

**İŞLEVSEL DERECELENDİRİLMİŞ BOR KARBÜR TAKVİYELİ AA7075  
ESASLI KOMPOZİTLERİN 7,62 mm'lik ZIRH DELİCİ MERMİLER  
KARŞISINDAKİ BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**BERTAN SARIKAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Temmuz 2013**

**ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

---

Prof. Dr. Necip CAMUŞCU

Müdü

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

---

Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŐ

Anabilim Dalı Başkanı

Bertan SARIKAN tarafından hazırlanan İŞLEVSEL DERECELENDİRİLMİŞ BOR KARBÜR TAKVİYELİ AA7075 ESASLI KOMPOZİTLERİN 7,62 mm'lik ZIRH DELİCİ MERMİLER KARŞISINDAKİ BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

---

Prof. Dr. Necip CAMUŞCU

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ömer KELEŞ

Üye : Prof. Dr. Necip CAMUŞCU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Teyfik DEMİR

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

**BERTAN SARIKAN**

**Üniversitesi** : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
**Enstitüsü** : Fen Bilimleri  
**Anabilim Dalı** : Makine Mühendisliği  
**Tez Danışmanı** : Prof. Dr. Necip CAMUŞCU  
**2. Tez Danışmanı** : Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ  
**Tez Türü ve Tarihi** : Yüksek Lisans – Temmuz 2013

**Bertan SARIKAN**

**İŞLEVSEL DERECELENDİRİLMİŞ BOR KARBÜR TAKVİYELİ AA7075  
ESASLI KOMPOZİTLERİN 7,62 mm'lik ZIRH DELİCİ MERMİLER  
KARŞISINDAKİ BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**ÖZET**

Kompozit malzemeler geleneksel malzemelere göre avantajlı özellikleri nedeniyle uzun yıllardır kullanılmaktadır. Yeni bir malzeme türü olan İşlevsel Derecelendirilmiş Malzemeler üstün özellikleriyle balistik uygulamalarda kullanılma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada; üç farklı kalınlıktaki (15, 20, 25 mm), üç katmanlı İDM'ler sıcak sıkıştırma ve sıvı fazlı sinterleme yöntemiyle üretilmiştir. Toplamda 36 adet numunenin üretimi tamamlanmıştır. Üretilen numuneler, alt katmanda AA7075, orta katmanda %10 veya %20 B<sub>4</sub>C, üst katmanda %20 veya %40 B<sub>4</sub>C takviyesi içermektedir. İki farklı bileşimdeki İDM'lere 100°C, 120°C ve 150°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta 96 saate kadar yapay yaşlandırma işlemi uygulanmış ve İDM'lerin yaşlandırma süresi-sertlik değişimleri incelenmiştir. İDM'lerin 7,62 mm'lik zırh delici mermiler karşısındaki balistik başarımları araştırılmıştır. Ayrıca üretilen numunelere üç nokta eğme deneyleri uygulanmış, numuneler balistik atışlar öncesi ve sonrası makro ve mikro incelemelere tabi tutulmuştur. Üretilen numunelerden balistik test yapılacak olanlara ve üç nokta eğme testi yapılacak numunelerin bir kısmına yaşlandırma sonucu en yüksek sertliğin elde edildiği 120°C'de 48 saate kadar yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Kalan üç nokta eğme numunelerine ise sadece 470°C'de çözeltiye alma ve su verme işlemleri uygulanmış olup, yaşlandırma ısıl işleminin, malzemenin çapraz kırılma dayanımı üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda gerçekleştirilen mikroskop incelemelerinde takviye parçacıkların ana yapı içerisinde düzgün dağılım gösterdiği fakat takviye oranı arttıkça topaklanma miktarının arttığı görülmektedir. Üretilen İDM'ler tam balistik koruma sağlayamamış fakat yapı içerisindeki B<sub>4</sub>C oranı ve malzeme kalınlığı arttıkça balistik performansın arttığı belirlenmiştir. Üç nokta eğme deneyleri sonucunda; yaşlandırma işlemi uygulanmış ve düşük takviye oranına sahip İDM'nin çapraz kırılma dayanımının en yüksek olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sıcak sıkıştırma, İşlevsel derecelendirilmiş malzeme, Balistik

**University** : TOBB University of Economics and Technology  
**Institute** : Institute of Natural and Applied Sciences  
**Science Programme** : Mechanical Engineering  
**Supervisor** : Professor Dr. Necip CAMUŞCU  
**2. Supervisor** : Professor Dr. Mustafa ÜBEYLİ  
**Degree Awarded and Date** : M.Sc. – July 2013

**Bertan SARIKAN**

**INVESTIGATION ON THE BALLISTIC PERFORMANCE OF  
FUNCTIONALLY GRADED BORON CARBIDE REINFORCED AA7075  
MATRIX COMPOSITES AGAINST 7,62 mm ARMOUR PIERCING  
PROJECTILES**

**ABSTRACT**

Composite materials are widely used in last decades for their more advantageous properties than conventional materials. Functionally Graded Material is a new type of material and have potential in ballistic applications. In this study; three-layer FGMs were produced with three different thicknesses (15, 20 and 25 mm) by hot pressing and liquid phase sintering methods. Totally, 36 specimens were produced. The top, middle and bottom layers of these materials consist of 20% or %40 B<sub>4</sub>C reinforced composite, 10% or 20% B<sub>4</sub>C reinforced composite and 7075 aluminium alloy, respectively. Artificial aging process was applied to specimens at 100°C, 120°C and 150°C up to 96 hours. Ballistic performances of these FGMs were investigated experimentally against 7,62 mm armour piercing projectiles. Three point bending tests were also applied to materials and materials investigated optically at macro and micro scale before ballistic tests. Artificial aging was applied to all of ballistic test specimens and some of three point bending test specimens at 120 °C and up to 48 hours. Other specimens were only solutionized and quenched. According to the experimental results, it was observed that reinforcements were distributed homogeneously in matrix material but it was also noticed that with the increase of reinforcement ratio in structure, some agglomeration was observed. Any of FGMs have not provide the ballistic protection. But as the increase in the thickness of material and ratio of the B<sub>4</sub>C, FGMS showed better performance ballistically. As a result of three-point bending tests it was observed that artificially aged specimens with low reinforcement ratio have highest transverse rupture strength.

Keywords: Hot pressing, Functionally graded materials, Ballistics

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocalarım Prof. Dr. Necip CAMUŞCU, Prof. Dr. Mustafa Übeyli, Yrd. Doç. Dr. Teyfik Demir, çalışma arkadaşlarım Arő. Gör. Erhan Balcı, M. Kemal Öztaş, Saman Ahmadzadeh ve yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teőekkürü bir borç bilirim. Balistik test deneylerinin gerçekleştirildiği MKEK Silah Fabrikası'na ve bu çalıőmayı 110M034 numaralı projesiyle maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1. Balistik	3
2.1.1. Terminal balistik	3
2.2. Alüminyum Alaşımları	5
2.2.1 Alüminyum alaşımlarında dayanım artırma mekanizmaları	6
2.3. Kompozit Malzemeler	8
2.3.1. Metal esaslı kompozitler	9
2.3.1.1. Alüminyum esaslı kompozitler	11
2.3.2. İşlevsel derecelendirilmiş malzemeler	13
2.4. Toz Metalurjisi	15
2.4.1. Sinterleme değişkenleri	16
2.4.2. Tozların karıştırılması	16
2.4.3. Tozların sıkıştırılması	19

2.4.4.Sinterleme	20
2.4.4.1. Katı fazlı sinterleme	21
2.4.4.2. Sıvı fazlı sinterleme	22
2.4.4.2.1. Alüminyum-Çinko alaşımlarının sıvı fazlı sinterlenmesi	23
2.4.5. Basınç destekli sinterleme	24
2.5. Zırh Malzemeleri	25
2.5.1. Zırh malzemelerinde balistik başarıımı etkileyen faktörler	28
3. DENEYSEL YÖNTEM	33
3.1 Toz Boyut Ölçümleri	33
3.2. Numune Üretimi	33
3.3. Isıl İşlem	35
3.4. Balistik Test Öncesi İç Yapıların İncelenmesi	35
3.5. Mekanik Deneyler	35
3.5.1. Sertlik deneyleri	36
3.5.2. Üç nokta eğme deneyleri	36
3.6. Balistik Deneylerin Gerçekleştirilmesi	37
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	41
4.1. Toz Boyut Ölçümleri	41
4.2. Numune Üretimi	45
4.3. Balistik Test Öncesi İç Yapıların İncelenmesi	47
4.3.1. Balistik test öncesi İDM'lere ait mikro görüntüler	48
4.4. Mekanik Deneyler	54
4.4.1 Sertlik deneyleri	54
4.4.2 Üç nokta eğme deneyleri	59



4.5. Balistik Atış Deneyleri	66
4.5.1. Balistik test sonrası İDM'lerin makro boyutta incelenmesi	67
4.5.2. Balistik test sonrası İDM'lerin mikro boyutta incelenmesi	77
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge		Sayfa
Çizelge 2.1	Alüminyum alaşımlarının kodlanması	6
Çizelge 2.2	AA7075 alaşımının içeriği	7
Çizelge 2.3	Isıl işlenebilirliklerine göre alüminyum alaşımları	8
Çizelge 3.1.	Üretilen İDM'lerin Bileşimleri	35
Çizelge 3.2.	7,62 mm'lik zırh delici merminin özellikleri	38
Çizelge 4.1	Kullanılan tozların ortalama boyutları	44
Çizelge 4.2	Yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'lerin üç nokta eğme dayanımları	57

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Farklı darbe durumlarında muhtemel kırılma şekilleri	4
Şekil 2.2 Takviye malzemesinin şekillerine göre kompozitler	10
Şekil 2.3 Toz karıştırma yöntemleri	17
Şekil 2.4 Bilyalı değirmenin gösterimi	18
Şekil 2.5 Sıkıştırmanın aşamaları	19
Şekil 2.6 Tek eksenli tek zımba ile sıkıştırmada oluşan yoğunluk dağılımı	20
Şekil 2.7 Sinterlenen iki parçacık arasındaki taşınım mekanizmaları	22
Şekil 2.8 Sıvı faz sinterlemesinin aşamaları	23
Şekil 2.9 Sıcak sıkıştırma ünitesinin şematik görünümü	25
Şekil 2.10 Darbe sonrası kopan parçalar ve koruyucu katmanın şematik görünümü	26
Şekil 2.11 Balistik atış sonrası seramiklerde konik kırılmanın gösterimi	28
Şekil 3.1 Eş zamanlı olarak gerçekleştirilen sıkıştırma ve sinterleme işlemlerinin gösterimi	33
Şekil 3.2 Üç nokta eğme numunesinin üstten görünümü	36
Şekil 3.3 Balistik atışların gerçekleştirildiği atış poligonunun şematik gösterimi	37
Şekil 3.4 Deney düzeneğine ait görüntüler a-) Genel görünüm b-) Hedef düzeneği	38
Şekil 3.5 7,62 mm'lik zırh delici merminin çizgesel gösterimi ve bileşenleri	39
Şekil 4.1 B <sub>4</sub> C tozlarının boyut dağılımı	40
Şekil 4.2 Al tozlarının boyut dağılımı	41
Şekil 4.3 Zn tozlarının boyutsal değişimi	41
Şekil 4.4 Mg tozlarının boyutsal değişimi	42
Şekil 4.5 Cu tozlarının boyutsal değişimi	43
Şekil 4.6 Üretimi tamamlanan B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait görünüm	44

Şekil 4.7	B <sub>4</sub> C takviyeli numunelere ait makro görüntüler a-) %10-20 takviyeli b-) %20-40 takviyeli	45
Şekil 4.8	AA7075 katmanına ait ışık mikroskobu görüntüsü (1000x)	47
Şekil 4.9	Şekil 4.9 AA7075 katmanına ait ışık mikroskobu görüntüsü (100x)	47
Şekil 4.10	Şekil 4.10 AA7075 katmanına ait SEM görüntüsü (500x)	47
Şekil 4.11	AA7075 ve %10 B <sub>4</sub> C takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesinin ışık mikroskobu görüntüsü (100x)	48
Şekil 4.12	%10 B <sub>4</sub> C takviyeli katmana ait ışık mikroskobu görüntüsü	49
Şekil 4.13	%10 ve %20 B <sub>4</sub> C takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesinin ışık mikroskobu görüntüsü (200x)	49
Şekil 4.14	AA 7075 ve %20 B <sub>4</sub> C takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesinin ışık mikroskobu görüntüsü (200x)	50
Şekil 4.15	%20 ve %40 B <sub>4</sub> C takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesinin ışık mikroskobu görüntüsü (200x)	50
Şekil 4.16	%20 B <sub>4</sub> C takviyeli katmana ait ışık mikroskobu görüntüsü (100x)	51
Şekil 4.17	%40 B <sub>4</sub> C takviyeli katmana ait ışık mikroskobu görüntüsü (500x)	51
Şekil 4.18	%20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'nin 100°C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi	53
Şekil 4.19	%40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'nin 100 °C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi	54
Şekil 4.20	%20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'nin 120°C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi	54
Şekil 4.21	%40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'nin 120°C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi	55
Şekil 4.22	%20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'nin 150°C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi	56
Şekil 4.23	%40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'nin 150°C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi	57
Şekil 4.24	Yaşlandırılmamış %20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	59
Şekil 4.25	%20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'nin yaşlandırılmamış numunenin üç nokta eğme testi sonrası görünümü	59
Şekil 4.26	Yaşlandırılmamış %40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	60
Şekil 4.27	%40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli yaşlandırılmamış İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü	60

