kullanılan tabakalı güvenlik camları (kurşun geçirmez cam) gösterilmektedir. İki cam tabakasının aradaki polivinilbutiral (PVB) tabakasıyla birleştirilerek üç tabakalı tek bir levha elde edilmesi yoluyla üretilen tabakalı camlarda (lamine camlar), kompoziti oluşturan cam ve polimer tabakalarından her biri homojen ve izotrop özelliğe sahipken, bunların birleştirilmesiyle elde edilen kompozit malzeme, tümüyle heterojen yapıdadır. Bu nedenle, kompozit malzemelerin mekanik davranışları genelde,

- Kompoziti oluşturan malzemelerin ve bunların birbirleriyle ilişkilerinin mikroskobik düzeyde ele alındığı mikro mekanik davranışlar,

- Kompozit malzemeden kaynaklanan ortalama özelliklerin bir bütün olarak ele alınarak değerlendirildiği makro mekanik davranışlar olarak iki ayrı başlık altında incelenmektedir.

Malzemelerin izotrop veya anizotrop oluşuna göre mekanik davranışları farklı özellikler gösterir. Uygulamada, anizotrop malzemelerin birçoğu genel olarak ortotrop özellikler göstermektedir. İzotrop malzemeler, yapılarında herhangi bir yöne göre değişiklik olmayan malzemelerdir. Normal gerilme altında, Hooke Yasası sınırları içinde, şekil 1.9' daki gibi şekil değişimi göstermektedirler. Bu malzemelerin bünyelerinde kayma gerilmeleri meydana gelmesi halinde, malzemede açı değişikliği görülmektedir. Ortotrop malzemelerde, birbirine dik doğrultulardaki malzeme özellikleri farklılık gösterir. Yüklemin asal malzeme doğrultusunda olması halinde, malzeme üzerinde etkili olan kuvvetin yönüne bağlı olarak uzama veya kısılma şeklinde kendini gösteren, izotrop hale benzer bir şekil değişikliği meydana gelir. Kayma halinde ise, malzemenin yönlere göre zaten farklı olan poisson oranlarından (ν_1, ν_2) ve elastisite modüllerinden (E_1, E_2) bağımsız bir açı değişikliği görülmektedir. Anizotrop malzemelerde, normal gerilme doğrultusu, asal malzeme doğrultularıyla çakışmamaktadır. Bu durumda, normal gerilme altında hem boyutsal deformasyon hem de açisal değişiklik meydana gelir. Aynı durum, basit kayma etkisi altında da görülmektedir.



Şekil 1.9 İzotrop, ortotrop ve anizotrop malzemelerde gerilmeye bağlı davranışlar

Kompoziti oluşturacak tabakaların bir araya getirilmesi işlemi sırasında, tabakaların farklı özellikler gösteren yönleri istendiği gibi düzenlenebilir. Örneğin, beş adet tabaka içeren bir kompozitte tabakalar, genellikle yapıldığı gibi özelliklerine göre birbirleriyle 90° açı yapacak şekilde, orta tabakaya göre simetrik olarak

düzenlenebileceği gibi, gereksinime göre asimetrik olarak da düzenlenebilir. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde, her bir tabakanın mekanik özellikleri dikkate alınarak, kompozitin maruz kalacağı öngörülen etkiye göre tabaka düzenlemesi yapılabilir. Bu durumda gereksinim görülen yönlerde tabakalar yerleştirilmektedir. Örneğin bir yönden daha fazla dayanım gerektiren beş tabakalı bir kompozitin malzemenin üretiminde, beş tabakadan üçü daha fazla gerilme doğacak olan yöne, diğer ikisinde buna dik getirilmektedir. Tabakalı kompozit malzemelerle ilgili bir diğer konu, tabakalar arasında meydana gelebilen kesme gerilmeleridir. Özellikle farklı özelliklere sahip tabakaların bir araya getirilmesi yoluyla üretilen kompozitlerde bu konu önem taşımaktadır. Ancak, bu durum sadece farklı özelliklere sahip katmanların bir araya getirilmesi sonucunda meydana gelmemektedir. Yönlere göre farklı özellikler gösteren malzemelerden yapılan tabakalı kompozitlerde de bir yöndeki gerilme altında farklı yönlerdeki tabakaların farklı davranış göstermeleri nedeniyle benzeri durumlar ortaya çıkabilmektedir. Tabakalı kompozitlerde, yukarı belirtilen nedenlerle ortaya çıkan tabakalar arası kesme gerilmesi, kompozitin kenarında en yüksek düzeyine ulaşmaktadır. Bunun sonucu olarak, aslında zaten kompozitin görece zayıf bir bölgesi olan bu kısımda tabakaların birbirlerinden ayrıldıkları gözlemlenmektedir. Öte yandan, tabakalı kompozitlerde, dış etkiler sonucunda ortaya çıkan enine doğrultudaki normal gerilmeler de belirli bir düzeyden sonra tabakalar arası ayrışmaya neden olabilmektedir. [3,20,27]

2. BALİSTİK BİLİMİ

Balistik bilimi (yunanca, atmak), mermi ve füzelerin hareketlerini inceleyen bir bilim dalıdır. Üç alt başlıkta incelenmektedir;

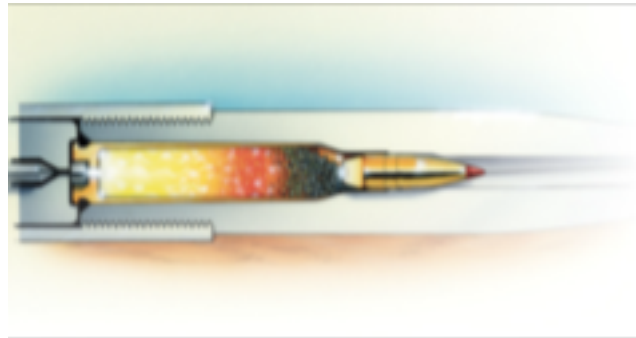
1. İç balistik
2. Dış balistik
3. Terminal (hedef) balistik.

Bu başlıklar haricinde ihtiyaca göre kriminoloji ve bazı suç takip birimlerine başka spesifik alt başlıkları da barındırmaktadır.

Özetle tarihsel gelişimi;

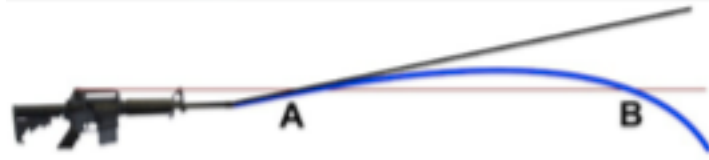
- İlk balistik çalışmalar 19.yy'ın ikinci çeyreğine dayanmaktadır, silahların çeşitlendirilmesi yapılmıştır.
- 20.yy' da bu bilim, mermi çekirdekleri ve mermi kapsüllerinin silahlara montajlanması ve hangi silahtan ateşlendiğinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.
- 20.yy'ın ikinci çeyreğinin başlarında Amerika Birleşik Devleti'nde ilk defa kıyaslama mikroskobu kullanılmasıyla mermi kapsüllerinin ayırt edilmesi gerçekleştirilmiştir ve hala günümüzde de kullanılmaktadır. [28]

İç balistik: Mermi veya füzenin namlu ağzını terk edinceye kadar olan davranışları inceleyen balistik türüdür.



Şekil 2.1 Namlu içindeki merminin ateşlenme anı [29]

Dış balistik: Merminin veya mühimmatın namlu ağzını terk ettikten sonra düşünceye kadar merminin izlediği yolu etkileyen faktörleri inceler.



Şekil 2.2 Mermi yolu [29]

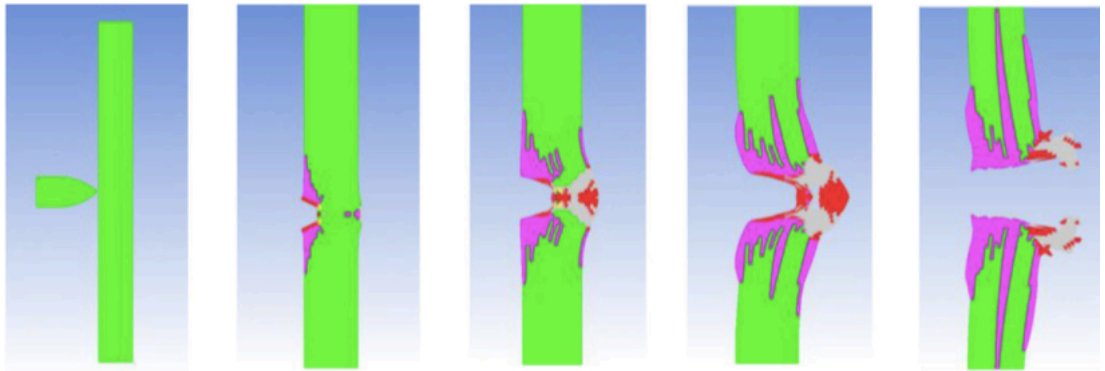
Terminal balistik: Merminin hedef üzerindeki veya hedefin mermi üzerindeki etkisini inceler.



Şekil 2.3 Mühimmatın hedefteki penetrasyonun termal takibi [29]

3. LİTERATÜR TARAMASI

Aswani Kumar Bandaru ve arkadaşları Kevlar® 29 iplikleri, 2D düz dokuma (2D-P), 3D ortogonal (3D-O) ve 3D açılı kenetlenme (3D-A) olmak üzere üç farklı mimari ile kumaş almak üzere dokumuşlardır. Kompozit zırh paneli, yukarıdaki üç tür kumaş ile takviye edilmiş PP matris ile vakumlu destekli sıkıştırma kalıplama makinesi kullanılarak imal edilmiştir. Bu çalışmadaki birinci hedef, 9 mm'lik bir FMJ mermisi ile çarpıldığında, Kevlar® / MAg-PP (K-MPP) kompozit zırh panellerinde, balistik test standardı NIJ-STD-0106.01 Tip IIIA'ya göre delinme kabiliyetleri için balistik darbe deneyi yapmaktır. İkinci hedef ise kumaş mimarisinin K-MPP laminatlarının balistik darbe tepkisi üzerindeki etkisini incelemektir. Balistik test, 39 ° C sıcaklık ve %78 nem' de Hindistan, Punjab Kapurthala yakınlarındaki ordu kampında gerçekleştirildi. Yapılan test sonucunda, üç zırh paneli arasında mermi, 3D-O ve 3D-A kumaşlı zırh panellerine nüfuz etmedi. Bununla birlikte, 2D-P kumaşlara sahip zırh panellerinde tam delikler gözlemlendi. 2D-P zırh panelleri üzerindeki etki testleri, yapraklanma, kesme tıkanması, matris kırma, uçak içi arıza ve elyaf kırma gibi bazı arıza modlarını ortaya çıkarmaktadır. Bu laminatlarda, 350 m/s ile 376 m/s arasındaki hızlarda deney sonuçları, merminin kısmen nüfuz ettiğini, yani zırhın içinde kaldığını gösterdi. Bu hızın ötesinde, tüm atışlar tam delme gösterdi.

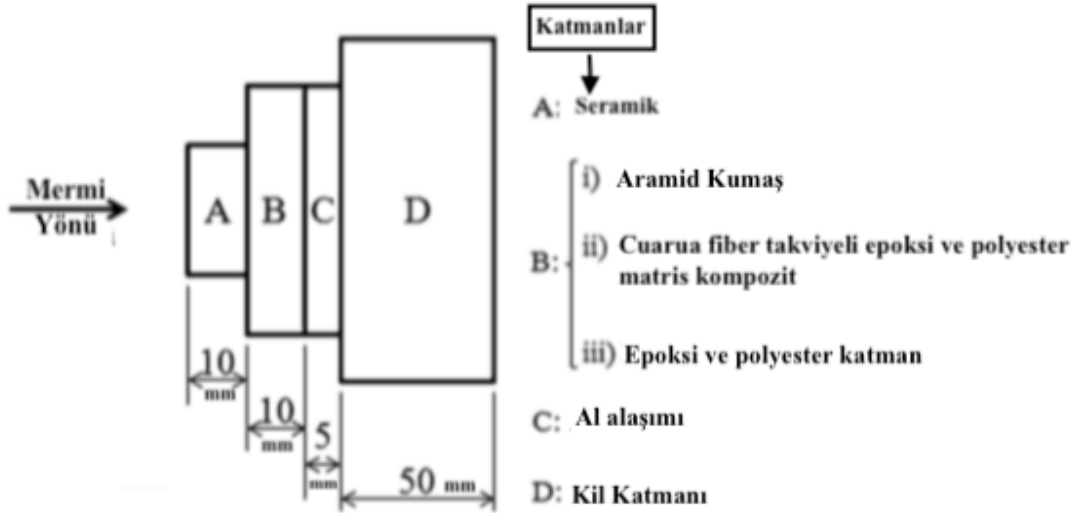


Şekil 3.1 400 m/s hızdaki merminin hedefte oluşturduğu hasar yayılımının simülasyonu [30]

O'Masta M.R. ve arkadaşları UHMWPE takviyeli kompozitlerin çapraz katlı levhalarda penetrasyon mekanizmalarını incelemiştir. İki katmanlı UHMWPE Dyneema® sınıfı (DSM, Hollanda) kullanılarak elde edilen HB50 ve BT10 tabakalarıyla çalışmışlardır. HB50 sınıf tabakalar, kompozitin ağırlıkça %17' sini oluşturan bir kauçuk modifiyeli reçinede 60 mm kalınlığında tek yönlü dereceli SK76

Dyneema® elyafının bir [0 ° / 90 °] çapraz katman biriktirmesini içermektedir. BT10 bant, 100 mm genişliğinde 42 mm kalınlığında UHMPE katı-hal bant şeritlerinden oluşmaktadır. Şeritler, 200 mm'lik bir periyodikle örülmüş düz dokumadır. Çekme testleri, 50 MPa'lık kavrama basıncı altında bir [0 ° / 90 °] kumaş kullanıldı ve nominal çekme gerinim oranı $10^{-3} s^{-1}$ 'de yüklendi; HB50 1,7 GPa – BT10 1,2GPa gerilme mukavemetine sahip olduğu ancak BT10 3,5 MPa- HB50 0,35 MPa laminant kayma mukavemetine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Balistik sonuçları ise “Chesapeake testing” yöntemi kullanılarak yapmışlardır. Çapı 12,7 mm ve ağırlıkça 8,4 g olan sertleştirilmiş çelik küre, hedefleri normal olarak (0 ° eğiklik) ve merkezi olarak etkilemiştir, 6mm kalınlığındaki balistik hedefler; dokuz katman HB50 ve sekiz katman BT10 laminantlarda katman başarısızlıkları $t = 3 \mu s$ 'de başlayıp hedefler 299 m/s hızlarda delinmişlerdir. [31]

Monteiro S. N. ve arkadaşları doğal cuarua fiber destekli çok katmanlı zırh sistemi (MAS) yapmışlardır. Bu çalışmada seramik, aramid kumaş veya curaua fiber kompozit ve alüminyum tabakalardan oluşan zırhların balistik performansı, bir insan vücudunu taklit eden modelleme kilindeki penetrasyon (iz/çukur) açısından araştırmışlardır.

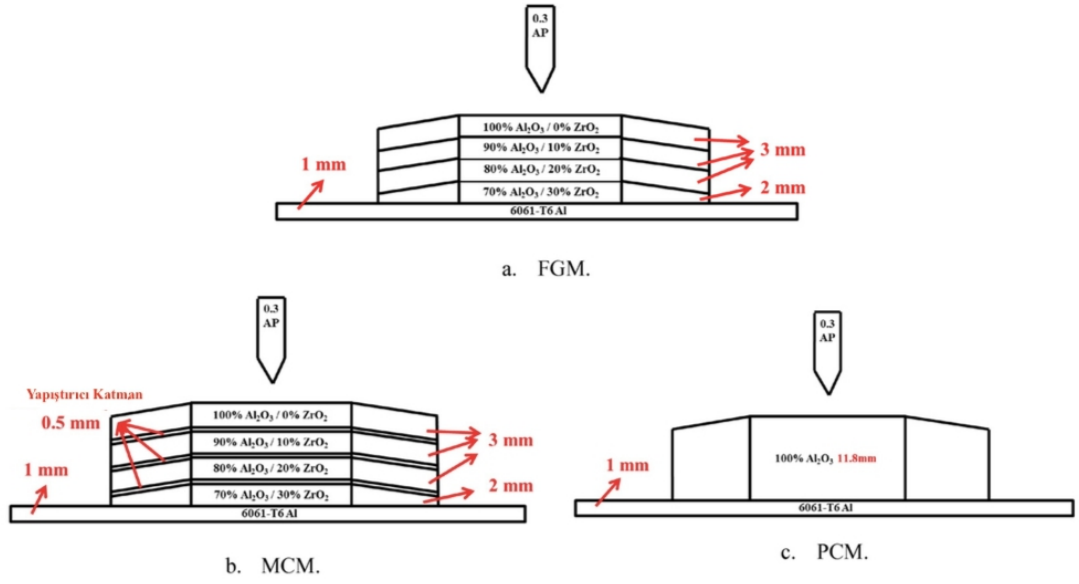


Şekil 3.2 Çok katmanlı zırhın (MAS) şematik diyagramı [32]

Seramik katman 31 mm yan boyuta sahip ve darbelere dayanıklı Al_2O_3 katkılı Nb_2O_5 den yapılmış 10 mm altıgen levhadır. Alaşım katmanı 5052-H34 alüminyum alaşımıdır. Son kil katmanına insan vücudu şekli vermişlerdir bunda ki amaç insan bedeni için en etkin sonucu elde etmektir. Balistik testler Rio de Janeiro, Marambaia

yarımadasındaki CAEX Brezilya Ordusu atış poligonu tesisinde yapmışlardır. MAS hedefinin her farklı türü için 10 test gerçekleştirmişler ve sonuçlar “Weibull” istatistik metodu kullanılarak analiz etmişlerdir. Tüm testler NIJ (NIJ 0101.03 ve NIJ 0101.04) standartlarına göre 7,62 9x51mm’lik NATO askeri mühimmat kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. MAS ‘lerde yapılan tüm balistik testler hedefteki perforasyonu sağlamamıştır. Sonuç olarak mermi daima durduruldu modelleme kilindeki girintisiyle çok katmanlı zırh içinde kinetik enerjisi dağılmıştır. Aramid elyaflarının daha mukavemetli ve dayanımlı olmasına rağmen, ön MAS seramik tabakalarının parçalanmasından kaynaklanan parçaları yakalama kapasitesi, curaua kompozitlerine göre daha kötü veya benzerdir. Seramik, aramid kumaş ve curaua epoksi kompozitinin bireysel balistik testleri, Al_2O_3 seramik karonunun 7,62 mermi darbe enerjisinin yaklaşık 55 katı kısmını, curaua / epoksi kompozitin ise 3 kat, aramid kumaşın ise 1,7 kat yayılım gösterdiğini ortaya koymuştur. Balistik performansın beklediği gibi, aramid kumaş ayrı ayrı en düşük enerji dağılımını sunmuştur. Bu, keskin sivri merminin kumaş örgü iplikleri arasına kolayca nüfuz etmesinden kaynaklanıyor olabilir. Bir insan vücudu taklit eden bir girinti tarafından, %30 hacim curaua lif ile (curaua / epoksi kompozit) takviyeli epoksi matris kompozitinin balistik performansı ikinci MAS tabakası olarak aramid kumaştan daha iyi bulunmuştur. [32]

Chin-Yu Huang ve Yu-Liang Chen Al_2O_3 ve ZrO_2 işlevsel dereceli malzemelerle üretilen (FGM-MCM-PCM) kompozitlerin tasarım ve etki dayanım analizleri yapmışlardır. Al_2O_3 ve 3 mol % Y_2O_3 -stabilize zirkonya (3YSZ) kullanıldı; Al_2O_3 ’ün termal genleşme katsayısı $8,6 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ve 3YSZ’nin $10,1 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ’ dir. Al_2O_3 parçacık boyutu $44 \mu m$ ’ye ve 3YSZ parçacık boyutu $17,9 \mu m$ ’ye öğütüldü ve $1550^{\circ}C$ sinterleme sıcaklığında 4 katmanlı (100, 90, 80, 70 vol. %) Al_2O_3 / (0, 10, 20, 30 vol. %) ZrO_2 FGM’si yapmak için toz metalürjisi sinterlemesi kullanıldı her bir seramik katmanın göreceli yoğunluğu %99,4-%99,8’tir. Al_2O_3 ve ZrO_2 seramiklerinin seçilmesinde ki sebep; katmanlarında oluşabilecek gerilme konsantrasyonu ve kırılmanın önüne geçebilmek için benzer genleşme katsayısı ve benzer sinterleme şartlarına sahip olmalarıdır. Balistik test için sırt plakası olarak $200mm \times 200mm \times 1mm$ ölçülerinde 6061-T6 Al plaka kullanıldı katmanlama işlemi için epoksi reçine kullanıldı ve işlevsel fonksiyonlu malzeme (FGM), çok katmanlı seramik kompozit malzeme (MCM) ve saf seramik kompozit malzeme (PCM) olmak üzere altıgen şeklinde üç işlevsel malzeme üretildi.



