



**TM YÖNTEMİ İLE B₄C TAKVİYELİ AA6061 METAL MATRİSLİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
VE BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Halil KARAKOÇ

**DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2017

Halil KARAKOÇ tarafından hazırlanan “TM YÖNTEMİ İLE B₄C TAKVİYELİ AA6061 METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. Adem KURT

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Recep ÇALIN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şener KARABULUT

Makine Bölümü, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 27/01/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Halil KARAKOÇ

27/01/2017

TM YÖNTEMİ İLE B₄C TAKVİYELİ AA6061 METAL MATRİSLİ KOMPOZİT
MALZEMELERİN ÜRETİMİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE BALİSTİK
PERFORMANSININ İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Halil KARAKOÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2017

ÖZET

Bu çalışmada; toz metalurjisi yöntemi ile AA6061 matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemeler üretilerek mekanik özellikleri ve balistik performansı incelenmiştir. Üretimde AA6061 matris tozu içerisine farklı oranlarda ağırlıkça % 0-5-10-15-20-25-30 B₄C tozu ilave edilerek Turbula marka üç boyutlu karıştırıcı ile 45 dakika karıştırılmıştır. Karışım tozlar 400 MPa basınç altında tek yönlü ve soğuk olarak preslenmiştir. Preslenen blok numuneler 550 °C’de 1 saat süre ile sinterlenerek yine aynı sıcaklıkta ekstrüzyon edilmiştir. Ekstrüze edilen numuneler 200 °C’de haddeleme işlemine tabi tutularak levhasal kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için T6 yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Ağırlıkça farklı oranlarda üretilen kompozit malzemelerin sertlik, çekme dayanımı, çapraz kırılma dayanımı ve darbe çentik dayanımları incelenmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin 9×19 mm ve 7,62×51 mm mermilerine karşı balistik performansları araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, sinterlemeye göre ekstrüzyon sonrası malzemelerin çapraz kırılma ve çekme dayanımları artmıştır. En yüksek mekanik özellikler haddeleme sonrası elde edilmiştir. Haddeleme sonrası yapılan 9×19 mm atışlarında artan takviye miktarına bağlı olarak balistik performans önce artmış daha sonrasında ise sertliğin artmasından dolayı azalmıştır. Tek plakalı kompozit levhalarda hem haddeleme sonrası hem de ekstrüzyon sonrası 7,62×51 mm mermilerine karşı balistik performans düşük çıkmıştır. Çift plakalı kompozit levhalarda ise 7,62×51 mm mermilerine karşı balistik performans iyileşmiştir.

Bilim Kodu : 91512

Anahtar Kelimeler : AA6061, B₄C, toz metalurjisi, kompozit malzeme, mekanik özellikler, balistik performans

Sayfa Adedi : 155

Danışman : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

FABRICATION OF AA6061 REINFORCED WITH B₄C METAL MATRIX
COMPOSITES AND INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND
BALLISTIC PERFORMANCES

(Ph. D. Thesis)

Halil KARAKOÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2017

ABSTRACT

In this study, mechanical properties and ballistic performances of B₄C particle reinforced AA6061 matrix composites produced by powder metallurgy were investigated. AA6061 matrix particles were mixed in varying ratio (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30%, mass fraction) of B₄C particle for 45 minute. These mixed powders were cold pressed under 400 MPa. The pressed compacts were sintered at 550 °C for one hour, and then were extruded at the same temperature. Extruded plate composite samples were produced by rolling the extruded samples at 200 °C. The T6 precipitation processes were applied to the composite samples for improving mechanical properties. The mechanical properties of the composites samples were characterized with hardness, tensile strength, transverse rupture strength and notch impact strength. Also, the ballistic performance of composite samples against 9 ×19 mm and 7.62×51 mm shootings were studied. As a result, the tensile and transverse rupture strength of samples increased with extrusion process compared to sintering process. The best mechanical properties were obtained with rolling process. The ballistic performance of the rolled samples against 9×19 mm shootings increased with increasing reinforcement ratio at the beginning, but it reduced with increasing reinforcement ratio due to increased hardness. Both extruded and rolled single plate samples show low ballistic performance against 7.62×51 mm shootings. The ballistic performance improves by using dual plate composite system against 7.62×51 mm shootings.

Science Code : 91512

Key Words : AA6061, B₄C, powder metallurgy, composite materials, Mechanical Properties, ballistic performance

Page Number : 155

Supervisor : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince çok kıymetli vaktini ayırıp yardım ve katkılarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Ramazan ÇITAK'a teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım. Tez izleme komitesi toplantılarında katkı ve değerlendirmeleri ile kıymetli tecrübelerinden yararlandığım değerli hocalarım Prof. Dr. Adem KURT ve Prof. Dr. Recep ÇALIN'a teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımı yapmış olduğum Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm başkanlığına, Prof.Dr. Halil ARIK'a, Doç.Dr. Ahmet DURGUTLU'ya, Yrd.Doç.Dr. Volkan KILIÇLI'ya ve araştırma görevlilerine teşekkür ederim. Çalışmalarımda bana sağlamış olduğu desteklerinden dolayı Hacettepe ASO 1.OSB Meslek Yüksekokulu müdürlüğüne, ayrıca Yrd.Doç.Dr. Şener KARABULUT'a teşekkür ederim. Tez sürecim boyunca desteklerinden ötürü Gazi Üniversitesi Fizik bölümün olan hocalarım Doç.Dr. Şükrü ÇAVDAR ve Doç.Dr. Haluk KOROLAY'a teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen hocam Yrd.Doç.Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye, Öğr.Gör.Dr. Uğur GÖKMEN'e, Yrd.Doç.Dr. Arif UZUN'a, ve Arş.Gör. Görkem KIRMIZI'ya teşekkürü bir borç bilirim. Mekanik test numunelerinin tel erezyon tezgâhında standartlara uygun kesilmesinde bana destek veren, Öznur Savunma Havacılık'a, Poyraz CNC Makine Silah Otomotiv Medikal İmalat A.Ş.'ye ve Hidrolift Firmasına teşekkür ederim. Balistik atışlarda sağlamış olduğu destekten dolayı Ankara Emniyet Müdürlüğü Kriminal Daire Başkanlığına teşekkür ederim. Ayrıca tezimi 07/2015-09 kodlu proje ile desteklediği için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim. Son olarak tez hazırlama sürecinde; sabır, sevgi, metanet ve anlayışla beni sürekli destekleyen Anneme, Babama, her iki kardeşime ve eşime şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xx
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	15
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	17
3.2. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler	18
3.2.1. Metal matrisli kompozit malzemeler	18
3.2.2. Polimer matrisli kompozit malzemeler	19
3.2.3. Seramik matrisli kompozit malzemeler	19
3.3. Takviye Çeşidine Göre Kompozit Malzemeler.....	20
3.3.1. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler	20
3.3.2. Fiber takviyeli kompozit malzemeler.....	20
3.3.3. Tabakalı kompozit malzemeler	21
3.4. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	21
3.5. Alüminyum Alaşımları.....	24
3.5.1. Alüminyum alaşımlarının gruplandırılması	26

	Sayfa
3.5.2. Al alaşımlarına uygulanan ısı işlemler.....	28
3.5.3. 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının genel özellikleri	31
3.5.4. AA6061 alüminyum alaşımı	31
3.6. Bor Minerali	31
3.6.1. Bor madenlerinin başlıca kullanım alanları	33
3.6.2. Bor karbür (B ₄ C)	34
3.6.3. Bor karbürün üretimi.....	35
3.6.4. Bor karbürün kullanım alanları	36
4. TOZ METALURJİSİ.....	37
4.1. TM ile Üretim Yönteminin Avantajları	39
4.2. TM ile Üretim Yönteminin Dezavantajları	40
4.3. TM Temel Üretim Basamakları	40
4.3.1. Toz üretimi	41
4.3.2. Toz karakterizasyonu	42
4.3.3. Harmanlama ve karıştırma	46
4.3.4. Tozların sıkıştırılması.....	47
4.3.5. Haddeleme ile toz metal parça üretimi.....	50
4.3.6. Ekstrüzyon ile toz metal parça üretimi.....	51
4.3.7. Sinterleme	53
4.4. TM Yöntemi İle MMK Üretimi	54
5. BALİSTİK.....	55
5.1. İç Balistik	55
5.2. Dış Balistik.....	55
5.3. Hedef (Nufuziyet) Balistiği.....	56

	Sayfa
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
6.1. Malzeme	59
6.2. Tozların Karakterizasyonu	59
6.2.1. Tozların tane şekillerinin belirlenmesi	59
6.2.2. Tozların tane boyutunun ölçülmesi	60
6.3. Kompozit Malzemelerin Üretimi	60
6.3.1. Tozların karıştırılması	60
6.3.2. Presleme işlemi	61
6.3.3. Sinterleme	62
6.3.4. Ekstrüzyon işlemi	63
6.3.5. Frezeleme işlemi	64
6.3.6. Haddeleme işlemi	65
6.3.7. T6 ısıtma işlemi	65
6.4. Malzeme Karakterizasyonu	66
6.4.1. Yoğunluk ölçümü	66
6.4.2. Mikroyapı analizleri	67
6.4.3. Sertlik testi	67
6.4.4. Mekanik test numunelerin hazırlanması	68
6.4.5. Çekme testi	69
6.4.6. Çapraz kırılma testi	70
6.4.7. Çentik darbe testi	71
6.5. Balistik Testler	72
7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	77
7.1. Kullanılan Tozların Karakterizasyonu	77

Sayfa

7.2. Ekstrüzyon İşleminin Yüzey Kalitesine Etkisi	78
7.3. Yoğunluk Değişimi ve Gözeneklilik Oranı.....	80
7.4. Mikroyapı Karakterizasyonu.....	83
7.4.1. Optik mikroskop analizleri.....	83
7.4.2. SEM ve EDS analizleri	88
7.5. Sertlik Değişimi	91
7.6. Çapraz Kırılma Dayanımı	94
7.7. Çekme Dayanımı Sonuçları	96
7.8. Çentik Darbe Deneyi Sonuçları	98
7.8.1. Kırık yüzeylerde EDS ve SEM analizleri	99
7.9. Balistik Test Sonuçları	103
7.9.1. 1.Grup malzemelerin balistik test sonrası makro ve mikro incelenmesi ..	103
7.9.2. 2.Grup malzemelerin balistik test sonrası makro ve mikro incelenmesi ..	111
7.9.3. 3.Grup malzemelerin balistik test sonrası makro ve mikro incelenmesi ..	118
7.9.4. 4.Grup malzemelerin balistik test sonrası makro ve mikro incelenmesi ..	127
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	137
8.1. Sonuçlar.....	137
8.2. Öneriler	140
KAYNAKLAR	141
ÖZGEÇMİŞ	153

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. A.B.D normlarına göre alüminyum alaşımlarının gösterimi	25
Çizelge 3.2. A.B.D normlarına göre alüminyum kullanım alanları	25
Çizelge 3.3. Alüminyum alaşımlarında temper kodlaması	30
Çizelge 3.4. Bor madeninin uygulama alanı ve kullanıldığı yerler	33
Çizelge 3.5. Bor karbür tozun genel özellikleri	34
Çizelge 3.6. Bor karbürün başlıca kullanım alanları.....	36
Çizelge 4.1. Standart Elek Boyutları.....	43
Çizelge 4.2. Sık kullanılan malzemeler için sıkıştırma basınç aralıkları.....	50
Çizelge 6.1. AA6061 ve B ₄ C'nin fiziksel özellikleri.....	59
Çizelge 6.2. 7.62×51 mm (m80) normal fişek özellikleri.....	74
Çizelge 6.3. 9×19 mm parabellum tabanca fişek özellikleri.....	75
Çizelge 6.4. Balistik test yapılan levhasal kompozit malzemeler.....	76
Çizelge 7.1. AA6061%15 B ₄ C'nin T6 yaşlandırma ısı işlem parametreleri	92

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Penetrasyon derinliğini ve şişkinlik ölçümünün şematik olarak gösterilişi	11
Şekil 2.2. Balistik test sonrası kurşunun mikro yapı analizi (a) Orijinal 7.62×51 mm zırh delici kurşun; (b) çarpma sonrası zırh delici kurşun; (c) kurşun ucu SEM morfolojisi; (d) siyah parçacık ve tipik kabarma ve karık alanın enerji spektrum analizi; (e) kurşun yüzeyinde eşit dağıtarak siyah parçacık	12
Şekil 2.3. (a) 7.62 mm deforme olabilir mermi, (b) pirinç ceket ile çekirdek, (c) sadece çekirdek	13
Şekil 2.4. 7.62 mm mermi geometrisinin şematik olarak çizimi	14
Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin üretildikleri malzeme sınıfları	16
Şekil 3.2. Matris malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması	18
Şekil 3.3. Takviye çeşidine göre kompozit malzemeler, (a) Parçacık takviyeli kompozit malzeme, (b) Kısa fiber takviyeli kompozit malzeme, (c) Sürekli fiber takviyeli kompozit malzeme, (d) Tabakalı kompozit malzeme	20
Şekil 3.4. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin farklı morfolojileri a) Rastgele yönelmiş süreksiz fiber, b) Yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit c) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber kompozit d) Örgü formunda fiberlerle pekiştirilmiş kompozitler	21
Şekil 3.5. MMK malzemelerin üretiminde kullanılan uygulamalar	23
Şekil 3.6. Alüminyum alaşımlarının alaşım elementine göre sınıflandırılması	24
Şekil 3.7. Alüminyum Alaşımlarının gruplandırılması	27
Şekil 3.8. Isıl işleme göre dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	27
Şekil 3.9. Isıl işleme göre döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	28
Şekil 3.10. Bor madenlerinin kullanım alanlarına göre dağılımı	32
Şekil 4.1. Toz metalürjisi yöntemi ile parça üretiminin şematik çizimi	38
Şekil 4.2. Toz metalürjisinde kullanılan olası parçacık şekilleri ve önerilen niteliksel tanımlar	41
Şekil 4.3. a) eleme cihazı, b) elek, c) eleme işleminin yapılışı, d) elek aralıkları	43

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Lazerle toz tane boyut ölçme sisteminin genel yapısı	44
Şekil 4.5. Toz tane boyutu ölçümü yapılan tekniklerin birbirleriyle karşılaştırılması..	46
Şekil 4.6. a) tek yönlü sıkıştırma, b) çift yönlü sıkıştırma.....	48
Şekil 4.7. Tozların kalıpta sıkıştırma işlem akışı.....	48
Şekil 4.8. Toz sıkıştırma kademelerinin bir görünüşü	49
Şekil 4.9. Haddelme ile toz metal parça üretimi, a) dikeyde, b) yatayda haddelme işlemi.....	51
Şekil 4.10. Ekstrüzyon işlem basamakları	52
Şekil 4.11. Ekstrüzyon işleminde malzeme akış çizgilerinin gösterimi	53
Şekil 4.12. Mikroskobik boyutta sinterleme işlemi, 1-parçacıkların temas ettiği noktalar, 2- temas noktaları büyüyerek “boyun” oluşur, 3- parçacıklar arasındaki gözenek boyutu küçülür, 4- gözenek boyutu küçülerek parçacıklar arasında tane sınırları oluşur	54
Şekil 4.13. MMK malzemelerin TM yöntemi ile üretim aşamaları.....	54
Şekil 5.1. Farklı darbe durumlarında muhtemel kırılma şekilleri.....	56
Şekil 6.1. Deneysel çalışmalarda yapılan işlemlerin akış sırası.....	57
Şekil 6.2. Toz metalürjisi yöntemi ile AA6061 matrisli B ₄ C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretimi	58
Şekil 6.3. Ekstrüzyon öncesi ve sonrası numune kesitleri, pilot çalışmalarda kullanılan kesitler (a), büyük ebatlarda malzeme üretmek için kullanılan kesitler (b)	64
Şekil 6.4. (a) AA6061 matrisli B ₄ C takviyeli kompozit malzemelere uygulanan T6 yaşlandırma ısı işlem parametreleri, (b) TM yöntemi ile üretilen AA6061 matrisli %15 B ₄ C takviyeli kompozit levha ve ısı işlem için alınan numune yerleri.....	66
Şekil 6.5. Çekme deney numune boyutları	69
Şekil 6.6. Çapraz kırılma deney numune boyutları.....	70
Şekil 6.7. Çapraz kırılma testinin şematik olarak gösterimi	71
Şekil 6.8. V-çentikli charpy deneyi numune boyutları	71

Şekil	Sayfa
Şekil 6.9. Açık hava atış poligonunun şematik olarak gösterimi (a) G3 tüfeği ile atış (b) MP5 tüfeği ile atış.....	73
Şekil 6.10. 7.62 ×51 mm (m80) normal fişek (a) ve 9 ×19 mm parabellum tabanca fişegi (b)	74
Şekil 7.1. AA6061 ve B ₄ C tozlarının SEM ve EDS analizleri	77
Şekil 7.2. AA6061 ve B ₄ C tozlarının parçacık boyut dağılımları.....	78
Şekil 7.3. Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk grafikleri	80
Şekil 7.4. Üretilen kompozit malzemelerin % yoğunluk grafikleri	81
Şekil 7.5. Üretilen kompozit malzemelerin % gözeneklilik grafikleri	83
Şekil 7.6. Haddeleme sonrası % 15 B ₄ C takviyeli kompozit malzemenin SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (a) 1. bölgenin, (b) 2. bölgenin EDS analizi	88
Şekil 7.7. Haddeleme sonrası % 15 B ₄ C takviyeli kompozit malzemenin yüzeyinden alınan genel haritalama görüntüsü (fast mapping)	89
Şekil 7.8. T6 yaşlandırma süresinin sertliğe olan etkisi.....	92
Şekil 7.9. Sinterleme, ekstrüzyon ve haddeleme sonrası ağırlıkça % B ₄ C oranına göre sertlik değişim grafiği	93
Şekil 7.10. Sinterleme, ekstrüzyon ve haddeleme sonrası ağırlıkça % B ₄ C oranına göre çapraz kırılma dayanımı değişim grafiği	95
Şekil 7.11. Ekstrüzyon ve haddeleme sonrası ağırlıkça % B ₄ C oranına göre çekme dayanımı değişim grafiği	97
Şekil 7.12. Ekstrüzyon ve haddeleme sonrası ağırlıkça % B ₄ C oranına göre darbe çentik dayanımları değişim grafiği	98
Şekil 7.13. Ekstrüzyon sonrası %15 B ₄ C kompozit malzemenin SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (a) 1. bölgenin, (b) 2. bölgenin EDS analiz	99
Şekil 7.14. Haddeleme sonrası %15 B ₄ C kompozit malzemenin SEM resmi ve EDS analizialınan bölgeler, (a) 1. bölgenin, (b) 2. bölgenin EDS analizi.....	100

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Çeşitli bor mineralleri	32
Resim 4.1. Toz tane boyutu ölçümünde kullanılan a) optik mikroskop, b) taramalı elektron mikroskobu, c) geçirmeli elektron mikroskobu (TEM)	45
Resim 4.2. Toz karıştırmada kullanılan makineler, a) V tipi, b) konik, c) spex üç boyutlu	47
Resim 4.3. a) atmosfer kontrolsüz, b) atmosfer kontrollü sinterleme fırınları	64
Resim 6.1. Mastersizer marka lazerle boyut ölçüm cihazı	60
Resim 6.2. (a) Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı, (b)Ağırlıkça % farklı oranlarda B ₄ C kullanılan karışım tozlar	61
Resim 6.3. (a) Hidrolik pres ve iç çapı 62 mm olan soğuk presleme kalıbı, (b) iç çapı 100 mm olan soğuk presleme kalıbı	61
Resim 6.4. Farklı takviye miktarlarında preslenen toz metal blok numuneler	62
Resim 6.5. Toz metal blok numunelerin sinterlenmesinde kullanılan Protherm marka fırın	62
Resim 6.6. (a) Pilot çalışmalarda kullanılan ekstrüzyon kalıbı, (b) büyük numune üretmek için kullanılan ekstrüzyon kalıbı	63
Resim 6.7. Ekstrüzyon edilen kompozit malzemelerin freze ile yüzeyinin işlenmesi	64
Resim 6.8. (a) Frezelenen malzemelerin haddelenmesi, (b) haddelenen malzemeler.....	65
Resim 6.9. (a) Leica DM4000M optik mikroskop, (b) JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu	67
Resim 6.10. (a) EMCO TEST Duravision 200 marka sertlik ölçüm cihazı, (b) üretilen kompozit numunelerin sertlik alınan bölgeleri	68
Resim 6.11. (a) CNC tel erezyon makinesi, (b) mekanik test numuneleri (c) CNC freze ile hazırlanan test numuneleri.....	69
Resim 6.12. Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip üniversal test cihazı	70
Resim 6.13. Instron Wolpert PW30 marka Charpy test cihazı	72

Resim	Sayfa
Resim 6.14. Açık hava atış poligonuna ait görünüm	72
Resim 6.15. Atış için hazır hale getirilen kompozit malzemeler (a) ekstrüzyon sonrası (b) haddeleme sonrası	73
Resim 6.16. Balistik testlerde kullanılan tüfekler	74
Resim 7.1. Küçük ebatlarda ekstrüzyon kalıbı içerisinde çıkarılan kompozit malzemeler.....	79
Resim 7.2. Büyük ebatlarda ekstrüzyon kalıbı içerisinde çıkarılan kompozit malzemeler.....	79
Resim 7.3. Sinterleme sonrası kompozit malzemelerin optik resimleri (50×)	84
Resim 7.4. Ekstrüzyon sonrası kompozit malzemelerin optik resimleri (50×)	86
Resim 7.5. Haddeleme sonrası kompozit malzemelerin optik resimleri (50×)	87
Resim 7.6. AA6061 matrisli B ₄ C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin haddeleme sonrası SEM resimleri (×500)	90
Resim 7.7. AA6061 matrisli B ₄ C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin haddeleme sonrası SEM resimleri (×3000)	91
Resim 7.8. Ekstrüzyon sonrası darbe çentik test numunelerinin kırık yüzey SEM resimleri	101
Resim 7.9. Haddeleme sonrası darbe çentik test numunelerinin kırık yüzey SEM resimleri	102
Resim 7.10. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapılan 12,7 mm kalınlığındaki sırası ile N1, N2, N3, N4 ve N5 numaralı numuneler	103
Resim 7.11. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapılan N1 nolu AA6061 numunesinin makro resmi.....	104
Resim 7.12. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapılan N1 nolu AA6061 numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde SEM resimleri.....	105
Resim 7.13. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapılan N2 nolu AA6061/%5 B ₄ C numunesinin makro resmi	106
Resim 7.14. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapılan N2 nolu AA6061/%5 B ₄ C numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde SEM resimleri	106

Resim	Sayfa
Resim 7.15. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N3 nolu AA6061/%10 B ₄ C numunesinin makro resmi.....	107
Resim 7.16. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N3 nolu AA6061/%10 B ₄ C numunesinin farklı büyütme SEM resimleri.....	108
Resim 7.17. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N4 nolu AA6061/%15 B ₄ C numunesinin makro resmi.....	109
Resim 7.18. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N4 nolu AA6061/%15 B ₄ C numunesinin farklı büyütme SEM resimleri.....	109
Resim 7.19. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N5 nolu AA6061/%20 B ₄ C numunesinin makro resmi.....	110
Resim 7.20. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N5 nolu AA6061/%20 B ₄ C numunesinin farklı büyütme SEM resimleri.....	111
Resim 7.21. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan 12,7 mm kalınlığındaki sırası ile N6, N7, N8, ve N9 numaralı numuneler	112
Resim 7.22. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N6 nolu AA6061 numunesinin makro resmi.....	113
Resim 7.23. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N6 nolu AA6061 numunesinin farklı büyütme SEM resimleri.....	113
Resim 7.24. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N7 nolu AA6061/% 5 B ₄ C numunesinin makro resmi.....	114
Resim 7.25. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N7 nolu AA6061/%5 B ₄ C numunesinin farklı büyütme SEM resimleri.....	115
Resim 7.26. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N8 nolu AA6061/% 10 B ₄ C numunesinin makro resmi	116
Resim 7.27. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N8 nolu AA6061/%10 B ₄ C numunesinin farklı büyütme SEM resimleri.....	116
Resim 7.28. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N9 nolu AA6061/% 15 B ₄ C numunesinin makro resmi	117

Resim	Sayfa
Resim 7.29. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N9 nolu AA6061/%15 B ₄ C numunesinin farklı büyütme SEM resimleri	118
Resim 7.30. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan sırası ile N10, N11, N12, N13 ve N14 numaralı numuneler	119
Resim 7.31. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N10 nolu AA6061 numunesinin makro resmi.....	120
Resim 7.32. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N10 nolu AA6061 numunesinin farklı büyütme SEM resimleri.....	121
Resim 7.33. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N11 nolu AA6061/% 5 B ₄ C numunesinin makro resmi.....	122
Resim 7.34. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N11 nolu AA6061/%5 B ₄ C numunesinin farklı büyütme SEM resimleri	122
Resim 7.35. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N12 nolu AA6061/%10 B ₄ C numunesinin makro resmi.....	123
Resim 7.36. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N12 nolu AA6061/%10 B ₄ C numunesinin farklı büyütme SEM resimleri	124
Resim 7.37. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N13 nolu AA6061/%15 B ₄ C numunesinin makro resmi.....	125
Resim 7.38. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N13 nolu AA6061/%15 B ₄ C numunesinin farklı büyütme SEM resimleri	125
Resim 7.39. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N14 nolu AA6061/%20 B ₄ C numunesinin makro resmi.....	126
Resim 7.40. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N14 nolu AA6061/%20 B ₄ C numunesinin farklı büyütme SEM resimleri	126
Resim 7.41. Ekstrüzyon sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N15 numaralı numune	127
Resim 7.42. Ekstrüzyon sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N15 nolu numunenin makro resmi	128

Resim	Sayfa
Resim 7.43. Ekstrüzyon sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N15 nolu numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM resimleri	129
Resim 7.44. Haddeleme sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N16, N17, N18 ve N19 numaralı numuneler.....	130
Resim 7.45. Haddeleme sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N16 nolu numunenin makro resmi	131
Resim 7.46. Haddelenmiş ve birbirine yapıştırılarak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N16 nolu numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM resimleri	131
Resim 7.47. Haddeleme sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N17 nolu numunenin makro resmi	132
Resim 7.48. Haddelenmiş ve birbirine yapıştırılarak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N17 nolu numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM resimleri	133
Resim 7.49. Haddeleme sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N18 nolu numunenin makro resmi	134
Resim 7.50. Haddelenmiş ve birbirine yapıştırılarak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N18 nolu numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM resimleri	134
Resim 7.51. Haddeleme sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N19 nolu numunenin makro resmi	135
Resim 7.52. Haddelenmiş ve birbirine yapıştırılarak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N19 nolu numunenin farklı büyütme ölçeklerinde SEM resimleri	136

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

g	Gram
μm	Mikrometre
cm³	Santimetreküp
m²	Metrekare
°C	Derece Santigrat
ρ	Yoğunluk
B₄C	Bor karbür
Al	Alüminyum

Kısaltmalar

Açıklamalar

AA6061	6061 alüminyum alaşımı
AMK	Alüminyum Matrisli Kompozit
EDS	Enerji dağılımlı spektroskopi analizi
HB	Hardness Brinell
HIP	Sıcak izostatik presleme
HV	Hardness Vickers
MMK	Metal matrisli kompozit
MPa	Megapascal
SEM	Tarama elektron mikroskobu
TM	Toz metalurjisi
XRD	X-ışınları difraktometresi

1.GİRİŞ

Zırh malzemeleri tank, askeri personel taşıma araçları, helikopter, uçaklar, gemiler ve personel korumasında geniş bir kullanım alanına sahip olması nedeni ile gizli ve stratejik teknolojiler arasında yer almaktadır. Devletler savunma, havacılık ve uzay sanayisine sahip olmayı ulusal egemenliğin bir gereği olarak görmekte, savunma teknolojilerinin gizliliğini yasal düzenlemelerle korumakta ve geliştirilmesini desteklemektedirler. Ayrıca savunma sistem tedariklerini serbest ticaret konusu yapmamaktadırlar. “Vizyon 2023” belgesinde ülkelerin ve şirketlerin uzun vadede rekabet güçlerini koruyabilmelerinin ve varlıklarını sürdürebilmelerinin yolu olarak bilgi teknolojileri başta olmak üzere biyoteknoloji, nanoteknoloji, kompozit malzeme teknolojilerinin milli imkânlarla üretilmesi ve geliştirilmesi vurgulanmaktadır [1]. Bu tür teknolojilerin ülkelerarası değişen politik ortamlarda para karşılığında bile temini güç olduğu dikkate alındığında ülkemizde zırh malzemesi üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ve sürekli olarak iyileştirilmesine yönelik AR-GE çalışmalarının yapılması büyük önem taşımaktadır. Vizyon 2023 Projesi “Savunma, Havacılık ve Uzay Sanayii Paneli” raporunda [2] küreselleşme akımıyla şekillenen dünya ekonomik düzeninin etkin bir oyuncusu olabilmek için ürün ve hizmetlerde küresel ölçekte rekabetçi olabilmek ve bu doğrultuda yenilikler yapma, yeni ürünler ve yeni teknolojiler üretme yeteneğine sahip olma gerekliliği, yurtiçinde özgün teknoloji ve ürün geliştirme hedefinin desteklenmesi, savunma sanayisinde kendi ulusal teknolojimizin geliştirilmesinin önemi vurgulanmaktadır. Çünkü Savunma, Havacılık ve Uzay sanayi sektörü uluslararası serbest ticaret antlaşmalarının kapsamı dışındadır ve devletlerin desteklerine açıktır.

Savunma Havacılık ve Uzay Sanayii Paneli tarafından odaklanılması önerilen teknoloji alanlarından ikisi; “Sivil ve askeri amaçlı kullanılabilecek insansız sistem ve robotik teknolojilerine sahip olma” ve “Ulusal savunma açısından kritik silah, karşı silah ve korunma teknolojilerine sahip olma” olarak ifade edilmiştir. Bu hedefleri gerçekleştirebilmek için de;

- Kompozit Malzeme Teknolojileri,
- Modelleme, Simülasyon ve Analiz Teknolojileri,
- İleri Malzeme İmalat Teknolojileri

konularına öncelik verilmesi ve AR-GE çalışmalarının desteklenmesi tavsiye edilmiştir.

Son zamanlarda kompozit malzemeler denizcilik, havacılık, otomotiv ve savunma sanayinde sıkça kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler; aynı veya farklı grupta yer alan iki ya da daha fazla sayıdaki mühendislik malzemelerinin en iyi özelliklerini bir araya getirerek tek bir malzeme oluşturmak için makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan yapılardır [3-4]. Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemeler arasında yaygın olarak kullanılan matris malzemeleri, Alüminyum, Magnezyum, Titanyum, Bakır ve intermetalik bileşiklerdir. Al düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, tokluk, korozyon direnci ve ucuz olmasından dolayı en yaygın olarak kullanılan matris malzemesidir [3-4]. Bu tip kompozit malzemelerin üretiminde SiC, Al₂O₃, B₄C seramik takviye elemanları en sık kullanılanlardır [4]. Al esaslı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini, matris yapı ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağı etkilemektedir. Burada matris yapı ile takviye elemanı arasındaki ıslatılabilirliğin iyi düzeyde olması, optimum özellikleri yerine getirmesi istenmektedir. Al matrisli kompozit malzemelerin birbirinden farklı üretim metotları vardır. Bu metotlar arasında en yaygın olanı katı hal üretim yöntemlerinden birisi olan toz metalürjisi yöntemidir. Toz metalürjisi yöntemi parçacık takviye elemanının matris yapı içerisinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlayarak mekanik özelliklerin malzemenin her tarafında aynı olmasını sağlamaktadır [5].

Vizyon 2023 strateji belgesindeki hedefler doğrultusunda, savunma ve havacılık sanayisinde kullanılmak üzere, balistik performansı yüksek, korozyona karşı dirençli, kaynak edilebilirliği ve şekillendirilebilirliği iyi olan AA6061 matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretiminin gerçekleştirilmesi, balistik performansının belirlenmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, TM yöntemi ile AA6061 esaslı B₄C parçacık takviyeli levhasal kompozit malzemelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin uygun ekstrüzyon parametreleri belirlenmiştir. Üretilen levhasal kompozit malzemelere T6 ısıtıl işlemi (çökelme sertleşmesi) uygulanarak bu malzemelerin dayanım ve sertliği artırılmıştır. Daha sonra ise numunelerin her birisinin mekanik testleri (sertlik, çekme, çapraz kırılma) yapılarak balistik performansı analiz edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Kompozit malzemeler içinde MMK'ler önemli bir yer tutmaktadır. Alüminyum, MMK'ler içinde en çok rağbet gören matris malzemesidir. Alüminyum Matrisli Kompozitler (AMK) tedarik kolaylığı, düşük yoğunlukları, yüksek mukavemetleri, üstün aşınma dayanım özellikleri ile birçok mühendislik uygulama alanı için potansiyel bir malzeme haline gelmektedir [6].

Kompozit malzemeler, başta otomotiv sanayi olmak üzere uçak ve elektronik sanayinde, savunma sanayinde, uzay endüstrisinde ve talaşlı imalat sektöründe hafif, yüksek aşınma direnci ve sıcaklık dayanımı istenen durumlarda tercih edilmektedir [7-8]. Uçak sanayiinde grafit elyaf takviyeli Al matrisli kompozitler roket ve helikopter yapılarında, Al_2O_3 elyaf takviyeli Al matrisli kompozitler dişli kutularının imalinde, Bor-SiC karışımı elyaf takviyeli Al matrisli kompozitler jet motoru kanatçıklarında kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde üstün özelliklerinden dolayı fren elemanları, fren disk ve balataları, motor blokları, pistonlar, akü plakaları, valfler, kavrama kolu, silindir gömlekleri, amortisör silindiri, pompalar, dişliler, kalibre aparatları ve gergi kolları gibi önemli bir uygulama alanı bulmaktadırlar. Otomotiv sanayisinde kullanılan dökme demir fren kampanalarının yerini SiC takviyeli Al matrisli kompozitler almıştır. Ayrıca Al matrisli grafit- Al_2O_3 parçacık takviyeli kompozit malzemelerden araba motor bloklarında kullanılan silindir gömlekleri yapılmaktadır. MMK malzemelerin ilk kullanıldığı yerlerden biriside uzay mekiği araçlarıdır [7-11].

Zhao ve diğerleri (2005), Mekanik Alaşımlama (MA) yöntemiyle 6061 alüminyum matris içerisine hacimce %8 oranında SiC parçacık takviye ederek kompozit üretmişlerdir. Tozları 5 saat MA yaptıktan sonra takviye elemanlarının mikro yapı içerisinde homojen olarak dağıldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca MA yönteminde toz kirliliği oluşmasının sinterleme işlemini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varmışlardır [12].

Abenojar ve diğerleri (2007), mekanik alaşımlama tekniği ile Al matrisli B_4C takviyeli kompozit malzeme üretmişlerdir. Parçacıkların mikro yapı içinde homojenliğini sağlamak amacı ile 12 saate kadar MA yapmışlardır. MA sonrası SEM (taramalı elektron mikroskobu) ile mikro yapı incelemeleri ve görünür yoğunluk ölçümü yapmışlardır. Çalışmada en iyi sinterlemenin $635\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 1 saat süre ile oluştuğunu gözlemlemişlerdir [13].

Torralba ve diğerleri (2003), Toz Metalürjisi (TM) yöntemiyle üretilen AMK'nin neden tercih edildiğine dair araştırma yapmışlardır. Alüminyumun düşük yoğunluğu, korozyon direncine ve rijitliğe sahip olmasından dolayı en çok tercih edilen matris malzemesi olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca AMK malzemelerin farklı üretim metotları ile kolaylıkla üretililebildiğini bulmuşlardır. Üretim metotları arasında TM tekniğinin diğer tekniklere göre oldukça etkili ve ekonomik olduğunu savunmaktadırlar [14].

Lin ve diğerleri (2004), TM yöntemi ile üretilen Cu-Sn/SiC ve AA6061/SiC MMK'nın tane sınırlarındaki birleşmelerin dayanımına ve matris/takviye parçacık boyutlarının birbirlerine oranlarına bağlı olarak basma gerilmeleri altındaki plastik deformasyon mekanizmalarını ve sertlik değerlerini incelemişlerdir. Matris/takviye parçacık boyutunun birbirine yakın olmasıyla malzemenin sertliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca takviye hacim oranı belli bir noktaya kadar (%5) artması ile kompozitin sertliği takviyesiz malzemenin sertliğinden daha yüksek olmuştur. Ancak daha yüksek takviye hacim oranlarıyla birlikte takviye parçacıkları temas oranı artmaktadır. Matris/takviye parçacıkları arasındaki birleşme doğal olarak matris tozlarının kendi aralarındaki birleşme kadar sağlam olamamaktadır. Sinterleme sıcaklıkları matris malzemelerine bağlı olarak seçildiği için bu sıcaklık değerleri takviye parçacıklarının kendi aralarında sinterlenmeleri için yetersiz düzeyde kalabilmektedir. Bu durumda kompozitin plastik deformasyonu malzemenin sertliğinin düşmesine neden olan sınır kayması şeklinde meydana gelmektedir. Kompozitler akma dayanımlarının daha üstüne yüklendiklerinde iri parçacık boyutlu takviyeli kompozitlerin plastik deformasyon dayanımı küçük boyutlu tozlu olanlara nazaran daha düşüktür. İri boyutlu parçacık içeren kompozitlerde matris boyunca plastik gerinmenin dağıtılması iki iri parçacık arasındaki matris alanının daha geniş olmasından dolayı daha zordur. İri parçacıklara komşu kısımlarda plastik gerinme yığılmasının çok daha yüksek olması kompozitin tümünde akmayla sonuçlanan matris yakınında erken hasara neden olacaktır. Bunun yanında daha büyük boyutlu parçacıkların kırılması daha olasıdır ve şiddetli gerilme ve gerinme yığılımları seramik/metal ara yüzeyinde ayrılmalara neden olmakta ve bu durumda kompozitin dayanımının düşmesine neden olmaktadır [15].

Amigo ve diğerleri (2000), 75 µm parçacık boyutunda 6061 Al alaşımına çok daha küçük boyutta Si₃N₄ takviye parçacıkları ilave ederek kompozit malzeme üretmişlerdir. Kompozit malzemelerin üretimini 250 MPa basınç altında soğuk presleme işlemi yaptıktan sonra 823K sıcaklıkta 25:1 oranında sıcak ekstrüzyon yaparak gerçekleştirmişlerdir. Yapılan testlerde

%10–15 takviye hacim oranlarına kadar malzemenin çekme dayanımında artış olduğu gözlemlenirken, %15’den fazla olan takviyelerde çekme dayanımının düştüğünü gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak takviye parçacık boyutunun matris parçacık boyutundan daha küçük seçilmesi halinde yüksek takviye oranlarında homojen parçacık dağılımını elde etmede karıştırma güçlüklerini belirlemişlerdir [16].

Hu ve diğerleri (2001), Borolyn tekniği kullanarak üretilen AA7093/B₄C kompozitinin mikro yapısını incelemişlerdir. Sonuç olarak, B₄C parçacıklar alüminyum matris içerisinde homojen olarak dağıldığını bulmuşlardır. SEM analizlerinde B₄C parçacıklarının matris yapı içerisinde kırıldığını fark etmişlerdir. Kompozitteki yüksek mekanik özelliklerin ortaya çıkması ile Al/B₄C arayüzeyinde güçlü bir bağ oluşmasından dolayı yüksek mekanik özelliklerin ortaya çıktığını görmüşlerdir [17].

Chen ve diğerleri (2009), AA6xxx ve AA7xxx alüminyum alaşımları ekstrüzyon sonrası T6 ısıtıl işlemine tabi tutularak gerilme-gerinme davranışı geniş aralıkta şekil değiştirme hızlarında incelemişlerdir. Çekme testleri, düşükten orta dereceye kadar olan şekil değiştirme hızlarında, standart gerilme test makinalarında gerçekleştirirken, yüksek derecedeki çekme testlerini gerçekleştirebilmek için ise Splithopkinson gerilme çubuğu kullanmışlardır. Ekstrüzyona uğramış alüminyum alaşımlar anizotropik mekanik özelliklere sahip olmasından dolayı testleri ekstrüzyon yönüne uygun olarak 3 yönde yapmışlardır. Sonuç olarak AA6xxx alaşımları gerilme-gerinme davranışının anlamlı bir duyarlılık oluşturmadığını, AA7xxx alaşımlarının makul (orta derecede) duyarlılık gösterdiğini bulmuşlardır [18].

Ganguly ve diğerleri (2001), AA6061 matrisli Al₂O₃ parçacık takviyeli kompozit malzemelerin yüksek sıcaklıklarda kırılma ve deformasyon mekanizmalarını incelemişlerdir. AA6061/20%Al₂O₃ kompozit malzemesi sıvı metal karıştırma ve direkt çil döküm ile DURALCAN firması tarafından imal ettirmişlerdir. Malzemenin hem döküm hem de döküm sonrası yapılan sıcak ekstrüzyonunu incelemişlerdir. Döküm ve ekstrüze edilmiş metal matrisli kompozit malzemelerin tek eksenli çekme ve basma gerilmelerini, 15 ve 550 °C sıcaklık aralıklarında test etmişlerdir. AA6061/20%Al₂O₃ kompozitlerin kırılma ve deformasyon mekanizmaları 300-550 °C değişen sıcaklıklarda ve 0,1-10 s⁻¹ gerilme oranlarında ölçmüşlerdir. Sünekliğin çok büyük bir ihtimalle sıcaklığa bağlı olduğunu savunmaktadırlar. 550 °C’de ara yüzey ayrılması gözlemlenirken 300 °C’ de parçacık

çatlamasını görmüşlerdir. Yüksek süneklik oranlarının 425 °C’ de olduğunu tespit etmişlerdir [19].

Abood ve diğerleri (2013), AA6061 alüminyum alaşımına uygulanan ısıtıl işlem davranışlarının yorulma ömrüne etkilerini incelemişlerdir. AA6061 alüminyum alaşımına üç tip ısıtıl işlem uygulamışlardır. İlk olarak (T6) yaşlandırma ısıtıl işlemi ve soğuk deformasyon yapmışlardır. İkinci olarak (T4) çözündürme ısıtıl işlemi ve doğal yaşlandırma yapmışlardır. Son olarak (O) ısıtıl işlemi uygulamışlardır. Daha sonra ASTM B557-84’e göre standart test numunesi her bir ısıtıl işlem için 5 test numunesi hazırlamışlardır. Düşük dönüşüm kırılma testi için ASTM 606-80’e göre numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan yorulma test numunelerinin yüzey pürüzlülüğünü 0.17 µm olarak hesaplamışlardır. Son olarak da kırılan yüzeylerin SEM görüntülerini almışlardır. Gerilme test sonuçlarına göre tavllanmış (O) durumu T6 ve T4 ısıtıl işlemine göre bir hayli değişmiştir. Yorulma dayanımları AA6061-T6 için 338 MPa, AA6061-T4 için 307 MPa ve AA6061-O için 127 MPa bulmuşlardır [20].

Ramnath ve diğerleri (2014), Al₂O₃ ve B₄C takviyeli alüminyum alaşımlı metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada alüminyum alaşımı içerisine Al₂O₃ ve B₄C takviye ederek mekanik özelliklere etkisine bakmışlardır. Alüminyum hafif olması, yüksek dayanım ve kolay işlenebilir olduğundan tercih etmişlerdir. Al₂O₃ ise iyi aşınma direnci, yüksek dayanım, sertlik ve B₄C ise mükemmel sertlik ve kırılma tokluğu olduğundan takviye elemanı olarak tercih etmişlerdir. Üretim yolu olarak karıştırma döküm tekniği kullanmışlardır. Katılaştırma işleminden sonra ise mekanik testleri ölçebilmek amacı ile çeşitli mekanik testler yapmışlardır. Yapılan çalışmada üç adet örnek malzeme yapmışlardır. Örnek 1 %95 alüminyum alaşımı, %3 alümina ve %2 bor karbür, örnek 2 %95 alüminyum alaşımı, %2 alümina, %3 bor karbür ve örnek 3 ise sadece alüminyum alaşımını içerir. Elde edilen numunelerin mekanik özelliklerini kıyaslamak için sırası ile çekme testi, eğilme testi, darbe testi ve sertlik testi uygulamışlardır. Çekme test sonuçlarında gerilmeler sırası ile örnek 1’de 54,60 MPa, örnek 2’de 51,75 MPa ve örnek 3’de 68,24 MPa olduğunu görmüşlerdir. Eğme test sonuçlarında ise eğilme dayanımları örnek 1’de 199,52 N/mm², örnek 2’de 193,85 N/mm² ve örnek 3 te ise 226,84 N/mm² olduğunu görmüşlerdir. Darbe testinde ise örnek 1’in kırılma enerjisi 2,18 J, örnek 2’de 2,42 J çıkarken örnek 3’de ise 2 J bulmuşlardır. Birinel sertlikleri ise sırası ile (48,53)-(52,80)-(37,83) olarak tespit etmişlerdir [21].

Srinivas ve diğeri (2013), AA6061 alüminyum alaşımasının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde kaynaklanabilirlik parametrelerini incelemişlerdir. Bu çalışmada AA6061 alüminyum alaşımasının sürtünme karıştırma kaynağından sonra mekanik özelliklerindeki değişimleri analiz etmişlerdir. Takım çapı, dönme hızı ve kaynak hızının birleştirilen parçalarda etkilerini incelemişlerdir. Sertlik değerlerini Vickers sertlik cihazında almışlardır. Ayrıca çekme testi ölçülmüş ve deneysel verileri ANOVA ile analiz etmişlerdir. Çalışma sonucunda kullanılan takımın (proben) geometrisi kaynak kalitesinin belirlenmesinde çok önemli bir etken olduğunu anlamışlardır. Aynı zamanda takım geometrisi ile kaynak işlem parametreleri arasındaki ilişkiyi irdelemişlerdir. Takım dönme hızı, kaynak hızı ve takım çapı arttıkça gerilme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir [22].

Kalaiselvan ve diğeri (2011), karıştırma döküm tekniği ile AA6061-B₄C kompozit malzemesini üretilip karakterize etmişlerdir. AA6061 içerisine çeşitli oranlarda B₄C parçacık takviyesi yaparak karıştırma döküm tekniği ile üretilebilirliğini incelemişlerdir. B₄C parçacıklarının ıslatılabilirliğini iyileştirebilmek için karışımın içerisine K₂TiF₆ fluks maddesi katmışlardır. Üretilen kompozit malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerini analiz etmişlerdir. Optik, SEM ve XRD çalışmalarının sonucunda B₄C parçacıklarının yapı içerisinde homojen olarak dağıldığını görmüşlerdir. Kompozitlerin mikro ve makro sertliklerinin B₄C takviye oranının artması ile beraber arttığını görmüşlerdir. Yine takviye oranının artması ile beraber çekme dayanımının 185 MPa'dan 215 MPa'ya arttığını gözlemlenmiştir [23].

Kerti ve Toptan (2008), döküm yöntemi ile üretilen B₄C takviyelendirilmiş Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin mikroyapısını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada düşük maliyetli olan döküm tekniği ile K₂TiF₆ fluks kullanarak takviye ile matris fazı arasında olan ıslatma problemini çözmüşlerdir. Farklı parçacık boyutlarında B₄C ilavesinin mikroyapı analizini yapmışlardır. Bu çalışmadan; döküm tekniği ile K₂TiF₆ fluks'ı kullanılarak homojen bir mikroyapı elde edildiği görmüşlerdir [24].

Babu ve diğeri (2011), AA6061 alüminyum alaşımasının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesini incelemişlerdir. Bu çalışmada, kaynaklı birleştirmelerde gerilme dayanımını artırmak için işlem parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Yapılan araştırmalar neticesinde AA6061 alaşımasının çekme dayanımının, takım dönme hızının, kaynak hızının ve eksenel kuvvet işlem parametrelerinin optimum olabileceğini söylemektedirler [25].

Knowles ve diğerleri (2014), AA6061 alüminyum alaşım matrisli SiC nano parçacık takviyeli kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada AA6061 matrisli nano parçacık takviyeli kompozit malzemeler toz metalürjisi yöntemi ile üretmişlerdir. Burada toz metalürjisi yönteminde ilk olarak tozların mekanik alaşımlanması daha sonrasında ise sıcak presleme ve ekstrüzyon yöntemini kullanmışlardır. Böylelikle parçacıkların yapı içerisinde homojen olarak dağılabileceğini düşünmüşlerdir. Kompozit malzemelerde takviye oranı ağırlıkça %10 ve %15 SiC parçacık takviyesi yapmışlardır. Bu tozların yüksek enerjili karıştırıcıda mekanik alaşımlama yapıldıktan sonra 500 nm'den daha düşük boyutlara inmesini sağlamışlardır. Bu tozlar 50 tonluk bir kuvvetle 30 mm çapında ve 30 mm yüksekliğinde soğuk olarak preslenmişlerdir. Tüm bu malzemeler daha sonra 450 °C'de 15 dakika sinterlendikten sonra 14:1 oranında ekstrüze yapılarak çapı 7,5 mm ve boyutu yaklaşık 1 m hale getirmişlerdir. Ekstrüzyon işleminden sonra ise T4 ısıtma işlemi 525 °C'de 1 saat bekletildikten sonra suda soğutmuşlardır. Parçacıklar kümeleşme olmadan yapı içerisinde homojen olarak dağılarak mekanik özellikleri artırdığını tespit etmişlerdir. İnce olan SiC parçacıklar (<500 nm) hacimce aynı fakat daha büyük olan parçacıklara nazaran dayanım artırmada daha etkili olduğunu saptamışlardır [26].

Adesola ve diğerleri (2012), AA6061 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma ısıtma işleminin ve gerilme oranlarının basma dayanımındaki etkilerini incelemişlerdir. T4, T6 ve T8 ısıtma işlemi uygulanmış AA6061 alüminyum alaşımına $3,2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ gerilme oranında statik basma dayanımı ve $7,0 \times 10^3 - 8,5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ arasında gerilme oranlarında dinamik basma dayanımlarına bakmışlardır. Alaşımın farklı ısıtma işlemi ve farklı yükleme koşullarının deformasyon davranışına olan etkilerini tartışmışlardır. AA6061 alüminyum alaşımının T4, T6 ve T8 ısıtma işleminin statik basma ve yüksek hız darbe yükleri altındaki dayanımları incelemiş ve karşılaştırmışlardır. T4 ısıtma işlemi uygulanmış alaşım statik yük altında yüksek pekleşme yeteneği sergilediğini tespit etmişlerdir [27].

Demir ve Gündüz (2009), AA6061 alüminyum alaşımlarına uygulanan yaşlandırma işleminin işlenebilirliğe etkilerini incelemişlerdir. AA6061 alaşımına uygulanan yapay yaşlandırma ısıtma işleminin, çözündürme işlemi, çözündürme ve sonra yaşlandırma ısıtma işlem şartlarını incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda 180 °C'de farklı yaşlandırma zamanları ve kesme hızı yüzey pürüzlülüğü değerlerini önemli derecede etkilediğini görmüşlerdir [28].

Erdem ve Türker (2011), AA7039 Alüminyum alaşımının kaynak öncesi ve sonrası mekanik ve balistik özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, kalınlıkları farklı (12,7 ve 38 mm) AA7039 zırh levhalarına özel kaynak ağzı açılarak MIG kaynak yöntemiyle çoklu paso kaynak yapmışlardır. Bu kaynaklı levhaların balistik ve mekanik özellikleri araştırmışlardır. 38 mm kalınlığındaki kaynaklı levhanın ana metal, geçiş bölgesi ve kaynak metali kısımlarına MIL-DTL-46063H malzeme spesifikasyonu ile atış yaparak bu bölgelerin V_{50} balistik sınır değerleri tespit etmişlerdir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde ise 12,7 mm kalınlığındaki kaynaklı levhalar kullanmışlardır. Bu deneyler sonucunda kaynaklı numunelerin mekanik ve balistik özellik değerlerinin azaldığını görmüşlerdir. Ayrıca en yüksek V_{50} balistik sınır değerini ana metal, en düşük V_{50} balistik sınır değerini ise kaynak metalinin gösterdiği tespit etmişlerdir [29].

Übeyli ve diğerleri (2014), AA7075 matrisli SiC parçacık takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit (FDM) malzemeleri toz metalürjisi yöntemi ile üretmişler ve balistik performansını incelemişlerdir. Üretilen FDM’lerde belirlenen tüm kalınlılarda ve kompozisyonlarda balistik performansın çok iyi olmadığını gözlemlemişlerdir. Tamamen balistik performansın korunabilmesi için FDM’lerde parça kalınlığının 25 mm’den daha büyük olması gerektiği saptamışlardır. Hafif yapılı zırh malzemelerin kullanımında FDM’lerin uygun bir çözüm olmadığını saptamışlardır. FDM’lerin yapısının gevrek kırılğan olduğunu görmüşlerdir. Test edilen numunelerde makro seviyede çatlaklar ve kopan makro parçacıklar olduğunu saptamışlardır. Aynı zamanda deformasyon bölgesinin yakın çevresinde mikro çatlaklar olduğu gözlemlemişlerdir [30].

Børvik ve diğerleri (2011), T4 ısıt işlemleri uygulanmış AA6082 koruyucu plakaların küçük silah mermileri ile normal ve açısal balistik dayanımlarına bakmışlardır. Bu çalışmada 20 mm kalınlığındaki AA6082 alaşım plakaların deneysel ve sayısal olarak (normal ve açısal olmak üzere) darbe özelliklerine bakmışlardır. Balistik testlerde iki farklı tipte küçük mermiler kullanmışlardır. Atışları 0° , 15° , 30° , 45° ve 60° ’de ayarlarken mermi hızını da yaklaşık olarak 830 m/s olarak ölçmüşlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, sert çekirdek mermiler ile yapılan atışta 30° ’lik açıda hızdaki düşüş hemen hemen etkilenmediğini görmüşlerdir. Her iki tip atış için (sert ve yumuşak çekirdek) hızın düşebilmesi için açının 60° ’den daha düşük olması gerektiğini düşünmektedirler [31].

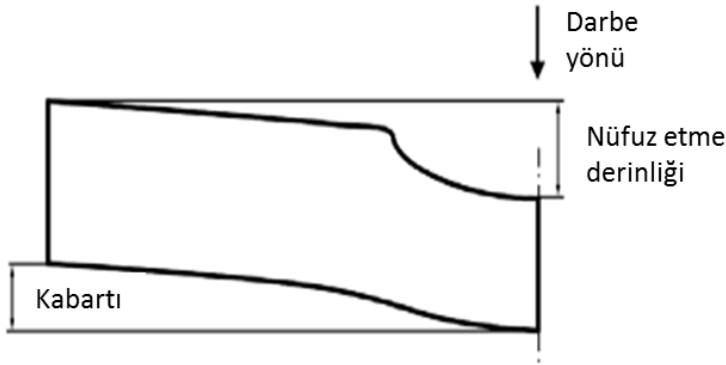
Manes ve diğerleri (2014), T6 ısıt işlemleri görmüş AA6061 plakaların delici zırh mermiler karşısındaki penetrasyon davranışını incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda, çelik ve

tungsten karbür çekirdekli olmak üzere iki tip mermi kullanmışlardır. Levhaları 101,6 mm, 76,2 mm ve 25 mm olmak üzere üç farklı kalınlıkta seçmişlerdir. Kurşunları hedefe doğru sıradan mühimmat hızında attırmışlardır. Balistik sonuçlarda plaka ve mermilerin deformasyonunu tartışmış ve daha sonra LSDYNA ve ABAQUS programlarında sayısal analiz yapmışlardır [32].

Mapelli ve diğerleri (2011), AA6061-T6 ısıtıl işlem uygulanmış alüminyum alaşımının balistik test sonrası mikroyapısal analizini yapmışlardır. Mikroyapı şekilleri balistik etkide önemli rol oynadığını savunmaktadırlar. Yüksek gerilme oranlarında ve bölgesel yüksek sıcaklıkta çalışma şartlarında gerilme sertleşmesi oluştuğunu düşünmektedirler [33].

Jena ve Bidyapati (2010), Zırh çeliği ve AA7017 zırh malzemelerinin 7,62 mm'lik mermi ile balistik performansını deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarda yüksek dayanımlı zırh çeliği ve AA7017 alaşımının 7,62 mm'lik mermiler karşısında normal ve açılmal olarak 830 ± 10 m/s'lik hızla balistik performansını analiz etmişlerdir. Yüksek dayanımlı zırh çeliği iki farklı ısıtıl işleminden geçirilerek mekanik özellikleri ve balistik davranışlarını incelemişlerdir. Deneysel çalışmaların sonucunda; hedef malzemesinin direncinden dolayı 7,62 mm'lik mermilerin deformasyonu bir disk şeklinde olduğunu saptamışlardır. İncelenen malzemeler arasında, en iyi balistik performansın 200°C 'de temperleme ısıtıl işlemi uygulanmış olan zırh çeliğine ait olduğunu saptamışlardır [34].

Özşahin ve Tolun (2001), Yüzeyi kaplama yapılmış alüminyum plakaların yüksek çarpma hızlarındaki balistik performansını incelemişlerdir. T651 ısıtıl işlemi görmüş AA6061 alüminyum plakalara iki farklı plazma spreyl yüzey kaplaması yaptıktan sonra balistik performansına bakmışlardır. Yüzeyi plazma spreyl kaplanmış ve kaplanmamış alüminyum levhalara 9,00 mm parabellum mermi kullanarak balistik direncini ölçmüşlerdir. Balistik test sonrası levhaların ön yüzeyindeki eğilme ve arka yüzeyindeki şişkinlik ölçülerek penetrasyon derinliğini hesaplamışlardır (Şekil 2.1). Yüzeyi kaplanmış alüminyum levhalardaki balistik direncin arttığını gözlemlemişlerdir. Balistik performans açısından özellikle yüksek çarpma hızlarında (yaklaşık 390 m/s veya üstü) Co-Mo-Cr kaplamanın etkileri ZrO_2 kaplamanın etkilerinden çok daha verimli olduğunu ispatlamışlardır [35].

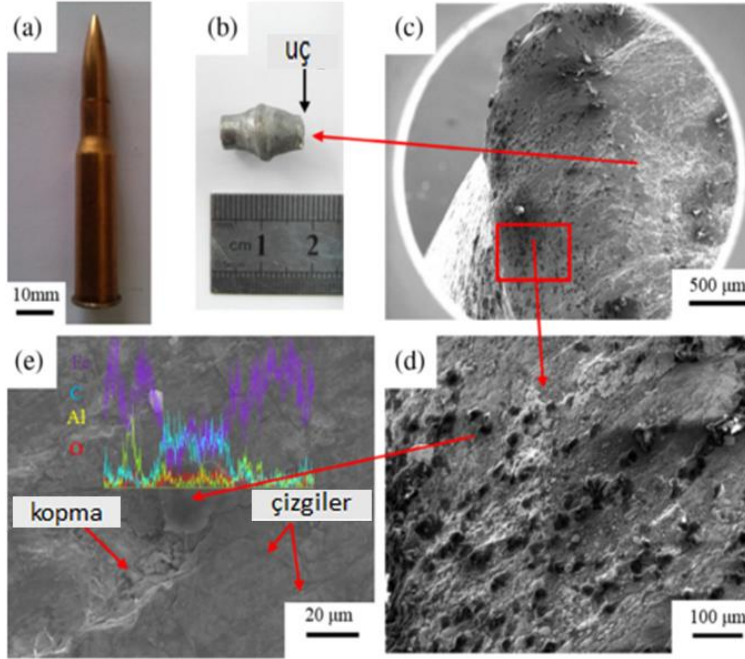


Şekil 2.1. Penetrasyon derinliğini ve şişkinlik ölçümünün şematik olarak gösterilişi [35]

Mondal ve diğerleri (2011), AA7055 alüminyum alaşımına uygulanan ısıtıl işlemin mekanik özellikleri ve balistik direnci nasıl etkilediğine dair araştırma yapmışlardır. Üç farklı yaşlandırma ısıtıl işlemine (yaşlandırmaz, uç yaşlandırma ve aşırı yaşlandırma) tabi tutulan levhaların statik mekanik özelliklerinde büyük farklılıklar ortaya çıktığını görmüşlerdir. Uç yaşlandırma yapılan Al levhaların yaşlandırmaz ve aşırı yaşlandırma yapılan levhalara göre maksimum dayanım ve sertlik sergilediğini görmüşlerdir. Isıtıl işleme tabi tutulmuş 5 ve 10 mm kalınlığındaki levhalar kalın arkalık kullanarak 820 ± 10 m/s hıza sahip olan mermilerle normal düz açıda balistik teste tabi tutmuşlardır. Yapılan testlerde yaşlandırmaz ve uç yaşlandırma yapılan levhalar benzer balistik direnç gösterdiği saptanırken aşırı yaşlandırma yapılan levhalardan daha iyi balistik direnç gösterdiğini görmüşlerdir. Uç yaşlandırma yapılan AA7055 alüminyum alaşımı levha nüfuz derinliği açısından ticari olarak temin edilebilen AA7017 alüminyum alaşımı levha ile karşılaştırıldığında çok daha iyi bir balistik özellik sergilediğini tespit etmişlerdir [36].

Zhou ve diğerleri (2014), AA2024/B₄C kompozit malzemelerin balistik test sonrası mikro yapı ve morfolojisini incelemişlerdir. AA2024/B₄C kompozit malzemeleri ortalama 17,5 µm parçacık boyutuna sahip hacimce %55 oranında B₄C takviyesi ile basınçlı infiltrasyon yöntemi ile üretmişlerdir. Üretilen kompozit levhaya yaşlandırma ısıtıl işlemi uyguladıktan sonra balistik performansına bakmışlardır. Kompozit levhaların arkasına destekleyici plaka olarak ticari AA7052 Al alaşımını kullanmışlardır. Kompozit malzemelerin balistik performansını 7,62×51 mm zırh delici mermiler ile gerçekleştirilmişlerdir. Şekil 2.2’de balistik test sonrası malzeme ve kurşunun makro ve mikro görüntüleri verilmiştir. Balistik testten sonra kurşunun uç kısmında ezilmeler meydana geldiğini görmüşlerdir. Ayrıca yapılan incelemelerde kurşunun yüzeyinde B₄C parçacıklarının olduğunu tespit ederek bu durumun kompozit malzemenin kurşun üzerinde pasifleştirici ve aşındırıcı etkisi olduğunu

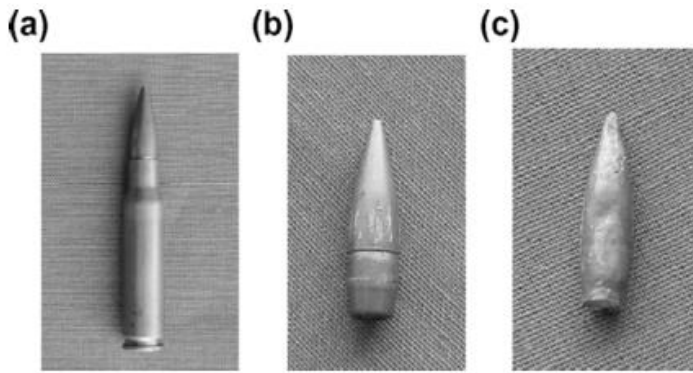
ortaya atmışlardır. Balistik testi farklı kalınlıklardaki (2,3-4,5 ve 7 mm) kompozit malzemelere uygulamışlardır. Balistik direnç koruma katsayısının artan kalınlıkla önce düştüğünü daha sonra arttığını ve sabit kaldığını tespit etmişlerdir. Koruma katsayısını 2.8'e kadar ulaştığını bulmuşlardır [37].