Şekil 4.28 Yaşlandırılmış %20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	61
Şekil 4.29 %20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli yaşlandırılmış İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü	62
Şekil 4.30 Yaşlandırılmış %40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	63
Şekil 4.31 Yaşlandırılmış %40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	63
Şekil 4.32 Balistik atışı gerçekleştirilecek olan B <sub>4</sub> C takviyeli numunelerin gösterimi	65
Şekil 4.33 Metallerde görülen hasar mekanizması çeşitleri a) sünek delinme b) çukur tipi delinme c) zımba etkisiyle delinme	65
Şekil 4.34 %20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli 15mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi	66
Şekil 4.35 %20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli 20 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi	67
Şekil 4.36 20 mm kalınlıktaki %20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'nin balistik test sonrası kesit görüntüsü	68
Şekil 4.37 %20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli 25 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi	69
Şekil 4.38 %20-10 B <sub>4</sub> C takviyeli 25 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi	70
Şekil 4.39 %40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli 15 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi	71
Şekil 4.40 %40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli 20 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi	72
Şekil 4.41 %40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli 20 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi girişi b-)mermi çıkışı	73
Şekil 4.42 %40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli 25 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi girişi b-)mermi çıkışı	74

Şekil 4.43 %40-20 B <sub>4</sub> C takviyeli 25 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi girişi b-) mermi çıkışı	74
Şekil 4.44 Düşük B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'nin alt katmanının balistik test sonrası mikro görüntüsü	76
Şekil 4.45 Düşük B <sub>4</sub> C takviyeli İDM'nin alt katmanının balistik test sonrası mikro görüntüsü	77

## KISALTMALAR

### Kısaltmalar Açıklama

AA	Alüminyum alaşımları
GP	Guinier-Preston
BTAEK	Bor karbür takviyeli alüminyum esaslı kompozitler
MEK	Metal esaslı kompozitler
İDM	İşlevsel derecelendirilmiş malzemeler

## 1. GİRİŞ

İnsanlar yüzyıllardır savaşlarda kendilerini korumak amacıyla farklı yöntemler izlemişlerdir. Zırh malzemeleri ile korunma, bu korunma yöntemlerinin en önemlilerinden bir tanesidir. Geçmiş yüzyıllarda, zırh malzemeleri üretimlerinde metalin yanı sıra bir çok malzeme kullanılmıştır. Bunlar arasında; deri bir yelek, ağaç zırhı, ağaç - çelik ve deri zırhı, hindistan cevizi lifinden ve balık derisinden yapılmış zırhlar gösterilebilir [1].

Gelişen teknoloji ile birlikte silahların gücünün artması, zorunlu olarak zırh teknolojisinde de gelişmeleri beraberinde getirmiş ve metal zırhların kullanımı yaygınlaşmıştır. Bu zırhlar, ilk zamanlar örgü şeklinde tasarlanmış daha sonra plaka zırhlara geçiş yapılmıştır. Metal zırhlar arasında özellikle çelik geniş bir veritabanına sahip olması ve iyi mekanik özellikleri nedeniyle çok geniş kullanım alanı bulmuş olup ve halen kullanılmaya devam etmektedir. Günümüzde metallerin nispeten yüksek yoğunluklu olması nedeniyle bunların yerlerini büyük ölçüde kompozit zırhlar almıştır. Böylece istenilen özelliklerde ve daha hafif zırh tasarımları yapılabilmüş ve zırhı taşıyan personel ve aracın hareket kabiliyeti artırılmıştır [2].

Kompozit malzemelerde en yaygın zırh modellerinden biri önde sert bir katmanın ve arkada onu destekleyen tok bir katmanın olduğu katmanlı yapılardır [3]. Fakat katmanlı kompozitlerin çoklu atışlarında öndeki sert katman dağılmakta ve bütüncül yapı muhafaza edilememektedir. Bu duruma çözüm olarak İDM'lerin zırh malzemesi olarak kullanımları gündeme gelmiştir. İDM'lerde takviye ana yapı oranları değiştirilerek, tek bir yapı içerisinde farklı mekanik özelliklere sahip bölgeler ya da katmanlar oluşturulmaktadır [4].

Bu çalışmada B<sub>4</sub>C takviyeli AA7075 esaslı üç katmanlı İDM'ler, üç farklı kalınlık ve iki farklı bileşim için toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş, üretilen malzemelere yaşlandırma işleminden sonra MKEK Silah Fabrikası'nda 7.62 mm'lik zırh delici



mermiler karşısında balistik test yapılmış ve malzemelerin kırılma davranışları incelenmiştir. Çalışma öncesinde kullanılacak tozların boyutları lazer parçacık boyut ölçümü yöntemiyle ölçülmüştür. Malzemelere 100°C, 120°C ve 150°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta 96 saate kadar yaşlandırma işlemi uygulanarak iki farklı bileşimdeki malzemenin yaşlandırma-sertlik eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca üretilen numunelere iki farklı ısıl işlem koşulunda üç nokta eğme deneyleri yapılmış ve yaşlandırma işleminin ve takviye oranının İDM'lerin çapraz kırılma dayanımlarına etkisi araştırılmıştır. Balistik test öncesi ve sonrası makro ve mikro incelemeler gerçekleştirilmiştir.

## **2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI**

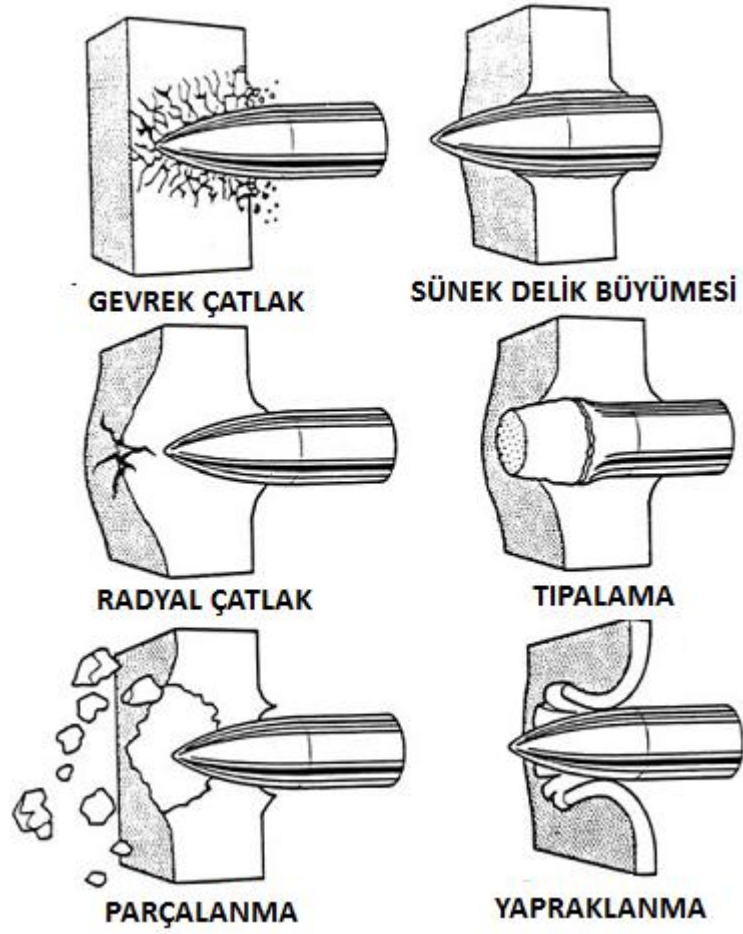
### **2.1. Balistik**

Balistik; mermi hareketini ve bu hareketi etkileyen koşulları inceleyen bilim dalı olup genel olarak iç, dış ve terminal olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilmektedir. İç balistik; fişek içerisindeki sevk barutunun yanması sonucu ortaya çıkan gazın basıncı, sıcaklığı ve hacmi ile ilgilenmekte olup merminin silah içerisindeki hareketini incelemektedir. Dış balistik ise mermi hızı, ağırlığı, şekli, çapı, hava direnci, yer çekimi gibi özellikleri göz önünde bulundurarak, merminin silah içerisinden ayrılıp hedefe ulaşana kadar geçen süredeki hareketi ile ilgilenir. Çalışmamızın temelini oluşturan terminal balistik konusu ayrı bir başlık altında daha ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

#### **2.1.1. Terminal balistik**

Terminal balistik merminin zırh üzerindeki ya da zırhın mermi üzerindeki darbe etkisini inceleyen bir mühendislik dalıdır. Yapılan çalışmalarda genellikle askeri personel, zırhlı taşıt ve binaları hedef alan ve 0,5 ve 2,0 km/s atış hızına sahip silah ve tüfeklerin etkileri araştırılır. 2 ve 8 km/s atış hızına sahip aşırı yüksek hızlı mermiler de terminal balistik üzerine çalışan mühendisler için ayrı bir çalışma konusudur. Zırh malzemesi tasarımı deneylerinde malzemeler yarı sonsuz, orta ve ince kalınlıkta olmak üzere üç kalınlıkta sınıflandırılırlar. Yarı sonsuz kalınlıktaki hedeflerde, hedefin arka bölümü mermiden etkilenmez ve böylece mermi giriş derinliği, oluşan delik boyut ve hacmi ile hedef içerisinde kalan mermi üzerinde incelemeler yapılır. Yarı sonsuz kalınlıkta yapılan deneylerde genellikle gerçek bir zırh tasarımından ziyade mermi ve hedef arasındaki fiziksel özellikler incelenir. Orta kalınlıktaki zırh deneylerinde mermi hedefi tamamıyla geçemez fakat hedefin arka bölümü mermiden etkilenir. Zırh tasarımcıları mermi ve orta kalınlıktaki zırhların etkileşimlerini inceleyerek gerçek bir zırh tasarımı gerçekleştirebilmektedirler. Fakat bu aşamada mermi ve hedef arasındaki etkileşimler oldukça karmaşıktır. Şekil 2.1'de

orta kalınlıktaki 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 [5].



**Şekil 2.1** Farklı darbe durumlarında muhtemel kırılma şekilleri [5]

## 2.2. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum yer kabuğunda 3. en çok miktarda bulunan element olmanın yanı sıra en çok bulunan metalik elementtir. Son 50 yıldır endüstriyel uygulamalarda demirden sonra en çok kullanılan malzemedir. Alüminyum saf haldeyken  $2698 \text{ kg/m}^3$  ile çeliğin üçte biri yoğunluğa, bakır gibi yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine, yüksek korozyon direnci gibi özelliklere sahip olması nedeniyle oldukça yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Saf alüminyumun erime sıcaklığının  $660 \text{ }^\circ\text{C}$  gibi göreceli olarak düşük bir sıcaklık olması üretimin daha düşük maliyetlerde gerçekleştirilmesini sağlamaktadır [6].

Alüminyum alaşımları içerisinde bulunan ana alaşım elementine göre kodlanmaktadır. Ana alaşım elementi yapı içerisinde alüminyumdan sonra bulunan en fazla bulunan elementtir ve alaşımın mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çizelge 2.1’de alüminyum alaşımalarının ana alaşım elementine göre kodlanması gösterilmiştir [7, 8].

Çizelge 2.1 Alüminyum alaşımalarının kodlanması [7, 8]

Ana alaşım elementi	Kodlama
Al, %99 (en az)	1xxx
Bakır (Cu)	2xxx
Mangan (Mn)	3xxx
Silisyum (Si)	4xxx
Magnezyum (Mg)	5xxx
Magnezyum + Silisyum (Mg+Si)	6xxx
Çinko (Zn)	7xxx
Diğer	8xxx

7xxx serisi alüminyum alaşımları düşük yoğunluk, yüksek dayanım, süneklik, tokluk, yorulma ve korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle yapısal uygulamalarda ve havacılıkta sıkça kullanılmaktadır [9].

Çalışmamızda kullanılan alüminyum 7075 alaşımı içerisinde yüksek oranda Zn olmasının yanı sıra Mg ve Cu da önemli oranlarda mevcuttur. AA7075 alaşımının ağırlıkça yüzde Çizelge 2.2’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 2.2 AA7075 alaşımının içeriği [7]

Element	Ağırlıkça yüzde (%)
Zn	5,1 – 6,1
Mg	2,1 – 2,9
Cu	1,2 – 2,0
Si	0,5
Fe	0,4
Cr	0,18 – 0,28

### 2.2.1 Alüminyum alaşımlarında dayanım artırma mekanizmaları

Metallerin dayanımlarını ve mekanik özelliklerini artırmak amacıyla bir takım ısıt işlemler uygulanabilmektedir. Alüminyum alaşımlarının dayanım ve sertlik gibi mekanik özellikleri çökelme sertleşmesi işlemiyle artırılabilir.