Şekil 3.3 İşlevsel dereceli malzemelerin balistik test örneği [33]

Balistik testler için 0,30” zırh delici ve 0,30” AP mermi profili kullanılarak NIJ seviye IV standartlarında yapıldı. Yapılan deney sonucunda ortalama 259m/s hızda FGM 3349J, 573 m/s hızda MCM 2047J, 288 m/s hızda PCM 3108J enerji absorblamıştır. FGM hem eşit bölgesel yoğunluk hemde eşit kalınlık içeren durumlarda optimal balistik dirence sahip olduğunu göstermiştir. Yapıştırıcı etkisinden dolayı enerji soğurmada MCM düşük kabiliyet gösterdi. [33]

Ögel B. ve arkadaşları alüminyum destek malzemesi, yapışkan türü, laminasyon tipi mekanik özelliklerin $Al_2O_3/Al2024$ tabakalı kompozit zırhların 7,62 x 51mm mermilerine karşı balistik performansı üzerine etkisini araştırmışlardır. 50x50mm boyutu ve farklı kalınlıkları (4, 6, 8 ve 10mm) olan %99 saflıktaki alümina seramik ön katman olarak kullanıldı. Tabakaları birbirine bağlamak için ticari olarak uygun epoksi ve poliüretan yapıştırıcıları kullanıldı. Al2024 alaşımlı plakaları yapay yaşlandırma yaparak mekanik özellikleri artırıldı. Bölgesel yoğunlukla, arka plakanın sertliği göz önüne alınarak epoksi ve poliüretan ile birleştirerek 15 gruplu (R1-R15) bir plaka serisi üretildi. 15m mesafeden 805 ± 15 m/s hızı ölçülen 7,62x51mm m61 tipi AP mermisi kullanılarak balistik laboratuvarında balistik testler yapıldı. Al2024-T6 kullanılan örnek grupları (R1 R2 R3) 7,62 mm AP mermisine karşı Al2024-O’lü örneklerden (R4 R5 R6) daha yüksek balistik direnç gösterdi. Alümina ve alüminyumun katman sırasının bölgesel yoğunluğu etkili bir şekilde kullanmada önemli bir tasarım parametresi olduğu görüldü. İki alüminyum katman arasında orta katman olarak

kullanılan alümina kompozitlerin balistik direnci azaldı çünkü mermi ince alüminyum katmanı yendi ve kalınlığının azalmasından dolayı arka katmanın balistik direncini azalttı. Bu sebepten dolayı arka katman büyük deformasyon bölgesine sebep olan darbe basıncı ile karşı karşıya kaldı. Alümina/alüminyum kalınlık oranı ayrıca kompozitlerin balistik davranışını etkiledi. R13, R14 ve R15 örneklerinin balistik performansı sırayla hem R1, R2, R3 hem de R10, R11 ve R12 örneklerinden çok düşüktü. R13, R14 ve R15 grupları için kullanılan ince alüminyum arka plakadan dolayı (~3mm) mermi etkisinden ötürü oluşan yüksek basınca direnç gösteremedi. 51 kg/m₂ (R1 ve R10 örnek grupları) ve 67 kg/m₂ (R2 ve R11 örnek grupları) bölgesel yoğunluk için kompozit zırhların balistik performansı gösterdi ki 1-3 arasında kalınlık oranı memnun edici sonuçlar verdi. İki farklı yapıştırıcı kullanılan kompozitlerde ki yapıştırıcılar balistik dirence etki etmemesine rağmen hem epoksi bağlı seramik fayans hem de seramik ve alüminyum katmanda bağ kopması meydana gelirken poliüretan yapıştırıcıda bağ kopması sadece merminin vurduğu seramik fayans etrafında bulundu. Dolayısıyla, poliüretan kullanımı mermin etkisi durumunda meydana gelen dalgaları absorblamada daha etkili olduğu görüldü çünkü sünekliği üstündü. Epoksinin poliüretandan daha yüksek dayanımı olmasına rağmen neredeyse herhangi bir plastik deformasyon göstermeden çatladı. [34]

Demir T. ve arkadaşları 7075 ve 5083 alüminyum alaşımların ve HSLA çeliği, AISI 4140 'ın 7,62 mm zırh delici mermilere karşındaki balistik davranışlarını incelemişler. Yuvarlak numuneler için $\varnothing = 70\text{mm}$, kare numuneler 70x70mm boyutlarında ve 55,70,85,100 ve 115 kg/m²' lik 5 farklı bölgesel yoğunlukta 8 örnek (1A-1B-1C-1D-2A-3A-3B-3C) hazırlamışlardır. Çelik numuneler 860°C' de östenitleme yapıldı ve su verildi burada ki amaç tamamen martenzitik yapı oluşturmaktır. Alüminyum alaşımları da T651 yaşlandırma ve T7351 aşırı yaşlandırma işlemi yapılarak istenen mekanik özellikleri elde etmişler. Balistik testleri 7,62x51mm M61 AP tipi mermi kullanılarak yapıldı. 1A-1B-1D-2A-3A örnekleri başarısız oldu, 3B örnek grupları bölgesel yoğunluğun $\geq 85\text{ kg/m}_2$ olduğu yerlerde tatmin edicidir oysaki 3C örnekleri $\geq 100\text{ kg/m}_2$ olduğu bölgelerde tam balistik koruma sağladı. Çelik örnek grupları arasında en iyi performans yaklaşık 53HRC sertliğe sahip olan 1C için bulundu, AP mermisine başarılı bir şekilde dayandı ve tam balistik performansı sürdürdü. Sertlik 60 HRC ye çıktığında, bölgesel yoğunluğa bağlı olarak örnekler birkaç parçaya kırıldı.

Araştırılan materyaller boyunca en iyi performans 7075-T651 alüminyum alaşımından elde edildi. [35]

Yu-Liang Chen ve Chin-Yu Huang FGM'nin uygun mekanik özellikler gösterdiğini doğrulamak ve FGM oluşturmak, sertlik, kırılma tokluğu ve darbe direnç kapasitesini analiz etmek için Al_2O_3 ve ZrO_2 kullandılar. Al_2O_3 ve 3YSZ'nin parçacık boyutlarını sırasıyla 20 ve 50,4 μm artırmak için sprey granülasyon tekniği kullanıldı. 2mm eninde 15mm çapında 11 ve 4 katmanlı FGM levha üretmek için Al_2O_3 ve ZrO_2 'ün çeşitli oranlarda oluşan levhaları basınçsız sinterleme yöntemiyle ürettir. 6061-T6 (200mmx200mmx1mm) arka plaka olarak kullanıldı ve epoksi reçinesi arka plaka ve seramik arasında yapıştırıcı olarak kullanıldı. Balistik testler için, A 0,3 zırh delici mermi kullanıldı ve test prosedürü National Institute of Justice (NIJ) seviye IV standartlarında yapıldı. Sonuçlar 90% Al_2O_3 -10% ZrO_2 non-FGM'nin 15,12 GPa'lık yüksek sertlik ortaya koyduğunu gösterdi ki bu 100% Al_2O_3 örneğinden çok da düşük değildi çünkü 1550°C'lik sinterleme şartları yüksek bağıl yoğunluklu (99.4%) ve düşük poroziteli (0,11%) örnekleri oluşturmaya olanak sağladı. 100% Al_2O_3 örneğinin bağıl yoğunluğu 98.8%'dir. Kalan örneklerde, sertlik artan ZrO_2 oranıyla azaldı, 30% Al_2O_3 -70% ZrO_2 non-FGM düşük bağıl yoğunluğunu (98.5%) sürdürdü ve sertlik değeri 80% ZrO_2 örneğinden daha azdı. Sonuçlar 50% Al_2O_3 -50% ZrO_2 non-FGM'nin 4,7 $MPa \cdot m^{0.5}$ lik yüksek kırılma tokluğu sergilediğini gösterdi. Ayrıca, Al_2O_3 - ZrO_2 non-FGM'si çatlak yönü sapması sergiledi çünkü Al_2O_3 ve ZrO_2 farklı termal genişleme katsayısı, çatlak yönü değişmesine sebep olan kalıntı gerilmeler oluşumu gösterdi. FGM yapı tasarımı iç katmanlardaki çatlak oluşumunu azaltabilir ve her seramik katmanın mermiyi aşındırma etkisini arttırabilir, böylece darbe direnç kapasitesi artar. FGM seramik konik oluşumunu geciktirebilir ve dairesel ve çevresel çatlak büyümesini durdurabilir böylece seramiğin mermiyi aşındırma etkisi artar ve arka plakanın deformasyonu sadece seramik koniden dolayı oluşur. FGM'lerin katman sayısının artması seramik koni ve çatlak oluşumun gecikmesine olanak sağladı ve seramik koni hacminin artışı merminin ilerlemesini engelledi. 11 katmanlı FGM yapısı %30-70 ZrO_2 örneğinin kırılma tokluğunun artmasına olanak sağlar. Bu, komşu seramik katmanların nasıl genişlediğini açıklayabilir ki bu seramiğin yoğunluğunun artması ile sonuçlanır. [36]

Ahmadi H. ve arkadaşları ince alüminyum katmanlardan ve cam takviyeli epoksilerden oluşan 2/1 (GLARE) hibrit kompozitin darbe direncini araştırmışlar. GLARE örnekleri 2024-T3 alüminyum katmanlarından, tek yönlü e-cam ve epoksi reçineden, oluşan numuneler el koyma yöntemiyle üretildi. Darbe testi helyum gazlı gaz silahı ile gerçekleştirilmiştir. Gaz silahı 50 bar kapasiteli basınç tankı, yüksek hız sarmal bobin vanası ve 2,5m uzunluklu paslanmaz çelik bidondan oluşmaktadır. Varilin iç çapı 8,7mm, mermi 14g ağırlıkta silindir ve yaklaşık 30mm boyundadır. Farklı kalınlığa sahip bazı 2/1 GLARE levhalarının yüksek hız darbe direnci testine göre g/e katmanları arasında geniş çaplı bir yapraklanma oluştu fakat alüminyum ve g/e katmanlarının bağlarının bozulması görülmemiştir. Geçmişteki çalışmalarda dış alüminyum katmanda yayılmanın olabileceği çatlak yönünde bir ağız birliği olmamasına rağmen, bu çalışmada arka alüminyum levhanın çatlak büyümesi son g/e levhanın fiber yönüne karşılık gelmiştir. Arka alüminyum levhanın yüksek hız darbesindeki yapraklanma şekli kare gibidir; merminin başına hemen hemen eşittir. Darbe enerjisinin veya panel kalınlığının artması daha büyük yapraklanmaya sebep olur fakat şekli değişmemektedir. Analitik sonuçlar enerji absorblama mekanizmasının büyük kısmının alüminyum levhaların genel deformasyonu olduğunu göstermiştir. Ayrıca, daha ince panellerde panel bükülmesinin membran gerilmesinden daha fazla etkisi olduğu görülmüştür. [37]

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Giriş

Bu çalışmada sıvı faz sinterleme yöntemi kullanılarak elde edilen sinter seramiklerin alüminyum ile çok katmanlı tabakalı kompozit üretimi, balistik uyumlulukları ve üretilen kompozitlerin karakterizasyonu üzerine çalışılmıştır.

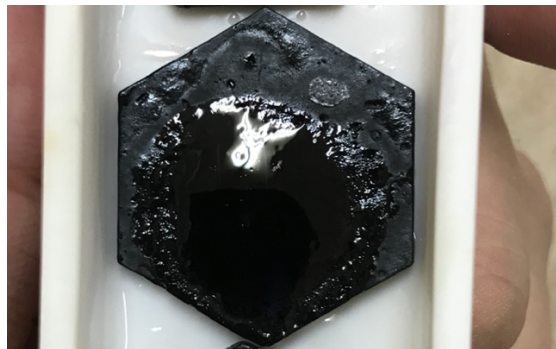
İlk olarak tozlar uygun kompozisyon oranında hazırlanarak değirmende öğütme, kurutma işlemleri uygulanmıştır. Tozlar şekillendirilip belirli sıcaklıkta sinterlendikten sonra döküm işlemi yapılarak tabakalı hala getirilmiştir.

4.2 Karışımların Hazırlanması ve Akım Şeması

Metal ve seramik matrisli kompozit oluşturmak üzere tozlar Çizelge 4.1’ de verilen karışımların ağırlık yüzdesi cinsinden toz öğütme prosesi uygulanmıştır. %5 Al ilaveli numunelerden yeteri kadar yoğunluk elde edilmemesinden dolayı Al ilavesi %10 alt sınıra, %10 ve üzeri cam ilavesinde ise numunelerinin camlaşması ve kusmasından dolayı %10 üst sınırlar belirlenmiştir. Şekil 4.1’de deneme sinterlemesi olarak yapılan %20 katkıli cam-B₄C numunedeki kasma görülmektedir.

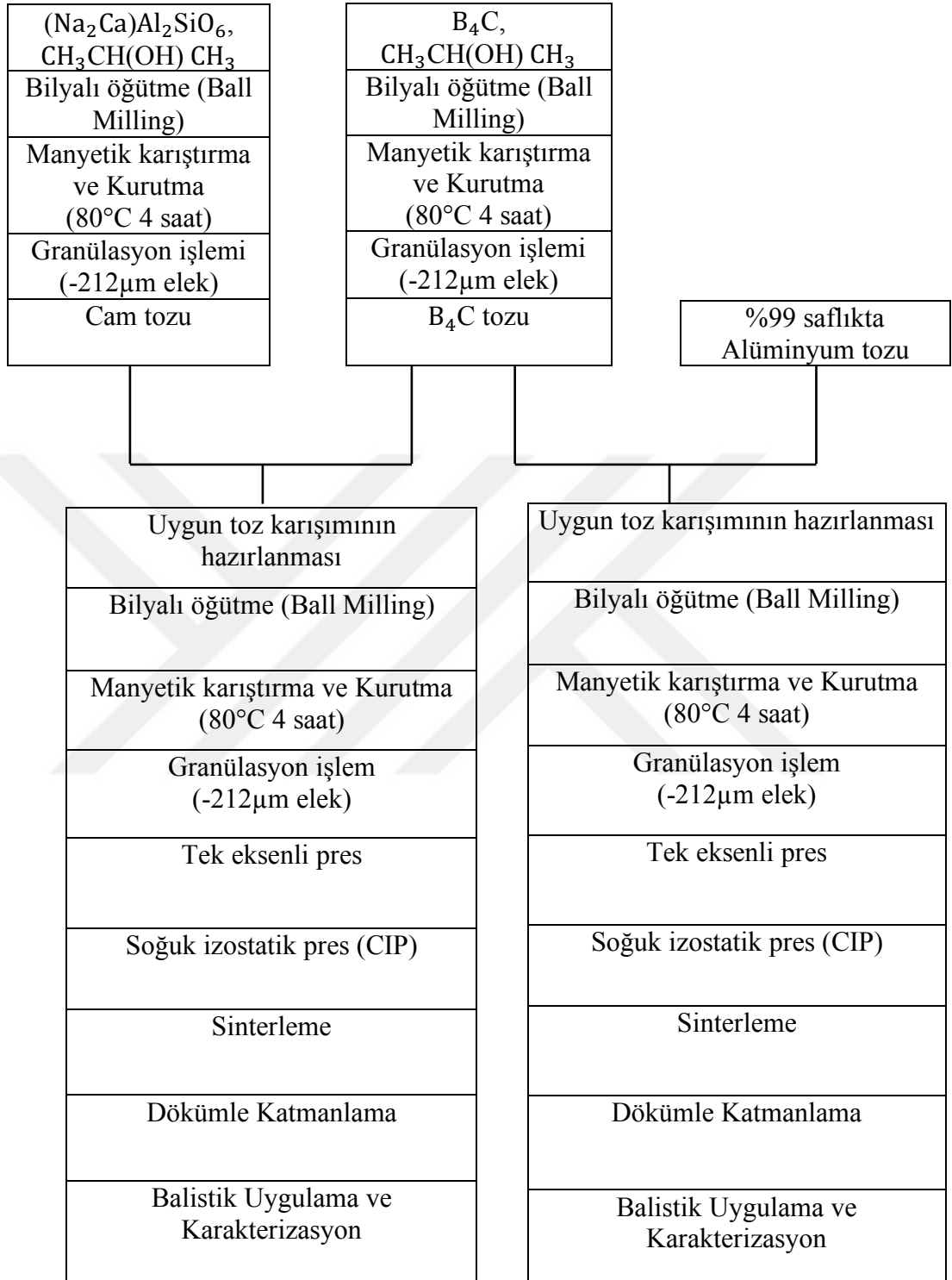
Çizelge 4.1 Hazırlanan karışımların ağırlık yüzdesi (%ağ.) cinsinden kompozisyonları

Malzeme kodları	Hazırlanan karışımların ağırlık yüzdesi (%ağ.)
10A	%10Al + %90B ₄ C
20A	%20Al + %80B ₄ C
5C	%5Cam + %95B ₄ C
10C	%10Cam + %90B ₄ C



Şekil 4.1 %20 cam katkıli sinter sonrası camlaşan numune

Çizelge 4.2 10A-20A-5C-10C kodlu kompozitlerin akım şeması



4.3 Öğütme ve Kurutma İşlemi

Çizelge 4.1’ de verilen değerlere göre hazırlanan kompozisyonlarda öğütme işleminin yapılması için en dışta koruyucu polimer kabın içerisindeki karıştırma kabına di-propanol ile 2,5mm çapındaki zirkonya bilye eklenmiştir. Bilye/toz oranı tüm deneylerde 1:4 oranında belirlenmiştir. Belirlenen kompozisyonlarda kullanılan $(\text{Na}_2\text{Ca})\text{Al}_2\text{SiO}_6$ ’ in bilyalı değirmen öncesi $38\mu\text{m}$ ’lik elekten geçirilmiştir. Bunun sebebinin de dar tane boyut aralığında çalışılarak düzenli bir sinterleme rejimi sağlamak istenmesidir. Karışma kabının içerisine hammaddeler, bilyeler ve alkol eklendikten sonra 24 saat süre ile Şekil 4.2’ deki bilyeli değirmende öğünme gerçekleşmiştir.

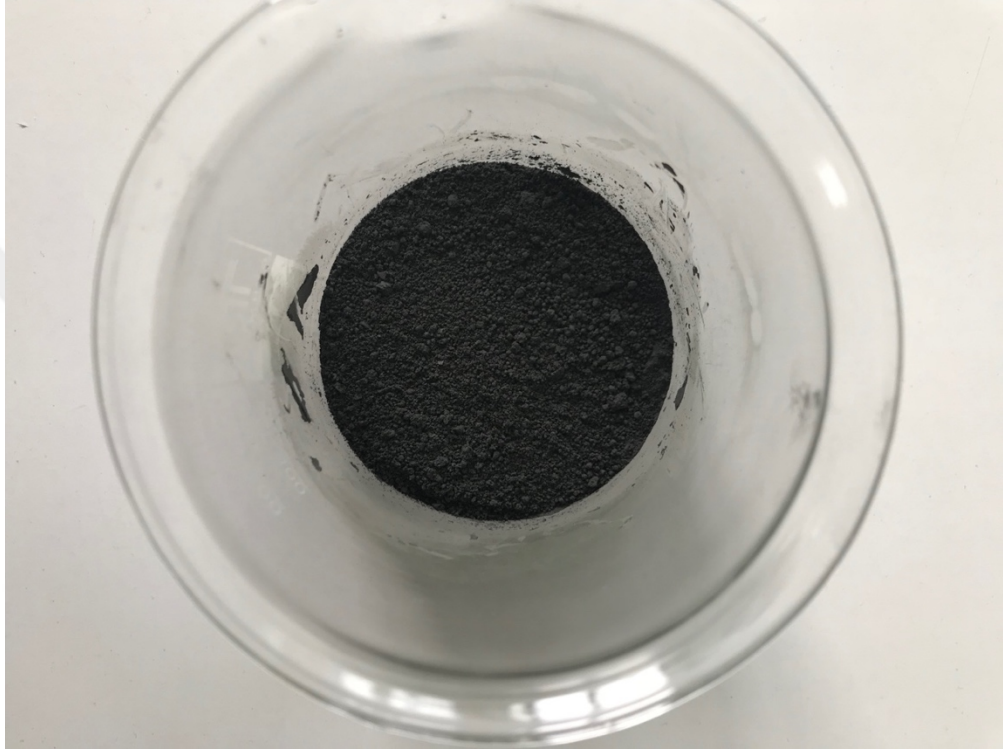


Şekil 4.2 Bilyalı değirmen



Şekil 4.3 Cam tozunun eleme öncesinin ve sonrasının görüntüsü

24 saat süre ile gerçekleştirilen bilyalı öğütme işleminden sonra kurutma işlemi yapıldı. Bunun için karıştırıcı kap içerisindeki karışım süzgeç yardımı ile bir beherin içerisinde döküldü, süzgeçte kalan bilyelere bulaşan tozlar propanol yardımı ile beher içerisine alındıktan sonra 300 rpm hızda ve 80°C’de 4 saat manyetik karıştırıcıda karıştırılıp içerisindeki alkol uzaklaştırıldı. İşlemler sonucunda elde edilen tozlar Şekil 4.4’de gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Kurutma işlemi sonrası tozun görüntüsü

4.4 Karışımların Şekillendirilmesi

4.4.1 Tek eksenli pres

Bilyalı öğütme sonrası tozlar Başaran marka manuel tek eksenli 150 tonluk hidrolik pres makinesi kullanılarak metal kalıplar yardımıyla preslenmiştir. Pres numuneleri 2 gramdır. Kullanılan metal kalıp Şekil 4.5’ de gösterilmektedir. Presleme yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli nokta tozların kalıbın içerisinde homojen bir şekilde dağılmasıdır. Aksi halde, sinterlenmiş numunelerde yoğunluk farkı oluşabilir ve bu yüzden yapı homojen olmaz. 10A-20A-5C-10C numunelerinin pres esnasında yapıda meydana gelebilecek delaminasyon ve deformasyonların oluşmaması için 5 farklı basınç denenmiştir ve yapılan incelemeler sonunda 130 MPa (110-150 MPa arası 10MPa’lık artışla) basınç uygun bulunmuştur. Yapılan incelemede 110-120 MPa’da

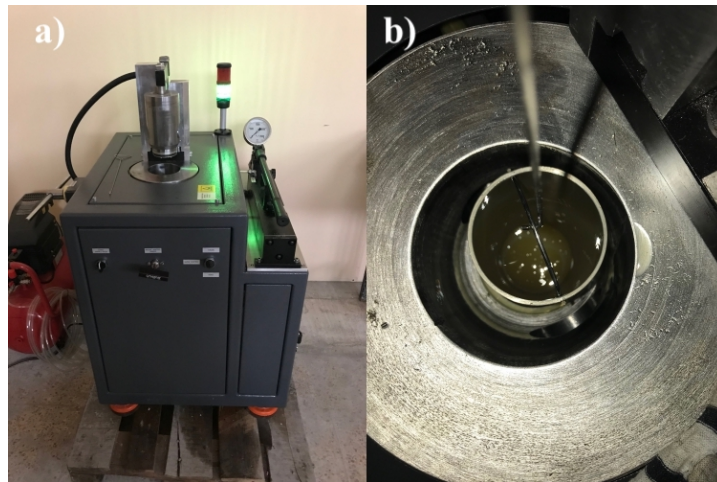
tozlaşma olduğu 140 MPa' nın üstünde ise delaminasyon olduğu görülmüştür.130 MPa basınç değeri numunede sıkıştırılabilme kabiliyeti ve delaminasyondan önceki en yüksek yoğunluğu elde edecek şekilde seçilmiştir.