Şekil 2.2. Balistik test sonrası kurşunun mikro yapı analizi (a) Orijinal 7.62×51 mm zırh delici kurşun; (b) çarpma sonrası zırh delici kurşun; (c) kurşun ucu SEM morfolojisi; (d) siyah parçacık ve tipik kabarma ve karık alanın enerji spektrum analizi; (e) kurşun yüzeyinde eşit dağıtarak siyah parçacık [37]

Sudhakar ve diğerleri (2016), sürtünme karıştırma yaptıkları AA7075 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelerin balistik performansını deneysel ve analitik yaklaşım yaparak incelemişlerdir. Ana metal olarak 40 mm kalınlığında AA7075-T6 alüminyum alaşımı kullanmışlardır. Takviye olarak kullanmış olduğu 160 µm boyutundaki B₄C parçacıklarını yüksek enerjili değirmende öğüterek 60 ve 30 µm boyutuna indirmişlerdir. Daha sonra B₄C parçacıklarını 40 mm kalınlığındaki AA7075-T6 alüminyum alaşımının üzerine sürtünme karıştırma tekniği ile ilave ederek yüzeye takviyelendirilmiş kompozit malzemeleri üretmişlerdir. Üretilen kompozit malzemelerin 10 metre mesafeden 7,62 mm çaplı mermiler ile balistik testini yapmışlardır. Zırh yüzeyinde bulunan B₄C parçacıklarının aşındırıcı etkisi ile mermi ucunu durdurarak balistik direnci artırdığını gözlemlemişlerdir [38].

Jena ve diğerleri (2010), Yüksek mukavemetli zırh çeliği ve AA7017 alaşımının normal açı 830 ± 10 m/s'lik bir hızda 7,62 mm deforme olabilen mermiler ile balistik davranışını analiz etmişlerdir (Şekil 2.3). Balistik davranış üzerine mekanik özellikleri belirleyebilmek amacıyla yüksek mukavemetli zırh çeliğine iki farklı ısı işlem uygulamışlardır. Daha sonra ise AA7017 alaşımın balistik sonuçları ile ısı işlem gören bu çelikler ile kıyaslanmıştır. Çalışmada adiyabatik kayma bantları oluşumuna dair bazı gözlemleri de olmuştur. Deneysel sonuçlara bakıldığında en iyi balistik performansı 910°C 'de östenitleme ve ardından 200°C 'de temperleme işlemi yapılan zırh çeliğinde olduğunu görmüşlerdir [39].

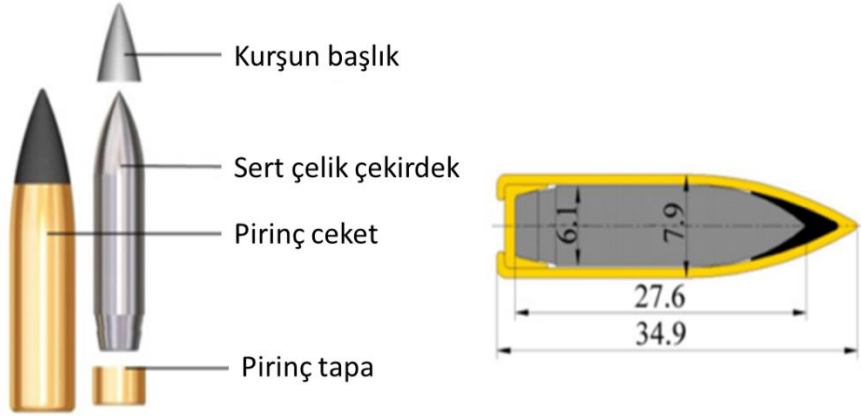


Şekil 2.3. (a), 7,62 mm deforme olabilir mermi, (b) pirinç ceket ile çekirdek, (c) sadece çekirdek [39]

Demir ve diğerleri (2007), Yapmış oldukları çalışmada AA7075 ve AA5083 alüminyum alaşımları ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliğin (AISI 4140) 7,62 mm zırh delici (AP) mermi altında balistik direncini deneysel olarak analiz etmişlerdir. AISI 4140 ve 7075 alüminyum alaşımına çeşitli ısı işlemler uygulayarak göstermiş oldukları sertlik ve mukavemetin balistik davranışa etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlara göre incelenen malzemeler arasında, en iyi balistik performansı alansal yoğunluğu $>85 \text{ kg/m}^2$ ile, AA7075-T651 yaşlandırılmış alüminyum alaşımının sergilediğini tespit etmişlerdir [40].

Holmen ve diğerleri (2010), AA6070 alüminyum alaşımına farklı ısı işlemler uygulayarak balistik performansa olan etkilerini araştırmışlardır. Hedef plaka olarak 20 mm kalınlığında O (temperlenmiş), T4, T6 ve T7 yaşlandırılmış malzemeler kullanmışlardır. Farklı ısı işlem sıcaklıklarının gerilme-gerinim davranışı üzerine etkisini yarı-statik gerilme testi ile karakterize etmişlerdir. Uygulanan farklı ısı işlemlerin dayanımı, pekleşmeyi ve sünekliği önemli derecede değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Balistik testlerde 7,62 mm APM2 mermiler kullanarak balistik limit hızlarını tüm ısı işlem uygulanan levhalarda tespit etmişlerdir. Şekil 2.4'de 7,62 mm'lik merminin şematik olarak çizimi verilmiştir.

Malzemelere uygulanan testlerde O-temperlenmiş malzemenin en sünek olduğu ve balistik testlerde hiçbir parçalanma oluşmadığını tespit etmişlerdir. T6-ısıtıl işlem uygulanan malzemenin ise en düşük sünekliğe sahip olduğunu ve balistik testlerde parçalanmaların olduğunu gözlemlemişlerdir [41].



Şekil 2.4. 7,62 mm mermi geometrisinin şematik olarak çizimi [41]

Kalemtaş ve diğerleri (2006), AA2024/B₄C kompozit malzemeleri argon ortamında basınçsız emdirme tekniğini kullanarak üretmişlerdir. Üretmiş oldukları kompozit malzemeleri seramik –metal oranı üretim öncesi uygulanan ısıt çevrimler, emdirme koşulları toz parçacık boyut dağılımı ve üretim sonrası ısıt çevrimler gibi farklı yönlerden ele almışlardır. Ayrıca elde etmiş oldukları kompozit malzemelerin içyapı, mekanik ve balistik özelliklerini karakterize etmişlerdir. Balistik test için 1 cm kalınlığındaki kompozit levhaları 1 cm kalınlığındaki cam elyaf örgülü destek plakası ile birleştirerek hedef plaka haline getirmişlerdir. Balistik testi askeri standartlara uygun olarak hızı 800-840 m/Sn olan tungsten çekirdekli mermilerle gerçekleştirmiş ve testlerden tam koruma sağlayan başarılı sonuçlar almışlardır [42].

Literatür çalışmalarında, önerilen tezin çözme amaçladığı problemin belli parçaları üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Araştırma çalışmaları sonucunda istedikleri başarı seviyesini yakalayan araştırmacılar olduğu gibi hedefledikleri başarı seviyesini yakalayamayan araştırmacılar da bulunmaktadır. Yukarıda verilen literatür bilgisi doğrultusunda, literatüre yapılması planlanan katkı kısaca şu şekilde özetlenebilir:

Şu ana kadar yapılan araştırmalardan farklı olarak %0, 5, 10, 15, 20 B₄C karışım oranlarının mekanik özellikler ve balistik performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca daha önce toz metalürjisi yöntemi kullanılarak büyük ebatlarda üretimi gerçekleştirilmemiş AA6061 matrisli B₄C takviyeli kompozitler üretilmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Alüminyum sahip olduğu özelliklerden dolayı mühendislik malzemeleri arasında potansiyel bir kullanıma sahiptir. Mekanik özellikleri kontrol altına alabilmek için alüminyum içerisine çeşitli alaşım elementleri ilave edilmektedir [43]. Böylece farklı kimyasal kompozisyonlara sahip olan alüminyum alaşımları içerisinde AA6061 düşük yoğunluğa sahip olmasının yanında orta ve yüksek dayanım, iyi şekillendirebilirdik ve iyi korozyon direncine de sahiptir [44-46]. Bor karbür (B_4C) $2,54 \text{ g/cm}^3$ 'lük yoğunluğa sahip üçüncü en sert seramik malzemedir [47]. Yüksek sertliklerinden dolayı kompozit malzemelerin aşınma direncini artırmada mükemmel bir tercihtirler. Aynı zamanda ergime derecelerinin $2445 \text{ }^\circ\text{C}$ olması da kompozit malzemenin termal özelliklerini geliştirmesine yardımcı olur [47]. Nötronları absorbe etme yeteneklerinden dolayı ve çeşitli kimyasallara karşı olan iyi direncinden dolayı nükleer reaktörlerde kullanılmaktadır [48,49].

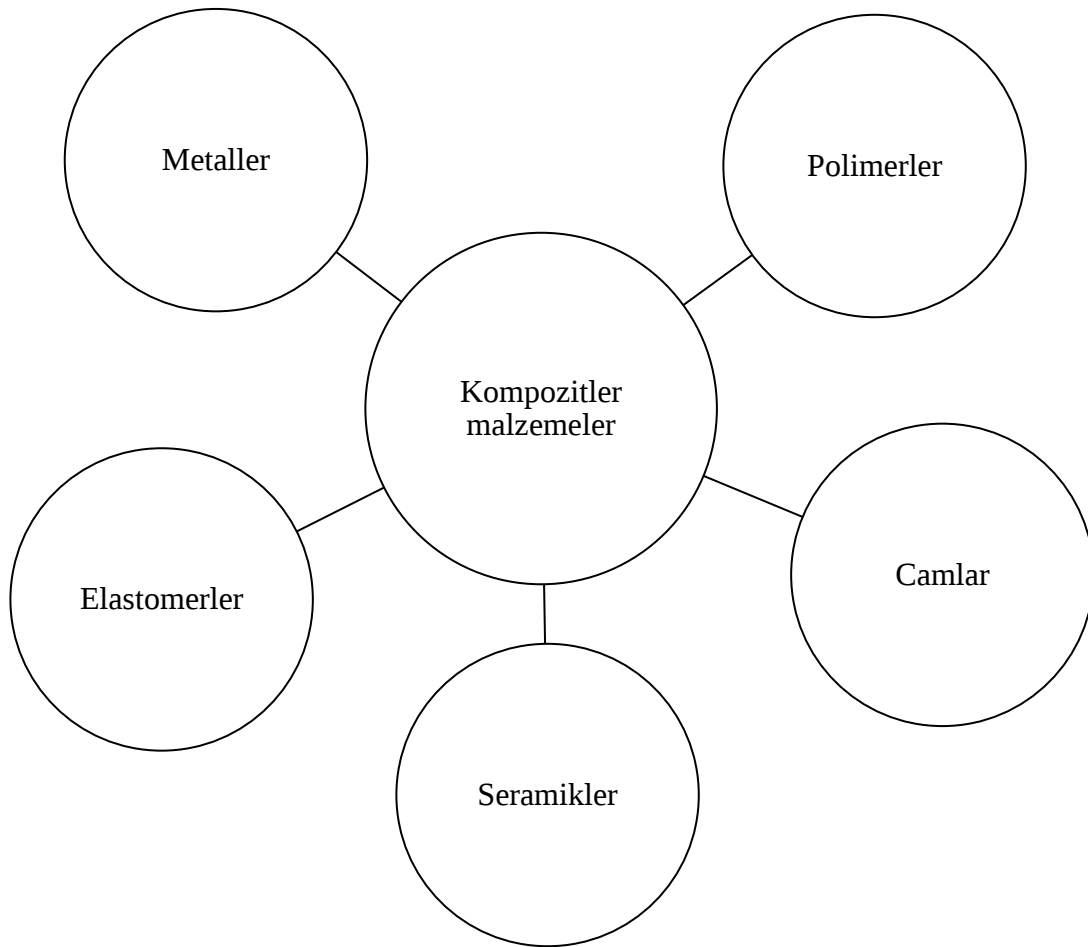
Teknolojinin gelişmesi ile beraber aynı anda birden fazla mekanik özellikleri barındıran insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılayabilecek yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Bu yeni nesil malzemeler arasında kompozit malzemelerin ayrı bir yeri ve önemi vardır. Kimyasal bileşimi ve özellikleri farklı olan iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde birleştirilmesiyle elde edilen yeni yapılara kompozit malzemeler denir [50].

Kompozit malzemeyi meydana getiren malzemeler yapı içerisinde kendi özelliklerini koruyarak daha üstün performanstaki kompozit malzemelerin üretimini sağlamaktadırlar [50].

Kompozit malzemelerin en belirgin özellikleri düşük yoğunluklu (hafif olmaları) ve dayanımlarının yüksek olmasıdır. Kompozit malzemelerin tanımlanabilmesi için bazı terimler vardır. Bunlar ana faz, takviye elemanı ve ana faz ile takviye elemanı arasında yer alan ara yüzey bağıdır [50]. Kompozit malzemelerin birbirinden farklı üretim yöntemleri mevcuttur. Üretim yöntemleri arasında toz metalürjisi, mekanik alaşımlama, döküm, infiltrasyon, vb. teknikler yer almaktadır [51-53]. Bu üretim yöntemleri arasında döküm yöntemi diğer tekniklere göre ucuz olmasına rağmen parçacık takviyelerin matris yapı içerisinde homojen olarak dağıtılması çok zordur. Bu durumu toz metalürjisi tekniği ile ortadan kaldırmak mümkündür. Toz metalürjisi yöntemi parçacıkların matris yapı içerisinde homojen olarak dağıtılmasını sağlar. Aynı zamanda toz metalürjisi tekniğinde mekanik

alaşım ile matris ile takviye elemanı arasındaki arayüzey bağımlı artırarak mekanik dayanımlar iyileştirilebilir [54,55].

Günümüzde endüstriyel olarak birçok malzeme çeşidi bulunmaktadır. Malzemeler cinsine göre; seramik, metal, polimer, kompozit, elastomer ve cam malzemeler olarak sınıflandırılabilir. Kompozit malzemeler ise bu malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan üstün mekanik özellikler sergileyen ileri malzemeler arasında yer almaktadır. Şekil 3.1’de malzeme cinsleri ve bu malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan kompozit malzemelerin sınıfları görülmektedir [56,57].



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin üretildikleri malzeme sınıfları [56,57]

Kompozit malzemeler çözünen ve çözen bileşenlerden meydana gelmez. Malzemeler birbiri içinde çözünürse alaşım malzeme olmuş olur. Kompozit malzemelerin bileşenleri arasında atom alışverişi bulunmamaktadır. Geleneksel malzemelerle elde edemeyeceğimiz bazı mekanik veya fiziksel özellikleri geliştirmek amacıyla birbiri içerisinde çözünemeyen farklı özelliklere sahip en az iki bileşenden oluşan kompozit malzemeler yapılmıştır. İnsan

tarafından tasarlanabilen kompozit malzemelerin bileşenleri kimyasal olarak birbirlerini etkilemezler. Bazı metalik sistemlerde ana malzeme ile takviye arasında bir miktar çözünme bileşenler arasında güçlü bağlanımların oluşmasına katkı sağlamaktadır [58,59].

Kompozit malzemelerde ana malzeme, takviye elemanı ve arayüzey bağının bir görevi vardır. Çeşitli form ve oranlarda olan takviye elemanı kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, ana malzeme ise hem takviye elemanın etrafını çevreler hem de yapı içerisinde oluşabilecek çatlakların ilerlemesini önleyerek kompozit malzemelerin kopmasını engellemektedir. Arayüzey bağı ise ana malzeme ile takviye elemanı arasındaki kuvvet aktarımını sağlamaktadır [60].

Kompozit malzemeleri bir araya getiren bileşenlerin sahip olduğu en iyi özellikler daha üstün performansa sahip yeni nesil malzeme oluşturulmasına imkan sağlar. Kompozit malzemelerin üretimi ile aşağıdaki özelliklerin bir ya da birkaçını bir araya getirmek mümkündür [60].

Kompozit malzemelerin avantajları,

- Yüksek mukavemet
- Yüksek aşınma dayanımı
- Yüksek yorulma dayanımı
- Yüksek kırılma tokluğu
- Yüksek korozyon dayanımı
- Yüksek sıcaklık performansı
- Isıl ve akustik iletkenlik
- Düşük maliyet
- Estetik görünüm
- İmalat kolaylığıdır [60].

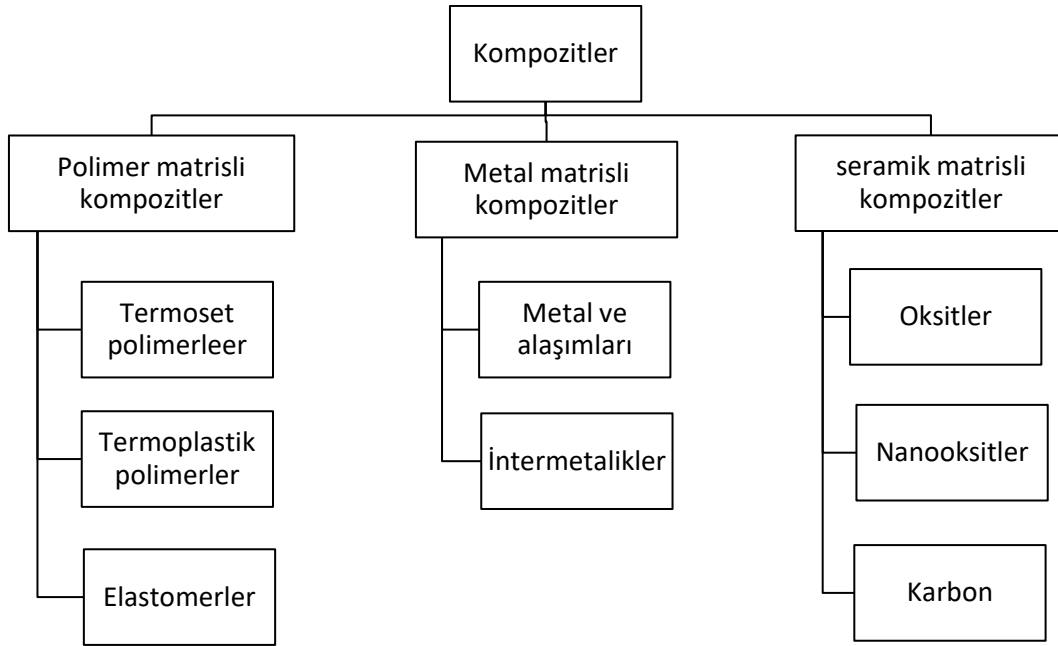
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin birbirinden farklı sınıflamaları mevcuttur. Malzeme bileşenlerine bağlı olarak, “metal-organik” veya “metal-inorganik”, bileşen fazların karakteristik özelliklerine göre “matris sistemleri” veya “tabakalı yapılar”, bileşen fazların dağılımlarına göre, “sürekli” veya “süreksiz” bileşen dağılımı, fonksiyonlarına bağlı olarak, “elektiriksel” veya “yapısal” kompozit malzemeler gibi pek çok sınıflandırma yapılmıştır [61-63].

Kompozit malzemeler, “matris malzemesine” ve “takviye çeşidine” göre iki şekilde sınıflandırılabilir.

3.2. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeleri oluşturan matris malzemesinin cinsine bağlı olarak yapılan sınıflandırmadır. Kullanılan matris malzemesine göre kompozit malzemeler; polimer matrisli kompozit malzemeler (PMK), seramik matrisli kompozit malzemeler (SMK) ve metal matrisli kompozit malzemeler (MMK) olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Şekil 3.2’de matris malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması verilmektedir [53,54].



Şekil 3.2. Matris malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması [55]

3.2.1. Metal matrisli kompozit malzemeler

Metal matrisli kompozit malzemeler, iyi süneklik ve tokluk özelliğine sahip metallerin, yüksek mukavemet ve yüksek elastiklik modülü sergileyen seramik malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşurlar. Düşük yoğunluk, yüksek elastiklik modülü, yüksek aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme gibi önemli özelliklere sahiptirler [56].

Metal matrisli kompozitler için matris malzemesi olarak genellikle Al, Mg, Ti ve alaşımları gibi hafif metaller tercih edilmektedir. MMK malzemelerde Al ve Al alaşımları sağlamış olduğu optimum özelliklerden dolayı matris malzemesi olarak en çok tercih edilendir. Bu optimum özellikler, düşük yoğunluk, düşük ergime sıcaklığı ve birçok seramik takviye elemanını kolay ıslatabilmesidir. Metal matrisli kompozit malzemelerde en çok kullanılan takviye elemanları ise Al_2O_3 , SiC, TiC ve B_4C 'dir [57].

3.2.2. Polimer matrisli kompozit malzemeler

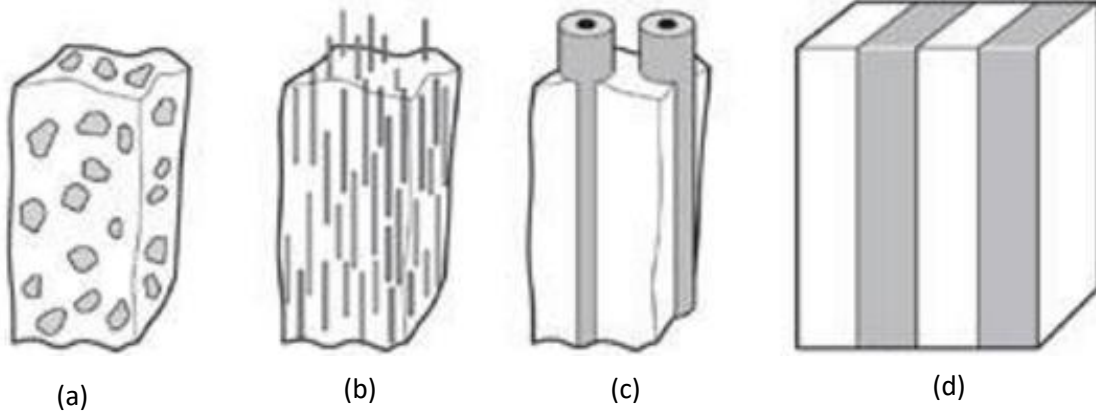
Polimer matrisli kompozit malzemelerin diğer kompozit malzemelere göre daha ucuz elde edilmesi ve basit olması endüstride yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. PMK malzemelerde matris malzemesi olarak termosetler ve termoplastikler kullanılmaktadır. Termoset olarak, epoksi ve polyester kullanılırken termoplastik olarak ise termoplastik polyester, poliamid (PA), politetrafloretillen (PTFA), polietilen (PE) tercih edilmektedir. Takviye elemanı olarak ise cam, aramid, karbon, B_4C , Al_2O_3 ve SiC kullanılmaktadır [58,59]. PMK malzemeler içerisinde özellikle cam, aramid ve karbon ile takviyelendirilen kompozitler endüstride geniş uygulama alanına sahiptirler. Bu kompozitlere örnek olarak uçak ve helikopter parçaları, spor malzemeleri, güçlendirme amaçlı yapı elemanları verilebilir [58].

3.2.3. Seramik matrisli kompozit malzemeler

Seramik matrisli kompozit malzemeler özellikle yüksek sıcaklıkta çalışması gereken parçalarda kullanılırlar. SMK malzemeler sert ve kırılğan yapılarıdır. Düşük kopma uzamasına ve düşük tokluğa sahiptirler. Ayrıca termal şoklara karşı dayanıksızdırlar. Buna karşılık düşük yoğunluk, yüksek elastiklik modülü ve yüksek çalışma sıcaklıklarına sahiptirler. SMK malzemelerde matris malzemesi olarak alümina (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür (Si_3N_4) ve bor karbür (B_4C) gibi malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak ise genellikle fiber formunda olan Al_2O_3 ve SiC gibi seramik malzemeler kullanılmaktadır [59].

3.3. Takviye Çeşidine Göre Kompozit Malzemeler

Takviye çeşidine göre kompozit malzemeler parçacık takviyeli, fiber takviyeli ve tabakalı kompozitler olmak üzere üç grupta incelenebilirler (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Takviye çeşidine göre kompozit malzemeler, (a) Parçacık takviyeli kompozit malzeme, (b) Kısa fiber takviyeli kompozit malzeme, (c) Sürekli fiber takviyeli kompozit malzeme, (d) Tabakalı kompozit malzeme [60]

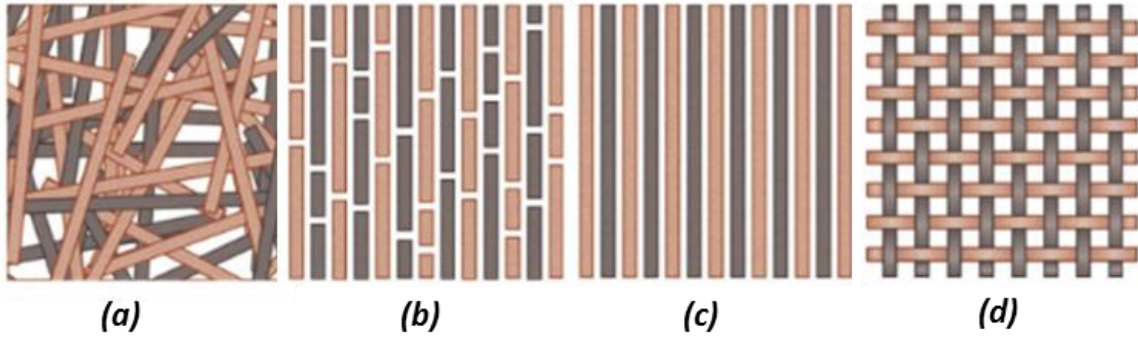
3.3.1. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Kompozit malzemelerin üretim süreçlerindeki gelişmeler sonucunda, parçacık takviyeli kompozit malzemelerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Bu kompozitlerin düşük maliyete ve yüksek performansa sahip olması avantaj oluşturmaktadır. Parçacık olan takviye elemanları küresel, kübik, tek tip veya farklı tip geometrilere sahip olabilmektedir. Ayrıca bu parçacıklar matris yapı içerisinde rastgele dağılmış veya yönlendirilmiş halde bulunabilirler. Matris yapı içerisinde yönlendirilmiş halde bulunan parçacık takviye elemanı belirli yönde özel zorlamalara karşı dayanım sağlamak mümkündür [61].

3.3.2. Fiber takviyeli kompozit malzemeler

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, sünek matris malzemesi ile mukavemeti ve elastiklik modülü yüksek olan fiberlerin birleştirilmesiyle elde edilirler. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde yük taşıma kapasitesi oldukça yüksektir. Kompozit malzemeye uygulanan yükü matris fazı fiberlere transfer eder. Böylelikle yüksek mukavemete sahip olan fiber takviyesi uygulanan yükün büyük bölümünü taşıyabilmektedir [62].

Matris yapı içerisine yerleştirilen fiberler, tek yönlü veya yönlendirilmiş halde bulunabilirler. Kompozitlerde uygulanacak yükün doğrultusuna bağlı olarak fiberler yerleştirilirler. Yönlendirilmiş fiberlerin yanı sıra örgü formunda olan fiberler de mevcuttur. Özellikle, yüksek mukavemet, rijitlik ve hafiflik gibi özelliklere sahip olan fiber takviyeli kompozit malzemeler uzay ve havacılık sektörlerinde kullanılan bir malzeme grubudur [62]. Şekil 3.4.'de farklı morfolojilere sahip fiber takviyeli kompozit malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin farklı morfolojileri a) Rastgele yönlendirilmiş süreksiz fiber, b) Yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit c) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber kompozit d) Örgü formunda fiberlerle pekiştirilmiş kompozitler [62]

3.3.3. Tabakalı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, farklı özelliklerdeki tabakaların üst üste veya yan yana bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Kompoziti bir araya getiren tabakaların özelliklerine bağlı olarak aşınmaya karşı dirençli, korozyona dayanıklı, yük taşıma kapasitesine sahip vb. malzemeler üretmek mümkündür. Tabakalar, farklı malzemelerden oluşabileceği gibi farklı türde ve formlarda takviye içeren kompozit malzemelerden de oluşabilmektedir. Kullanım amacına göre değişik formlarda tasarlanabilen tabakalı kompozit malzemeler askeri ekipmanlar ve hafif zırhlarda yerini almıştır [63].

3.4. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozit malzemeler umut verici, yüksek mekanik ve termal özelliklere sahip olmalarına rağmen, sadece çok özel kullanım alanlarında uygulanmaktadır. Kompleks üretim gereksinimleri ve son ürünün yüksek maliyeti gibi eksiklikler metal matrisli kompozit

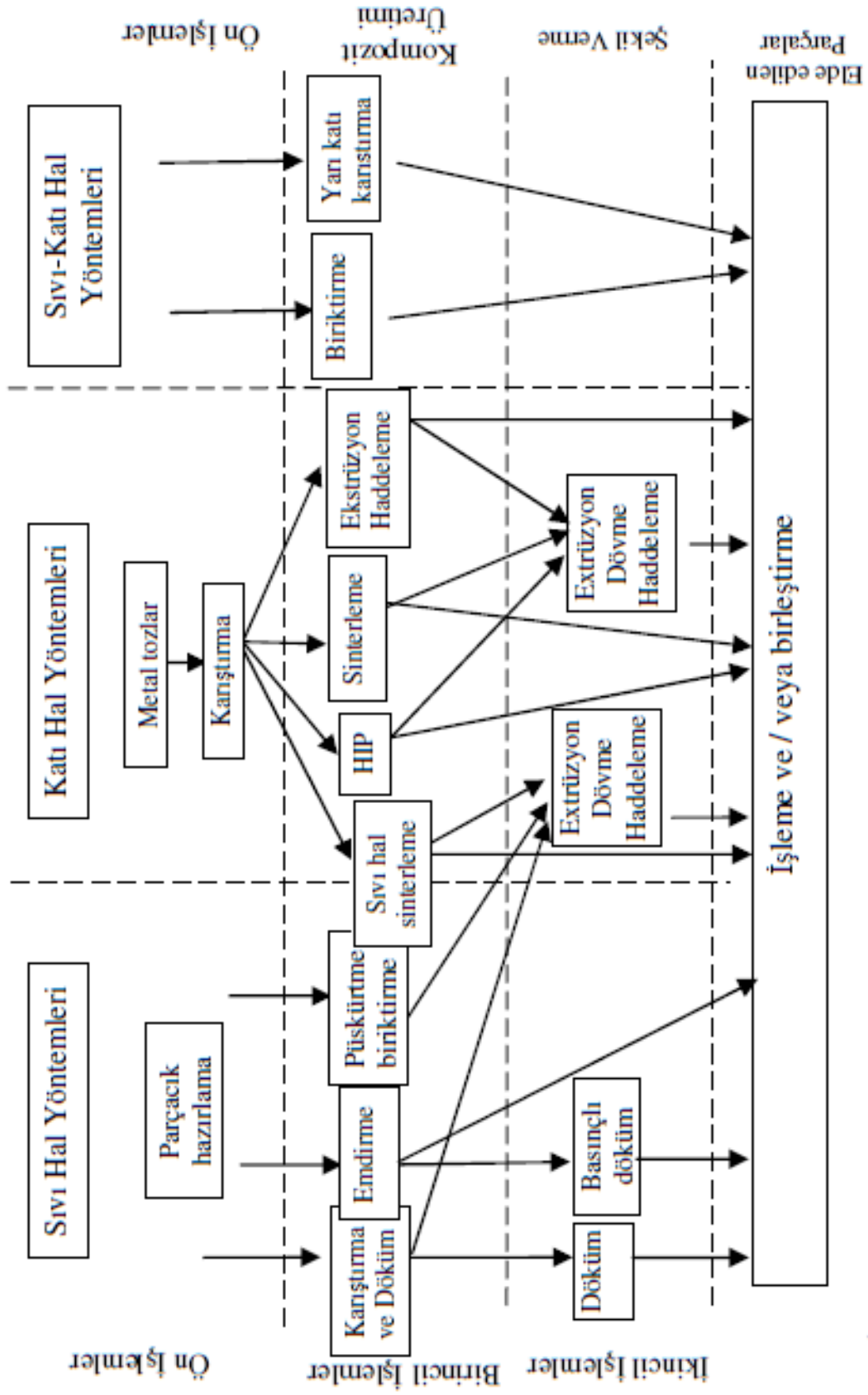
malzemelerin yaygınlaşmasındaki en büyük engellerdir. Takviye elemanı imalatı ve kompozit üretim tekniklerindeki gelişmeler metal matrisli kompozit malzemelerin endüstriyel kullanımının artmasında en önemli etkenlerdir [64, 65].

Metal matrisli kompozit malzemelerin mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalar sonucunda her geçen yıl üretim teknolojileri yenilenmekte ve gelişmektedir. Üretim yöntemleri metalik matrisin üretim esnasındaki sıcaklığına göre sınıflandırılmaktadır.

Dolayısıyla, metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri;

- Sıvı faz üretim yöntemleri
- Katı faz üretim yöntemleri
- İki faz (sıvı-katı) üretim yöntemleri
- Biriktirme üretim yöntemleri
- In-situ üretim yöntemi

olarak 5 gruba ayrılabilir [66-69]. MMK malzemelerin üretiminde kullanılan uygulamalar şematik olarak Şekil 3.5.'de görülmektedir.



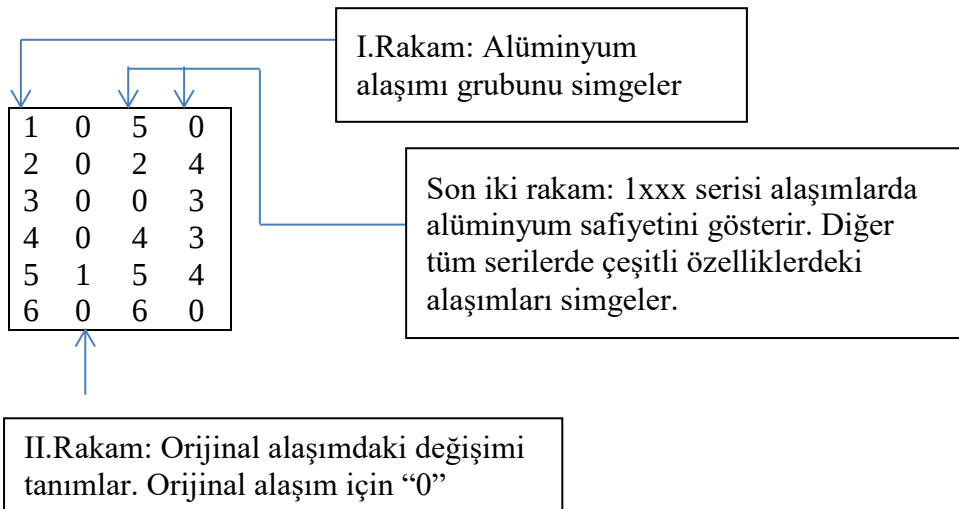
Şekil 3.5. MMK malzemelerin üretiminde kullanılan uygulamalar [70]

3.5. Alüminyum Alaşımları

Endüstriyel olarak alüminyum çelikten sonra en çok kullanılan metaller arasında yer almaktadır. Ayrıca alüminyum tabiatta en çok bulunan elementler arasındadır. Alüminyumun doğada kararlı bir bileşik olan alüminyum oksit halinde bulunur. Bu bileşik indirgenerek alüminyum metali üretilir [71-73].

Alüminyum sahip olduğu mekanik ve fiziksel özellikler ile diğer mühendislik malzemeleri arasında ayrı bir öneme sahiptir. Yoğunluğu $2,7 \text{ gr/cm}^3$ olan saf alüminyum içerisine alaşım elementi ilave ederek çekme dayanımları artırılabilir [71-73].

Saf alüminyumun mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirebilmek için içerisine alaşım elementleri katılarak alüminyum alaşımları elde edilir. Ticari olarak piyasada farklı özelliklere sahip alüminyum alaşımları bulunmaktadır. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması yapılırken Alüminyum Topluluğu'na (Aluminum Association) ait sınıflandırma sisteminin kullanımı yaygındır. Bu alüminyum alaşımlarının, içerdiği alaşım elementine göre sınıflandırılması için 4 rakamdan oluşan bir kodlama sistemi kullanılır. Bu 4 rakamdan ilki, alüminyuma ilâve edilen esas alaşım elementini, ikinci rakam orijinal alaşımdaki değişimi tanımlar, son iki rakam olan üçüncü ve dördüncü rakam ise Al içerisinde bulunan alaşımları simgeler (Şekil 3.6). Çizelge 3.1'de A.B.D normlarına göre Al serilerinin meydana getiren alaşım elementleri, Çizelge 3.2'de ise Al serilerinin kullanım alanları verilmiştir [74].



Şekil 3.6. Alüminyum alaşımlarının alaşım elementine göre sınıflandırılması [75]

Çizelge 3.1. A.B.D normlarına göre alüminyum alaşımlarının gösterimi [76]

A.B.D. Normlarına Göre Adı	İçindeki Alaşımları
1xxx	Alaşımsız alüminyum
2xxx	Bakırlı alüminyum alaşımı
3xxx	Manganezli alüminyum alaşımı
4xxx	Silisyumlu alüminyum alaşımı
5xxx	Magnezyumlu alüminyum alaşımı
6xxx	Silisyum ve magnezyumlu alüminyum alaşımı
7xxx	Çinkolu alüminyum alaşımı
8xxx	Demir ve Silisyumlu alüminyum alaşımı
9xxx	Kullanılmayan seriler

Çizelge 3.2. A.B.D normlarına göre alüminyum kullanım alanları [76]

A.B.D. Normlarına Göre Adı	Kullanım Alanları
1xxx	Genel olarak elektrik ve kimya endüstrisinde
2xxx	Yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe
3xxx	Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda
4xxx	Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde
5xxx	Denizel korozyona karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında
6xxx	Şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında
7xxx	Uçak parçaları yapımı ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde
8xxx	Özellikle uçak ve uzay yapılarında
9xxx	Kullanımı bulunmamaktadır.

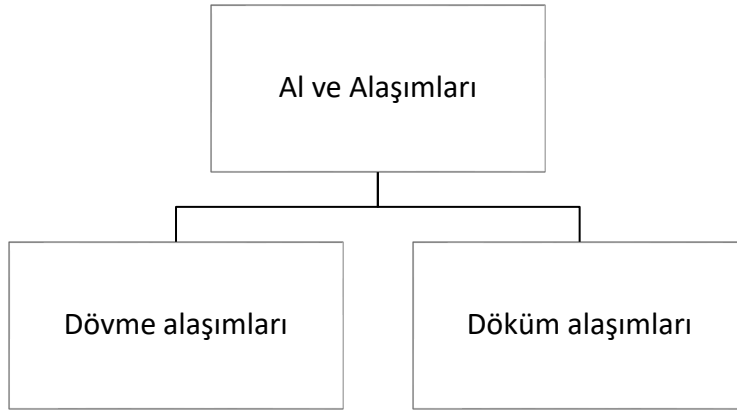
İnsanoğlunun yaşamını kolaylaştıran alüminyum alaşımları her geçen gün daha da çok kullanılmaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kullanım alanlarını aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yapı, elektrik, karayolu, petrol ve diğer mühendislik uygulamalarında,
- Meşrubat, gıda, ecza, kimya ve atom endüstrisinde,
- Sıfır altı sıcaklıklarda çalışacak yapı ve donanımlarda,
- İçten yanmalı motorlarda ve diğer motor dışı otomotiv endüstrisinde,
- Demiryolu donatılarında, denizcilik ile ilgili uygulamalarda, uçak ve uzay çalışmalarında,
- Askeri araç ve ekipmanlarda,
- Yataklama, alet, takım, cihaz ve diğer mekanik uygulamalarda,
- Elektronik endüstrisinde,
- Ev araçları, mobilya vb. uygulamalar ile tüketim ürünlerinde,
- Ambalaj işlemleri, boya ve boya malzemeleri sanayinde
- Metalürji ve kimyasal reaksiyonlarda

Yukarıda gösterildiği üzere alüminyum alaşımlarının kullanım çeşitliliği diğer mühendislik malzemelerine göre onu daha cazip hale getirmektedir [77-79].

3.5.1. Alüminyum alaşımlarının gruplandırılması

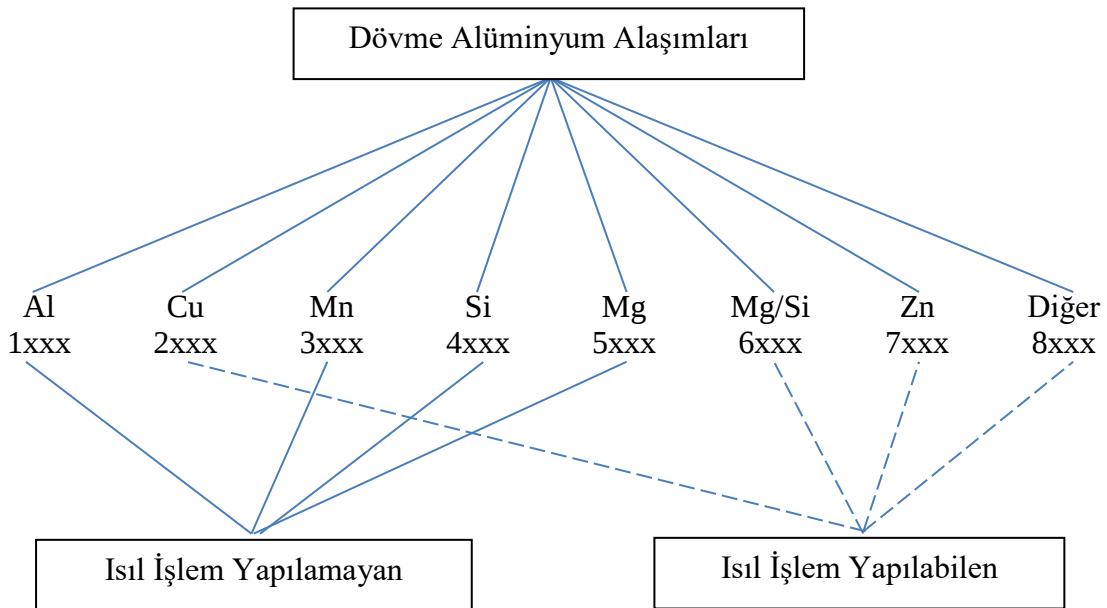
Alüminyum alaşımları üretim metotlarına göre “dövme Al alaşımları” ve “döküm Al alaşımları” olmak üzere iki ana gruba ayrılır (Şekil 3.7). Dövme Al alaşımları plastik deformasyonla şekillendirilebilen Al alaşımlarıdır. Ayrıca döküm Al alaşımlarından farklı mikro yapı ve kimyasal bileşime sahiptirler. Döküm Al alaşımları ise sıvı olarak kolayca dökülebilen Al alaşımlarıdır. Bu iki ana grup Al alaşımları içerisinde ısıtıl işlem uygulanabilen ve ısıtıl işlem uygulanamayan Al alaşımlar olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Isıl işlem, Al alaşımlarının dayanımları artırmak için kullanılmaktadır [80].



Şekil 3.7. Alüminyum Alaşımlarının gruplandırılması [80]

Dövme alüminyum alaşımları

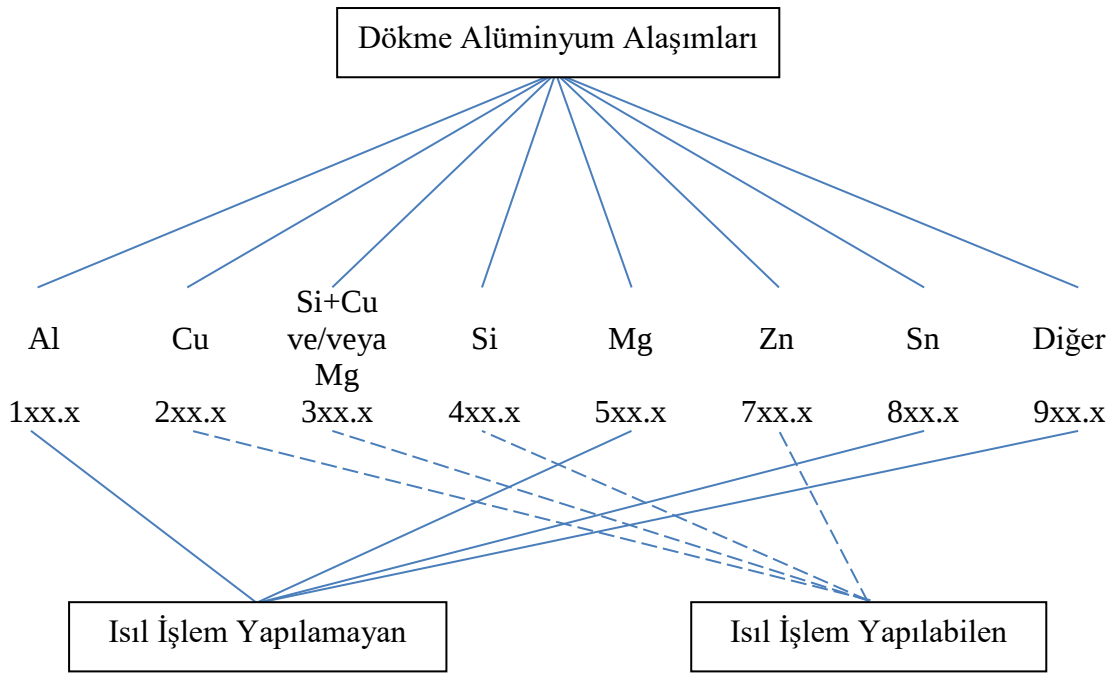
Plastik deformasyona kabiliyeti iyi olan dövme Al alaşımları dövülerek kolayca şekillendirilebilirler. Dövme ve döküm alüminyum alaşımlarının büyük bir kısmına ısıtım işlemi uygulanabilmektedir (Şekil 3.8). Isıtım işlemi uygulanamayan dövme alüminyum alaşımları 1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx serisi olanlardır. Bu alaşımlar sadece şekil değiştirme yolu (plastik deformasyon) ile sertleştirilebilirler. Isıtım işlemi ile sertleştirilebilen dövme alüminyum alaşımları ise 2xxx, 6xxx, 7xxx ve 8xxx serisi olanlardır [81,82].



Şekil 3.8. Isıtım işlemine göre dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [81,82]

Dökme alüminyum alaşımları

Döküm alüminyum alaşımlarının pek çoğu ötektik reaksiyona neden olan silisyum (%5-12 Si) içerirler (Şekil 3.9). Silisyum iyi akışkanlık ve dökülebilirlik sağlamaktadır. Akışkanlık, sıvı metalin kalıp içerisinde iyi şekilde vaktinden önce katılaşmadan akmasıdır. İyi bir dökümün kolay bir şekilde bir alaşımdan elde edilmesine ise dökülebilirlik denir [81,82].



Şekil 3.9. Isıl işleme göre döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [81,82]

3.5.2. Al alaşımlarına uygulanan ısı işlemler

Alüminyum alaşımlarına yaşlandırma ısı işlemi uygulanmaktadır. Yaşlandırma ısı işlemi Al alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra korozyon ve ısı iletkenliklerini de değiştirmektedir [83-85].

Yaşlandırma ısı işlemi üç aşamada gerçekleşmektedir. Bunlar sırasıyla; çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma (çökelme) işlemidir. Aşırı doymuş katı fazdan yaşlandırma ısı işlemi sonrasında mikro yapı içerisinde çok ince çökelti fazının dağılımı mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli rol oynar. Mikro yapı içerisinde oluşabilecek çökelti fazı doğal (tabii) olarak gerçekleşebileceği gibi yapay (suni) olarak da gerçekleşebilir. Genellikle al alaşımlarına yapay yaşlandırma ısı işlemi yapılır [86,87]. Al alaşımlarına uygulanan ısı işlemlerin kodlanması ve açıklanması Çizelge 3.3’de verilmiştir.

6xxx serisi Al alaşımlarının ticari karşılığı Al-Si-Mg alaşımlarıdır. Bu Al alaşımlarına en çok T6 yaşlandırma ısııl işlemi uygulanır. T6 yaşlandırma ısııl işlem sonrası 6xxx serisi Al alaşımlarının mekanik özellikleri artmaktadır. T6 ısııl işlemi sırası ile çökelti fazının oluşması için ötektik altı sıcaklık olan yaklaşık 545 °C’de uzun süre çözeltiye alma, ardından su vererek aşırı doymuş katı çözelti oluşturma ve son olarak 150-200 °C civarlarında yapay (suni) yaşlandırma işlemi uygulanır. Çözeltiye alma sırasında, magnezyum ve bir miktar silisyum çözünerek homojen bir katı çözelti oluşturur. Yaşlandırma ise, magnezyum ve silisyum alüminyum dendritleri içerisinde Mg_2Si olarak çökelmesine sebep olur [88].

Çizelge 3.3. Alüminyum alaşımlarında temper kodlaması [89,90]

Temper no	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
O	Tavlanmış (Mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	Sadece soğuk şekillendirilmiş (X soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder)
H12	Soğuk şekillendirme, 0 ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H14	Soğuk şekillendirme, 0 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
H16	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H18	Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar
H19	Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar
H2X	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış
H3X	Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
W	Çözelti ısıtma işlemi görmüş
T	Yaşlandırılmış
T1	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve doğal olarak yaşlanmış
T2	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk deformasyon uygulanmış, doğal olarak yaşlanmış
T3	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırma uygulanmış
T4	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlanmış
T5	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş ve yapay yaşlandırılmış
T6	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlanmış
T7	Çözeltiye alınmış ve stabilize edilmiş (aşırı yaşlanmış)
T8	Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş, yapay yaşlandırılmış
T9	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlem uygulanmış
T10	Sıcak şekillendirme sonrası soğumuş, soğuk işlem uygulanmış yapay yaşlanmış

3.5.3. 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının genel özellikleri

AA6xxx serisi olan Al alaşımları, yüksek oranlarda Magnezyum (Mg) ve Silisyum (Si) içerirler. Yapı içerisinde bulunan Mg, Si, Fe, Cu, Mn, Zn vb. elementlerin oranları, kullanım alanlarına göre farklı özelliklerde profil üretimini sağlarlar. Demir (Fe) oranı % 0,20 veya % 20'den daha düşük olan 6xxx serisi alaşımlarda, profil polisaj yapıldığında parlak yüzey elde edilir. Fe miktarının %20'den yüksek olması durumunda, profilin rengi grileşerek parlaklığı matlaşır. Bu sebeple mat yüzey elde etmek için de Fe miktarı en az % 0,18 olmalıdır. Fe miktarının artması ile beraber profilin yüzeyindeki matlık da artar. Fe miktarının % 0.30'dan fazla olması hem Ekstrüzyon işlemini zorlaştırır hem de eloksal sonrası donuk bir görünüme neden olur [91].

Profilin yapay yaşlandırma ısı işlemi sonrası olan sertliğe Mg ve Si miktarlarının etkisi vardır. Bu alaşım elementlerinin maksimum seviyede olması ile beraber sertlikte artış meydana gelirken üretim hızının düşmesine neden olur. Üretim hızının düşmesi ekstrüzyon işleminde kullanılan kütük (billet) sertliğinin de aynı oranda artmasından kaynaklanacaktır [91].

3.5.4. AA6061 alüminyum alaşımı

6xxx serisi alüminyum alaşımları içinde AA6061 alaşımı en sık kullanılanlardan bir tanesidir. Alüminyum alaşımları içerisinde orta derecede dayanıma sahip olan bir alaşımdır. Çok iyi korozyon direnci ve kaynaklanabilirliği olan bir Al serisidir. Orta seviyede bir yorulma dayanımı vardır. T4 ve T6 yaşlandırma ısı işlemi uygulanabilir bir Al alaşımıdır. Tipik kullanım alanları; Ray antrenörler, kamyon çerçeveleri, gemi yapımı, köprüler ve askeri köprüler, uzay uygulamaları, tüp pylonlar ve kuleler, taşımacılık, ısıya dayanıklı, motorlu tekneler, perçinler olarak sıralanabilirler [92].

3.6. Bor Minerali

Periyodik cetvelde “B” ile simgelendirilen bor, ısıya dayanıklı, sert bir yapıya sahiptir. Bor elementi 2300 °C’de erirken, 2500 °C’de kaynamaktadır. Bor doğada serbest olarak değil, tuz şeklinde ve diğer elementlerle bileşik olarak bulunur (Resim 3.1). Türkiye’de önemli

kaynakları bulunan bu element, savunma sanayinden bilgisayar sistemlerine, inşaat sektöründen otomobil sektörüne kadar pek çok alanda kullanılmaktadır (Şekil 3.10) [93].

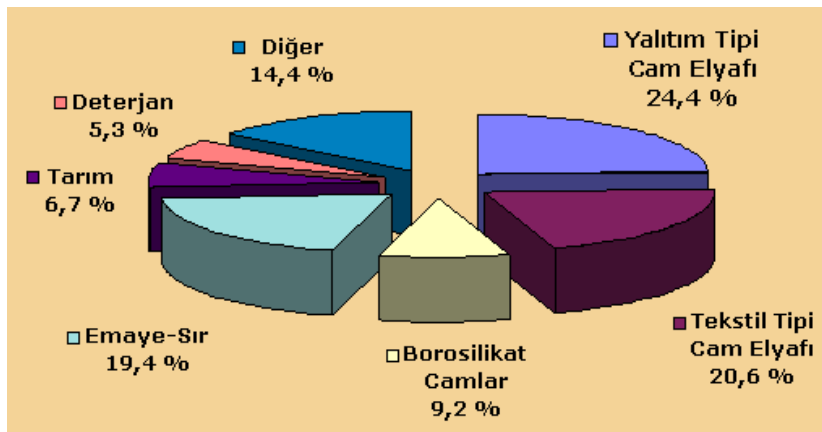
Bor minerali karbon ve başka elementlerle bileşik oluşturduğu için endüstride yüksek saflıkta bor zorlukla elde edilir. Günümüzde bor mineralleri ticari olarak çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Bor, minerallerini günlük yaşantımızda pek çok alanda kullanılmaktadır. Kullanım alanı bu derece geniş olan bor elementi uzay teknolojilerinde, askeriye sistemlerinde, deterjan ve sabun yapımında vb. yerlerde kullanılmaktadır. Bor birçok bilim insanı tarafından “21.yüzyılın Petrolü ve Sanayinin Tuzu” diye tanımlanmaktadır. Bor dünyadaki birçok doğal kaynaktan daha fazla kullanım alanına sahiptir. Örneğin günümüzün en önemli doğal kaynağı olan petrol; gaz yağı, akaryakıt, makine yağı, fuel oil, jet yakıtı gibi alanlarda kullanılırken Bor, bütün bu alanları kapsadığı gibi ekstra bilgisayar ve savunma sistemlerinde de kullanılabilir. Bu alanların dışında aşınmaya ve ısınmaya karşı dirençli olduğu için uçaklarda ve uzay araçlarında da kullanılmaktadır [94-96].

Borun temel cevherleri;

- Kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
- Boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)
- Kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- Uleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) gibi boratlardır [93].



Resim 3.1. Çeşitli bor mineralleri



Şekil 3.10. Bor madenlerinin kullanım alanlarına göre dağılımı [95]

3.6.1. Bor madenlerinin başlıca kullanım alanları

Bor mineralinin başlıca kullanım alanları Çizelge 3.4.'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bor madeninin uygulama alanı ve kullanıldığı yerler [94-96]

Uygulama alanı	Kullanıldığı yerler
Cam sanayi	Borosilikat camları, izolasyon cam elyafı, tekstil cam elyafı, optik lifler, cam seramikleri, şişe ve diğer düz camlar
Seramik sanayi	Emaye, sır, sırça, porselen boyaları
Nükleer sanayi	Reaktör kontrol çubukları, nükleer kazalarda güvenlik amaçlı ve nükleer atık depolayıcı olarak
Uzay ve havacılık sanayi	Sürtünmeye-aşınmaya ve ısıya dayanıklı malzemeler, roket yakıtı katkı malzemeleri, Askeri & Zırhlı Araçlar: Zırh plakalar, kompozit malzemeler
Elektronik-elektrik ve bilgisayar Sanayinde	Bilgisayarların mikro çip, cd-sürücüler, fiber optik kablolar, yarı iletkenler, elektrik kondansatörleri, gecikmeli sigortalar
İletişim araçlarında	Cep telefonları, modemler, televizyonlar
İnşaat-çimento sektöründe	Mukavemet artırıcı ve izolasyon ürünleri
Metalurji	Paslanmaz ve alaşımlı çelik, sürtünmeye-aşınmaya karşı dayanıklı malzemeler, metalurjik flaks, refrakterler, briket malzemeleri, lehimleme, döküm malzemelerinde katkı maddesi olarak, kesiciler, aşındırıcılar
Enerji sektörü	Hidrojen taşıyıcı, güneş enerjisinin depolanması, güneş pillerinde koruyucu olarak
Otomobil sanayi	Hava yastıklarında, hidroliklerde, plastik aksamda, yağlarda ve metal aksanlarda, ısı ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla, antifrizler
Tekstil sektörü	Isıya dayanıklı kumaşlar, yanmayı geciktirici ve önleyici selülozik malzemeler, izolasyon malzemeleri, tekstil boyaları deri renklendiricileri
İlaç ve kozmetik sanayi	Dezenfekte ediciler, antiseptikler, diş macunları
Tıp	Osteoporoz tedavilerinde, alerjik hastalıklarda, psikiyatride, kemik gelişiminde ve artiritte, menopoz tedavisinde, beyin kanserlerinin tedavisinde
Kimya sanayi	Bazı kimyasalların indirgenmesi, elektrolitik işlemler, flotasyon ilaçları, banyo çözeltileri, katalistler, atık temizleme amaçlı olarak, petrol boyaları, yanmayan ve erimeyen boyalar, tekstil boyaları
Temizleme ve beyazlatma sanayi	Toz deterjanlar, toz beyazlatıcılar, parlaticılar
Tarım sektörü	Gübreler, böcek-bitki öldürücüler
Kağıt sanayi	Beyazlatıcı olarak
Koruyucu	Ahşap malzemeler ve ağaçlarda koruyucu olarak, boya ve vernik kurutucularında

Bunların dışında;

- Fiber optik
- Kauçuk ve plastik sanayii
- Fotoğrafçılık
- Patlayıcı maddeler (havai fişek vb.)
- Petrol boya ları, yanmayan ve erimeyen boyalar, tekstil boya ları
- Zımpara ve aşındırıcılar
- Manyetik cihazlar
- İleri teknoloji araştırmaları gibi alanlarda da kullanılmaktadır [94-96].

3.6.2. Bor karbür (B₄C)

Bor karbür, etkili bir takviye malzemesinden beklenen, özellikle yüksek sertlik (elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert üçüncü malzemedir) ve rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özelliklerin çoğunu gösterdiğinden, alüminyum ve alaşımları için çekici ve talep gören bir takviye malzemesidir [97]. Bor karbürün ısıl kararlılığı çok yüksek ve kimyasal inertliği çok iyi değerlerdedir [98]. Bor karbür rombohedral kristal yapısındadır. Yüksek nötron absorpsiyon kesitine sahiptir [99].

Bor karbür, yüksek ergime sıcaklığına sahip, yüksek sertlik ve aşınma direnci gösteren, düşük yoğunluklu ve kimyasallara karşı korozyon direnci yüksek bir malzemedir [100]. Bor karbür, seramiklerin içinde kübik bor nitrür ve elmasa oranla üçüncü en sert malzemedir. Bu malzemenin bazı özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir [93].

Çizelge 3.5. Bor karbür tozun genel özellikleri [101]

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm ³	2,52
Sertlik (100g Knopp)	Kg/mm ²	2900-3580
Kristal yapı		Rombohedral
Ergime sıcaklığı	°C	2450
Isıl genleşme	0c	5x10-6
Elektrik iletkenliği	Ω ⁻¹ -m ⁻¹	140

3.6.3. Bor karbürün üretimi

Bor karbür; genellikle elektrik ark fırınlarında, bor oksit (B_2O_3), borik asit (H_3BO_3), boraks ($NaB_4O_7 \cdot 10H_2O$), ve borasit ($Mg \cdot Cl_2B_{16}O_{30}$) gibi çeşitli bor-oksijen bileşiklerinin karbon ile indirgenmesi reaksiyonu sonucu elde edilirler [97].

Ticari bor karbürün üretimi, elektrik ark ocaklarında bor oksit ve karbon karışımının ergitilip reaksiyona sokulması ile elde edilmektedir. Fırın içerisinde elektrik arkı grafit elektrotlar arasında elde edilir ve bu ark bor oksidin ergimesi ve karbonla reaksiyona girmesini sağlayacak yeterli termal enerjiyi vermektedir. Reaksiyon büyük hacimlerdeki karbonmonoksidin serbest kalması ile oluşmaktadır. Bor karbürün uygun bir şekilde erimemesi katı bor karbürle temas halinde bulunan sıvı kısmının katı haldekiyle aynı bileşime sahip olmadığını gösterir. Ark ocağında bulunan ergiyik, katı ve sıvı faz dengeye ulaşmadan katılaştırılır. Ergiyik halde kalan malzeme en son sıvı katılaşana kadar karbonca artarak zenginleşir ve bileşiminde ötektik olarak bor karbür ve grafit karışımı bulunur. Her ne kadar pratikte bor karbür özenle hazırlansa da, tüm ark ocağı ürünleri belli bir miktar serbest grafit ihtiva ederler [97].

Eşitlik 3.1’de belirtilen borik asit ve karbon bileşimi, fırın içerisine jarz edilir ve fırın içerisindeki grafit çubuklara ark uygulanır. Ark neticesinde reaksiyon;



Burada gerçekleşen karbon monoksit reaksiyonu veren endotermik reaksiyon sonucunda B_4C meydana gelir. Reaksiyon sonucu açığa çıkan karbon monoksit gazı, ventilasyon ile sistemden uzaklaştırılır.

Eşitlik 3.2’de ise bor oksidin, karbon ve magnezya ısıl redüksiyonunda ekzotermik reaksiyon ile B_4C elde edilir.



B_4C ’ün safsızlaştırılması için MgO ve reaksiyona uğramamış magnezyumun HCl ve H_2SO_4 kullanımı ile bünnyeden uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu reaksiyon ile elde edilen B_4C kırılıp öğütülerek asit ile muamele edilir ve metalik kalıntılar giderilmiş olunur. Elde edilen toz gruplara ayrılarak sınıflandırılır [97].

3.6.4. Bor karbürün kullanım alanları

Bor karbür (B_4C) bileşeninin olağanüstü sertliğinden dolayı kurşungeçirmez yeleklerde ve tank zırhlarında kullanılmaktadır. Elmastan sonra bilinen en sert malzemelerden biri olan B_4C , Mohs sertlik skalasında 9,5 derecesi vardır [102].

Bor karbür (B_4C), mükemmel aşınma direnci ve sertliği nedeni ile çeşitli nozullarda, elmasa göre daha ekonomik olduğundan aşındırıcı olarak kaba leplemede, düşük yoğunluğu avantajıyla; savunma sanayinde zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır [103].

Bor karbür; yüksek sertlik, darbe-aşınma dayanımı ve düşük yoğunluk gibi üstün fiziksel ve mekanik özellikler göstermektedir [104,105]. Bor karbürün kullanım alanları Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Bor karbürün başlıca kullanım alanları [106-110].