Çökelme sertleşmesi; ana faz içerisinde yoğun ve ince çökeltiler oluşturarak dislokasyon hareketinin engellenmesi esasına dayanan bir dayanım artırma mekanizmasıdır. Çökelme sertleşmesi mekanizması çözelti ısıt işlemi, su verme ve yaşlandırma olmak üzere 3 aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada alaşım elementlerinin ana yapı içerisinde çözünebilmesi için, yapı gerekli sıcaklığa

çıkarılmakta ve bu sıcaklıkta bir süre beklenerek katı çözeltili oluşumu sağlanmaktadır. Çözeltili oluşumu sağlandıktan sonra yapıya oda sıcaklığında su verilerek aşırı doymuş katı çözeltili elde edilmektedir ve yapı daha kararsız ve yüksek enerjili bir konuma geçmektedir. Üçüncü ve son aşama olarak yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Yaşlandırma işlemiyle birlikte su verme sonrası elde edilen aşırı doymuş çözeltiler bozunarak daha düşük enerji seviyesinde yarı kararlı duruma ya da denge fazlarına geçmektedir. Yaşlandırma işlemi yapay ve doğal olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Doğal yaşlandırma işlemi oda sıcaklığında ve uzun sürelerde gerçekleştirilmekte, yapay yaşlandırma işlemi ise yükseltilmiş sıcaklarda ve nispeten kısa sürelerde gerçekleştirilmektedir. Yaşlandırma işlemi sonucunda ince ve dağılmış çökelti oluşarak dislokasyon hareketi engellenmiş ve dayanım ve sertlik artışı sağlanmış olmaktadır. Alüminyum alaşımları yapısındaki alaşım elementlerine göre ısıl işlemi uygulanabilenler ve uygulanamayanlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Çizelge 2.3’de ısıl işlenebilirliklerine göre alüminyum alaşımları verilmiştir.

Çizelge 2.3 Isıl işlenebilirliklerine göre alüminyum alaşımları [8-10]

<b>Isıl işlenebilen</b>	<b>Isıl İşlenemeyen</b>
2xxx	1xxx
4xxx	3xxx
6xxx	5xxx
7xxx	

AA7075 alaşımı içeriğinde bulunan yüksek çinko ve magnezyumun alüminyum içerisinde yüksek oranda çözünmesi, yüksek yoğunlukta çökelti oluşumu ve dolayısıyla yüksek dayanım değerlerine ulaşılmasına imkan sağlamaktadır [11]. AA 7075 için çökelti dizisi karmaşık olmasına rağmen genel kabul gören çökelti dizisi aşağıdaki gibidir [12];

Aşırı doymuş katı çözelti  $\longrightarrow$  GP bölgeleri  $\longrightarrow$   $\eta'$   $\longrightarrow$   $\eta$ -MgZn<sub>2</sub>

Sarıkan ve arkadaşları [13], yapay yaşlandırmanın sıcak sıkıştırma yöntemiyle üretilmiş SiC Takviyeli AA7075 alaşımı içeren İşlevsel Derecelendirilmiş Malzemenin sertliği üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda en yüksek sertliğin, en yüksek seramik takviyesine sahip katmanda 120°C sıcaklıkta ve 48-66 saat aralığında elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca seramik takviyesinin AA7075 alaşımının yaşlanma karakteristiğini değiştirmedeği yalnızca ulaşılan sertlik seviyesini değiştirdiği görülmüştür.

Hadianfard ve arkadaşları [14], %20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli ve takviyesiz AA6061 alaşımının 175 °C'de 68 saate kadar yaşlandırılması sonucu takviye parçacıkların AA6061 alaşımına etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda takviyeli ve takviyesiz numunelerin her ikisinde yaşlandırma eğiliminin benzer olduğu, takviye parçacıkların çekirdeklenme ve çökelti oluşum oranını artırdığı görülmüş ayrıca yapıdaki takviye parçacıkların yapıdaki  $\beta'$  ve  $\beta$  fazlarının hacimce oranını artırdığı GP bölgeleri oranını ise azalttığı görülmüştür.

### 2.3 Kompozit Malzemeler

Günümüzde, havacılık, savunma sanayi, biyo-mühendislik ve taşıma endüstrisi gibi alanlarda sıkça kullanılan kompozit malzemeler, geleneksel malzemelerde elde edilemeyen ayrıcalıklı özelliklere sahip olması sebebiyle ileri teknoloji uygulamalarında sıkça kullanılan bir malzeme türüdür. Kompozit malzemeler, istenen amaç için tek başına uygun olmayan iki veya daha fazla malzemenin belirli şartlar ve oranlarda makro boyutta bir araya getirilmesiyle elde edilmektedir. Ayrıca kompozit malzemelerin; geleneksel malzemelere göre daha düşük yoğunlukta olması nedeniyle motorlu araçlarda daha düşük yakıt tüketimi ve daha yüksek performans sağlaması, daha yüksek yorulma direncine sahip olması nedeniyle ürünlerin daha

uzun süreler kullanılması gibi avantajlar sağlaması bu malzemelerin çok geniş kullanım alanları bulmasına neden olmuştur [15, 16].

Kompozit malzemelerin özellikleri, üretim yöntemlerine, takviye ve ana yapı malzemelerinin özellikleri ve oranlarına, takviye malzemesinin şekline bağlı olarak oluşur. Kompozit malzemeler takviye malzemelerinin şekline göre parçacık takviyeli, elyaf takviyeli ve katmanlı kompozitler ve ana yapı malzemelerine göre genel olarak polimer, metal ve seramik esaslı olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilmektedir [17].

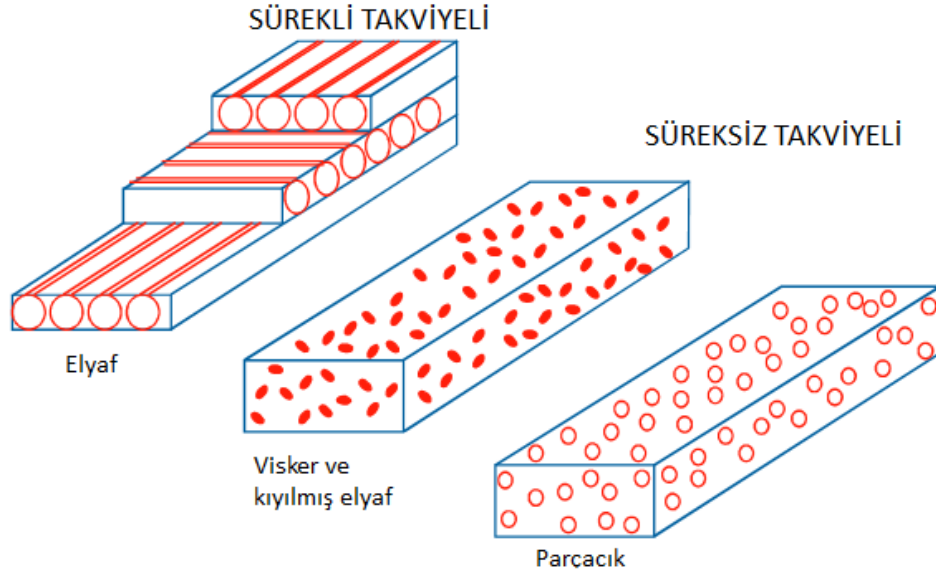
### **2.3.1 Metal esaslı kompozitler**

Metal esaslı kompozitler düşük yoğunluk, yüksek elastiklik modülü, yüksek dayanım, daha iyi yüksek sıcaklık özellikleri, düşük ısıl genleşme, daha düşük aşınma direnci gibi özellikleriyle monolitik metallere göre birçok avantaj sağlamaktadır. MMK'ler döküm, toz metalurjisi, basınçlı sıvı-metal süzdürme tekniği, derin çekme ve haddeleme gibi yöntemlerle sıcak ve soğuk olarak şekillendirilebilirler [18].

MMK'lerde ana yapı her zaman metal malzemedan oluşmakta olup, bu malzemeler genellikle saf halde değil, alaşım olarak yapıda bulunmaktadır. Ana yapı malzemesi olarak alüminyum, titanyum, bakır, nikel, magnezyum ve çelik kullanılabilir. Anayapı malzemesinin kompozit içerisindeki görevi üzerine gelen yükün takviye malzemesine iletilmesi ve bütüncül yapının korunabilmesini sağlamaktır. Bir metalin anayapı malzemesi olabilmesi için takviye malzemesi ile iyi bağ yapabilmesi, takviye malzemesi ile ısıl genleşme katsayılarının çok farklı olmaması, düşük yoğunluğa sahip olması ve üstün mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Örnek olarak magnezyum, alüminyum ve titanyuma göre daha düşük yoğunluğa sahip bir malzeme olmasına rağmen atmosferik ortamda oksit oluşturması ve



dolayısıyla üretim aşamasında yaşanabilecek zorluklardan dolayı ana yapı malzemesi olarak pek fazla tercih edilmemektedir. Berilyum yapısal uygulamalarda kullanılan en düşük yoğunluklu malzeme ve çelikten bile daha yüksek çekme dayanımına sahip olmasına rağmen yüksek gevrekliği nedeniyle ana yapı malzemesi olarak kullanılamamaktadır. Nikel ve kobalt super alaşımları ana yapı malzemesi olarak kullanılabilmekte fakat yüksek sıcaklıklarda oksit oluşturmaları nedeniyle tercih edilmemektedir. MMK’lerde takviye malzemesi olarak genellikle parçacık, sürekli ve süreksiz elyaf, tel, visker kullanılmaktadır. Kompozitlerin takviye türlerine göre gösterimi Şekil 2.2’de verilmiştir. Elyaf takviyeli kompozitlerde yükün önemli bir bölümü takviye malzemeleri tarafından karşılanmakta iken, parçacık ve visker takviyeli kompozitlerde takviye malzemesi yapının dayanımını ve rijitliğini artırmak amacıyla kullanılır. Metal matriks kompozitlerde takviye malzemesi olarak seramikler yüksek sıcaklıklarda üstün dayanım ve tokluk özelliklerine sahip olması nedeniyle, karbür, nitrür ve oksit halde çok sık kullanım alanı bulmaktadır [19, 20].



Şekil 2.2 Takviye malzemesinin şekillerine göre kompozitler [21]

### 2.3.1.1 Alüminyum esaslı kompozitler

AEK'ler birçok malzemede aranan düşük yoğunluk özelliğinin yanı sıra yüksek dayanım, süneklik, iyi elektrik ve ısı iletkenliği, iyi korozyon dayanımı, çökeltme sertleşmesi ile mekanik özelliklerin iyileştirilebilmesi, iyi sönümlenme kabiliyeti, iyi aşınma direnci ve düşük termal genleşme katsayısı gibi özellikleri sayesinde, otomobil, havacılık ve uzay endüstrisinde sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi düşük yoğunluklu alaşımlarla kıyaslandığında daha ucuzdur [22, 23].

Alüminyum esaslı kompozitlerde mekanik özellikler büyük ölçüde anayapı ve takviye malzemesi ara yüzeyine bağlıdır. Bu nedenle; düşük basınçta sıvı fazlı bir üretim yöntemi izleniyorsa ıslatmanın düzgün gerçekleşmesi, anayapı ve takviye malzemesi ara yüzeyinde reaksiyonlar gerçekleşmesinin ve dolayısıyla gevrek yeni fazların oluşmasının önlenmesi, ana yapı ve takviye malzemesinin iyi bağ yapması sağlanmalıdır. Seramik parçacıklar, alüminyum esaslı kompozitlerde en çok kullanılan takviye malzemeleridir. Takviye malzemesi olarak en sık kullanılan seramik parçacıklar  $B_4C$ ,  $SiC$ ,  $Si_3N_4$  ve  $Al_2O_3$ 'dir.

AEK'lerin üretim yöntemleri; katı halde, sıvı halde ve çökeltme olmak üzere üç kategoride incelenebilmektedir. Bu yöntemler içerisinde en yaygın olanı, katı hal üretim yöntemlerinden biri olan toz metalurjisi yöntemidir. Toz metalurjisi tekniği; daha çok ana yapının erime sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda kullanılır ve döküm yönteminde oluşan segregasyona rastlanmaması nedeniyle daha iyi mekanik özellikler elde edilebilmesi açısından avantajlı görünmektedir [24, 25].

Parçacık takviyeli kompozitlerde malzeme boyunca aynı özellikler elde edebilmek için, takviye malzemesinin ana yapı içerisinde homojen karışmış olması gerekmektedir. Toz metalurjisi ile üretimin bir aşaması olan karıştırma aşaması, ana

yapı içerisinde homojen parçacık dağılımı elde edilebilmesi açısından anahtar görev üstlenmektedir. Homojen parçacık dağılımı sinterleme sonrası daha yüksek yoğunluk değerlerine ulaşılmasına ve dolayısıyla daha yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesine neden olmaktadır [26].

SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kadar yaygın olarak kullanılmamasına karşın B<sub>4</sub>C malzemesi; düşük yoğunluk, yüksek sertlik, yüksek nötron sönümlene kabiliyeti, yüksek elastikiyet katsayısı, yüksek aşınma direnci ve nötron sönümlene kabiliyeti ile aşınmaya dayanıklı makine parçası, zırh malzemesi, balistik füze yakıtı, nükleer reaktörlerde radyasyondan korunma amaçlı ve yakıt kontrol çubuğu olarak kullanılmaktadır. Bor karbür rombohedral kristal yapısına sahip olup bilinen en sert üçüncü malzeme olup 2.52 g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa ve 2450 °C erime sıcaklığına sahiptir. Elektriksel olarak yarı-iletken özelliği olup, kimyasal olarak yüksek kararlılığa sahiptir [27, 28].