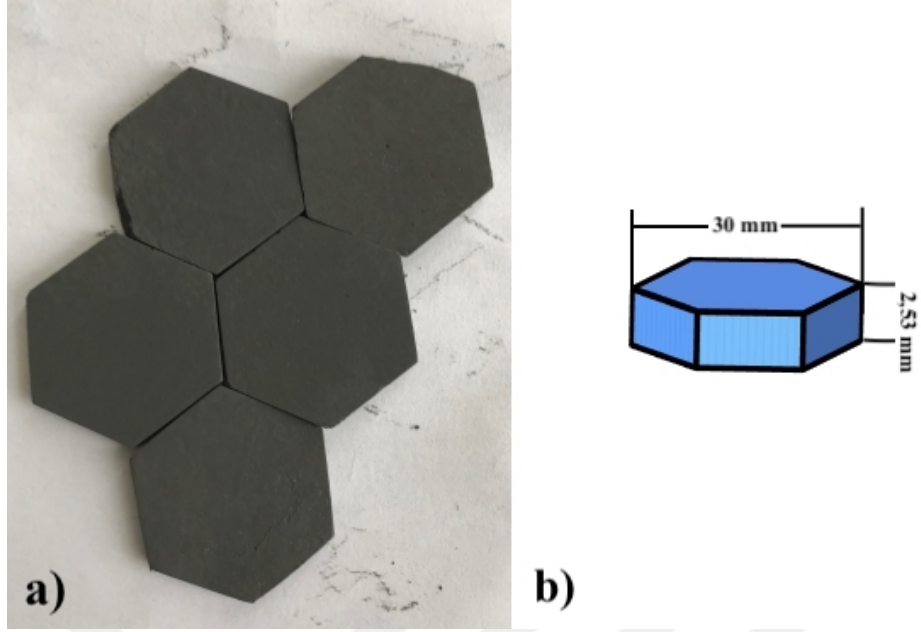
Şekil 4.5 Pres işleminde kullanılan metal kalıp

4.4.2 Soğuk İzostatik pres (CIP)

Tek eksenli pres de oluşan yoğunluk gradyantının yok edilmesi ve düzenli bir sıvı faz sinterleme oluşması için altıgen plakalar 180 MPa'da ve latex eldiven içerisinde vakumlanarak soğuk izostatik pres yapılmıştır. CIP' in ana prensibi seramiklerin ve metallerin çok eksenli basmada şekil değiştirme esasına göreler. Böylece yapı, seramik parçaların aralara dolması sebebiyle, sinter öncesi ham yoğunluğuna ulaşması sağlanır. Deneylerde kullanılan soğuk izostatik pres Şekil 4.6' de gösterilmiş



Şekil 4.6 a) CIP, b) Numune besleme bölmesi gösterilmiştir.



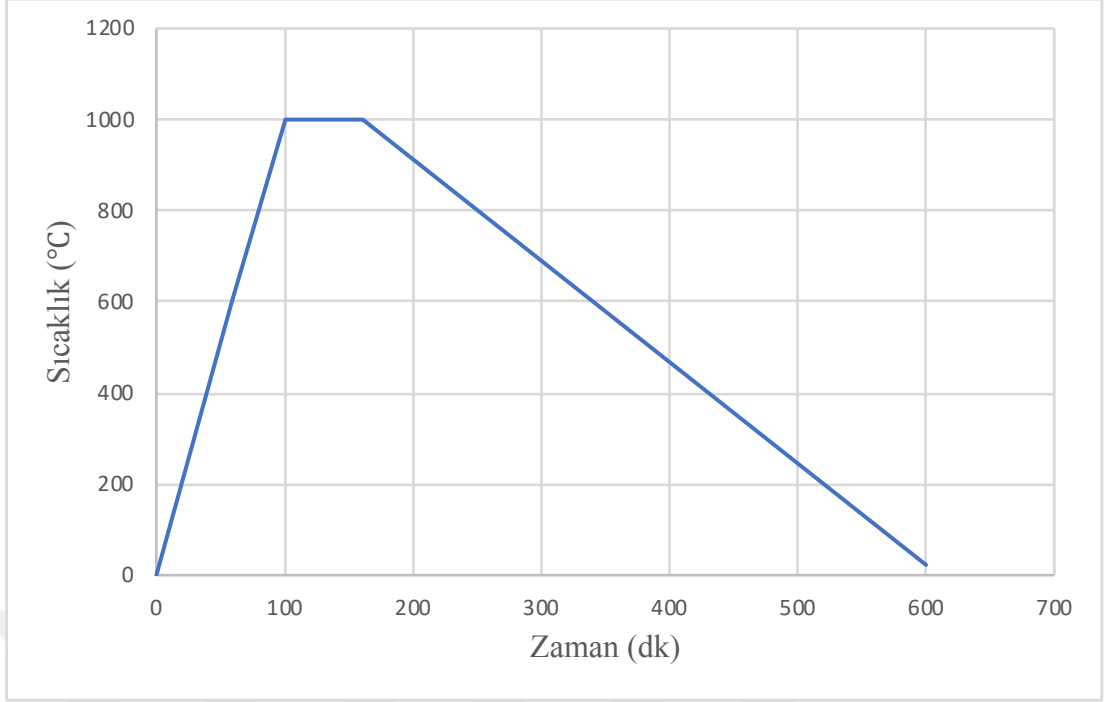
Şekil 4.7 a) CIP sonrası elde edilen numuneler, b) altıgen plakaların ölçüleri

4.5 Sinterleme İşlemi

Soğuk izostatik presle şekillendirilen numuneler Magmatherm atmosfer kontrollü fırında sinterlendi. Kullanılan atmosfer kontrollü fırın Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Al matrisli 10A ve 20A numuneleri sıvı faz, cam matrisli 5C ve 10C numuneleri ise viskoz sinterleme yapılmıştır. Deneyler 1000°C sıcaklıkta, uygun Argon (Ar) atmosferinde ve 1 saat bekletilerek sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme rejimi Şekil 4.9’ de gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Atmosfer kontrollü fırın



Şekil 4.9 10A-20A-5C-10C numunelerinin sinter rejim grafiği

4.6 Döküm İşlemi

Sinterleme işleminden elde edilen altıgen numuneler, grafit kalıba 2x3 (yatayda 3 tane ve dikeyde 2 tane altıgen plaka, Şekil 4.11) şeklinde yerleştirilip üzerine 7075 serisi alüminyum dökümleri yapılmıştır. Döküm işleminde kullanılan Al'un mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi Çizelge 4.3' de gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 7075 serisi Al'nin a) kimyasal bileşimi, b) mekanik özellikleri [38]

a) Kimyasal Bileşimi									
Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Diğer	Al
0,12	0,04	1,56	0,02	2,2	5,4	0,22	0,039	0,15	Kalan

b) Mekanik Özellikler				
Isıl işlem türü	Akma Mukavemeti (Mpa) min-max	Çekme Mukavemeti (Mpa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (Brinel) min-max
0	105	225	17	60
T6	460-505	530-570	10	140-160

Döküm işleminde kullanılan Al içerisinde özellikle Zn ve Mg'un intermetalik oluşturması sonucu, tane sınırlarında çökelen intermetaliklerin dislokasyonların hareketini engelleyerek yüksek mukavemet kazanması sağlanmaktadır.



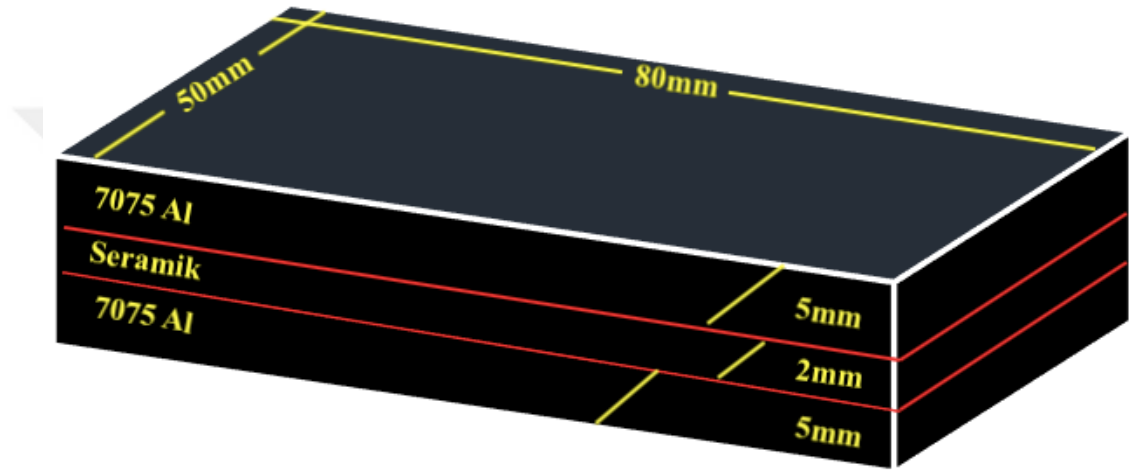
Şekil 4.10 İndüksiyon ocağı ve grafit pota



Şekil 4.11 Dökümde kullanılan grafit pota ve 2x3 dizilimdeki numuneler

Metali eritmek için şekil 4.10'da gösterilen 10-14 KHz çalışma frekansında, 11 kW güce sahip, 3kg eriyik pota haznesi bulunan Entina NRS 05 105 marka indüksiyon

ocağı kullanılmıştır. Kullanılan 7075 serisi Alüminyumlar, döküm esnasında döküm boşluğu oluşumunu engellemek, yüzey cürufunu minimize etmek ve gerekli akışkanlığı sağlamak için alüminyum alaşımı 720°C’ de ergitme yapılmıştır. Döküm işlemi Şekil 4.11’de gösterilen grafit kalıp yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Döküm öncesi kalıplar 350°C’ye kadar ısıtılıp numuneler kalıp içerisine 2x3 (yatayda 3 tane ve dikeyde 2 tane altıgen plaka, Şekil 4.11) şeklinde dizilerek yapılmıştır. Döküm sonrası işleme payları hesaplanarak her bir plaka yüzü için 150 g (±5g) eriyik kullanılmıştır.



Şekil 4.12 İşleme sonrası plaka ölçüleri

Döküm sonrası talaş kaldırma işlemi yapılan plakaların boyutları dijital kumpas yardımıyla; 80x50x12 mm olarak ölçülmüştür. Plaka ağırlıkları 130g hesaplanmıştır. Ağırlık hesabı eşitlik 4.1 yardımıyla yapılmıştır.

$$m = d \times V \quad [4.1]$$

m: kütle

d: yoğunluk

V: hacim

4.7 Balistik Uygulamaları

10A-20A-5C-10C zırh kompozitlerinin balistik testleri TSK Standartlarına göre Sivas Komanda Birliğinde ki keskin nişancılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Atış anında ki hava şartları da göz önünde bulundurularak 50m ve 100m olmak üzere iki farklı mesafeden atışlar yapılmıştır. Testlerde kullanılan silah ve mermi NATO

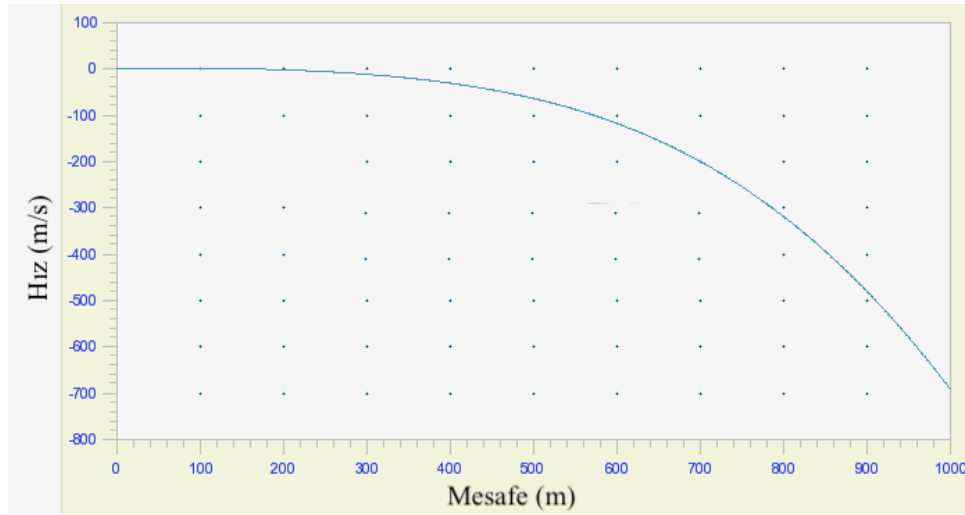
standartlarına uygun seçilmiştir. Atışlarda kullanılan silah ve merminin özellikleri Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5’ de gösterilmektedir.

Çizelge 4.4 HK-33 Piyade tüfeğinin özellikleri

Çap	5,56 mm
Fişek Ebadı	5,56 x 45 mm
Uzunluğu (sabit dipçikli)	920 mm
Uzunluğu (seyyar dipçikli)	735 mm
Namlu Uzunluğu	390 mm
Yiv-Set Adedi	6
Ağırlığı (şarjörsüz)	3,9 kg
Atış Şekli	Yarı otomatik, Üçlü darbeli, Tam otomatik
Atış Sürati	750 adet/dk
İlk Hız	885 m/s
Azami Menzili	3800 m
Tesirli Menzili	400 m

Çizelge 4.5 Kullanılan Merminin Özellikleri

İğne Tipi	Centerfire
Kapsül Tipi	Boxer (tek kanallı)
Gömlük Tipi	Fmj (%97 Cu- %3 Zn)
Çekirdek Malzemesi	Pb çekirdek
İlk Hız	900m/s
Toplam Ağırlık	11,923 g
Çekirdek Ağırlığı	4,535 g
Gücü	1645 Joule

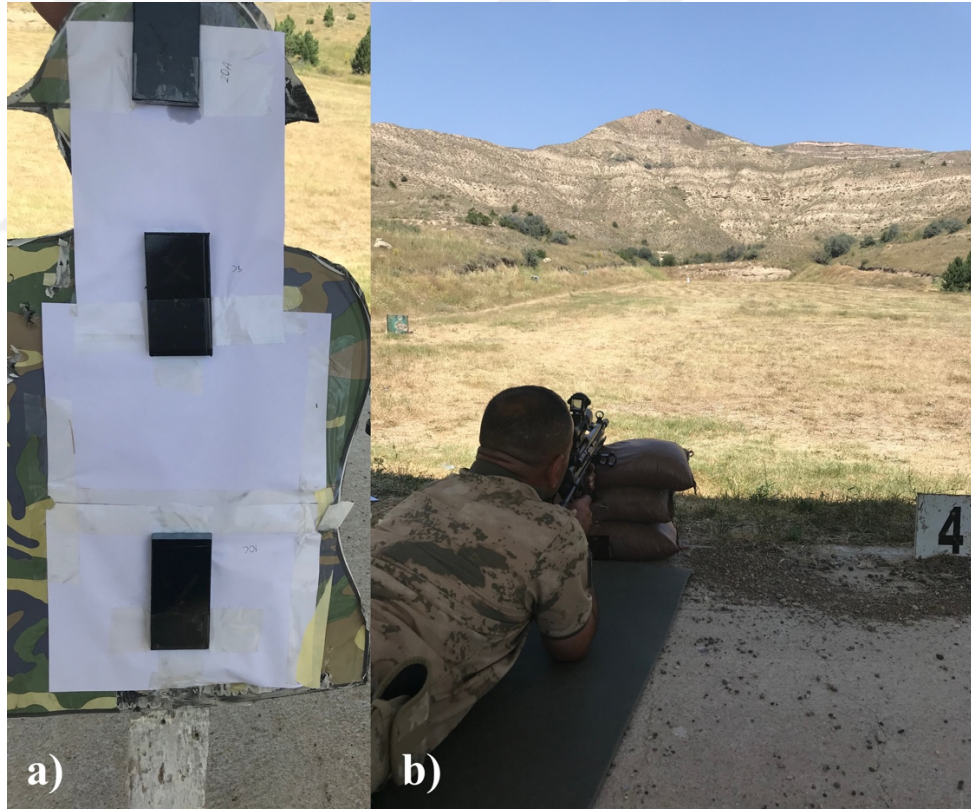


Şekil 4.13 Balistik Düşüş Kartı

Şekil 4.13’deki balistik kart incelendiğinde etkili maksimum hızın ilk 100 metrede olduğu görülmektedir. Sonrasında ise yerçekiminin etkisiyle özellikle 180 metreden sonra hızda ciddi bir düşüş başlamaktadır. Bu sebeple balistik test mesafeleri 50m ve 100m olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.14 a) 5,56 x 45 mm mermi, b) HK-33 piyade tüfeği



Şekil 4.15 a) Hedef plakalar, b) Atış alanı

4.8 Karakterizasyon Teknikleri

4.8.1 Yoğunluk ölçümü

Sinterlenmiş numunelerin 25°C' deki yoğunlukları Arşimet tekniği ile ölçülmüştür.

İlk olarak numunelerin kuru ağırlıkları ölçülmüş (W_{kuru}), ardından numunelerdeki

açık gözeneklerin etkilememesi için 1 saat saf suda kaynatılmıştır. Daha sonra saf su içerisinde asılı ağırlıkları (W_{suda}) ve ardından numune yüzeyindeki sular temizlenip ıslak ağırlıkları ($W_{\text{ıslak}}$) ölçülmüştür.

$$d_{\text{deneysel}} = \frac{W_{\text{kuru}}}{W_{\text{ıslak}} - W_{\text{suda}}} \times d_{\text{su}} \quad [4.2]$$

$$d_{\text{teorik}} = (V_m \times d_m) + (V_t \times d_t) \quad [4.3]$$

$$\%d_{\text{relatif}} = \frac{d_{\text{deneysel}}}{d_{\text{teorik}}} \times 100 \quad [4.4]$$

V_m = Matris hacim oranı

d_m = Matris yoğunluğu

V_t = Takviye hacim oranı

d_t = Takviyenin yoğunluğu

Örnek olarak 10A değeri için hesaplama aşağıda yapılmış ve cam matris için de kullanılmıştır.

$$10g \text{ Al} / d_{\text{Al}} = V_{\text{Al}} \rightarrow V_{\text{Al}} = 3,703 \text{ cm}^3$$

$$90g \text{ B}_4\text{C} / d_{\text{B}_4\text{C}} = V_{\text{B}_4\text{C}} \rightarrow V_{\text{B}_4\text{C}} = 35,71 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{toplam}} = 3,703 + 35,71 = 39,413 \text{ cm}^3 \rightarrow V_m = V_{\text{Al}} / V_{\text{toplam}} \rightarrow V_m = 0,094$$

$$V_t = V_{\text{B}_4\text{C}} / V_{\text{toplam}} \rightarrow V_t = 0,906$$

$$d_{\text{teorik}} = (0,906 \times 2,52) + (0,094 \times 2,7) \rightarrow 2,54 \text{ g/cm}^3$$

Yapılan ölçümlerin doğruluğunu artırmak için her ölçüm 3'er kez tekrarlanarak ortalaması alınmış ve eşitlik 4.2 yardımıyla deneysel yoğunlukları ölçülmüştür. Eşitlik 4.3'de verilen karışımlar kuralıyla teorik yoğunluk, eşitlik 4.4 ile relatif yoğunluklar yüzde cinsinden belirlenmiştir.

4.8.2 Mikro sertlik ölçümü

Üretilen numunelerin sertlik değerleri Shimadzu HMV-3 marka 136° konik elmas uca sahip sertlik cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Sinterleme sonrasında hazırlanan numuneler 15sn süreyle 1kg yük uygulanarak çentik izlerinden ölçümler alınmıştır. Her numune için 3 kez uygulanmış ve elmas ucun meydana getirdiği izin köşegenler arasındaki mesafeler ölçülerek sertlik değerleri bulunmuştur.

Altıgen plakalar sinterlendikten sonra Al döküm ile katmanlı olarak üretildi ve talaş kaldırmada küçük bir bölge dikine kesilerek Al-B₄C-Al şeklinde tabakalar elde edildi. Bu tabakalardan geçen mikrosertlik izleri alınarak toplam 11 adet noktadan 3' lü ölçümler yapılarak mikrosertlik grafiği Şekil 5.1'deki gibi oluşturulmuştur.

4.8.3 X-ışını kırınım analizi

Takviye malzemesine göre üretilen her altıgen plaka ve üretim için kullanılan tozların XRD analizleri Şekil 4.16'da gösterilen Rigaku D-max marka cihazla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.16 Rigaku D-max XRD cihazı

Numunelerin mikro yapısında gelişen kristal fazların tespiti X-ışını kırınım indisi metoduyla gerçekleştirilmiştir. Oluşan X ışınları numune yüzeyine çarparak Bragg yasasına göre geri yansır. Oluşan ilk X-ışını ve geri dönen X-ışını arasındaki şiddet ve açı farkı faz özelliklerini belirlemektedir. Elde edilen pikler malzemenin hangi fazlardan oluştuğunu belirlemede kullanılmaktadır.

Bragg yasası:

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad [4.6]$$

d = Kristal düzlemler arası mesafe

λ = X-ışını dalga boyu

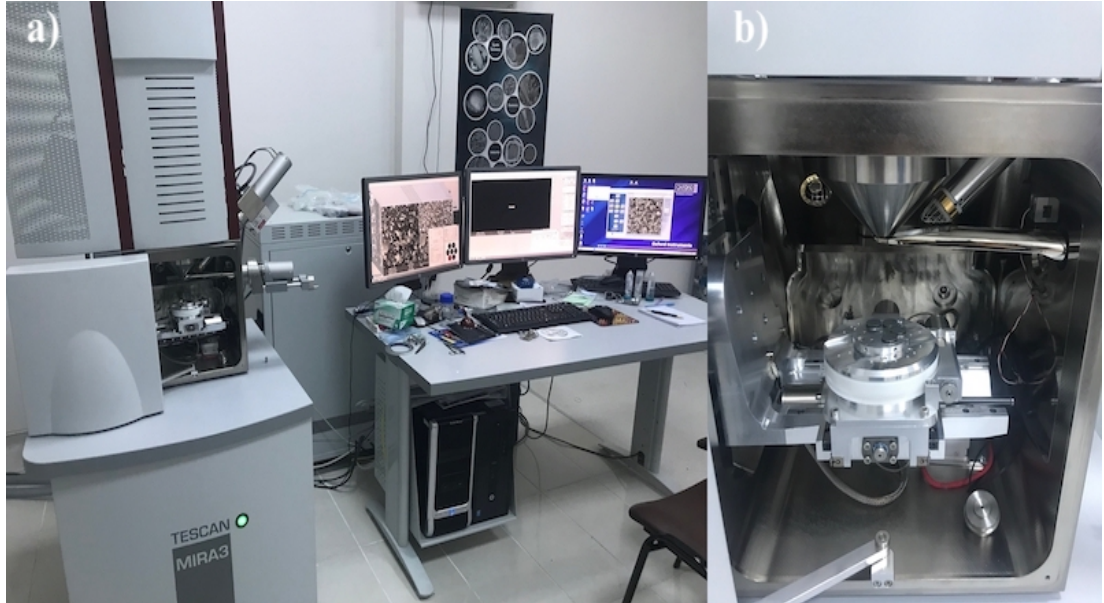
n = Yansıma derecesi

θ = Kırınım açısı

Kullanılan Cu-K α tütün voltajı 35 kV ve akımı 15 mA olarak ayarlanmıştır. Numuneler 2°/dk tarama hızında ve 0,02 tarama kademesinde 20-70° (2θ) arasında taramaya tabi tutulmuştur. Farklı açı ve şiddetlerde beliren piklere karşılık gelen düzlemler ve düzlemler arası mesafeler bu kristallere ait standart (J.C.P.D.S Joint Community for Powder Diffraction Standart) değerleri ile karşılaştırılarak mikro yapıda oluşan kristal fazlar belirlenmiştir.