B_4C kullanım alanları
Asma kilitler
Kişilerde ve araçlarda koruyu balistik zırh malzemesi olarak
Kumlamada kum püskürtme ucu olarak
Yüksek basınçlı su jet nozulları
Kazımaya ve aşınmaya dayanıklı kaplamalar
Presleme ve kesim kalıpları
Aşındırıcılar
Nükleer reaktörlerde nötron soğurucu
Katı yakıt ramjetler için yüksek enerjili yakıt
Araçların fren balataları
Metal matris kompozitler

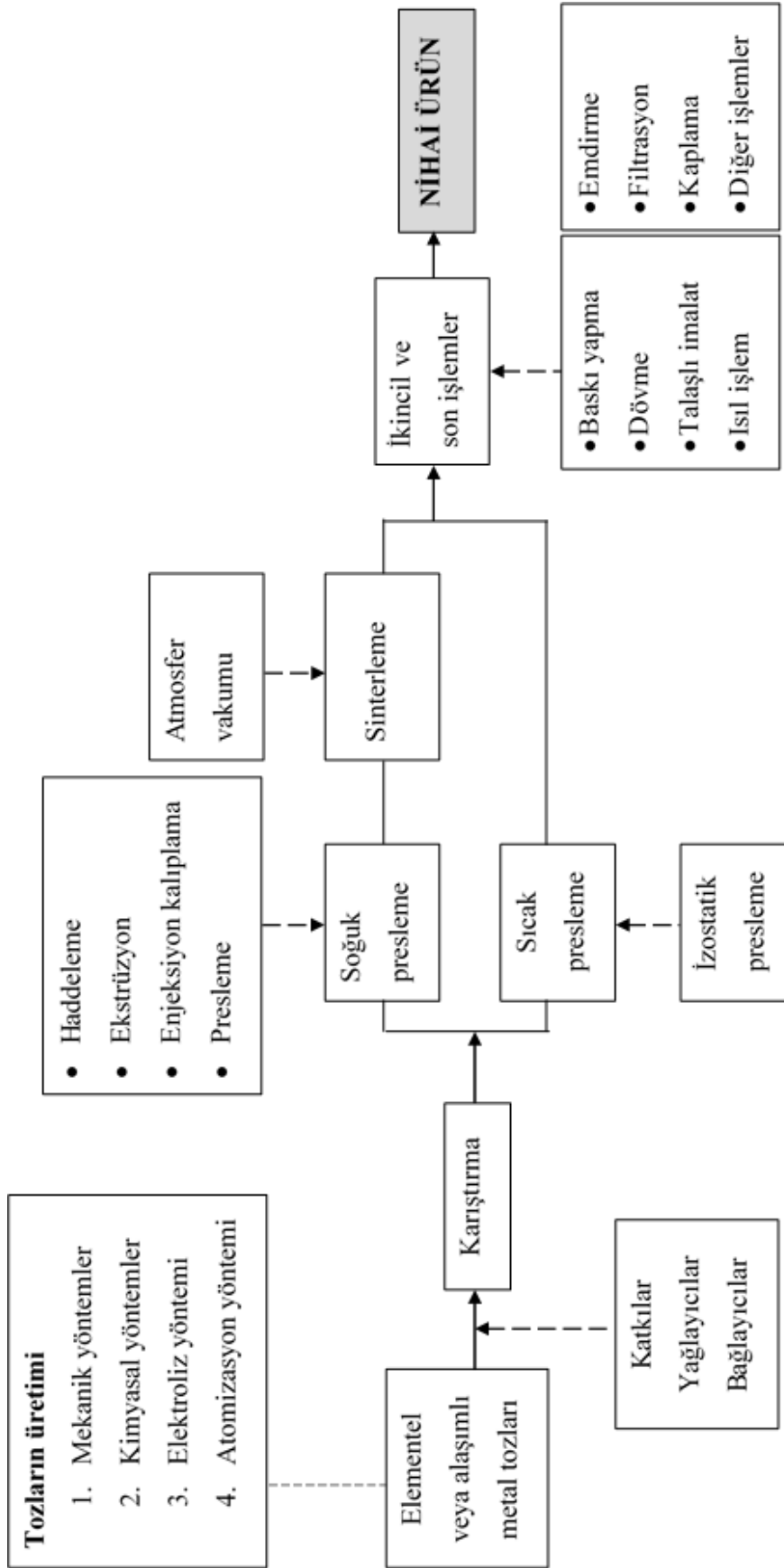
4. TOZ METALURJİSİ

Metal tozu, mikron boyutundan milimetreye kadar çeşitli boyut ve saflıklarda farklı metallerden üretilen tozlara verilen genel isimdir [111]. Toz metalurjisi (TM), metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesiyle elde edilen ürünlerin imalatını kapsar. Başka bir deyişle TM, metal tozlarının, kendine has yöntemler ile küçük, karmaşık geometrili, diğer klasik metalurji yöntemleriyle üretilmesi zor olan iş parçalarının seri olarak üretilmesine olanak sağlayan toz malzeme teknolojisidir [112-116]. Şekil 4.1’de genel olarak TM ile parça üretimi şematik olarak gösterilmiştir.

Bu teknik küçük, karmaşık ve boyutsal hassasiyeti yüksek parçaların seri imalatında son derece ekonomik ve uygundur. Malzeme kaybı çok az olmakta, küçük toleransla homojen kalite dağılımında parçalar üretilebilmektedir. Bunların yanında belirli derecede gözeneklilik (porozite) ve geçirgenlik de elde edilir [112-116].

İşleme teknolojileri arasında farklı olan TM yöntemi çoğu zaman döküm, dövme veya talaşlı imalat teknikleri ile bir rekabet halindedir. Döküm yöntemi ile üretilmesi zor olan mukavemetli, aşınma direnci yüksek ve yüksek çalışma sıcaklıklarında elde edilebilecek parçalar TM yöntemi ile üretilebilmektedir. TM yöntemi ile döküm yönteminden sonra yapılan talaşlı imalat gibi ikincil işlemleri ortadan kaldırarak yüksek hassasiyette parça üretimini sağlamak mümkündür. Döküm tekniğinde meydana gelebilecek gözenek, çekme ve kalıntı oluşumunu ortadan kalkar [112-116].

TM yöntemi en eski metalürji tekniklerinden birisi olduğunu dünyanın farklı bölgelerinde çalışan arkeolojik bilim adamları tarafından kanıtlanmıştır. Örneğin toz altın İnkaların mücevherlerinde kullanılmıştır [117]. 1826’da Rusya’da tedavüle çıkarılan platin para toz metalurjisinin ilk endüstriyel uygulaması olmuştur. 1903-1905 yılları arasında, Wolfram (W) ve Molibden (Mo) sinterleme ile endüstriyel imalatı gerçekleştirilmiştir. W’ın ergime sıcaklığı 3400 °C, Mo’in ki 2600 °C civarındadır. Çok yüksek ergime sıcaklıklarından ötürü ergitme ve döküm yöntemi ile bu iki metalden tel ve levha üretiminde karşılaşılan zorluklar TM yöntemiyle ortadan kaldırılmıştır [118].



Şekil 4.1. Toz metalürjisi yöntemi ile parça üretiminin şematik çizimi [112-116]

TM günümüz endüstrisinde, otomotiv sektöründen tıbbi malzemelere, uçak ve uzay sanayisinden askeri araç ve ekipmanlara, enerji sektöründen filtre üretimine kadar hemen her alanda yaygın bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. [119].

4.1. TM ile Üretim Yönteminin Avantajları

TM ile üretim yapmak çoğu zaman büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlardan bazıları şunlardır [112-116].

- Parçacık takviyeli MMK üretiminde takviye elemanlarının kontrolü mümkün olduğundan, yapının kontrolünü sağlamak da mümkün olmaktadır.
- Yüzey kalitesi ve hassasiyet yüksek malzemelerin üretimine çok uygundur.
- Kendinden yağlamalı yataklar, sert metaller, kesici uçlar ve mekanik filtrelerin üretimine uygun bir yöntemdir.
- Yapısı gözenekli olan parçaların üretimine son derece uygundur.
- Karmaşık şekilli parçalar daha hızlı ve hassas üretilebilir.
- Yüksek ergime sıcaklığı olan malzemeler için son derece uygun ve ekonomik bir imalat yöntemidir.
- Üretim aşamasında malzeme kaybı yok denecek kadar azdır. %99'lar seviyesinde hammadde kullanımı söz konusudur.
- Üretilen parçaların gözeneklilik oranı kontrol edilebilir.
- Bilinen yöntemlerle birbirine karıştırılamayacak malzemeler birleştirilebilir.
- Çoklu üretimde ekonomiktir. Parça üretim hızı istenildiği gibi ayarlanır.
- Yüksek hız çelikleri ve süper alaşımlar bu yöntem ile geliştirilmiş özelliklerle üretilebilir.
- Çevreye duyarlı bir üretim yöntemidir.

4.2. TM ile Üretim Yönteminin Dezavantajları

TM yönteminin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar genel olarak şunlardır [112-116].

- İlk yatırım maliyeti oldukça yüksektir. (Presleme ekipmanları, kalıp, sinter teçhizatı vb.)
- Bu yöntemle büyük parçalar, radyal delikli parçalar, girintili köşeli parçalar üretilemez.
- 100 gramdan ağır parçalar için ekonomik değildir.
- Talaşlı imalata göre toleransı kabadır.
- Metal tozlarının üretim maliyetleri ingota göre daha fazladır.
- Mekanik ve fiziksel özellikler ilave bazı işlemler olmadıkça sınırlı kalır.
- Belirli bir kapasitenin altındaki üretim hızlarında diğer yöntemlerle maliyet konusunda rekabet edemez.
- Büyük parçaları preslemek için çok yüksek basınç değerlerine ihtiyaç vardır.
- Toz kullanımı temizlik gerektirir. Yabancı maddeler ya da artıklar toz halindeki malzemeye nüfuz edebilir.
- İş sağlığı ve güvenliği açısından riskli çalışma ortamına sahiptir.

4.3. TM Temel Üretim Basamakları

Gerekli boyut, şekil ve paketlenme özelliklerine sahip metal tozunu güçlü, mükemmel ve yüksek performanslı bir şekle dönüştüren TM’de temel basamaklar, toza şekil verilmesi veya sıkıştırma işlemi ve sinterleme yolu ile tozların ısıl birleştirilmesidir [112-116]. Ancak TM parçalarının üretiminde genel olarak yedi aşama mevcuttur;

- Toz hazırlama (karıştırma ve harmanlama)
- Presleme
- Pişirme
- Yağ emdirme ve kalibrasyon (gerekirse)
- Tam yoğunluk işlemleri (toz dövme)
- Çapak alma
- İkincil işlemler

4.3.1. Toz üretimi

TM’de ilk aşama tozların üretilmesine hazırlıktır. Kullanılacak olan tozları üretmeden önce hangi üretim tekniği ile üretileceğine karar verilmesi gerekir. Tozların üretimi için birçok ticari metot vardır. Bunlar;

- Mekanik yöntemler
- Kimyasal yöntemler
- Elektroliz yöntemi
- Atomizasyon yöntemleridir [112-116].

Kullanılacak olan tozların şekli üretim tekniğine bağlı olarak farklı geometrilere olabilmektedir. Üretilen tozların tane boyutu ve şekli, kalıp içerisindeki akışı, sıkıştırılabilirliği ve paketlemeyi etkilemektedir [112-116]. Toz üretim yöntemleri ile üretilen tozların tane şekilleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Toz metalürjisinde kullanılan olası parçacık şekilleri ve önerilen niteliksel tanımlar [112-116]

4.3.2. Toz karakterizasyonu

Toz üretim yöntemleriyle üretilen tozların belirli başlı özelliklerinin bilinmesi ve muayene edilmesiyle toz metal parça üretimi için önemlidir. Bu nedenle TM yönteminde üretilen tozların presleme, Sinterleme ve ikincil işlemler için karakterize edilmesi gerekmektedir. Genel olarak üretilen tozların incelenmesinde iki tür teknik kullanılır. Bunlar;

- Tozların fiziksel özelliklerinin incelenmesi
- Tozların kimyasal özelliklerinin incelenmesi

Tozların fiziksel özellikleri

Üretilen tozların fiziksel özellikleri; tane boyutu, tane şekli, toz tane boyutu, özgül yüzey alanı, tozların görünür yoğunluğu ve toz akış hızıdır. Belirlenen bu özelliklerden tane şekli, tane boyutu ve özgül yüzey alanı tozların ham yoğunluğuna, paketlenmesine ve sinterlemeye etki etmektedir. Tozların en önemli özelliklerinden ikisi toz tane şekli ve toz tane boyutudur. Tozların tane şekli ışın ve elektron mikroskoplarıyla tayin edilir [112-116].

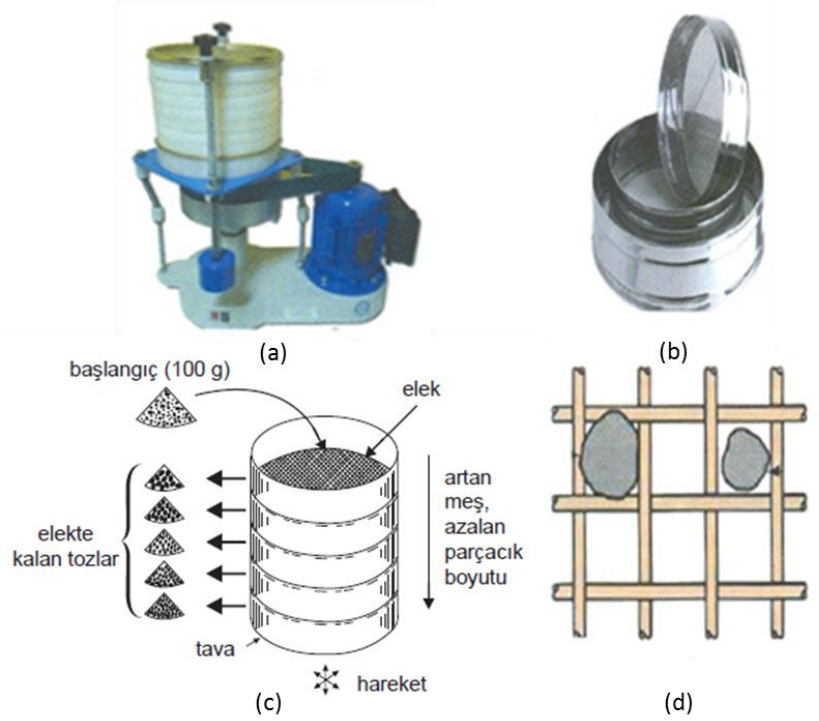
Toz tane boyutu ölçümü farklı teknikler kullanılarak yapılabilir. Toz boyut ölçümü yapan cihazlar parçacık boyutunu küresel olarak kabul edip buna göre ölçüm yaparlar. Bunlar;

- *Elek analizi*
- *Sedimentasyon*
- *Işık hızması*
- *X-ışınları*
- *Mikroskopik analizdir.*

Elek analizi

En çok kullanılan toz tane boyutu tekniklerinden bir tanesidir. Metalsel veya ipek tellerden elek kullanılarak yapılan bir tekniktir. Eleğin yüzeyinde bulunan birim alandaki delik sayısı Meş (mesh) olarak ifade edilir. Bir inç'teki tel sayısına elek boyutu denir. Elek ile toz ölçüm tekniği tozların net çapı belirlenemez ancak belirli parçacık boyutundan küçüktür veya büyüktür denilebilir. Şekil 4.3'de eleğin çizimi, ölçüm cihazı ve elek verilmiştir. Elek ölçüm cihazının en üstündeki eleğin içerisine konulan 100 g toz karışımı cihaza verilen titreşim yardımı ile parçacık boyutuna bağlı olarak elenirler. Büyük olan parçacıklar üst eleklerde

kalırken küçük parçacıklar ise aşağı doğru hareket etmektedir. Aşağıya doğru indikçe meş artarken parçacık boyutu küçülmektedir. Çizelge 4.1’de standart elek boyutları verilmiştir [112-116].



Şekil 4.3. a) eleme cihazı, b) elek, c) eleme işleminin yapılışı, d) elek aralıkları

Çizelge 4.1. Standart elek boyutları [112-116]

Elek boyutu	Açıklık, μm	Elek boyutu	Açıklık, μm
18	1000	100	150
20	850	120	125
25	710	140	106
30	600	170	90
35	500	200	75
40	425	230	63
45	355	270	53
50	300	325	45
60	250	400	38
70	212	450	32
80	180	500	25
		635	20

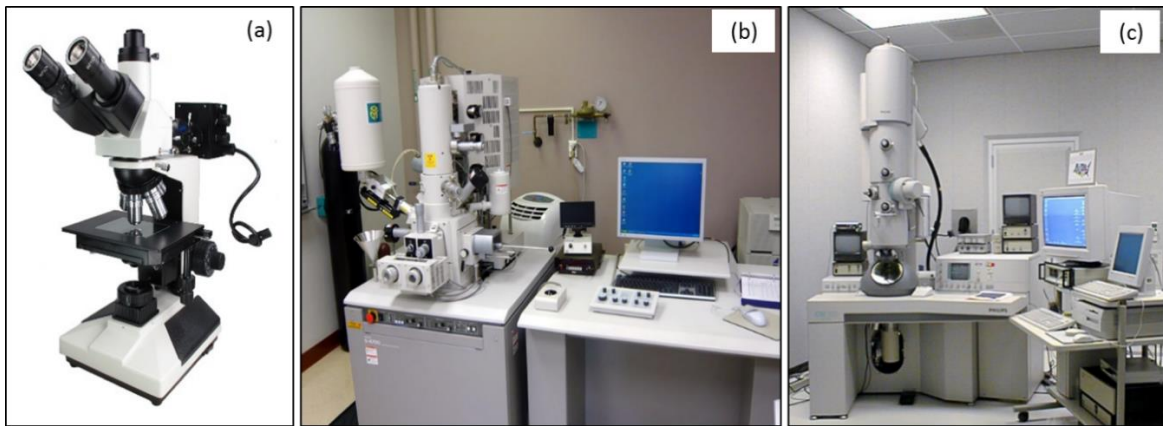
Şekil 4.4.'e baktığımızda sırası ile; (1) lazer kaynağı, (2) ışın genişletici, (3) ölçüm hücresi, (4) Fourier merceği, (5) herhangi bir merceğe çarpmayan ışın demeti, (6) aynı büyüklükteki tanelere çarparak kırılan ışınlar, (7) mercek odak uzaklığı, (8) çok elemanlı dedektör, (9) merkezi dedektör, (10) süspansiyon akış yönü, (11) örnek hazırlama ünitesi, (12) bilgisayardır [112-116]

X-ışını teknikleri

Bu teknik ile özellikle çok küçük tane boyutuna sahip tozların ölçümü yapılmaktadır. Küçük açılı saçınımı olarak bilinen bu tekniktir. X-ışınlarının şiddeti ile parçacığın hacmi değişkenlik gösterir. Özellikle 50 nm'den düşük olan parçacık boyutları bu teknik ile rahatlıkla belirlenebilir [112-116].

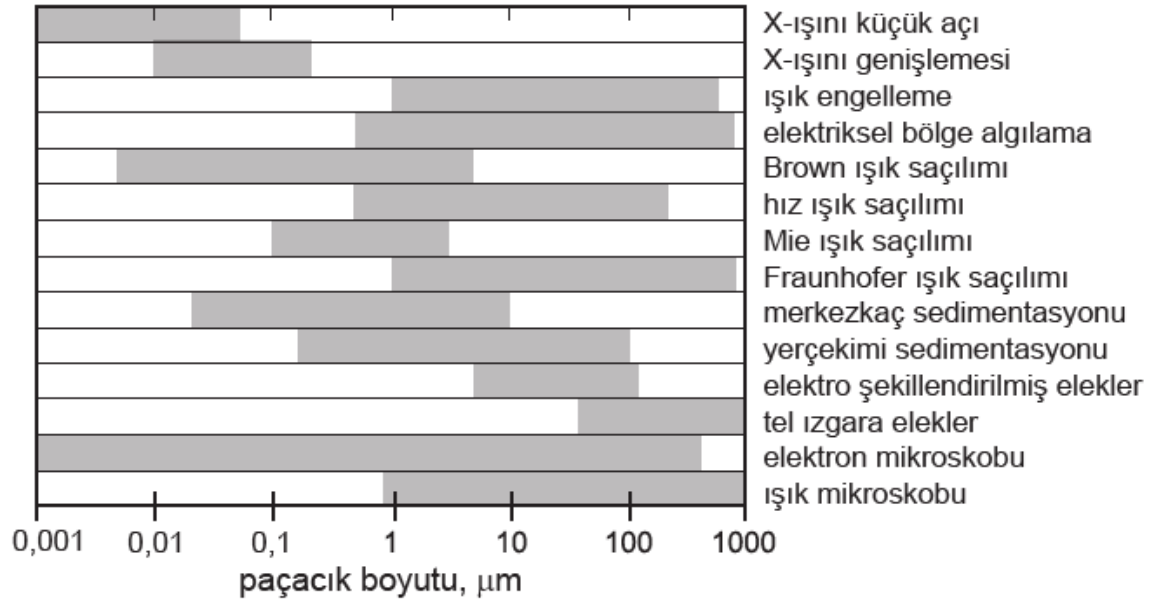
Mikroskobik analiz

Toz tane boyut analizi optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) gibi tekniklerin kullanıldığı bir yöntemdir. 50 mikron altı toz parçacıklarının boyut analizi yapılabilmektedir. Nanometreden milimetreye kadar olan toz tanelerinin boyut analizleri, şekil analizleri hem de kimyasal analizleri elektron mikroskoplarında yapılabilmektedir. Bu sebeplerden ötürü diğer tekniklere göre daha çok tercih edilirler. Resim 4.1'de toz tane boyutu ve tane şekli ölçümünde kullanılan cihazlar [112-116].



Resim 4.1. Toz tane boyutu ölçümünde kullanılan a) optik mikroskop, b) taramalı elektron mikroskobu, c) geçirmeli elektron mikroskobu (TEM)

Toz tane boyut ölçümü yapan pek çok cihaz teknik vardır. Bunlardan bazıları Şekil 4.5’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 4.5. Toz tane boyutu ölçümü yapılan tekniklerin birbirleriyle karşılaştırılması [112-116]

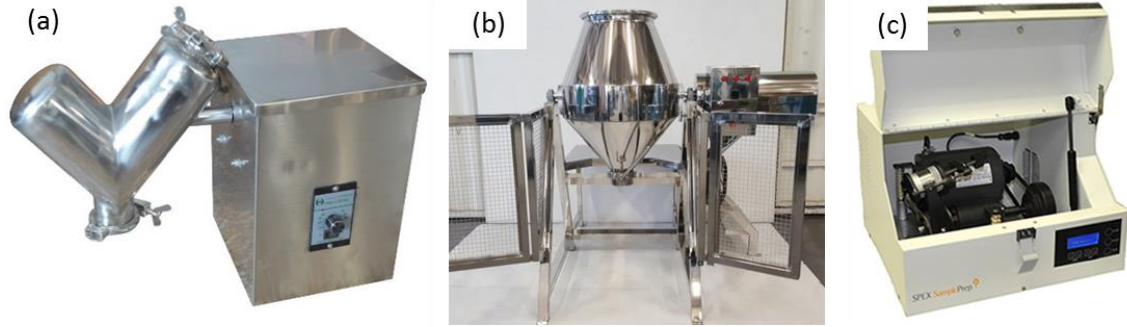
Tozların kimyasal özellikleri

TM tekniğinde üretilen tozlar; elementel saf tozlar, ön karışımli tozlar ve bileşik tozlar olabilir. Bu sebepten ötürü üretilen tozların kimyasal karakterizasyonu yapılarak safsızlık oranları belirlenmelidir. Bu durum uygun toz malzeme seçimi açısından oldukça önemlidir. Üretilen tozun kimyasal karakterizasyonu farklı teknikler kullanılarak yapılabilmektedir. Bunlar; yaş analiz, emisyon veya alev spektroskopu, atomik absorpsiyon, X-ışını kırınımı veya X-ışını floresan teknikleridir [112-116].

4.3.3. Harmanlama ve karıştırma

Harmanlama ve karıştırma birbirlerinden farklı terimlerdir. Aynı kimyasal özelliğe sahip farklı tane boyutlarındaki tozların karıştırılmasına harmanlama denir. Karıştırma ise farklı kimyasal özelliklerdeki farklı veya benzer tane boyutunda olan birleştirmek bir araya getirmek ve homojen bir dağılım sergilemek için yapılan işleme denilmektedir. Harmanlama; presleme öncesinde aynı kimyasal özellikte olan tozların ortalama tane boyutunu eşitlemek için yapılan işlemdir. Karıştırma işlemi tozların topaklanmasını

önlemek ve homojen dağılım sergilemesi için yapılan işlemdir. Tozların karıştırılması özel olarak imal edilmiş karıştırıcı makinelerde yapılır. Toz karıştırmada kullanılan bazı makineler Resim 4.2’de verilmiştir [112-116].



Resim 4.2. Toz karıştırmada kullanılan makineler, a) V tipi, b) konik, c) spex üç boyutlu

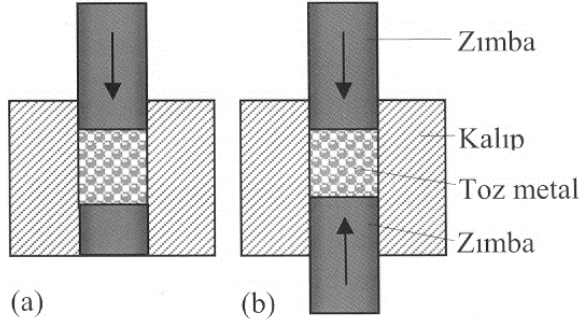
4.3.4. Tozların sıkıştırılması

Kalıp içerisine konulan belirli bir toz kütlesinin basınç altında kolay paketlenebilme ve teorik yoğunluğa yaklaşma derecesine “tozun sıkıştırılabilirliği” denir. Sıkıştırılabilirlik tozun paketlenme özelliğini verdiğinden önemli bir faktördür. Bir tozun sıkıştırılabilirliği; toz şekline, toz tane büyüklüğüne ve dağılımına, tozun sertliğine ve yağlayıcılara bağlıdır. Toz sıkıştırma esnasında, toz tanecikleri arasında sürtünmeyi azaltarak tozların akıcılığını artırmak ve tozun sıkıştırılabilirliğini artırmak için sıkıştırılan tozun içerisine belirli oranlarda *yağlayıcılar* katılır. Toz sıkıştırmada kullanılan yağlayıcılar, Çinko stearat, alüminyum stearat, lityum stearat, magnezyum stearat, kalsiyum stearat, stearik asit ve grafittir [112-116].

Toz sıkıştırma yöntemleri ile elde edilen şekil ürünün son şekli olduğundan, sıkıştırma yöntemi mekanik özellikleri etkilemektedir. Birçok toz şekillendirme tekniği vardır. Toz şekillendirme teknolojisi pek çok durumda sırası ile, tozların sıkıştırma kalıplarına konulması, tozların soğuk, yarı sıcak veya sıcak sıkıştırılması, bağlayıcı ayrıştırılması ve Sinterleme işlemlerini kapsar. Bir birinden farklı toz sıkıştırma teknikleri vardır. Bunlar;

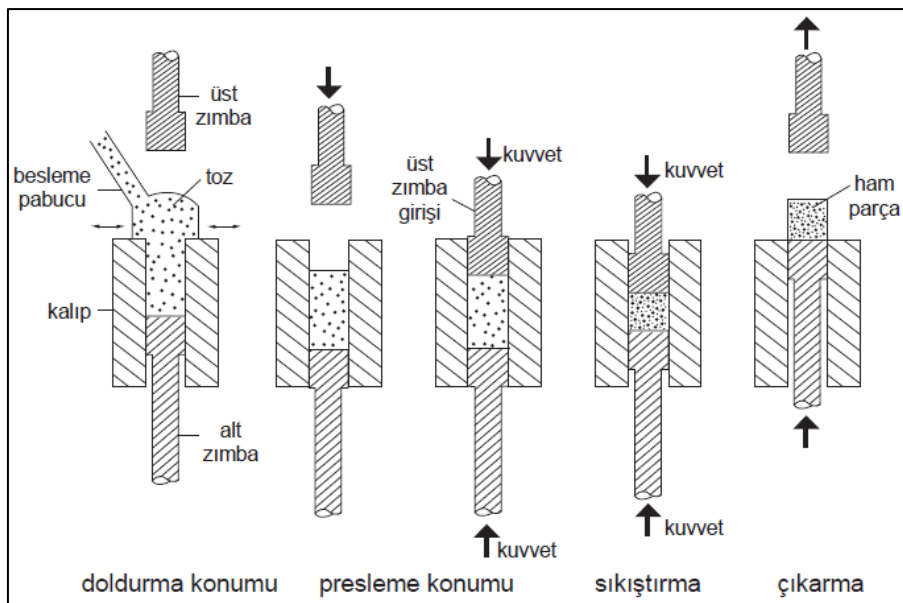
- Presleme
- Haddeleme
- Ekstrüzyon
- İzostatik presleme
- Toz enjeksiyon kalıplama teknikleridir [112-116].

TM yöntemi ile parça üretiminde en yaygın kullanılan toz sıkıştırma tekniği preslemedir. Presleme işlemi özel olarak tasarlanan çelik kalıplarda tek taraflı veya çift taraflı basınç uygulanarak yapılan bir işlemdir (Şekil 4.6).



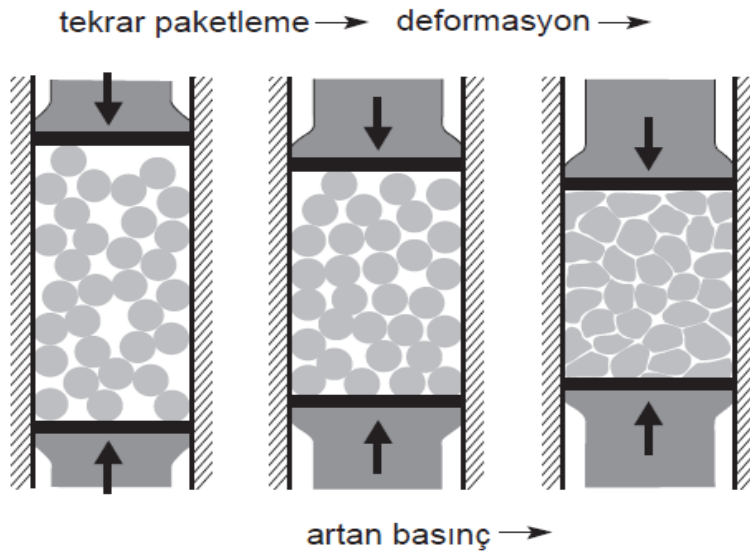
Şekil 4.6. a) tek yönlü sıkıştırma, b) çift yönlü sıkıştırma [112-116]

Tozların preslenmesi esnasında uygulanan basınç ile toz ile kalıp arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek ve presleme sonrasında numunenin kalıptan kolay çıkmasını sağlamak için kalıp içerisine yağlayıcı sürülür. Şekil 4.7’de Kalıpta sıkıştırma işlem sırası verilmiştir. İlk olarak alt zımba aşağıda doldurma konumunda iken presleme pabuç yardımı ile kalıp boşluğuna tozlar dolar. Doldurma pabucunun geri çekilmesinden sonra alt zımba aşağı doğru hareket ederek tozların preslenmesi için hazır konuma getirilir. Üst zımba kalıba girer, alt ve üst zımbalar merkeze doğru ilerleyerek tozları sıkıştırırlar. Sıkıştırmadan sonra, üst zımba geri çekilir ve alt zımba yukarı doğru hareket ederek preslenen numuneyi kalıp içerisinden çıkartır ve tekrardan presleme işlemini başlatmış olur [112-116].



Şekil 4.7. Tozların kalıpta sıkıştırma işlem akışı [112-116]

Presleme işleminden önce tozların sahip olduğu yoğunluğa *görünür yoğunluk* denilmektedir. Presleme esnasında toz parçacıkları birbirine daha çok yaklaşarak şekil değiştirirler. Tozların preslenmesi sonrası elde edilen yoğunluğa *ham yoğunluk* denir. Toz parçacıklarının paketlenmesi esnasında düşük basınçlar altında tozlar birbirleri üzerinden kayarak hareket ederler. Uygulanan sıkıştırma basıncı arttıkça parçacıklar sertliklerine göre şekil değiştirerek gözeneklerin kapanmasına yol açar. Bu durum üretilen malzemenin yoğunluğunun artmasına sebep olur. Şekil 4.8’de tozların, presleme basıncına bağlı olarak kalıp içerisindeki hareketi verilmiştir [112-116].



Şekil 4.8. Toz sıkıştırma kademelerinin bir görünüşü [112-116]

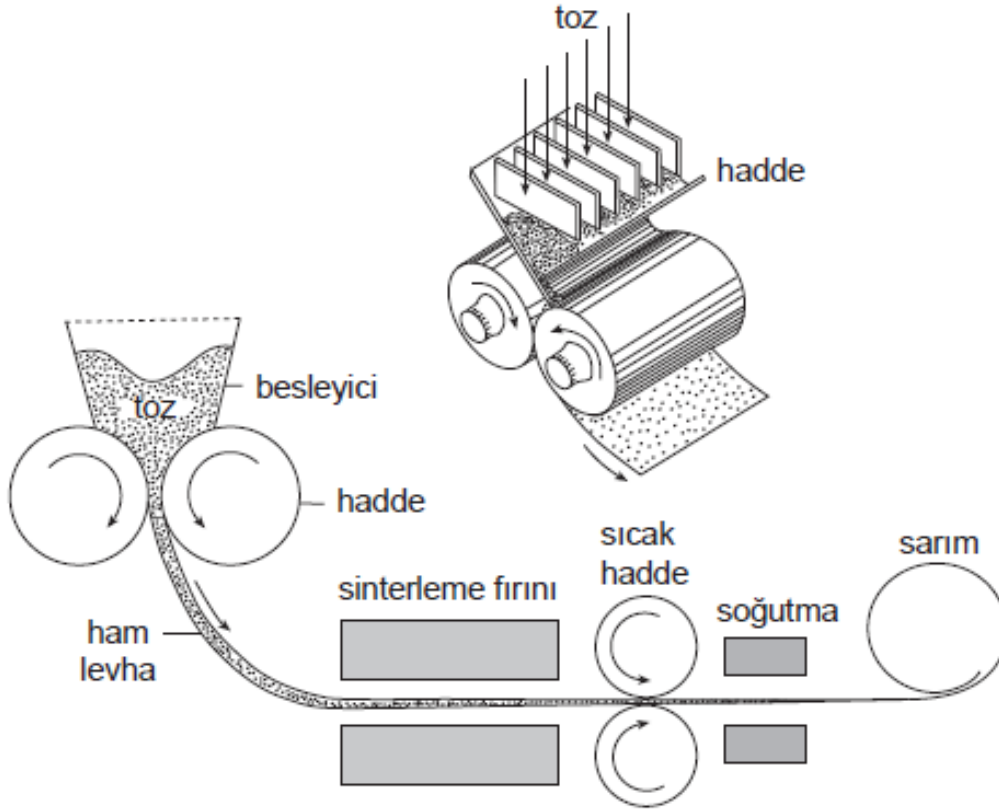
Toz malzemenin cinsine bağlı olarak presleme basınçları da değişmektedir. Çizelge 4.2’de bazı malzemeler için sıkıştırma basınç aralıkları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Sık kullanılan malzemeler için sıkıştırma basınç aralıkları [112-116]

Malzeme	Ortalama parçacık boyutu, μm	Sıkıştırma basıncı, MPa	Ham yoğunluk, % Teorik
Alümina	0,5 (topaklanmış)	110 - 140	45 - 60
Alüminyum	45	150 - 275	90 - 95
Pirinç	65	400 - 700	85 - 90
Bronz	85	200 - 300	85 - 90
Karbürler	1,5 (topaklanmış)	140 - 400	45 - 55
Ferritler	0,3 (topaklanmış)	110 - 165	45 - 50
Demir	80-120	480 - 820	85 - 92
Paslanmaz Çelik	65	700 - 840	85 - 88
Çelik	80-100	500 - 820	88 - 92
Tantalyum	1	70 - 140	30 - 40
Tungsten	1-5	240 - 500	55 - 60
Tungsten Karbür	1 (topaklanmış)	200 - 350	60 - 62

4.3.5. Haddeleme ile toz metal parça üretimi

Bu teknik ile çubuk, levha ve şerit gibi basit geometrik parçaların üretimi yapılır. Burada gevşek halde bulunan tozlar iki veya daha fazla sayıda olan silindir arasından geçirilir. Silindirden geçirilen gevşek tozlar sıkıştırılarak şekillendirilir. Silindirler arasındaki açıklık plastik deformasyon ve nihai ürün kalınlığının belirlenmesi için önemli bir parametredir. Haddeleme işlemi çok düşük hızlarda gerçekleştirilir. Haddeleme işlemi silindirlerin konumuna bağlı olarak yatayda veya düşeyde olabilmektedir. Tozların deformasyonu esnasında tozlar haddeleme doğrultusunda yönlendirilerek şekil almaktadır. Gevrek tozların haddeleme işleminde pekleşme meydana getirmesinden dolayı sünek tozlar bu işlem için daha uygundur. Şekil 4.9’da haddeleme işleminin şematik görünümü verilmiştir [112-116].



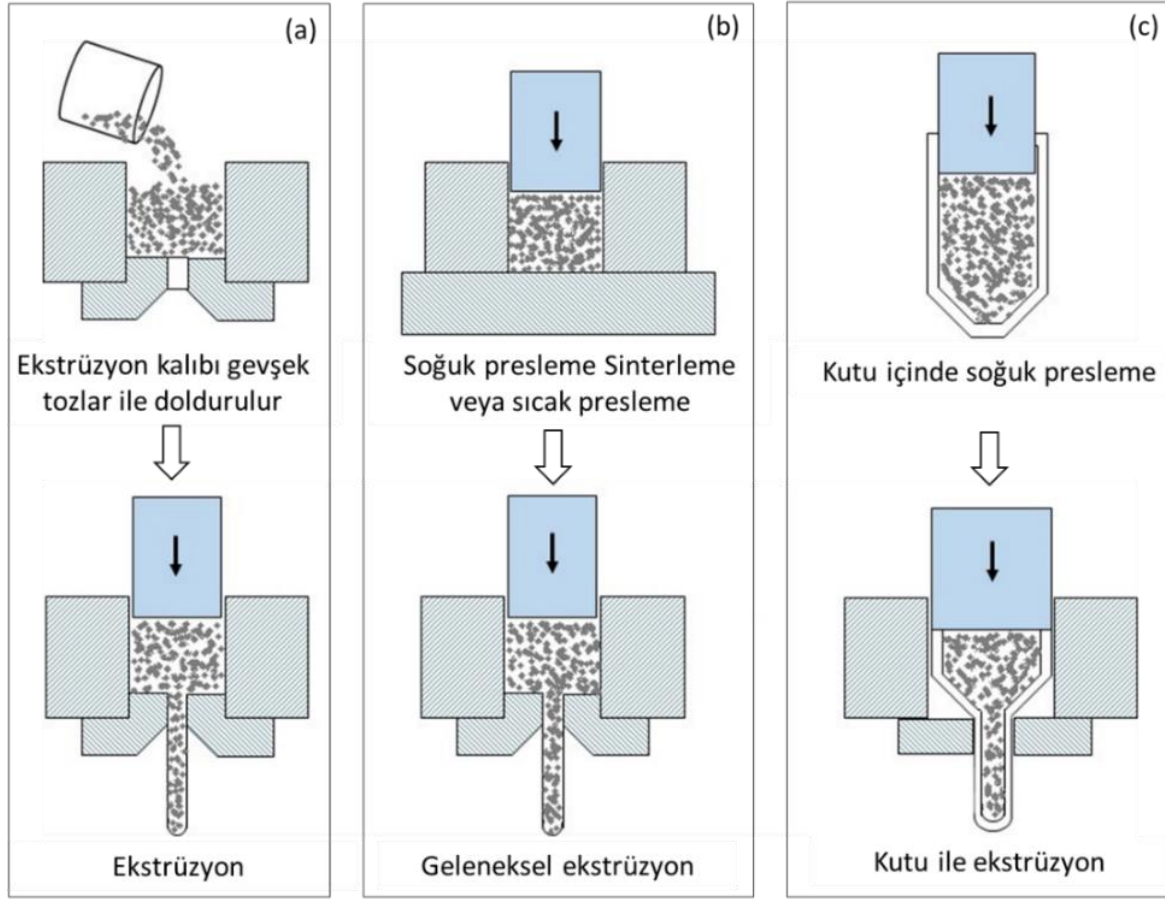
Şekil 4.9. Haddeme ile toz metal parça üretimi a) dikeyde b) yatayda haddeme işlemi [112-116]

4.3.6. Ekstrüzyon ile toz metal parça üretimi

Ekstrüzyon, metal tozlarının bir kalıba doldurulduktan sonra bir matrizen basılıp şekillendirilmesi işlemine denir [120]. Ekstrüzyon işleminde, metal tozları ısıtılmış ekstrüzyon alıcısına gevşek olarak doldurulur ve matrizen basılır. Ardından metal tozları önce soğuk olarak preslenerek yoğunlaştırılır. Daha sonra buradan alınan sıkıştırılmış parça sıcak ekstrüzyona tabi tutulur. Ve son olarak da metal tozu metalik bir zarf içine doldurulup ısıtılarak kapsülle birlikte ekstrüzyon işlemi uygulanır. Bu yöntem, tam yoğun TM parça üretimine uygun bir yöntemdir. Tozlar sıkıştırılıp yaklaşık %85 yoğunluğa ulaşmadıkça ekstrüzyon başlamaz. İşlem adımlarında önce pres sonra ekstrüzyon gelmektedir [120,121].

Ekstrüzyon işlemi ile çubuk, tüp, bal peteği ve değişik formlarda uzun parçaların üretimi yapılabilmektedir. Hazırlanan toz ve bağlayıcı karışımı ısıtılmış olan hazneye yerleştirilerek sıkıştırılır. Sıkıştırılan toz bağlayıcı karışımı haznenin çıkış kısmında bulunan matris kalıptan geçerken şekil almaya başlar. Silindirik, kare, dikdörtgen veya karmaşık şekilli

parçalar matris kalıbın şekline göre oluşturulur [122,123]. Şekil 4.10'da ekstrüzyon ile toz metal parça üretimi verilmiştir.

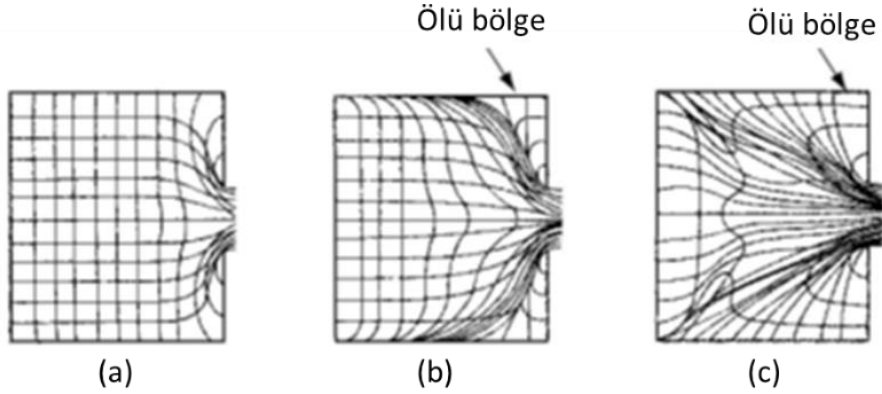


Şekil 4.10. Ekstrüzyon işlem basamakları [122,123]

Ekstrüzyon işleminde alıcı kovanın köşelerinde bir miktar malzeme hareketsiz kalır. Bu bölgeye ölü bölge adı verilir. Ekstrüzyon basıncı – İstampa kursu eğrisinden de görüleceği gibi işlemin sonuna doğru bu ölü bölge fazla basınç gerektirir [122,123].

Şekil 4.11.'de Ekstrüzyon işlemi esnasında malzemenin akışını göstermektedir. Şekil 4.4-a'da en homojen malzeme akışı görülüyor. Metal takoz ile alıcı arasında sürtünme yok. Bu tür malzeme akışı varsa yağlamanın etkisi çok iyi demektir. Şekil 4.4-b'de malzeme akışında sürtünme hayli yüksek demektir. Metal kalıp içine hayli yüksek kayma gerilme değerleri ile girerler. Bu da üründe kusurlara neden olabilir. Şekil 4.4-c'de kayma gerilmelerinin hayli yüksek olduğu bir ekstrüzyon işlemi görülmektedir. Bu durum çok yüksek sürtünme olduğunda geçerlidir. Bu malzemenin kalıba akışını geciktirmektedir. Sürtünme sebebiyle sıcaklık artışı, ayrıca sıcak ekstrüzyonda işlem esnasında ilk soğuyan bölge metal takozun alıcıya sürtünen kısmı olur. Metal takozun ortası kolay akarken dış kısımlar zor akar.

Sonuçta ölü metal bölgesi büyük olur. Akma da homojen olmaz. Bu tür bir akış ekstrüzyon kusuru doğurur [124].



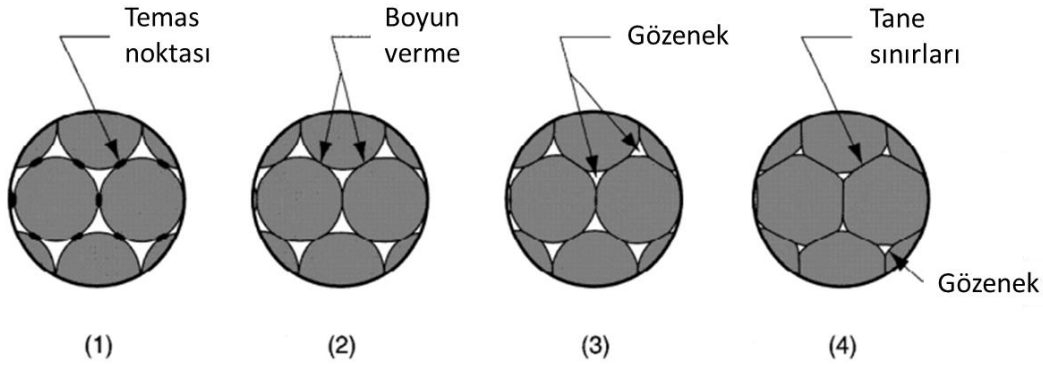
Şekil 4.11. Ekstrüzyon işleminde malzeme akış çizgilerinin gösterimi [124]

4.3.7. Sinterleme

Sinterleme işlemi ile sıkıştırılmış veya şekil almış ham yoğunluktaki toz karışımın, ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklara kadar ısıtılarak tozlar arasındaki bağ oluşumunu sağlar. Sinterleme işlemi ana malzemenin ergime sıcaklığının 1/3'ü kadar düşük olan sıcaklıklarda yapılmaktadır. Sıkıştırma işleminde tozlar arasında meydana gelen mekanik bağlanma Sinterleme işlemi ile kimyasal bağlanma ile desteklenerek mekanik dayanımı sağlanmış numune elde edilir. Sinterleme işleminin evreleri Şekil 4.12'de verilmiştir. Sinterleme işlemleri Sinterleme fırınlarında atmosfer korumalı ve atmosfer korumasız olarak yapılabilir (Resim 4.3) [112-116].



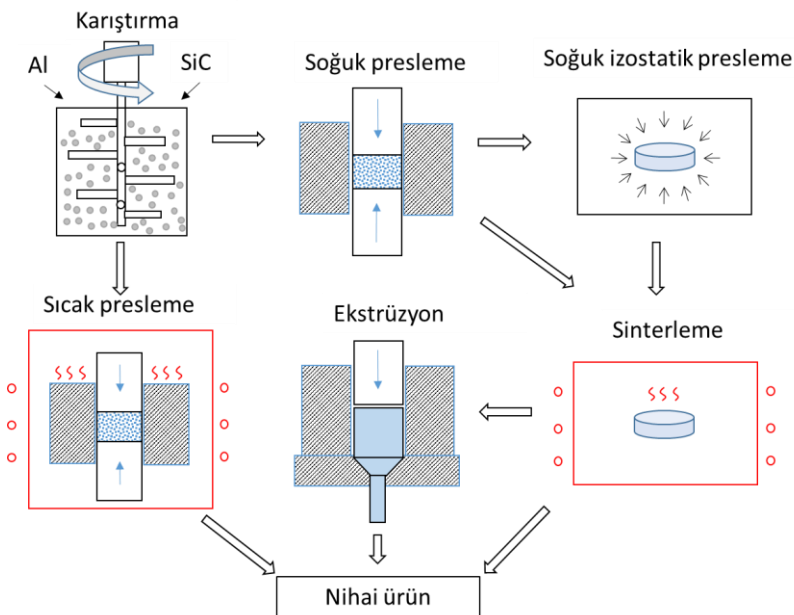
Resim 4.3. a) atmosfer kontrolsüz, b) atmosfer kontrollü sinterleme fırınları



Şekil 4.12. Mikroskobik boyutta sinterleme işlemi, 1-parçacıkların temas ettiği noktalar, 2-temas noktaları büyüyerek "boyun" oluşur, 3- parçacıklar arasındaki gözenek boyutu küçülür, 4- gözenek boyutu küçülerek parçacıklar arasında tane sınırları oluşur [112-116]

4.4. TM Yöntemi İle MMK Üretimi

Ağırlıkça karışım oranları belirlenen matris (metal) ve takviye elemanı (seramik) tozu birbiri içerisinde homojen dağılım sergilemesi için karıştırıcıda karıştırılır. Karışım tozlar, soğuk presleme veya soğuk izostatik presleme yapıldıktan sonra sinterlenerek (pişirme) nihai ürün üretilceği gibi sinterlenen toz metal numune ekstrüzyon yapılabilir. TM kompozit malzemelerin diğer bir üretim tekniği ise karışım tozlarının doğrudan sıcak preslenmesidir. Yukarıdaki işlemlerden herhangi birisine tabi olan tozlar istenilen mukavemete kavuşturulur [125]. Şekil 4.13’de MMK’lerin üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 4.13. MMK malzemelerin TM yöntemi ile üretim aşamaları [126]

5. BALİSTİK

Balistik, fişğin ateşlenmesi ile fişek çekirdeğinin namludan çıkıp hedefi vurmasına kadar olan hareketlerini ve hedefe ulaştığında oluşturmuş olduğu tahribatı inceleyen bir bilim dalıdır [127,128].

Balistik, fişğin namlu içerisine konulmasından, hedefe ulaşmasına kadar içinde bulunduğu ortama göre isimlendirilmektedir. Bunlar;

1. İç balistik,
2. Dış balistik,
3. Hedef balistiği (nufiziyet balistiği)'dir.

5.1. İç Balistik

Merminin ateşlenmesi ile mermi çekirdeğinin namluyu terk edinceye kadar ki hareketlerini ve bunlara etki eden faktörleri inceler. Silahtan mermi çekirdeğine asgari gaz basıncıyla mümkün olan azami hızın verilmesi istenir.

Ateşleme ile mermi içerisinde oluşan gaz basıncı sayesinde mermi çekirdeğine bir hız kazandırılmış olur ve buna ilk hızda denir. İlk hıza çekirdek namluyu terk edene kadar, birçok faktörler etki edebilir [129].

5.2. Dış Balistik

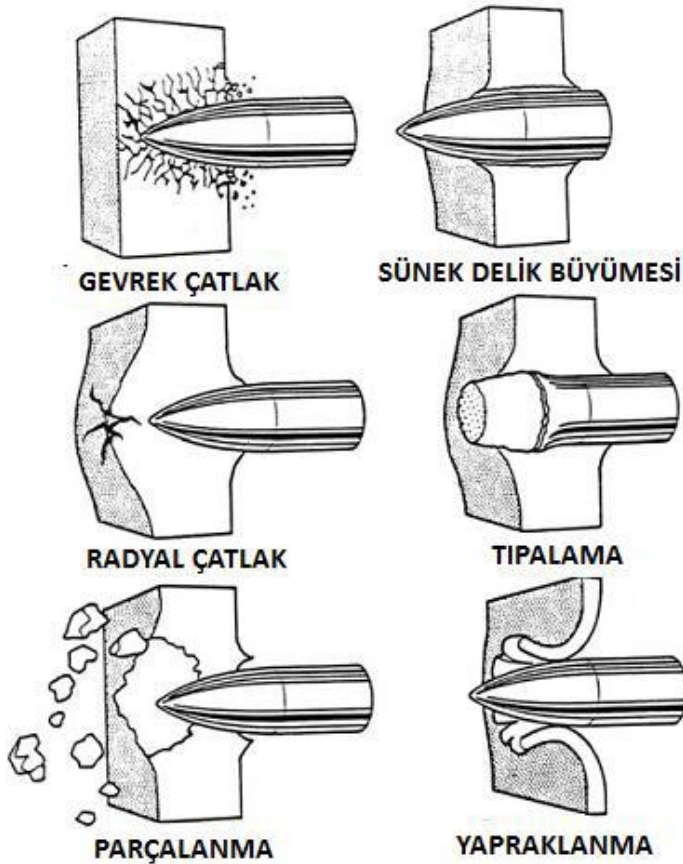
Mermi çekirdeğinin namluyu terk ettikten sonra hedefe varıncaya kadar olan hareketlerini ve bunlara etki eden faktörleri inceler. İç balistikte izah edildiği gibi mermi çekirdeği kazanmış olduğu ilk hız ile hedefe doğru gidecektir. Merminin namludan hedefe kadar takip ettiği yola mermi yolu denir. Namlu ağzından çıkan mermi üç kuvvetin etkisi altında ilerler. Bunlar;

1. Barut gazının itme kuvvetinin mermiye verdiği ilk hız
2. Merminin kütesinin tesiri ile çekirdeği aşağı doğru düşürmeye çalışan yerçekimi
3. Merminin ilerlemesine karşı olan hava direncidir. Hava direncinden dolayı merminin hızı namlunun ağzından uzaklaştığı oranda azalır [128,130].

5.3. Hedef (Nufuziyet) Balistiği

Bu balistik çeşidi literatürde hedef balistiği, amaç balistiği, terminal balistiği, nihai balistik ve nufuzi balistik gibi değişik isimler verilmektedir. Nufuzi balistik kavramı ile daha çok hedefin imhası anlaşılmaktadır. Mermi çekirdeğinin hedefte meydana getirdiği etkilerin incelenmesi olayına hedef balistiği denir [127,129].

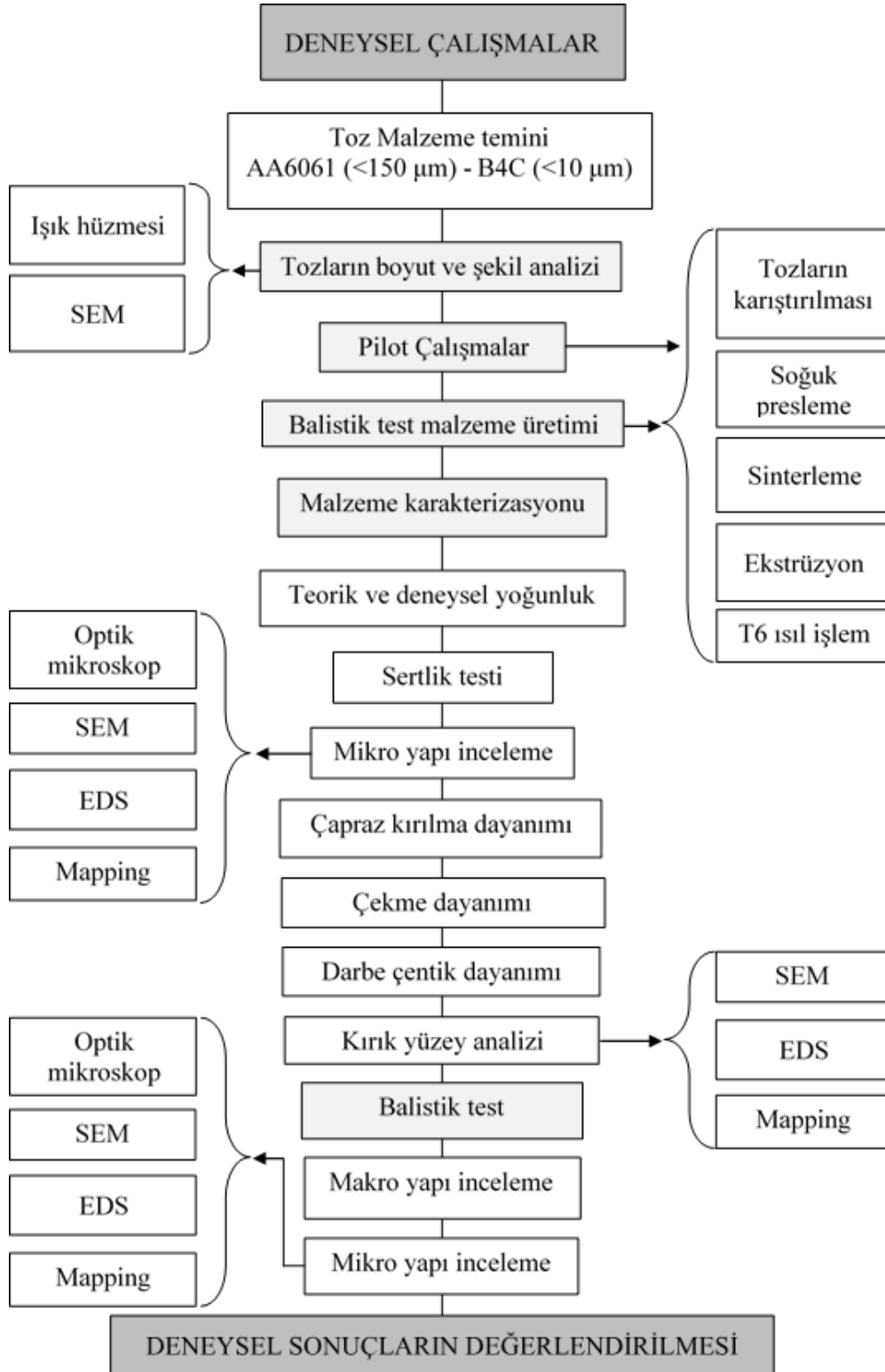
Şekil 5.1’de hedef ve mermi arasındaki etkileşim sonucu oluşan muhtemel kırılma mekanizmaları gösterilmiştir. İnce kalınlıktaki zırh malzemelerinde, mermi hedefi delip geçer ve hedefin mermi üzerindeki etkileri incelenir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlarda hedefin mermi üzerindeki etkileri iyi tanımlanırsa, gerçek bir zırh tasarımı için çok büyük faydalar sağlayacağı düşünülmektedir [130].



Şekil 5.1. Farklı darbe durumlarında muhtemel kırılma şekilleri [130]

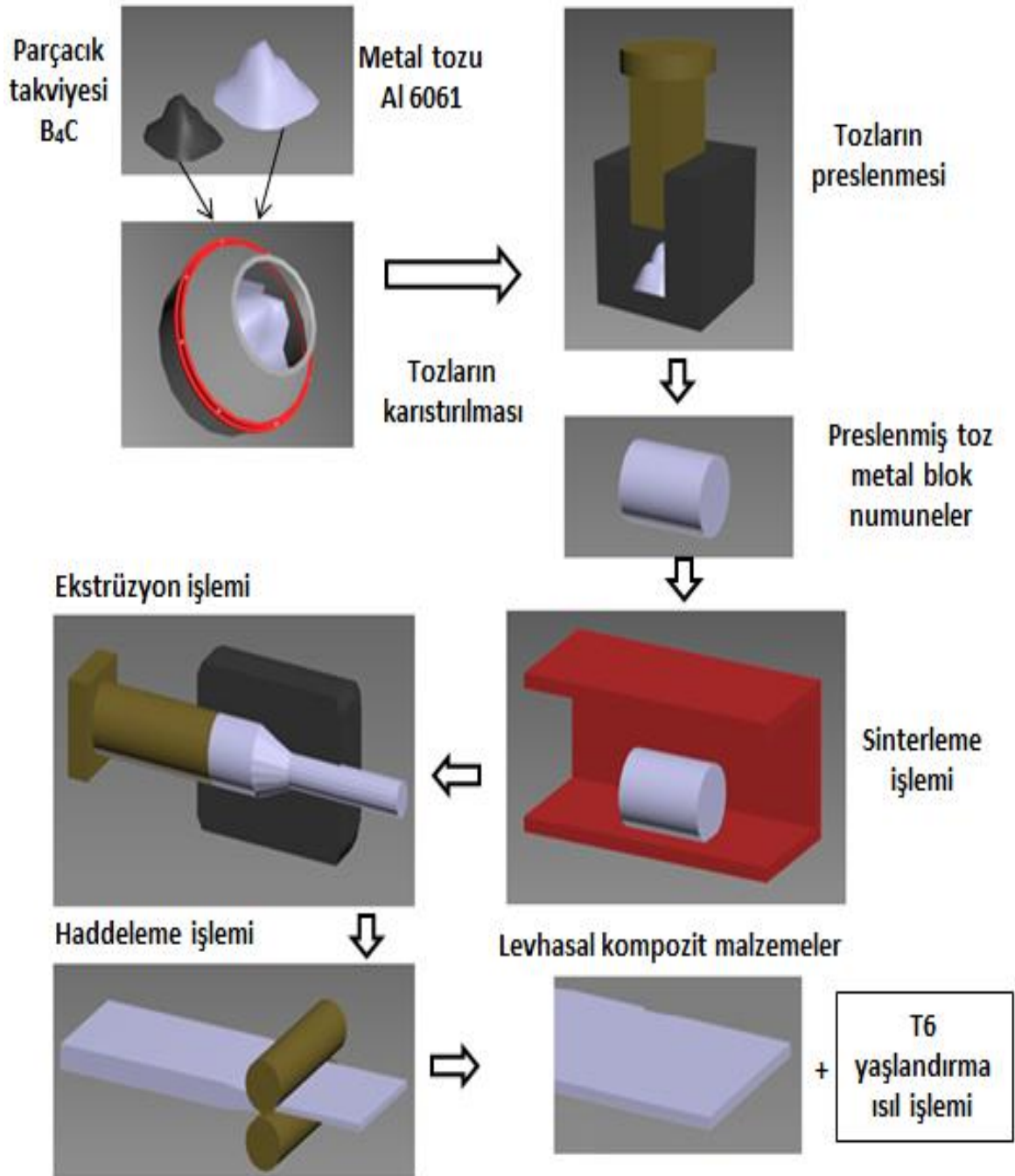
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada yapılan işlemlerin akış şeması Şekil 6.1.'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Deneysel çalışmalarda yapılan işlemlerin akış sırası

Bu çalışmada TM yöntemi ile AA6061 matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemeler üretildi. Üretilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, optik özellikleri ve balistik performansları karakterize edildi. Kompozit üretim süreci Şekil 6.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Toz metalürjisi yöntemi ile AA6061 matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretimi

6.1. Malzeme

Kompozit malzemelerin üretilmesinde matris olarak $<150\ \mu\text{m}$ parçacık boyutunda ve %99,0 saflıkta AA6061 alaşım tozu kullanıldı. Takviye elemanı olarak ise $<10\ \mu\text{m}$ parçacık boyutunda ve %99,0 saflıkta B_4C seramik tozu kullanıldı. Bu malzemelere ait özellikler Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. AA6061 ve B_4C ’nin fiziksel özellikleri

	Malzeme	
Özellikler	AA6061	Bor karbür (B_4C)
Parçacık boyutu (μm)	<100	<10
Parçacık şekli	Düzensiz	Köşeli
Saflık (%)	99,0	99,0
Ergime derecesi [$^{\circ}\text{C}$]	582-652	2450
Yoğunluk [g/cm^3]	2,70	2,52
Young modülü [GPa]	69	450
Isıl iletkenlik [$\text{W}/\text{m K}$]	180	29
Termal genleşme katsayısı [10^{-6}K^{-1}]	23,6	5,0-6,0

6.2. Tozların Karakterizasyonu

6.2.1. Tozların tane şekillerinin belirlenmesi

Tozların tane şekillerinin ve safsızlıklarının belirlenmesi için Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde yer alan JEOL JSM 6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) analizleri yapıldı. Tozları SEM cihazında görüntüleyebilmek için metalografik olarak epoksi reçine yüzeyine soğuk gömme yapıldı. Soğuk gömme yapılan tozların şekil tayini için SEM görüntüleri alındı. Ayrıca tozların safsızlıklarını belirleyebilmek için tozların EDS analizleri de yapıldı.