Bunların yanı sıra bor karbür sünek bir malzemeyle desteklendiğinde balistik uygulamalarda yüksek başarımlı sağlamaktadır. Tüm seramiklerde görüldüğü gibi yapıdaki gözenek miktarı malzemenin çatlak dayanımını düşürmektedir. Balistik uygulamalarda yapıdaki gözenek ve zayıf ikinci fazlar çekme çatlakları yaratarak balistik başarımlı düşürmektedir. Bu nedenle yüksek performans gerektiren uygulamalarda bor karbürün yoğunluğu teorik yoğunluğa yakın olacak şekilde üretilmelidir [29, 30, 31].

Bor karbür takviyeli alüminyum esaslı kompozitler hakkında literatürde sınırlı miktarda bilgi bulunmakta ve yapılan çalışmalar çoğunluklu olarak ıslatılabilirlik ve B<sub>4</sub>C-Al arasındaki kimyasal reaksiyonlar konuları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Yapılan araştırmalarda BKTAEK'lerin toz metalurjisi yöntemiyle üretilebildiği ve SiC parçacık takviyeli malzemelere göre daha üstün mekanik özellikler elde edildiği görülmüştür [26].

Gomez ve arkadaşları [32] yaptıkları çalışmada, B<sub>4</sub>C ve SiC takviyeli AA6061 alaşımının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda artan takviye oranıyla birlikte elde edilen yoğunluk değerinin azaldığı, %10 takviye oranında her iki takviye malzemesi için karışımın homojen sağlanabildiği, üretilen numunelerde herhangi bir arayüzey reaksiyonunun görülmediği, T6 ısıl işlemi sonucu sertlik ve dayanım özelliklerinde artış görüldüğü, artan takviye oranının aşınma kaybını azalttığı görülmüştür. Ayrıca B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitin SiC takviyeliye kıyasla, dayanım, sertlik, süneklik ve aşınma direnci özelliklerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Orhan ve arkadaşları [18] yaptıkları çalışmada; %99 saflıkta alüminyum esaslı farklı oranlarda B<sub>4</sub>C parçacıkları ile takviyelendirilmiş kompozitlerin sıcak sıkıştırma yöntemiyle üretilebilirliğini ve yapıdaki B<sub>4</sub>C takviyesine bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişimi belirlemişlerdir. Çalışma sonucunda ağırlıkça %30 oranına kadar takviyelendirilmiş parçacıkların Al matris içerisinde homojen dağılım gösterdiği, anayapı içerisinde takviye oranı arttıkça mikrosertlik değerlerinde artış görüldüğü ve B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin sıcak sıkıştırma yöntemiyle üretilebildiği belirlenmiştir.

### **2.3.2 İşlevsel derecelendirilmiş malzemeler (İDM)**

Kompozit yapılarda, yapıyı oluşturan malzemelerin ısıl genleşme katsayılarının farklı olması yüksek sıcaklık uygulamalarında katmanlar arası ayrışmaya neden olmaktadır. Bu durumun önünde geçebilmek için Japon bilim adamları tarafından 1980'li yıllarda kompozit yüzeyine kaplama yapılarak ısıl bariyer oluşturulmuş ve malzemenin bütüncül yapısının korunması sağlanmıştır. Elde edilen bu malzemeye İDM denilmiştir. İDM'lerde kompozit malzemelerden farklı olarak daha düzgün ara yüzey elde edilebilmekte, malzeme yapı ve bileşimi malzeme içerisinde kademeli

olarak değişmekte ve bu sayede istenilen özelliklerde malzeme elde edilebilmektedir [33]. Bahsedilen özellikleriyle İDM'ler yeni bir malzeme türü olup, kompozit ve malzemelerden ayrı bir kategoride yer almaktadır [34].

İDM'ler uzay taşıtları, gelecek nesil fizyon reaktörlerinde, ses ve görüntü kayıt cihazlarında, piezoelektrik ve termoelektrik aletlerde, ışık algılayıcılarında, diş implant malzemelerinde, metal/seramik zırh malzemeleri gibi bir çok alanda kullanım alanı bulmaktadır [35, 36].

En sık kullanılan İDM türü olarak bir metalden bir seramiğe geçişin olduğu yapılar gösterilebilir. Metallerin tokluk ve işlenebilirlik özellikleriyle seramiklerin yüksek sertlik, basma dayanımı ve aşınma dirençleri gibi özellikler birleştirilerek istenen özellikte malzemeler ortaya çıkmaktadır. İDM üretimleri kuru ve yaş metod olmak üzere iki farklı teknikle yapılabilmektedir. Kuru metodlar; toz metalurjisi, plazma spreyle kaplama, SHS (self propagating high-temperature synthesis), fiziksel ve kimyasal buhar yoğuşturma (CVD, PVD), pervane kuru karıştırma (IDB) tekniklerinden, yaş metodlar ise; endüksiyonla yığıma, slip döküm, santrifüj döküm tekniklerinden oluşmaktadır. Adı geçen üretim teknikleri içerisinde toz metalurjisi yöntemi, kolay şekil verme, düşük maliyet, daha basit işlem teçhizatları, daha az enerji tüketimi, daha kısa işlem süreleri gibi özelliklerle diğer yöntemlere göre avantajlı konumdadır [37-39].

Lin ve arkadaşları [40], işlevsel derecelendirilmiş çok katmanlı SiC takviyeli Al 2124 kompozitini toz metalurjisi yöntemiyle üretmiş, İDM'nin geleneksel katmanlı kompozit malzemeye göre mekanik özelliklerini ve elde edilen toz karışımına titreşim uygulanmasının mekanik özelliklere ve katman geçişlerine etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda karışımlara titreşim uygulanmasının yüksek SiC takviyeli katmanlarda topaklanmayı azaltarak daha homojen bir SiC dağılımı sağladığı fakat katmanlar arası geçişin düzgün olmadığı, SiC oranı arttıkça sertlik

değerlerinin arttığı fakat yüksek SiC içeriğine sahip olan katmanlarda artan gözeneklilik ve topaklanma nedeniyle sertlik artış oranının düşük olduğu görülmüştür.

## 2.4 Toz Metalurjisi

Metal tozlarının bir kalıp içerisinde sıkıştırılarak istenilen şekle uygun malzemeler oluşturulması tarih öncesi zamanlardan beridir bilinen bir teknolojidir. TM, tozların işlemde geçirilerek yararlı mühendislik malzemelerine dönüştürülmesi ile ilgilenen bir imalat yöntemidir. TM'de malzeme içerisindeki gözenekler ve fazlar istenildiği gibi konumlandırılabilen olup döküm yönteminde olduğu gibi net şekilli parça üretimine imkan tanınmakta ve düşük sıcaklıklarda ergiyen metallere uygulanan döküm yönteminden farklı olarak yüksek sıcaklık seramikleri, bazı polimerler, bakırlı çelikler, refrakter metaller gibi çok çeşitli malzeme üretimi mümkündür. TM ile üretimin döküm işlemine göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi ve üretim sonrası talaşlı imalat gibi ikincil işlemlere çoğu zaman gerek duyulmaması toz metalurjisinin diğer avantajları arasında gösterilebilmektedir. TM damgalama ve talaşlı imalat vb. gibi diğer üretim yöntemlerine göre de bir çok avantaj sağlamaktadır. Ayrıca ucuz donanım ve düşük çevrim süreleri toz metalurjisi yöntemini diğer üretim yöntemleri arasında cazip kılmaktadır. [41, 42]. Toz metalurjisi genel olarak;

- Karıştırma
- Ön şekillendirme
- Sinterleme
- Son işlemler

aşamalarından oluşmaktadır. Fakat bir çok üretim yönteminde olduğu gibi TM'de de farklı ürün grupları için üretim aşamaları değişkenlik gösterebilmektedir. Örnek olarak; şekil verme işlemi tek eksenli ya da izostatik sıkıştırma işlemi ile

gerçekleştirilebilmektedir. Kullanılan şekil verme işlemine göre sinterleme koşulları ve sinterleme sonrası ürün özellikleri farklılık gösterebilmektedir [43].

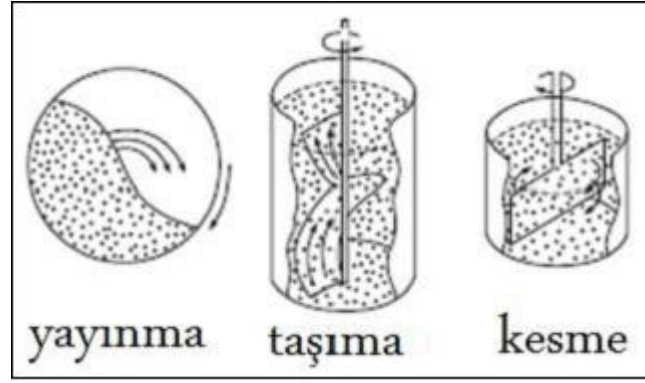
#### **2.4.1 Sinterleme değişkenleri**

Sinterleme değişkenleri, malzeme ve işlem değişkenleri olmak üzere iki farklı sınıfta incelenmektedir. Malzeme değişkenleri olarak genellikle; kullanılan tozların kimyasal bileşimi, boyutu, şekli, boyut dağılımı, topaklanma derecesi gibi özellikler dikkate alınır. Bu özellikler tozların sıkıştırılabilirliğini ve sinterlenebilirliğini (yoğunlaşma ve tane büyümesi) önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca iki farklı tozun karışımından elde edilen yapılarda, parçacıkların homojen karışımının nihai ürünün özelliklerinde önemli ölçüde etkisi olduğu bilinmektedir. Homojen toz karışımı elde edebilmek için genellikle mekanik karıştırma işlemi uygulansa da bunun yanı sıra kimyasal karıştırma işlemi gibi diğer yöntemler de karışımın türüne göre uygulanabilmektedir. İşlem değişkenleri ise sinterleme esnasında önemli olan sıcaklık, zaman, sinterleme atmosferi, basınç, ısıtma ve soğutma hızı gibi değişkenlerden oluşmaktadır [44].

#### **2.4.2 Tozların karıştırılması**

Karıştırma işlemi yeni alaşımların oluşturulması, alaşımın içeriğinde tozların homojen dağılımını sağlamak, toz içerisindeki nem ve taşıma şartlarına bağlı olarak oluşan segregasyonun önlenmesi, eğer gerekliyse sıkıştırma için yağlayıcı eklenmesi ve şekillendirme için toz-bağlayıcı eklenmesi gibi ihtiyaçların karşılanması doğrultusunda gereklidir. Bunlara ek olarak ortamdaki nem oranı nedeniyle oluşabilecek topaklanmalar, karıştırma öncesi düşük sıcaklıklarda yapılan kurutma işlemiyle önlenebilmektedir. Karıştırma işlemi tozlar kuru haldeyken ya da bir sıvı ortamında yapılabilmektedir. Toz karışımlarının homojenliğini artırmak ve topaklanmayı önlemek amacıyla alkol gibi sinterlemeye etkisi olmayacak sıvılar

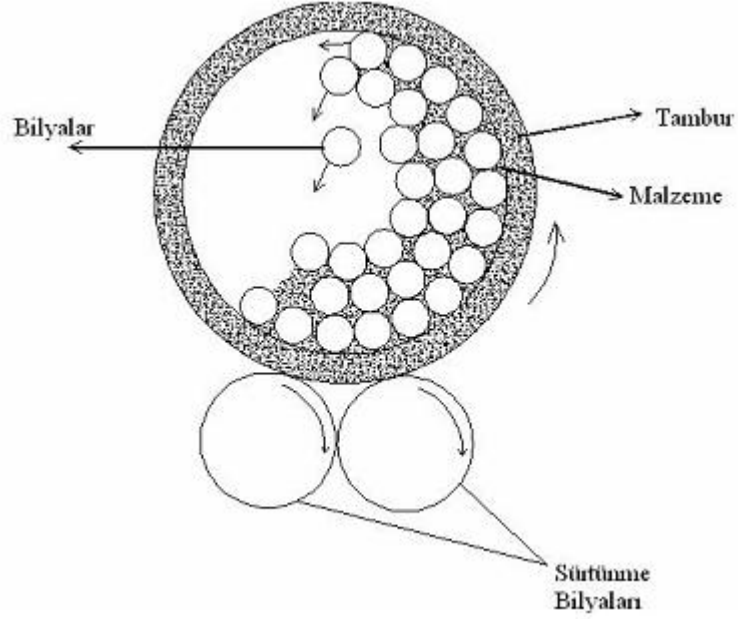
karıştırma işleminde kullanılabilse de genellikle uygulamalarda kuru halde toz karışımı tercih edilmektedir. Kuru toz karıştırma işlemi yayınma, konveksiyon ve kesme olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Adı geçen üç farklı karıştırma yönteminin şematik gösterimleri Şekil 2.3’de görüldüğü gibidir. Yayınma işleminde kapalı bir silindirin sabit hızda dönmesiyle tozların kütle içerisinde sürekli yer değiştirmesiyle sağlanır. Taşıma ile karıştırmada silindir içerisindeki bir mekanizmayla tozlar alt yüzeyden kesilerek üst yüzeye doğru taşınır. Kesme ile karıştırmada tozların sürekli ayrışma ve kayma düzlemleri üzerinde akmaları ile gerçekleşir [24, 42, 45].