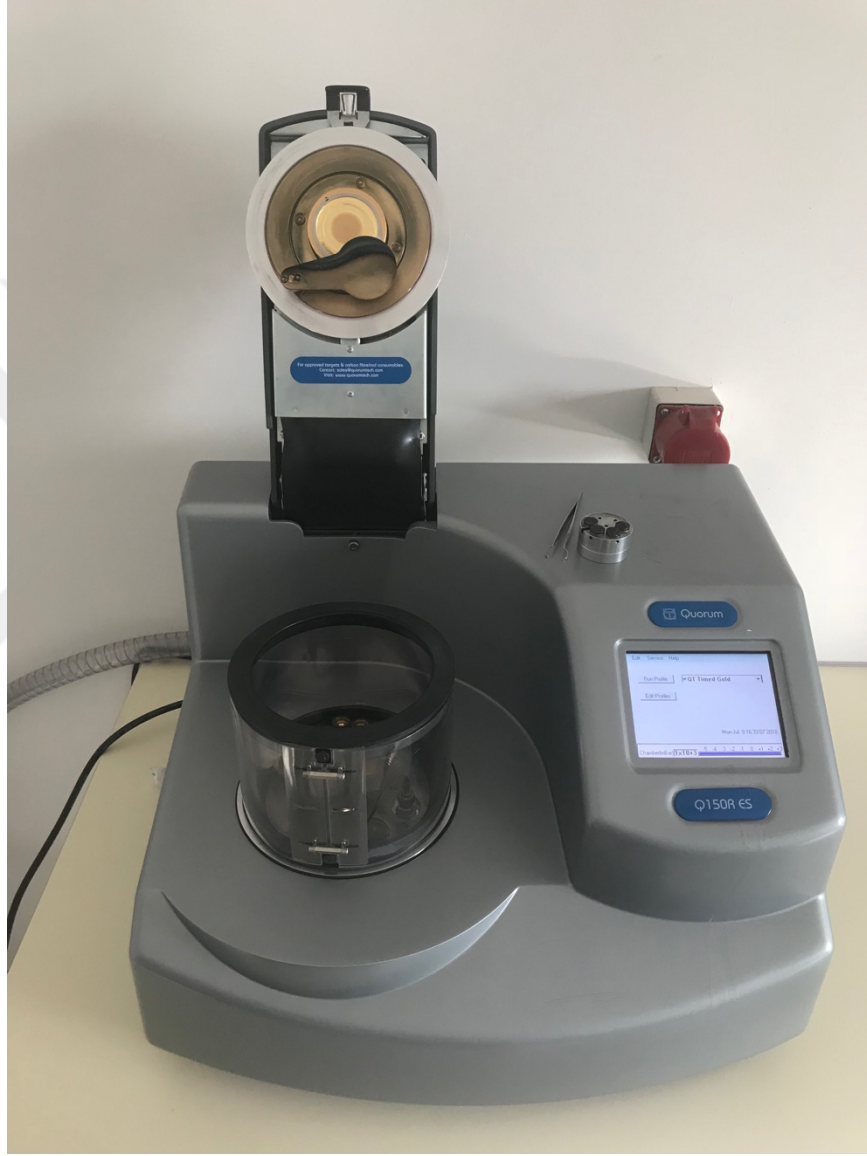
4.8.4 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleme

Plaka üretiminde kullanılan tozlar ve takviye malzemesine göre üretilen her altıgen plakanın yüzeyden incelenmesi ve görüntülerinin alınması için Şekil 4.17'de gösterilen Mira3XMU FE-SEM (Tescan, Çekya) marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 4.17 a) Mira3XMU FE-SEM (Tescan, Çekya) markalı taramalı elektron mikroskobu, b) SEM cihazının numune tablası ve dedektörlerin yerleşimi

Numunelerin görüntülenebilmesi için yüzey iletkenliğini sağlamak amacıyla Şekil 4.18’de gösterilen Quorum Q150R ES Sputter Coater (Au-Pd) marka kaplama cihazıyla numune yüzeyleri altın kaplanmıştır. Yüzey görüntüleri alınırken hem SE (ikincil elektron) hem de BSE (geri saçımmlı elektron) modları kullanılarak analizler yapılmıştır.



Şekil 4.18 Quorum Q150R ES Sputter Coater (Au-Pd) kaplama cihazı

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1 Yoğunluk Sonuçları

Yoğunluk ölçümü için, 1000°C’de sinterlenmiş 5C-10C-10A-20A altıgen plakalar Arşimet metodu uygulanarak yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Sinter öncesi plaka yoğunluklarını artırmak için ilk olarak tek eksenli pres uygulanmıştır. Tek eksenli preste oluşan yoğunluk gradyanlarını gidermek ve daha yüksek yoğunluk elde edilmesi amacıyla soğuk izostatik pres (CIP) uygulanmıştır. CIP sonrası yapı, seramik parçaların aralara dolması sebebiyle sinterlenmemiş ham yoğunluğuna ulaşmıştır.

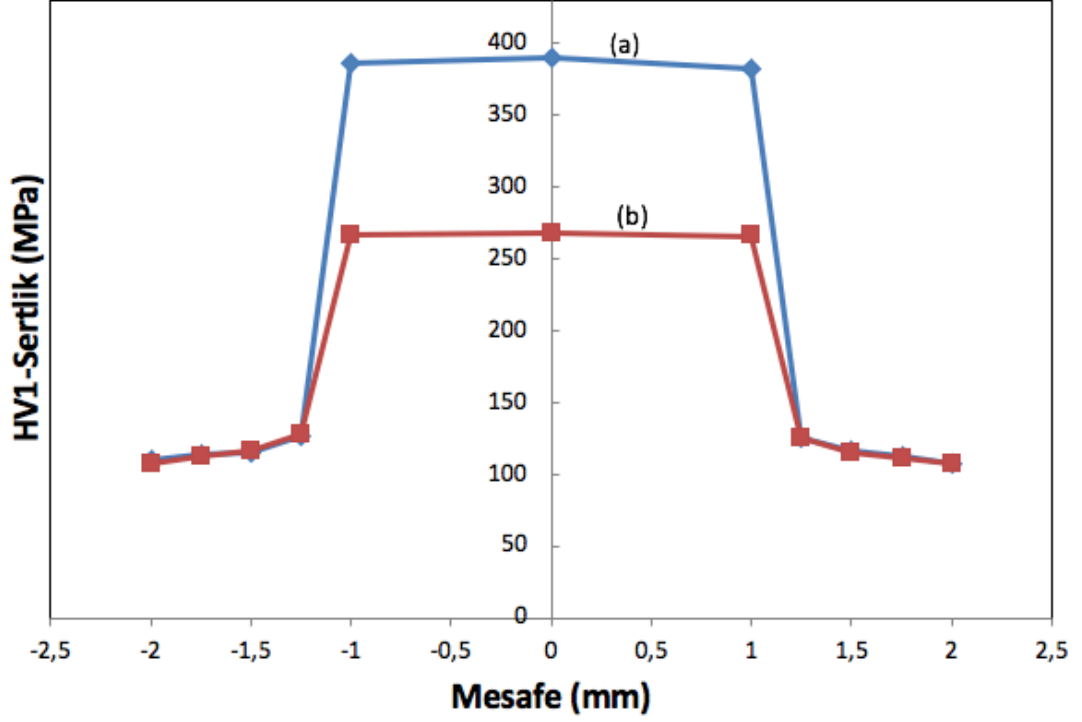
Çizelge 5.1 1000°C’ de sinterlenen 10A-20A-5C-10C altıgen numunelerin yüzde cinsinden ortalama Arşimet yoğunluk – sertlik değerleri.

	Ortalama Değer			
	10A	20A	5C	10C
Relatif Yoğunluk	%70	%75	%79	%83
Mikro Sertlik (HV)	268 MPa	272 MPa	381 MPa	390 MPa

Yapıdaki ilave fazın artmasıyla yoğunluğun arttığı Çizelge 5.1’de görülmektedir. Bunun sebebi; yapılan sıvı faz ve viskoz sinterleme işlemleri sonucunda B₄C ana fazındaki gözeneklerin takviye malzemesi tarafından doldurulmasıdır.

5.2 Sertlik Sonuçları

Tüm altıgen plakaların sertlik sonuçları Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Maksimum cam miktarındaki B₄C katkısıyla (%10) seramiğin yaklaşık olarak 390MPa, %10 Al’ de 268 MPa bulunmuştur. Genel olarak bakıldığında cam fazın B₄C ile birleştiğinden ve yüksek yoğunluk elde edildiğinden dolayı yüksek sertlikte çıkması, alüminyumun cama göre daha düşük sertliğe sahip olmasından dolayı sertliğin düşük bulunması doğaldır.

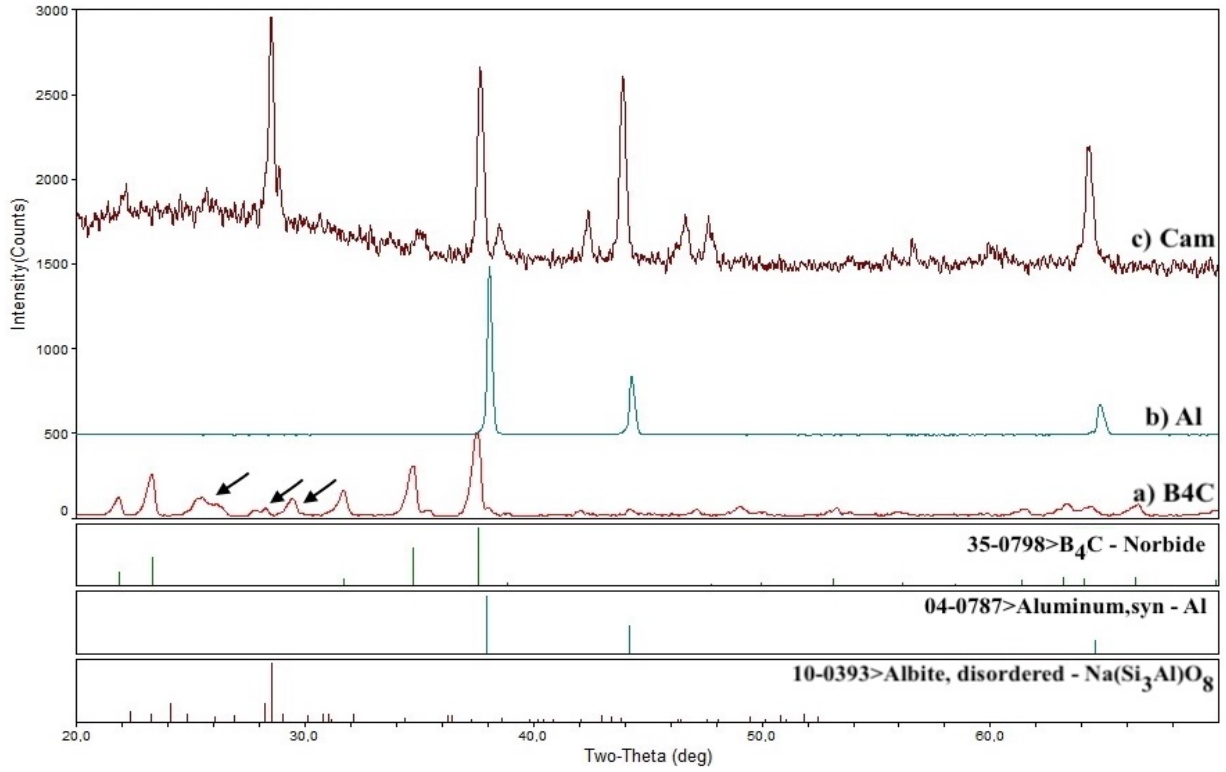


Şekil 5.1 a) 10C , b) 10A takviyeli Al plakalarının kesit mikro sertlik (HV) grafiği Şekil 5.1’de de görüldüğü üzere en yüksek sertlik değeri 10C plakasına aittir. Alüminyum plakaların sertlik değerlerinin birbirine yakın olmasından ve yine seramik plakaların sertlik değerleri birbirlerine yakın olup kendi içinde değerlendirilmesinden dolayı kıyaslama için grafik eşit yüzde ağırlığa sahip 10C ve 10A plakaları baz alınarak çizilmiştir. Camın alüminyumdan daha sert bir malzeme olmasından dolayı ve sinterleme esnasında oluşan camsı faz sayesinde 5C-10C plakaları daha yüksek yoğunluğa ve daha yüksek sertliğe sahiptir.

5.3 XRD Sonuçları

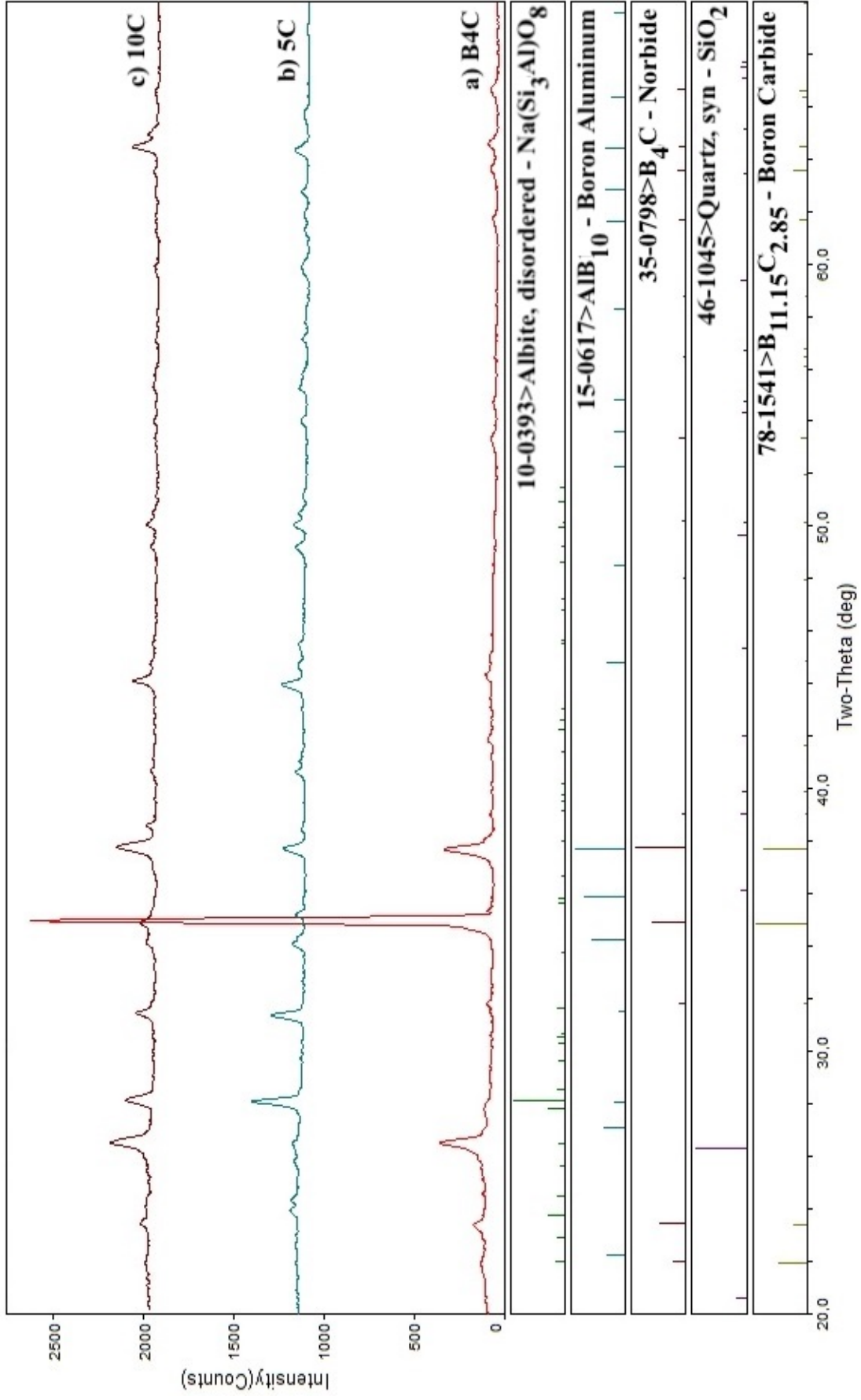
Şekil 5.2’de sinterleme işlemlerinde kullanılan tozların XRD paternleri görülmektedir. 37,8° de B_4C ana piki görülmektedir. Ayrıca bor karbürün başlatıcısı olarak yapıda kendiliğinden gelen Na-Si (NaOH, Na_2SiO_3) yapıları görülmektedir (şekilde ok ile gösterilmiştir). Fakat bu pikler işaretlenmemiştir. Şekil 5.2 b)’ de pikler saf Al’nin (111), (220), (400) pikleri ile tam uyumludur. (b) Al toz içerisinde XRD’ nin çözünürlük (%1-3) sınırından daha düşük miktarda empürite olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.2 c)’ de görüldüğü üzere camın öğütülmesinden kaynaklı amorf fazdan kristalin faza geçiş belirlenmiştir. 20-40° arasında görülen yoğun amorf bölge bilyalı değirmenlemede deformasyondan dolayı kristalin piklere sebep olmuştur. Camın

içerisinde bulunan Na-Si-Al-O elementleri en çabuk kristalleşebilen sistem olarak düzensiz Albit fazını oluşturmuştur.

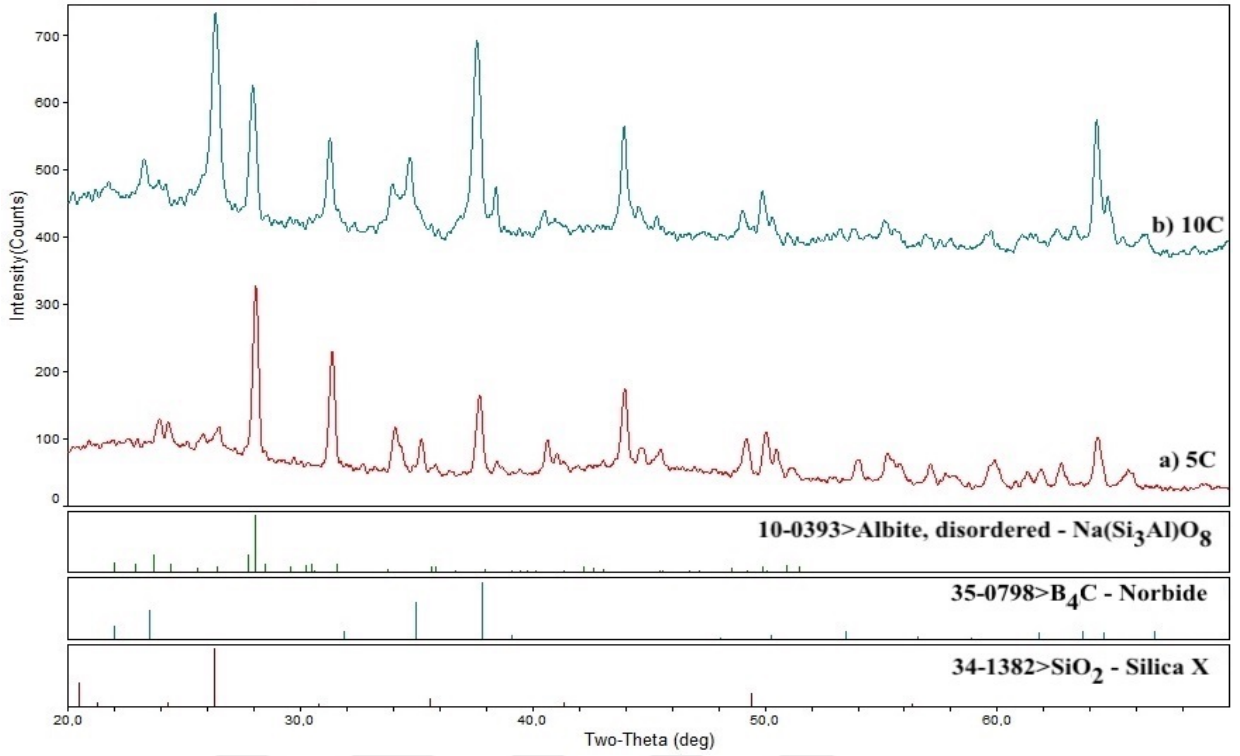


Şekil 5.2 24 saat bilyalı değirmende öğütülmüş, a) Cam, b) Al, c) B_4C tozlarının XRD paternleri

Şekil 5.3’de görüldüğü üzere referans olarak alınan (a) saf B_4C 78-1541 ICSD kodlu XRD paternine göre karbon oranını bir miktar kaybederek ($B_{11.15}C_{2.85}$) sinterlenmiştir. Aynı yapıda B_4C (35-0798) ise $37,8^\circ$ ve $34,9^\circ$ 2 teta ‘da pikler oluşmuş şekilde sinterlenmiştir. Dolayısıyla yapıda iki ayrı kristal yapıya sahip B-C bulunmaktadır. $26,5^\circ$ ana piki görülen ve tozdan geldiği düşünülen Na-Silika (serbest silika) tabanlı pik görülmektedir. (b) %5 cam ‘da ise $27,8^\circ$ cam fazın öğütülmesinden kaynaklı Albit’in (10-0393; $Na(Si_3Al)O_8$) ana piki olup diğer piklerde benzer şekilde Albite ait olarak görülmüştür. Yine düşük şiddette $37,8^\circ$ ve $34,9^\circ$ de B_4C pikleri görülmektedir. Cam fazın sinterlemeden sonra yüzeyi tamamen kaplamış olmasından dolayı B_4C pikinin şiddetinin düştüğü yani cam faz tarafından çevrelendiği düşünülmektedir. (c) %10 cam matrisli B_4C ’ de artan cam miktarıyla, cam piklerine ilave olarak $26,1^\circ$ karbon isiyile birlikte serbest silika pikinin de bulunduğu görülmüştür. Şekil 5.4’de 2’li cam şeklinde, daha iyi anlaşılması için cam takviyeli sinterler ayrı olarak gösterilmiştir. Görüldüğü üzere sinterlenen camlar düşük kristallığe sahip şekilde amorf yapı da içermektedir.