6.2.2. Tozların tane boyutunun ölçülmesi

Tozların ortalama tane boyut dağılımı Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Toz metalürjisi laboratuvarında bulunan Malvern Mastersizer lazerle boyut ölçme cihazında belirlendi. Malvern Mastersizer lazerle boyut ölçme ünitesi Fraunhofer teorisine göre çalışarak tozların boyutlarını ölçmektedir. Resim 6.1’de cihazın görüntüsü verilmiştir.



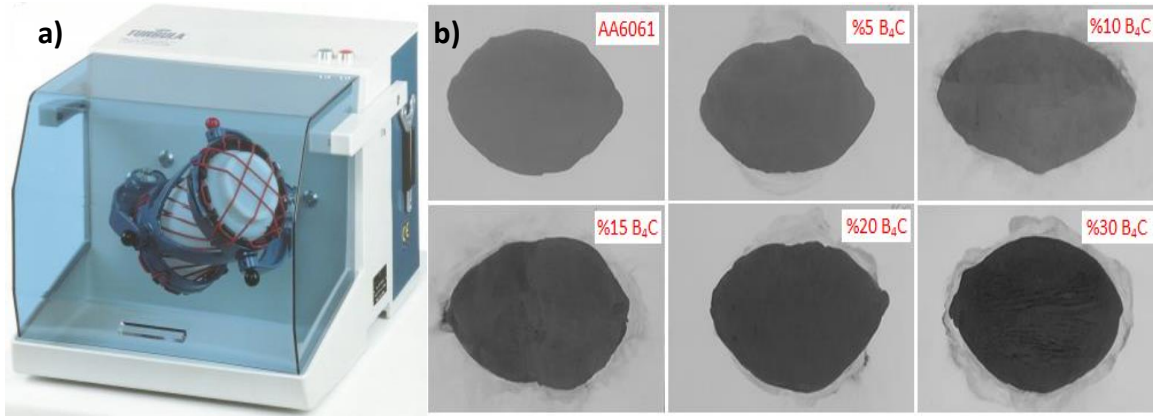
Resim 6.1. Mastersizer marka lazerle boyut ölçüm cihazı

6.3. Kompozit Malzemelerin Üretimi

Kompozit malzemelerin üretimi Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan cihazlarda gerçekleştirildi. Kompozit malzemelerin üretiminde toz malzeme sarfiyatını önlemek amacı ile ilk olarak pilot çalışma yapıldı. Pilot çalışmadaki üretim verilerinden faydalanarak büyük ebatlarda kompozit malzeme üretildi. Kompozitlerin üretiminde sırası ile aşağıdaki işlemler yapıldı.

6.3.1. Tozların karıştırılması

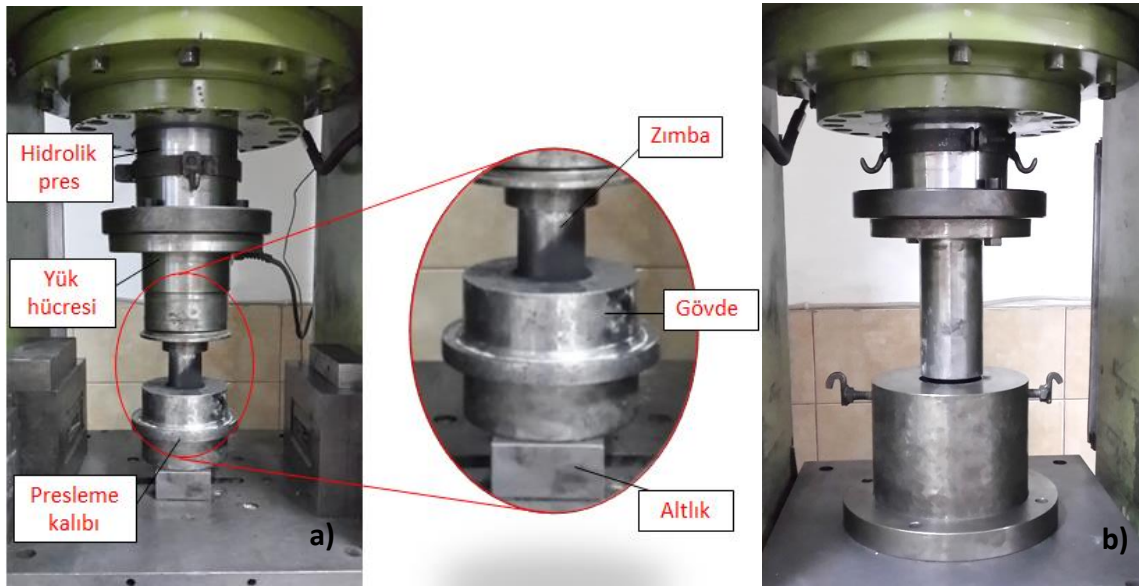
AA6061 tozları ile ağırlıkça %0-5-10-15-20-25-30 oranlarında B₄C tozları 0,1 mg hassasiyetindeki Precisa marka hassas terazi kullanılarak tartıldı. Tartılan tozlar plastik bir kap içerisine konulduktan sonra Turbula marka T2 F tipi üç boyutlu karıştırıcıda 45 dakika boyunca karıştırıldı (Resim 6.2-a). Farklı oranlarda B₄C içeren AA6061 alaşım tozlarının karışım sonrası görünüşleri Resim 6.2-b’de verilmiştir.



Resim 6.2. (a) Turbula T2 F tipi üç boyutlu toz karıştırıcı, (b) Ağırlıkça % farklı oranlarda B₄C kullanılan karışım tozlar

6.3.2. Presleme işlemi

Karışım tozlar TM laboratuvarında bulunan 260 ton presleme kapasitesine sahip hidrolik preste gerçekleştirildi (Resim 6.3). Pilot çalışmalar için iç çapı 62 mm olan özel olarak tasarlanmış soğuk presleme kalıbı kullanıldı. Büyük ebatlarda malzeme üretebilmek için ise iç çapı 100 mm olan soğuk presleme kalıbı kullanıldı. Hem pilot çalışmalar için hem de büyük ebatlarda malzeme üretmek için karışım tozlar soğuk olarak 300 MPa basınç altında tek yönlü preslendi. Preslenen blok numunelerin makro görünüşleri Resim 6.4’de verilmiştir. Numunelerin ham yoğunlukları belirlendi.



Resim 6.3. (a) Hidrolik pres ve iç çapı 62 mm olan soğuk presleme kalıbı, (b) iç çapı 100 mm olan soğuk presleme kalıbı



Resim 6.4. Farklı takviye miktarlarında preslenen toz metal blok numuneler

6.3.3. Sinterleme

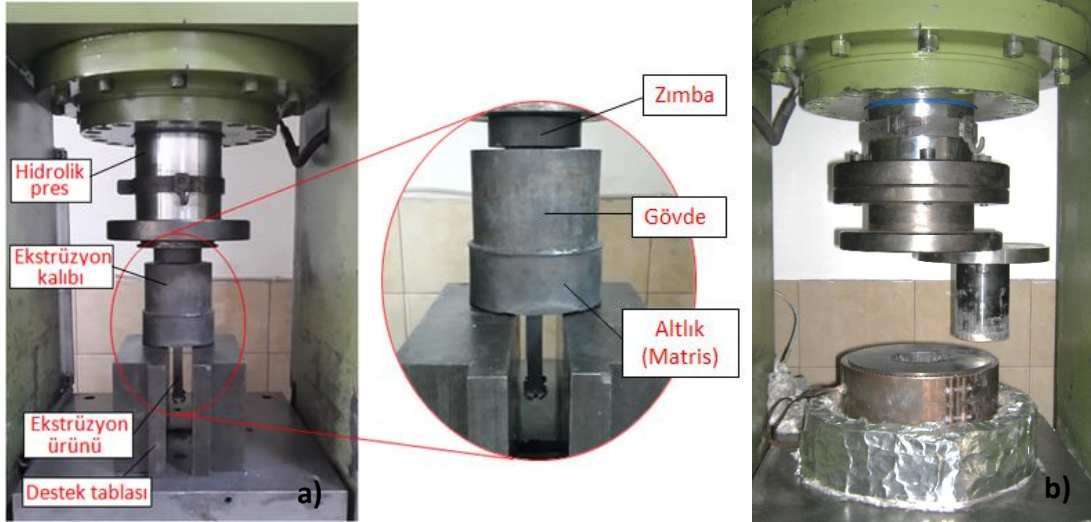
Sıcak Ekstrüzyon işlemi öncesinde toz metal blok numunelere 550 °C sıcaklıkta 1 saat süre boyunca normal atmosferde sinterleme işlemi yapıldı. Bu işlem Protherm marka PLF 120/12 tipindeki 1000 °C kapasiteli fırın (Resim 6.5) kullanılarak yapıldı. Sinterleme sonrası yoğunluklar belirlendi.



Resim 6.5. Toz metal blok numunelerin sinterlenmesinde kullanılan Protherm marka fırın

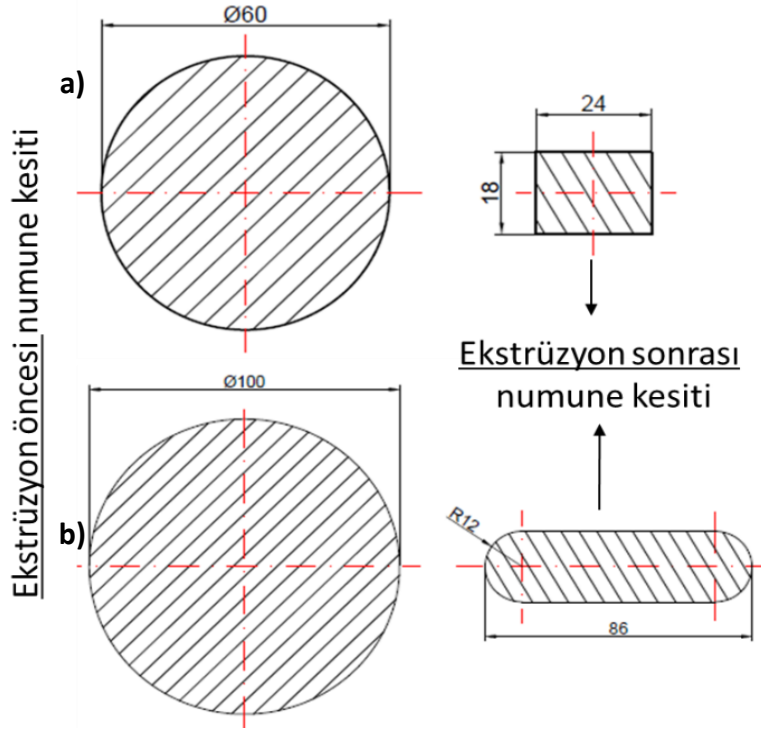
6.3.4. Ekstrüzyon işlemi

Sinterlenen blok numuneler 550 °C sıcaklıkta ekstrüze edildi. Ekstrüzyon işleminde yüksek sıcaklıklara dayanıklı özel olarak tasarlanmış 2344 serisi sıcak iş takım çeliği kalıplar kullanıldı (Resim 6.6).



Resim 6.6. (a) Pilot çalışmalarda kullanılan ekstrüzyon kalıbı, (b) büyük numune üretmek için kullanılan ekstrüzyon kalıbı

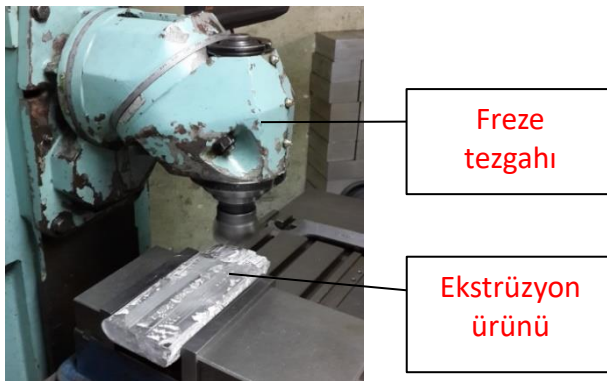
Pilot çalışmalar ve büyük ebatlarda malzemeler üretmek amacı ile iki farklı kesitte ekstrüzyon işlemi yapıldı. Ekstrüzyon işlemi sonrası yoğunluklar tespit edildi. Şekil 6.3-a'da pilot çalışmalarda kullanılan ekstrüzyon öncesi ve ekstrüzyon sonrası kesitler verilmiştir. Şekil 6.3-b'de ise büyük ebatlarda malzeme üretmek için kullanılan kesitler verilmiştir.



Şekil 6.3. Ekstrüzyon öncesi ve sonrası numune kesitleri, (a) pilot çalışmalarda kullanılan kesitler, (b) büyük ebatlarda malzeme üretmek için kullanılan kesitler

6.3.5. Frezeleme işlemi

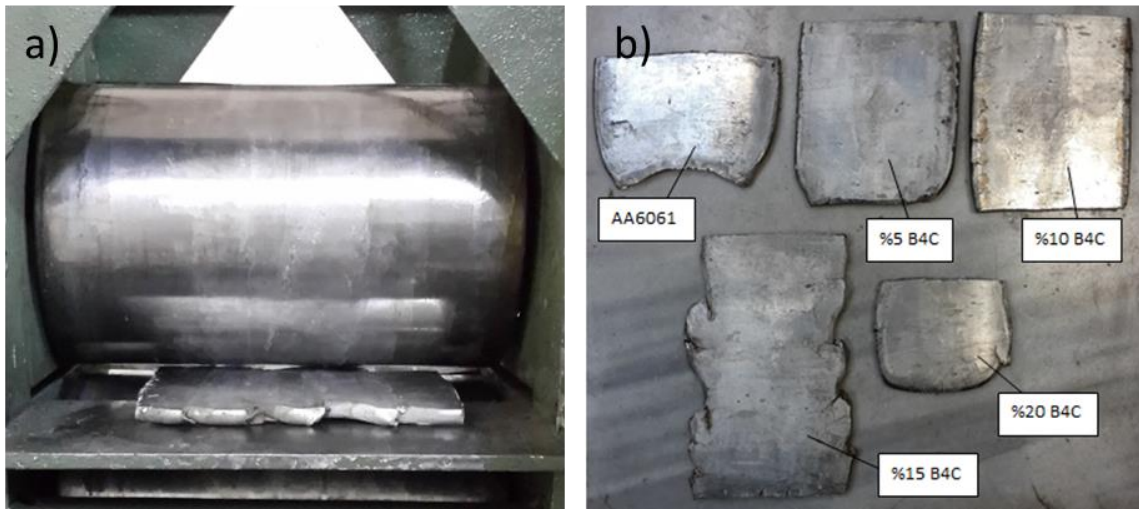
Balistik testlerin yapılabilmesi için büyük ebatlı kompozit malzeme üretebilmek amacıyla Ekstrüzyon işlemi sonrası haddeleme işlemine gerek duyulmuştur. Şekil 6.3-b'de kesiti verilen Ekstrüzyon ürününün yüzey kalitesi çok iyi olmadığından haddeleme işlemi sırasında oluşabilecek soğuk yapışma veya katlanma gibi hataların oluşumunu engellemek için numuneler frezeleme işlemine tabi tutuldu (Resim 6.7). Kompozit malzemelerin yüzeyi frezede işlenerek kalınlıkları 24 mm'den 20 mm'ye düşürüldü.



Resim 6.7. Ekstrüzyon edilen kompozit malzemelerin freze ile yüzeyinin işlenmesi

6.3.6. Haddelme işlemi

Frezeleme işlemi ile yüzey pürüzlülüğü iyileştirilen ekstrüzyon ürünü numunelere haddelme yapıldı. Bu işlem Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölüm laboratuvarlarında bulunan haddelme cihazında yapıldı (Resim 6.8). Numunelere haddelme öncesi 500 °C sıcaklıkta 1 saat ön ısıtma uygulandı. Daha sonra 3 basamakta numuneler 12,7 mm kalınlığa düşürüldü. Her basamak arası numuneler 30 dakika 500 °C sıcaklıkta bekletildi.

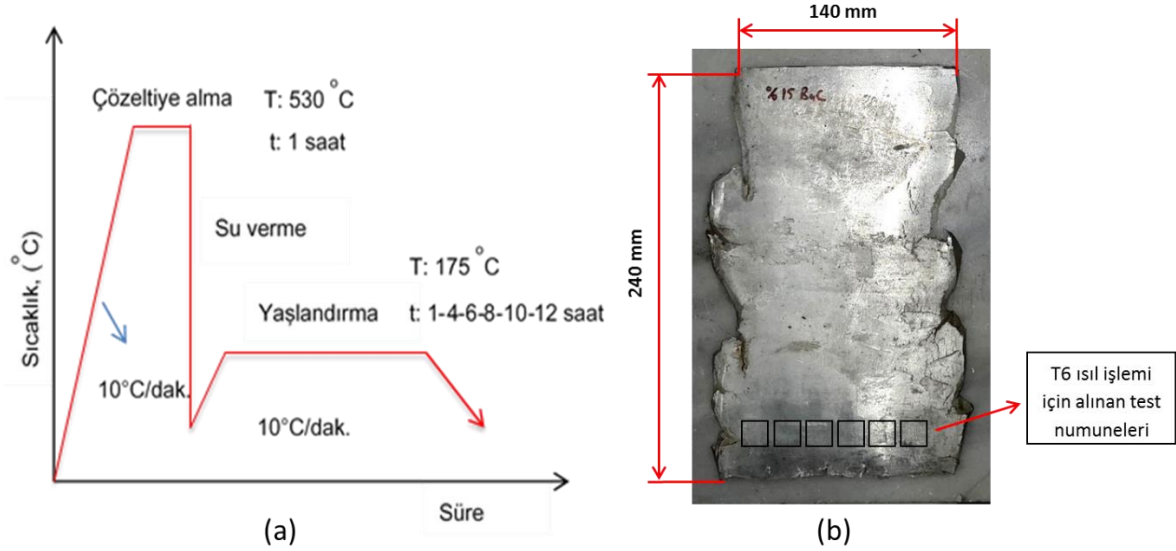


Resim 6.8. (a) Frezelenen malzemelerin haddelenmesi, (b) haddelenen malzemeler

6.3.7. T6 ısıt işlemi

Haddelenen kompozit levhaların dayanımlarını artırabilmek için AA6061 alaşımlarına en çok uygulanan ısıt işlemlerden biri olan T6 yaşlandırma ısıt işlemi uygulandı. Yaşlandırma ısıt işleminde optimum yaşlandırma parametrelerini yakalayabilmek için %15 B₄C takviyeli kompozit levhalardan numuneler alınarak farklı sürelerde suni yaşlandırma yapıldı (Şekil 6.4-b). Elde edilen %15 B₄C yaşlandırılabilir numuneler fırın içerisinde 10 °C/dakika ısıtma hızı kullanılarak 530 °C sıcaklığa çıkartılarak 1 saat süreyle çözündürme ve hemen ardından su verilerek hızlı soğutma yapıldı. Su verilerek soğutulan numuneler 10 °C/dakika ısıtma hızı ile 175 °C sıcaklığa getirilerek 2-4-6-8-10 ve 12 saat ayrı ayrı suni yaşlandırma işlemine tabi tutuldu (Şekil 6.4-a). % 15 B₄C takviyeli kompozit malzemelerin T6 ısıt işleminden sonra alınan ortalama sertlik değerlerine bakılarak optimum yaşlandırma parametreleri

belirlenmiştir. Diğer üretilen kompozit malzemelere de (% 0-5-10-20 B₄C) optimum belirlenen yaşlandırma ısı işlemi uygulandı.



Şekil 6.4. (a) AA6061 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemelere uygulanan T6 yaşlandırma ısı işlem parametreleri, (b) TM yöntemi ile üretilen AA6061 matrisli %15 B₄C takviyeli kompozit levha ve ısı işlem için alınan numune yerleri

6.4. Malzeme Karakterizasyonu

6.4.1. Yoğunluk ölçümü

Üretilen AA6061/B₄C kompozit malzemelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre 0,1 mg hassasiyetindeki Sartorius marka terazi kullanılarak yapıldı. Yoğunluk hesabı için kullanılan Arşimet prensibi Eşitlik 6.1’de verilmiştir [131]. Üretilen kompozit malzemelerin sinterleme öncesi, sinterleme sonrası, ekstrüzyon ve haddeleme sonrası olmak üzere ayrı ayrı yoğunluk değişimleri incelenmiştir.

$$\rho^* = \frac{m_{hava}}{m_{hava} - m_{su}} \quad (6.1)$$

Bu eşitlikte;

ρ^* = Malzemenin yoğunluğunu (g/cm³),

m_{hava} = Malzemenin havadaki ağırlığını (g),

m_{su} = Malzenin su içerisindeki ağırlığını (g) ifade etmektedir.

6.4.2. Mikroyapı analizleri

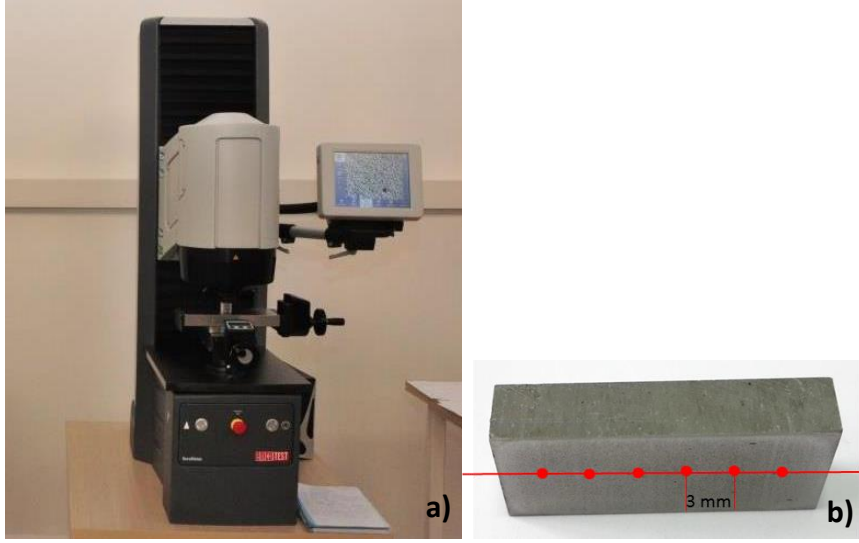
Üretilen kompozit levhalar mikroyapısal analizler için tel erezyon tezgâhında kesildi. Kesilen numunelerin yüzeyleri sırası ile 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı zımparalarda sulu dönen disk üzerinde zımparalandı. Zımparalama sonrası keçe üstüne sıkılan 3 ve 1 μm 'lik elmas süspansiyon (pasta) ile parlatma işlemleri gerçekleştirildi. Son olarak numuneler keller (1ml HF + 200 ml H₂O) çözeltisinde 15 saniye süre ile dağlama yapılarak optik inceleme için hazır hale getirildi. Numunelerin optik incelemeleri Leica DM4000M optik mikroskopta yapıldı (Resim 6.9-a).. Üretilen kompozit levhalarda takviye malzemesi (B₄C) ile ana malzeme (AA6061) arasındaki ara yüzey bağ uyumunu görebilmek için JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı ve aynı cihazda EDS analizleri yapıldı (Resim 6.9-b).



Resim 6.9. (a) Leica DM4000M optik mikroskop, (b) JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu

6.4.3. Sertlik testi

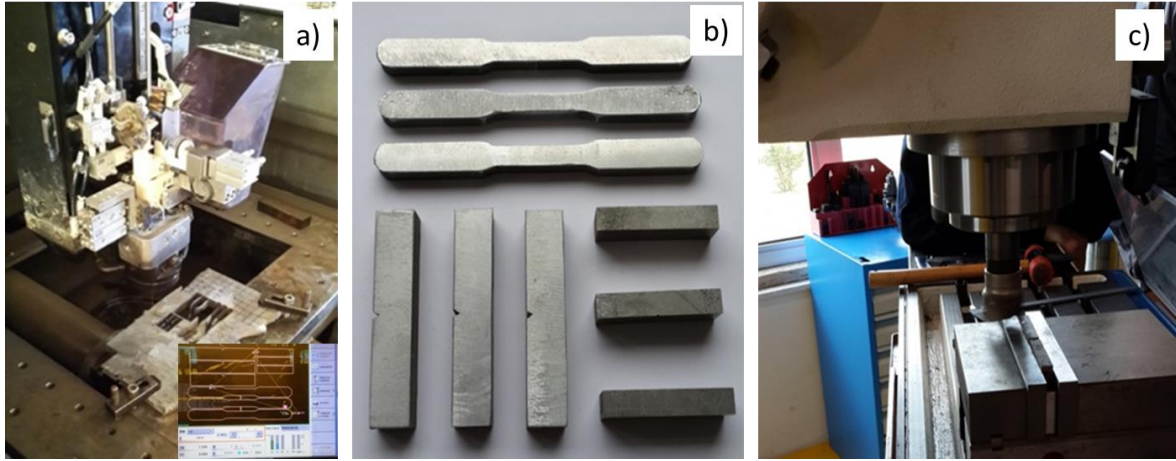
TM yöntemi ile üretilmiş ve T6 yaşlandırma işlemi uygulanan kompozit malzemelerin sertliklerini belirlemek için Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanıldı. Sertlik ölçümleri EMCO TEST Duravision 200 marka sertlik ölçüm cihazında 2,5 mm bilye uç ve 31,25 kgf yük uygulanarak gerçekleştirildi (Resim 6.10-a). Numunelerin sertlikleri Resim 6.10-b'de verildiği gibi 3 mm aralıklarla alınmıştır.



Resim 6.10. (a) EMCO TEST Duravision 200 marka sertlik ölçüm cihazı, (b) üretilen kompozit numunelerin sertlik alınan bölgeleri

6.4.4. Mekanik test numunelerin hazırlanması

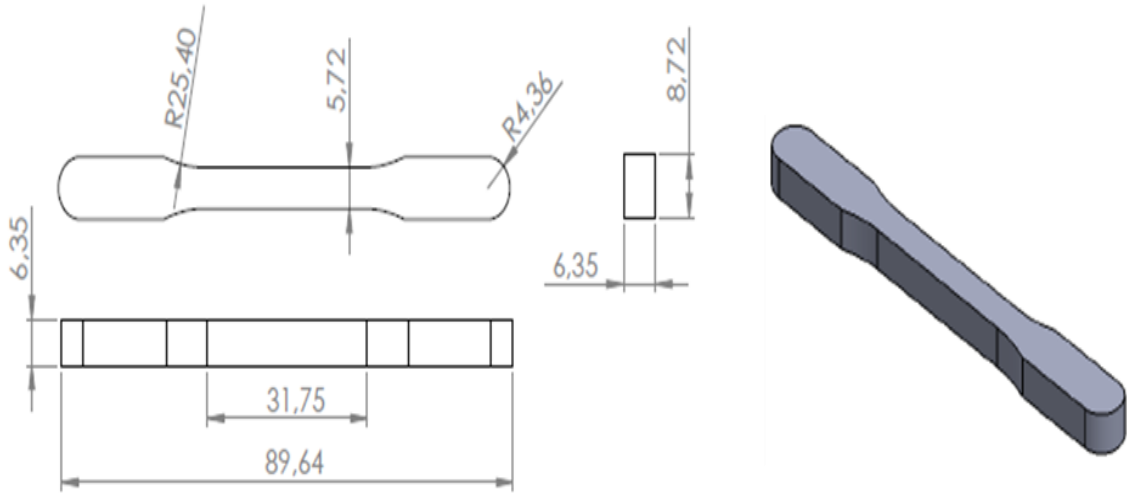
Pilot çalışmalarda sinterleme sonrası, ekstrüzyon sonrası ve büyük ebatlarda malzeme üretiminde haddeleme sonrası olmak üzere üretimin çeşitli aşamalarında mekanik test numuneleri hazırlandı. Üretilen kompozit malzemelerin içerisinde mekanik test için çekme, çapraz kırılma ve çentik darbe testi için üçer adet numune alındı. Mekanik test numunelerinin hazırlanmasında Mitsubishi Marka CNC Tel Erozyon Makinesi (Poyraz CNC firması) kullanıldı. Tel erozyon ile kesilen mekanik test numuneleri standart ölçülerine getirebilmek için CNC freze tezgâhında yüzeyleri frezelenerek mekanik testlere hazır hale getirildi (Resim 6.11). Çekme test numuneleri “Metal Powder Industries Federation Standart Test Methods For Metal Powders And Powder Metallurgy Products – MPFI –10, 1998” standartlarına göre hazırlandı. Çapraz kırılma test numuneleri “MPFI–41,1998” standartlarına uygun olarak hazırlandı. Çapraz kırılma deneyleri için 31,7×12,7×6,35 mm boyutlarında numuneler hazırlandı. V-çentik Charpy deneyleri için 55×10×10 mm ölçüleri için çentikli numuneler hazırlandı.



Resim 6.11. (a) CNC tel erezyon tezgâhı, (b) mekanik test numuneleri (c) CNC freze ile hazırlanan test numuneleri

6.4.5. Çekme testi

Şekil 6.5'te Metal Powder Industries Federation standartlarına göre hazırlanmış çekme test numune ölçüleri verilmiştir. Çekme testleri Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip universal test cihazında oda sıcaklığında 1 mm/dakika çekme hızında yapıldı (Resim 6.12). Gerilme ve % uzama değerleri deney sırasında çekme cihazına bağlı bilgisayardan grafik olarak elde edildi.



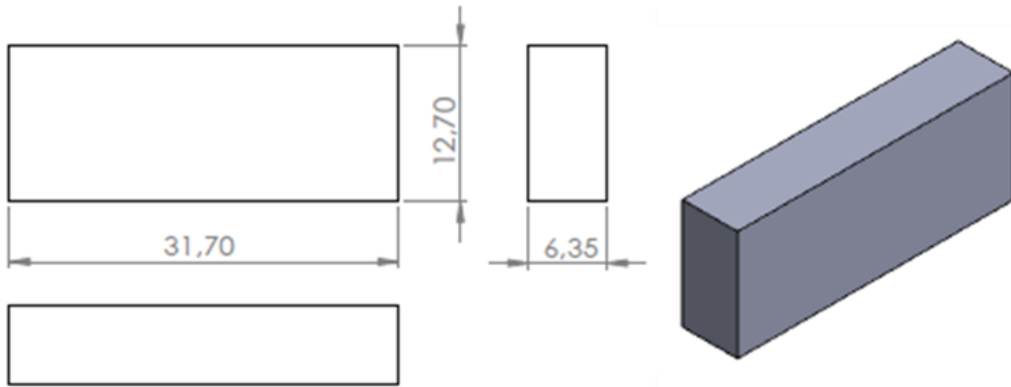
Şekil 6.5. Çekme deney numune boyutları



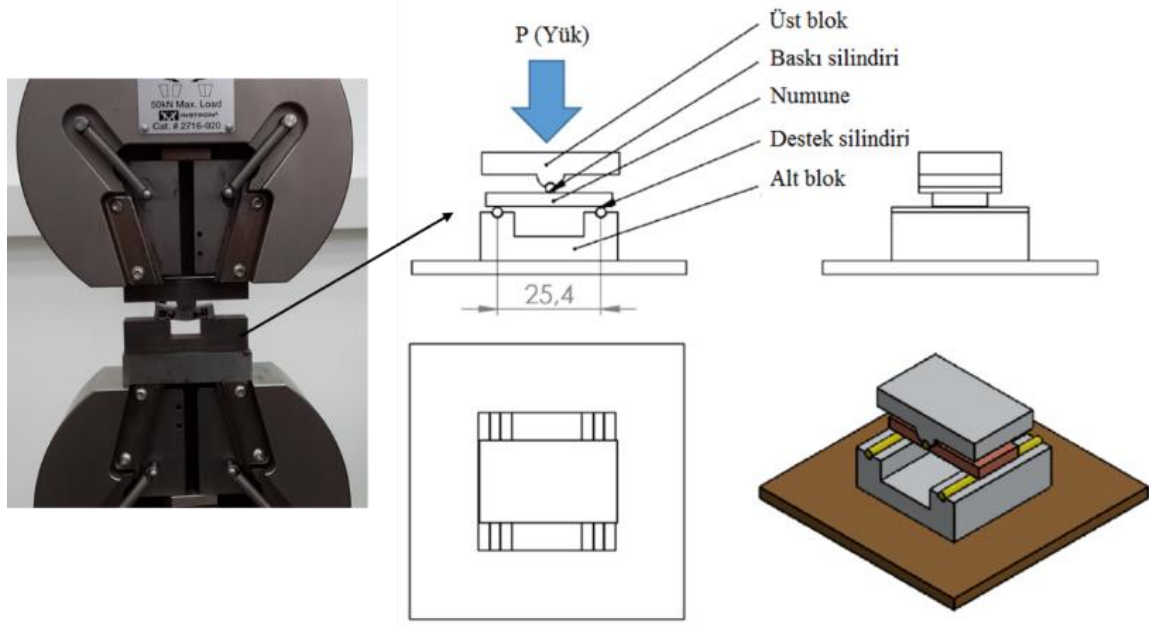
Resim 6.12. Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip üniversal test cihazı

6.4.6. Çapraz kırılma testi

Şekil 6.6’da Metal Powder Industries Federation standartlarına göre hazırlanmış çapraz kırılma numune boyutları verilmiştir. Yapılan çalışmada hazırlanan test numunelerinin çapraz kırılma deneyleri Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip üniversal test cihazında özel olarak hazırlanan çapraz kırılma aparatı kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 6.7). Bu deney grubu için 3’er adet numune kullanıldı. Eğme deneyleri oda sıcaklığında ve 1 mm/dakika hızda gerçekleştirildi.



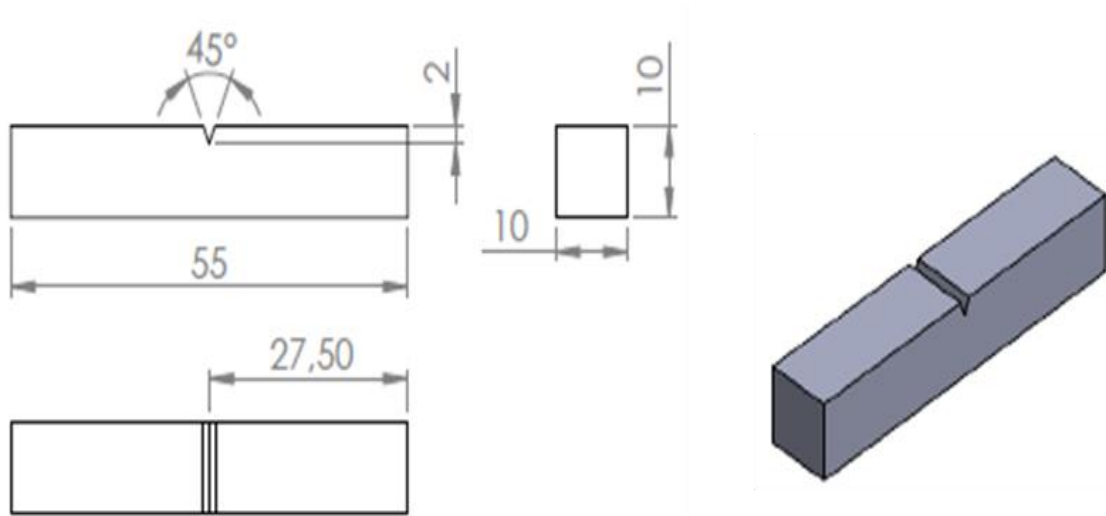
Şekil 6.6. Çapraz kırılma deney numune boyutları



Şekil 6.7. Çapraz kırılma testinin şematik olarak gösterimi

6.4.7. Çentik darbe testi

Ekstrüzyon yapılan, haddelenen ve T6 ısıt işlem uygulanan kompozit malzemelerden EN ISO 148.01 standartlarına uygun olarak Şekil 6.8’de verilen V-çentik darbe test numuneleri hazırlandı. Numuneler her bir deney için üçer adet olacak şekilde önce tel erezyon tezgâhında kesildi sonra freze ile hassas olarak işlendi. Darbe testleri 150 joule kapasiteli Instron Wolpert PW30 marka Charpy test cihazında yapıldı (Resim 6.13). Testler oda sıcaklığında gerçekleştirildi.



Şekil 6.8. V-çentikli charpy deneyi numune boyutları



Resim 6.13. Instron Wolpert PW30 marka Charpy test cihazı

6.5. Balistik Testler

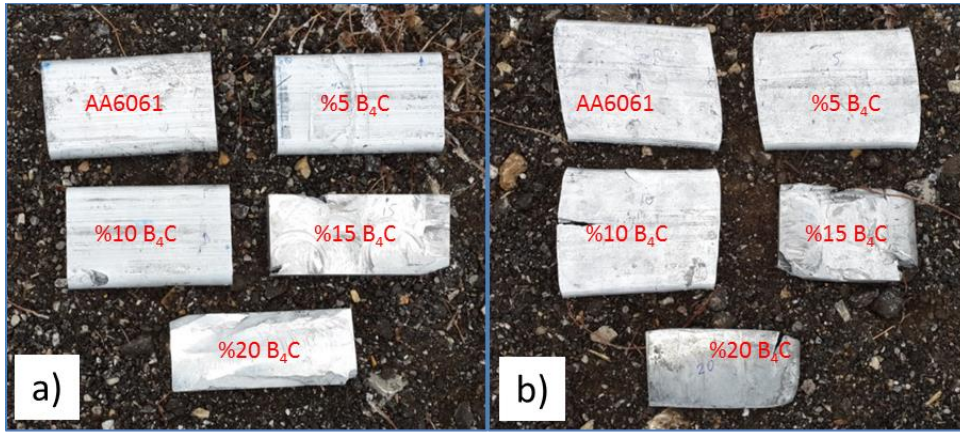
Balistik testler Emniyet Genel Müdürlüğü Kriminal Dairesi Başkanlığı Bomba İmha ve İncelemeler Şube Müdürlüğü Gölbaşı Açık Hava Atış poligonunda yapıldı (Resim 6.14). Açık hava atış poligonu deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 6.9’da verilmiştir. Hedef ile atış silahının namlusu arasındaki mesafe 10 metre olarak alındı. Atış yapılmadan önce kompozit malzemeler hedef düzeneğine mengene yardımı ile sabitlendi. 10 metre mesafe uzaklıktaki koruyucu kabinde bulunan keskin nişancı tarafından hedef numunelere atış yapıldı. Atışlar numune yüzeylerine dik olarak (90°) yapılmıştır. Balistik deneylerde kullanılan numunelere ait fotoğraflar Resim 6.15’da verilmiştir.



Resim 6.14. Açık hava atış poligonuna ait görünüm



Şekil 6.9. Açık hava atış poligonunun şematik olarak gösterimi (a) G3 tüfeği ile atış (b) MP5 tüfeği ile atış



Resim 6.15. Atış için hazır hale getirilen kompozit malzemeler (a) ekstrüzyon sonrası (b) haddeleme sonrası

Balistik test atışlarında iki farklı tüfek kullanıldı. Deneysel çalışmalarda kullanılan tüfekler Resim 6.16’de verilmiştir. MP5 tüfeği ile 9×11 mm çap ve tipinde standart normal uçlu mermi çekirdeğine sahip MKE yapısı fişekler kullanıldı. G3 tüfeği ile 7,62×51 mm çap ve tipinde (M80) yumuşak uçlu mermi çekirdeğine sahip MKE yapısı fişekler kullanıldı. Kullanılan mermilere ait resimler Şekil 6.10.’de verilmiştir. Mermilere ait detaylı fiziksel özellikler Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3’de ayrıca verilmiştir.



Resim 6.16. Balistik testlerde kullanılan tüfekler



Şekil 6.10. (a) 7,62×51 mm (m80) normal fişek ve (b) 9×19 mm parabellum tabanca fişegi [132]

Çizelge 6.2. 7,62×51 mm (m80) normal fişek özellikleri [132]

Fişek Boyu	71,12 mm
Fişek Ağırlığı	~ 24,5 g
Hız (23,7 M)	838 ± 9,1 m/s
Mermi İrtibat Kuvveti	min. 27 kgf (265 N)
Kovan Model Numarası	7,62×51 mm kovan
Kovan Malzemesi	Pirinç (CuZn28 veya CuZn30)
Mermi Malzemesi	Tombak, kurşun çekirdek (kurşun-antimon alaşımı)
Barut	Küresel barut
Kullanıldığı Silah	G3, FAL, MG3, L7A2, M60
Mermi Ağırlığı	9,65 - 0,20 g

Çizelge 6.3. 9×19 mm parabellum tabanca fişek özellikleri [132]

Fişek Boyu	29,69 – 0,3 mm
Fişek Ağırlığı	~12,15 g
Hız	370± 10 m/s (16 m'de)
Mermi İrtibat Kuvveti	min. 20,4 kgf
Kovan Model Numarası	9×19 mm parabellum kovan
Mermi Tipi	fmj, mermi gömlek yüksüğü pirinç (CuZn36), mermi çekirdeği kurşun-antimon alaşımı
Mermi Ağırlığı	8 ± 0,075 g
Kovan Malzemesi	Pirinç (CuZn30)
Kapsül	9 mm kapsül, boxer
Barut	küresel barut
Kullanıldığı Silah	9 mm Belçika browning, 9 mm p1 alman walther, 9 mm pm 12s İtalyan Beretta (hafif makinalı), 9 mm 92f İtalyan Beretta, 9 mm CZ 75, 9 mm Ruger, 9 mm Astra, 9 mm MP-5 makinalı tüfek

Ekstrüzyon ve haddeleme ile üretilen levhasal kompozit malzemelere T6 yaşlandırma ısıtma işlemi uygulandıktan sonra 9×19 mm (MP5) ve 7,62×51 mm (G3) mermileriyle atış yapılarak balistik davranışları incelenmiştir. Balistik atışlar için ortalama 80×120 mm boyutlarında 4 malzeme grubu hazırlandı. 1.grup malzemelere haddeleme sonrası 9×19mm'lik atış yapılmıştır (N1, N2, N3, N4 ve N5 nolu numuneler). 2.grup malzemelere haddeleme sonrası 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılmıştır (N6, N7, N8, ve N9 nolu numuneler). 3. Grup malzemelere ekstrüzyon sonrası 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılmıştır (N10, N11, N12, N13, ve N14 nolu numuneler). 4.grup malzemeler ekstrüzyon ve haddeleme sonrası metal esaslı özel yapıştırıcı kullanılarak bir araya getirilen tabakalı kompozitlerdir. Çift katmanlı olan 4.grup malzemelere 7,62×51 mm'lik atış yapılmıştır. Balistik deneylere ait detaylı bilgi Çizelge 6.4'de verilmiştir. Atış sonrası malzemelerin makro incelemesi ve SEM analizleri yapılmıştır.

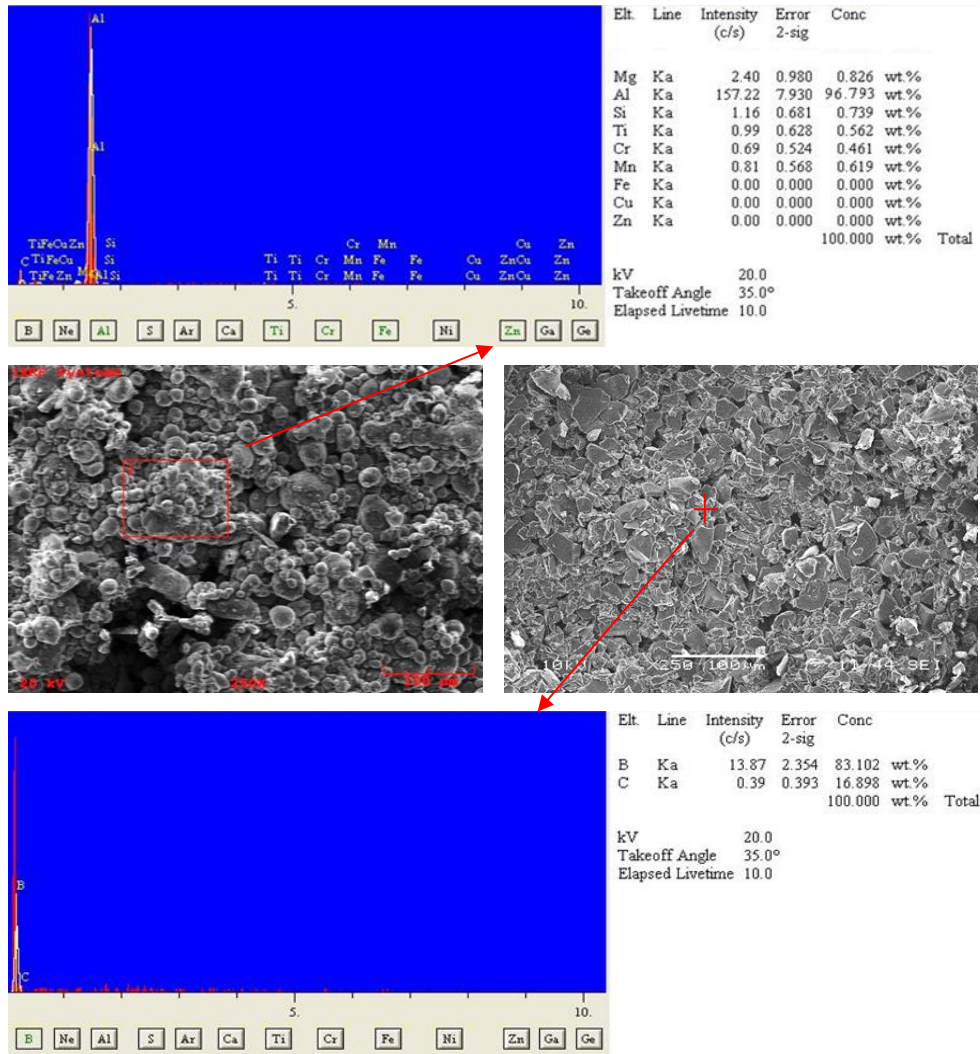
Çizelge 6.4. Balistik test yapılan levhasal kompozit malzemeler

Grup numarası	Numune kodu	Deney Numuneleri		Üretim Yolu	Atış Yapılan Levha Kalınlığı	Atış testi
1.grup	N1	AA6061		Haddeleme	12,7 mm	MP5
	N2	%5 B ₄ C		Haddeleme	12,7 mm	MP5
	N3	%10 B ₄ C		Haddeleme	12,7 mm	MP5
	N4	%15 B ₄ C		Haddeleme	12,7 mm	MP5
	N5	%20 B ₄ C		Haddeleme	12,7 mm	MP5
2.grup	N6	AA6061		Haddeleme	12,7 mm	G3
	N7	%5 B ₄ C		Haddeleme	12,7 mm	G3
	N8	%10 B ₄ C		Haddeleme	12,7 mm	G3
	N9	%15 B ₄ C		Haddeleme	12,7 mm	G3
3.grup	N10	AA6061		Ekstrüzyon	25,4 mm	G3
	N11	%5 B ₄ C		Ekstrüzyon	25,4 mm	G3
	N12	%10 B ₄ C		Ekstrüzyon	25,4 mm	G3
	N13	%15 B ₄ C		Ekstrüzyon	25,4 mm	G3
	N14	%20 B ₄ C		Ekstrüzyon	25,4 mm	G3
	Tabakalı kompozit malzemeler					
		1.tabaka	2.tabaka	Yapıştırma		
4.grup	N15	AA6061	%5 B ₄ C	Ekstrüzyon	50,8 mm	G3
	N16	%10 B ₄ C	AA6061	Haddeleme	25,4 mm	G3
	N17	%20 B ₄ C	AA6061	Haddeleme	25,4 mm	G3
	N18	%10 B ₄ C	%5 B ₄ C	Haddeleme	25,4 mm	G3
	N19	%15 B ₄ C	%5 B ₄ C	Haddeleme	25,4 mm	G3

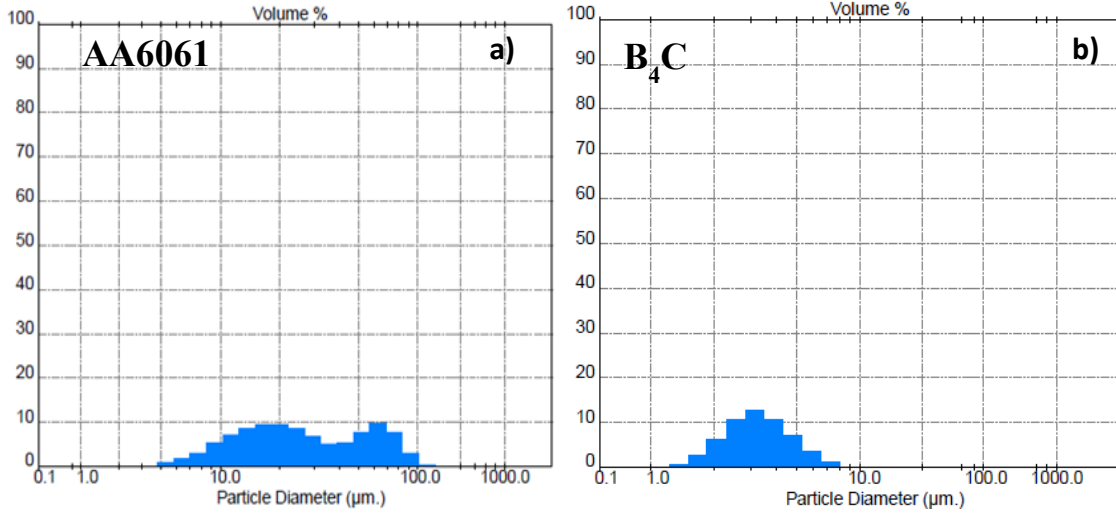
7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1. Kullanılan Tozların Karakterizasyonu

Bu çalışmada kullanılan AA6061 matris alaşım tozları ile B₄C seramik takviye elemanı olan tozların SEM görüntüleri, EDS analizleri ve parçacık ölçüm analizleri yapıldı. SEM görüntülerini incelediğimizde AA6061 tozunun küresel şekilli ve düzensiz olduğu görülürken B₄C tozunun ise karmaşık şekilli ve köşeli olduğu görülmüştür. Tozların SEM resimleri ve EDS analizleri Şekil 7.1’de verilmiştir. Tozların parçacık boyutları dağılımına baktığımızda AA6061 alaşım tozlarının 10 ile 100 µm mikrometre arasında olduğu tespit edildi. B₄C seramik tozlarının 1 ile 10 µm arasında dağıldığı tespit edildi. Toz boyut dağılımı analiz sonuçları Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.1. AA6061 ve B₄C tozlarının SEM ve EDS analizleri



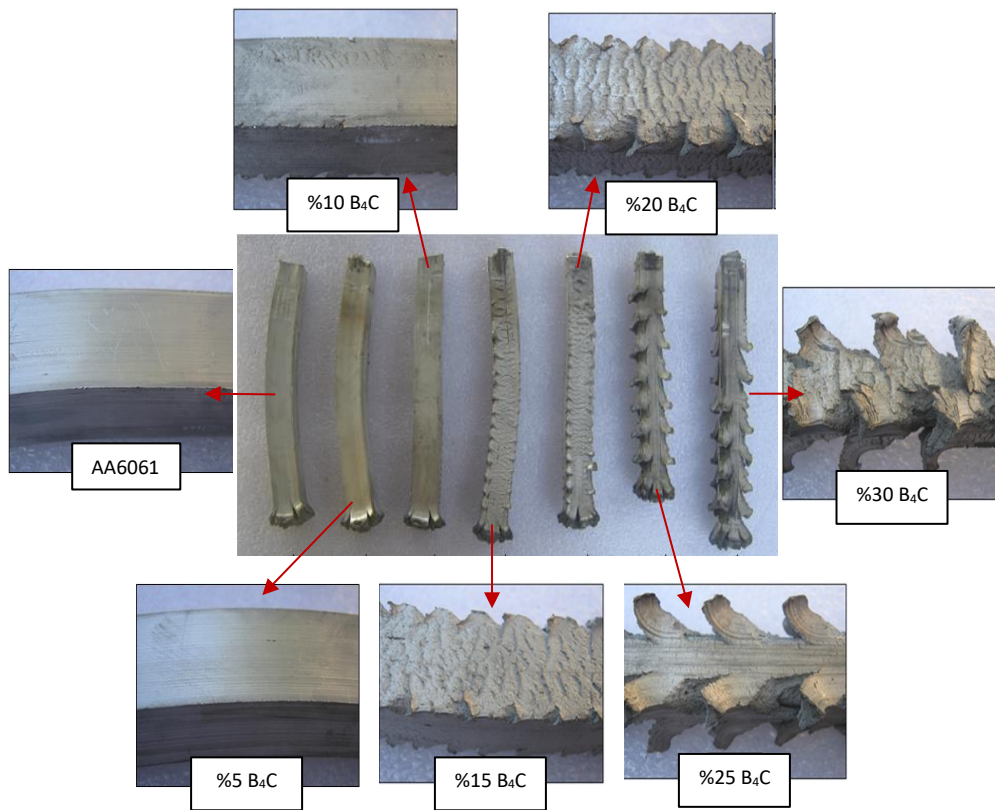
Şekil 7.2. AA6061 ve B₄C tozlarının parçacık boyut dağılımları

7.2. Ekstrüzyon İşleminin Yüzey Kalitesine Etkisi

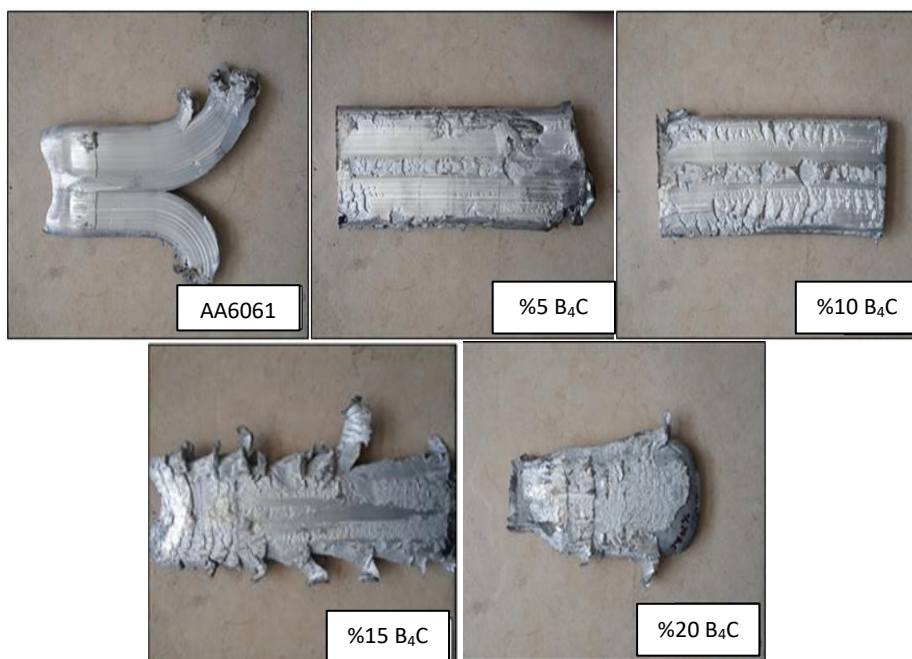
Resim 7.1’de pilot çalışmalar için ekstrüze edilmiş numunelere (kesit:24×18 mm²) ait makro yapı fotoğrafları verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında AA6061 matris yapı içerisinde B₄C seramik parçacık takviye oranının artmasıyla malzeme yüzey kalitesinin düştüğü gözlemlendi. Ekstrüzyon işlemi esnasında aşırı sertlikte olan B₄C parçacıkları sürtünmenin etkisi ile beraber kalıp yüzeylerine tutunarak malzemenin kalıp içerisindeki akışını zorlaştırmaktadır. Kayma gerilmelerinin çok yüksek olduğu ekstrüzyon işlemlerinde yüksek sürtünmeler meydana gelmektedir. Yüksek sürtünme malzemenin kalıp içerisindeki akışını zorlaştırır. Ekstrüzyon işleminde ilk soğuyan bölge metal toz bloğunun alıcıya sürtünen kısmı olur. Metal toz bloğun orta kısmı kolay akarken dış kısımlar zor akar. Sonuçta ölü metal bölgesi büyük olur. Malzemenin akışıda homojen olmaz. Bu tür bir akış malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşturur [122,123].

B₄C içermeyen AA6061 ile %5 B₄C takviyelendirilmiş kompozit malzemenin yüzey kalitesi diğerlerine kıyasla oldukça pürüzsüzdür. % 10 B₄C takviyelendirilmiş kompozit malzemede ise yüzey nispeten biraz daha pürüzlüdür. % 15 ile % 20 oranlarında B₄C takviyelendirilmiş numunelerin yüzey kalitesi bozuk olmasına rağmen frezeleme işlemi ile bu olumsuzluklar giderilebilmektedir. Farklı bir çalışmada Alizadeh ve arkadaşları, yaş mekanik alaşımlama ve sıcak ekstrüzyon ile farklı oranlarda (Al/%7.5B₄C ve Al/%15B₄C) kompozit malzeme üretmeyi başarmışlardır [133]. Özellikle %25 ve %30 B₄C takviyeli numunelerde timsah sırtı benzeri hataların olduğu düşük kalitede yüzeyler elde edilmiştir. Bu nedenle balistik malzeme üretimi için tasarlanan ve kullanılan daha büyük kesite sahip ekstrüzyon kalıbında

bu oranlarda B₄C içeren numuneler ekstrüze edilmemiştir (Resim 7.2). Al/ B₄C kompozit malzemelerde takviye oranı artmasıyla beraber ekstrüze edilebilirlik düşmektedir.



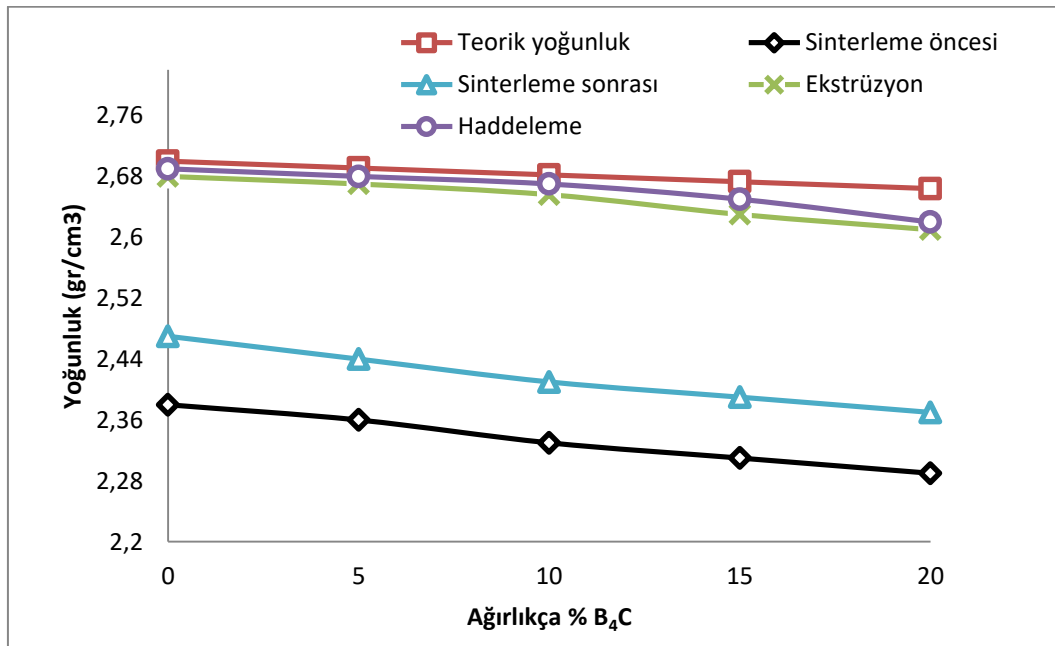
Resim 7.1.. Küçük ebatlarda ekstrüzyon kalıbı içerisinde çıkarılan kompozit malzemeler



Resim 7.2. Büyük ebatlarda ekstrüzyon kalıbı içerisinde çıkarılan kompozit malzemeler

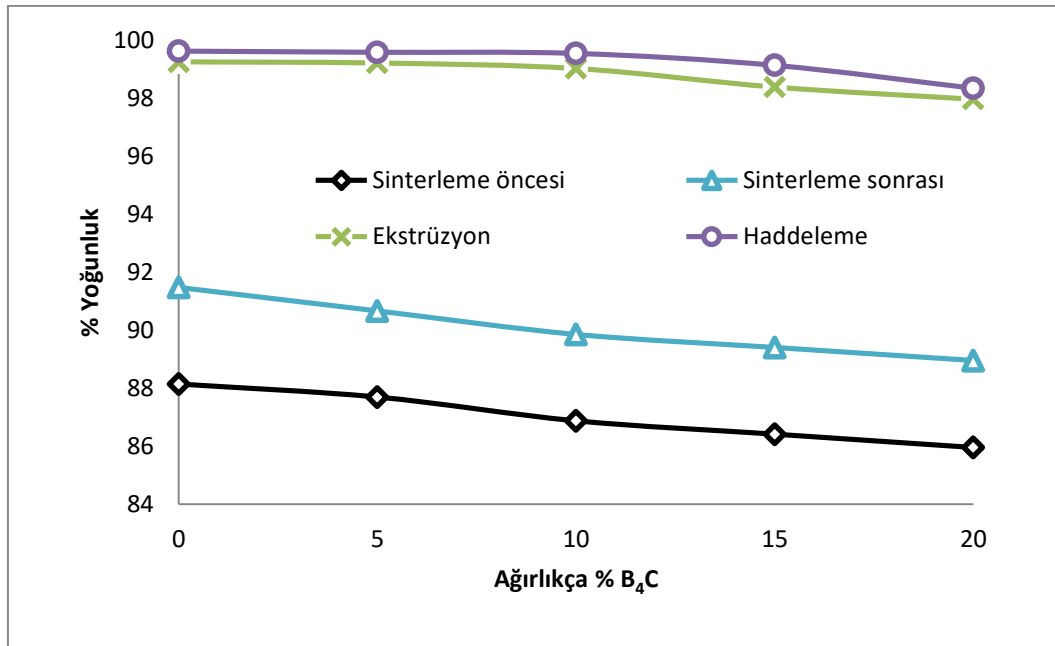
7.3. Yoğunluk Değişimi ve Gözeneklilik Oranı

Sinterleme öncesi, sinterleme sonrası, ekstrüzyon sonrası ve haddeleme sonrası olmak üzere üretimin her safhasında yoğunluk ve gözenek ölçümleri yapıldı. Sonuçlar Şekil 7.3’de verilmiştir. Matris ve takviye miktarına göre teorik yoğunluklar hesaplandı. Ayrıca teorik yoğunluk ve deneysel yoğunluk verilerinden faydalanılarak % yoğunluk ve gözeneklilik oranları belirlendi. Malzemelerin % yoğunluk ve gözeneklilik sonuçları Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’de verilmiştir. Yoğunluk grafiğini incelediğimizde en düşük yoğunlukların sinterleme öncesi ham yoğunluklu numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra sırası ile sinterleme sonrası, ekstrüzyon sonrası ve haddeleme sonrası olmak üzere yoğunluklarda artış meydana gelmiştir. En yüksek yoğunluklar Ekstrüzyon sonrası ve haddeleme sonrası elde edilmiştir. Genel olarak ağırlıkça % B_4C takviye oranının artması ile beraber yoğunluklarda düşüş meydana gelmiştir. Benzer bir çalışmada M. Alizadeh ve ark. Al matrisi içerisindeki B_4C takviye miktarının artması ile gözeneklilik oranının arttığını ve dolayısı ile yoğunluğun düştüğünü belirlemişlerdir [133]. Farklı bir çalışmada ise A. Alizadeh ve ark. Al-Cu matrisli B_4C takviyeli kompozit malzemeleri hem döküm hem de Ekstrüzyon yöntemi ile üretmişlerdir. Her iki üretim yönteminde de ağırlıkça % B_4C miktarının artması ile beraber yoğunluklarda düşüş meydana geldiğini görmüşlerdir. Ayrıca Ekstrüzyon yöntemindeki yoğunluklar döküm ile üretilene göre daha yüksek çıktığını tespit etmişlerdir [134].