Şekil 2.3 Toz karıştırma yöntemleri [42]

Kolay tasarlanabilirliği ve işlemin pratik oluşu nedeniyle toz karıştırma yöntemleri içerisinde en çok kullanım alanı bulan yöntem, bilyeli değirmen vasıtasıyla tozların yayınma mekanizmasıyla karıştırılmasıdır. İşlemin şematik görünümü Şekil 2.4’de görüldüğü gibidir. Bilyeli değirmenle karıştırma işleminde kuru tozlar, içine konuldukları silindirin hacmine göre belirli hızlarda çoğunlukla seramik bilyeler yardımıyla karıştırma işlemi sağlanır [46].





Şekil 2.4 Bilyeli değirmenin gösterimi [46]

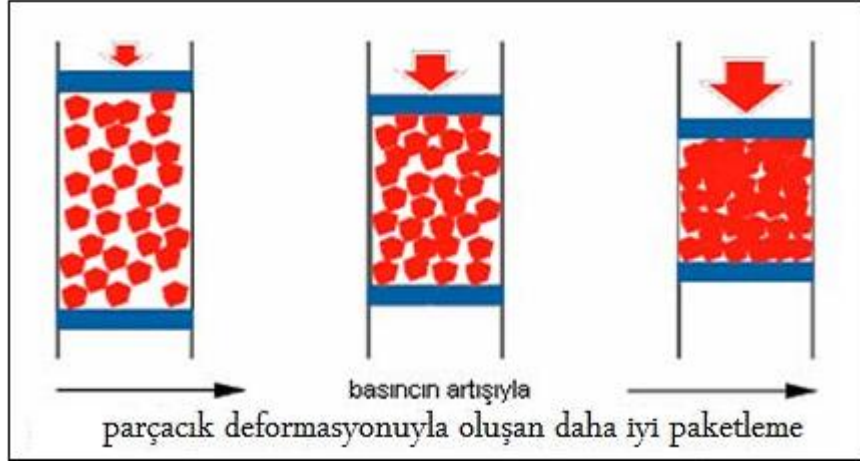
Wang ve arkadaşları [47] yaptıkları çalışmada parçacık boyut ve dağılımının SiC parçacık takviye Al-Cu alaşımı kompozitlerinin mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda; takviye parçacık ve ana yapıyı oluşturan parçacıklar arasında boyut oranının düşük olması ve karıştırma süresinin artması takviye parçacıkların ana yapı içerisinde daha homojen dağılmasına ve böylece daha yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesine neden olduğu, takviye parçacık boyutu azaldıkça akma ve çekme dayanımı değerlerinin arttığı fakat süneklik değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Kouzeli ve Martensen [48] yaptıkları çalışmada  $B_4C$  ve  $Al_2O_3$  parçacık takviyeli saf alüminyum esaslı kompozitin, parçacıklar arası mesafeye bağlı olarak dayanım değerlerinin değişimini incelemiştir. Çalışma sonucunda; parçacıklar arası mesafenin azalmasıyla akma dayanımının değeri arttığı, parçacıklar arasında aynı

mesafeye sahip  $Al_2O_3$  ve  $B_4C$  takviyeli kompozitlerden  $B_4C$  takviyeli olan soğuma esnasında daha yüksek dislokasyon yoğunluğu oluşturmaya bağlı olarak daha yüksek akma dayanımı sağladığı görülmüştür.

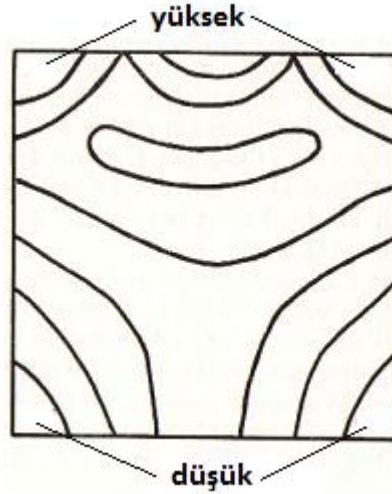
### **2.4.3 Tozların sıkıştırılması**

Tozların karıştırılması ve hazırlanması işleminden sonra gerçekleştirilen sıkıştırma işleminin amacı elde edilen toz karışımının yoğunluğunu artırmak ve istenen şekli ve boyutsal kontrolü sağlamaktır. Sıkıştırma işlemi Şekil 2.5'de şematik olarak gösterildiği gibi üç aşamada incelenebilir. İlk aşamada basınç etkisiyle parçacıklar birbirleri üzerinden kayarak yer değiştirme ve yeniden düzenlenme aşaması gerçekleşir. Fakat düzenlenme numune boyunca her yerde aynı olmayıp, parçacıkların yakın boşluklara yerleşmesi şeklinde gerçekleşir. İkinci aşamada yeniden düzenlenme en yüksek seviyeye çıkar ve bölgesel olarak plastik deformasyon başlar. Yoğunlukta az miktarda artış gözlemlenir. Üçüncü ve son aşamada basınç artışıyla parçacıkların plastik deformasyonu tüm numune boyunca gözlemlenmeye başlar. Parçacıklar üzerindeki oksit tabakaları kırılır ve soğuk kaynaklama gerçekleşerek parçacıklar arasında topaklanma başlar. Basıncın daha yüksek seviyelere çıkmasıyla parçacıklar arası temas noktaları artarak ham yoğunluk ve dayanım artar [42].



Şekil 2.5. Sıkıştırmanın aşamaları [49]

İlk ve ikinci aşamalarda daha çok tozlar yeniden düzenlenirken üçüncü aşamada plastik deformasyon daha baskındır. Sıkıştırma enerjisi parçacık-parçacık arasında, parçacık-duvar arasındaki sürtünmeye ve plastik deformasyona harcanmaktadır. Eğer sıkıştırma işlemi tek yönlü gerçekleştiriliyorsa numune boyunca farklı yoğunluk dağılımı oluşması muhtemeldir. Üst ve alt katman arasındaki yoğunluk farkı sürtünmeden dolayı basıncın alt katmanlara daha düşük iletilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.6. Tek eksenli tek zımbla ile sıkıştırmada oluşan yoğunluk dağılımı

## 2.4.4 Sinterleme

Sinterleme işlemi birbirine temas eden parçacıkların, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleriyle ve ya pek çok durumda olduğu gibi sıvı faz oluşumu ile birbirine bağlanmasını sağlar. Sinterleme işleminde gözenekli haldeki şekil verilmiş tozlar, sıcaklık artışı ile birlikte atom hareketlerinin artışına bağlı olarak parçacık temas noktalarının büyür, gözenek şekli değişir, gözenek hacmi azalır ve parçacıkların yüzey enerjileri azalarak birleşmesi sağlanır. Tozların sinterlenmesi işlemi katı fazlı ve sıvı fazlı olmak üzere iki farklı sinterleme işlemiyle gerçekleştirilmektedir. Katı halde sinterleme işleminde ön sıkıştırma gerçekleştirilmiş yapıda tamamıyla katı fazda bir yoğunlaşma sağlanırken, sıvı fazlı sinterlemede sinterleme sıcaklığında yapıda bir sıvı faz bulunmaktadır [42, 43, 46].

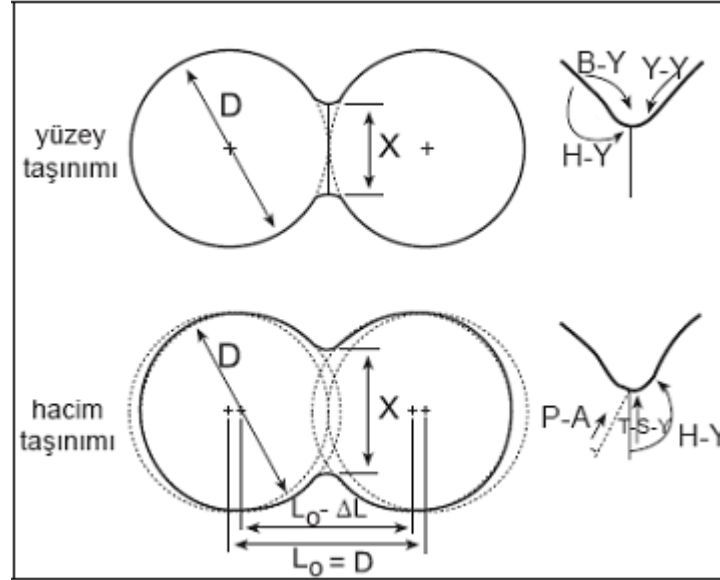
### 2.4.4.1 Katı fazlı sinterleme

Katı fazlı sinterleme işleminde, parçacıklar ergime sıcaklığının altında bir sıcaklığa ısıtılarak atom hareketlerine bağlı olarak bağ oluşumu sağlanır. Kristal yapıya sahip malzemelerde sinterleme en az altı farklı yolla gerçekleştirilmektedir. Bunlar;

- Yüzey yayınımları
- Buharlaşma-Yoğuşma
- Hacim yayınımları (yüzeyden)
- Hacim yayınımları (tane sınırından)
- Tane sınırı yayınımları
- Plastik akış

şeklinde sıralanabilir. Bunlardan yüzey yayınımları, buharlaşma-yoğuşma ve yüzeyden hacim yayınımları mekanizmaları, parçacıklar arasında boyun büyümesine ve genişlemeye yol açarken yoğunlaşmaya katkı sağlamazlar. Tane sınırı yayınımları,

plastik akış ve tane sınırından hacim yayınımlı mekanizmaları ise boyun büyümesinin yanı sıra yoğunlaşmaya neden olurlar. Bu nedenle sinterleme sırasında yoğunlaşmaya katkı sağlamayan mekanizmalar aktif olduğundan nihai üründe gözenekli bir yapı elde edilmektedir. Malzeme türlerine göre sinterleme esnasında aktif olan mekanizmalar değişebilmektedir. Tane sınırı yayınımlı ve hacim yayınımlı metal ve seramiklerde önemli yoğunlaşma mekanizmaları olarak görülürken, sinterleme gerilmesi etkisi altında dislokasyon hareketiyle gerçekleşen plastik akış ise düşük dislokasyon yoğunluğu nedeniyle seramik malzemelerin sinterlenmesinde önemli bir rol üstlenmemektedir [44].

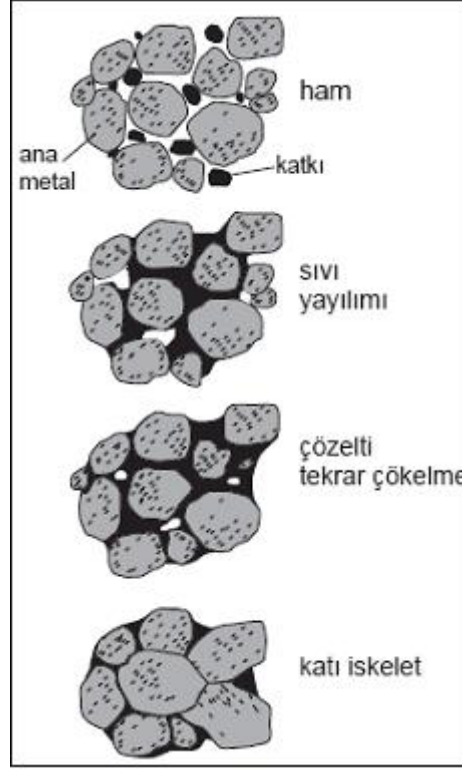


Şekil 2.7 Sinterlenen iki parçacık arasındaki taşınım mekanizmaları [42]

#### 2.4.4.2 Sıvı fazlı sinterleme

Sinterleme işlemlerinin çoğunda sinterlemenin daha düşük sıcaklıkta gerçekleşmesi, tane büyümesinin hızlanması gibi nedenlerle bir sıvı fazın oluşumu tercih edilmektedir. Sıvı fazlı sinterlemenin sembolik gösterimi Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

Sinterlemenin başlangıcında artan sıcaklıkla birlikte tanelerin birbirine katı hal sinterlemesi ile bağlandığı görülür. Sıvı oluşumu sağlandıktan sonra tanelerin yeniden düzenlenmesiyle birlikte yoğunlukta hızlı bir artış gerçekleşir ve devamında oluşan sıvı katı parçacıklar arasında oluşan bağı çözer ve yeniden düzenlenmeyi sağlar. Bu aşamadan sonra çözelti-tekrar çökme aşaması başlar. Katı parçacıklar sıvı faz içerisinde çözünür ve sıvı içerisinde yayılarak küçük katı parçacıkları büyük tanelerin üzerine çökeler. Katı çözünürlüğü parçacık boyutuyla ters orantılı olarak gerçekleşir. Yani öncelikle küçük parçacıklar sıvı içerisinde çözünür. Son aşamada yoğunlaşma sıvı faz içerisinde oluşan gözeneklerin şekline ve konumuna bağlıdır [42].