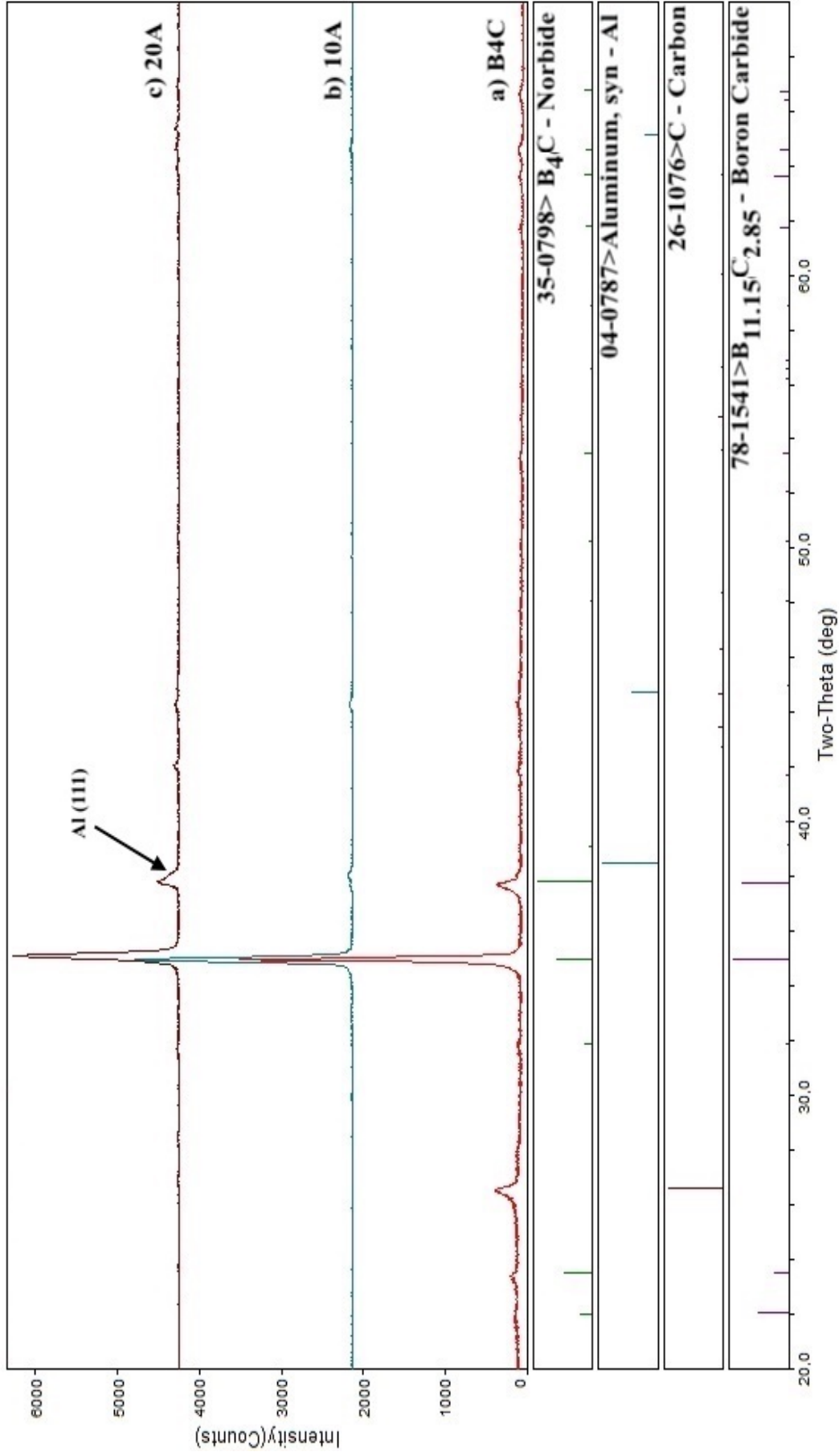


Şekil 5.3 1000 °C' de 1 saat sinterlenmiş a) saf B₄C, b) Ağırlıkça %5 cam matrisli, c) Ağırlıkça %10 cam matrisli kompozitlerin XRD paternleri



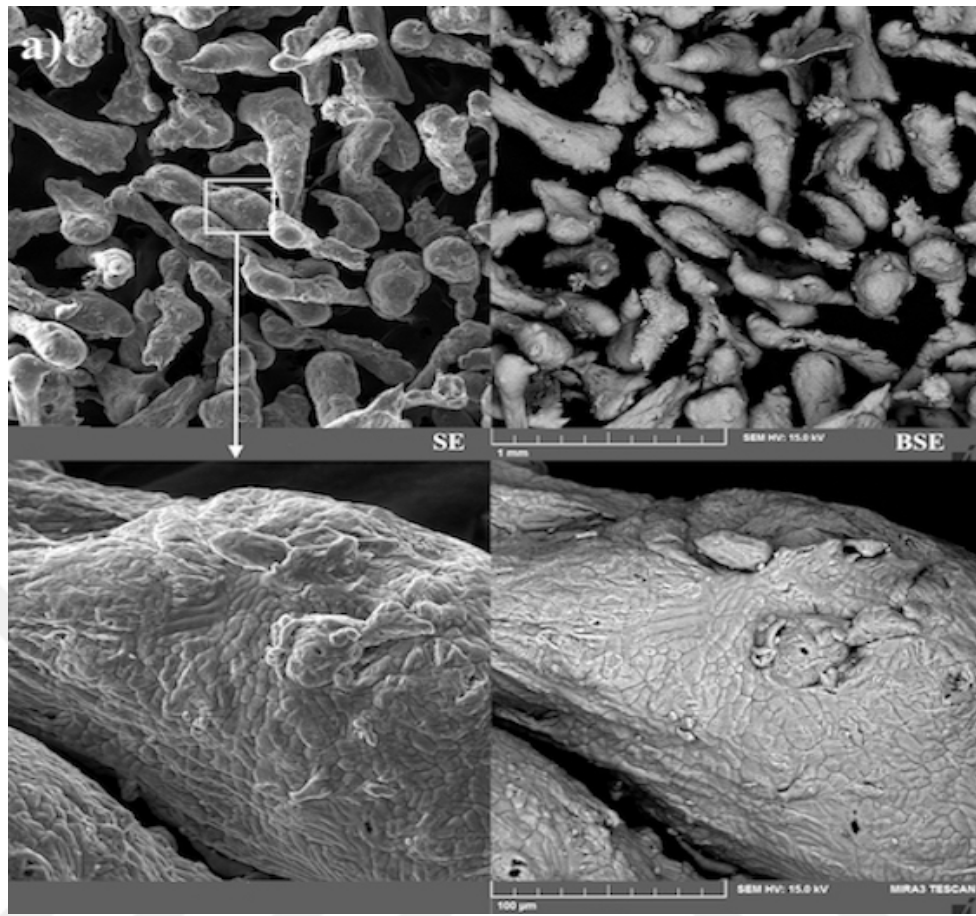
Şekil 5.4 1000 °C’ de 1 saat sinterlenmiş a) Ağırlıkça %5 cam matrisli, b) Ağırlıkça %10 cam matrisli kompozitlerin XRD paternleri

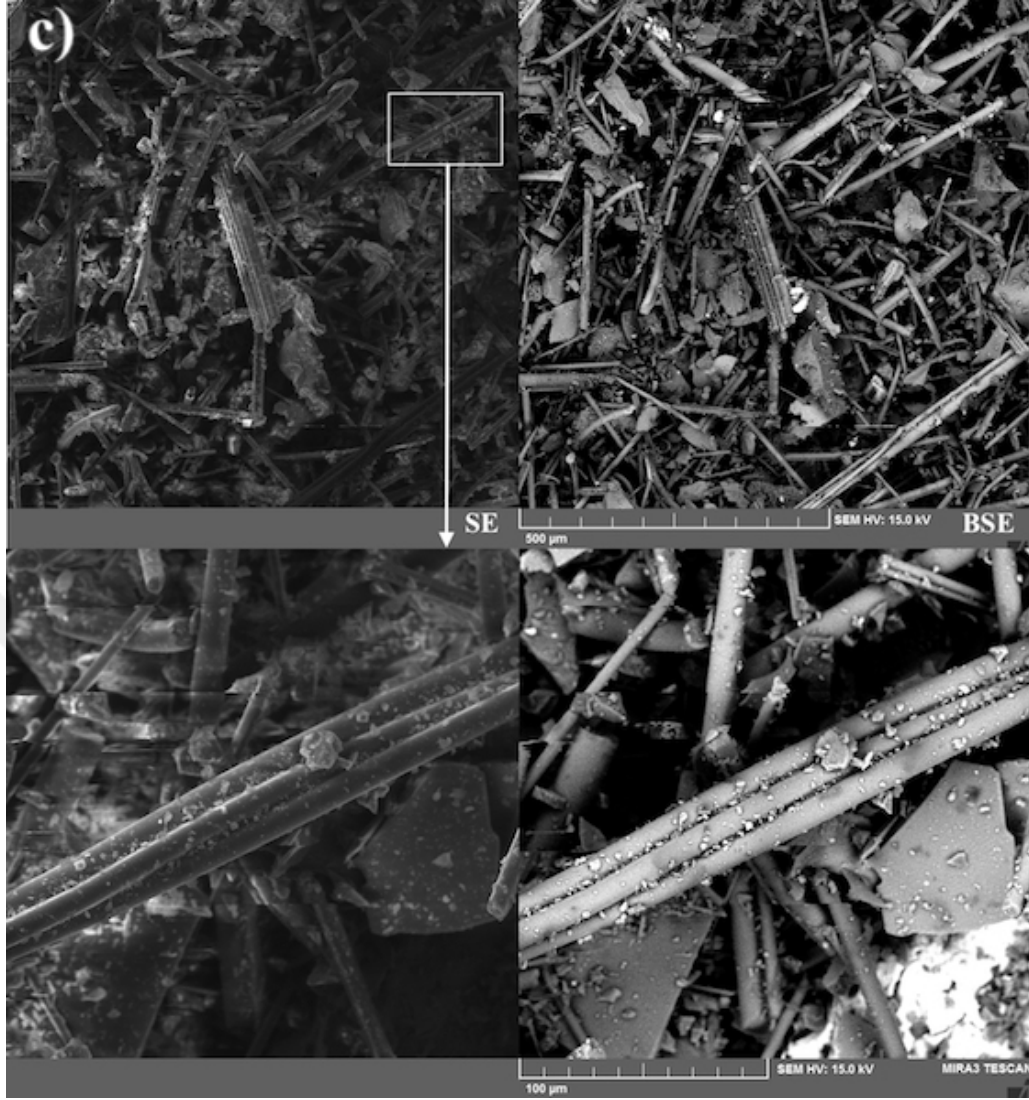
Şekil 5.5’de referans olarak yine (a)’ da herhangi bir takviye elemanı olmadan sinterlenmiş olan saf B_4C görülmektedir. Sinter ürünü olarak bilinen 78-1541 kodlu borkarbür ile norbide fazındaki kübik B_4C ana bileşenleri oluşturmaktadır. Sinterlemenin devamında ortaya çıkan ve karbon (C) karası şeklinde belirlenen 26-1076 kodlu karbon, Al miktarının artışıyla gerek redükleme gerekse sinterleme etkisiyle yok olmuştur. Şekilde Al artışıyla (b) birlikte Norbide fazının hemen sağ tarafında $38,3^\circ$ de alüminyumun (111) piki görülmüş, artan Al miktarıyla da (c)’ de daha belirgin hala gelmiştir (şekilde ok ile gösterilen bölge). Al pikinin bu denli düşük şiddette olmasının nedeni yapının %75 relatif yoğunluğa sahip olmasıdır. Dolayısıyla yüzeylerde alüminyumsuz gözenekli bölgeler mevcut olduğu düşünülebilir.



Şekil 5.5 1000 °C' de 1 saat sinterlenmiş a) saf B₄C, b) Ağırlıkça %10 Al matrisli, c) Ağırlıkça %20 Al matrisli kompozitlerin XRD paternleri

5.4 SEM Sonuçları

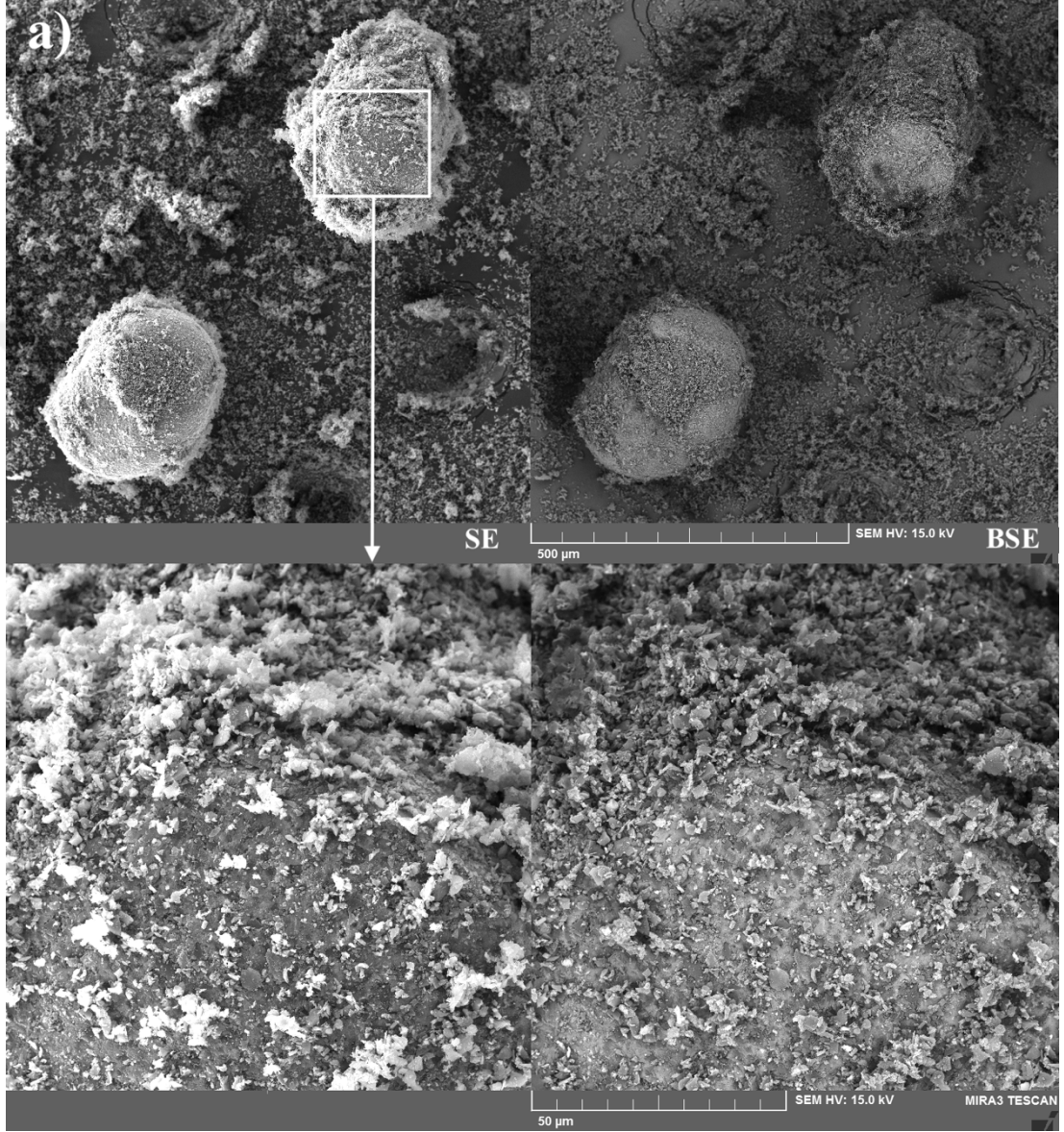


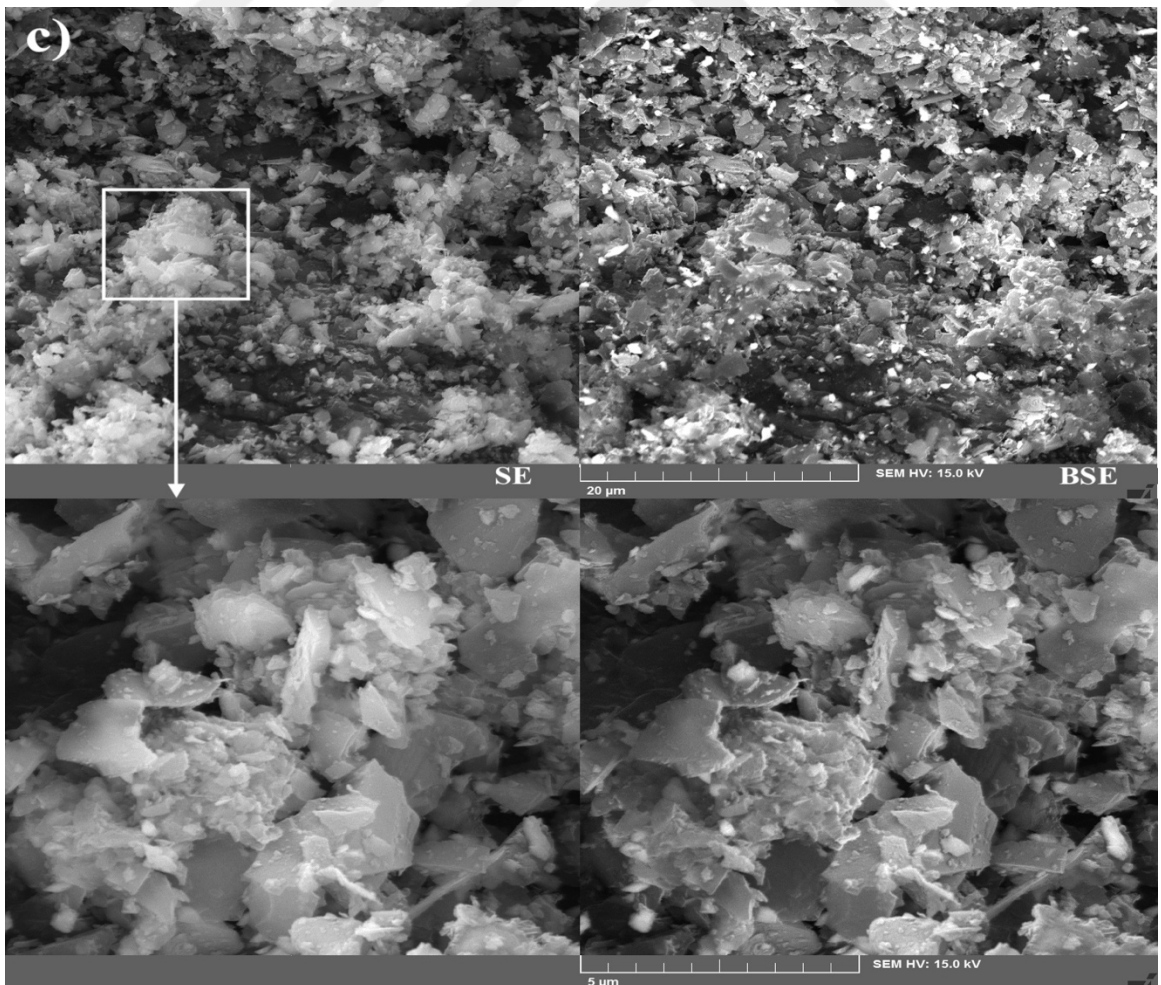
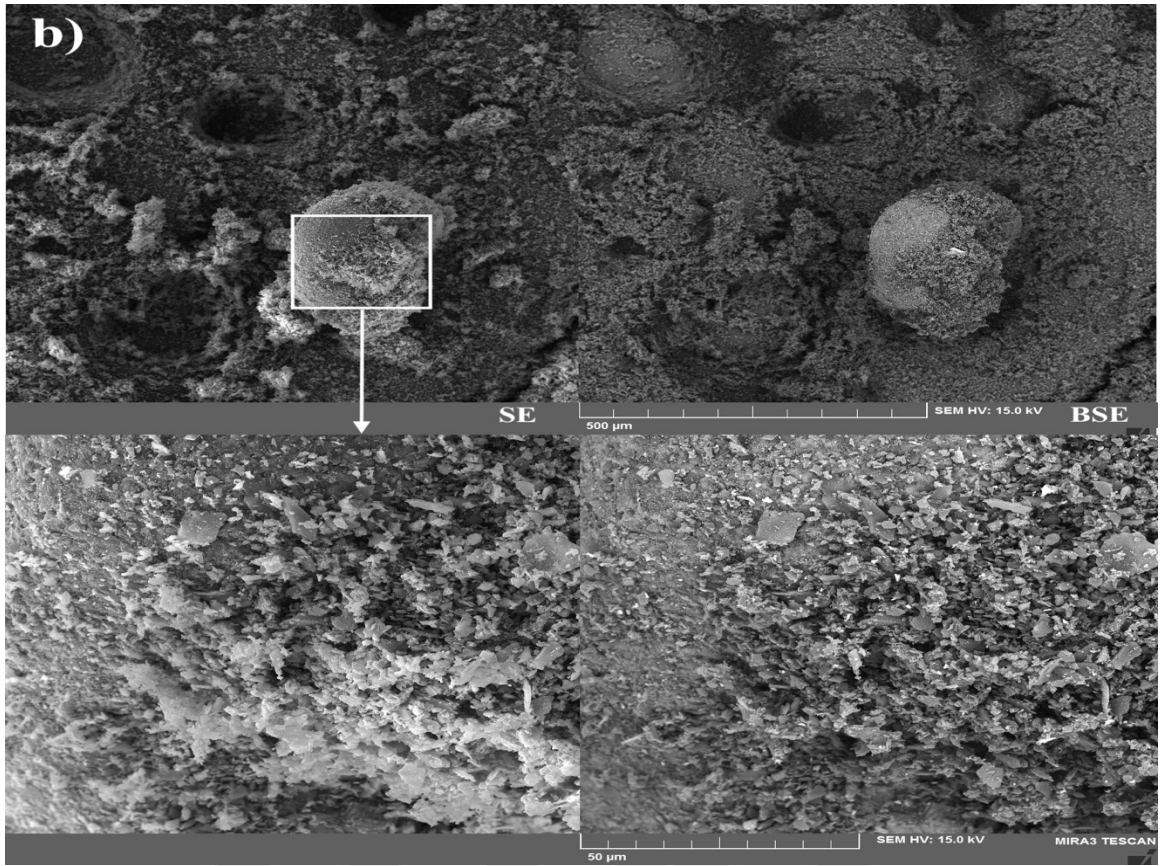