Şekil 7.3. Üretilen kompozit malzemelerin yoğunluk grafikleri

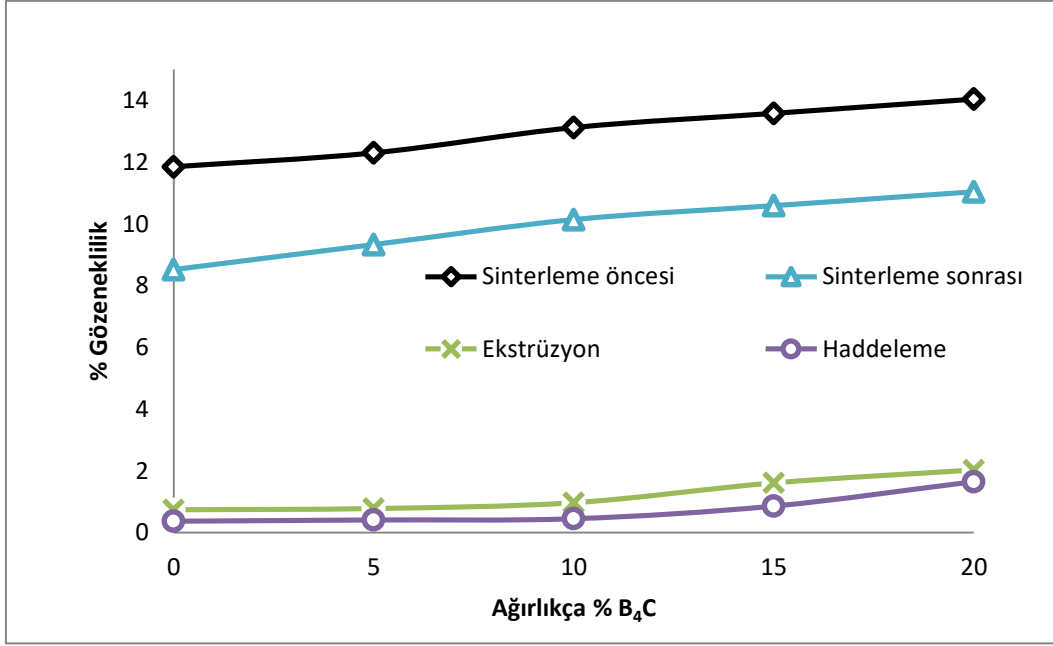
Toz metal blok numunelerin sinterleme öncesi ve sinterleme sonrası yoğunluk değişimleri ile gözeneklilik oranları incelendiğinde sinterleme sonrası yoğunluk değerlerinin arttığı gözenek miktarının ise azaldığı görülmektedir. Sinterleme öncesi maksimum bağıl yoğunluk değeri %88,14 ile AA6061 numunede elde edilirken, minimum değer yaklaşık %86,96 ile ağırlıkça %20 B₄C içeren numunede elde edilmiştir. B₄C içermeyen numunelerde bağıl yoğunluk değeri yaklaşık %91,48 iken ağırlıkça %20 B₄C içeren numunede %89,96'dır. Sinterleme işlemi ile bütün numunelerde ortalama %3'lük bir artış gözlenmiştir. Bu durum sinterleme işlemi ile atomların difüzyon yaparak parçacıklar arasında bağlanma gerçekleştirmesinden kaynaklanır [135]. B₄C parçacık miktarındaki artış ile yoğunluk değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bilindiği üzere seramik parçacıkların sıkıştırılması ve gözeneksiz bir yapının elde edilmesi oldukça güçtür. AA6061 metal tozu içerisindeki B₄C tozları sert yapılı olmaları toz içerisinde ve kalıp yüzeylerinde sürtünme kuvvetini artırdığından toz metal blokların sıkıştırılabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. 10 µm altı B₄C parçacıklarının küçük boyuta sahip olmaları yüzey enerjilerinin artmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden artan takviye elemanına bağlı olarak takviyelerin matris fazı ile karıştırılmasında kısmen topaklanmalar oluşmuştur. Bu durum parçacıklar arasında hava boşluklarının oluşmasına neden olmuş ve yoğunluk değerleri parçacık içermeyen numunelere kıyasla daha düşük elde edilmiştir [136].



Şekil 7.4. Üretilen kompozit malzemelerin % yoğunluk grafikleri

Ekstrüzyon işlemi sonrası bağıl yoğunluk değişimleri ile gözeneklilik oranları Şekil 7.3 ve Şekil 7.5’de verilmiştir. Şekil incelendiğinde ekstrüzyon işleminin yoğunluk değişimi üzerine oldukça önemli etkiye sahip olduğu görülmektedir. Takviyesiz AA6061 alaşımında nispi yoğunluk % 99’un üstüne çıkarken % 20 B₄C oranında dahi nispi yoğunluk %99,97’ye ulaşmıştır. Benzer bir çalışmada, A. Alizadeh ve arkadaşları Al matrisli nano B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemeler karıştırma döküm ve karıştırma döküm sonrası ekstrüzyon olmak üzere iki farklı metotla üretilmiştir. Her iki teknikte de takviye miktarının artması ile yoğunlukta düşüş yaşanırken aynı miktarda B₄C içeren kompozit malzemelerde ekstrüzyon yapılan malzemelerin yoğunluğu karıştırma döküm tekniğine göre daha yüksek çıkmıştır. Döküm esnasında yapı içerisinde meydana gelen gaz boşlukları yoğunluğun düşmesine neden olurken bu durum ekstrüzyonda tam tersidir [134].

Haddeleme işlemine tabii tutulan numunelere ait yoğunluk değişimleri incelendiğinde ekstrüzyon işlemine göre yoğunluk değişimlerinde çok düşük oranlarda artış meydana gelmiştir. Ekstrüzyon işleminde olduğu gibi B₄C miktarına bakılmaksızın bütün numunelerde %98’in üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir. B₄C içermeyen numunelerde ise % 100’e yakın bağıl yoğunluk değeri elde edilmiştir. Ekstrüzyon işlemi ile %99.26 bağıl yoğunluk elde edilirken haddeleme işlemi ile bu değer %99.62 olmuştur. Her iki işlem sonrası elde edilen bağıl yoğunluk değerleri arasındaki farkın çok önemli olmadığı anlaşılmaktadır. Fakat tam yoğunlukta kompozit malzeme üretimi oldukça önemlidir [137]. Çünkü mekanik özellikler bu değerlere göre farklılık gösterebilmektedir. Haddeleme işleminde B₄C miktarındaki artışın yoğunluk değişimi üzerine çok fazla bir etkisi olmadığı görülmektedir. Gözeneklilik değerlerine bakıldığında maksimum % 1.65 oranında %20 B₄C içeren numunelerde gözeneklilik elde edilmiştir (Şekil 7.5).



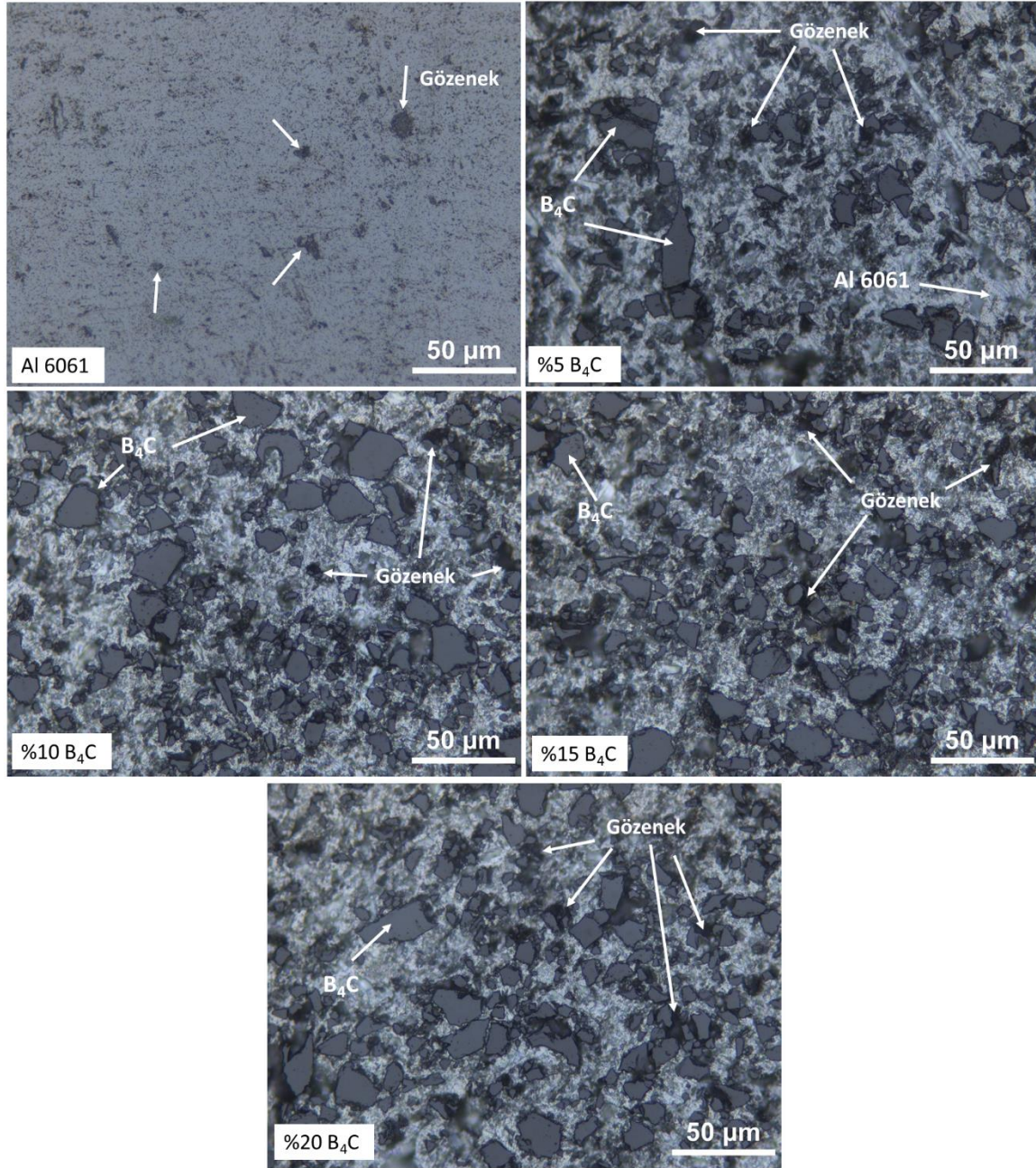
Şekil 7.5. Üretilen kompozit malzemelerin % gözeneklilik grafikleri

Kompozit malzeme üretiminde yüksek yoğunlukta düşük gözenek içeren malzemelerin üretiminde sıkıştırma ve sinterleme işlemlerinin yanı sıra ekstrüzyon, haddeme ve dövme gibi ikincil işlemlere ihtiyaç duyulabilmektedir [137,138]. Fakat bu işlemlerin uygulanması esnasında toz metal blok numunelerde deformasyon ile birlikte yapıda mikro çatlakların oluşumunda söz konusu olabilir [138]. Bu çalışmada yüksek bağlı yoğunluk değerleri elde etmek için ekstrüzyon ve haddeme gibi ikincil işlemler uygulanmıştır. Özellikle balistik test numunelerinde boyutsal sınırlamalar bu tür işlemleri zorunlu hale getirmiştir.

7.4. Mikroyapı Karakterizasyonu

7.4.1. Optik mikroskop analizleri

Resim 7.3’de sinterleme sonrası kompozit malzemelerin mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. Sinterleme sonrası takviye miktarına bağlı olarak yoğunluk düşmesi meydana gelmiştir. Mikroyapı resimlerini incelediğimizde takviye miktarına bağlı olarak gözeneklerin arttığı görülmüştür. Resimde siyah olarak gösterilen bölgeler gözeneği oluştururken, koyu gri bölgeler ise takviye elemanı olan B₄C’yi temsil etmektedir.

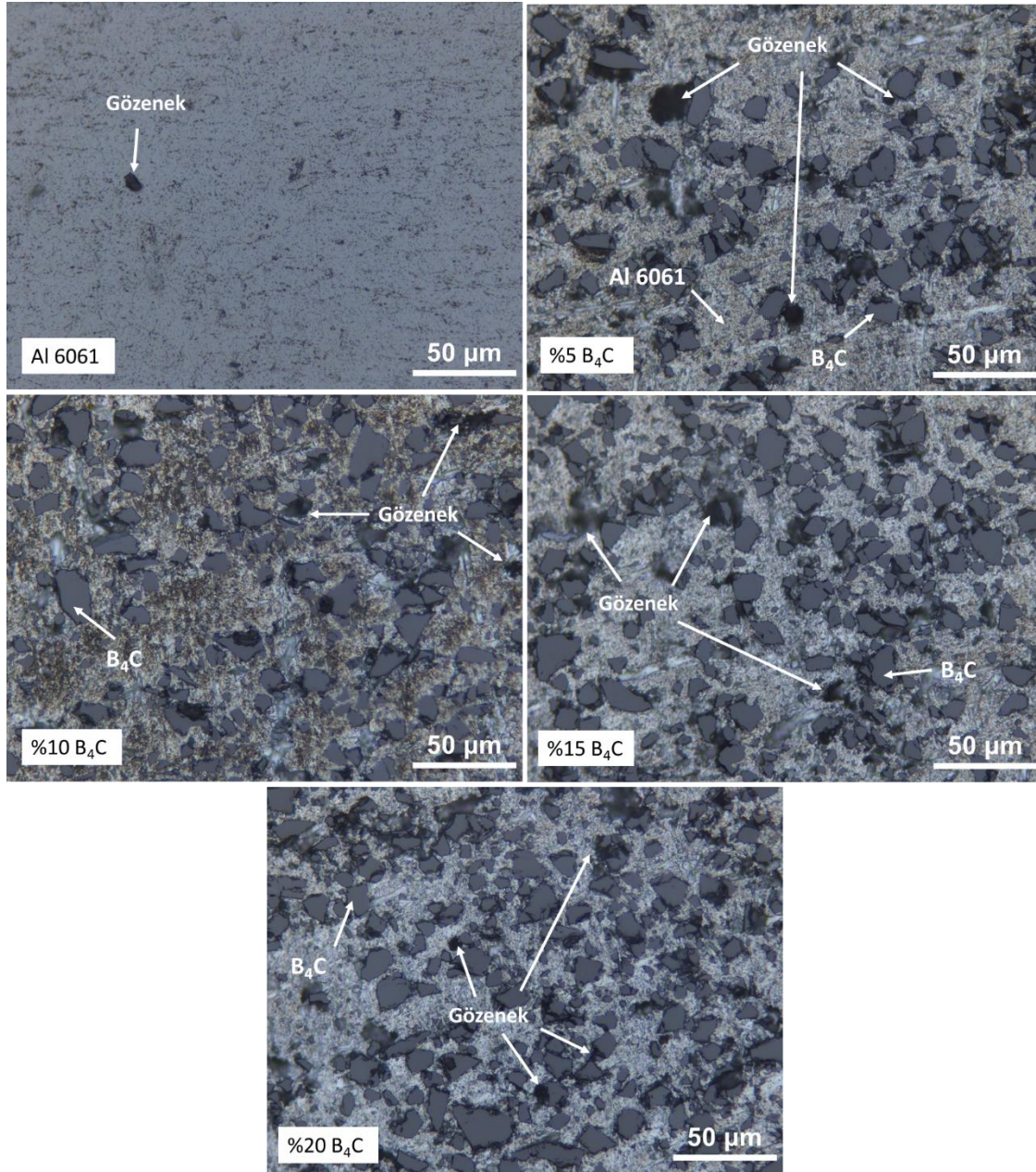


Resim 7.3. Sinterleme sonrası kompozit malzemelerin optik resimleri (50×)

Ayvaz ve Çetinel, T/M yöntemiyle farklı parametrelerde Al/B₄C kompozit malzemeler üretmişlerdir. Üretimde üç farklı matris (Al5Cu, Al5Mg ve Al2.5Cu.2.Mg) ve dört farklı oranda (ağırlıkça %5, 10, 20, 30) B₄C takviye kullanmışlardır. kompozitlerin malzemeler iki farklı basınç (200 ve 400 MPa) ve atmosferik gaz ortamında 560 °C'de üç farklı sinterleme süresinde (60, 120 ve 240 dk.) sinterlenerek üretilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerde ağırlıkça % B₄C miktarının artması ile gözenekli bir mikro yapının olduğu gözlemlenirken % yoğunluğun azaldığı tespit edilmiştir. Sinterleme ile üretilen numunelerde en yüksek yoğunluk % 94.958 olarak tespit etmişlerdir [139].

Tozların preslenmesi ve sinterlenmesi ile neredeyse tam yoğunluğa ulaşmak bir hayli zordur. Bu durum sinterlenen tozların Ekstrüzyon ve haddelenmesi ile ortadan kaldırılmış olunur. Zheng ve arkadaşları, sırası ile mekanik alaşımlama, sıcak presleme ve sıcak ekstrüzyon ile üretmiş oldukları AA2024/20B₄C takviyeli kompozit malzemeleri mekanik özellik ve mikroyapısını incelemişlerdir. 823 K ve 400 MPa sıcak preslenen numuneler yine aynı sıcaklıkta sıcak ekstrüzyon yapılarak tamamen yoğun kompozitler üretmiştir. Sıcak ekstrüzyon sonrası B₄C parçacıklarının Al-2024 matrisinde düzgün bir şekilde dağıldığını ve sinterleme sırasında oluşan gözeneklerin ortadan kaldırıldığı anlaşılmıştır [140].

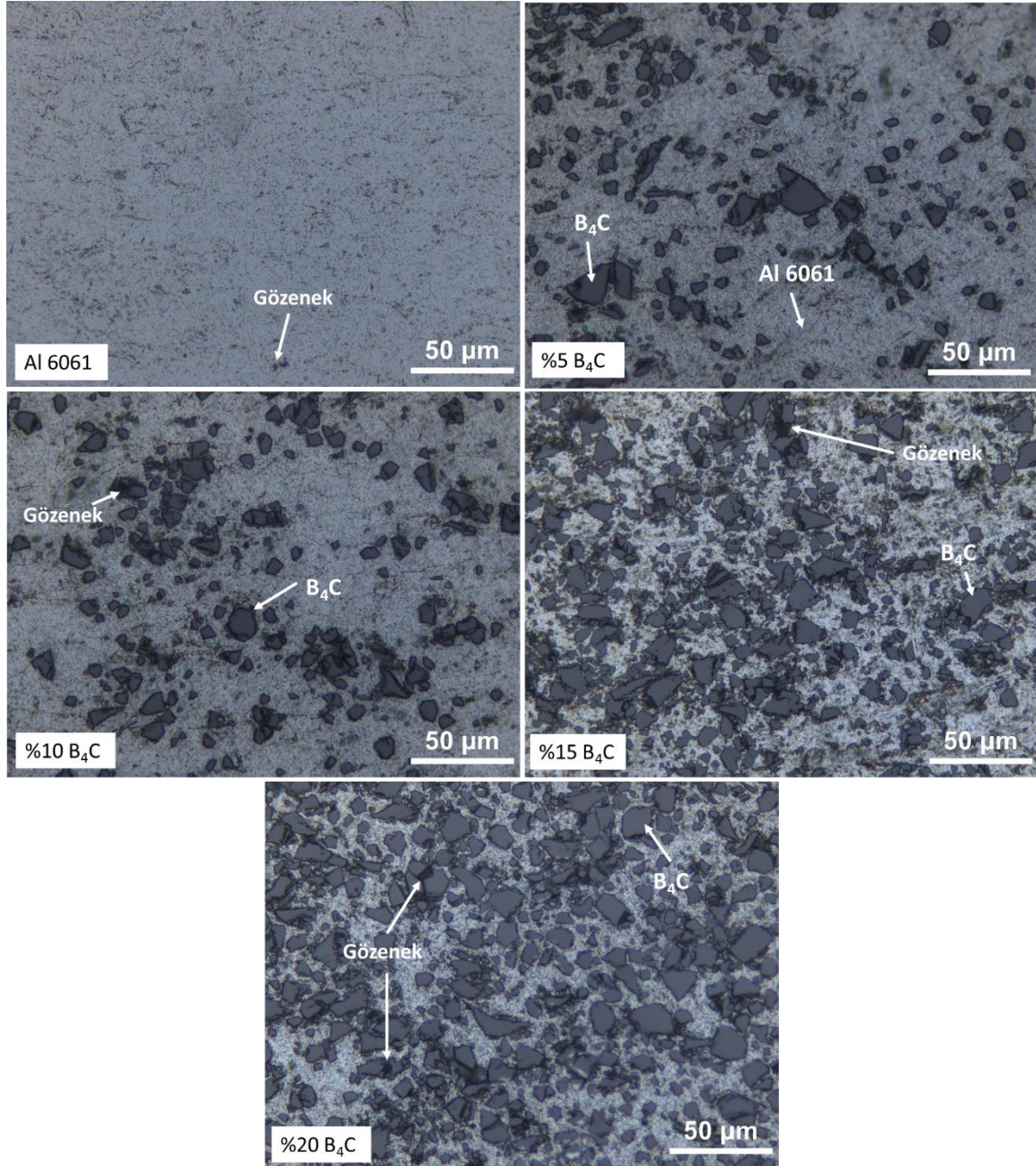
Resim 7.4’de kompozit malzemelerin ekstrüzyon sonrası mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Sinterleme sonrası elde edilen numunelere kıyasla ekstrüze edilen numunelerde gözeneklerin nispeten azaldığı görülmektedir. Şekil 7.5’de verilen gözeneklilik grafiği bu durumu doğrulamaktadır. Ekstrüzyon işleminden sonra meydana gelen yoğunluktaki bu artış gözeneklilik oranının düşmesine sebep olmuştur. Genel olarak B₄C içeren numunelerde parçacıklarının matris fazı içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir.



Resim 7.4. Ekstrüzyon sonrası kompozit malzemelerin optik resimleri (50×)

Haddeleme işlemi yassı mamul üretimi için oldukça önemlidir. Özellikle nihai ürün için son işlem olarak kullanılabilir. Resim 7.5’de kompozit malzemelerin haddeleme sonrası mikroyapı fotoğrafları gösterilmektedir. Ekstrüzyon sonrası elde edilen numunelere kıyasla haddelenmiş numunelerde gözeneklerin azaldığı görülmektedir. Yapı içerisinde bulunan gözeneklerin deformasyonla birlikte azaldığı görülmektedir. Nitekim Şekil 7.5’de verilen gözeneklilik grafiği bu durumu doğrulamaktadır. Chen ve arkadaşları, farklı oranlarda (%10, %20, %30 and %40) B_4C takviyeli AA6061 matrisli kompozit malzemeler sıcak presleme sonrasında sıcak haddeleme ile üretmişlerdir. haddeleme işlemi ile parçacık

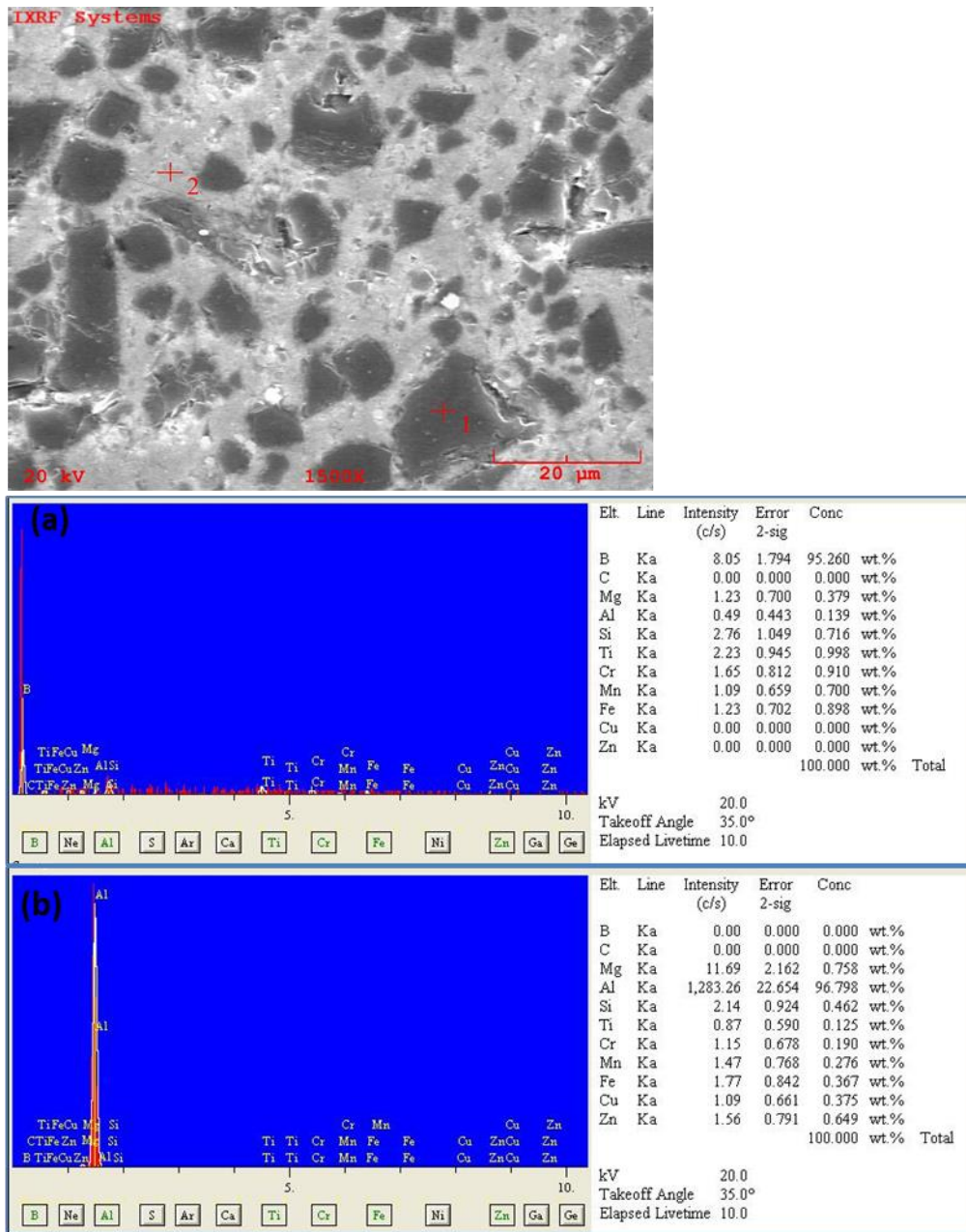
dağılımının daha homojen dağıldığını, topaklanmanın azaldığını ve matris ile takviye elemanı arasındaki ıslatabilirliğin iyileştiğini tespit etmişlerdir [141].



Resim 7.5. Haddeleme sonrası kompozit malzemelerin optik resimleri (50×)

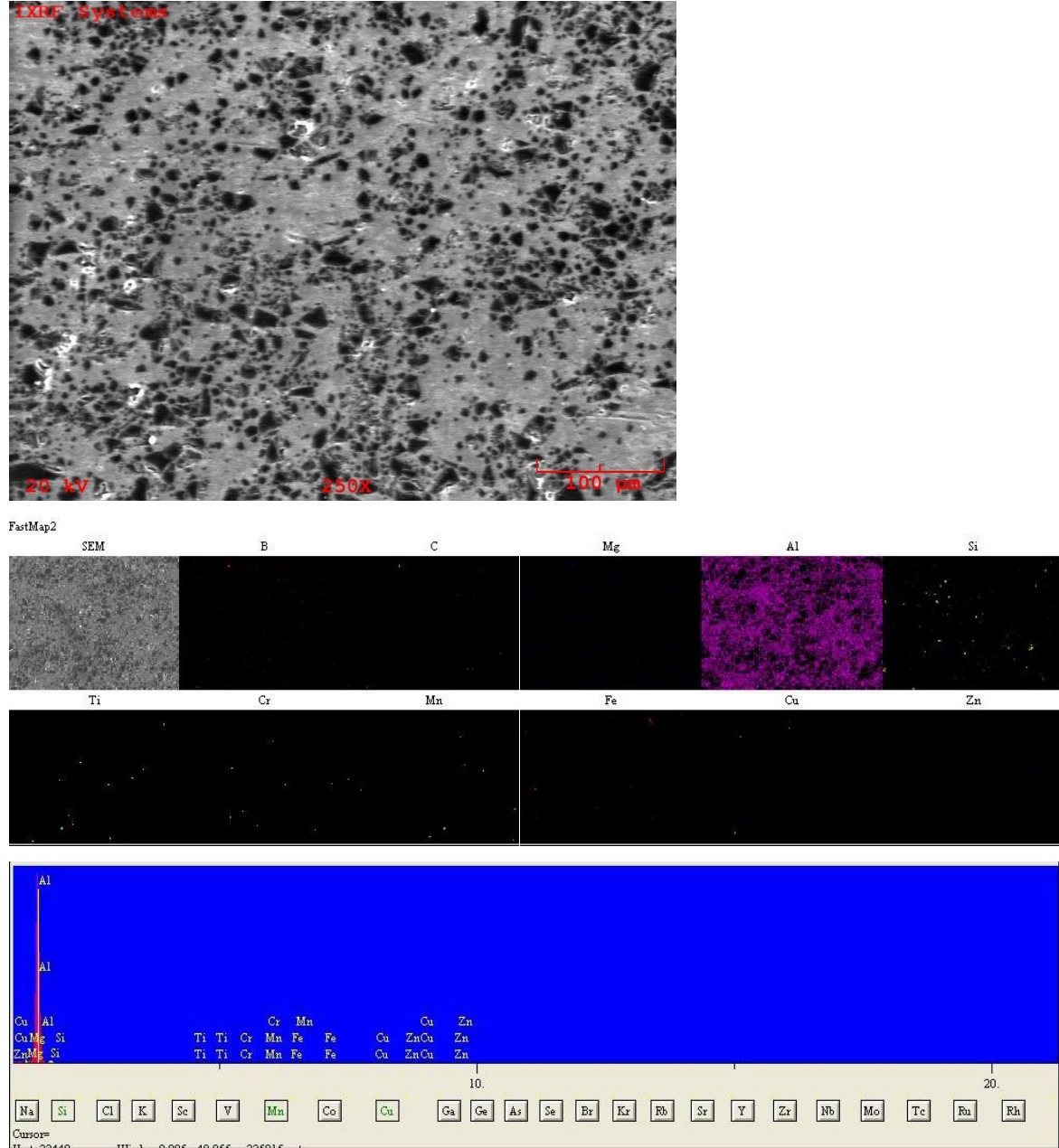
7.4.2. SEM ve EDS analizleri

Kompozit malzemelerin haddeleme sonrası SEM resimleri, EDS ve Mapping (haritalama) analizleri yapılmıştır. Şekil 7.6'da haddeleme sonrası % 15 B₄C takviyeli kompozit malzemeden alınan SEM resmi ve EDS sonuçları verilmiştir. EDS analizine baktığımızda 1. noktadan alınan pikte bor oranını yüksek olması koyu gri renkli olan bölgelerin B₄C olduğunu göstermektedir. 2. Noktadan alınan pik grafiğine bakıldığında ise ağırlıkça matris fazı oluşturan Al elementinin yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 7.6. Haddeleme sonrası % 15 B₄C takviyeli kompozit malzemenin SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (a) 1. bölgenin, (b) 2. bölgenin EDS analizi

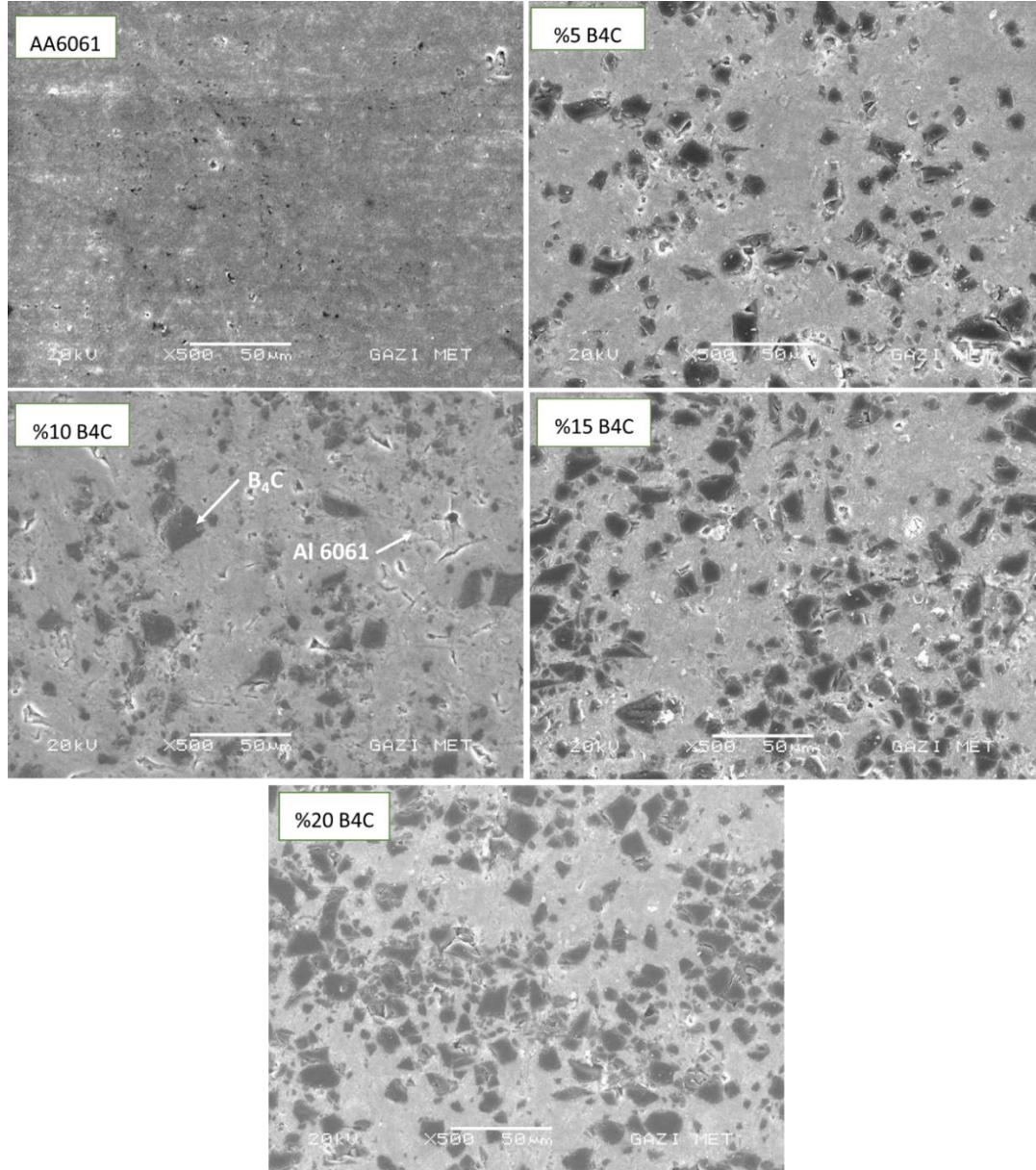
Şekil 7.7’de AA6061 matrisli % 15 B₄C takviyeli kompozit malzemenin haddeleme sonrası yüzeyinden alınan fast mapping görüntüleri verilmiştir. Haritalama tekniği ile alınan verilere baktığımızda bor karbür parçacıklarının yapı içerisinde homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir.



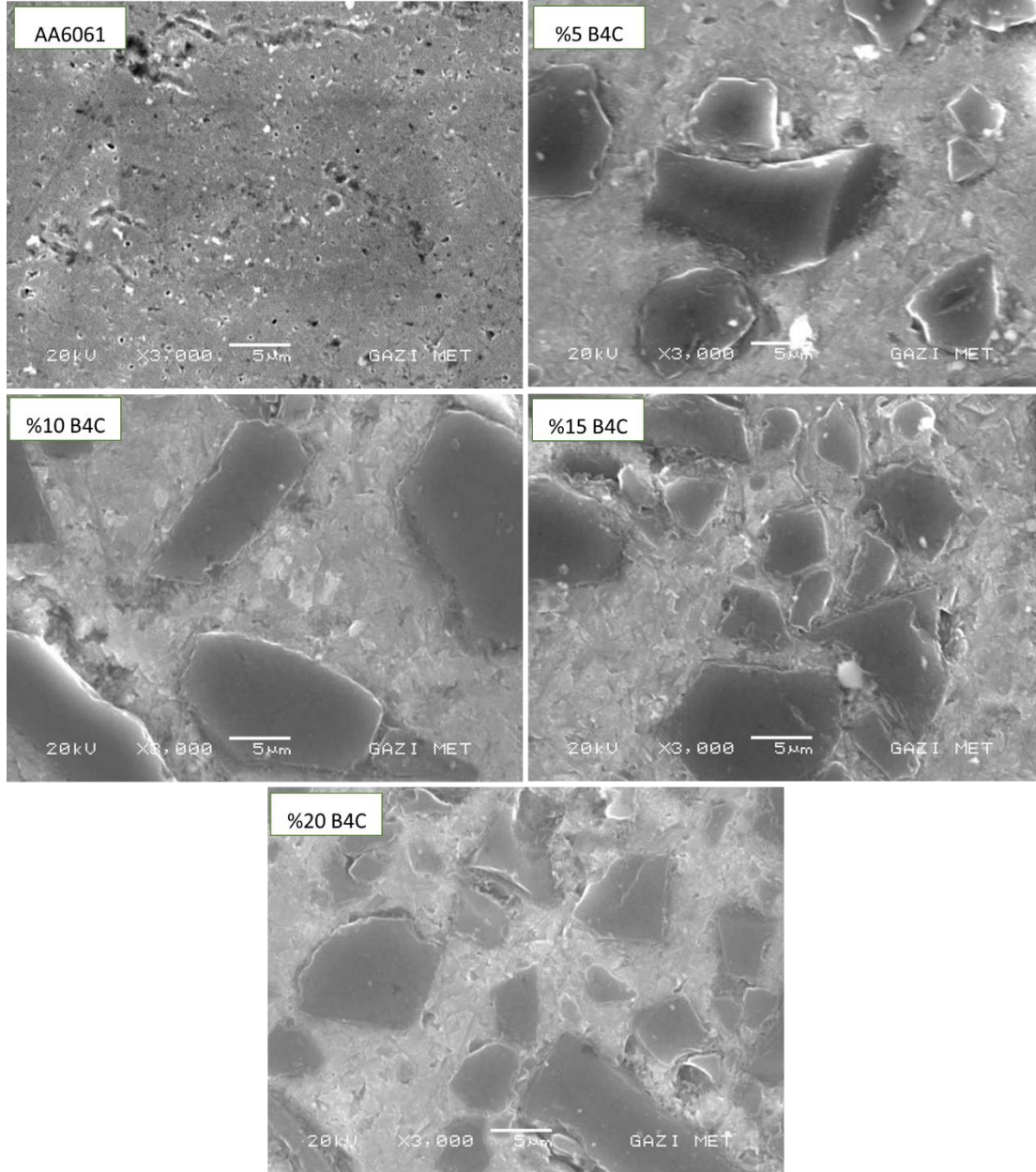
Şekil 7.7. Haddeleme sonrası % 15 B₄C takviyeli kompozit malzemenin yüzeyinden alınan genel haritalama görüntüsü (fast mapping)

Özellikle haddeleme işleminden sonra aşırı miktarda plastik deformasyona uğrayan B₄C takviyeli numunelerde mikro çatlaklar dikkat çekmektedir. Bu durum ağırlıklı olarak %15 ve %20 B₄C içeren numunelerde gözlenmiştir. Parçacık miktarındaki artış ve aşırı plastik

deformasyonun parçacıkların birbirlerine yaklaşmasına ve aşırı gerilme sonucu çatlama ve kırılmalarına neden olduğu varsayılmaktadır. Bu durum özellikle topaklanma bölgelerinde dikkat çekmektedir. Matris fazı ile B_4C parçacıklarının ara yüzey uyumunun ekstrüzyon işlemine kıyasla daha iyi olduğu Resim 7.6'da ve Resim 7.7'de verilen SEM fotoğraflarında görülmektedir.



Resim 7.6. AA6061 matrisli B_4C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin haddeleme sonrası SEM resimleri ($\times 500$)



Resim 7.7. AA6061 matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin haddeleme sonrası SEM resimleri (×3000)

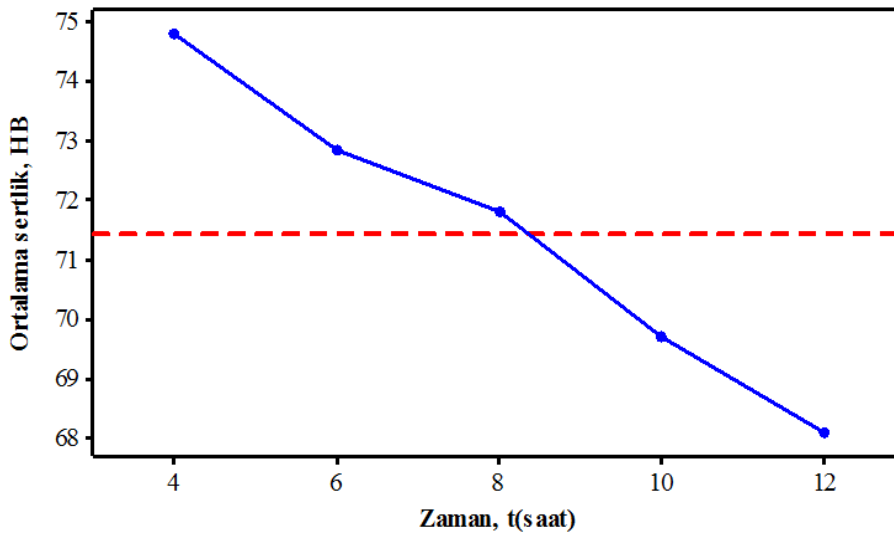
7.5. Sertlik Değişimi

Üretilen kompozit malzemelerin T6 ısıtıl işlem sonrası sertliğindeki değişimleri tespit etme için ilk olarak haddelenmiş AA6061%15B₄C kompozit malzemesinden numuneler alınarak farklı parametrelerde T6 ısıtıl işlemi uygulandı. T6 ısıtıl işlem sonrası numunelerin yüzeyinden sertlikler alınarak ortalama sertlik değerleri belirlendi. T6 ısıtıl işlem parametrelerinin sağlamış olduğu en iyi sertlik değerleri hesaplandı. AA6061%15B₄C kompozit malzemesin T6 ısıtıl işlem parametreleri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. AA6061%15 B₄C'nin T6 yaşlandırma ısıtma işlem parametreleri

Çözündürme sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma süresi (saat)	AA6061 (%)	B ₄ C (%)
530	175	4	85	15
530	175	6		
530	175	8		
530	175	10		
530	175	12		

Şekil 7.8'de verilen grafiği incelediğimizde farklı sürelerde yapılan T6 yaşlandırma ısıtma işlemine göre 4 saat süre ile yaşlandırılan numunenin ortalama sertlik değeri en yüksek çıkmıştır (74,8 HB). Daha sonra 6 saat yaşlandırılan numunenin sertlik değeri (72,6 HB), 4 saat'e göre ani bir düşüş sergilemiştir. 8 saat yaşlandırılan kompozit numunede ortalama sertlik (71,8 HB) elde edilirken 10 ve 12 saat yaşlandırılan numunelerde sertlik değerleri (sırasıyla 69,5 HB, 68,2 HB) giderek düşmüştür.

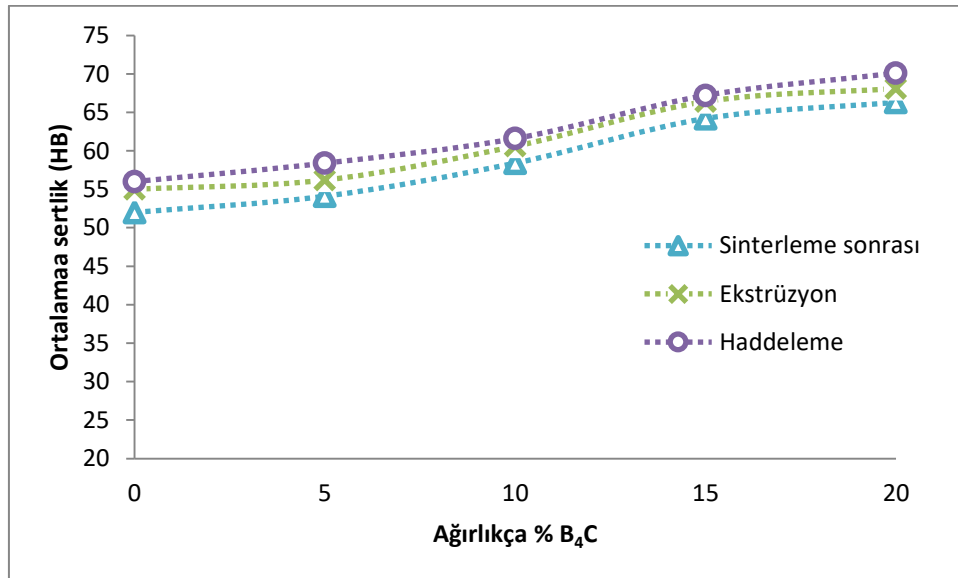


Şekil 7.8. T6 yaşlandırma süresinin sertliğe olan etkisi

Haddeleme sonrası farklı sürelerde T6 ısıtma işlemi yapılan malzemenin sonuçlarına bakarak ortalama sertlik değerleri 8 saat yaşlandırılan numunelerde elde edilmiştir. Bu sebepten dolayı üretilen kompozit malzemelerin sinterleme, ekstrüzyon ve haddeleme sonrası olmak üzere üretimin her safhasında 530 °C'de çözündürme hemen ardından suda soğutma ve 175 °C'de 8 saat yaşlandırma ısıtma işlemi uygulandı. Bu ısıtma işlem sonrası alınan sertlik değişim grafikleri Şekil 7.9'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde B₄C miktarındaki artış ile birlikte sertlik değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Sinterleme sonrası sertlik değerleri 52 HB ile

66,3 HB arasında değişmektedir. En düşük sertlik değeri 52 HB ile AA6061 alüminyum alaşımında gözlemlenirken en yüksek sertlik değeri 66,3 HB ile % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde elde edilmiştir. Benzer bir çalışmada da B₄C Miktarının artması ile sertliğinde arttığını yazarlar tespit etmiştir [142]. B₄C parçacıklarının matris yapı içerisinde gerilimler oluşturarak kompozitin sertliğinin artırmasında önemli bir etken olduğu düşünülmektedir.

Ekstrüzyon sonrası en düşük sertlik değeri 55 HB ile AA6061 alüminyum alaşımında gözlemlenirken en yüksek sertlik değeri 68 HB ile % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde elde edilmiştir. Sinterleme sonrası üretilen numunelere kıyasla sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum ekstrüzyon işlemi ile meydana gelen plastik deformasyonun gerilim sertleşmesine neden olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Parçacık miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik değerlerindeki artış sinterleme sonrası elde edilen numunelerde olduğu gibi gerilme enerjilerinden kaynaklanmıştır.



Şekil 7.9. Sinterleme, ekstrüzyon ve haddeleme sonrası ağırlıkça % B₄C oranına göre sertlik değişim grafiği

Haddeleme sonrası üretilen kompozit malzemelere ait sertlik değişimleri incelendiğinde sinterleme sonrası ve ekstrüzyon sonrası üretilen numunelerde olduğu gibi B₄C miktarındaki artış ile birlikte sertlik değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. En düşük sertlik değeri 56 HB ile AA6061 alüminyum alaşımında gözlemlenirken en yüksek sertlik değeri 70.1, HB ile % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde elde edilmiştir. Sinterleme ve ekstrüzyon sonrası

üretileen numunelere kıyasla sertlik değeerlerinin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum haddeleme işleminin deformasyon sertleşmesine neden olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca sinterleme, ekstrüzyon ve haddeleme işlemleri sonrası elde edilen numunelerdeki bağıl yoğunluk değışimleri ve gözeneklilik oranları sertlik değışimi üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu da göstermektedir. Benzer bir çalışmada ekstrüzyon ile üretilen Al matris içindeki nano B₄C parçacık miktarının artması ile sertlikte gözle görülebilir bir artış meydana gelmiştir. Fakat bazı üretim metotlarında örneğin karıştırma döküm tekniğı ile üretilen kompozitlerde B₄C takviye miktarının artması ile gözeneklilik oranı artarak gözeneklilik ve sertliğı olumsuz etkileyebilir [143].

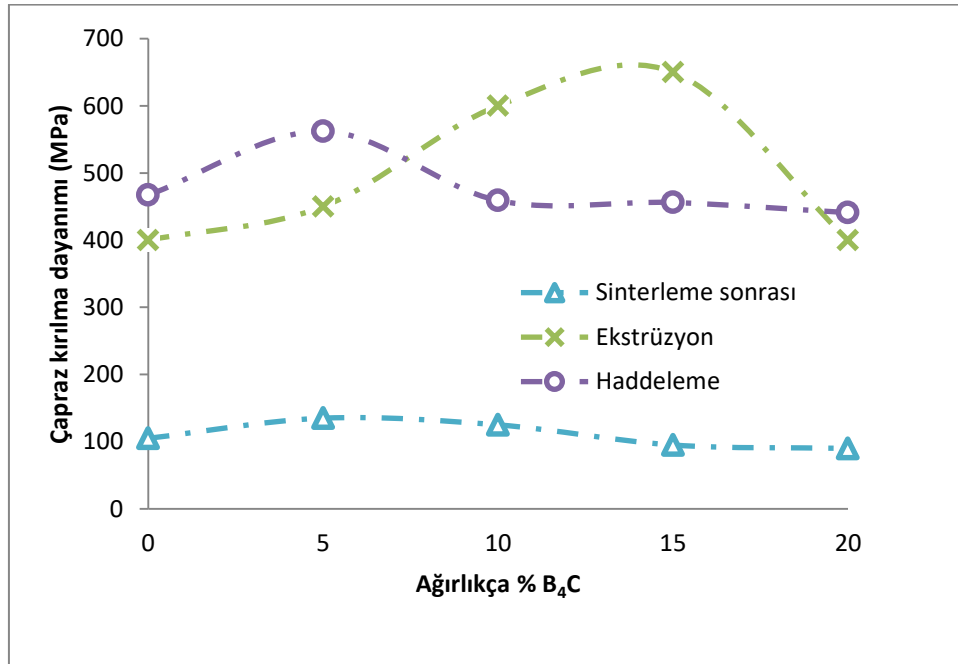
7.6. Çapraz Kırılma Dayanımı

Çalışmada farklı oranlarda B₄C içeren kompozit malzemelere çapraz kırılma testi uygulanmıştır. Çapraz kırılma deneyleri sonucu elde edilen eğriler Şekil 7.10’da verilmiştir. Bu deneyler malzemelerin şekil değıştirebilirliğini belirlemede oldukça önemlidir. Deneysel çalışmalar sonucu sinterleme sonrası elde edilen numunelerin çapraz kırılma dayanımı grafiğı incelendiğinde maksimum dayanımın 135 MPa ile %5 B₄C içeren numunelerde elde edildiğı görülmektedir. Bu noktadan itibaren %15 ve %20 B₄C içeren numunelerde çapraz kırılma dayanımlarında (sırasıyla 95 MPa ve 90 MPa) bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum sinterleme sonrası takviye oranının artması ile gevrekliğin artmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle artan parçacık miktarı ile birlikte gözeneklilik miktarının da artması kırılma dayanımını düşürmüştür. B₄C içermeyen AA6061 numuneler %15 ve %20 B₄C içeren numunelere oranla daha yüksek kırılma dayanımına sahiptir. Bunun nedeni parçacık etrafında yer alan gözenekler ve parçacık-matris ara yüzey uyumunun yeterli olmamasıdır. Sinterleme esnasında toz malzemeler bir biri ile birleşmeye başladığında yapı içerisinde gözeneklerin kaldığı bilinmektedir [139].

Ekstrüzyon sonrası numunelerin çapraz kırılma dayanımlarında artış gözlenmiştir. AA6061 numunede sinterleme sonrası çapraz kırılma dayanımı 105 MPa iken ekstrüzyon işlemi ile bu oran 400 MPa’a çıkmıştır. Yaklaşık 4 kat dayanımda artış meydana gelmiştir. En yüksek dayanım değeri 650 MPa ile %15 B₄C içeren numunelerde elde edilmiştir. Halbuki sinterleme sonrası %5 B₄C içeren numunelerde maksimum değere ulaşılmıştır. Bunun nedeni ekstrüzyon işlemi ile birlikte gözeneklilik oranının azalması ve parçacık miktarındaki artış ile birlikte gerilme değeerlerinin yükselmesidir. % 20 B₄C içeren numunede ise dayanım

değeri 400 MPa'a düşmüştür. Bu düşüşün sebebi ise deney esnasında oluşan çekme gerilmelerinin parçacık matris ara yüzeyindeki bağın kuvvetini geçmesinden kaynaklanmaktadır. Esasında parçacık miktarındaki artışın %15'e kadar dayanım artışı sergilemesi gevrek bir davranıştan daha sünek bir davranışa geçişten kaynaklandığı düşünülmektedir.

Haddeleme sonrası çapraz kırılma dayanımlarını incelediğimizde, kırılmaların genel olarak sünek olduğu görülmüştür. Malzemeler uygulanan kuvvet doğrultusunda hiç kırılmadan eğilmiştir. Eğilme neticesinde malzemelerin alt kısımlarında çekme gerilmesi ile çatlaklar oluşmuştur. Çatlaklar ağırlıkça % B₄C miktarına bağlı olarak daha belirgin bir şekilde oluşmuştur. En düşük çapraz kırılma dayanımı % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemede gözlemlenirken, en yüksek dayanım %5 B₄C takviyeli kompozit malzemede ulaşılmıştır. AA6061'den % 5 B₄C miktarı arasında çapraz kırılma dayanımı 467 MPa'dan 562 MPa'a çıkmıştır. Daha sonrasında ise takviye miktarındaki artış ile çapraz kırılma dayanımları giderek azalmıştır.



Şekil 7.10. Sinterleme, ekstrüzyon ve haddeleme sonrası ağırlıkça % B₄C oranına göre çapraz kırılma dayanımı değişim grafiği

Sinterleme sonrası, ekstrüzyon sonrası ve haddeleme sonrası çapraz kırılma dayanımlarının olduğu ortak grafiği incelediğimizde en yüksek çapraz kırılma dayanımının ekstrüzyon sonrası %15 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde olduğu gözlemlenirken, en düşük çapraz kırılma dayanımı sinterleme sonrası % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde olduğu görülmüştür. Çapraz kırılma dayanımlarına genel olarak baktığımızda en düşük dayanımlar

sinterleme sonrası meydana gelmiştir. Bu durum sinterleme sonrası mikro yapı içerisinde meydana gelen gözeneklerden (düşük bağıl yoğunluk) oluştuğu düşünülmektedir. Sinterleme sonrası ağırlıkça % B₄C miktarı sinterleme sonrası dayanımları çok büyük oranlarda etkilememiştir. Sinterleme sonrası ekstrüzyon yapılarak mikro yapı içerisinde meydana gelen gözenekler azaltılarak (yüksek bağıl yoğunluk) çapraz kırılma dayanımları çok ciddi oranlarda artırılmıştır. Ağırlıkça % B₄C miktarının artması ile beraber %15 B₄C takviyesine kadar dayanım artarken %20 B₄C’de dayanım düşüşe geçmiştir. Haddeleme sonrası ise AA6061’den %5 B₄C’ye kadar çapraz kırılma dayanımı artarken bu değer %15 de düşerek devam etmiştir.

7.7. Çekme Dayanımı Sonuçları

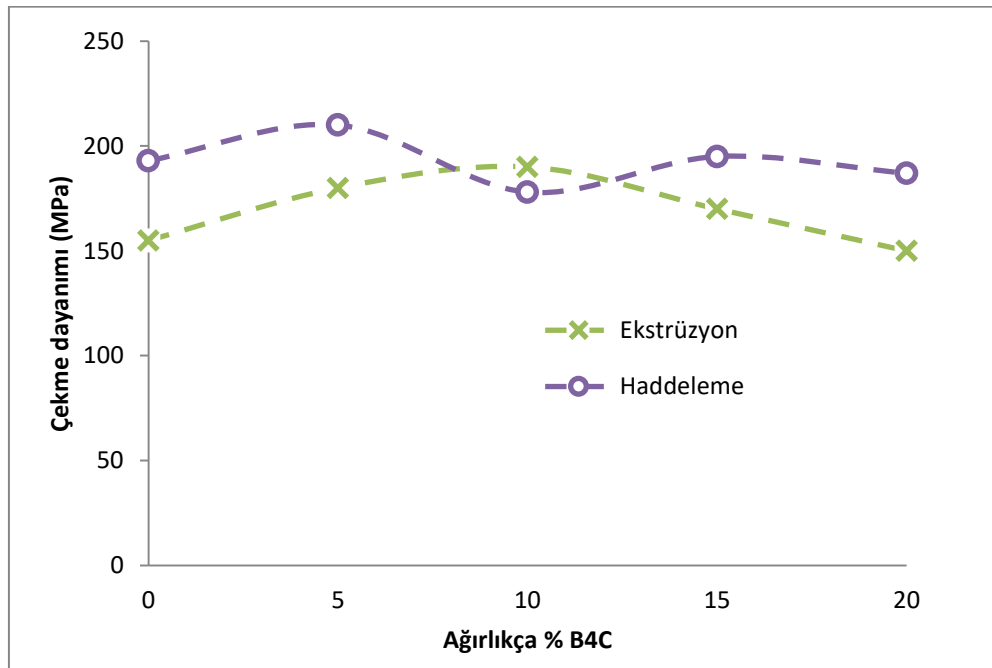
Ekstrüzyon sonrası ve haddeleme sonrası çekme test grafiği Şekil 7.11’de verilmiştir. Ekstrüzyon sonrası çekme dayanımlarını incelediğimizde en yüksek dayanım % 10 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde görülürken en düşük çekme dayanımı %20 B₄C takviyelilerde olduğu görülmüştür. Takviyesiz AA6061’de çekme dayanımı 155 MPa iken bu değer %5 ve % 10 B₄C takviyelerinde artarak sırası ile 180 ve 190 MPa olmuştur. Daha sonrasında ise bu değer düşerek % 15 ve % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde sırası ile 170 ve 150 MPa olmuştur. Benzer bir çalışmada Al matris içinde B₄C miktarının artması ile beraber çekme dayanımının ve mikrosertlik değerinin arttığı belirlenmiştir [133]. Karıştırma döküm ve ekstrüzyon tekniği ile üretilen (ağırlıkça%1-2-4 oranlarında) Al/nano B₄C kompozit malzemelerinin çekme dayanım sonuçları incelendiğinde, döküm tekniğinde ağırlıkça %2’ye kadar ekstrüzyonda ise %4’e kadar çekme dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Ekstrüzyon tekniğinde ağırlıkça B₄C miktarının artması ile çekme dayanımının artması daha az gözenek içermesi ve B₄C nano parçacıklarının daha homojen dağılmasından kaynaklanmaktadır [134]. Abdollahi ve arkadaşları, mekanik alaşımlama ve sıcak ekstrüzyon tekniği ile B₄C takviyeli ve takviyesiz AA2024 alaşımını üreterek mekanik özelliklerini ve tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Mekanik testlerin sonuçları, mekanik alaşımlama ve B₄C parçacıklarının varlığının Al2024 alaşımının mukavemetini ve sertliğini arttırdığını, ancak sünekliğini şiddetle azalttığını göstermektedir. Bunun nedeni, dislokasyon hareketlerini engelleyen engellerin artmasıdır [144]. Onoro ve arkadaşları, AA6061 ve AA7015 matrisli B₄C takviyeli kompozit malzemeleri sıcak ekstrüzyon ile üretilen oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta gerilme özelliklerini analiz etmişlerdir. AA6061

ve AA7015 matris yapısının her ikisine de eklenen B₄C mekanik özellikleri iyileştirmiştir [145].

Ekstrüzyon ve haddeleme sonrası çekme dayanımlarını kıyasladığımızda en yüksek çekme dayanımının haddeleme sonrası % 5 B₄C takviyeli kompozit malzemede olduğu görülürken en düşük çekme dayanımı ekstrüzyon sonrası % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde olduğu görülmüştür. Genel olarak baktığımızda % 10 B₄C haricinde haddeleme sonrası çekme dayanımları ekstrüzyon sonrasına göre daha yüksek çıkmıştır.

Haddeleme sonrası çekme dayanımlarını incelediğimizde en yüksek çekme dayanımının % 5 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde 210 MPa olduğu, en düşük çekme dayanımının ise %10 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde 178 MPa olduğu tespit edilmiştir. Takviyesiz AA6061'de çekme dayanımı 193 MPa iken bu değer % 5 B₄C takviyeli kompozitlerde 210 MPa'a çıkmıştır. Daha sonrasında bu değer % 10 B₄C'de ciddi oranlarda düşmüştür. Son olarak % 15 ve %20 B₄C'de bu değer % 10 B₄C'ye göre biraz artarak sırası ile 195 ve 187 MPa olmuştur.

Ekstrüzyon ile haddeleme yöntemini kıyasladığımızda haddeleme ile çekme dayanımın iyileştiği gözlemlenmiştir. Fakat %10 B₄C takviye elemanında beklenmeyen bir düşüş görülmüştür. Bu düşüş haddeleme sonrası %10 B₄C'de meydana gelen tozların topaklanmasıdır.



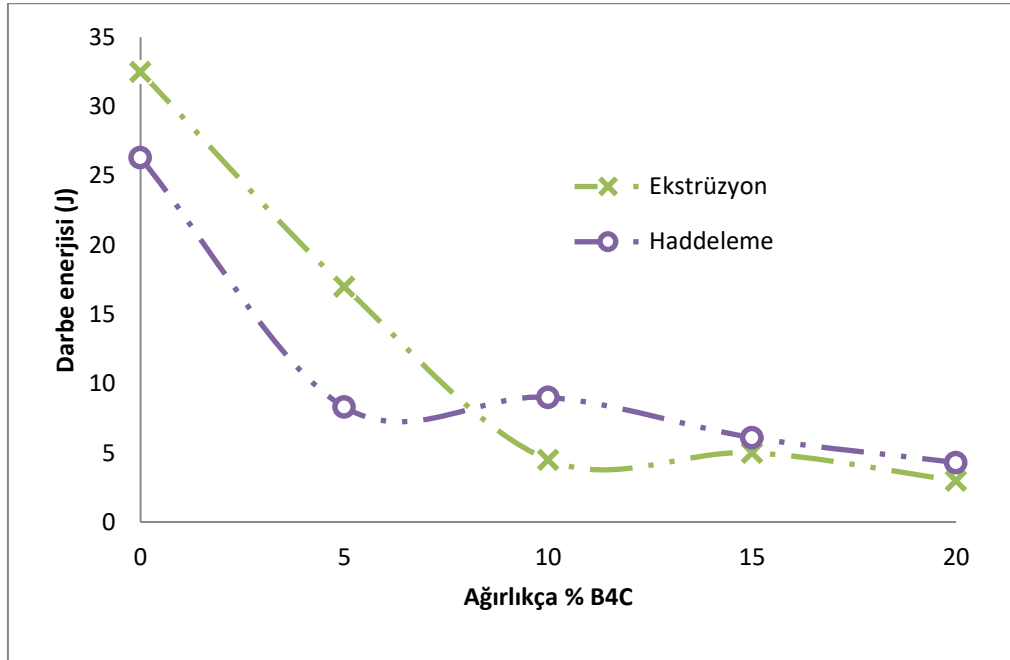
Şekil 7.11. Ekstrüzyon ve haddeleme sonrası ağırlıkça % B₄C oranına göre çekme dayanımı değişim grafiği

7.8. Çentik Darbe Deneyi Sonuçları

Kompozit malzemelerin ekstrüzyon sonrası ve haddeleme sonrası çentik darbe testleri yapıldı. Numunelere herhangi bir vurma veya çarpma gibi darbe geldiğinde ortaya çıkan darbe enerjisini incelemek için Charpy tipi darbe deneyi yapıldı.