Şekil 2.8 Sıvı faz sinterlemenin aşamaları [42]

#### **2.4.4.2.1 Alüminyum-Çinko alaşımlarının sıvı fazlı sinterlenmesi**

Al-Zn sistemi, çinkonun alüminyumdan düşük erime sıcaklığına sahip olması, ara faz oluşturmaması ve sıvı içinde tamamen karışabilmesi gibi özelliklere sahip olması nedeniyle ideal bir sıvı fazlı sinterleme sistemi oluşturmaktadır. Fakat Al-Zn sisteminde katı çözünebilirlik oranı ideal olmayıp; Zn'nin Al içerisinde en yüksek katı çözünebilirliği oranı %83.1 iken, Al'nin Zn içerisindeki en yüksek katı çözünebilirliği oranı %1.2'dir. Bu nedenle Al-Zn alaşımlarının başarıyla sinterlenebilmesi için, büyük Zn parçacıkları kullanımı ve ısıtma işleminin yüksek hızda gerçekleştirilmesi ile Zn'nin Al içerisinde çözünmesi engellenerek yeterli seviyede sıvı faz oluşumu sağlanmalıdır. Büyük Zn parçacığı kullanımında ise Zn parçacıkları Al içinde bölgesel olarak çözünecek ve homojenleşme tamamıyla gerçekleşmeyecektir. Bu durumda yapıya ilave edilen katkı malzemeleriyle sinterleme işlemi kolaylaştırılabilir. Ayrıca ısıtma hızının yüksek olması Zn sıvı faza geçmeden önce gerçekleşecek difüzyon miktarını azaltacak ve böylece Zn'nin sıvı faza geçmesi Al içinde daha az çözüldüğü sıcaklıklarda gerçekleşerek tane sınırlarında yerleşmesine neden olacaktır. Sonuç olarak oluşan sıvı faz sinterlemeye katkı sağlayacak daha yüksek yoğunluk değerleri elde edilebilecektir.

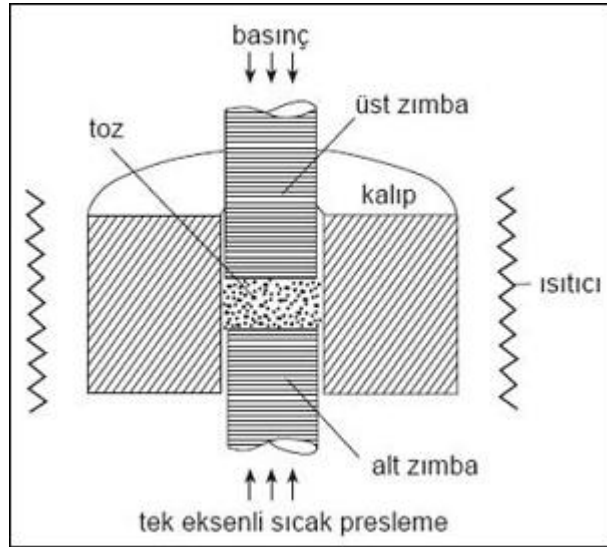
#### **2.4.5 Basınç destekli sinterleme**

Sıcak sıkıştırma, düşük sinterleme davranışına sahip sistemlerin sinterlenmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemle sıkıştırma ve sinterleme işlemleri tek bir aşamada gerçekleştirilerek geleneksel sıkıştırma işlemine göre avantajlar sağlanmaktadır. Bu sayede teorik yoğunluğa yakın yoğunluk değerleri elde edilebilmekte ayrıca sıcaklık artışı ile birlikte metal parçacıkların plastik deformasyona karşı gösterdikleri direnç azalmakta, düşük basınçlarda sıkıştırma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Geleneksel sinterleme yöntemlerinde parçacık boyutu, şekli ve dağılımı önemli iken, sıcak sıkıştırmada; sıcaklık, basınç ve sinterleme atmosferi elde edilen ürünün özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir.

Sıcak sıkıştırma yöntemi, sinterleme sıcaklığında düşük atom hareketi göstermeleri nedeniyle saf borür, nitrür ve karbür yapılarının yoğunlaştırılmasında kullanılan vazgeçilmez bir üretim yöntemidir. Sıcak sıkıştırma yöntemi aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır [41];

1. Hazırlanan tozlar ya da ön şekillendirilmiş numuneler kalıba koyulur;
2. Kalıp indüksiyon ya da dirençler yardımıyla istenilen sıcaklığa ısıtılır;
3. Zımbalar yardımıyla basınç uygulanır;
4. Basınç uygulanırken sıcaklık artışı istenilen sıcaklığa ulaşınca kadar devam eder;
5. İstenilen sıkıştırma basıncı ve sinterleme sıcaklığında gerekli süre beklenir.
6. İşlem sonunda kalıp soğumaya bırakılır.

Şekil 2.9'de çift hareketli zımba yapabilen bir sıcak sıkıştırma ünitesinin şematik görünümü verilmiştir [42].



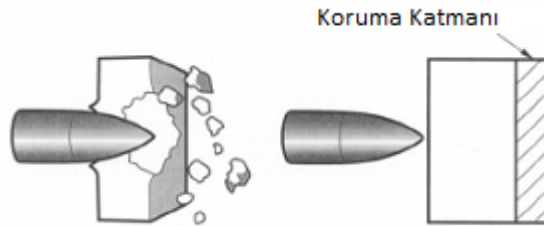
Şekil 2.9 Sıcak sıkıştırma ünitesinin şematik görünümü [42]



## 2.5 Zırh Malzemeleri

Zırh malzemelerinin görevi çoğunlukla insanları yada askeri teçhizat ve cihazları tehditler karşısında korumaktadır. Zırhlar genel olarak pasif, aktif ve reaktif olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilmektedir. Pasif zırhlar balistik korumanın sağlanabilmesi için yüksek dayanımlı ve belirli ölçülerdeki malzemelerden oluşturulmakta olup bu malzemeler korunacak sistemin üzerine monte edilerek kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra aktif ve reaktif zırhlar ise tehdit hedefe ulaşır ulaşmaz veya ulaşmadan bir süre önce tehdidin enerjisini, karşı enerji oluşturarak sönümler ve böylece balistik korumayı sağlamış olurlar.

Zırh malzemelerinin değerlendirilmesinde çoğunlukla referans bir sisteme göre elde edilen balistik verimlilik kriteri göz önünde bulundurulur. Zırh malzemesi balistik korumayı; merminin kinetik enerjisini plastik deformasyon ya da çatlak oluşumuyla sönümleyip onu yavaşlatarak, mermiyi parçalayarak, aşındırarak veya hedeften saptırarak gerçekleştirebilmektedir. Zırh malzemesinde çatlak oluşumu söz konusuysa, çatlama sonucu yapıdan kopan parçaların ayrı bir tehlike oluşturmaması için kontrolü sağlanması gerekebilmektedir. Bu durumda zırha Şekil 2.10'de görüldüğü gibi kopan parçaların tehlike oluşturmasını önlemek amacıyla kalkan görevi gören ek bir katman ilave edilmektedir [50, 51].



Şekil 2.10 Darbe sonrası kopan parçalar ve koruyucu katmanın şematik görünümü [50]

Zırh malzemesi tasarımında, zırh malzemesinden aranılan temel özellikler balistik korumayı sağlamanın yanı sıra düşük yoğunlukta olmasıdır. Elde edilen düşük yoğunluk sayesinde zırhlı personelin ya da teçhizatın hareket kabiliyeti ve hızı artmaktadır. Bu nedenle zırh teknolojisindeki araştırmalar sürekli daha düşük yoğunlukla daha yüksek performansın elde edilebilmesi yönünde ilerlemektedir.

Çelik tokluk ve dayanımının yanı sıra düşük maliyetli ve geniş bir teknolojik veritabanına sahip olması nedeniyle zırh malzemesi olarak yıllardır kullanılmaktadır. Çeliğin nispeten yüksek yoğunluklu olması nedeniyle genellikle ısıtma işlemi, soğuk haddeleme gibi işlemlerden geçirilerek dayanım artışı sağlanmakta böylece aynı başarıyı sağlayan zırh malzemesinin ağırlığı azaltılarak zırhlı kullanan personelin hareket kabiliyeti artırılmak istenmektedir.

Günümüzde kompozit malzemeler düşük yoğunluğu nedeniyle çeliğe göre daha yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Kompozit zırh malzemesi olarak çoğunlukla polimer, metal ve seramik esaslı sistemler üzerinde çalışılmaktadır. Plastikler düşük yoğunluklarının yanı sıra iyi işlenebilirlikleri ve düşük maliyetli olmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Seramik esaslı zırhlar ise düşük yoğunlukları ve yüksek sertlikleri sayesinde balistik başarıyı artırmada önemli görevler üstlenmekte olup yüksek maliyete ve düşük işlenebilirliğe sahiptirler [52].

Metal esaslı kompozit zırhlar bir seramik malzeme ile takviye edilerek üstün balistik başarıyı sağlamanı nedeniyle üzerinde çalışılan sistemlerden biridir. En sık kullanılan ve en yüksek performanslı zırh modellerinden biri önde sert bir katmanın ve arkada daha tok bir yapının yer aldığı sistemdir. Bu sistem Wilkins ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş olup ilk kez Vietnam Savaşı'nda kullanılmıştır. Ön katman olarak basma akma dayanımlarının yüksek olmaları nedeniyle genellikle seramikler ve sertleştirilmiş metaller kullanılmakta olup arka katman olarak ise elyaf takviyeli polimer kompozitler ya da alüminyum, titanyum gibi yüksek dayanım ve tokluğa

sahip ve düşük yoğunluklu malzemeler kullanılmaktadır. Bu sistemde ön katman merminin şeklini bozarak üzerine gelen şok dalgasını karşılarken arka katman ise ön katmanı bir arada tutar ve merminin kalan enerjisini sönümler. Ayrıca arka katmanın metal/seramik ara yüzeyinde oluşmaya başlayacak çekme çatlaklarını geciktirdiği ve merminin daha çok aşınması sonucunda balistik başarımın arttığı bilinmektedir.

Önde seramik katman kullanılan yapılarda seramik katmanda, darbe sonrasında genellikle Şekil 2.11’de görüldüğü gibi konik bir çatlak oluşur. Oluşan çatlak kompozitin çoklu darbe dayanımı azaltmaktadır. İlk balistik atışta başarılı olan zırh ikinci bir atışta balistik başarımı sağlayamayabilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için yeni bir malzeme türü olan İDM’ler üzerinde çalışılmaktadır.



Şekil 2.11. Balistik atış sonrası seramiklerde konik kırılmanın gösterimi [53]

İDM’lerde malzeme bileşimi kompozitin her katmanında değiştirilerek, malzemenin mekanik özelliklerinin her katmanda farklı olması sağlanmakta ve böylece önce sert ve arkada tok yapıya sahip malzeme tek bir yapı içerisinde üretilebilmektedir. Seramik/metal İDM’lerinin balistik başarımı önemli ölçüde artırdığı, yük taşıma

kapasitelerinin yüksek olduğu ve malzemeler arasında belirgin bir ara yüzey olmaması nedeniyle daha iyi mekanik özellikler elde edildiği bilinmektedir [51, 53, 54, 55].

### **2.5.1 Zırh malzemelerinde balistik başarımı etkileyen faktörler**

Zırh malzemelerinde balistik başarımı etkileyen faktörleri belirlemek oldukça karmaşıktır. Malzeme kalınlığı (ve ya alan yoğunluğu) ve bileşimi, mermi hızı ve geometrisi, darbe sönümlene kabiliyeti, darbe açısı, çevre şartları balistik başarım üzerinde önemli bir etkiye sahip olmakta olup, katmanlı kompozitlerde; bahsedilen etkilere ilave olarak katmanlar arası ara yüzey, katman sayısı, katman kalınlıkları ve katman kalınlık oranları balistik başarımı etkileyen faktörlerdir [52, 55].

Jena ve arkadaşları [56], yüksek dayanımlı zırh çeliği ve Al-7017 alaşımının farklı kalınlık ve ısıl işlem koşullarında 7.62mm'lik deforme edilebilir mermiler karşısındaki balistik başarımını incelemiştir. Çalışma sonucunda balistik test sonrası merminin şeklinden hedefin balistik başarımı hakkında yorum yapılabileceği, 200°C'de menevişlenmiş çeliğin en yüksek balistik başarımı sağladığı, yüksek dayanım, sertlik ve uzama sertleşmesi oranının balistik başarımı artırdığı görülmüştür.

Demir ve arkadaşları [57], farklı kalınlık ve ısıl işlem koşullarındaki AA7075, AA5083 ve AISI 4140 malzemelerinin 7,62 AP mermiler karşısında balistik başarımını incelemiştir. Çalışma sonucunda T651 ısıl işlemi uygulanmış AA7075 numunelerinin en yüksek balistik başarımı sağladığı, alüminyum ve çelik malzemelerin sertlik değerlerindeki artışın balistik başarımı önemli ölçüde artırdığı, T651 ısıl işlemi uygulanmış AA7075'in çelik zırh malzemelerine göre ağırlıktan önemli ölçüde kazanç sağlayacağı belirlenmiştir.

Übeyli ve arkadaşları [58], farklı kalınlıklarda HSLA (yüksek dayanım düşük alaşım) çeliklerinin ve farklı kalınlık, ısıl işlem koşullarındaki Alümina-AA2024 katmanlı kompozitinin 7.62mm'lik zırh delici mermiler karşısında balistik başarımını incelemişlerdir. Seramik üst katmanına sahip katmanlı kompozitlerin en iyi balistik başarımı sağladığı, aynı balistik başarımı sağlayan çelik numunelere göre ağırlıktan %26 kazanç sağlandığı görülmüştür. Ayrıca çelik numunelerin artan sertlikleriyle birlikte balistik başarımlarının da arttığı belirlenmiştir.