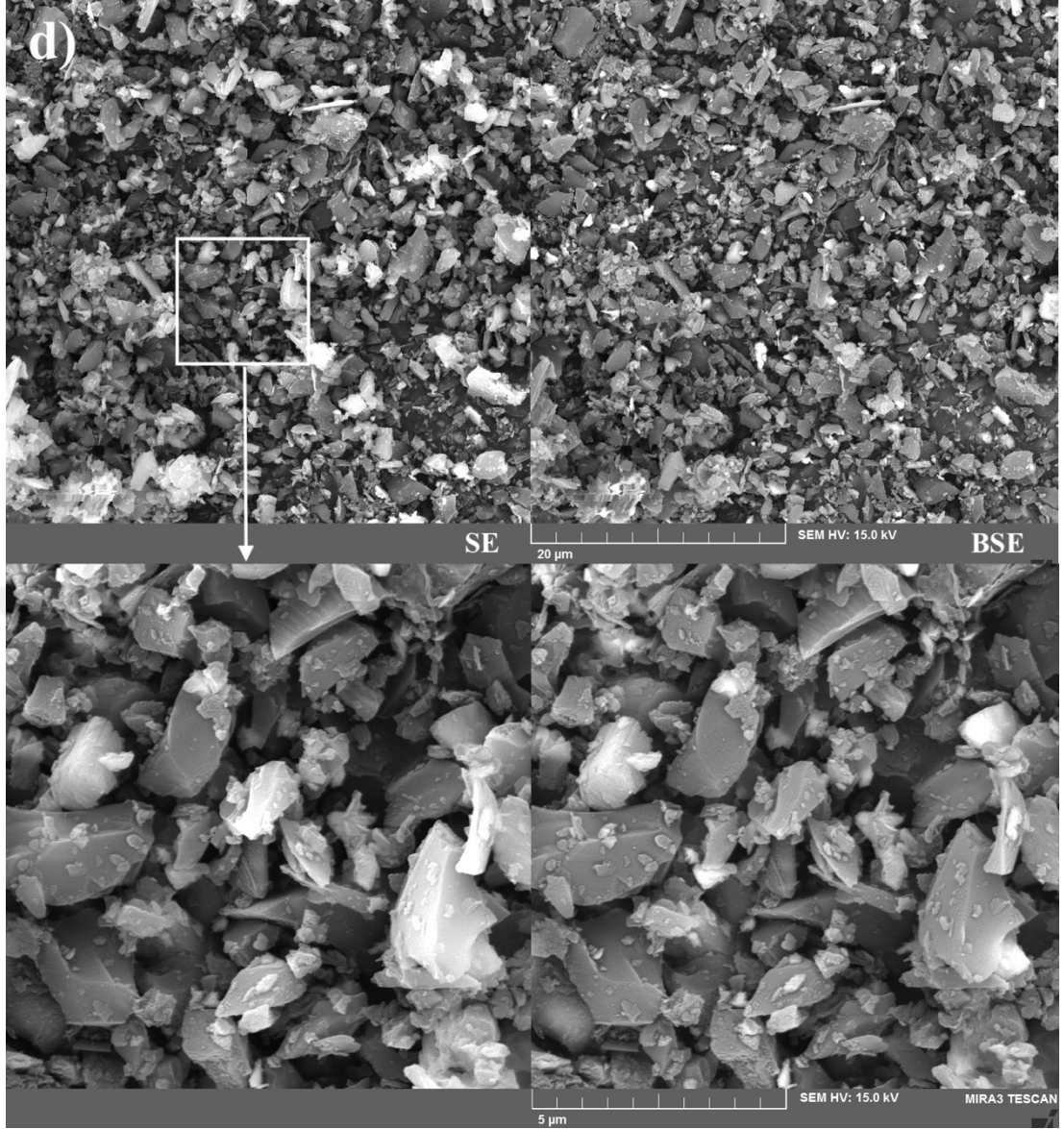
Şekil 5.6 a) %99 saflıkta Alüminyum tozu ve 24 saat bilyalı değirmende öğütülmüş; b) B₄C, c) Cam tozlarının SEM görüntüleri

Plaka üretiminde kullanılan öğünmüş tozların SEM görüntüleri Şekil 5.6'da gösterilmektedir. (a) su atomizasyon yöntemiyle üretilen alüminyum tozlarıdır. Damlacık şeklinde görülen, yakın fotoğraflarda da görüldüğü üzere herhangi bir empürite olmaksızın ve dentiritik fazdan döküm şeklinde büyüyerek uzamışlardır. (b) B₄C ortalama toz boyutu 1-5μm civarında keskin köşeli kırık gevrek tipik kübik karbür kırılma deseni görülmekte, yapıda B₄C ile birlikte düşük miktarda B₄C' yi başlatıcı olarak kullanılan Na ve Si tipinde orta yüksek yoğunluklu fazlarda görülmektedir. Bunlar daha çubuksu ve plaka şekliyleder fakat B₄C keskin köşeli ve kırıklı yapı olarak yüksek büyütmede görülmektedir. (c) öğütüldüğünde gerek ince uzun kırıklar gerek plakalar şeklinde deforme olan bir cam şeklidir. Plakalar şeklinde deforme olmasının alternatififi plakaların bir kristal yapıya sahip olması dolayısıyla bu yarı kristal hale

dönüştürülmüş bir cam faz olarak belirir, çubuksu yapılar daha çabuk vitrifiye olurken plaka tipi yapılar da malzemede kristal sistemi temsil eder. Yapılan XRD analizlerinde de cam fazın deformasyondan sonra düşük bir miktarda kristalliğe sahip olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin plakasal yapılardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



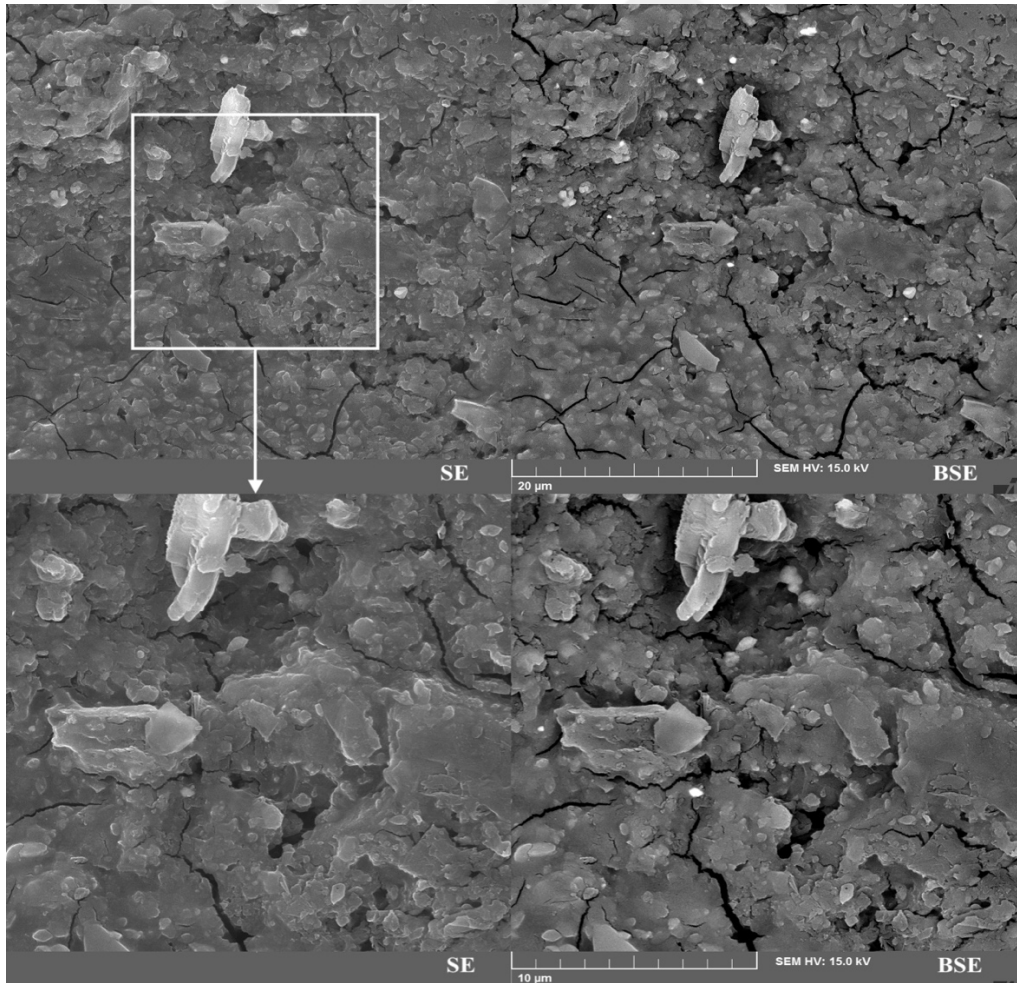




Şekil 5.7 24 saat bilyalı değirmende öğütülmüş; a) %20Al-%80B₄C, b) %10Al-%90B₄C, c) %5Cam-%95B₄C, d) %10Cam-%90B₄C tozlarının SEM görüntüleri

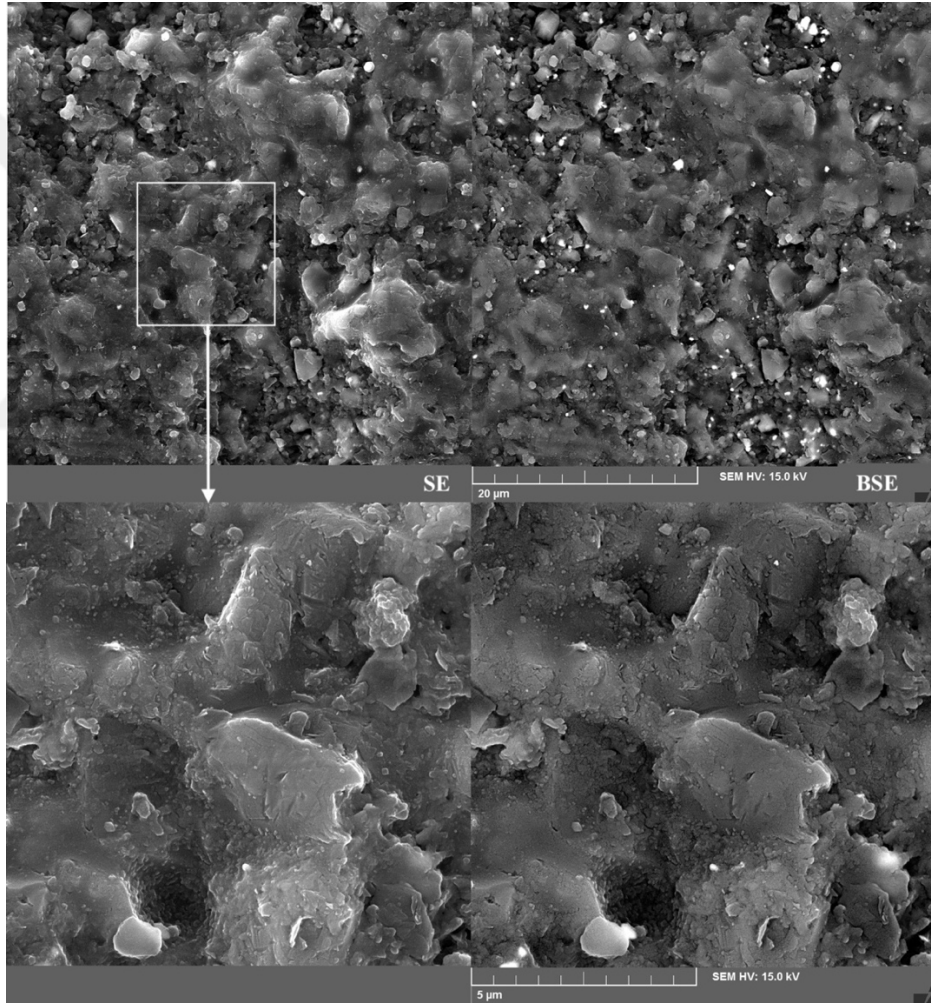
Uygun kompozisyonlarda karıştırılıp öğütülmüş tozların SEM görüntüleri Şekil 5.7’de gösterilmektedir. (a) yapının daha büyük fotoğrafı altta 50µm şeklinde görülmekte ve alüminyum B₄C’e göre daha büyük boyutta kaldığından dolayı öğütme etkisi yapmıştır. Buda kırıkların daha küçük boyutlarda ve daha büyük alana yayılmış, B₄C’ler şekilde görülmektedir. Yüzeye giren tozlar birbirlerini daha fazla öğütmüşler ve Al bilye gibi davranıp otojen öğütme yapmıştır. (b) öğütme sonrası alüminyumların yapıda plakalanıp tam dağılamadığı ve çok fazla deforme olmadıkları görülmüştür. Fakat deforme edilmiş toz üzerinden alınan SE ve BSE dedektörü görüntülerinde yani alttaki büyütülmüş görüntülerde tozların Al yüzeylere batma şeklinde mekanik olarak tutunduğu, yüzeyde bir seramik (B₄C) faz oluştuğu

görülmüştür. (c) BSE' de sağ tarafta beyazlar B_4C iken B_4C ' lerin ortalama toz boyutları 1-2 μm civarındadır. Diğer plakanamsı görünen tozlar yakın fotoğrafında bile daha gri renkte görüldüğü ve bunların elementel olarak düşük yoğunlukta olduğu dolayısıyla bunların cam faz olduğu, kesin köşeli kırıklı ve açık renkte görülen yapının B_4C olduğu bilinmektedir. Uzakta görünenlerde topaklaşmış, topaklaşan yerlerde hem cam hem B_4C var buda homojen bir karışım sağlanabildiğini göstermektedir. Ve buda preslenmeden sonra daha iyi verim elde edilmesini sağlamıştır. (d) %5 cam katkılı toza göre gri renkli bölgeler yani cam faz daha fazla görülmektedir. Cam fazın ortalama toz boyutu 5-10 μm , 1 μm tozlar ve çok küçülmüş fragmente olmuş tozlarda mevcuttur. Ozer A. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada dar tane boyut aralığında olan tozların daha sıkı bir ham numune oluşturarak gerek gözenek oluşumunun azalmasına gerekse yüksek teknolojik malzemelerin mekanik özellikler üzerine olumlu etkisi olduğunu belirtmişlerdir [39]. Öğütülmeden dolayı aralarda B_4C 'nin 1 μm ' nin altına düştüğü görülmektedir.



Şekil 5.8 1000 °C'de sinterlenmiş katkısız B_4C numunelerinin SEM görüntüsü

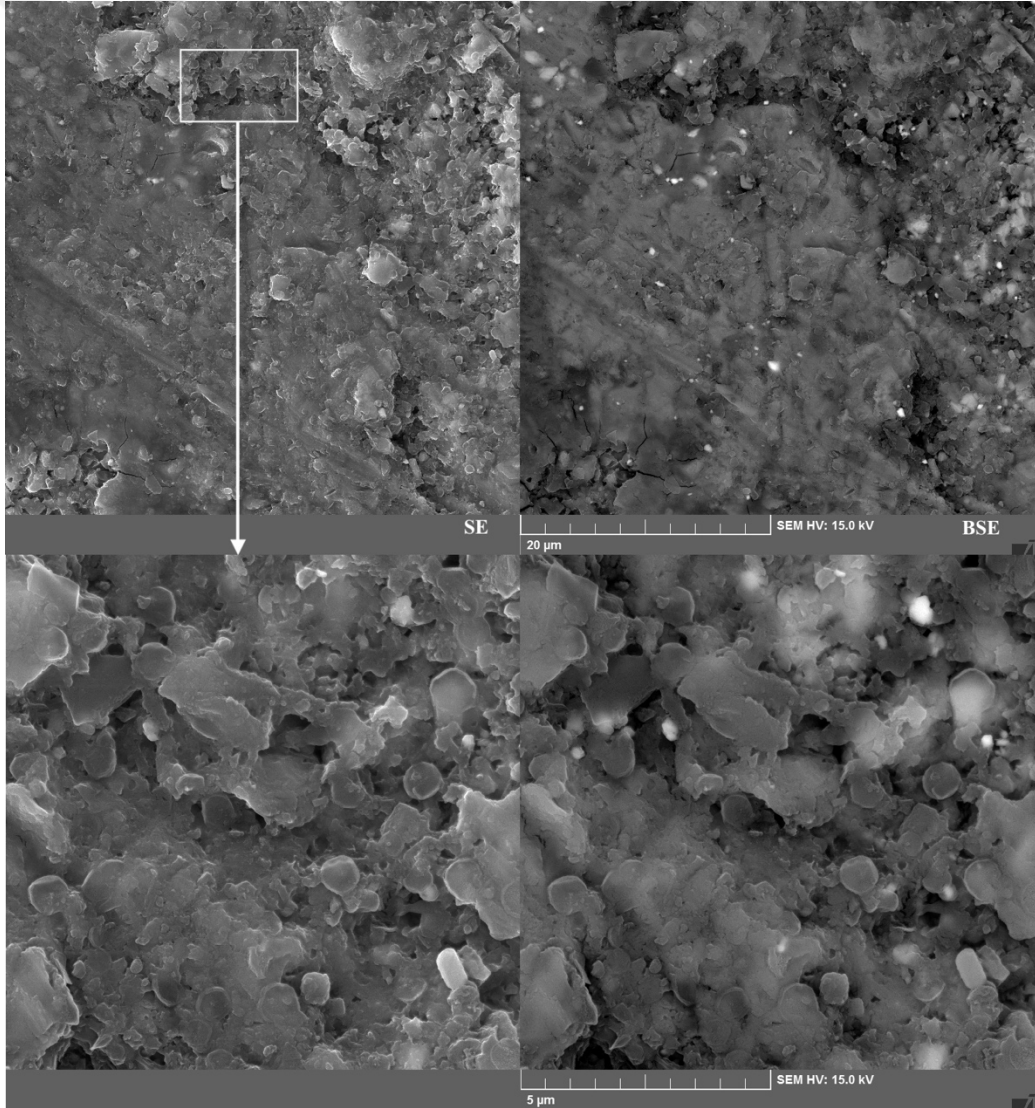
Katkısız B_4C 'ün sinterlenmiş numunelerinin SEM fotoğrafı Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Alınan tüm SEM fotoğraflarında hem SE hem BSE modu kullanılmıştır. İkinci elektron dedektörü görüntülerinde yüzeyel olarak yüksek miktarda pürüz görülmekle birlikte, yer yer gözenekler ve geniş yüzey çatlakları görülmektedir. Bu çatlakların soğuma esnasında B_4C ile kendi yapısında bulunan bir miktar Na-Si oksitli yapılarının cam faz oluşturup termal olarak farklı genleşmelerinden dolayı ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bununla birlikte camsı faz içerisinde B_4C 'ün kısmi keskin köşeli ortalama tane boyutu $1-3\mu m$ 'lik tozlar olarak dağıldığı görülmektedir. Geri saçınımlı elektron dedektör görüntüsünde ise yüzeyde yer yer harici tozlar dışında safsızlık görülmemektedir.



Şekil 5.9 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'de sinterlenmiş %10Al katkılı B_4C numunelerinin SEM görüntüsü

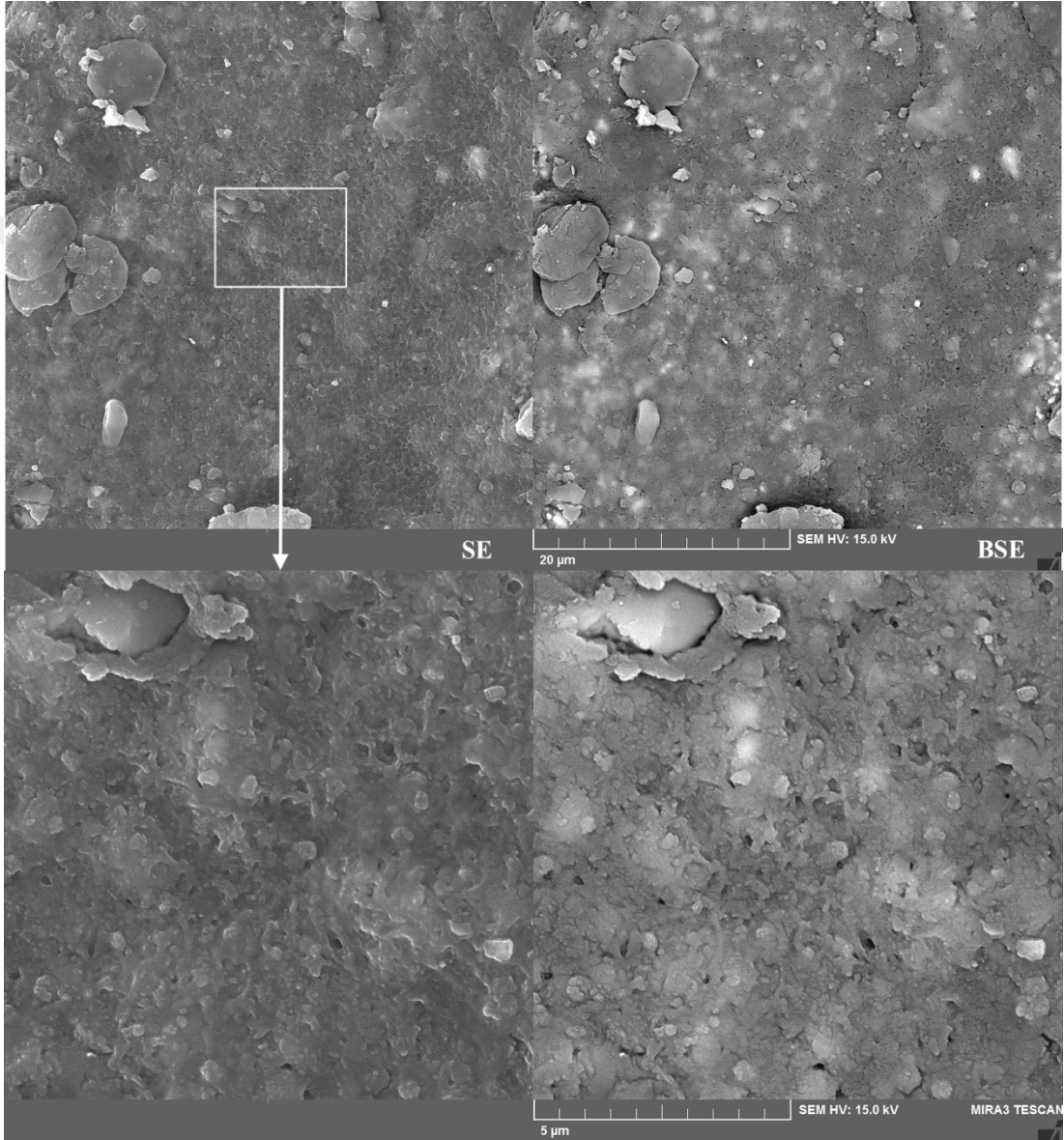
%10 Al katkılı B_4C 'nin sinterlenmiş SEM fotoğrafı Şekil 5.9'da görülmektedir. Yapının sinter pürüzlülüğüne sahip olduğu fakat gözenekleri Al (sıvı faz) ile dolduğu yakın büyütmelede de görülmektedir. BSE de elementel farklılık görülemez.