Ekstrüzyon sonrası darbe enerjisine baktığımızda ağırlıkça % B_4C takviye miktarına bağlı olarak darbe enerjisinde bir düşüş olduğu görülmüştür. En yüksek darbe enerjisi takviyesiz AA6061’de 32,5 Joule olurken en düşük darbe enerjisi 3 Joule değer ile % 20 B_4C takviyeli kompozitlerde olduğu görülmüştür (Şekil 7.12).

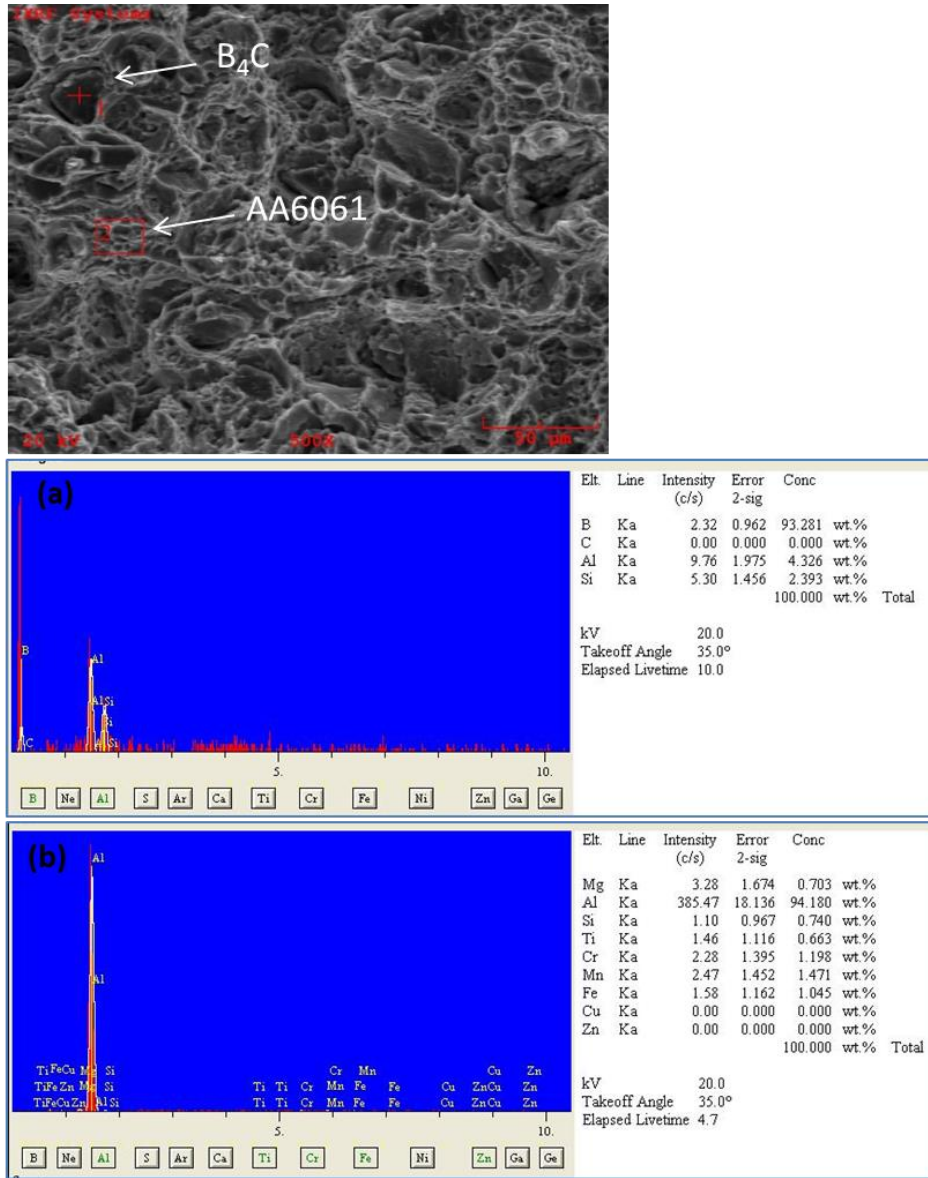
Haddeleme sonrası kompozit malzemelerin darbe enerjisi değişimine baktığımızda 26,3 Joule ile en yüksek darbe enerjisi takviyesiz AA6061 alaşımında görülürken en düşük darbe enerjisi 4,3 Joule gibi bir değerle % 20 B_4C takviyeli kompozit malzemede olduğu belirlenmiştir. Takviyesiz AA6061’den 26,3 Joule değere sahip olan darbe enerjisi % 5 B_4C ’de 8,3 Joule değere düşmüş % 10 B_4C ’de 9,0 Joule çıkmış ve daha sonra % 15 ve % 20 B_4C ’de sırası ile 6,1 ve 4,3 Joule değerlerine düşmüştür.



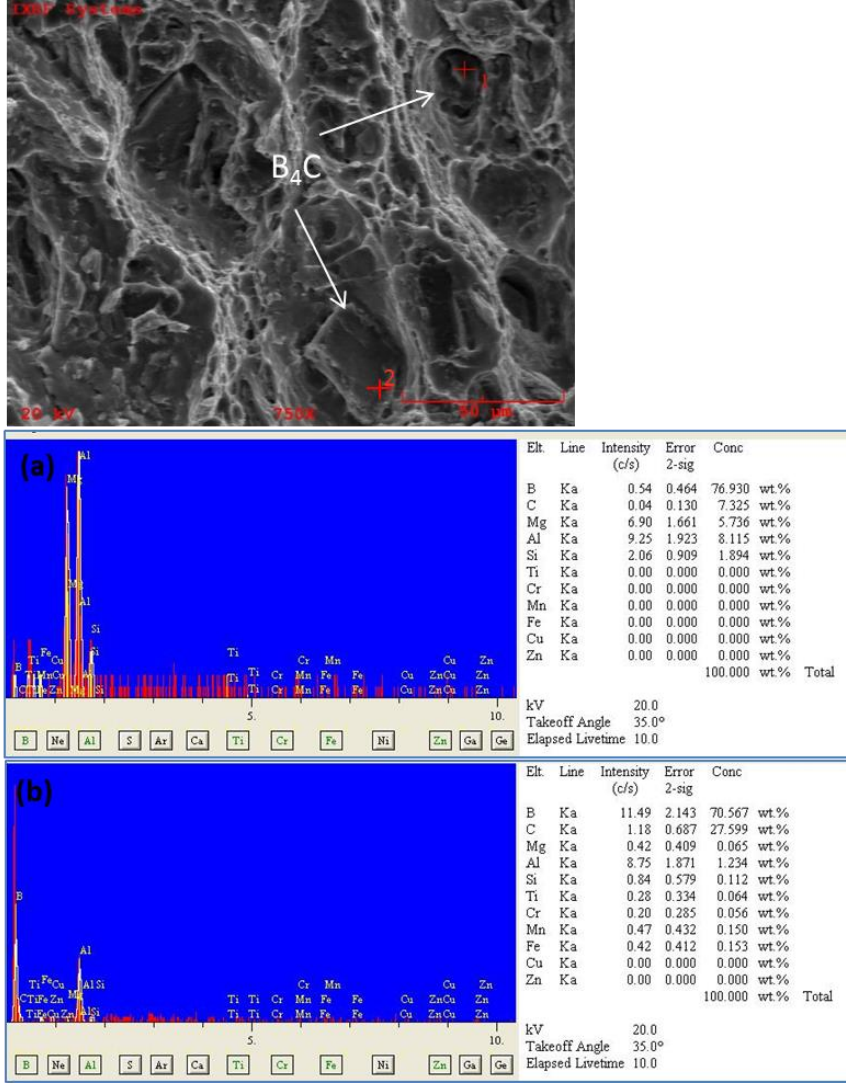
Şekil 7.12. Ekstrüzyon ve haddeleme sonrası ağırlıkça % B_4C oranına göre darbe çentik dayanımları değişim grafiği

7.8.1. Kırık yüzeylerde EDS ve SEM analizleri

Ekstrüzyon sonrası ve haddeleme sonrası çentik darbe testi yapılan numunelerin kırılan yüzeyleri SEM ile incelendi. Ayrıca kırık yüzeylerde B₄C parçacıklarının tespiti için EDS analizi yapıldı. Ekstrüzyon sonrası kırık yüzeyde yapılan EDS analizi Şekil 7.13’de haddeleme sonrası kırık yüzeyde yapılan EDS analizi ise Şekil 7.14’de verilmiştir. Kırık yüzeyde EDS alınan SEM resimlerini incelediğimizde B₄C parçacıklarının matris yapı içerisine gömülü olduğu görülmüştür. Şekil 7.13’de verilen %15 B₄C içeren numunenin kırık yüzeyi üzerinden alınan SEM görüntüsü ve elemental analiz örneklerinde yapı içerisindeki B₄C parçacığı açıkça görülmektedir.

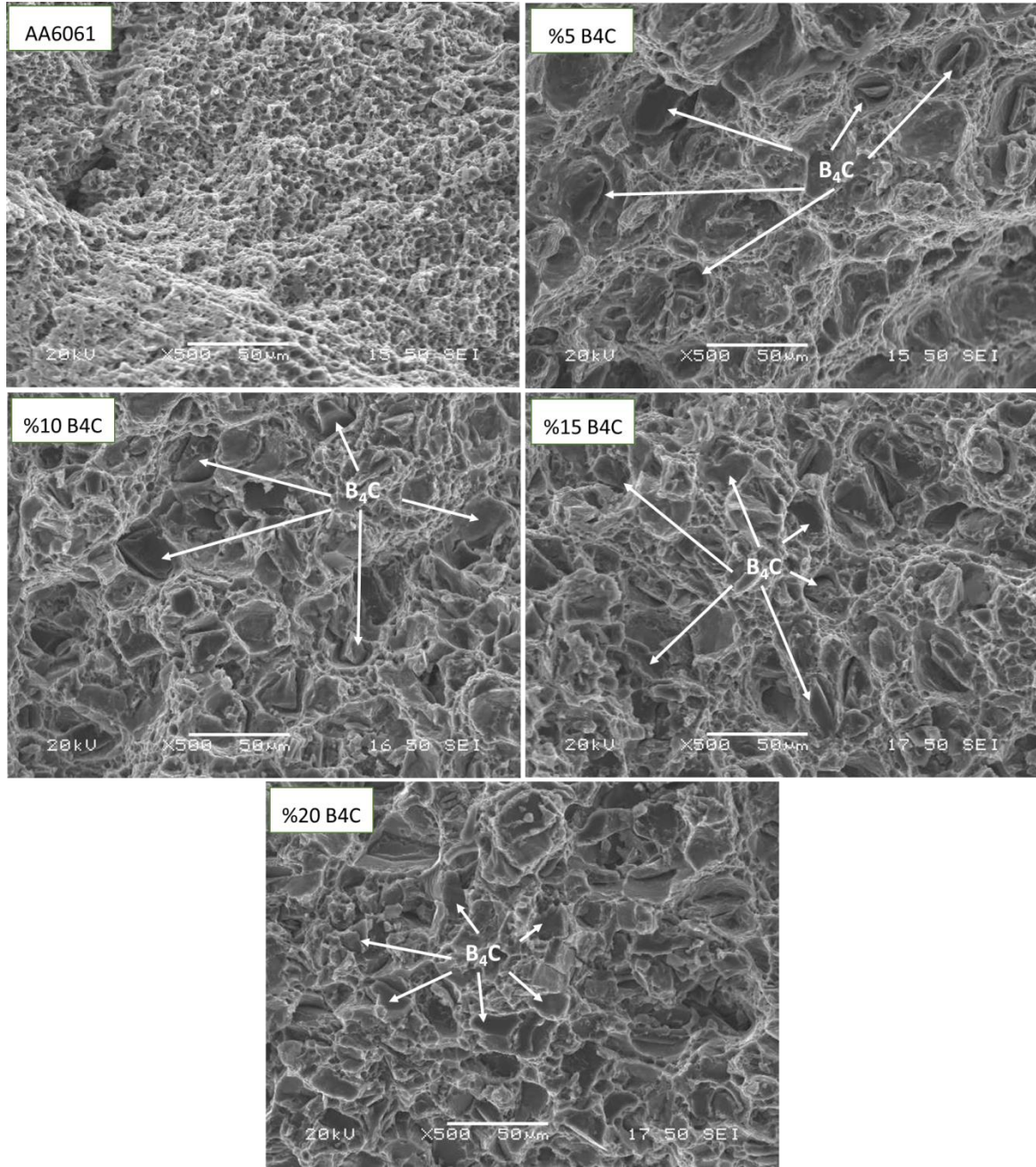


Şekil 7.13. Ekstrüzyon sonrası %15 B₄C kompozit malzemenin SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (a) 1. bölgenin, (b) 2. bölgenin EDS analizi



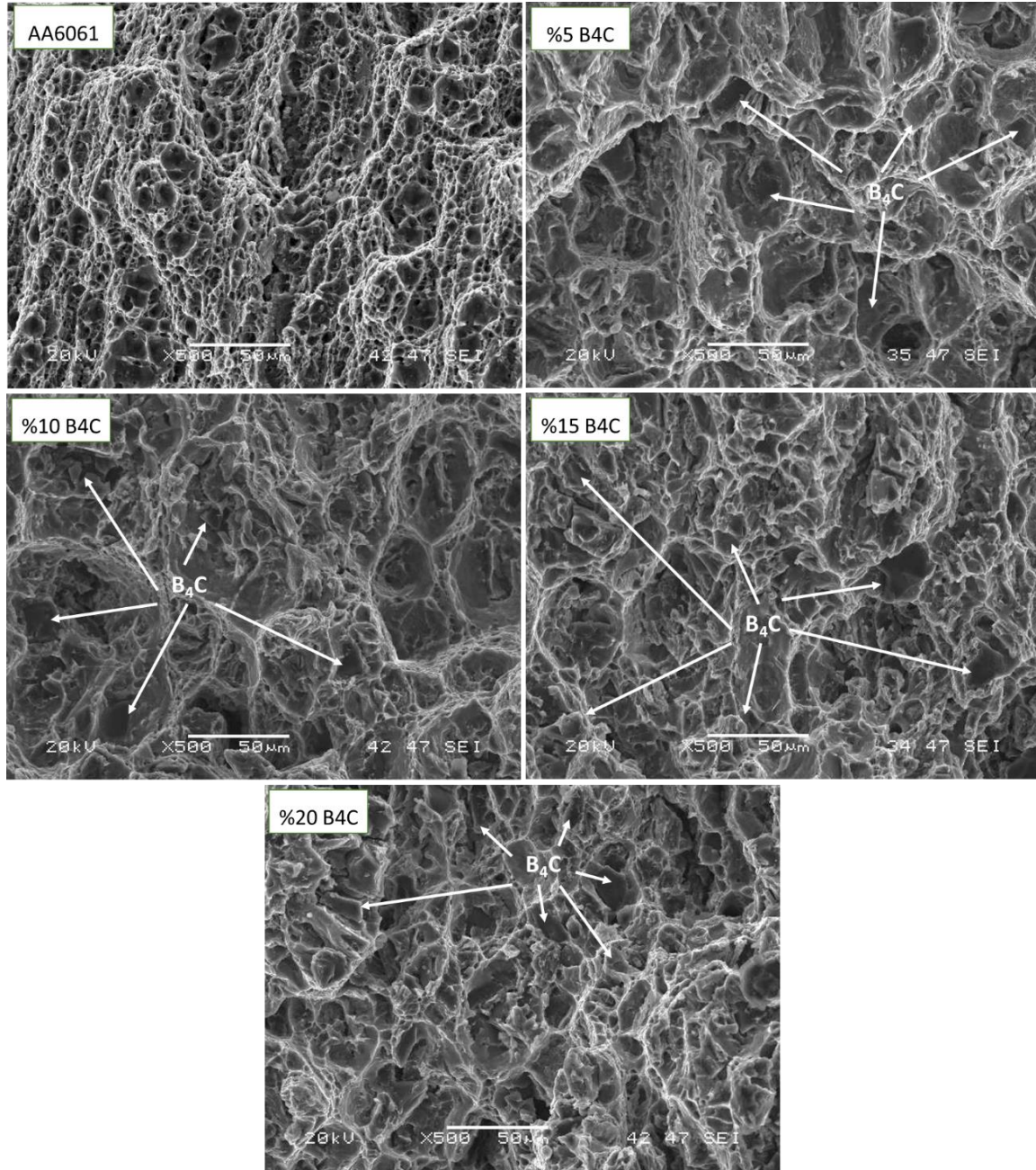
Şekil 7.14. Haddelenme sonrası %15 B₄C kompozit malzemenin SEM resmi ve EDS analizi alınan bölgeler, (a) 1. bölgenin, (b) 2. bölgenin EDS analizi

Genellikle metal matrisli kompozit malzemelerde kopma davranışı matris malzemesi, takviye elemanı ve matris-parçacık ara yüzeyine bağlı olarak üç ana mekanizma ile kontrol edilmektedir. Eğer bölgesel gerilmeler sert matris içerisine takviye edilmiş parçacıkların kırılma gerilmesini aşmış ise kopma esnasında parçacıklarda kırılma durumu söz konusu olmaktadır (1. Mekanizma). Fakat bölgesel gerilmeler ara yüzey bağ dayanımından yüksek ve parçacık kırılma dayanımından düşük ise kırılma esnasında matris ile parçacık arasında ayrışmalar meydana gelmektedir (2. Mekanizma). Son olarak hem ara yüzey hem de takviye elemanı matristen çok güçlü ise kırılma matriste gözenek veya çukur oluşumu ile meydana gelir [146,147].



Resim 7.8. Ekstrüzyon sonrası darbe çentik test numunelerinin kırık yüzey SEM resimleri

Resim 7.8 ve Resim 7.9'a baktığımızda takviyesiz olan AA6061 alaşımında kırılmanın şekil değiştirerek olduğu görülürken ağırlıkça % B₄C miktarının artması ile beraber kırılmaların net şekilli olduğunu dolayısı ile gevrek bir kırılma davranışı oluşmaktadır. Kırık yüzeyde görülen B₄C parçacıklarının matris yapı içerisinde gömülü olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun ana faz ile takviye elemanının birbiri ile uyumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

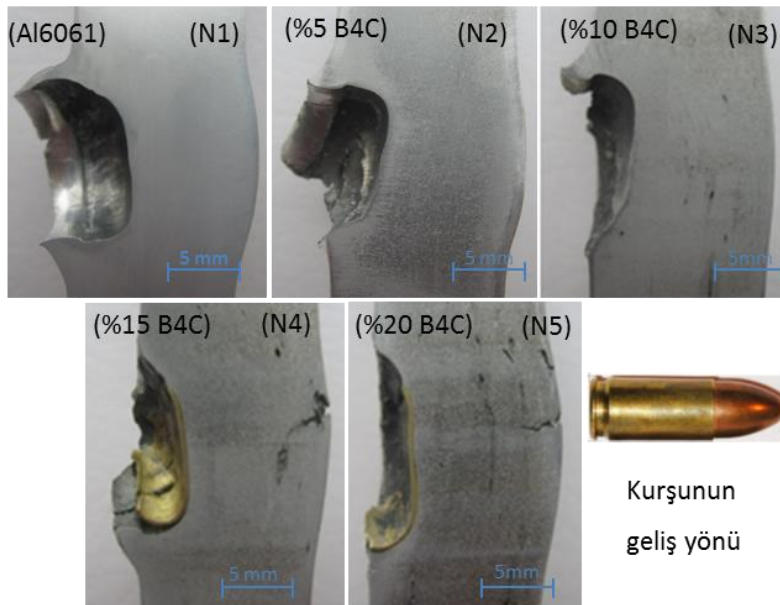


Resim 7.9. Haddelme sonrası darbe çentik test numunelerinin kırık yüzey SEM resimleri

7.9. Balistik Test Sonuçları

7.9.1. 1.Grup malzemelerin balistik test sonrası makro ve mikro incelenmesi

Haddeleme sonrası kalınlığı 12,7 mm'ye düşürülen kompozit levhalara T6 ısıt işlemleri uygulandı. Ağırlıkça % 0-5-10-15 ve 20 oranında B₄C içeren haddelenmiş levhalara MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapıldı. Bu malzemeler 1. grup olarak kodlanmıştır. 1. grup malzemeler sırası ile N1, N2, N3, N4 ve N5 numaralı numunelerdir. 9×19 mm'lik mermilerle atış sonrası malzemelerin kesit görüntüleri Resim 7.10'da verilmiştir. Benzer bir çalışmada Özşahin ve Tolun AA6061 T651 Al alaşımının yüzeyine kaplama yaparak 9×19 mm'lik mermilerle balistik direncini araştırmışlardır. Kaplamalı olan malzemeler kaplamasız olanlara göre daha iyi balistik direnç göstermiştir. Co-Mo-Cr kaplanan AA6061-T651 malzemesi daha az penetrasyon derinliği ve çıkıntısı göstermiştir [148].

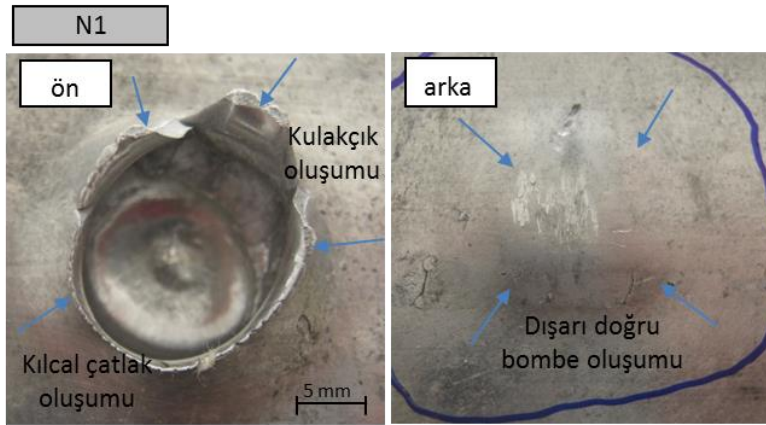


Resim 7.10. Haddelenmiş MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapılan 12,7 mm kalınlığındaki sırası ile N1, N2, N3, N4 ve N5 numaralı numuneler

Merminin tahribatına baktığımızda N1, N2, N3 numaralı numunelerin arka tarafında çatlak oluşmadığı görülürken N4 ve N5 numaralı numunelerde ise çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla N1, N2, N3 numaralı numuneler bu testten başarılı olurken N4 ve N5 numaralı numunelerde başarı alınamamıştır. N1 numaralı numuneyi incelediğimizde merminin oluşturmuş olduğu tahribat (penetrasyon) derinliğinin fazla olması ve merminin temas ettiği yerlerde metal yayılmasının olması sünek bir davranış sergilemesinden

kaynaklandığı düşünülmektedir. N2 numaralı numunede ise tahribat derinliği biraz daha azalmıştır. N3 numaralı numunede penetrasyon derinliği azalmıştır. N4 ve N5 numaralı numunelerde ise metal yayılmasının minimum olması, malzeme içerisinde ve arka tarafında uç çatlakların oluşması malzemelerin gevrek davranışı sergilemesinden kaynaklanmaktadır. Resim 7.10'a baktığımızda merminin hedefe çarpması ile oluşan bası dalgaları hedefin serbest yüzeyinden çeki dalgası oluşturarak darbeye maruz kalan hedefte radyal çatlak hasarları oluşumuna neden olduğu gözlenmiştir. Bu radyal oluşumunun nedeni merminin hedefe çarpması sonucu arka yüzeyde oluşan gerilme dalgalarından kaynaklanmaktadır.

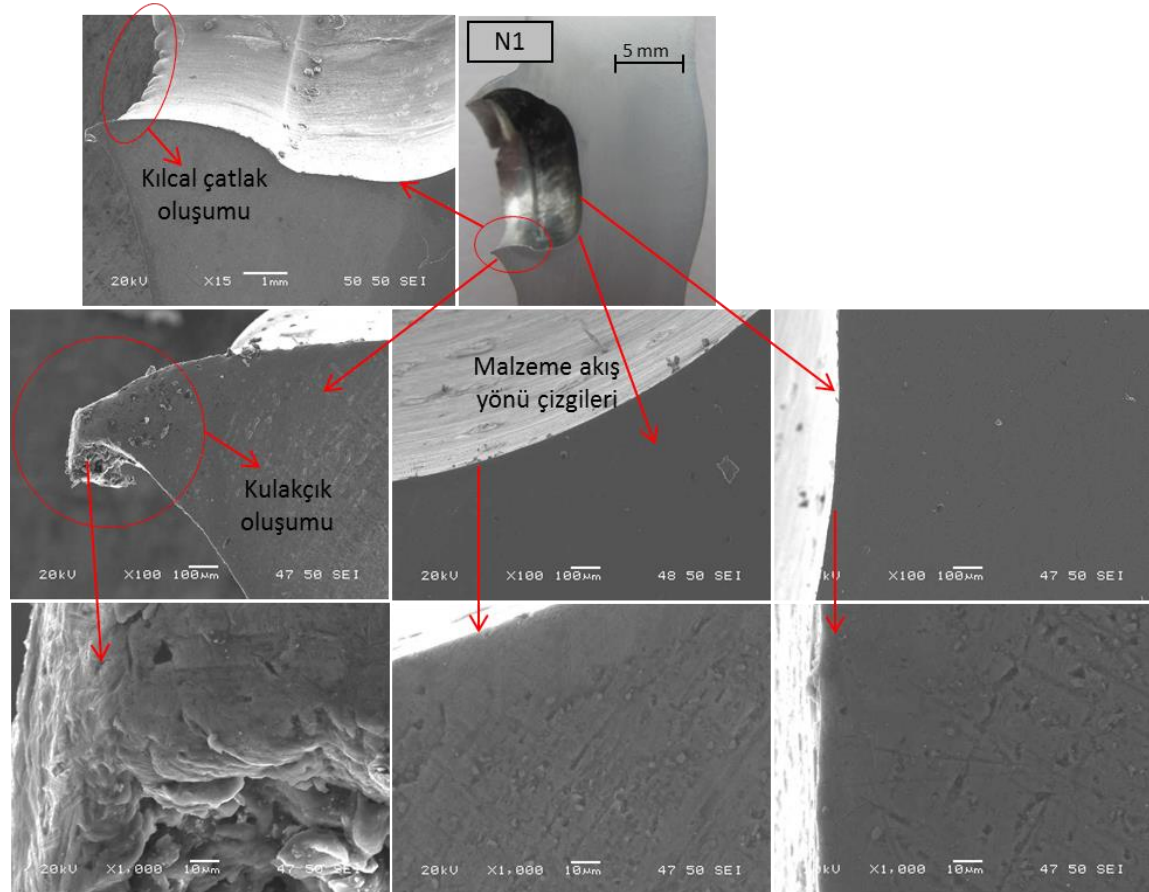
Resim 7.11'de N1 numaralı numunenin balistik atış sonrası ön taraf ve arka taraftan görüntüleri verilmiştir. Merminin ilk temas ettiği ön tarafta darbe etkisi ile beraber malzeme dışı doğru deforme (kulakçık oluşumu) olmuştur. Deforme olan kısımlara baktığımızda çok ince kılcal çatlakların olduğu görülmüştür. Bu durum matrisin sünek yapılı olmasından kaynaklanmaktadır. Malzemenin arka kısmına baktığımızda ise çukurcuk gibi dışı doğru malzemenin çıkıntı yaptığı görülmüştür.



Resim 7.11. Haddelme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapılan N1 nolu AA6061 numunesinin makro resmi

Resim 7.12'de N1 numaralı numunenin balistik test sonrası merminin temas ettiği yerlerden alınan SEM resimleri verilmiştir. SEM resimleri merminin ilk temas ettiği, malzeme içinde yol aldığı ve merminin durduğu yerden olmak üzere üç yerden alınmıştır. Sem resimlerinde kurşunun ilk girdiği yerde meydana gelen kulakçık oluşumu açıkça görülmüştür. Kulakçık oluşumuna baktığımızda sünek bir deformasyon olduğu görülmüştür. Ayrıca çatlakların kılcal olduğu çok büyük olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca merminin malzeme içindeki hareketine baktığımızda deformasyon yönünde malzeme akış çizgileri görülmüştür. Ayrıca malzeme akış yönünde çatlaklara rastlanmadığı tespit edilmiştir. AA6061 alüminyum

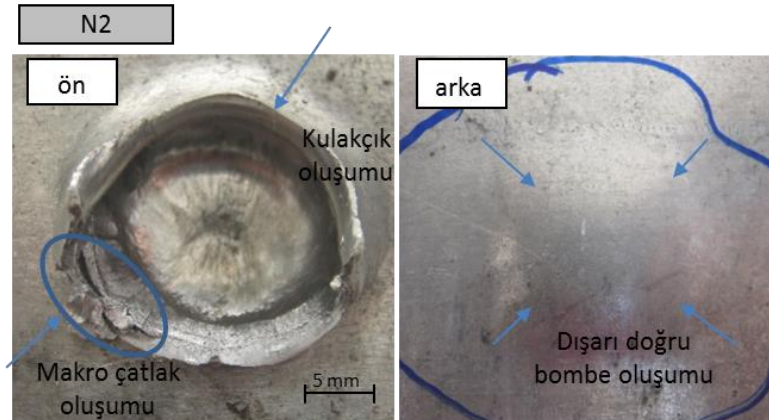
alaşımı sünek bir alüminyum alaşımı olduğu için malzemede genel olarak çok büyük çatlaklara rastlanmamıştır. Merminin durdurulduğu üçüncü kısımda çatlaklara rastlanmamıştır. Merminin darbe enerjisinden kaynaklanan dışa doğru bombe oluşumunu incelediğimizde ise mikro veya makro çatlaklara rastlanmamıştır.



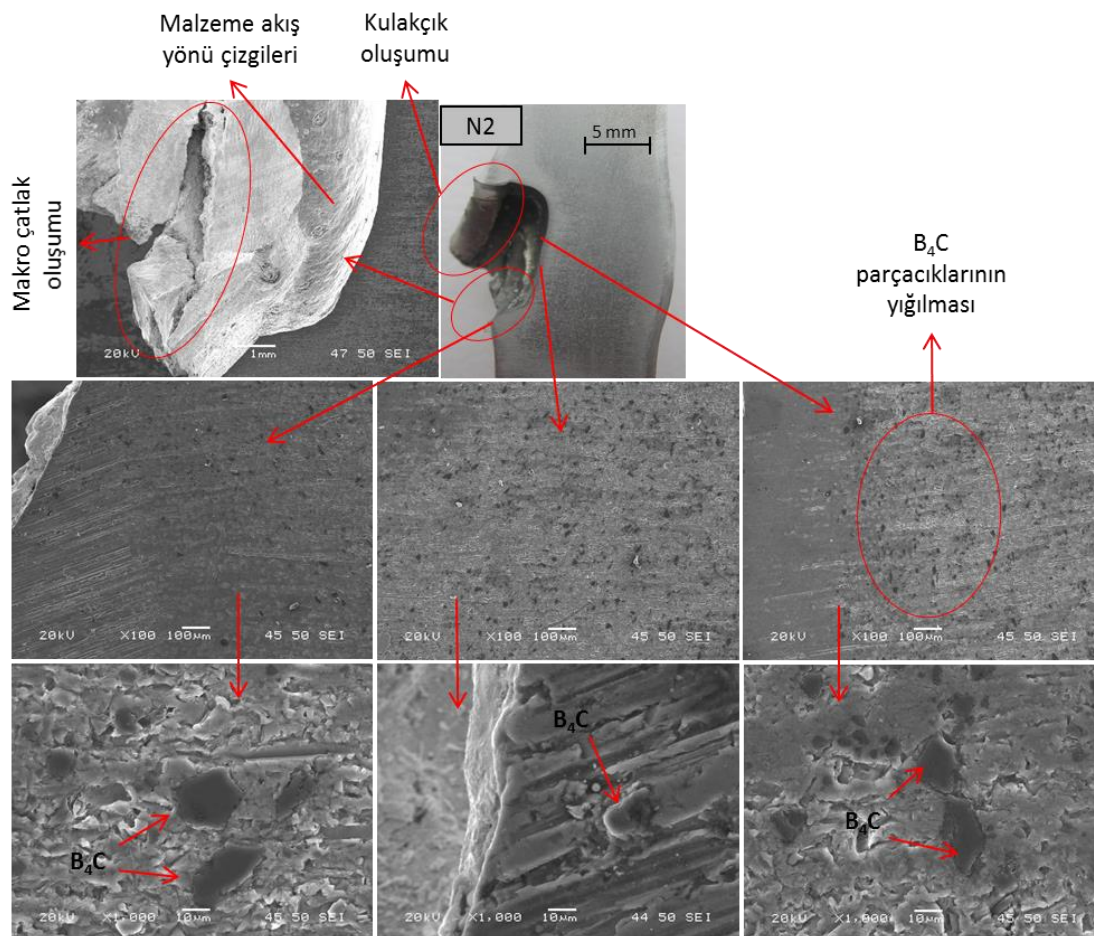
Resim 7.12. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N1 nolu AA6061 numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

Resim 7.13’de N2 numaralı numunenin balistik test sonrasında ön taraf ve arka tarafın makro resimleri verilmiştir. Resimlere baktığımızda merminin temas ettiği ilk yerin delik çapı N1 numaralı numuneye göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum %5 B₄C takviyesinin oluşturmuş olduğu sertlik artışından kaynaklanmaktadır. Merminin temas ettiği ön tarafta kulakçık olduğu gözlemlenirken N1 numaralı numuneden daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çarpmanın etkisi ile numunenin arka tarafında bombenin olduğu gözlemlenirken bombede çatlak oluşmadığı tespit edilmiştir. N2 numaralı numunede oluşan bombenin N1 numaralı numuneden daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durum %5 B₄C takviyesinin merminin hareketine olan zıt yönde oluşturmuş olduğu sürtünme kuvvetinden kaynaklanmıştır.

N2 numaralı numunenin SEM resmine baktığımızda merminin temas ettiği ilk yerde makro çatlakların oluştuğu görülmüştür (Resim 7.14). N1 nolu numune ile kıyasladığımızda penetrasyon derinliğinin ve kulakçık oluşumunun azaldığı tespit edilmiştir. Merminin durdurulduğu yüzeyde ise B4C parçacıklarının yığıldığı tespit edilmiştir.



Resim 7.13. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N2 nolu AA6061/%5 B4C numunesinin makro resmi



Resim 7.14. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N2 nolu AA6061/%5 B₄C numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde SEM resimleri

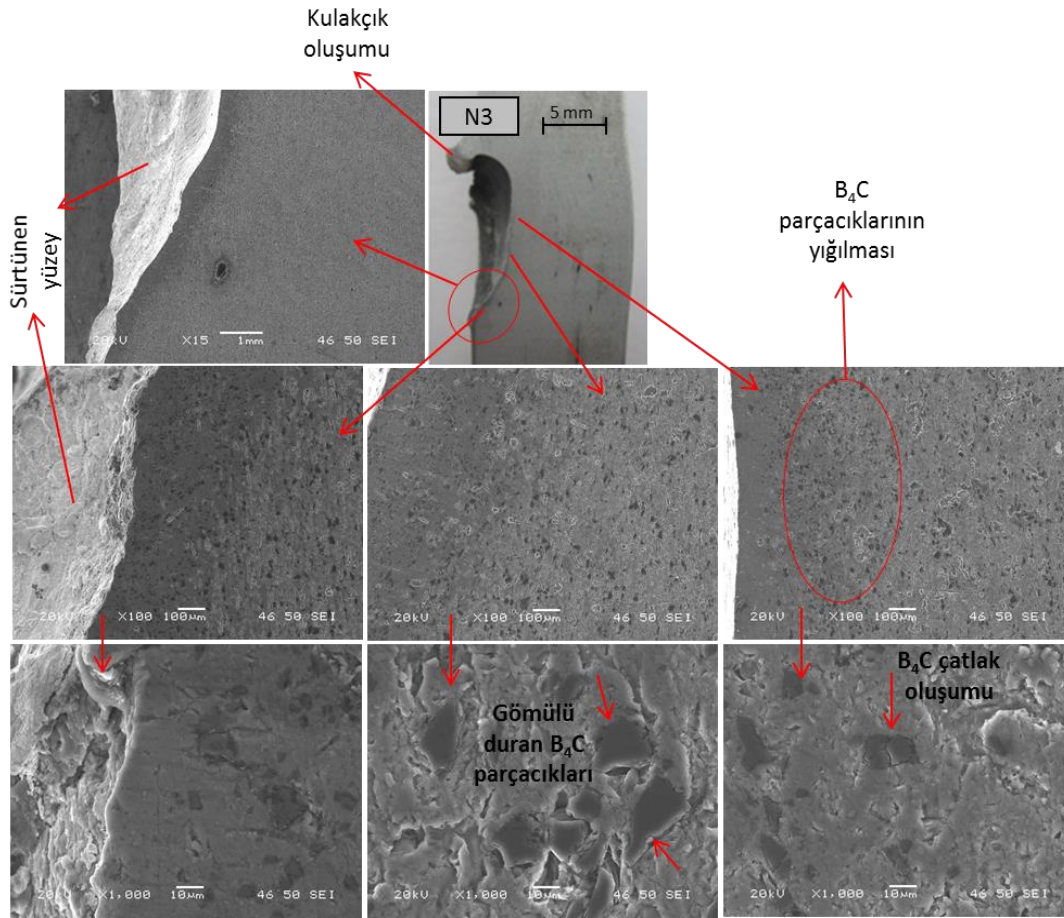
Resim 7.15’de N3 numaralı numunenin ön ve arka kısmını incelediğimizde delik çapının N1 ve N2 numaralı numunelere göre azaldığını aynı zamanda delik çapı ile beraber kulakçık oluşan alanında azaldığı tespit edilmiştir. Ön tarafta merminin ilk temas ettiği yerde makro çatlak oluştuğu görülmüştür. Kurşunun arka tarafta oluşturmuş olduğu bombenin azaldığı görülürken arka kısımda çatlak oluşmadığı tespit edilmiştir.



Resim 7.15. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N3 nolu AA6061/%10 B₄C numunesinin makro resmi

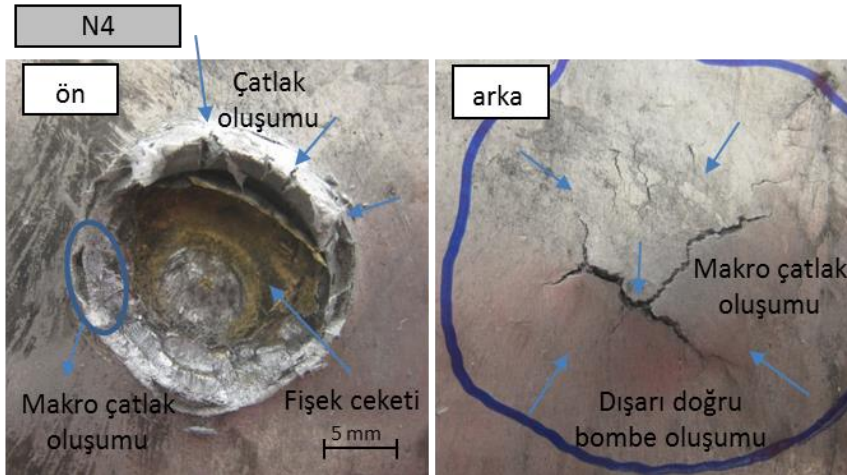
Resim 7.16’de N3 numaralı numunenin SEM resimlerine baktığımızda kurşunun ilk temas ettiği yerde kurşunun sürtünmeden dolayı malzemenin yüzeyinde yüzey akış çizgileri yerine kopan yüzey görünümü oluşmuştur. Bu durumun ağırlıkça artan % B₄C miktarının kurşunun ilerlemesine karşı oluşturmuş olduğu sürtünmeden dolayı kaynaklanmaktadır. Ayrıca artan takviye miktarına bağlı olarak malzemenin sünekliğinde düşüş yaşanırken sertlikte ise artış yaşanmaktadır. Dolayısı ile takviye miktarına bağlı olarak merminin malzemede oluşturmuş olduğu tahribat malzemenin süneklikten gevrekliğe geçtiğini göstermektedir (Resim 7.16).

Resim 7.16’de kurşunun ilk temas ettiği yerde kırılan yüzeyin gevrek bir davranış sergilediği görülmüştür. Ayrıca bazı B₄C parçacıklarında çatlak oluşumu olduğu görülmüştür. Kurşunun hareket ettiği yüzeyde bazı boşluklara rastlanmıştır. Bu durum kurşun ile malzeme arasında gerçekleşen sürtünme kuvvetinden dolayı yüzeyde bulunan B₄C parçacıklarının yüzeyden ayrılması ile kaynaklandığı düşünülmektedir.

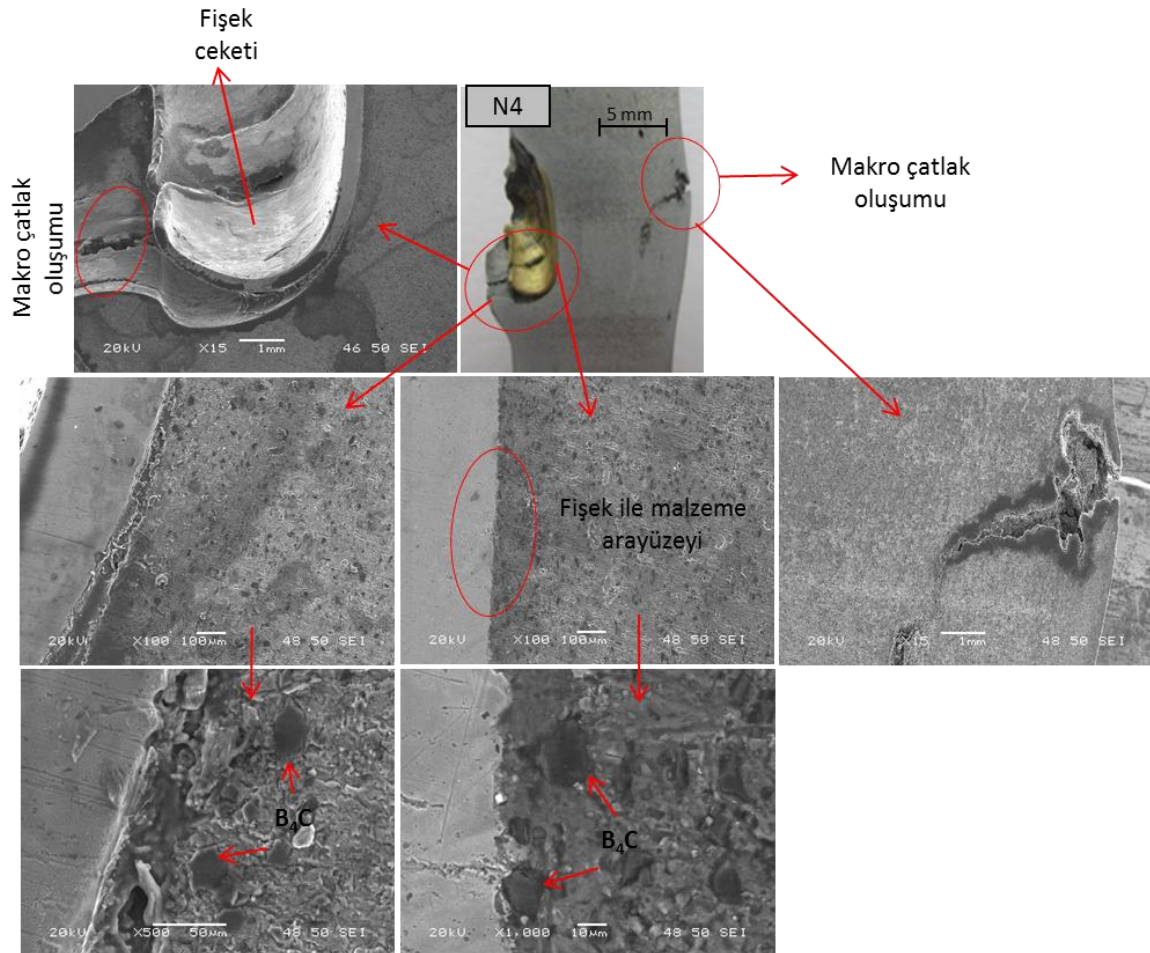


Resim 7.16. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N3 nolu AA6061/%10 B₄C numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

Resim 7.17’de N4 numaralı numuneye baktığımızda mermi ceketinin malzemenin içine saplanıp kaldığı görülmektedir. Bu durum artan takviye miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan takviye miktarı ile beraber gevrekliğin artması ile N4 numaralı malzemede kulakçık oluşumu azalmıştır. Kurşunun temas ettiği ilk yüzeyde makro çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca temas eden yüzeylerde parçacık kopmalarına rastlanmıştır. Numunenin arka tarafını incelediğimizde ise aşırı gevreklikten dolayı makro çatlaklar oluştuğu görülmüştür. Bu durum balistik koruyucu malzemelerde istenmeyen bir durum olduğundan N4 numaralı numunelerin balistik performansının iyi olmadığı kanaatine varılmıştır. Resim 7.17’de merminin giriş yaptığı yerde, malzemenin içerisinde ve bombenin oluştuğu yerde çatlak oluşumları görülmüştür. N4 numaralı malzemenin penetrasyon derinliğinin çok olmaması ile malzemenin dış arka kısmında meydana gelen çatlaklar B₄C parçacıklarının malzemeyi gevrekleştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Resim 7.18’de mermi ceketi ile malzeme ara yüzeyinde B₄C parçacıklarının cekete saplandığı görülmüştür. Bu durumun sert olan B₄C parçacıklarının kurşunun ilerlemesini engellediği düşünülmektedir.



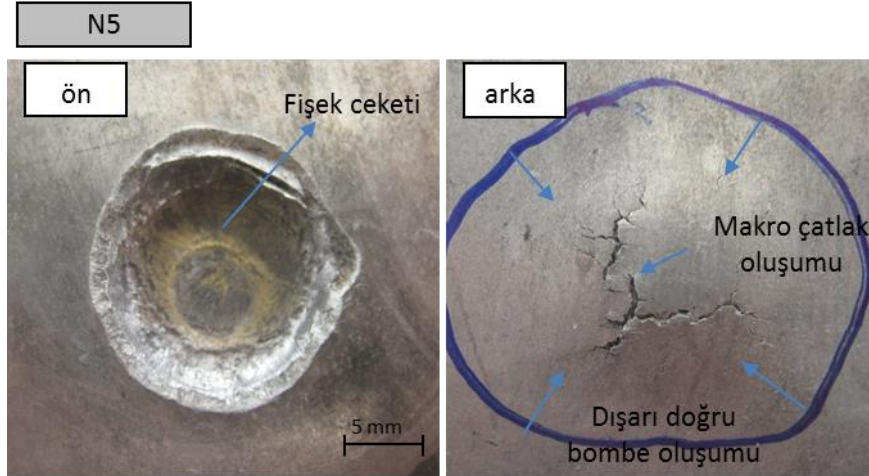
Resim 7.17. Haddelenme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapılan N4 nolu AA6061/%15 B₄C numunesinin makro resmi



Resim 7.18. Haddelenme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapılan N4 nolu AA6061/%15 B₄C numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

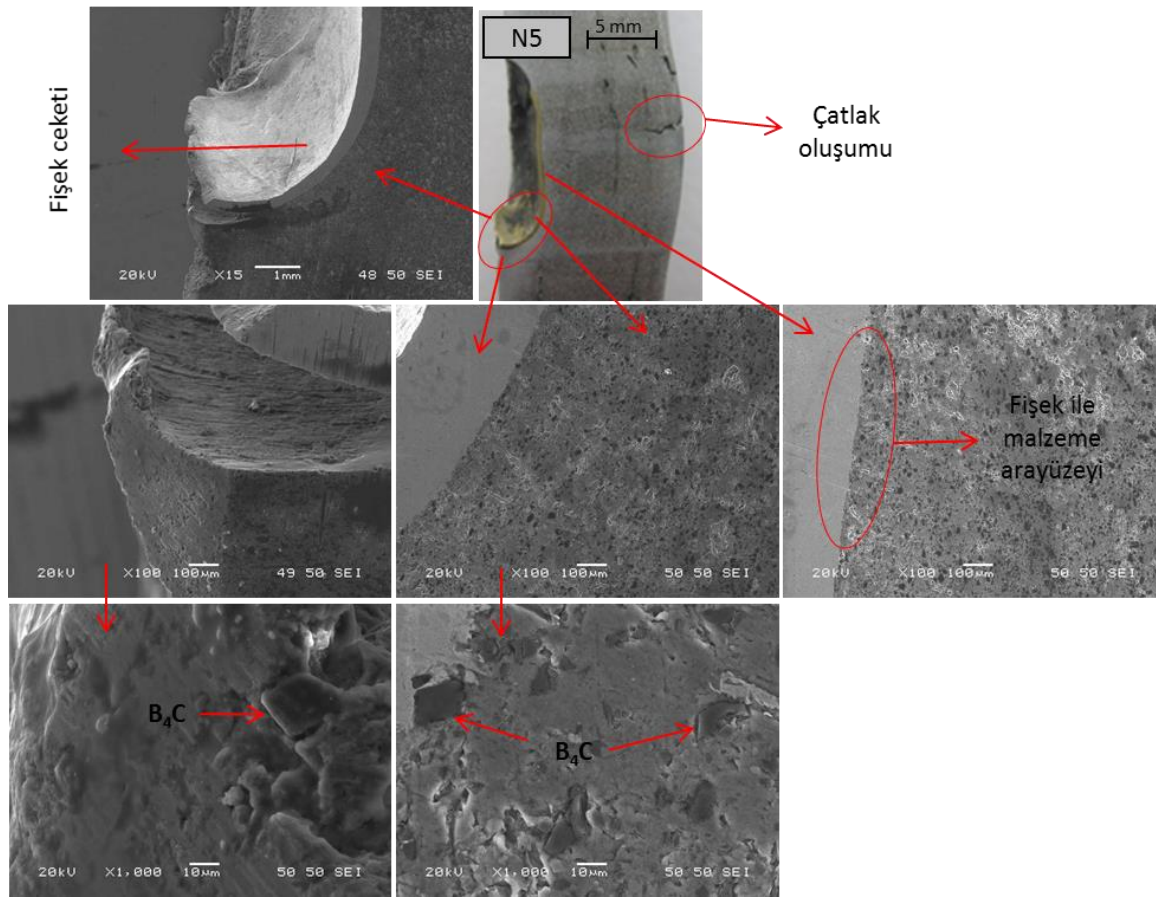
N5 numaralı numuneyi incelediğimizde atış sonrası N4 numaralı numunede olduğu gibi mermi ceketinin malzemeye saplanıp kaldığı görülmüştür. Merminin giriş yaptığı kısımlarda

kulak oluşumu gözükmezken deliğin etrafında metalin aşındığı ve koptuğu görülmüştür. Bu durum artan takviye miktarı ile malzemede meydana gelen gevreklikten kaynaklandığı düşünülmektedir. Sertliğin artması ve dolayısı ile gevrekliğin artmasına bağlı olarak malzemenin arka kısmında çatlak oluşumu meydana gelmiştir. Malzemenin arkasında meydana gelen bu çatlak oluşumundan dolayı malzemenin balistik performansı iyi sonuç vermemiştir (Resim 7.19).



Resim 7.19. Haddeleme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm'lik mermi atışı yapılan N5 nolu AA6061/%20 B₄C numunesinin makro resmi

Resim 7.20'de N5 numaralı numunede merminin isabet ettiği yerden arakesit görüntüsü ve arakesitten alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Ara kesiti incelediğimizde merminin oluşturduğu darbe etkisinden dolayı malzemenin iç kısmında meydana gelen gerilim yığılmaları çatlak oluşumlarına sebebiyet vermiştir. Benzer çatlak oluşumları malzemenin dışında da oluşmuştur. Resim 7.20'de mermi ceketi ile malzeme arasında görülen ara yüzeye baktığımızda B₄C parçacıklarının yığıldığı görülmüştür. Ayrıca mermi ceketi ile malzeme ara yüzeyinde olan B₄C parçacıklarının mermi ceketine saplandığı görülmüştür. Penetrasyon derinliğinin artan takviye miktarına bağlı olarak düşmesinin sebeplerinden bir tanesi B₄C parçacıklarının kurşun ceketine karşı bir sürtünme kuvveti oluşturmasından ayrıca malzemenin sertliğini artırmasından kaynaklanmaktadır.

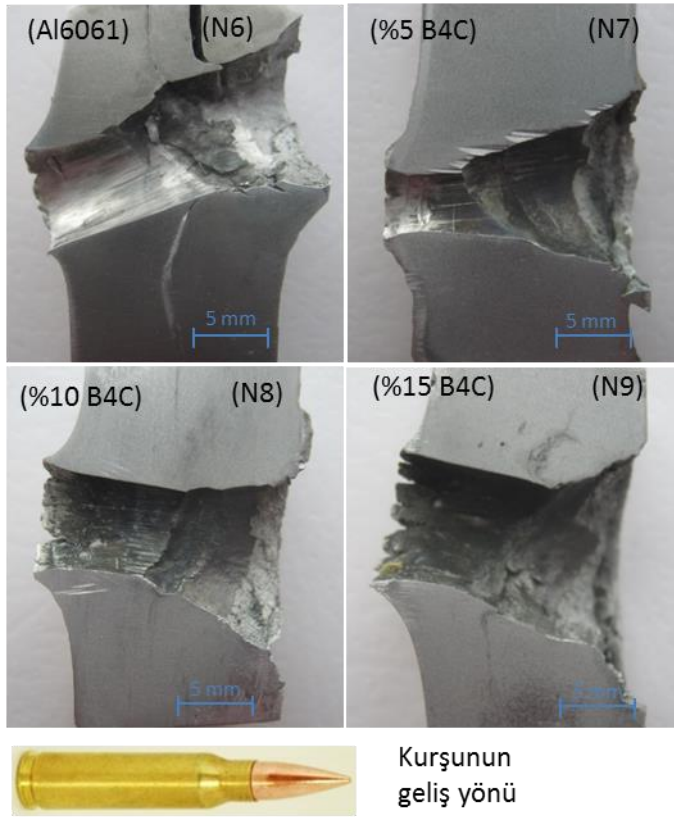


Resim 7.20. Haddeme sonrası MP5 tüfeği ile 9×19 mm’lik mermi atışı yapılan N5 nolu AA6061/%20 B₄C numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

7.9.2. 2.Grup malzemelerin balistik test sonrası makro ve mikro incelenmesi

Haddeme sonrası kalınlığı 12,7 mm olan balistik test numunelerine G3 tüfeği ile 7,62 mm’lik mermiler kullanılarak atış yapılmıştır (Resim 7.21). Benzer bir çalışmada Holmen ve ark. AA6070 Al alaşımının ısıtma işlemi sonrası 7,62 mm’lik balistik direncini ölçmüşlerdir [149]. Yine başka bir çalışmada Flores-Johnson ve ark. 7,62 mm’lik mermilerle çelik ve Al tabakalı malzemelerin balistik direncini ölçmüşlerdir [150]. N6, N7, N8 ve N9 numaralı numunelerde merminin oluşturduğu tahribata baktığımızda merminin bir taraftan girip diğer taraftan çıktığı görülmektedir. Dolayısı ile N6, N7, N8 ve N9 numaralı numuneler bu testten başarılı sonuç alamamıştır. N6 numaralı numuneyi incelediğimizde merminin ilk girdiği yerde ve çıkış kısmında kulakçık oluşumu görülmüştür. Ayrıca merminin çıkış yaptığı delik ilk giriş yaptığı delikten daha büyük olduğu görülmüştür. N7 numaralı numunede giriş kısmında kulakçık oluşumu gözlemlenirken çıkış kısmındaki kulakçık oluşumu N6 numaralı numuneye göre daha azalmıştır. N8 ve N9 numunelerde ise giriş kısmında kulakçık

oluşurken oluşan kulakçıklarda radyal çatlaklar görülmüştür. Ayrıca merminin çıkış kısımlarına baktığımızda kulakçık oluşumu neredeyse hiç oluşmamakla beraber çıkış kısımlarında malzemenin gevrek olmasından dolayı kopmalar aşınmalar meydana gelmiştir. Bu durum artan B₄C oranından kaynaklanmaktadır.

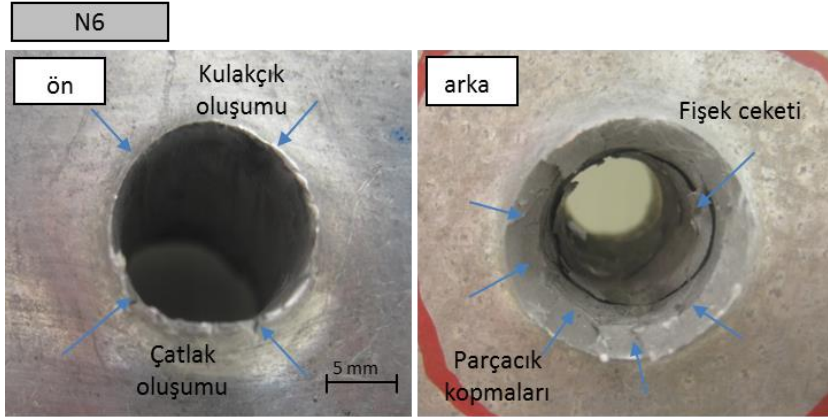


Resim 7.21. Haddelme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan 12,7 mm kalınlığındaki sırası ile N6, N7, N8, ve N9 numaralı numuneler

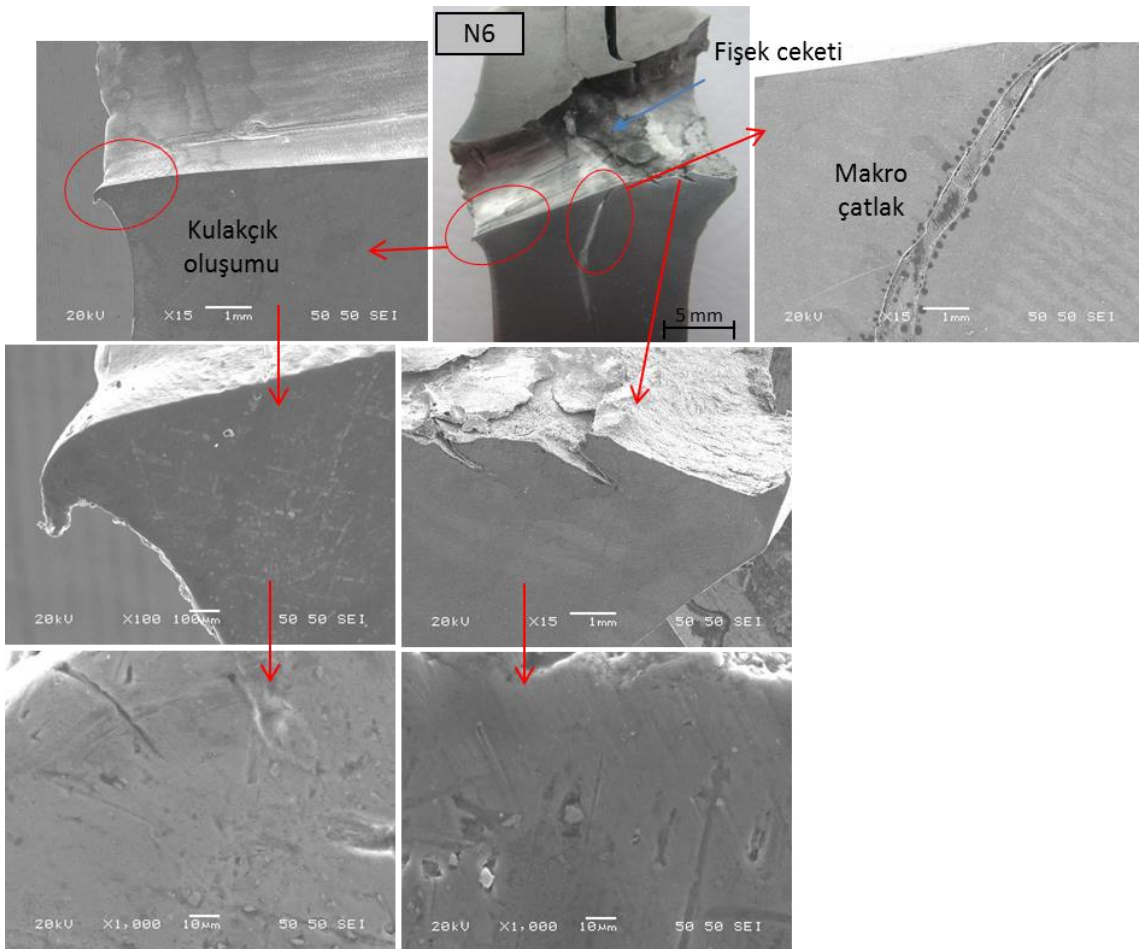
Resim 7.22’de N6 numaralı numunenin 7.62 mm’lik atış sonrası ön ve arka taraftan makro resimleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere mermi bir yerden girip diğer taraftan çıkmıştır. Dolayısı ile N6 numaralı numune bu testten başarısız sonuç almıştır. Takviyesiz AA6061 Al alaşımı sünek olduğundan mermi ilk girdiği yerde doğrudan delik açmıştır. Merminin girdiği yerin çevresinde çok ince kılcal çatlak oluştuğu görülmüştür. Mermi girdiği yerden çıkarken sürtünmeden dolayı ceketini deliğin içerisinde bırakmıştır. Merminin çıktığı delikte kısmen kopmalar meydana gelmiştir.

Resim 7.23’de N6 numaralı numunelerin balistik test sonrası merminin girip çıktığı ara yüzeyden SEM resimleri alınmıştır. Merminin giriş kısmında kulakçık oluşurken merminin hareket yönünde ise malzeme akış çizgileri görülmektedir. Merminin oluşturduğu termal

etkiden dolayı malzemenin merkezinde boyuna çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca merminin oluşturmuş olduğu kinetik enerjiden dolayı malzeme yığılması meydana gelerek merminin çıkmış olduğu kısımda parçacık kopmalarına ve makro çatlak oluşumlarına rastlanmıştır.