Forquin ve arkadaşları [59], alümina ile takviyelendirilmiş kireçli harçların çelik mermiler karşısındaki balistik başarımını incelemiş ve sayısal modellerle deneysel sonuçları kıyaslamışlardır. Çalışma sonucunda takviyesiz kireçli harcın düşük balistik başarımlar gösterdiği, %30 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile takviyelendirilmiş numunelerin ise mermiyi durdurduğu ve hedefin herhangi bir zarar görmediği anlaşılmıştır. KST sayısal modelinin takviyelendirilmemiş numunelerde gerçeğe yakın sonuç verdiği fakat takviyelendirilmiş numunelerde deneysel sonuçlardan uzaklaştığı görülmüştür.

Diğer bir çalışmada Savio ve arkadaşları [60], AA6063-T6 alaşımıyla desteklenmiş farklı kalınlıktaki bor karbür plakalarının 7.62mm'lik zırh delici ile DOP (depth of penetration) deneyine tabi tutarak bor karbür plakaların balistik başarımlarını ve mermi hızının bor karbür plakaların balistik başarımlarına etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda bor karbür plaka kalınlığı arttıkça merminin bor karbür içerisine girme derinliğinin azaldığı ve bor karbür plakalardan kopan parçaların boyutlarının küçüldüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca beklediği üzere mermi hızındaki artış merminin hedef içerisinde ilerleme miktarını artırmıştır.

Ong ve arkadaşları [61], malzemelerin fiziksel özelliklerini ve nümerik metotları kullanarak yeni bir katmanlı kompozit personel zırh modeli geliştirmiş, bu zırhın AISI 4140 malzemesiyle balistik başarımlarını kıyaslamışlardır. Geliştiren katmanlı

kompozit zırh modelinin aynı alan yoğunluğundaki çelik zırh malzemesine göre daha yüksek balistik başarımlar sağladığı, geliştiren zırh malzemesi katmanlarının doğru sıralandığı görülmüştür.

Taşdemirci ve arkadaşları [62], seramik üst katmana ve cam elyaf arka katmana sahip kompozitin ara yüzeyinde kauçuk, alüminyum köpük ve teflon malzeme kullanarak, ara yüzeyde kullanılan malzemenin balistik başarıma etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışma sonucunda ara katmanda kauçuk kullanmanın arka katmana iletilen gerilme miktarını azaltmada herhangi bir etki göstermediği, alüminyum köpük ve teflonun ise arka katmana iletilen enerjiyi bir miktar düşürdüğü gözlemlenmiş ayrıca kauçuk ara yüzeyli numunelerde mermi hedef aldığı noktalarda bölgesel kırılma gerçekleşmiş, alüminyum köpük ve teflon ara yüzeylilerde ise darbe bölgesi geniş bir alana yayılmıştır.

Madhu ve arkadaşları [63], önde farklı saflık oranlarında alümina katmanına ve arkada Al 7017 katmanına sahip katmanlı kompozitlerin 12.7 mm'lik zırh delici mermiler karşısında DOP testine tabi tutarak balistik başarımlarını değerlendirmişlerdir. Çalışma sonucunda alümina katmanının saflığı arttıkça balistik başarımların arttığı, yüksek saflıktaki alümina katmanının kalınlığı arttıkça balistik verimlilik faktörünün azaldığı fakat düşük saflıktaki alümina katmanının verimlilik faktörünün kalınlık artışıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir.

Shokrieh ve Javadpour [64], önde bor karbür seramik katmanı ve arkada Kevlar 49 malzemesi bulunan katmanlı kompozitinde, katman kalınlıklarının ve eğikliğin balistik başarıma etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda Heterington modelinde belirtilen optimum katman kalınlığı değerlerinden uzaklaşıldıkça balistik başarımların düştüğü, mermi ile hedef arasındaki eğiklik arttıkça sınır balistik hızının arttığı görülmüştür.

Lee ve arkadaşları [55], önde alümina arkada alüminyum katmanlarının yer aldığı kompozitlerin, 7.62 mm'lik zırh delici mermiler karşısındaki balistik başarımlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişler ve en uygun katman kalınlık oranını bulmaya çalışmışlardır. Çalışma sonucunda ön ve arkada katman kalınlık oranının 2.5 olduğu durumda en iyi başarımlar elde edilmiştir ve bunun yanı sıra katman kalınlıklarının 1.5 ve 3.0 olduğu durumlarda balistik başarımlarda bir fark oluşmamıştır.

Templeton ve arkadaşları [65] işlevsel derecelendirilmiş 6 katmanlı AlN-Al kompoziti için bilgisayar ortamında bir model oluşturmuş ve bu modelin işlevsel derecelendirilmemiş 2 katmanlı AlN-Al kompozitiyle balistik özelliklerini kıyaslamışlardır. Çalışma sonucunda, İDM'nin 1000m/s hızındaki merminin soğurulan kinetik enerjisinde %15'lik bir artış sağladığı, İDM mermiyi tamamıyla durdururken derecelendirilmemiş kompozitin balistik başarımlarını sağlayamadığı sadece mermi üzerinde bir miktar hasar yarattığı tespit edilmiştir.

### 3. DENEYSEL YÖNTEM

#### 3.1. Toz Boyut Ölçümleri

Çalışmada kullanılan AA7075 alaşımının içeriğinde bulunan malzemelerin ve yine B<sub>4</sub>C'nin toz boyut ölçümleri lazer parçacık boyut ölçüm cihazında gerçekleştirilerek, kullanılan parçacıkların boyutları ve boyut dağılımları belirlenmiştir.

#### 3.2. Numune Üretimi

Bu çalışmada iki farklı bileşim ve üç farklı kalınlıktaki AA7075 esaslı İşlevsel Derecelendirilmiş Malzeme (İDM)'nin üretimleri sıcak sıkıştırma ve sinterleme yöntemiyle tamamlanmıştır. Üretilen İDM'ler 3 katmanlı olup tüm numunelerin alt katmanı AA7075 alaşımından oluşmaktadır. Orta ve üst katmanın takviye oranları ise düşük ve yüksek takviyeli İDM'ler için 2 farklı şekilde hazırlanmıştır. İki farklı bileşime sahip İDM'lerin katmanlarına ait bileşimler Çizelge 7.1'de verilmiştir. Her bir malzeme grubundan 15, 20 ve 25 mm kalınlıkta 6'şar adet numune hazırlanmış olup toplamda 36 adet B<sub>4</sub>C takviyeli İDM üretilmiştir.

Çizelge 3.1. Üretilen İDM'lerin Bileşimleri

Tabakalar	Malzeme Grubu	
	1 (Düşük seramik oranlı)	2 (Yüksek seramik oranlı)
Alt	AA7075	AA7075
Orta	%10 B <sub>4</sub> C Takviyeli	%20 B <sub>4</sub> C Takviyeli
Üst	%20 B <sub>4</sub> C Takviyeli	%40 B <sub>4</sub> C Takviyeli

Numune üretiminde öncelikle AA7075 alaşımı hazırlanmış ve elde edilen karışım 2 saat süreyle TURBULA karıştırıcıda, karışımla tepkimeye girmeyen zirkonyum



oksit bilyeler vasıtasıyla karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. AA7075 karışımı elde edildikten sonra %10, %20 ve %40 seramik takviyeli karışımlar hazırlanarak yine 2 saat karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen toz karışımları, en altta AA7075, ortada düşük takviyeli ve üstte yüksek takviyeli karışım elde edilecek şekilde kalıba dökülmüş ve 13 MPa basınç altında ön sıkıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Ön sıkıştırma işleminden sonra ham şeklini almış olan numune 575 °C’de ve 13 MPa basınç altında 30 dakika süreyle eş zamanlı sıkıştırma ve sinterleme işlemine tabi tutulmuştur.

Sıkıştırma ve sinterleme işlemleri Şekil 3.1’de görülen sıcak sıkıştırma cihazında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra numune kalıp içerisinde soğumaya bırakılmıştır. Bahsedilen işlemler tüm numuneler için aynı şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Eş zamanlı olarak gerçekleştirilen sıkıştırma ve sinterleme işlemlerinin gösterimi

### 3.3. Isıl İşlem

Üretilen İDM'lerin yaşlanma karakteristiklerinin belirlenmesi ve dayanımlarının artırılması için İDM'lere çökeltme sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Çökeltme sertleştirme işleminin ilk aşamasında 470°C'de 1 saat süreyle çözeltiye alma ve ardından ikinci aşama olarak su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, 100 °C, 120 °C ve 150 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta 96 saate kadar yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

Üretilen numunelerin bir kısmına, mekanik deneyler ve balistik atış testleri yapılmadan önce sertlik artışı sağlamak ve ısıl işlemin malzeme özelliklerine etkisini incelemek amacıyla 470°C'de 1 saat süreyle çözeltiye alma ve sonrasında su verme işlemi gerçekleştirilmiş daha sonra 120°C'de 48 saat yaşlandırma işlemi uygulanmıştır [66, 67].

### 3.4. Balistik Test Öncesi İcyapıların İncelenmesi

İDM'ler seramik diskli testere vasıtasıyla kesilmiş, zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından ışık mikroskobundan mikro görüntüleri elde edilmiştir. Zımparalama işlemi sırasıyla 1000, 600, 360 ve 180'lik zımpara kağıtları kullanılarak yapılmıştır. Zımparalama işlemi ardından gerçekleştirilen parlatma işlemi 6, 3 ve 1 µm'lik elmas çözeltiler ile gerçekleştirilmiştir. Parlatılan yüzeylere dağlama işlemi yapılmadan önce 100, 200 ve 500 kat büyütmelemlerde görüntüler elde edilmiş ve ana yapı içerisindeki seramik dağılımı incelenmiştir. Dağlama işlemi yapılan numuneler, 2 mL HF (48%), 3 mL HCl (conc), 5mL HNO<sub>3</sub> (conc), 190 mL H<sub>2</sub>O kimyasal bileşimine sahip Keller Çözeltisi içerisinde hazırlanmış ve dağlama işleminden sonra tüm katmanların 500, 1000 kat büyütmelemlerde görüntüleri alınarak icyapı incelemeleri yapılmıştır. Buna ek olarak yine aynı numune hazırlama işlemleri

uygulanarak İDM'lerin SEM görüntüleri elde edilmiştir. SEM görüntüleriyle yapı içerisindeki gözenek miktarı, safsızlıklar ve tane yapıları incelenmeye çalışılmıştır.

### **3.5. Mekanik Deneyleer**

İDM'lerin yaşlandırma süresi boyunca sertliğindeki değişimin belirlenmesi amacıyla belirli zaman aralıklarında sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca yaşlandırmanın ve yapı içerisindeki B<sub>4</sub>C takviyesinin malzemenin çapraz kırılma dayanımına etkisini belirlemek amacıyla üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır.

#### **3.5.1. Sertlik deneyleri**

Yaşlandırma işlemi yapılan numunelerin yaşlandırma işlemi boyunca sertlik değerlerindeki değişimleri tespit etmek amacıyla belirli zaman aralıklarında sertlik değerleri ölçülmüştür. Numunelerin sertlik deneyleri yapılmadan önce numunelerin her iki yüzeyine zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Sertlik deneyi ASTM E10-84 [68] standardına göre 187,5 kg yük altında ve 2,5 mm çapında bilye kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### **3.5.2. Üç nokta eğme deneyleri**

Üretimi tamamlanan iki farklı bileşim ve ısıl işlem koşulundaki B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'lerin çapraz kırılma davranışlarının incelenmesi amacıyla üç nokta eğme testleri ASTM B 528-99 [69] standardına uygun olarak yapılmıştır.

Hazırlanan numuneler, 15 mm kalınlıkta, 12.7 mm eninde ve 31.2 mm boyunda olacak şekilde üretimi tamamlanan numunelerin su jetiyle kesilmesi sonucu elde edilmiştir. İki farklı bileşim ve iki farklı ısıl işlem koşulundaki numunelerden 3'er adedi üç nokta eğme testine tabi tutulmuş olup toplamda 12 adet numunenin deneyi

tamamlanmıştır. Numunelerin makro boyuttaki görünümü Şekil 3.2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 3.2 Üç nokta eğme numunesinin üstten görünümü

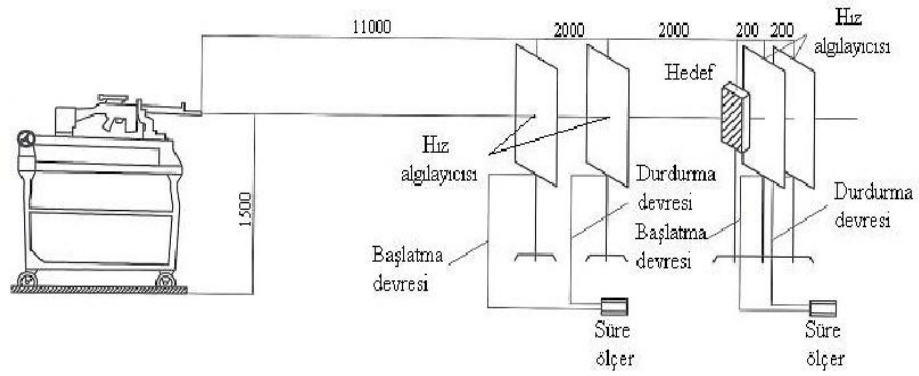
Yapılan deneyler numunelere yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış olmak üzere iki farklı koşulda gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme deneyleri sonucunda İDM’lerin yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış koşullarda çapraz kırılma dayanımları hesaplanmış ve kırılma davranışları incelenmiştir.