birlikte bunun sebebinin benzer yoğunluğa sahip element ve XRD analizinde de görülen bileşiklerin ($Al-AlB-B_4C-B_{11.15}C_{2.85}$) varlığından ileri geldiği düşünülmektedir. Yapıda alüminyumun sıvı faza geçebilmesiyle birlikte keskin köşelerde yuvarlaklaşma ve yeniden düzenlenme mekanizmasıyla daha sıkı (kompakt) sinter numune eldesi mümkün olmuştur. X ışınları analizinde görüldüğü gibi metalik Al ile beraber yüksek miktarda $B_{11.15}C_{2.85}$ fazının yapıda bulunduğu belirlenmiştir. Bunun da sebebinin alüminyumun B_4C ' ü kısmı olarak redükleyebilme potansiyeli olduğu düşünülmektedir. Ozer A. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre de sıvı faz sinterlemede karışımın ısıtılması esnasında yeniden düzenlenme mekanizması, yoğunlaşmadan önce devreye girip keskin köşelerin yuvarlaklaşmasına yani sıvının katıyı çözerek başka yerlerde biriktirip değme noktalarındaki basıncı azaltmasına sebep olmaktadır. [39]



Şekil 5.10 1000 °C'de sinterlenmiş %20Al katkılı B_4C numunelerinin SEM görüntüsü

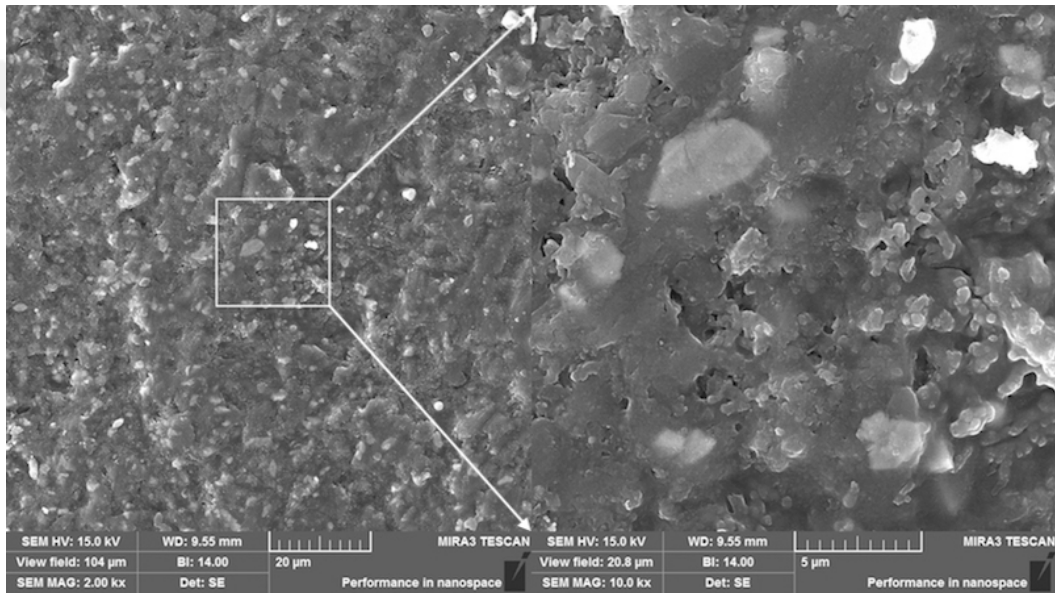
%20 Al katkılı B_4C ' ün sinterlenmiş SEM fotoğrafı şekil 5.10'da görülmektedir. Yapının yaş numuneden kalma yüzey çizikleri ile birlikte sinter pürüzlülüğüne sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca büyütülmüş BSE fotoğrafında da görüldüğü üzere artan Al miktarıyla yapıda daha açık renkte görünen tane sınırlarında ve yüzeyinde alüminyum elementi görülmektedir. Artan Al ile birlikte B_4C taneleri daha az keskin köşeli ve yuvarlak formda, büyük taneler oluşturmuş şekilde görülmektedir.



Şekil 5.11 1000 °C'de sinterlenmiş %5 Cam katkılı B_4C numunelerinin SEM görüntüsü

%5 cam katkılı B_4C ' ün şekil 5.11'de SEM fotoğrafı gösterilmektedir. B_4C içerisindeki cam faz yapıcılara ilave olarak katılanan soda camı $((Na_2Ca)Al_2SiO_6)$

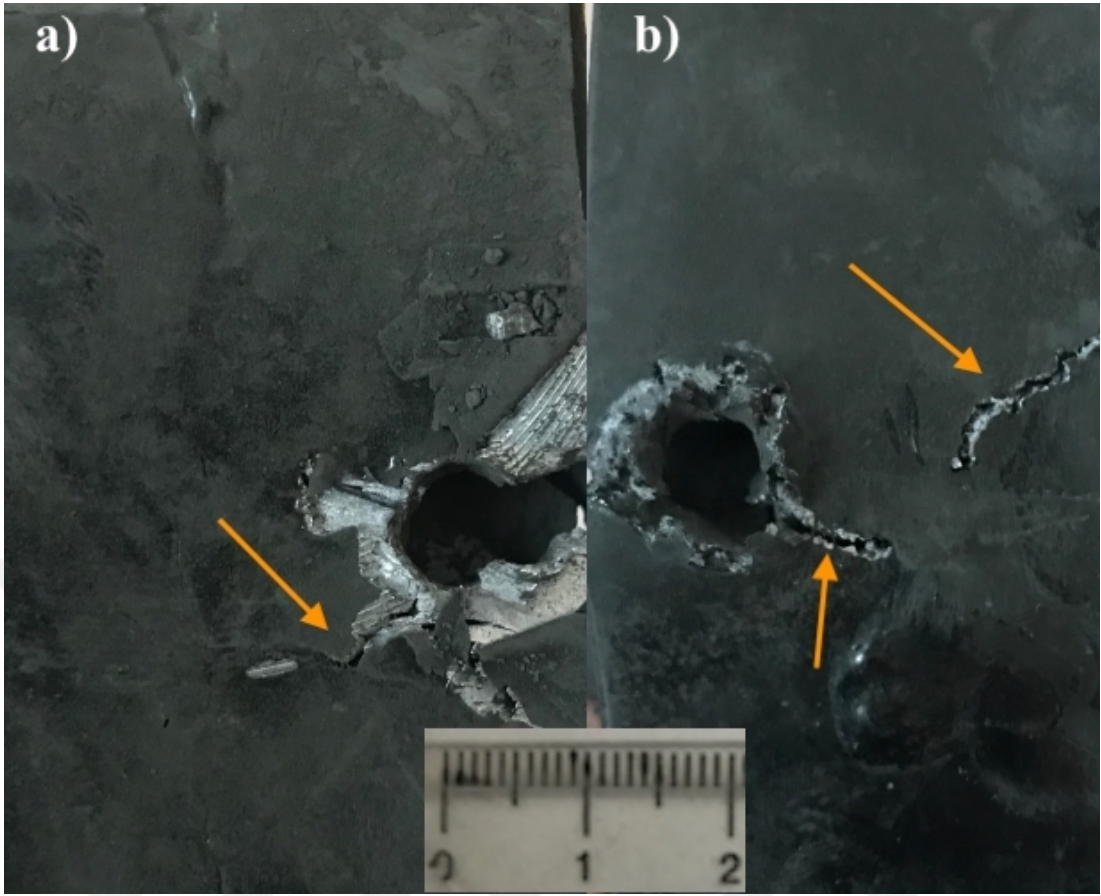
ile yapıda 1µm civarında ağ yapısı şeklinde cam fazın B₄C taneleri etrafında olduğu ve B₄C' ün BSE de görüldüğü gibi daha açık renkte yani daha yoğun kristal yapıya sahip olacak şekilde cam fazı içerisinde ortalama 2µm civarında küresele yakın tozlar olarak kaldığı görülmektedir. Bununla birlikte 20µm'lik BSE fotoğrafında cam faz üzerinde aşırı büyümüş altıgen şeklinde B₄C veya B_{11.15}C_{2.85} fazları da görülmektedir. Ozer A. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da karbür partikül takviyeli yapıların, farklı oksitlerin varlığında redüklenebildiği ve stokiyometrik olmayan fazların oluşabileceği görülmüştür. Bu cam oranındaki katkıyla B₄C artık keskin köşelerini kaybetmiştir [40].



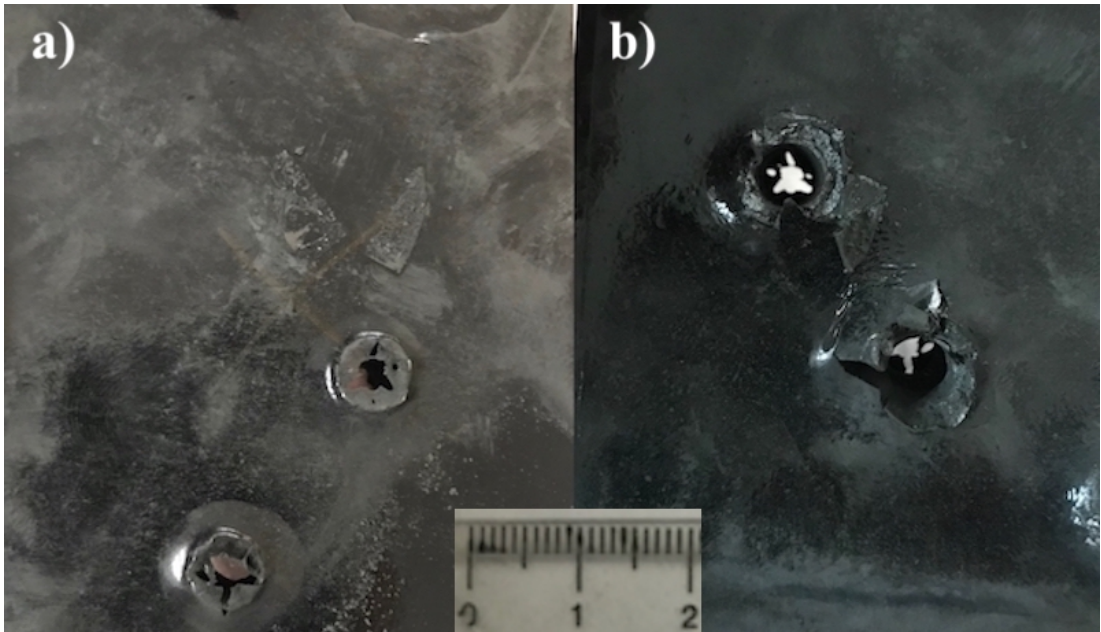
Şekil 5.12 1000 °C'de sinterlenmiş %10 Cam katkılı B₄C numunelerinin SEM görüntüsü

%10 cam katkılı B₄C'ün sinterlenmiş numunelerinin SEM fotoğrafı şekil 5.12'de gösterilmektedir. Yapıda yoğun miktarda cam bulunduğu hem tane sınırlarında hem de B₄C tanelerini çevreleyen şekilde kaplamalar oluşturmuş biçimde görülmektedir. Birbirine değme durumundaki B₄C' ler çözünme-yeniden çökme mekanizmasıyla cam fazdan kusularak 2-3µm civarına, bazen de 5µm'ye yaklaşan taneler olarak büyümüşlerdir. Bununla birlikte ayrık şekilde duran 1µm civarında yuvarlak köşelere sahip B₄C taneleri de görülmektedir. Yapılan X-ışınları analizinde de görüldüğü üzere (şekil 5.3) cam faz, kısmi kristalin şeklinde çökelmiş ve B₄C' ler ise viskoz cam halden katılaştıran faz içerisinde hapsolmuş ve düşük şiddetli B-C fazları şeklinde yapıda görülmektedir.

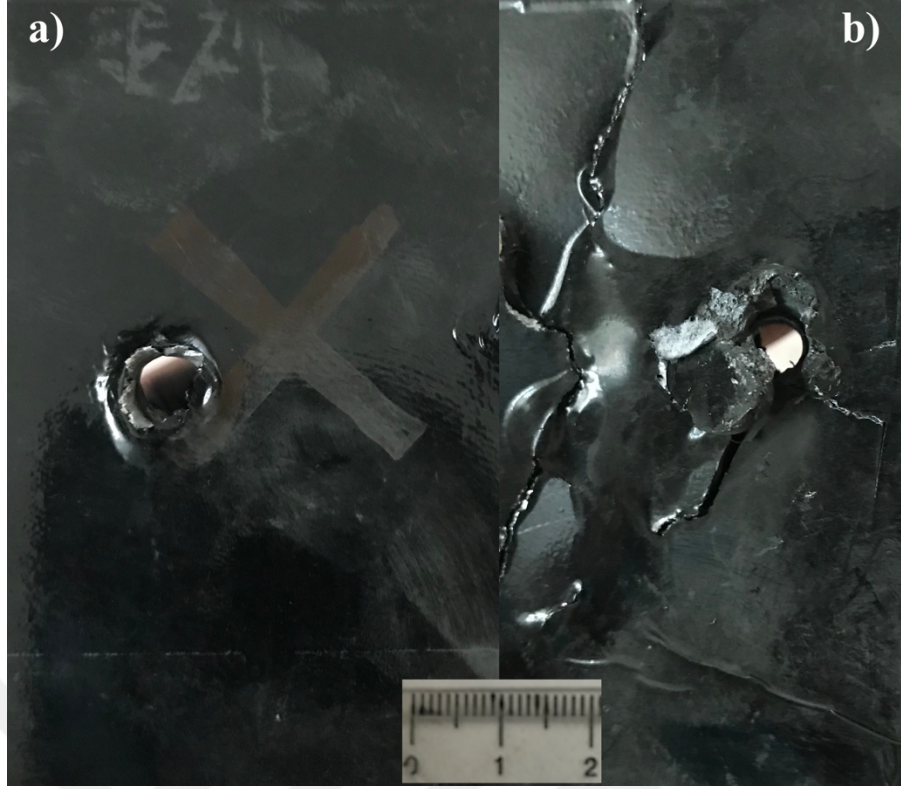
5.5 Balistik Sonuçlar



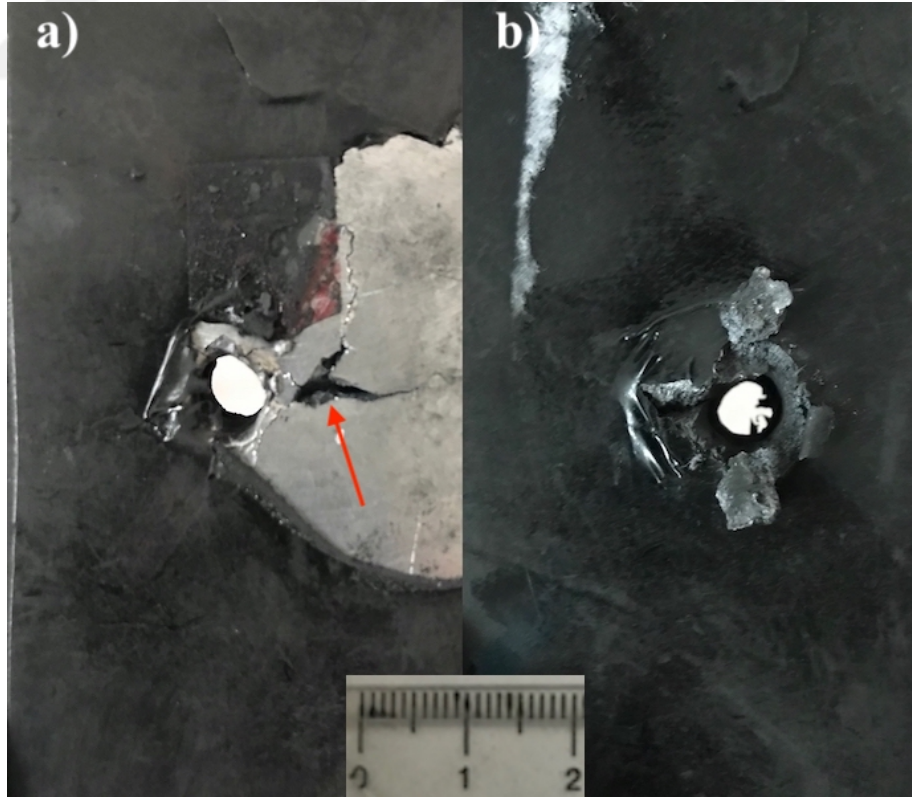
Şekil 5.13 100 metreden atışları yapılan, a) 20A zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 20A zırh plakasının mermi çıkış yönü



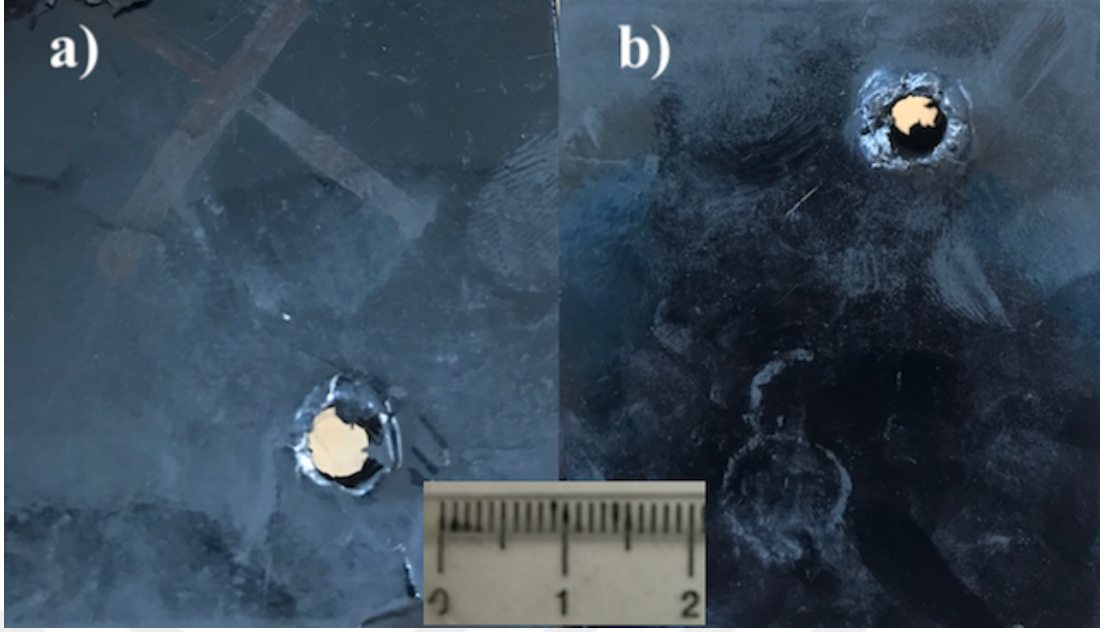
Şekil 5.14 100 metreden atışları yapılan, a) 10A zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 10A zırh plakasının mermi çıkış yönü



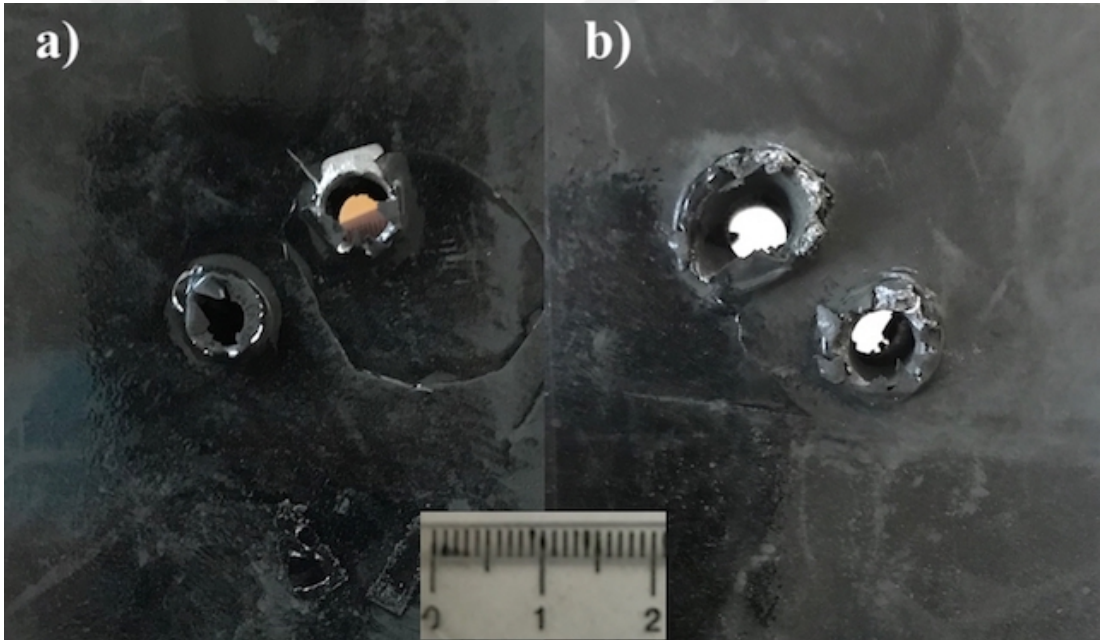
Şekil 5.15 100 metreden atışları yapılan, a) 5C zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 5C zırh plakasının mermi çıkış yönü



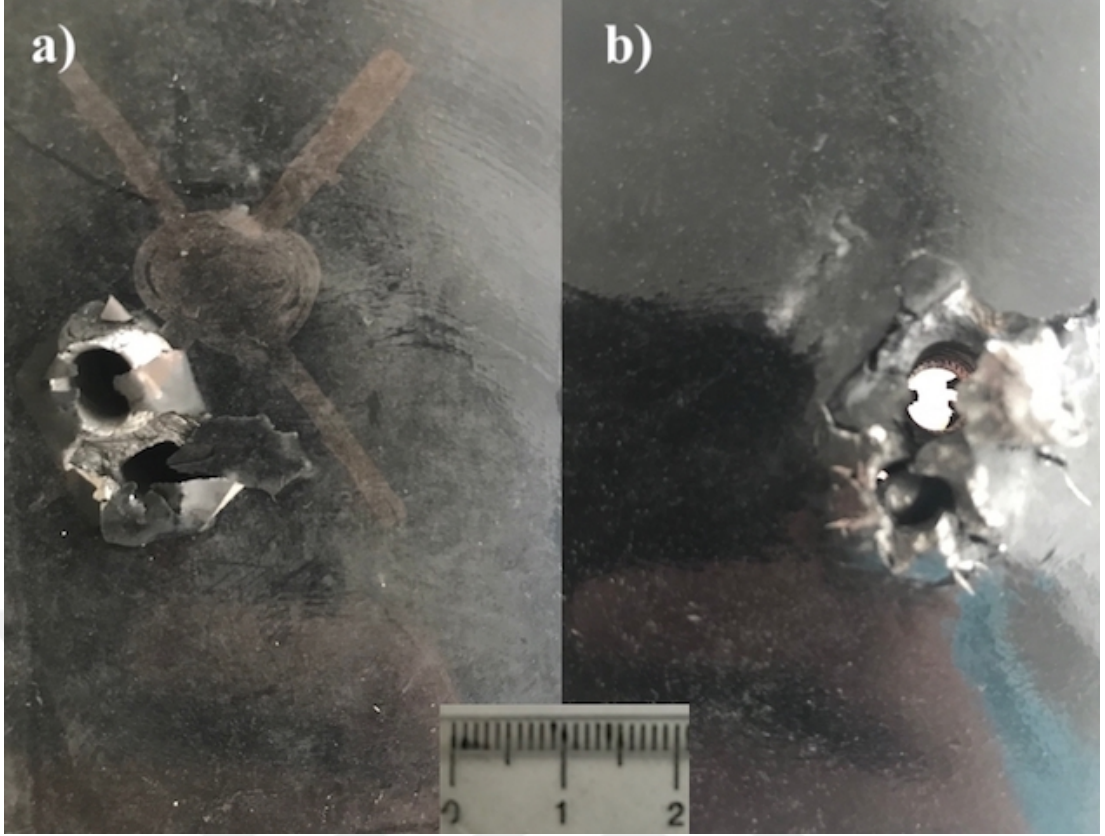
Şekil 5.16 100 metreden atışları yapılan, a) 10C zırh plakasını mermi giriş yönü, b) 10C zırh plakasının mermi çıkış yönü