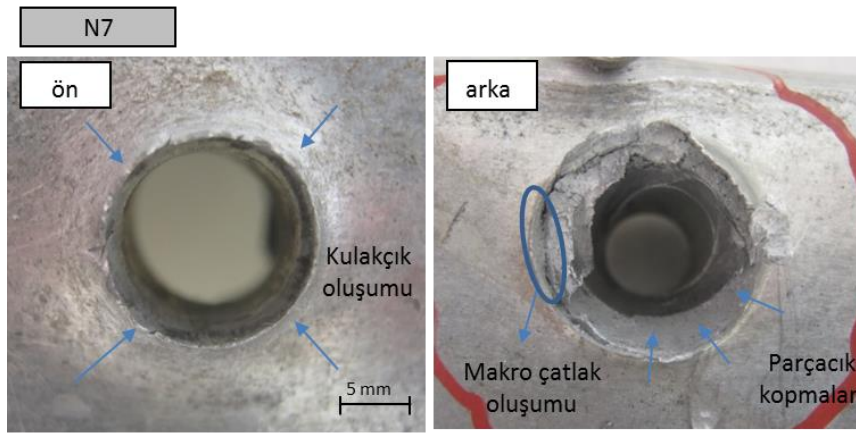
Resim 7.22. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N6 nolu AA6061 numunesinin makro resmi



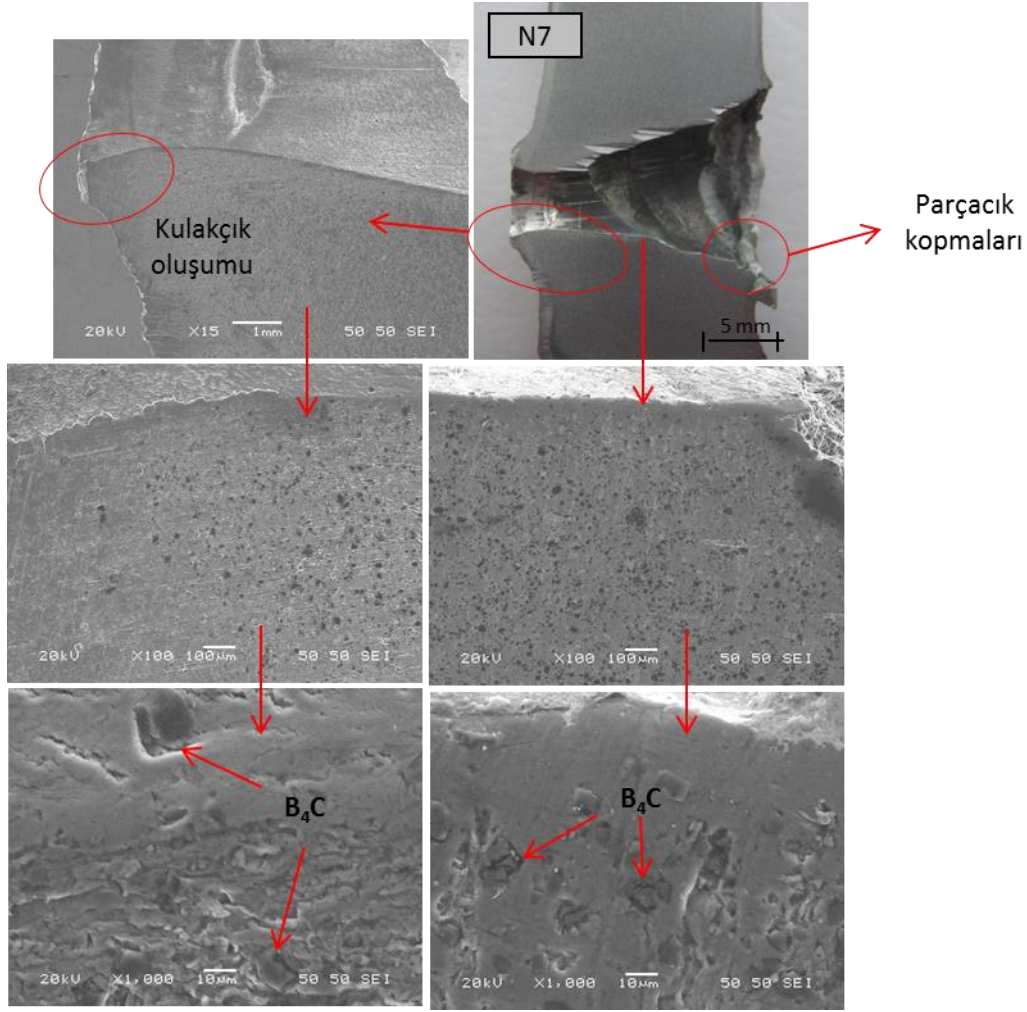
Resim 7.23. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N6 nolu AA6061 numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

Resim 7.24’de N7 numaralı numunenin balistik test sonrası önden ve arkadan görünümüleri verilmiştir. Mermi ön kısımdan girip arka taraftan çıkmıştır. Merminin ilk girdiği yerde çok az miktarlarda kılcal çatlak oluştuğu tespit edilmiştir. Merminin çıktığı kısımda ise merminin oluşturmuş olduğu gerilim yığılmasından dolayı kopmaların ve makro çatlakların meydana geldiği görülmüştür.

Resim 7.25’de yer alan SEM resimlerine baktığımızda merminin ilk girdiği yüzey net şekilli iken orta kısımda ve bitiş kısımlarında pürüzlü ve kopan bir yüzey görülmektedir. % 5 B₄C takviye miktarı ile çıkış kısmında meydana gelen çatlak oluşumları artmıştır.

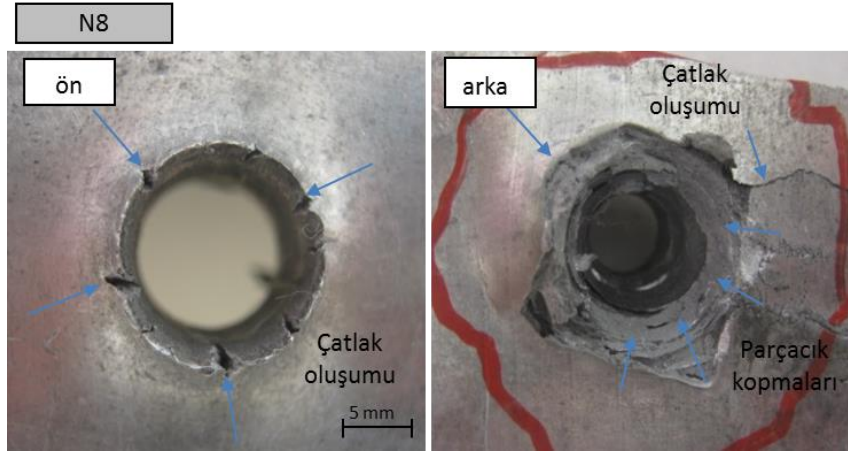


Resim 7.24. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N7 nolu AA6061/% 5 B₄C numunesinin makro resmi

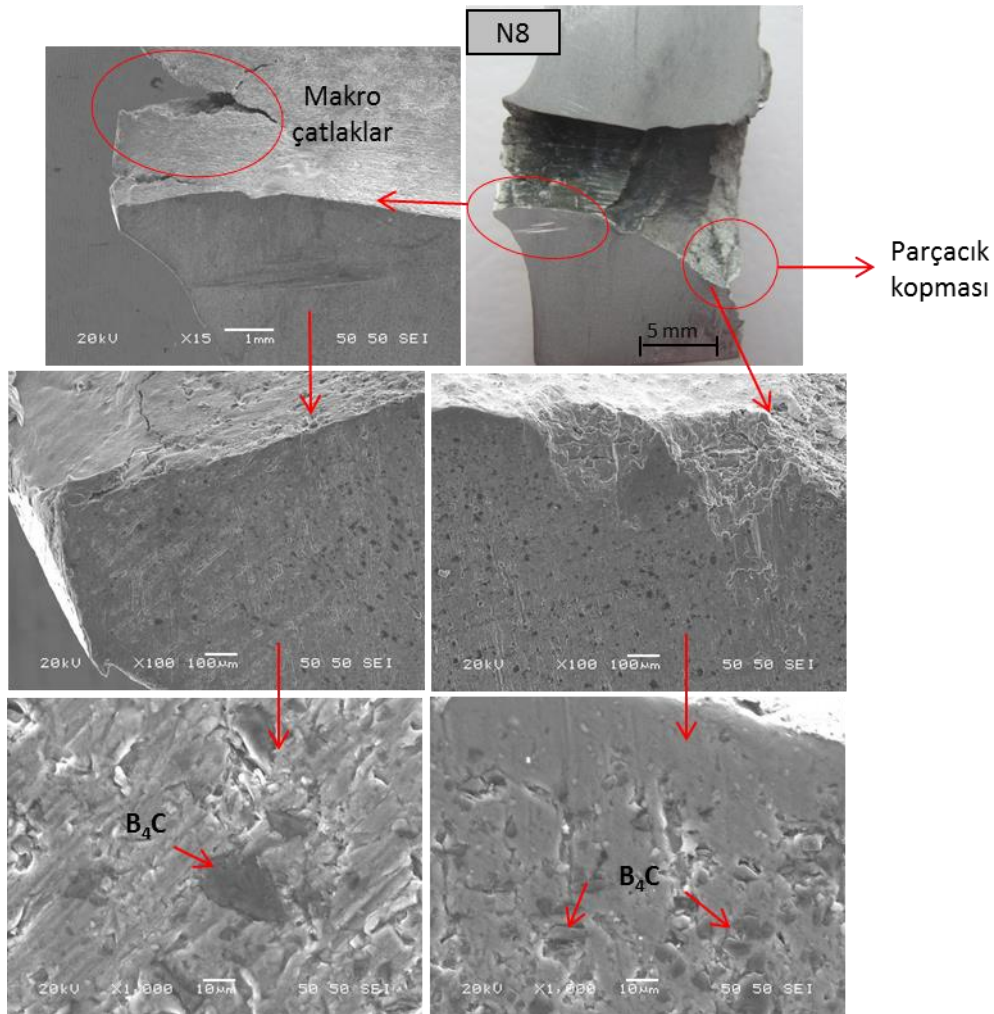


Resim 7.25. Haddeleme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N7 nolu AA6061/%5 B₄C numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

Resim 7.26'da N8 numaralı numunede bir taraftan giren mermi diğer taraftan çıkmıştır. Bu durum malzemenin gevrekleşmesine sebebiyet vermektedir. Dolayısı ile merminin ilk temas ettiği yüzeyde N6 ve N7 numaralı numunelere göre daha net ve fazla sayıda olan makro çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda malzemenin gevrekliğinin artması sebebi ile merminin çıkmış olduğu kısımda radyal çatlak oluşumları ve kopmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Resim 7.27'de yer alan SEM resimlerine baktığımızda merminin ilk girmiş olduğu yerde makro çatlak oluşumları açıkça görülmektedir. Ayrıca merminin hareket ettiği yol üzerinde malzemenin daha pürüzlü olduğu görülmüştür. Bu durum artan B₄C miktarının merminin hareket ettiği yüzeyde sürtünme oluşturmamasından kaynaklanmaktadır.



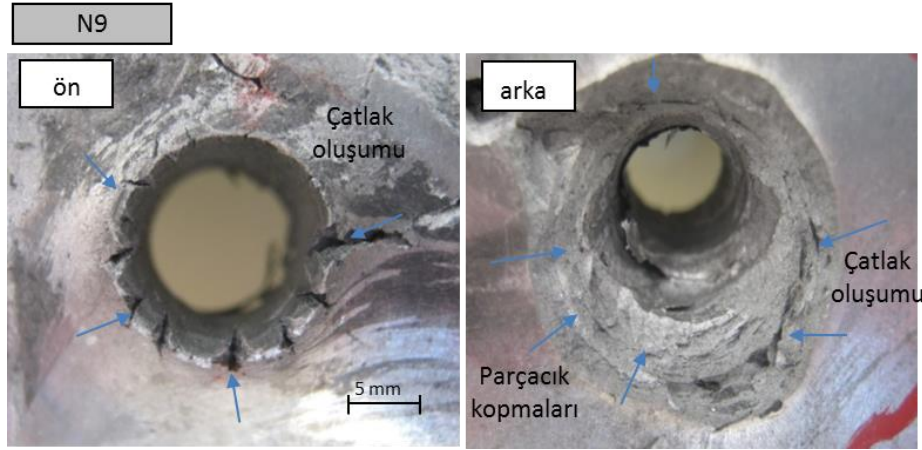
Resim 7.26. Haddelerme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N8 nolu AA6061/% 10 B₄C numunesinin makro resmi



Resim 7.27. Haddelerme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N8 nolu AA6061/%10 B₄C numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

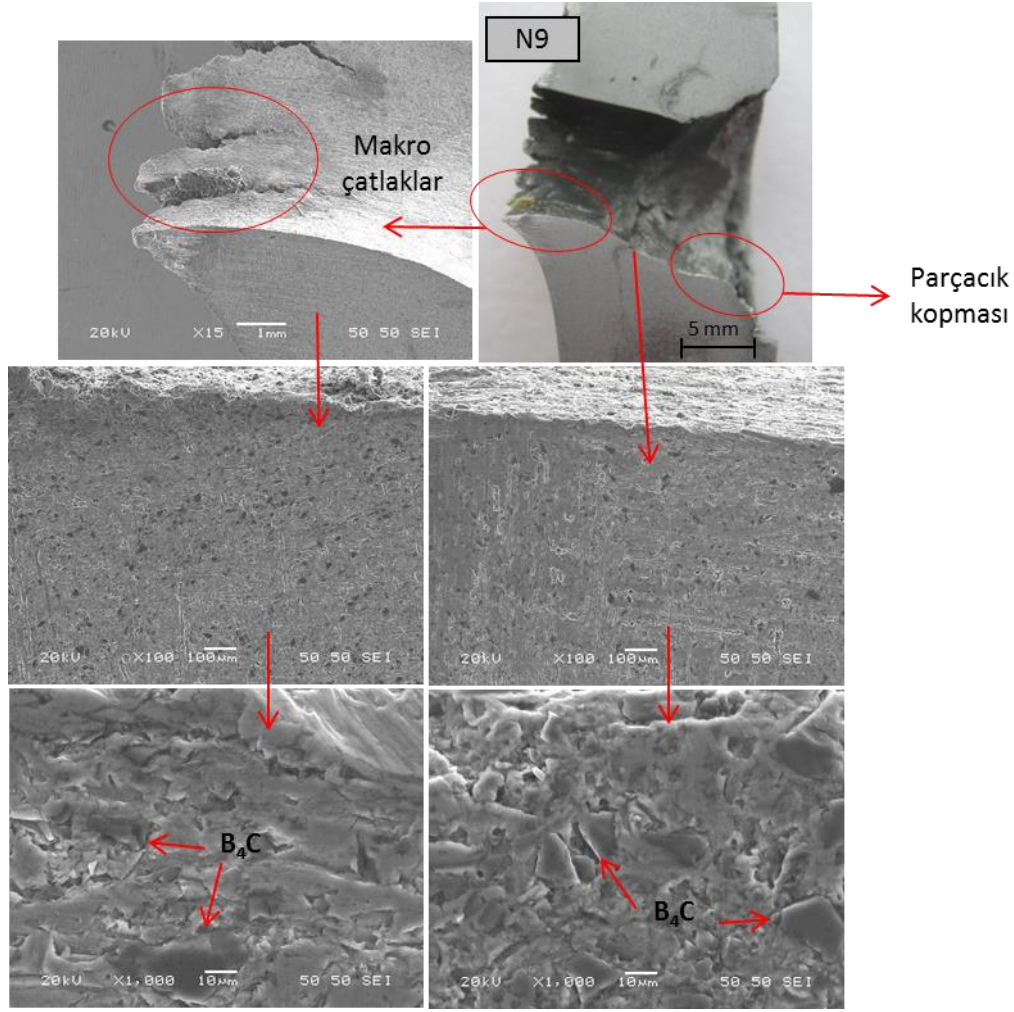
N6,N7,N8 nolu numunelerde olduğu gibi N9 numaralı numunede de mermi bir yerden girmiş ve diğer taraftan çıkmıştır (Resim 7.29). Ağırlıkça % 15 B₄C takviyeli olan kompozit

malzemenin takviye miktarı N6,N7 ve N8 numaralı numuneden çok olduğu için bu malzemelere göre daha gevrek bir özellik sergilemiştir. Merminin ilk girdiği yere bakacak olursak diğer numunelerde meydana gelen çatlak miktarından daha büyük ve fazla oranda çatlak oluştuğu söylenebilir. Yine aynı şekilde merminin çıktığı yerde de diğer numunelere göre makro çatlak oluşumu ve kopmalar meydana geldiği görülmüştür. Çıkışta meydana gelen kopmalar diğer numunelere göre daha fazla olmuştur.



Resim 7.28. Haddemele sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N9 nolu AA6061/% 15 B₄C numunesinin makro resmi

Resim 7.29’de N9 numaralı numunenin ara kesitinden alınan SEM resimlerinde merminin giriş kısmındaki makro çatlaklar daha net görülebilmektedir. Merminin malzeme içerisindeki almış aldığı yola bakacak olursak merminin malzeme yüzeyini aşındırdığını çıkış yerinden de parçacık kopardığı açıkça görülebilmektedir.

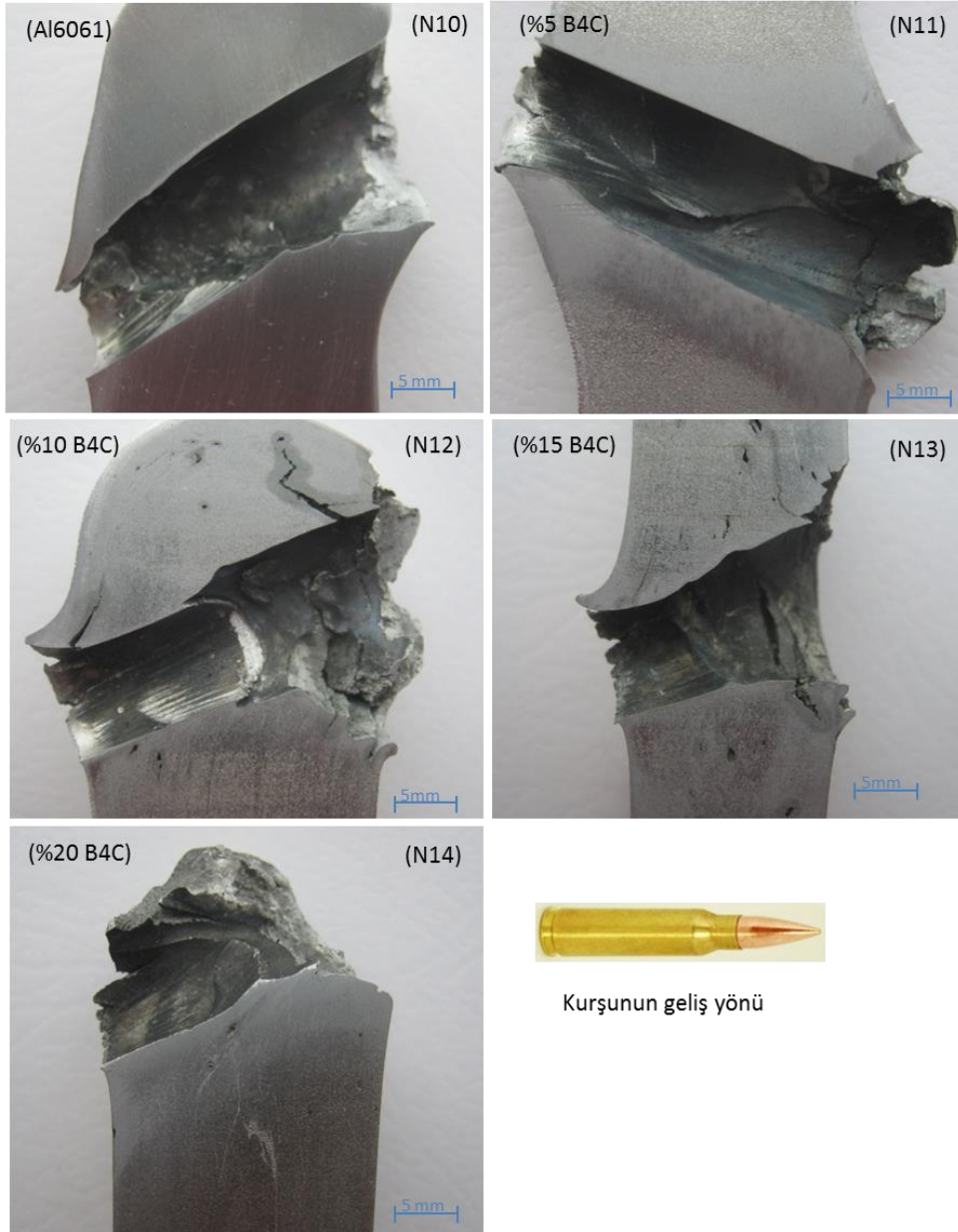


Resim 7.29. Haddelme sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N9 nolu AA6061/%15 B₄C numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

7.9.3. 3.Grup malzemelerin balistik test sonrası makro ve mikro incelenmesi

Kompozit malzemelerin üretiminde ekstrüzyon sonrası da malzemelerin balistik özelliklerine bakılmıştır. Ekstrüzyon sonrası takviye miktarı yüksek olup yüzeyi pürüzlü çıkan kompozit malzemeler yüzeyinden talaş kaldırılarak balistik teste hazır hale getirilmişlerdir. Hazırlanan ekstrüzyon ürünü kompozit levhalar 7,62×51 mm’lik mermi ile atış yapılarak balistik performansları araştırılmıştır. Balistik test sonrası makro ve mikro olarak analiz edilmiştir. Ekstrüzyon sonrası kalınlıkları 20 ile 25,4 mm arasında değişen kompozit levhalar 85×120 ebatlarında kesilerek balistik teste hazır hale getirilmiştir. Bu kompozit levhalar 3. grup malzemelerdir. Bu 3.grup malzemelerin (N10, N11, N12, N13 ve N14 numuneler) 7,62×51 mm’lik mermi ile atış sonrası kesit görünüşleri Resim 7.30’da verilmiştir. Resimde görüldüğü üzere her levha için mermi ön taraftan girip arka taraftan

çıkıştır. Dolayısı ile bu numuneler 7,62×51 mm'lik mermi ile atış sonrası balistik testten başarılı sonuç alamamıştır.

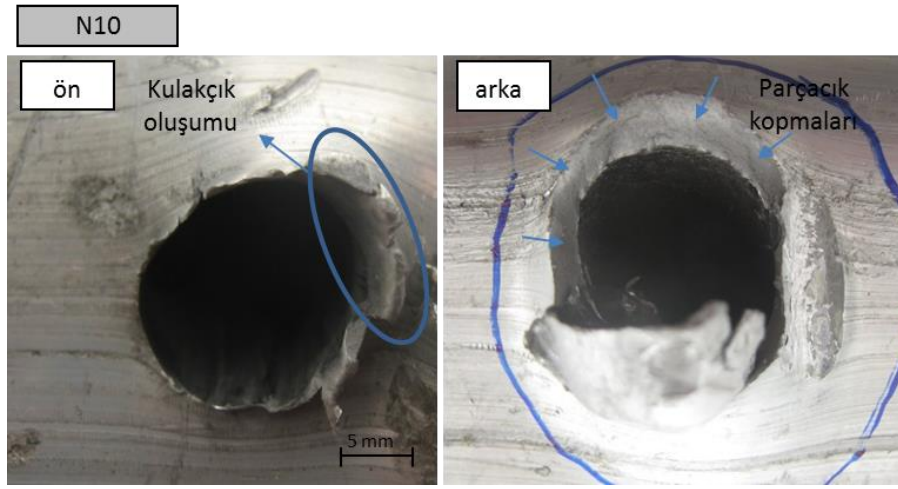


Resim 7.30. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan sırası ile N10, N11, N12, N13 ve N14 numaralı numuneler

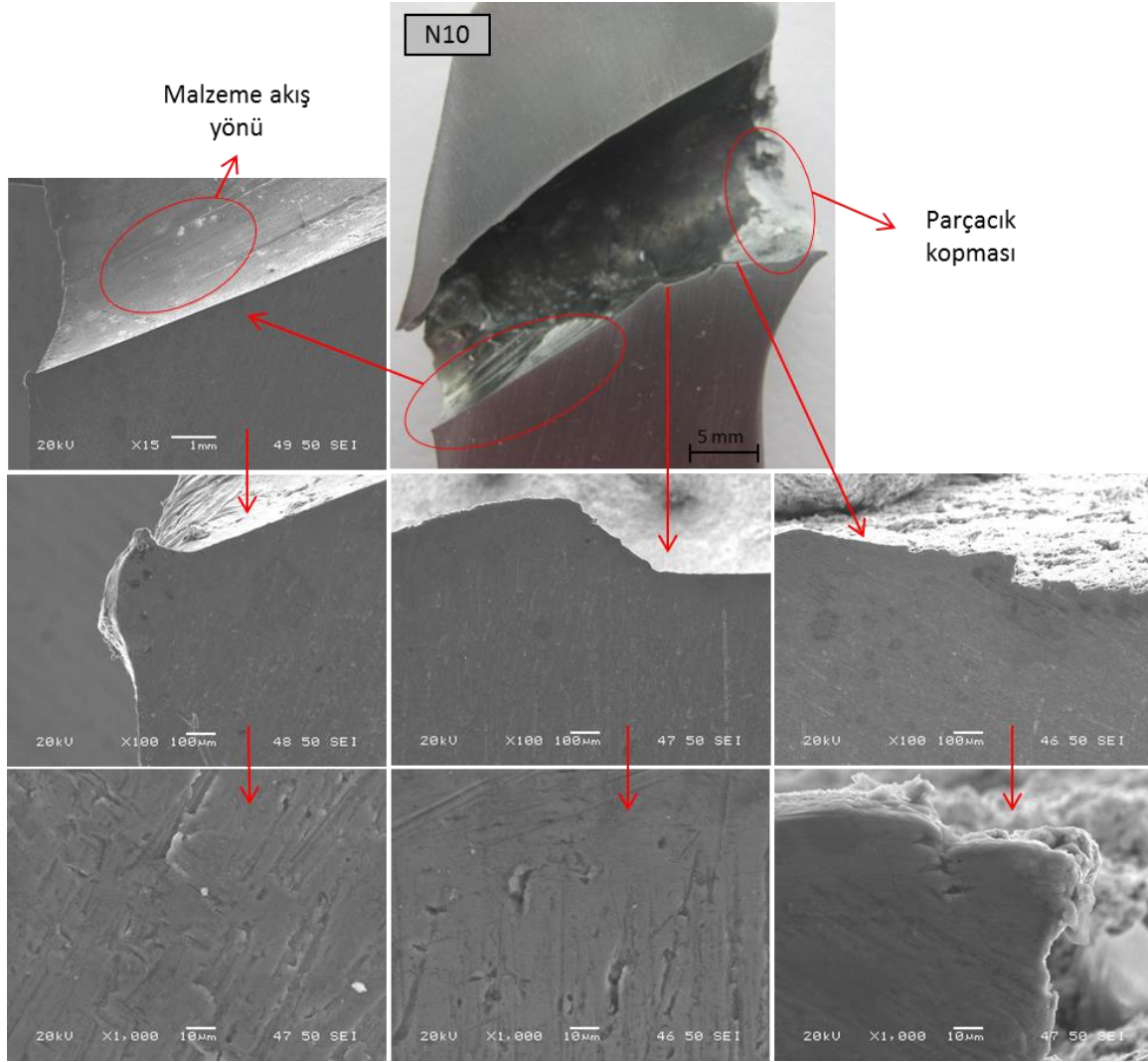
Takviyesiz AA6061 olan N10 numaralı numuneyi incelediğimizde merminin girdiği yerde çok büyük çatlaklar oluşturmadığı dolayısı ile sünek bir giriş sergilediği görülürken çıktığı yerde ise çok az miktarlarda kopma olduğu gözlemlenmiştir. Diğer numunelerde ise takviye miktarına bağlı olarak giriş kısımlarında çatlak oluşumunun ve çatlak büyüklüğünün arttığı gözlemlenirken çıkış yerlerinde de kopmaların ve çatlak oluşumlarının arttığı

gözlemlenmiştir. Bunun artan % B₄C miktarından kaynaklandığı bilinmektedir. Resim 7.31’da N10 numaralı numunenin makro görüntüsünü incelediğimizde merminin girdiği deliğin etrafında kulakçık oluştuğu görülmektedir. Bu durum ana malzemenin sünek olduğunun göstergesidir. Merminin çıkış deliğine baktığımızda ise bazı kısımlarda kopmaların bazı kısımda dışarı doğru malzeme taşması olduğu görülmektedir.

Resim 7.32’da N10 numaralı numunenin balistik test sonrası kesiti görülmektedir. Merminin giriş çıkış yaptığı kesite baktığımızda merminin kesit boyunca malzemeyi deforme ederek ilerlediği görülürken çıkış kısmında küçük oranlarda parça kopardığı görülmüştür.

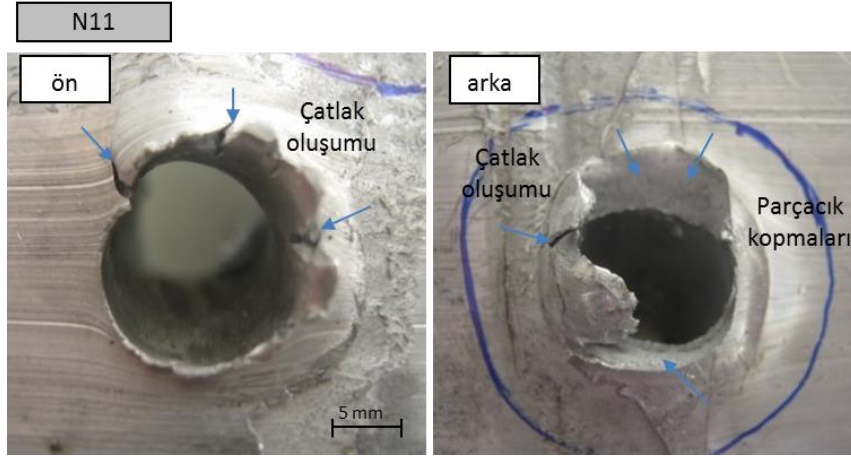


Resim 7.31. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N10 nolu AA6061 numunesinin makro resmi

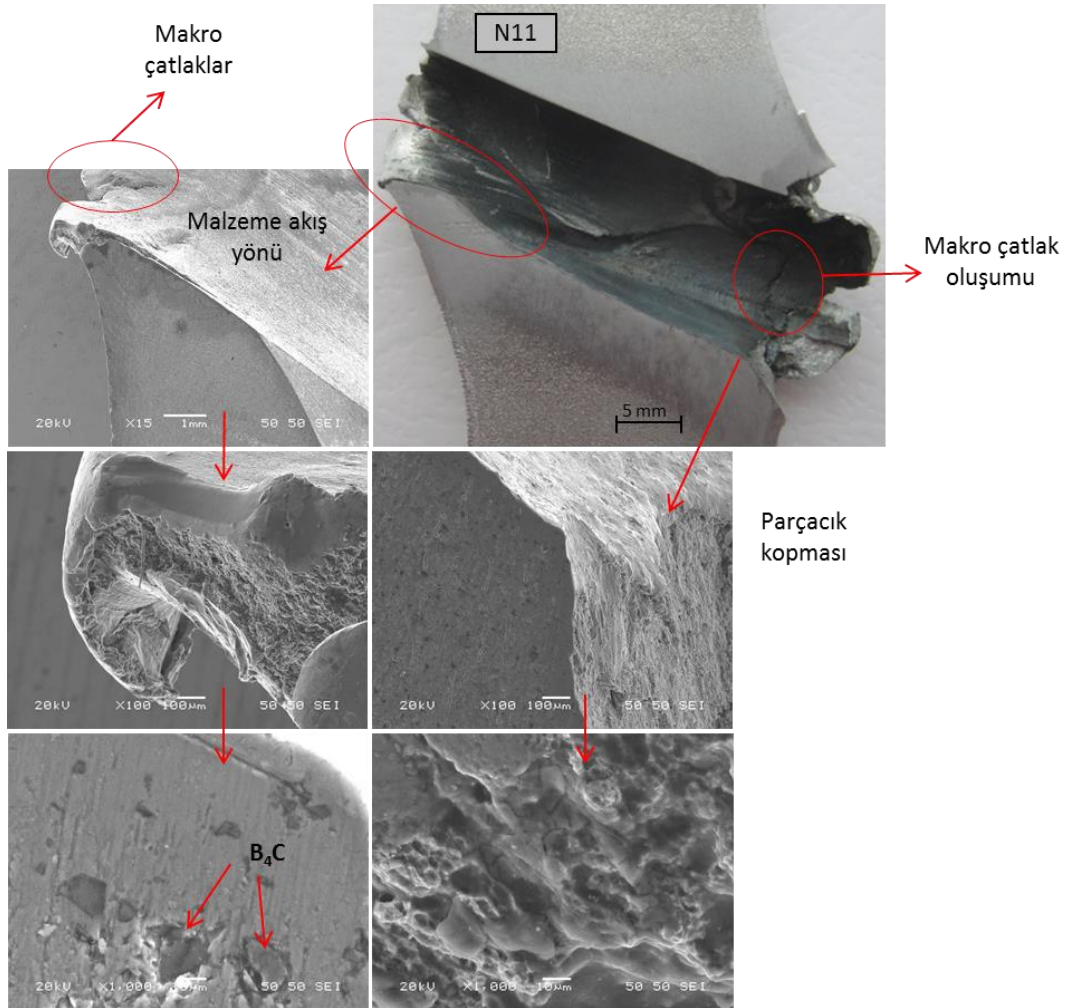


Resim 7.32. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N10 nolu AA6061 numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

N11 numaralı numunenin balistik test sonrası makro görüntüsü Resim 7.33’de verilmiştir. Merminin temas ettiği ilk yerde (giriş yerinde) makro çatlakların oluştuğu görülmektedir. Kurşunun çıkış kısmında ise hem çatlak oluşumu hem de parçacık kopmaları tespit edilmiştir. Resim 7.34’de N11 numaralı numunenin SEM resimlerini incelediğimizde giriş kısmında ve çıkış kısmında çatlakların N10 numaralı numuneden daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

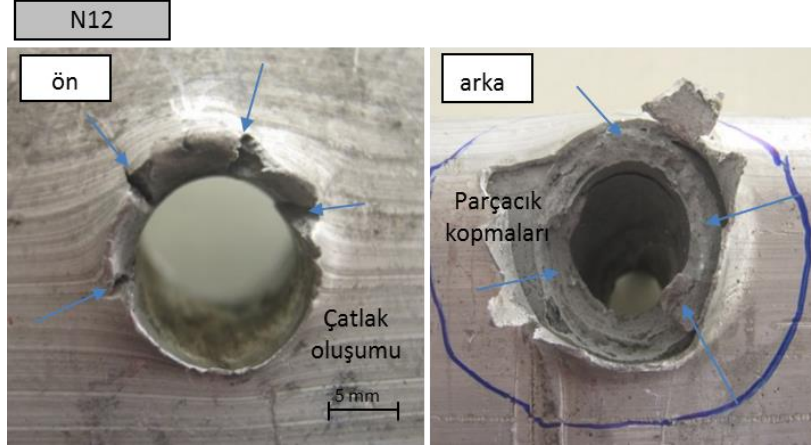


Resim 7.33. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N11 nolu AA6061/% 5 B₄C numunesinin makro resmi

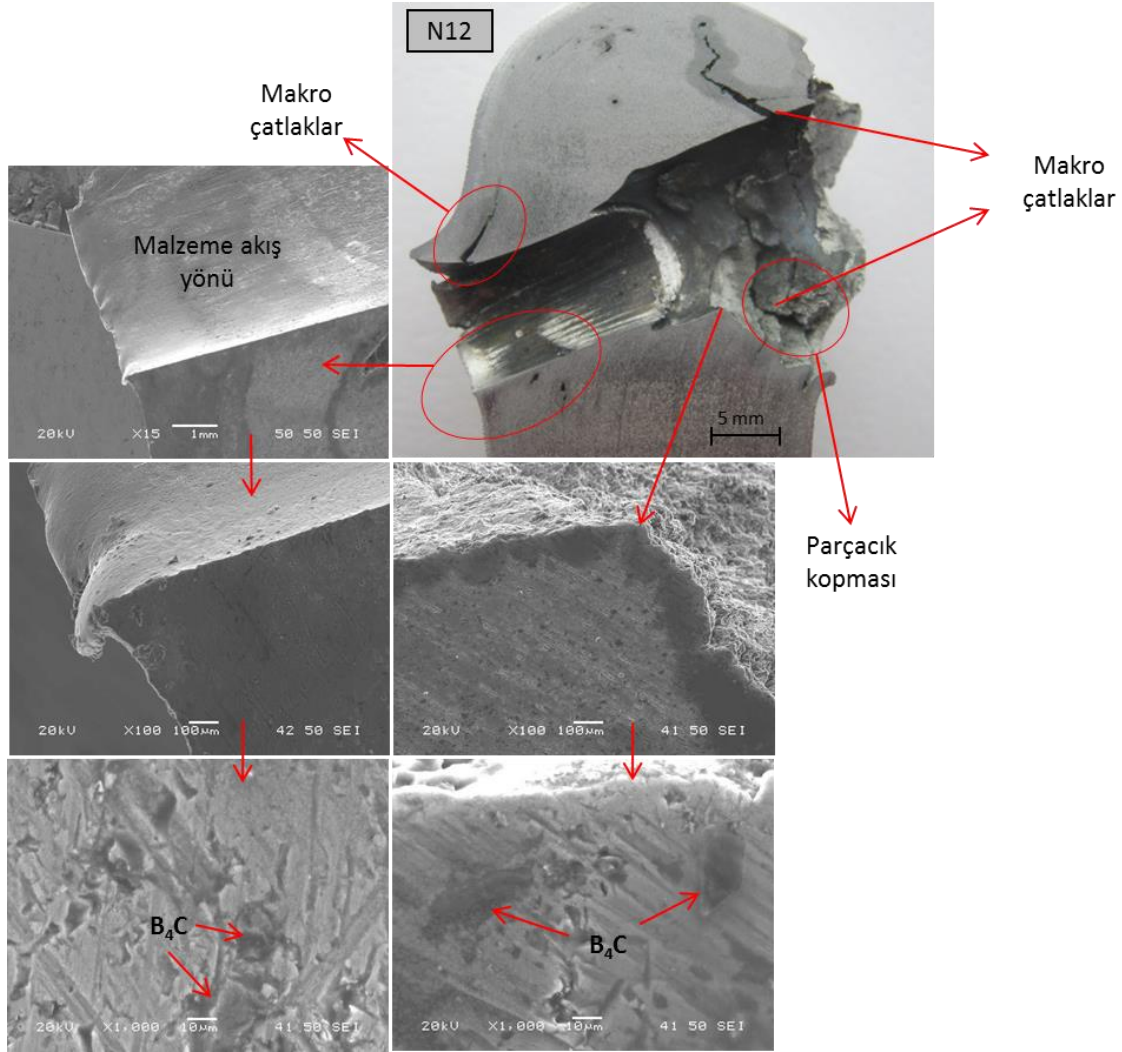


Resim 7.34. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N11 nolu AA6061/%5 B₄C numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

N12 numaralı numunenin makro resmini incelediğimizde merminin giriş yapmış olduğu kısımda çatlak oluşumlarının arttığı görülmüştür. Ayrıca merminin çıkış kısmını incelediğimizde parçacık kopmalarının olduğu açıkça görülmektedir. Resim 7.36'da N12 numaralı numunenin balistik test sonrası arakesitinden alınan SEM görüntüleri vardır. Deliğin başlangıcında çatlak oluşumları görülürken çıkış kısmında ise parçalanmalar görülmektedir (Resim 7.35).

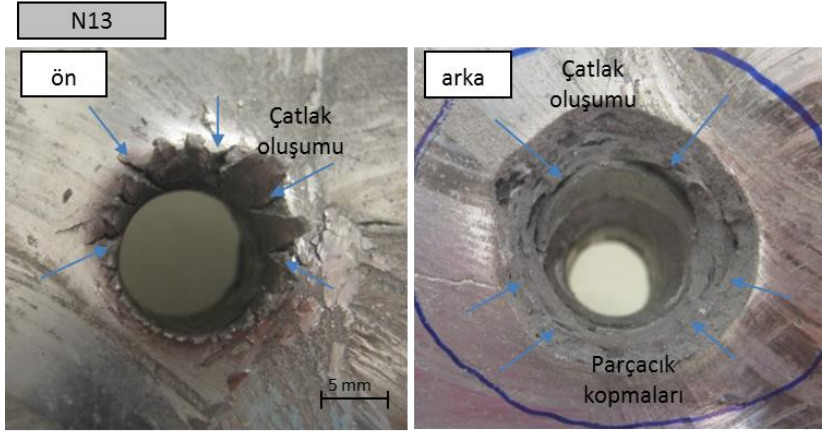


Resim 7.35. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N12 nolu AA6061/%10 B₄C numunesinin makro resmi

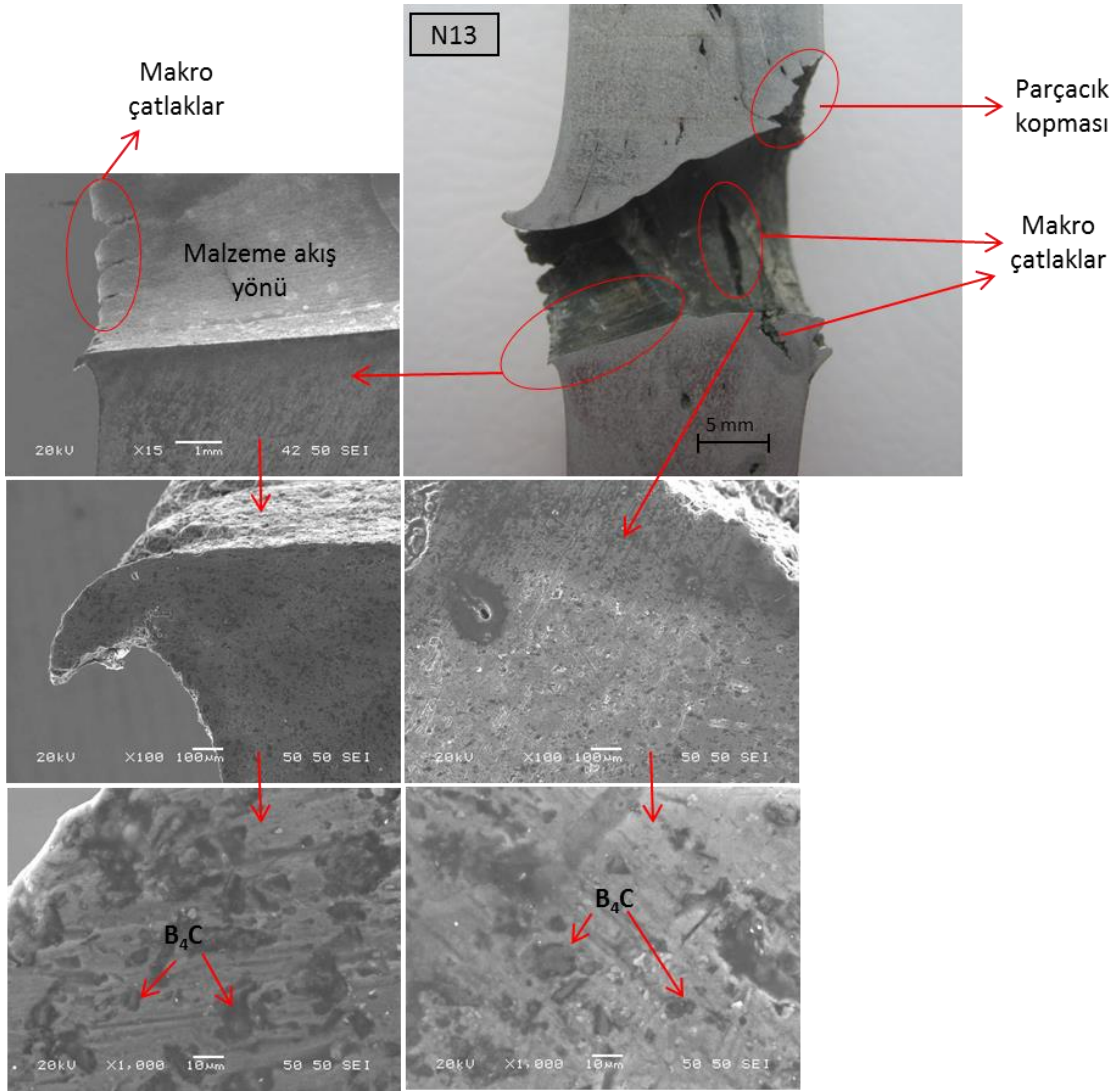


Resim 7.36. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N12 nolu AA6061/%10 B₄C numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

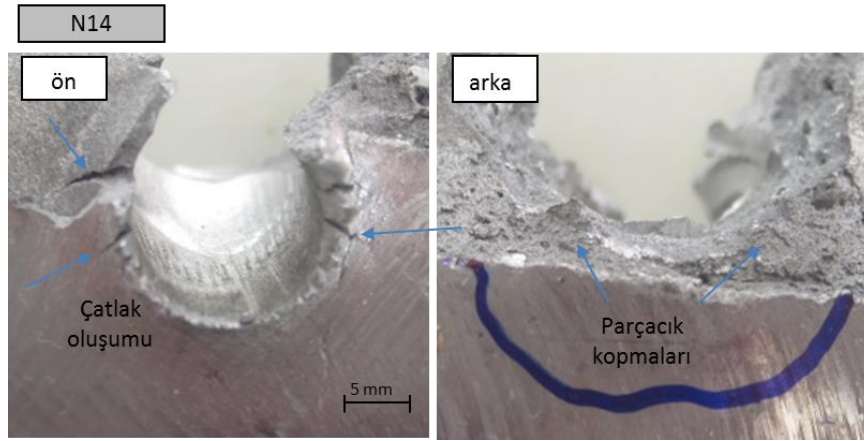
N13 ve N14 numaralı numunelerin balistik testini yapmadan önce ekstrüzyonda meydana gelen malzeme yüzey pürüzlülüğünü gidermek için yüzeyleri frezede işlenerek kalınlıkları 18 mm ye getirilmiştir. N13 ve N 14 numaralı numunelerin giriş kısmında çatlak oluşumları diğer numunelere oranla artmıştır ayrıca merminin çıkış kısımlarında malzemelerin gevrek özellik sergilemelerinden dolayı kopmalar çatlamlar meydana gelmiştir (Resim 7.37 ve Resim 7.39).



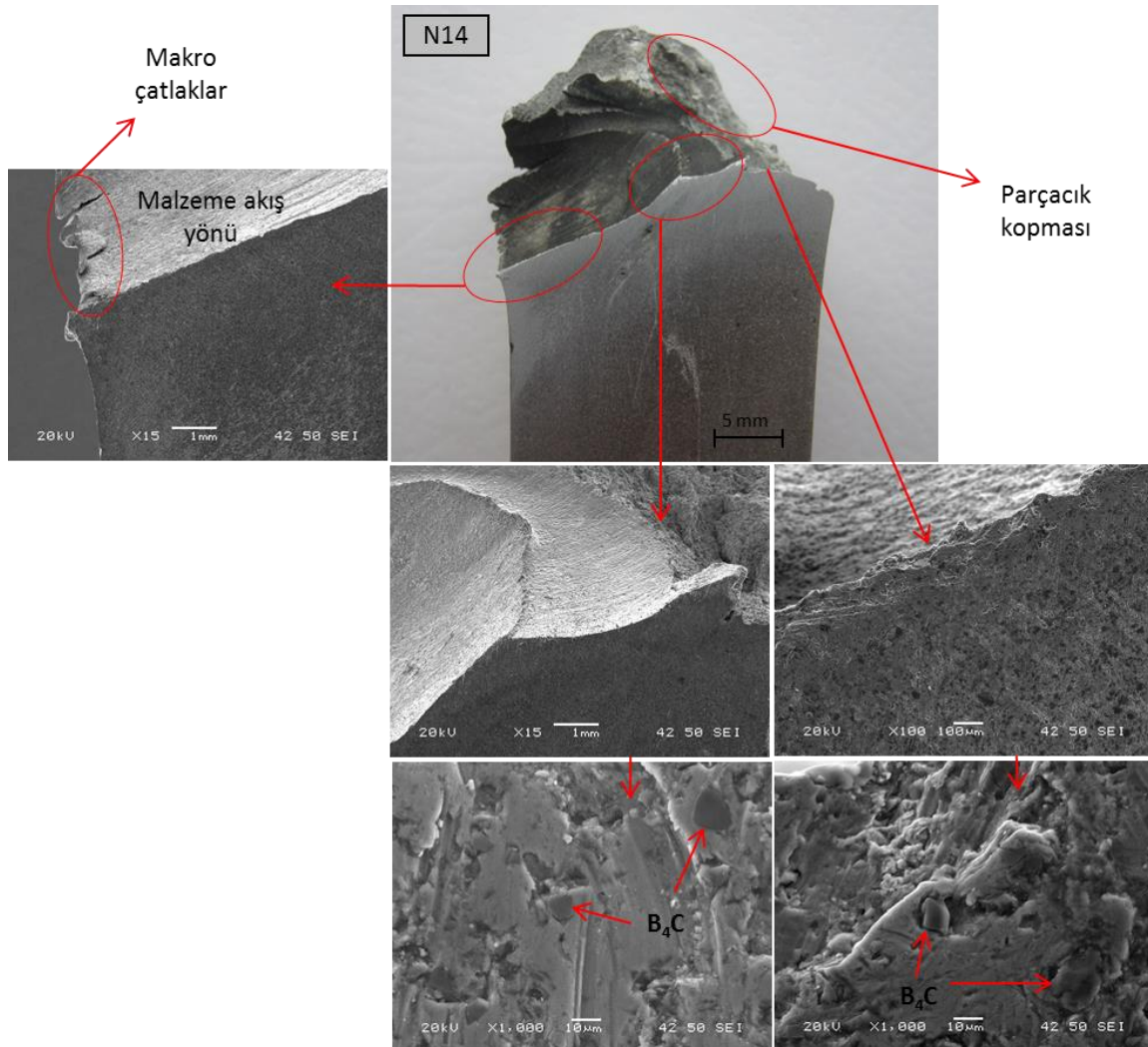
Resim 7.37. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N13 nolu AA6061/%15 B₄C numunesinin makro resmi



Resim 7.38. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N13 nolu AA6061/%15 B₄C numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri



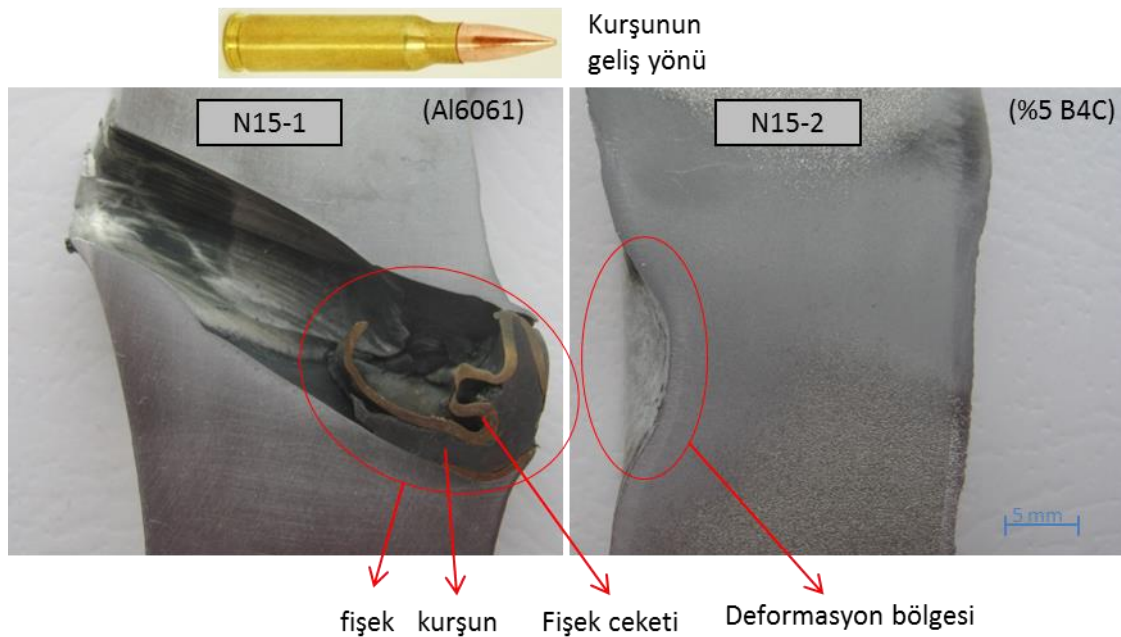
Resim 7.39. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N14 nolu AA6061/%20 B₄C numunesinin makro resmi



Resim 7.40. Ekstrüzyon sonrası G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N14 nolu AA6061/%20 B₄C numunesinin farklı büyütmelerde SEM resimleri

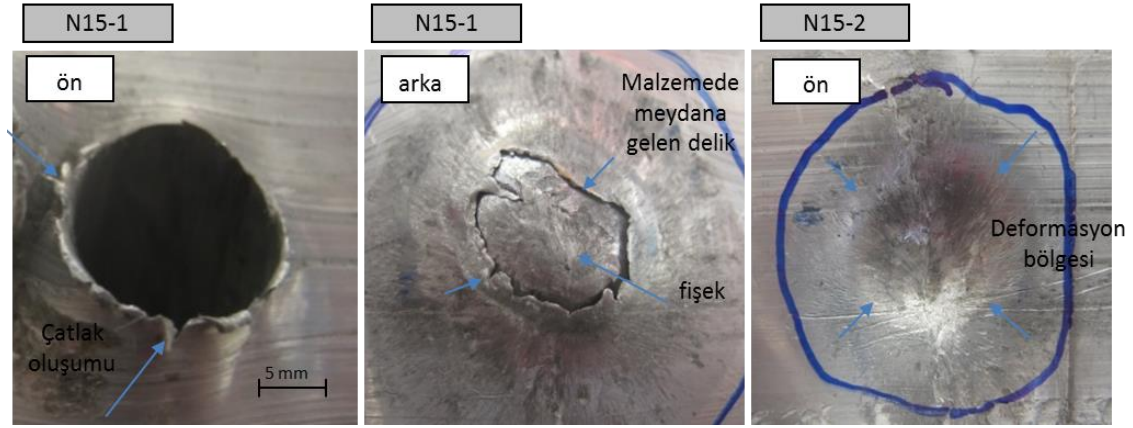
7.9.4. 4.Grup malzemelerin balistik test sonrası makro ve mikro incelenmesi

4. grup malzemeler tabakalı kompozit malzemelerdir. Ekstrüzyon ve haddeleme ile üretilen kompozit malzemeler üst üste konularak 7,62×51 mm'lik mermi ile balistik test yapıldı. Yapılan balistik teste ilk olarak ekstrüzyon yapılan iki malzeme (AA6061 ve %5 B₄C) ara yüzeyde hiçbir yapıştırıcı kullanmadan üst üste konularak atış yapıldı (N15 numaralı numune). Atış sonrası kompozit malzemenin makro görüntüsü Resim 7.41'da verilmiştir. Merminin ilk temas ettiği malzeme olan AA6061 in giriş kısmında ince bir delik olduğu görülürken mermi delik içinde yol alarak tam çıkış noktasında sıkışarak kalmıştır. Merminin çıkmasını % 5 B₄C olan kompozit malzeme deformasyon olarak engellemiştir. % 5 B₄C olan kompozit malzemenin ön kısmında merminin oluşturmuş olduğu basınç kuvveti ile içeri doğru çukurcuk olduğu görülmüştür.



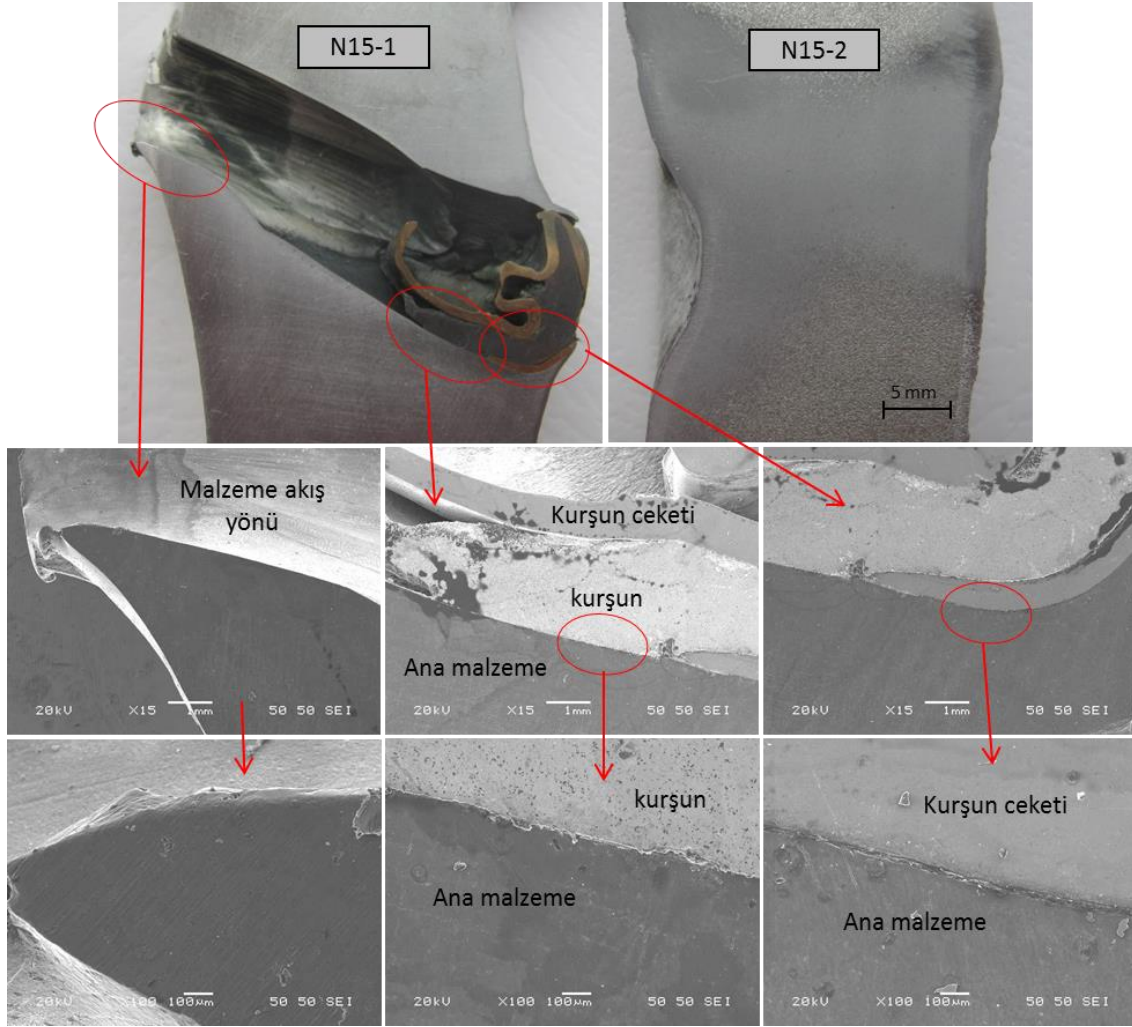
Resim 7.41. Ekstrüzyon sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm'lik mermi atışı yapılan N15 numaralı numune

N15 numaralı numunenin balistik test sonrası ön ve arka kısmından alınan makro resimler Resim 7.42'de verilmiştir. Merminin girdiği yerde dairesel bir delik oluşmuştur. Giriş yerinde çok az miktarda kulakçık ve çatlak oluşmuştur. Mermi N15-1 numaralı numuneden çıkamadan kaldığı görülmektedir. Mermi çıkamamakla beraber N15-2 numaralı numunenin deformasyon olması ile N15-1 numaralı numunenin tam çıkış yerinde kalmıştır.



Resim 7.42. Ekstrüzyon sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N15 nolu numunenin makro resmi

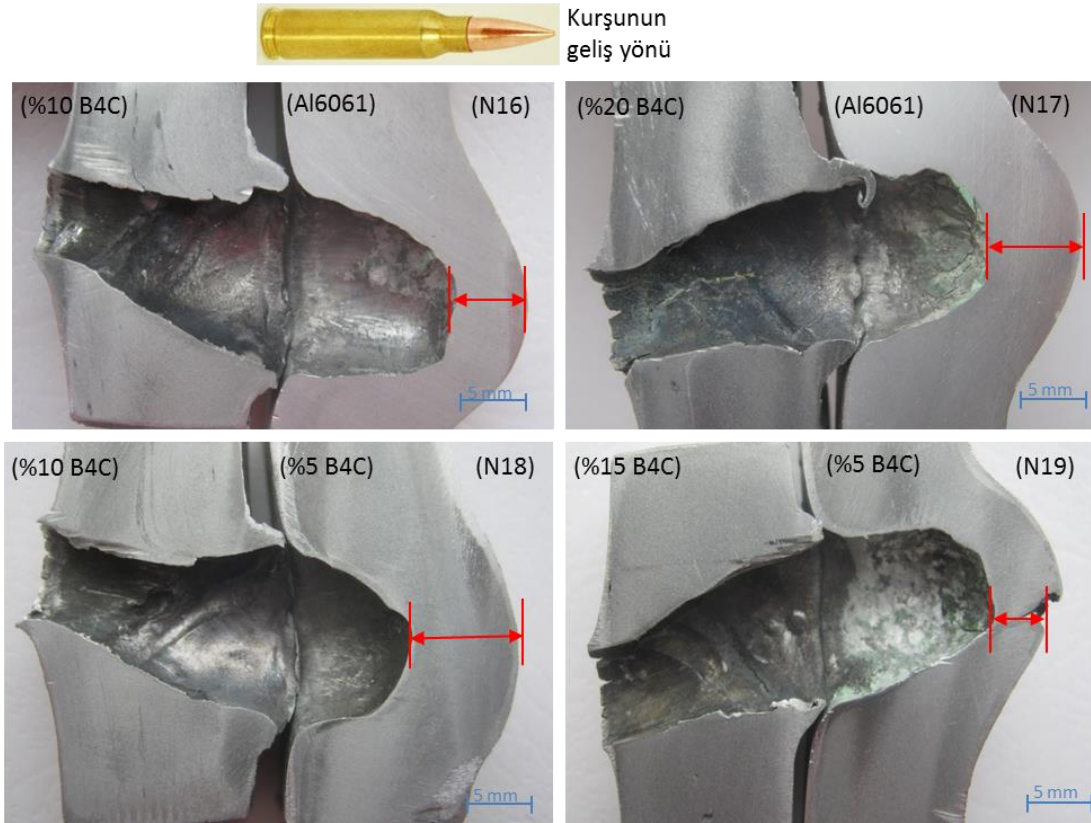
N15 numaralı numunenin test sonrası arakesit görünümüne baktığımızda merminin malzemenin sonuna yığılıp kaldığı ve dışarı çıkamadığı görülmüştür. Dolayısı ile toplam 50 mm kalınlığında olan AA6061 ve %5 B₄C ekstrüzyon levhasının üst üste konulması ile balistik koruyucu zırh malzemesi olarak kullanılabileceğini kanıtlamıştır. Resim 7.43’e baktığımızda merminin AA6061 malzemesi içerisinde sünek olarak hareket ettiği görülmektedir. Mermi malzeme içerisinden çıkmadan diğer % 5 B₄C takviyesi olan malzemenin etkisi ile beraber N15-1 ile N15-2 numaralı numune arasında kalmıştır.



Resim 7.43. Ekstrüzyon sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N15 nolu numunenin farklı büyütmelerde SEM resimleri

N15 numaralı numunede ekstrüzyon edilen numuneyi yan yana koyarak balistik testine bakılmıştır ve başarılı sonuç alınmıştır. Bu durumdan esinlenerek ağırlıkça % farklı oranlarda B₄C içeren haddelenmiş 12,7 mm kalınlığında olan kompozit malzemeler birbirine yapıştırarak tabakalı kompozit levhalar üretilmiş ve balistik performansı araştırılmıştır (Resim 7.44). Bu haddelenmiş kompozit levhalar birbirine piyasadan hazır olarak temin edilen Acad fix marka katı metal yapıştırıcı ile birleştirilmiştir. Balistik test sonrası bu yapıştırıcının tutmadığı parçaların birbirinden ayrıldığı görülmüştür. Bu tabakalı kompozit malzemeler 4 Farklı oranlarda bir araya getirilmiştir. Bu malzemelerin ara kesitinin makro görüntüsü Resim 7.44’da açıkça görülmektedir. Bu malzemeler N16, N17, N18 ve N19 numaralı numunelerdir. Bu malzemeler arasında N16, N17 ve N18 numaralı numunelerde delinme ve çatlak oluşumu görülmezken N19 numaralı numunenin arka kısmında çatlak oluştuğu görülmüştür. Dolayısı ile N16, N17 ve N18 numaralı numuneler balistik testten

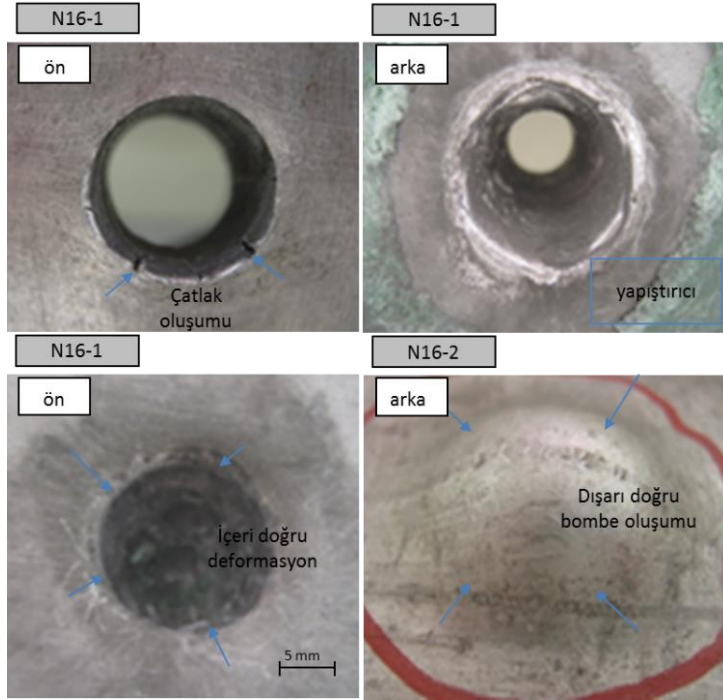
başarılı sonuç alırken N19 numaralı numune başarısız olmuştur. G3 mermisinin bu malzemelerde oluşturmuş olduğu tahribata bakacak olursak en yüksek penetrasyon derinliği N19 numaralı numunede olurken en düşük penetrasyon derinliği N18 numaralı numunelerde olmuştur. Mermi girişlerine baktığımızda ise en çok makro çatlak oluşumu N17 numaralı numunede olduğu açıkça görülmüştür.



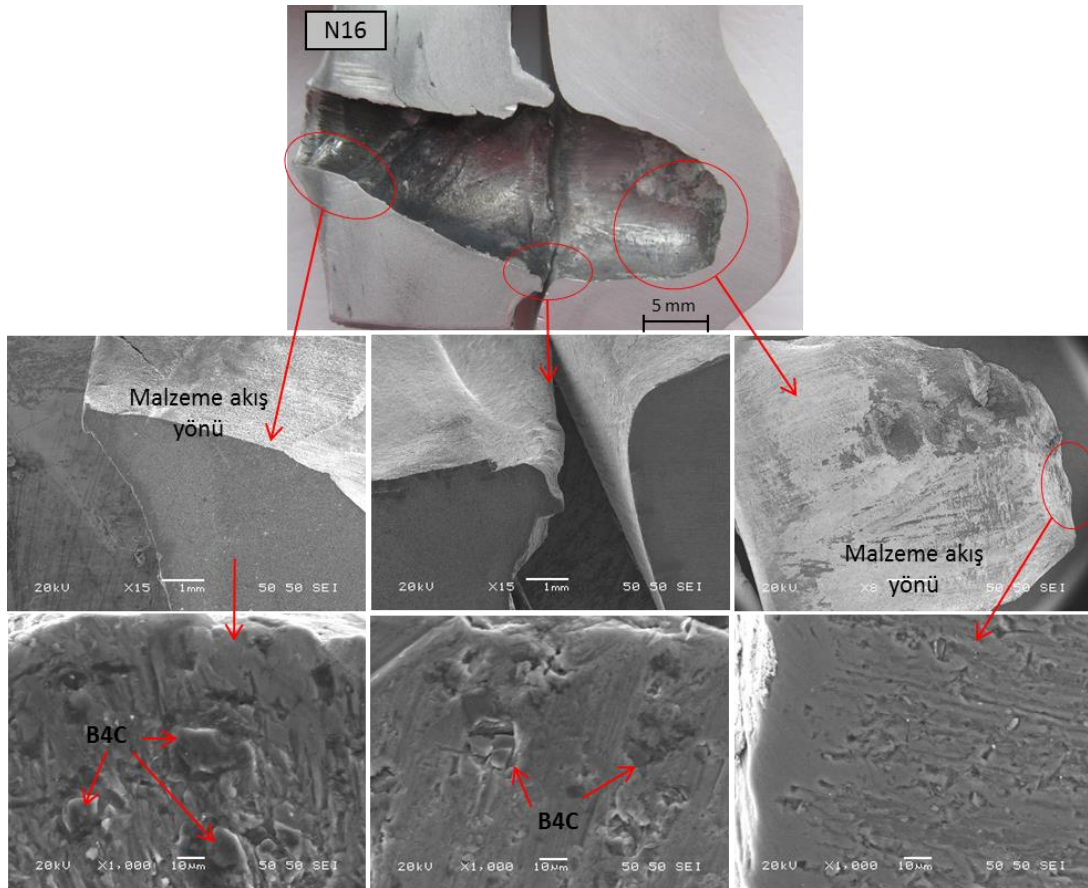
Resim 7.44. Haddeleme sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N16, N17, N18 ve N19 numaralı numuneler

Resim 7.45’de N16 numaralı numunenin balistik test sonrası makro resmini incelediğimizde merminin % 10 B₄C takviyeli olan N16-1 numaralı numuneyi deldiğini takviyesiz AA6061 olan N16-2 numaralı numuneye ise saplanıp kaldığı tespit edilmiştir. Balistik test sonrası ara yüzeyi yapıştırmak için kullanılan yapıştırıcı koparak parça ikiye ayrılmıştır. Mermi N16-2 numaralı numunenin ön kısmından girmiş arka kısmında ise basıncın etkisi ile bombe oluşturmuştur. Bombeli olan yüzeyde herhangi bir çatlak oluşmadığı tespit edilmiştir.

Resim 7.46’da N16 numaralı numunenin SEM resimleri verilmiştir. Merminin girdiği kısımda çok ince çatlaklar oluşurken iki malzeme arasında da dışa kulak oluşumu gözlemlenmiştir.

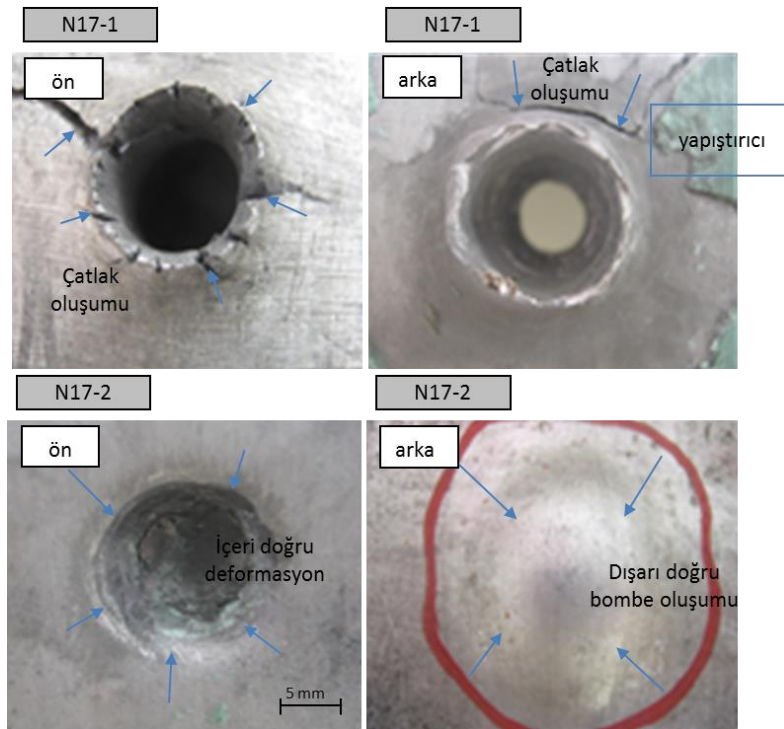


Resim 7.45. Haddelenme sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N16 nolu numunenin makro resmi



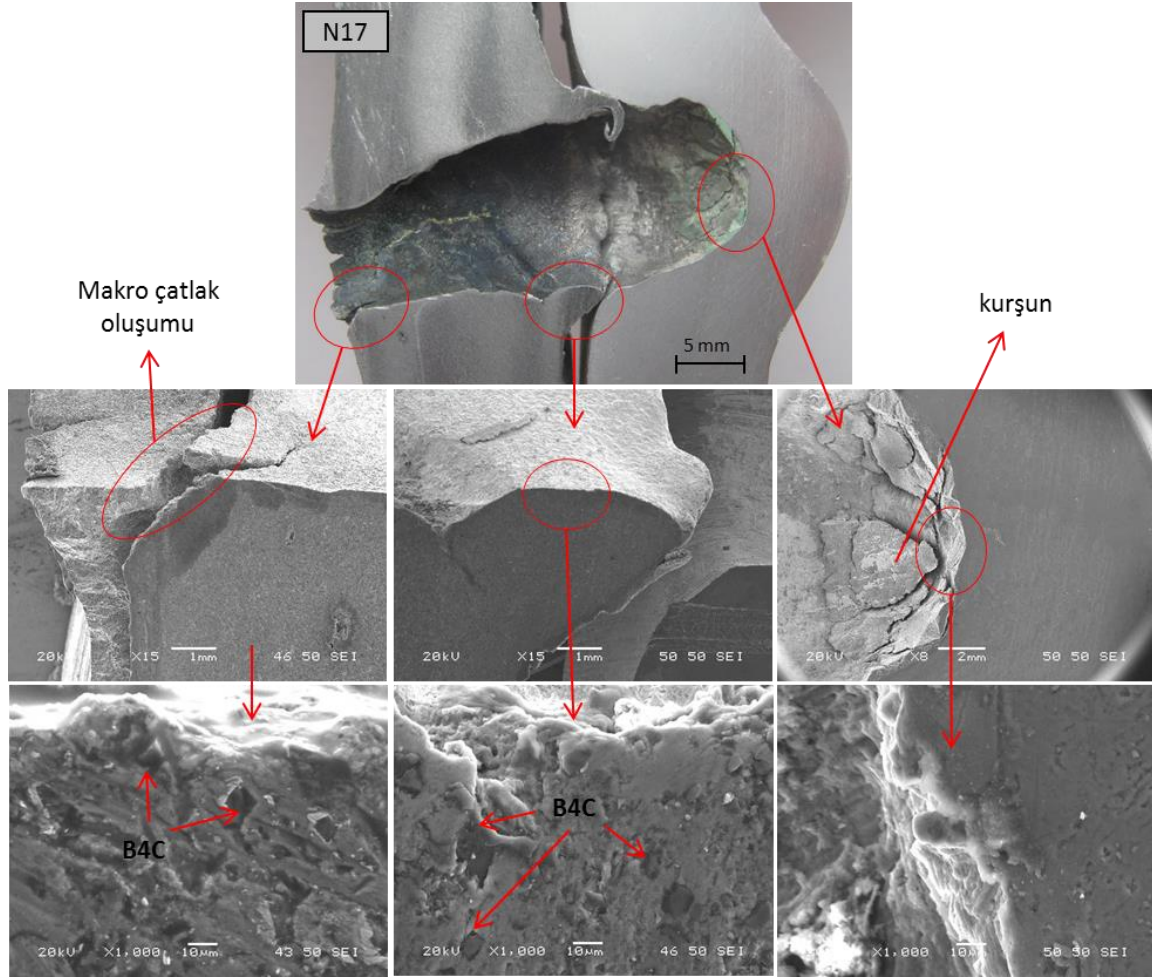
Resim 7.46. Haddelenmiş ve birbirine yapıştırılarak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N16 nolu numunenin farklı büyütmelerde SEM resimleri

N17 numaralı numunede balistik test başarılı olmuştur (Resim 7.47). N17-1 numaralı numune tamamen delinirken N17-2 numaralı numune mermiyi durdurmuştur. N17-1 numaralı numunede merminin ilk temas ettiği yerde çatlamların ve ayrılmaların olduğu görülmüştür. Bu çatlak oluşumları malzemenin içermiş olduğu yüksek oranlarda ağırlıkça % 20 B₄C oranından kaynaklanmaktadır. Ayrıca merminin N17-1 numaralı numuneden çıkış yerine bakacak olursak oralarda da çatlak oluştuğu açıkça görülmektedir. N17-2 numaralı numuneye saplanan Mermi malzemenin arka kısmında bombe oluşturmuştur.



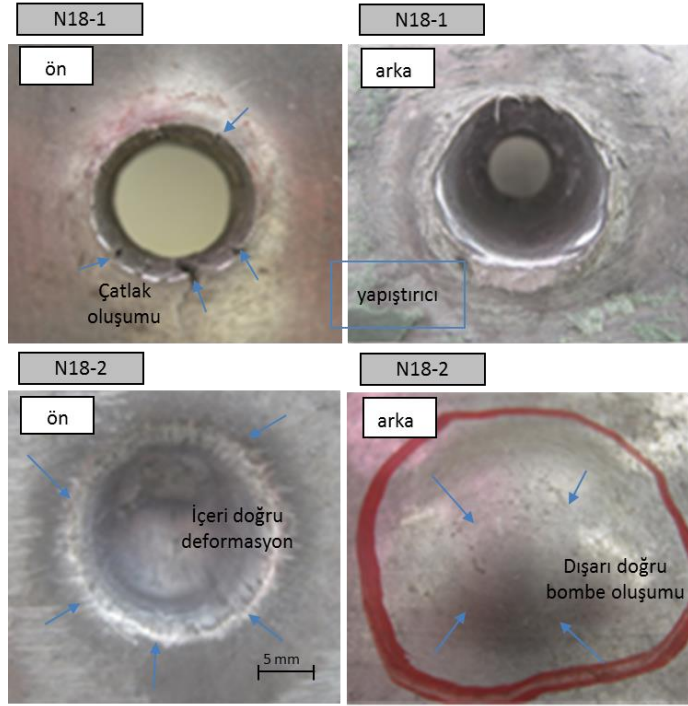
Resim 7.47. Haddeleme sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N17 nolu numunenin makro resmi

Resim 7.48’da N17 numaralı malzemenin arakesitin SEM görüntüsü verilmiştir. Resmi incelediğimizde merminin ilk girdiği yerde çok az miktarda kulakçık oluşumu ile beraber makro radyal çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Yine aynı şekilde merminin N17-1 numaralı numunenin çıkış kısmında da çatlak oluşumuna rastlanmıştır. Mermiden kopan kurşun parçacıkları N17-2 numaralı numunenin iç kısmına toplanmıştır.

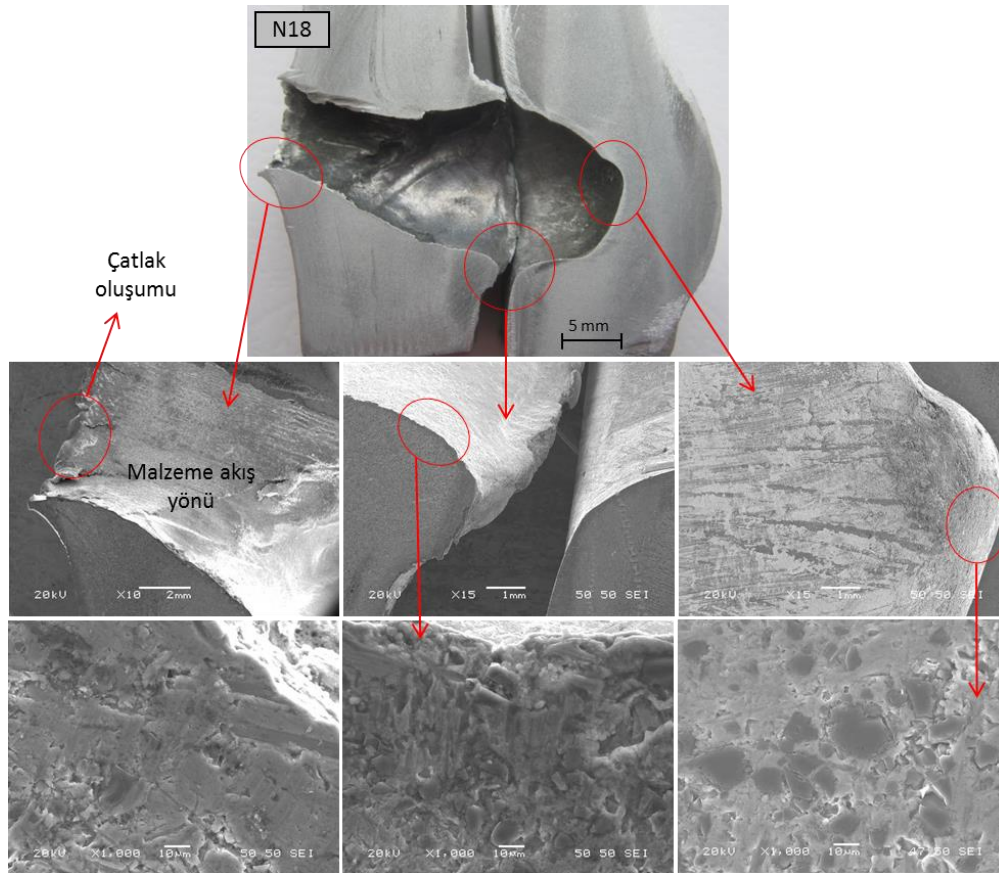


Resim 7.48. Haddelenmiş ve birbirine yapıştırılarak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N17 nolu numunenin farklı büyütmelerde SEM resimleri

Katmanlı kompozit malzemeler arasında (N16, N17, N18 ve N19) en başarılı sonucu N18 numaralı numuneler almıştır. N18 numaralı numunede 1. Katmanda % 10 B₄C var iken 2. Katmanda % 5 B₄C vardır. Merminin ilk temas ettiği N18-1 numaralı % 10 B₄C olan kompozit malzemenin giriş kısmında az miktarda radyal çatlak oluşmuştur (Resim 7.49). N18-1 numaralı numunenin çıkış kısmında ise çatlak oluşumuna rastlanmamıştır. N18-1 numaralı numuneden çıkan mermi N18-2 numaralı % 5 B₄C içeren kompozit malzemenin içine saplanarak kalmıştır. Merminin darbe etkisinden dolayı numunenin dış kısmında bombe oluşmuştur. Oluşan bu bombe diğer malzemelere göre daha azdır.

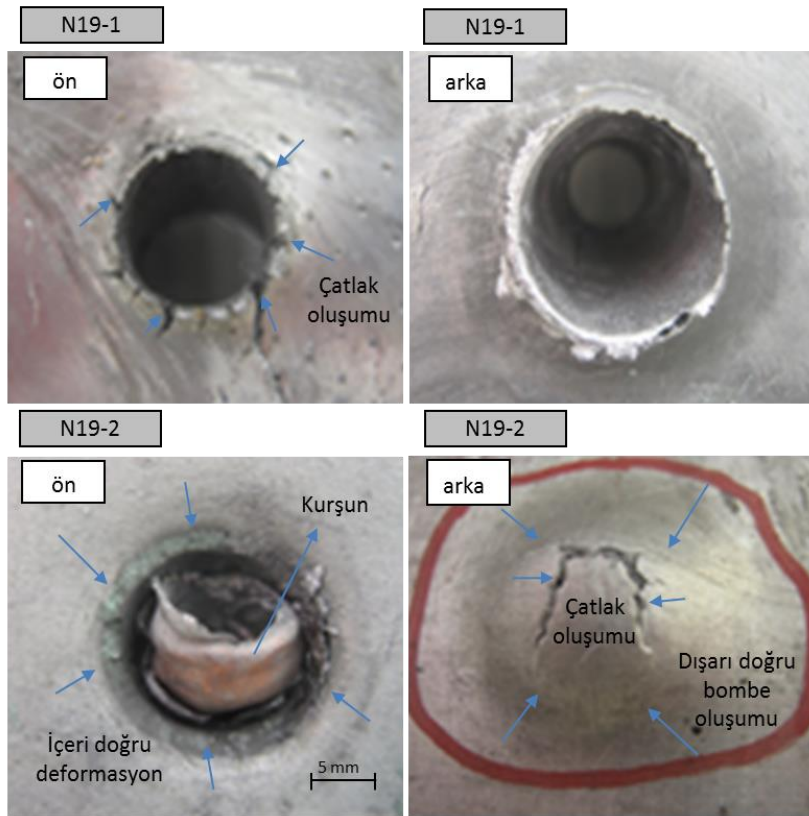


Resim 7.49. Haddeleme sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N18 nolu numunenin makro resmi

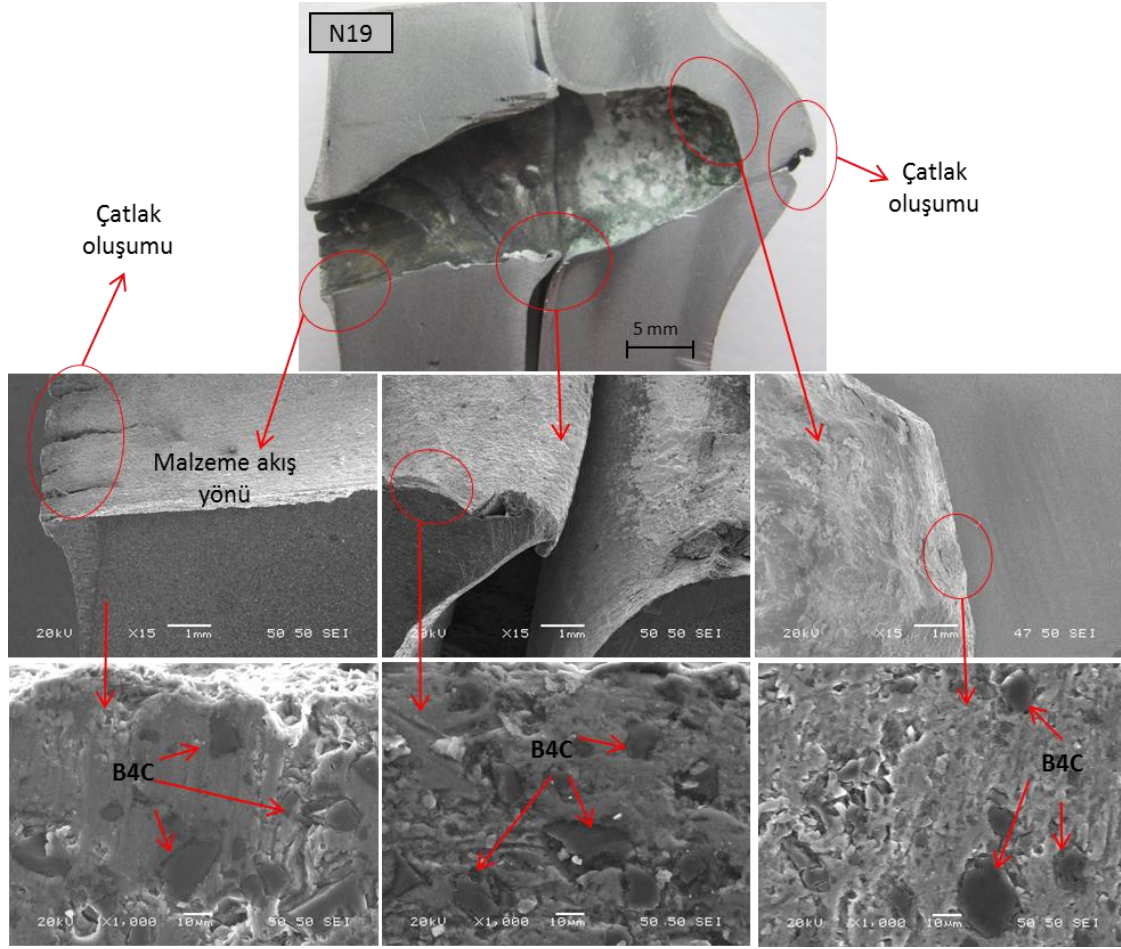


Resim 7.50. Haddelenmiş ve birbirine yapıştırılarak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N18 nolu numunenin farklı büyütme SEM resimleri

N19 numaralı numunenin balistik test sonrası makro resmi Resim 7.50’de verilmiştir. Resme baktığımızda merminin N19-1 numaralı numuneyi delip çıktıktan sonra N19-2 numaralı numuneye saplanıp kaldığı görülmektedir. Merminin ilk temas ettiği N19-1 numaralı numunede delik girişinde çatlak oluşumlarına rastlanmıştır. Ayrıca merminin N19-2 numaralı numuneye saplandığında darbe etkisinden dolayı malzemenin arka kısmında çatlak oluşumuna sebebiyet vermiştir. Bu çatlak oluşumundan dolayı malzemenin balistik testi başarılı olamamıştır.



Resim 7.51. Haddeleme sonrası yan yana konularak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N19 nolu numunenin makro resmi



Resim 7.52. Haddelenmiş ve birbirine yapıştırılarak G3 tüfeği ile 7,62×51 mm’lik mermi atışı yapılan N19 nolu numunenin farklı büyütmelerde SEM resimleri

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

TM yöntemi ile B₄C takviyeli AA6061 matrisli kompozit malzemelerin üretimi, mekanik özelliklerinin ve balistik performansının incelenmesi üzerine yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Sinterleme öncesi maksimum bağıl yoğunluk değeri %88 ile AA6061 numunede elde edilirken, minimum değer yaklaşık %86 ile ağırlıkça %20 B₄C içeren numunede elde edilmiştir. Sinterleme sıcaklığı ile bu değerlerde artış gözlenmiştir. B₄C içermeyen numunelerde bağıl yoğunluk değeri yaklaşık %91 iken ağırlıkça %20 B₄C içeren numunede yaklaşık %89'dur. Sinterleme işlemi ile bütün numunelerde ortalama %3'lük bir artış gözlenmiştir.
2. Ekstrüzyon işleminin yoğunluk değişimi üzerine oldukça önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. B₄C miktarına bakılmaksızın bütün numunelerde yaklaşık %98 'in üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir.
3. Ağırlıkça % B₄C miktarının üretilen numunelerin yüzey kalitesi üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. %25 ve %30 B₄C içeren numunelerde yüzey kalitesi oldukça düşük olmakla birlikte malzeme sarfiyatı da çok fazladır. Bu nedenle maksimum ağırlıkça %20 oranında parçacık takviyesi yapılmıştır.
4. Haddeme ile ekstrüzyon işleminde olduğu gibi B₄C miktarına bakılmaksızın bütün numunelerde %98'in üzerinde bağıl yoğunluk değerleri elde edilmiştir. B₄C içermeyen numunelerde % 100'e yakın bağıl yoğunluk değeri elde edilmiştir. Ekstrüzyon işlemi ile %99.26 bağıl yoğunluk elde edilirken haddeme işlemi ile bu değer %99.62 olmuştur.
5. T6 Isıl işlem sonrası sertlik değerleri 52 HB ile 66.3 HB arasında değişmektedir. En düşük sertlik değeri 52 HB ile AA6061 alüminyum alaşımında gözlemlenirken en yüksek sertlik değeri 66.3 HB ile % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde elde edilmiştir.

6. Sinterleme sonrası elde edilen numunelerde en düşük sertlik değeri 55 HB ile AA6061 alüminyum alaşımında gözlemlenirken en yüksek sertlik değeri 68 HB ile % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde elde edilmiştir.
7. En düşük sertlik değeri 56 HB ile AA6061 alüminyum alaşımında gözlemlenirken en yüksek sertlik değeri 70.1 HB ile % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde elde edilmiştir. Sinterleme ve ekstrüzyon sonrası üretilen numunelere kıyasla sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.
8. Sinterleme sonrası elde edilen numunelerin çapraz kırma dayanımı grafiği incelendiğinde maksimum dayanımın 135 MPa ile %5 B₄C içeren numunelerde elde edildiği görülmektedir. Bu noktadan itibaren %15 ve %20 B₄C içeren numunelerde çapraz kırma dayanımlarında (sırasıyla 95 MPa ve 90 MPa) bir düşüş gözlemlenmiştir.
9. AA6061 numunede sinterleme sonrası çapraz kırma dayanımı 105 MPa iken ekstrüzyon işlemi ile bu oran 400 MPa'a çıkmıştır. Yaklaşık 4 kat dayanımda artış meydana gelmiştir. En yüksek dayanım değeri 650 MPa ile %15 B₄C içeren numunelerde elde edilmiştir.
10. Ekstrüzyon sonrası en yüksek çekme dayanımı % 10 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde görülürken en düşük çekme dayanımı %20 B₄C takviyelilerde olduğu görülmüştür. Takviyesiz AA6061'de çekme dayanımı 155 MPa iken bu değer %5 ve % 10 B₄C takviyelerinde artarak sırası ile 180 ve 190 MPa olmuştur. Daha sonrasında ise bu değer düşerek % 15 ve % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde sırası ile 170 ve 150 MPa olmuştur.
11. Haddeleme sonrası çekme dayanımlarını incelediğimizde en yüksek çekme dayanımının % 5 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde 210 MPa olduğu, en düşük çekme dayanımının ise %10 B₄C takviyeli kompozit malzemelerde 178 MPa olduğu tespit edilmiştir. Takviyesiz AA6061'de çekme dayanımı 193 MPa iken bu değer % 5 B₄C takviyeli kompozitlerde 210 MPa'a çıkmıştır. Daha sonrasında bu değer % 10 B₄C'de ciddi oranlarda düşmüştür. Son olarak % 15 ve %20 B₄C'de bu değer % 10 B₄C'ye göre biraz artarak sırası ile 195 ve 187 MPa olmuştur.

12. Ekstrüzyon sonrası darbe enerjisine baktığımızda ağırlıkça % B₄C takviye miktarına bağlı olarak darbe enerjisinde bir düşüş olduğu görülmüştür. En yüksek darbe enerjisi takviyesiz AA6061'de 32,5 Joule olurken en düşük darbe enerjisi 3 Joule değer ile % 20 B₄C takviyeli kompozitlerde olduğu görülmüştür.
13. Haddeleme sonrası kompozit malzemelerin darbe enerjisi değişimine baktığımızda 26,3 Joule ile en yüksek darbe enerjisi takviyesiz AA6061 alaşımında görülürken en düşük darbe enerjisi 4,3 Joule gibi bir değerle % 20 B₄C takviyeli kompozit malzemede olduğu belirlenmiştir. Takviyesiz AA6061'den 26,3 Joule değere sahip olan darbe enerjisi % 5 B₄C'de 8,3 Joule değere düşmüş % 10 B₄C'de 9,0 Joule çıkmış ve daha sonra % 15 ve % 20 B₄C'de sırası ile 6,1 ve 4,3 Joule değerlerine düşmüştür.
14. Merminin tahribatına baktığımızda N1, N2, N3 numaralı numunelerin arka tarafında çatlak oluşmadığı gözlemlenirken N4 ve N 5 numaralı numunelerde ise çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir.
15. N6, N7, N8 ve N9 numaralı numunelerde merminin oluşturmuş olduğu tahribata baktığımızda merminin bir taraftan girip diğer taraftan çıktığı görülmüştür. Dolayısı ile N6, N7, N8 ve N9 numaralı numuneler bu testten başarılı sonuç alamamıştır.
16. N10, N11, N12, N13 ve N14 numunelerin G3 mermisi ile atış sonrası kesit görünümlerine bakıldığında merminin bir taraftan girip diğer taraftan çıktığı belirlenmiştir.
17. N15 numaralı numunenin balistik test sonrası ön ve arka kısmından alınan makro resimlere bakıldığında merminin girdiği yerde dairesel bir delik oluşmuştur. Giriş yerinde çok az miktarda kulakçık ve çatlak oluşmuştur. Mermi N15-1 numaralı numuneden çıkamadan kaldığı görülmektedir. Mermi çıkamamakla beraber N15-2 numaralı numunenin deformasyon olması ile N15-1 numaralı numunenin tam çıkış yerinde kalmıştır.

18. N16, N17 ve N18 numaralı numunelerde delinme ve çatlak oluşumu görülmezken N19 numaralı numunenin arka kısmında çatlak oluştuğu görülmüştür. Dolayısı ile N16, N17 ve N18 numaralı numuneler balistik testten başarılı sonuç alırken N19 numaralı numune başarısız olmuştur. G3 mermisinin bu malzemelerde oluşturmuş olduğu tahribata bakacak olursak en yüksek penetrasyon derinliği N19 numaralı numunede olurken en düşük penetrasyon derinliği N18 numaralı numunelerde olmuştur. Mermi girişlerine baktığımızda ise en çok makro çatlak oluşumu N17 numaralı numunede olduğu açıkça görülmüştür.

8.2. Öneriler

1. Farklı kombinasyonlarda Al matrisli B₄C takviyeli tabakalı kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilerek balistik performans geliştirilebilir.
2. Farklı türde Al alaşımları denenebilir.
3. Kompozit levhalar farklı türde yapıştırıcı kullanılarak bir araya getirilebilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Ulusal Bilim ve Teknoloji Politikaları 2003-2023 Strateji Belgesi. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.tubitak.gov.tr%2Ftubitak_content_files%2Fvizyon2023%2FVizyon2023_Strateji_Belgesi.pdf&date=2017-02-10, Son Erişim Tarihi: 10.02.2017.
2. İnternet: Vizyon 2023 Projesi Savunma, Havacılık ve Uzay Sanayii Paneli, URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tubitak.gov.tr%2Ftubitak_content_files%2Fvizyon2023%2Fshu%2FSHU_son_surum.pdf&date=2017-02-10, Son Erişim Tarihi: 10.02.2017.
3. Kainer, K. U. (2006). *Metal matrix composites: custom-made materials for automotive and aerospace engineering*. Weinheim: John Wiley & Sons., 1-7.
4. Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering* (Third edition). New York: Springer Science & Business Media, 197-200.
5. Ravindran, P., Manisekar, K., Narayanasamy, R. and Narayanasamy, P. (2013). Tribological behaviour of powder metallurgy-processed aluminium hybrid composites with the addition of graphite solid lubricant. *Ceramics International*, 39(2), 1169-1182.
6. Toptan, F. (2006). *Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemiyle Üretilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-40.
7. Gay, D. (2014). *Composite materials: design and applications* (Third edition). Boca Raton: CRC Press, 3-10.
8. Friedrich, K. and Almajid, A. A. (2013). Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications. *Applied Composite Materials*, 20(2), 107-128.
9. Sih, G. C., Carpinteri, A. and Surace, G. (2013). Advanced technology for design and fabrication of composite materials and structures: applications to the automotive, marine, aerospace and construction industry. *Springer Science & Business Media*, 427-435.
10. Abhik, R., Umasankar, V. and Xavior, M. A. (2014). Evaluation of properties for Al-SiC reinforced metal matrix composite for brake pads. *Procedia Engineering*, 97, 941-950.
11. Nishida, Y. (2013). *Introduction to metal matrix composites: fabrication and recycling*. New York: Springer Science & Business Media, 1-50.
12. Zhao, N., Nash, P. and Yang, X. (2005). The effect of mechanical alloying on SiC distribution and the properties of 6061 aluminum composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 170(3), 586-592.

13. Abenojar, J., Velasco, F. and Martinez, M. A. (2007). Optimization of processing parameters for the Al+ 10% B₄C system obtained by mechanical alloying. *Journal of Materials Processing Technology*, 184(1), 441-446.
14. Torralba, J. M., Da Costa, C. E. and Velasco, F. (2003). P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1), 203-206.
15. Lin, Y. C., Li, H. C., Liou, S. S. and Shie, M. T. (2004). Mechanism of plastic deformation of powder metallurgy metal matrix composites of Cu–Sn/SiC and 6061/SiC under compressive stress. *Materials Science and Engineering: A*, 373(1), 363-369.
16. Amigo, V., Ortiz, J. L. and Salvador, M. D. (2000). Microstructure and mechanical behavior of 6061Al reinforced with silicon nitride particles, processed by powder metallurgy. *Scripta materialia*, 42(4), 383-388.
17. Hu, H. M., Lavernia, E. J., Harrigan, W. C., Kajuch, J. and Nutt, S. R. (2001). Microstructural investigation on B₄C/Al-7093 composite. *Materials Science and Engineering: A*, 297(1), 94-104.
18. Chen, Y., Clausen, A. H., Hopperstad, O. S. and Langseth, M. (2009). Stress–strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates. *International Journal of Solids and Structures*, 46(21), 3825-3835.
19. Ganguly, P., Poole, W. J. and Lloyd, D. J. (2001). Deformation and fracture characteristics of AA6061-Al₂O₃ particle reinforced metal matrix composites at elevated temperatures. *Scripta Materialia*, 44(7), 1099-1105.
20. Abood, A. N., Saleh, A. H. and Abdullah, Z. W. (2013). Effect of heat treatment on strain life of aluminum alloy AA 6061. *Journal of Materials Science Research*, 2(2), 51.
21. Ramnath, B. V., Elanchezhian, C., Jaivignesh, M., Rajesh, S., Parswajinan, C. and Ghias, A. S. A. (2014). Evaluation of mechanical properties of aluminium alloy–alumina–boron carbide metal matrix composites. *Materials & Design*, 58, 332-338.
22. Srinivas, V. L., Zammerudhin, M., Kumar, M. R., Sankar, B. R. and Ravindra, K. (2013). Parametric Analysis of Friction Stir Welding on AA6061 Aluminum Alloy. *International Journal of Mechanical Engineering and Research*. ISSN, 2249-0019.
23. Kalaiselvan, K., Murugan, N. and Parameswaran, S. (2011). Production and characterization of AA6061–B₄C stir cast composite. *Materials & Design*, 32(7), 4004-4009.
24. Kerti, I. and Toptan, F. (2008). Microstructural variations in cast B₄C-reinforced aluminium matrix composites (AMCs). *Materials letters*, 62(8), 1215-1218.
25. Babu, N., Kumar, A. and Davidson, M. (2011). A Review of Friction Stir Welding of AA6061 Aluminum Alloy. *J. Eng. Appl. Sci*, 6(4), 61-63.

26. Knowles, A. J., Jiang, X., Galano, M. and Audebert, F. (2014). Microstructure and mechanical properties of 6061 Al alloy based composites with SiC nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 615, 401-405.
27. Adesola, A. O., Odeshi, A. G. and Lanke, U. D. (2013). The effects of aging treatment and strain rates on damage evolution in AA6061 aluminum alloy in compression. *Materials & Design*, 45, 212-221.
28. Demir, H. and Gündüz, S. (2009). The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy. *Materials & Design*, 30(5), 1480-1483.
29. Erdem, M. and Türker, M. (2011). 7039 Alüminyum alaşımının kaynak öncesi ve sonrası mekanik ve balistik özelliklerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(1), 17-26.
30. Übeyli, M., Balci, E., Sarikan, B., Öztaş, M. K., Camuşcu, N., Yildirim, R. O. and Keleş, Ö. (2014). The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy. *Materials & Design*, 56, 31-36.
31. Børvik, T., Olovsson, L., Dey, S. and Langseth, M. (2011). Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates. *International Journal of Impact Engineering*, 38(7), 577-589.
32. Manes, A., Serpellini, F., Pagani, M., Saponara, M. and Giglio, M. (2014). Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets. *International Journal of Impact Engineering*, 69, 39-54.
33. Mapelli, C., Manes, A., Giglio, M., Mombelli, D., Baldizzone, C. and Gruttadauria, A. (2011). Microstructural investigation on an Al 6061 T6 alloy subjected to ballistic impact C. *Procedia Engineering*, 10, 3447-3452.
34. Jena, P. K., Bidyapati M., K., Siva Kumar, T. and Balakrishna B. (2010). An experimental study on the ballistic impact behavior of some metallic armour materials against 7.62 mm deformable projectile. *Materials and Design*, 31, 3308-3316.
35. Özşahin, E. and Tolun, S. (2010). On the comparison of the ballistic response of coated aluminum plates. *Materials & Design*, 31(7), 3188-3193.
36. Mondal, C., Mishra, B., Jena, P. K., Kumar, K. S. and Bhat, T. B. (2011). Effect of heat treatment on the behavior of an AA7055 aluminum alloy during ballistic impact. *International Journal of Impact Engineering*, 38(8), 745-754.
37. Zhou, Z., Wu, G., Jiang, L., Li, R. and Xu, Z. (2014). Analysis of morphology and microstructure of B₄C/2024Al composites after 7.62 mm ballistic impact. *Materials & Design*, 63, 658-663.
38. Sudhakar, I., Reddy, G. M. and Rao, K. S. (2016). Ballistic behavior of boron carbide reinforced AA7075 aluminium alloy using friction stir processing—An experimental study and analytical approach. *Defence Technology*, 12(1), 25-31.

39. Jena, P. K., Mishra, B., Kumar, K. S. and Bhat, T. B. (2010). An experimental study on the ballistic impact behavior of some metallic armour materials against 7.62 mm deformable projectile. *Materials & Design*, 31(7), 3308-3316.
40. Demir, T., Übeyli, M. and Yıldırım, R. O. (2008). Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile. *Materials & Design*, 29(10).
41. Holmen, J. K., Johnsen, J., Jupp, S., Hopperstad, O. S. and Børvik, T. (2013). Effects of heat treatment on the ballistic properties of AA6070 aluminium alloy. *International Journal of Impact Engineering*, 57, 119-133.
42. Kalemtaş, A., Arslan, G. ve Kara, F. (2006). *Basıncsız infiltrasyonla SiC-B₄C-Al kompozitlerinin üretimi ve özellikleri*. Savtek 2006, Savunma Teknolojileri Kongresi 29-30 Haziran 2006, Ankara. 1-8.
43. Davis, J. R. (1993). *Aluminum and aluminum alloys*. Ohio: American Society For Metals International, 351-415.
44. Knowles, A. J., Jiang, X., Galano, M. and Audebert, F. (2014). Microstructure and mechanical properties of 6061 Al alloy based composites with SiC nanoparticles. *Journal of Alloys and Compounds*, 615, 401-405.
45. Sanders, R. E. (2001). Technology innovation in aluminum products. *The Journal of The Minerals*, 53(2), 21-25.
46. Polmear, I. J. (1995). *Light alloys, metallurgy of the light alloys* (Third edition) London: Metallurgy and Materials Science, 168-95.
47. Domnich, V., Reynaud, S., Haber, R. A. and Chhowalla, M. (2011). Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. *Journal of the American Ceramic Society*, 94(11), 3605-3628.
48. Thévenot, F. (1990). Boron carbide—a comprehensive review. *Journal of the European Ceramic Society*, 6(4), 205-225.
49. Adeli, R., Shirmardi, S. P. and Ahmadi, S. J. (2016). Neutron irradiation tests on B₄C/epoxy composite for neutron shielding application and the parameters assay. *Radiation Physics and Chemistry*, 127, 140-146.
50. Chung, D. D. (2010). *Composite materials: science and applications* (Second edition). London: Springer Science & Business Media. 1-30.
51. Tan, A., Teng, J., Zeng, X., Fu, D. and Zhang, H. (2017). Fabrication of aluminium matrix hybrid composites reinforced with SiC microparticles and TiB₂ nanoparticles by powder metallurgy. *Powder Metallurgy*, 1-7.
52. Jokhio, M. H., Panhwer, M. I. and Unar, M. A. (2016). Manufacturing of aluminum composite material using stir casting process. *Mehran University Research Journal Of Engineering & Technology*. 53-64

53. Tochaee, E. B., Hosseini, H. M. and Reihani, S. S. (2016). On the fracture toughness behavior of in-situ Al-Ti composites produced via mechanical alloying and hot extrusion. *Journal of Alloys and Compounds*, 681, 12-21.
54. El-Kady, O. and Fathy, A. (2014). Effect of SiC particle size on the physical and mechanical properties of extruded Al matrix nanocomposites. *Materials & Design*, 54, 348-353.
55. Torralba, J. M., Da Costa, C. E. and Velasco, F. (2003). P/M aluminum matrix composites: an overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1), 203-206.
56. Corbin, S. F. and Wilkinson, D. S. (1994). The influence of particle distribution on the mechanical response of a particulate metal matrix composite. *Acta Metallurgica et Materialia*, 42(4), 1311-1318.
57. Varol, T. (2012). *AA2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 3-6.
58. İnternet:URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fsinankoksal.cbu.edu.tr%2Fdosyalar%2Fkonu_ekleri%2Fkompozit-malzemeler-72.pdf&date=2017-02-12, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
59. Chawla, K. K. (2006). *Metal matrix composites*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1-100.
60. Atmaca, A. (2006) *Çelik Fiber Takviyeli Alüminyum Metal Matrisli Kompozit Plakaların Elasto-Plastik Gerilme Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-50.
61. Uygur, I. ve Saruhan, H. (2004). Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 167-174.
62. Berthelot, J. M. (2012). *Composite materials: mechanical behavior and structural analysis*. Berlin: Springer Science & Business Media, 1-52.
63. Vinson, J. R. and Sierakowski, R. L. (2012). *The behavior of structures composed of composite materials*. London: Springer Science & Business Media, 1-13.
64. Gupta, M. and Sharon, N. M. L. (2010). *Fundamentals of Metal Matrix Composites. Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 87-111.
65. Fridlyander, J. (2012). *Metal matrix composites*. Moscow: Springer Science & Business Media, 1-293.

66. Rosso, M. (2006). Ceramic ve metal matrix composites: routes and properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 175(1-3), 364-375.
67. Suresh, S. (2013). *Fundamentals of metal-matrix composites*, Stoneham: Butterworth-Heinemann, 3-327.
68. Shirvanimoghaddam, K., Hamim, S. U., Akbari, M. K., Fakhrhoseini, S. M., Khayyam, H., Pakseresht, A. H. and Davim, J. P. (2017). Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 92, 70-96.
69. Staab, G. (2015). *Laminar composites* (Second edition). Waltham: Butterworth-Heinemann, 1-388.
70. Çanakçı, A. (2006). *AA2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1-70.
71. Daşcılar, B. (2006). *Farklı Ekstrüzyon Hızlarında Ekstrüze Edilmiş AA6063 Alaşımlarının Yüzey ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, 1-50
72. Öztop, M. (2007). *Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi İle Alüminyum Ekstrüzyon Prosesinin İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1-78.
73. Cobden, R. and Banbury, A. (1994). *Aluminium: physical properties, characteristics and alloys*. Talat lecture, 1501(11), 144-155.
74. İnternet:URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.yildiz.edu.tr%2F%7Eakdogan%2Flessons%2Fmalzeme%2FAluminyum_ve_Aluminyum_Alasimlari.pdf&date=2017-02-12, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
75. Polmear, I. and John, D. S. (2005). *Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals* (Fourth edition). Butterworth-Heinemann, 1-235.
76. İnternet:URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kmyocorrosionlab.duzce.edu.tr%2FDokumanlar%2Ffe3ea391d-3ab8-485b-b346be285b57c274_Al%2520ve%2520Ala%25C5%259F%25C4%25B1mlar%25C4%25B1%2520Korozyon.pdf&date=2017-02-11, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
77. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Ftr.wikipedia.org%2Fwiki%2FAl%25C3%25BCminyum&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
78. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.aluminiumindustry.org%2Fen%2Fapplications-involving-aluminium.html&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.

79. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.constelium.com%2Ftechnology-center%2Faluminium-alloy-properties&date=2017-02-12>, Son Erişim Tarihi: 12.02.2017.
80. Kaufman, J. G. (2000). *Introduction to aluminium alloys and tempers*. Ohio: American Society For Metals International, 1-10.
81. Davis, J. R. (1999). *Corrosion of aluminum and aluminum alloys*. Ohio: American Society For Metals International, 1-23.
82. Starke, E. A. and Staley, J. T. (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 32(2-3), 131-172.
83. Chen, J. K., Hung, H. Y., Wang, C. F. and Tang, N. K. (2017). Effects of casting and heat treatment processes on the thermal conductivity of an Al-Si-Cu-Fe-Zn alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 105, 189-195.
84. Esmailian, M., Shakouri, M., Mottahedi, A. and Shabestari, S. G. (2015). Effect of T6 and Re-Aging Heat Treatment on Mechanical Properties of 7055 Aluminum Alloy. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 9(11), 1242-1245.
85. Afrasiabi, H. A., Khayati, G. R. and Ehteshamzadeh, M. (2014). Studying of heat treatment influence on corrosion behavior of AA6061-T6 by taguchi method. *International Journal of Engineering-Transactions C: Aspects*, 27(9), 1423.
86. Sjölander, E. and Seifeddine, S. (2010). The heat treatment of Al–Si–Cu–Mg casting alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(10), 1249-1259.
87. Garrett, R. P., Lin, J. and Dean, T. A. (2005). An investigation of the effects of solution heat treatment on mechanical properties for AA 6xxx alloys: experimentation and modelling. *International Journal of Plasticity*, 21(8), 1640-1657.
88. Demir, E. (2008). *Alüminyum Alaşımlarda Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1-80.
89. Davis, J. R. (1993). *Aluminum and aluminum alloys*. Ohio: American Society For Metals International, 275-290.
90. Hatch, J. E. (1984). *Aluminium: properties and physical metallurgy*. Ohio: American Society For Metals International, 105-194.
91. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.aluminyumsanayi.com%2Faluminyumprofilgenel.htm&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
92. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.azom.com%2Farticle.aspx%3FArticleID%3D3328&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.

93. Greenwood, N. N. and Earnshaw, A. (2012). *Chemistry of the elements* (Second edition). Burlington: Butterworth-Heinemann, 139-213.
94. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.nnt.com.tr%2Fbor%2Fbor-kullanim-alanlari.php&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
95. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.bilgiustam.com%2Fbor-madeni-nedir-onemi-ve-kullanim-alanlari-nelerdir%2F&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
96. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.boren.gov.tr%2Ftr%2Fbor%2Fkullanim-alanlari&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
97. Jones, B. R., Prunier, A. R. Jr. and Pyzik, A. J. (1999). Brake or clutch components having a ceramic-metal composite friction material. United States Patent, No: 5957251 dated 28.9.1999.
98. Rallini, M., Torre, L., Kenny, J. M. and Natali, M. (2015). Effect of boron carbide nanoparticles on the thermal stability of carbon/phenolic composites. *Polymer Composites*. 1-9.
99. Li, Y. L., Wang, W. X., Zhou, J. and Chen, H. S. (2017). Hot deformation behaviors and processing maps of B₄C/Al6061 neutron absorber composites. *Materials Characterization*, 124, 107-116.
100. Shorowordi, K. M., Laoui, T., Haseeb, A. S. M. A., Celis, J. P. and Froyen, L. (2001). *Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study*. In Proc. ICME 2001, 4th International Conference on Mechanical Engineering. 175-181.
101. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.concentric.net%2F%7Ectkang%2Fb4c.shtml&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
102. Crouch, I. G., Appleby-Thomas, G. and Hazell, P. J. (2015). A study of the penetration behaviour of mild-steel-cored ammunition against boron carbide ceramic armours. *International Journal of Impact Engineering*, 203-211.
103. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.trbor.com%2Fbor-karburun-kullanim-alanlari%2F&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 06.02.2017.
104. Suri, A. K., Subramanian, C., Sonber, J. K. and Murthy, T. C. (2010). Synthesis and consolidation of boron carbide: a review. *International Materials Reviews*, 55(1), 4-40.

105. Chen, X. G., Da Silva, M., Gougeon, P. and St-Georges, L. (2009). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6063–B₄C metal matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 518(1), 174-184.
106. Park, J. J., Hong, S. M., Lee, M. K., Rhee, C. K. and Rhee, W. H. (2015). Enhancement in the microstructure and neutron shielding efficiency of sandwich type of 6061Al–B₄C composite material via hot isostatic pressing. *Nuclear Engineering and Design*, 282, 1-7.
107. Prasad, S. V. and Asthana, R. (2004). Aluminum metal-matrix composites for automotive applications: tribological considerations. *Tribology letters*, 17(3), 445-453.
108. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.bortechnic.com%2Ftr%2Furunlerimiz%2Fbor-karbur-savunmadakullanım.html&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
109. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.boroptik.com%2Findex.php%2Ftr%2Furun%2Furun%2Fk%2F5%2Fu%2F1%2Fad%25C4%25B1%2FBor%2BKarb%25C3%25BCr%2C++Son+eri%C5%9Fim+Tarihi%3A+06.02.2017&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
110. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.nurolteknoloji.com%2Ftr%2Furunler%2Fbalistik-zirh-plakalari.html&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
111. İnternet:URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2FVikipedi%2C+http%3A%2F%2Ftr.wikipedia.org%2Fwiki%2FToz_metal&date=2017-02-11, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
112. Tomac, N., Tannessen, K. and Rasch, F. O. (1992). Machinability of particulate aluminium matrix composites. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 41(1), 55-58.
113. German, R. M. (2007). *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*. (çev. S. Sarıtaş, M. Türker, N. Durlu). Ankara: Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, (Eserin orijinali 2005’de yayımlandı), 60-80.
114. Aydın, M., Gavas, M., Yaşar, M. and Altunpak, Y. (2012). *Üretim yöntemleri ve imalat teknolojileri*. Ankara: Seçkin Yayınevi, 205-248.
115. Angelo, P. C. and Subramanian, R. (2008). *Powder metallurgy: science, technology and applications*. New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 1-120.
116. Upadhyaya, G. S. (1997). *Powder metallurgy technology*. England: Cambridge International Science Publishing, 1-100.
117. German, R. M. (2013). History of sintering: empirical phase. *Powder Metallurgy*, 56(2), 117-123.

118. İnternet:URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Ftr.wikipedia.org%2Fwiki%2FToz_metal&date=2017-02-11, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
119. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Frahmiunal.net%2Ftoz%2Fpowdermet.html&date=2017-02-12>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
120. German, R. M. (2005). *Powder metallurgy and particulate materials processing: the processes, materials, products, properties, and applications* (pp. 231-232). Princeton, NJ, USA: Metal powder industries federation.
121. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.civilengineeringhandbook.tk%2Fpowdermetallurgy%2Fintroductionvmm.html&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
122. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.civilengineeringhandbook.tk%2Fpowdermetallurgy%2Fmechanicsofpowderextrusion.html&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
123. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fw3.balikesir.edu.tr%2F%7Eay%2Flectures%2Fiy%2Flecture9.pdf&date=2017-02-11>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
124. Feng, A. H., Geng, L., Zhang, J. and Yao, C. K. (2003). Hot compressive deformation behavior of a eutectic Al–Si alloy based composite reinforced with α -Si₃N₄ whisker. *Materials chemistry and physics*, 82(3), 618-621.
125. İnternet:URL:http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.yildiz.edu.tr%2F%7Eakdogan%2Flessons%2Fimalattakompozit%2FMMK_son&date=2017-02-12, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
126. Örün, S.S. (1977). *Balistik*. Ankara: Kara Kuvvetleri Komutanlığı Yayınları, 1-3.
127. Yavuz, M. (1988). *Silah bilgisi ve atış kültürü*. Ankara: Başkent Klişe Matbaacılık Yayınları, 81-88,
128. Öztürk, A. R. (1988). *Dış balistik*. Ankara: Makine Kimya Endüstrisi Kütüphanesi, 174-178.
129. Öztürk, A. R. (1988). *Silah mekaniği ve mermilerin hedef üzerindeki etkileri*. Ankara: Makine Kimya Endüstrisi Kütüphanesi, 78-83.
130. Rosenberg, Z. and Dekel, E. (2012). *Terminal ballistics*. Berlin: Springer Heidelberg, 267-291.
131. Çinici, H. (2012). *TM Yöntemi ile Al Esaslı Bor Karbür Takviyeli Sandviç Metalik Köpük Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-80

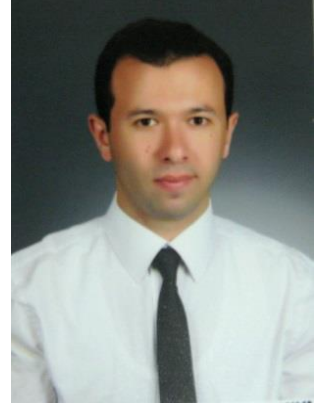
132. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.mkek.gov.tr%2Ftr%2Furunler.aspx%3FuretimYeriID%3D0%26AnaKategori%3D106%26AltKategori%3D119&date=2017-02-12>, Son Erişim Tarihi: 11.02.2017.
133. Alizadeh, M., Alizadeh, M. and Amini, R. (2013). Structural and mechanical properties of al/b₄c composites fabricated by wet attrition milling and hot extrusion. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(8), 725–730.
134. Alizadeh, A. and Hajizamani, M. (2011). Hot extrusion process effect on mechanical behavior of stir cast al based composites reinforced with mechanically milled B₄C Nanoparticles. *Journal of Materials Science & Technology*, 27(12), 1113-1119.
135. Mazahery, A. and Shabani, M. O. (2012). Study on microstructure and abrasive wear behavior of sintered Al matrix composites. *Ceramics International*, 38(5), 4263-4269.
136. Canakci, A. Arslan, F., and Varol, T. (2013). Effect of volume fraction and size of B₄C particles on production and microstructure properties of B₄C reinforced aluminium alloy composites. *Materials Science and Technology*, 29(8), 954-960.
137. Surappa, M. K. (2003). *Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities*. Sadhana, 28(1-2), 319-334.
138. Uzun, A. (2014). *B₄C Takviyeli Ve Takviyesiz Al Esaslı Köpürebilir Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmesi Ve Köpürebilirliğinin Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-80.
139. Ayvaz, M. and Çetinel, H. (2014). Production and characterization of aluminum based composites by powder metallurgy method for different matrix composition and amounth of the reinforcement. *Celal Bayar University Journal of Science*, 10(1), 45-53.
140. Zheng, R., Hao, X., Yuan, Y., Wang, Z., Ameyama, K. and Ma, C. (2013). Effect of high volume fraction of B₄C particles on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy based composites. *Journal of alloys and compounds*, 576, 291-298.
141. Chen, H. S., Wang, W. X., Li, Y. L., Zhang, P., Nie, H. H. and Wu, Q. C. (2015). The design, microstructure and tensile properties of B₄C particulate reinforced 6061Al neutron absorber composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 632, 23-29.
142. Gökmeşe, H., Taşçı, U. ve Bostan, B. (2013). AA2014 Al Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mikro Yapı Ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 1(4), 161-168.
143. Alizadeh, A., Taheri-Nassaj, E. and Hajizamani, M. (2011). Hot extrusion process effect on mechanical behavior of stir cast Al based composites reinforced with mechanically milled B₄C nanoparticles. *Journal of Materials Science & Technology*, 27(12), 1113-1119.

144. Abdollahi, A., Alizadeh, A. and Baharvandi, H. R. (2014). Dry sliding tribological behavior and mechanical properties of Al2024–5 wt .% B₄C nanocomposite produced by mechanical milling and hot extrusion. *Journal Of Materials&Design*, 55, 471–481.
145. Onoro, J., Salvador, M. D. and Cambronero, L. E. G. (2009). High-temperature mechanical properties of aluminium alloys reinforced with boron carbide particles. *Materials Science and Engineering: A*, 499(1), 421-426.
146. Friedrich, K. (2012). *Application of fracture mechanics to composite materials*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 491-542.
147. Kaw, A. K. (2005). *Mechanics of composite materials* (Second edition). Boca Raton: CRC Press, 1-59.
148. Özşahin, E. and Tolun, S. (2010). On the comparison of the ballistic response of coated aluminum plates. *Materials & Design*, 31(7), 3188-3193.
149. Holmen, J. K., Johnsen, J., Jupp, S., Hopperstad, O. S. and Børvik, T. (2013). Effects of heat treatment on the ballistic properties of AA6070 aluminium alloy. *International Journal of Impact Engineering*, 57, 119-133.
150. Flores-Johnson, E. A., Saleh, M. and Edwards, L. (2011). Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *International journal of impact engineering*, 38(12), 1022-1032.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARAKOÇ, Halil
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 12.04.1983, Samsun
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0543-571 99 27
 Faks : 0312-267 33 38
 e-mail : halil.karakoc@hacettepe.edu.tr,
halil.kkoc@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/ Metal Eğitimi	2012
Lisans	Gazi Üniversitesi / Metal Eğitimi	2009
Lise	Samsun Merkez E.M.L./ Metal Eğitimi	2001

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	H.Ü. Hacettepe A.S.O. 1. OSB	Öğretim Görevlisi
2012-2013	G.Ü. Atatürk M.Y.O.	Okutmanlık
2011-2013	G.Ü. Ostim M.Y.O.	Okutmanlık
2011-2012	G.Ü. Endüstriyel Ürün Tasarım Öğretmenliği	Okutmanlık
2010-2012	G.Ü. Metal Eğitimi Bölümü	Asistan Öğrenci

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Masa tenisi, Futbol

Projelerde Yaptığı Görevler:

1. Patlama Etkisine Karşı Koruyucu Zırh Geliştirilmesi, Tübitak Projesi, Bursiyer, , 01/01/2010 - 01/01/2011 (Ulusal)
2. Sıcak Presleme Yöntemi İle Al Köpük Malzeme Üretimi, Yükseköğretim Kurumları Tarafından Destekli Bilimsel Araştırma Projesi, Araştırmacı, , 30/06/2011 - 15/03/2013 (Ulusal)
3. Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretiminin Gerçekleştirilmesi Ve Yüzey Frezeleme Kesme Parametrelerinin Yapay Sinir Ağları İle Optimizasyonun Yapılması, Yükseköğretim Kurumları Tarafından Destekli Bilimsel Araştırma Projesi, Araştırmacı, , 30/05/2015 - 02/10/2015 (Ulusal)
4. TM Yöntemi İle B₄Cp Takviyeli AA 6061 Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi Balistik Performans Ve Raddioaktif Özelliklerinin İncelenmesi, Yükseköğretim Kurumları Tarafından Destekli Bilimsel Araştırma Projesi, Araştırmacı, , 27/10/2015 - 09/11/2016 (Ulusal)

Ödüller

1. Otomotiv Sektörü Ve Raylı Sistemlerde Çarpışma Etkilerini Azaltan, Düşük Ağırlığa Sahip Alumix 231 Esaslı B₄C Parçacık Takviyeli Farklı Geometrilere Yeni Nesil Kompozit Profil Köpüklerin Üretimi, İstanbul Demir Ve Demirdışı Metaller İhracatçıları Birliği, 2015

Eserler

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Uzun, A., Karakoc, H., Gokmen, U., Cinici, H. and Turker, M. (2016). Investigation of mechanical properties of tubular aluminum foams. *International Journal of Materials Research*, 107(11), 996-1004.
2. Karabulut, Ş., Karakoç, H. and Çıtak, R. (2016). Influence of B₄C particle reinforcement on mechanical and machining properties of Al6061/B 4 C composites. *Composites Part B: Engineering*, 101, 87-98.
3. Karabulut, Ş., Çinici, H. and Karakoç, H. (2016). Experimental Investigation and optimization of cutting force and tool wear in milling Al7075 and open-cell SiC foam composite. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(5), 1797-1812.
4. Erdem, M., Cinici, H., Gokmen, U., Karakoc, H. and Turker, M. (2016). Mechanical and ballistic properties of powder metal 7039 aluminium alloy joined by friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(1), 74-84.
5. Karabulut, Ş. and Karakoç, H. (2015). Investigation of surface roughness in the milling of Al7075 and open-cell SiC foam composite and optimization of machining parameters. *Neural Computing and Applications*, 1-15.

6. Yilbas, B. S., Karatas, C., Karakoc, H., Aleem, B. A., Khan, S. and Al-Aqeeli, N. (2015). Laser surface treatment of aluminum based composite mixed with B₄C particles. *Optics & Laser Technology*, 66, 129-137.
7. Çinici, H., Gökmen, U., Uzun A., Karakoç, H., Göde, C. and Türker, M. (2014). Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen AlSi7 köpüklerin düşük hızlı darbe enerjileri altında penetrasyon davranışının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2).



GAZİ GELECEKTİR..