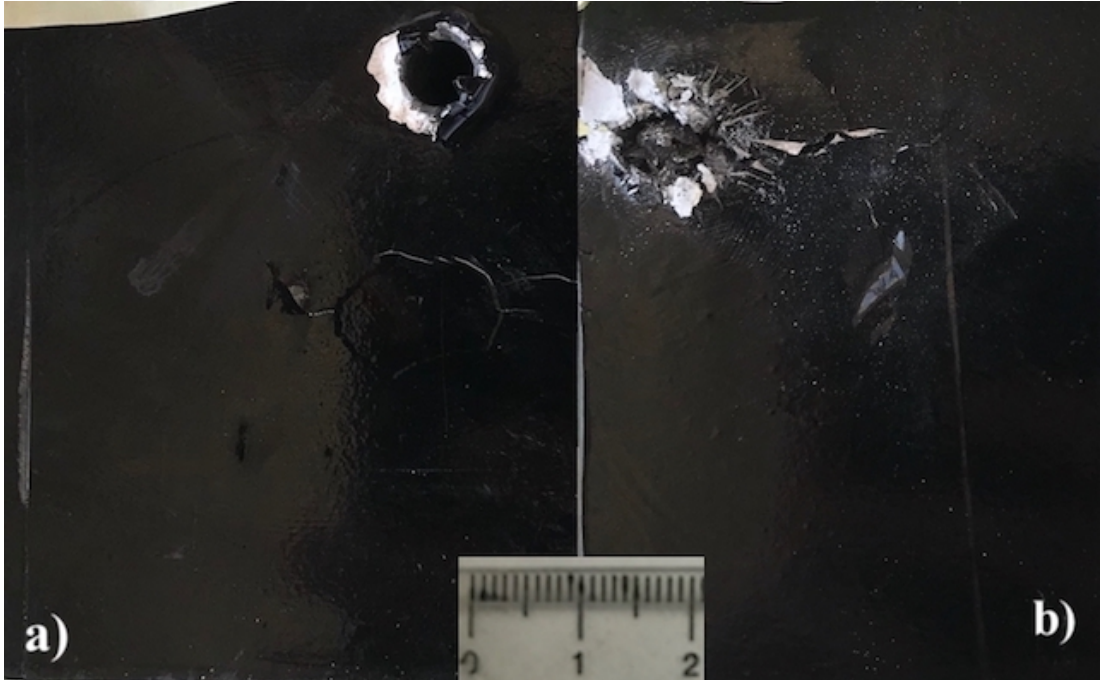
Şekil 5.17 50 metreden atışları yapılan, a) 20A zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 20A zırh plakasının mermi çıkış yönü



Şekil 5.18 50 metreden atışları yapılan, a) 10A zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 10A zırh plakasının mermi çıkış yönü



Şekil 5.19 50 metreden atışları yapılan, a) 5C zırh plakasının mermi giriş yönü, b) 5C zırh plakasının mermi çıkış yönü



Şekil 5.20 50 metreden atışları yapılan, a) 10C zırh plakasının mermi giriş yönü, b)10C zırh plakasının mermi çıkış yönü

Çizelge 4.4 ve 4.5’de belirtilen özelliklere sahip NATO standartlarında olan HK-33 piyade tüfeği ve ortalama 895 m/s hıza ulaşan mermi ile yapılan atışlar sonrasında 100m mesafede tüm zırh plakalarında tam penetrasyon meydana gelmiştir. 50m mesafe 20A-10A ve 5C zırh plakalarında da tam penetrasyon gerçekleşmiştir. Ancak 50m mesafede 10C zırh plakası kısmi perforasyon sonrası balistik performans sergilemiştir. 10A-20A zırh plakalarında Al’nin sünekliğinden ötürü yapraklanma meydana gelmiştir. Al’nin yapraklanmasındaki değişim, kompozit yapıda bulunan metal ve cam seramik takviyenin gevrek-sünek farklılıklarıdır. Yani, B₄C altıgen plakalardaki kompozit yapı farklılığı, mermi giriş ve çıkışındaki enerji absorpsiyonuna etki ederek, tam penetrasyon, kısmi penetrasyon ve perforasyon etkisi oluşturmuştur. Burada yapraklanma olmadan yapıda oluşabilecek şişmeler hem B₄C altıgen plakaların arayüzelerindeki boşluklara merminin çarpmış olabileceği hem de alüminyum katmanlar arasındaki tekrarlı döküm sebebi ile yapışmama sorunundan dolayı olduğu düşünülmektedir. Al döküm yapılarındaki döküm hataları da bölgesel farklılıklara sebep olabilir ve darbe etkisi ile merminin tutulamaması problemi ortaya çıkabilir.

Özellikle Şekil 5.18 b) ’deki yapraklanmanın iç yüzeyde B₄C sürüntüsü ile birlikte gevrek-sünek olduğu görülmektedir. Burada Al’nin düşük yoğunluğundan da dolayı tozlaşma görülmüş ve çıkışta da Al alaşımının gevrek-sünek yapısından dolayı kısmi yırtıklı fakat yine de kısa yapraklanma şeklinde deformasyon görülmüştür. 100 m’de Şekil 5.13’da ok işaretleriyle gösterilen çatlakların, döküm esnasındaki oluşan termal yırtıklar nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Ahmadi H. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya göre Al yırtıklarının çatlak yönünde ve yapraklanma şeklinde oluştuğu ve bunların enerji absorblama mekanizmasının Al levhaların deformasyonu olduğunu bulmuşlardır [37]. 100 m’de daha geniş bir çıkış görülmekte olup, bunun da merminin etki menzili içinde helezonlaşarak ilerlemesi ve daha geniş yüzeye darbe etkisi yapmasından olduğu düşünülebilir. Al katkısı yapılmış B₄C altıgen plakalar düşük sertlikten dolayı, Al zırh plakaları tam penetrasyon sergilemiştir. Karakoç H. ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da belirtildiği üzere artan B₄C partikül takviyesiyle yapıda gözenekler oluşmakta böylece yoğunlukta düşmektedir. Bununla birlikte toplam yapının sertliği de düşmekte ve Al plakanın balistik performansı düşmektedir [41] 50m ve 100m de test edilen 5C ve 100m de test edilen 10C zırh plakalarında şekil 5.15(b), şekil 5.16(b) ve şekil 5.19(b) de görüldüğü üzere takviye malzemesi olan camın gevrekliğinden ötürü delaminasyon sonucu yapraklanmanın uzun ve gevrek-

sünek karışımı kırılmalar meydana gelmiştir. Şekil 5.16' da ok işareti ile gösterilen boşluğun döküm boşluğu olduğu düşünülmektedir. 50 metreden atışı yapılan 10C zırh plakasında cam katkısının artmasıyla yapıdaki sertlik yükselmesi sonucu ve en yüksek yoğunluğa sahip olmasından ötürü şekil 5.20 b' de görüldüğü gibi başarılı olmuştur.

Bununla birlikte, deneysel olarak poligon şartlarından dolayı, B₄C'nin tam ortasından vurulmuş olabileceği ve diğer plakalarda da altıgen plakaların ara yüzeylerinden vurulmuş olma olasılığı da penetrasyon şartlarını etkilemiş olabilir. Ayrıca aynı numuneye birkaç sefer yapılan atış neticesinde de benzer noktalara deformasyon uygulanmasıyla oluşan hem kırılma hem de dökümdeki hatalardan dolayı penetrasyon oluştuğu da söylenebilir. Bu da 50 m'de 10C plakasının mermiyi tutup, 100 m'de tutamamasının sebebi olabilir.

Genel olarak testler sonucunda alüminyum alaşımın yapıda sünekliğe sebep olup sertliği düşürdüğü, cam katkısının ise yapıda sertlik ve yoğunluk artışına sebep olduğu görülmüştür.

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Bu yüksek lisans tezinde B_4C' e farklı oranlarda cam ve Al tozlarının katkılanması, gerekli toz karıştırma ve preslenme işlemlerinin ardından, camsı faz ve viskoz sinterlemeyi takiben döküm ve kaplama işlemleriyle tabakalı kompozit plaka üretimi çalışılmış, karakterize edilmiş, üretilen plakaların balistik performansları incelenmiştir.
- Bu çalışmada üretilen kompozit zırh plakalarından %10 cam katkılı zırh plakası yapılan balistik testler sonucunda fmj mermiye karşı başarılı olmuştur.
- Bu çalışmada 1000 °C' de sinterleme işlemi sonucu elde edilen kompozit zırh plakalarının Arşimet yoğunluk değerleri %70-83 aralığında değişmektedir. En yüksek yoğunluklu plakaların %10 cam katkılı B_4C' ün sinterlenmesiyle elde edilenler olduğu ölçülmüştür. Bunun sebebinin yüksek orandaki cam fazın B_4C tozlarını tam çevrelemesi ve hızlı viskoz sinterleme oluşturmasından ileri geldiği düşünülmektedir.
- Numunelerde artan yoğunlukla birlikte sertliklerde artmakta, fakat Al matrisli altıgenlere göre cam matrisli B_4C yapılarında, camın sertliği ve yüksek yoğunluktan dolayı daha yüksek sertlikler bulunmuştur. Bunun da cam matrise sahip Al plakanın balistik performansına olumlu etkisi olduğu görülmüştür.
- X-ışınları analizinde cam katkılı B_4C altıgen plakalarda, camın öğütülmesinden gelen yarı kristalin albit fazının varlığı ve B_4C' nin kısmi redüklenmeyle oluşmuş $B_{11.15}C_{2.85}$ fazının varlığı tespit edilmiştir.
- Toz karışımlarının SEM fotoğraflarında gerek Al gerekse cam tozlarının B_4C tarafından çevrelendiği, batma ve yüzey kaplama ile, tozların birlikte buldukları yani bir mekanik bağlanmanın söz konusu olduğu görülmüştür.
- Sinterlenmiş numunelerinin SEM analizinde de Al katkılı yapıların sıvı faz miktarının azlığı sebebiyle daha düşük yoğunluğa ulaştığı fakat cam fazın viskoz sinterleme ile daha yüksek yoğunluklara ulaşmış daha küresel B_4C partikülleri elde edildiği görülmüştür.
- Bu çalışmada Al katkılı plakalar gerek sertlik gerekse göreceli düşük sinterleme yoğunluğundan dolayı başarısız olmuşlardır. Sinterleme yoğunluğunun düşük basınçlı/vakum döküm yapılarak engellenebileceği veya alüminyuma parçacık takviyesiyle gerekli mekanik dayanım kazandırılarak

hem akıcılığın artırılmasıyla daha yoğun parçalar üretilebileceği hem de mukavemet ve sertliğin artırılabilmesi düşünülmektedir.

- Bu tez çalışmasında balistik performansın belirlenmesi TSK tarafından da kullanılan NATO standartlarına uyumlu bir tüfek olan HK-33(5.56 x 45 mm) ile atışlar yapılmış olup, ileri seviyedeki çalışmalarda farklı kalibre ve standartlarda silahlarla da test edilmesi planlanmaktadır.
- Bu tez çalışmasında teknik imkansızlıklardan ötürü sinterleme sıcaklığı 1000 °C olarak belirlenmiş olup hem camın hem de Al' un sıvı faza geçmesi için bu sıcaklık uygundur. Tam sinterleme yoğunluğuna ulaşılması için hem daha yüksek sıcaklık sağlayabilen bir fırın hem de daha iyi bir atm kontrolü sağlanmasının gerekliliği görülmüştür. Bundan sonra planlanan çalışmalarda B₄C' ün sinterlenmesi için 1400-1700°C' lik atm kontrollü fırınlar kullanılarak daha düşük katkı yapılması, böylece bor karbürün balistik performansa etkisinin bütünüyle ortaya çıkarılması planlanmaktadır.
- İleriki çalışmalarda B₄C ile başka sert seramik fazların (SiC-ZrO₂-WC-Al₂O₃ ve başka metaller) farklı oranlarda sinterlenebilirliği, faz oluşumu, yüzey morfolojisi gibi özellikleri farklı analitik tekniklerle de çalışılmalı, bunların mermi yüzeylerinde oluşturduğu darbe-kırma-yırtma ve plakada ki penetrasyon bölgeleri araştırılmalıdır.
- Balistik performansın katmanlar ve plaka yüzeylerinde oluşturduğu deformasyon uygun bir sonlu elemanlar yöntemi (ANSYS) ile incelenmeli böylece standartlara uygun ağırlık ve hacimde plakalar üretilebilmesi sağlanmalıdır.
- Plaka geometrisinde altıgenin tercih edilmesinin sebebi, plaka dizaynında her bir numunenin birbirleri üzerinde yüzey gerilmesinin minimum seviyede olması içindir. Böylece aradaki boşluklar da minimum olup, merminin etkisini sünek fazdan gevrek faza çabuk geçirmek amaçlanmıştır. Bundan sonraki aşamada, B₄C' ün yekpare plaka olarak sinterlenebilirliğinin çalışılması planlanmış olup daha büyük fırın ve atm kontrolü gerekmektedir.

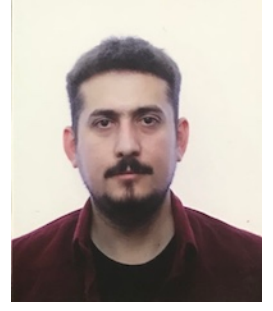
KAYNAKLAR

- [1] **Broutman, L. J., Krock, R. H.** (1967). *Modern Composite Materials*. Addison-Wesley Publisher Company, Reading, Massachusetts.
- [2] **Davey, N.** (1965). *A History of Building Materials*. Phoenix House, 260p, London.
- [3] **Jones, R. M.** (1975). *Mechanics of Composite Materials*. Scripta Book Company, 507p, Washington D.C.
- [4] **Smith, W., F.** (2006). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*. (N.G. Kınıkoğlu, Çev.) Literatür Yayıncılık, 855s, İstanbul.
- [5] **Lubin, G.** (1982). *Handbook of composites*. Van Nostrad Reinhold Co., 196p.
- [6] **Monteiro, N.S., Louro, L.H.L., Trindade, W., Elias, N. C., Ferreira, L.C., Lima, S. D.E., Weber, P.R., Suarez, M.C.J., Figueiredo, S.D.A., Pinheiro, A.W., Silva, D.C.L., Lima Jr, P.E.** (2015). "Natural Curaua Fiber-Reinforced Composites in Multilayered Ballistic Armor". *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*.
- [7] **Masta, M.R., Compton, B.G., Gamble, E.A., Zok, F.W., Deshpande, V.S., Wadley, H.N.G.** (2015). Ballistic impact response of an UHMWPE fiber reinforced laminate encasing of an aluminum-alumina hybrid panel. *International Journal of Impact Engineering*, 86, 131-144.
- [8] **Hu, D., Zhang, Y., Cai, Q.** (2017). Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems.
- [9] **Vermeeren, C.A.J.R.** (2003). An historic overview of the development of fibre metal laminates. *Applied Composite Materials*, 10, 189-205.
- [10] **Vlot, A.** (2001). *History of the development of a new aircraft material*, Dordrecht, Kluwer.
- [11] **Atas, C.,** (2007). An experimental investigation on the impact response of fiberglass/aluminum composites. *J Reinf Plast Compos*. 26, 1479-1491.
- [12] **Johnson, G.R., Cook, W.H.,** (1985). Fracture characteristic of three metals subjected to various strains, strain rates and high temperature. *Eng Fract Mech*, 21, 31-48.
- [13] **Gül, F.,** (1999). Seramik parçacık takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri ve özellikleri. *M.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 15, 101-113.
- [14] **Farag, M.M.** (1989). *Selection of materials and manufacturing processes for engineering desing*. Prentice Hall Ltd., 789p, Cambridge.
- [15] **Islam, M., Wallace, W.** (1984) Carbon fibre reinforced aluminium composites: a critical review. National Research Council, NRC No 23498, 2984/4.

- [16] **Hughes, D.H.** (1986) Fibres for reinforcement composite materials -Part 2. Metals and Materials, 365.
- [17] **Easterling, K.T.** (1999). Tomorrow's materials. The institute of metals, North American Publications Center. 675p, USA.
- [18] **Piatti, G.** (1993). Advances in composite materials. Applied science publishers Ltd., 379p, London.
- [19] **Phillips, N.L.** (1992). Desing with advanced composite materials, The design Council, London.
- [20] **Groover, P.M.** (1996). Fundemantals of modern manufacturing: Materials, processes and systems. Prentice Hall Inc. 1003p, USA-PA
- [21] **Kelly, A.** (1990). Composite materials: an overview. Pergamon Press and THE MIT Press, 876p, UK.
- [22] **Popovics, S., Erdey, M.** (1970). Estimation of modulus of elasticity of concrete-like composite materials, Materials and structures, 16, 253-260.
- [23] **Hirsch, T.J.** (1962). Modulus of elasticity of concrete affected by elastic modul of cement paste matrix and aggregate. ACI Journal, 59, 427-551.
- [24] **Hansen, T.C.** (1960). Strength, elasticity and creep as related to the internal structure of concrete. Chemistry of cement, 43, 709-723.
- [25] **Hull, D.** (1992). An intoduction to composite materials. Cambridge University Press, UK.
- [26] **Brooks, L.A., Zhou, H., Shen, Z.** (2017). Amonolithic "unibody" construction of structural assemblies through vacuum-assisted processing of agro-waste fibrous composites. Construction and Building Materials, 30, 886-896.
- [27] **Kocataşkın, F., Gököz, Ü., Boduroğlu, H.,** (1981). Y.Malz. Özel Konular – Komp. Malzemeler. İTÜ MMF, MMLS Ders Notları.
- [28] **Özer, A.** (2018). Kişisel görüşme. Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- [29] **KIRIKLAR, Ç.** (2014). Balistik zırh tasarımı ve performanslarının incelenmesi. CÜ, Müh. Fak., Metalurji ve Malzeme Bölümü, Malzeme seçim ve tasarım sunusu, 1-39.
(<https://prezi.com/yuos7pjlw5vz/balistik-zrh-tasarm/>). Erişim Tarihi: 14.06.2018.

- [30] **Aswani, K.B., Vikrant, V.C., Suhail A., Alagirusamy, R.** (2016). Ballistic impact response of kevlar reinforced thermoplastic composite armors. *International journal of impact engineering*, 89, 1-13.
- [31] **O'Masta, M.R., Crayton, D.H., Deshpande, V.S., Wadley, H.N.G.** (2015). Mechanisms of penetration in polyethylene reinforced cross-ply laminates. *International journal of impact engineering*, 86, 249-264.
- [32] **Sergio, N.M., Luis, H.L.L., Willian, T., Carlos, N.E., Carlos, L.F., Eduardo D.S.L., Ricardo, P.W., João, C.M.S., Andre, B.H.D.S.F., Wagner, A.P., Luis, C.D.S., Edio, P.L.Jr.** (2015). Natural Curaua fiber-reinforced composites in multilayered ballistic armor. *The Minerals, Metal & Materials Society and ASM international*.
- [33] **Huang, C.Y., Chen Y.L.** (2016). Desing and impact resistant analysis of functionally graded Al_2O_3 - ZrO_2 ceramic composites. *Materials and Desing*. 91, 294-305.
- [34] **Ögel, B., Yıldırım, O.R., Übeyli, M.** (2008). Investigation on the ballistic behavior of Al_2O_3/Al_{2024} laminated composites. *Journal of materials processing technology*, 196, 356-364.
- [35] **Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, O.R.** (2008). Invenstigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62mm armor piercing projectile. *Materials and desing*, 29, 2009-2016.
- [36] **Huang, C.Y., Chen, Y.L.** (2016). Effect of mechanical properties on the ballistic resistance capability of Al_2O_3 - ZrO_2 functionally graded materias. *Ceramics international*, 42, 12946-12955.
- [37] **Ahmadi, H., Liaghat, GH., Sabouri, H., Bidkhour, E.** (2012). Investigation on the high velocity impact properties of glass-reinforced fiber matel laminates. *Journal of composite materials*, 47, 1605-1615.
- [38] **Dey, S., Chatteraj, I.** (2016). Interaction of strain rate and hydrogen input on the embrittlement of 7075 T6 Aluminum alloy. *Materials science & Engineering A*, A661, 168-178.
- [39] **Ozer, A., Tür, Y.K.** (2013). Sintering behaviour and mechanical properties of Cr₃C 2-NiCr cermets. *Bulletin of Materials Science*, 36, 907-911.
- [40] **Ozer, A., Kriven, W.M., Tur, Y.K.** (2012). An experimental study on the effects of SiC on the sintering and mechanical properties of Cr₃C₂-NiCr cermets. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 32, 271-279
- [41] **Karakoç, H., Karabulut, Ş., Çıtak, R.** (2018). Study on mechanical and ballistic performances of boron carbide reinforced Al 6061 aluminum alloy produced by powder metallurgy. *Composites Part B Engineering*. 148, 68-80.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı	Çağatay KIRIKLAR
Doğum Yeri ve Tarihi	Kırıkkale, 25.11.1986
Medeni Hali	Bekar
Yabancı Dil	İngilizce
İletişim Adresi	Cumhuriyet Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü 58140 Sivas
E-posta Adresi	cagataykiriklar@gmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2015 – Met. ve Malz. Müh. Bölümü
Yüksek Lisans	Cumhuriyet Üniversitesi, 2015 – Halen

İş Tecrübesi

2013-2014	AKDAŞ DÖKÜM A.Ş (Döküm Stajı)
2014-2015	ANKAS ISIL İŞLEM A.Ş (Isıl İşlem Stajı)