### **3.6. Balistik Deneylerin Gerçekleştirilmesi**

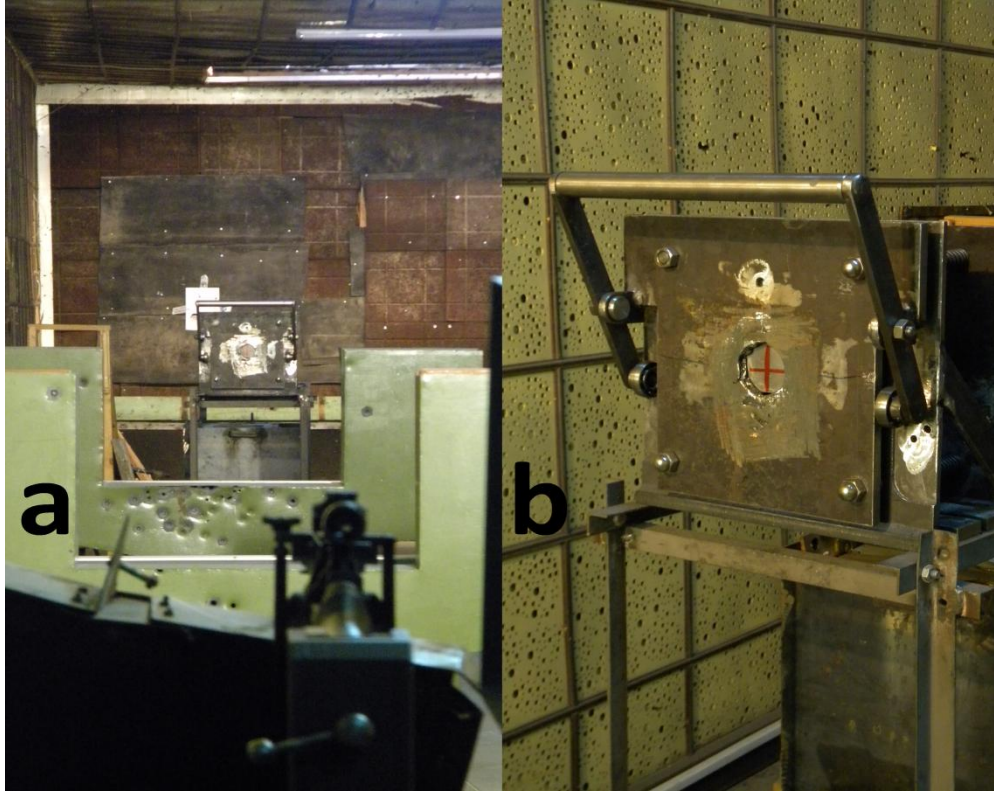
Balistik deney atışları MKEK Silah Fabrikası Atış Poligonlarında gerçekleştirilmiştir. Atışların gerçekleştirildiği deney düzeneği genel görünümü ve hedef düzeneği Şekil 3.3 ve 3.4’de görüldüğü gibidir. Balistik atış deneyleri 7,62 mm’lik zırh delici mermiler ile gerçekleştirilmiştir.

Mermi çıkış noktası ile hedef düzeneği arasında mermi hızını ölçen duyargalar bulunmakta olup, deney 15 m atış mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler iki

numune grubuna ait İDM'lerin 3 farklı kalınlığı için yapılmıştır. Deney doğruluğunu sağlayabilmek amacıyla her numune grubundan 3'er adet eş numune kullanılmıştır. Her bir numuneye yalnızca bir kez atış yapılmıştır. Balistik atışlar sonrası numunelerin makro ve mikro görüntüleri elde edilerek balistik başarımları ve kırılma davranışları incelenmiştir.



Şekil 3.3 Balistik atışların gerçekleştirildiği atış poligonunun şematik gösterimi [57]

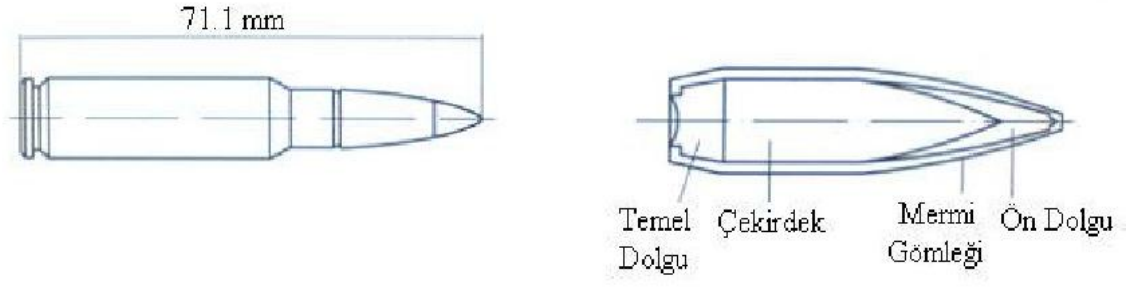


Şekil 3.4 Deney düzeneğine ait görünüm a-) Genel görünüm b-) Hedef düzeneği

Balistik atış deneyleri %20-10 ve %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'lere uygulanmıştır. Numunelerin her türünden 3'er adet hazırlanmış ve Çizelge 3.2'de özellikleri, Şekil 3.5'de şematik görüntüsü verilmiş olan 7,62 mm'lik zırh delici mermilerle balistik atışları gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2 7,62 mm'lik zırh delici merminin özellikleri [70]

Fişek uzunluğu	71,12 ± 0,76 mm
Fişek ağırlığı	25,47 ± 1,75 g
Gömlek malzemesi	7,62 x 51 mm Pirinç (CuZn30)
Çekirdek malzemesi	DIN 100Cr6 (61-62 HRC)
Mermi ağırlığı	9,75 ± 0,7 g
Mermi uzunluğu	32,95 mm
Burun çeşidi	Konik (yarım koniklik açısı, α=17°)

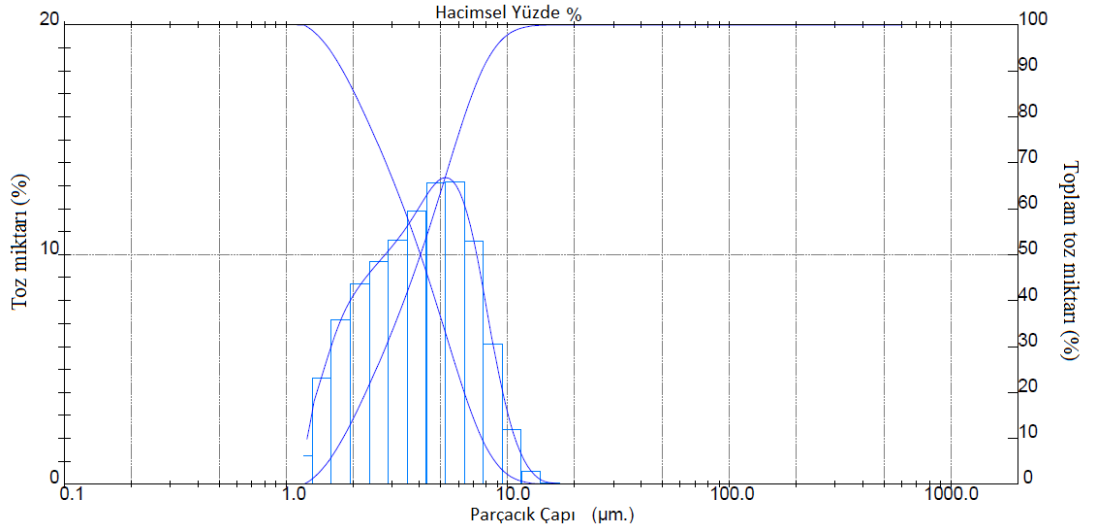


Şekil 3.5 7,62 mm'lik zırh delici merminin çizgesel gösterimi ve bileşenleri [70]

## 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

### 4.1. Toz Boyut Ölçümleri

Çalışmada kullanılan tozların boyutları lazer parçacık boyut ölçümü yöntemiyle belirlenmiştir. Boyut ölçümleri sonucunda takviye malzemesi olarak kullanılan B<sub>4</sub>C tozların ait parçacık boyut ve dağılımları eğrisi Şekil 4.1'deki gibi elde edilmiştir.

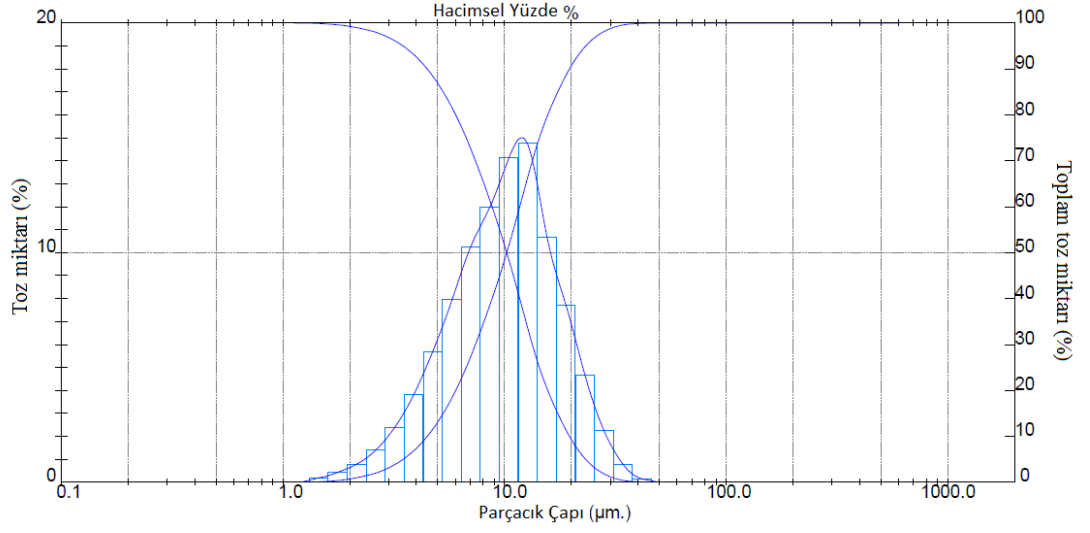


Şekil 4.1 B<sub>4</sub>C tozlarının boyut dağılımı

Ölçüm sonucunda B<sub>4</sub>C tozlarının ortalama çapı 4.04 µm olarak belirlenmiştir. Toz boyutlarının genel olarak birbirine yakın ve 10µm altında olduğu görülmüştür. Ana yapıyı oluşturan Al tozlarına ait boyut dağılımı Şekil 4.2'de verilmiştir. Elde edilen grafik incelendiğinde Al toz boyutlarının normal bir eğri oluşturduğu görülmekte olup, ortalama parçacık çapı 10 µm olarak elde edilmiştir. Al parçacık boyutlarının 1 ile 30 µm arasında değiştiği ve parçacık boyut dağılımının normal olduğu

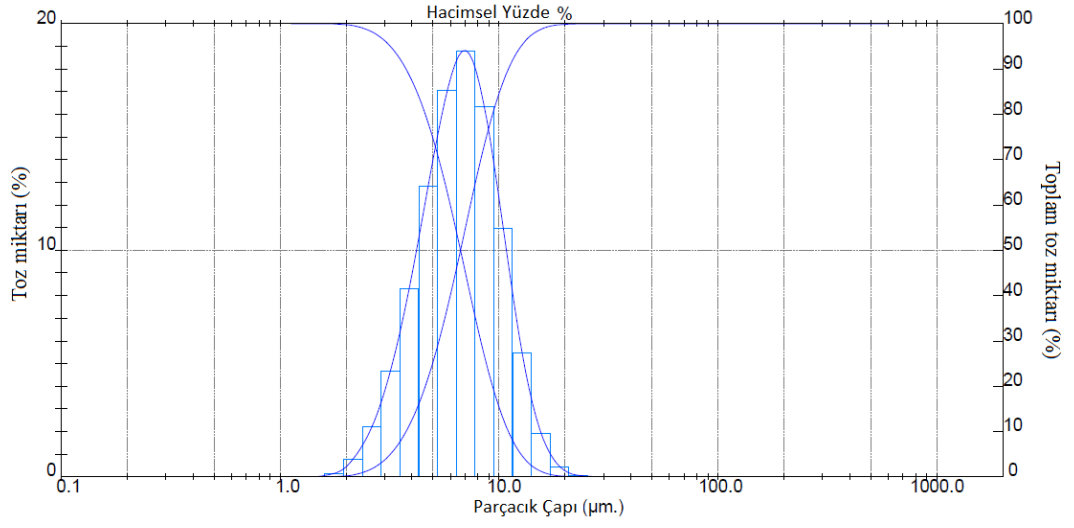


görülmüştür. Takviye parçacık boyutunun küçük olmasının yapıdaki gözenek oranını azaltacağı düşünülmektedir [71].



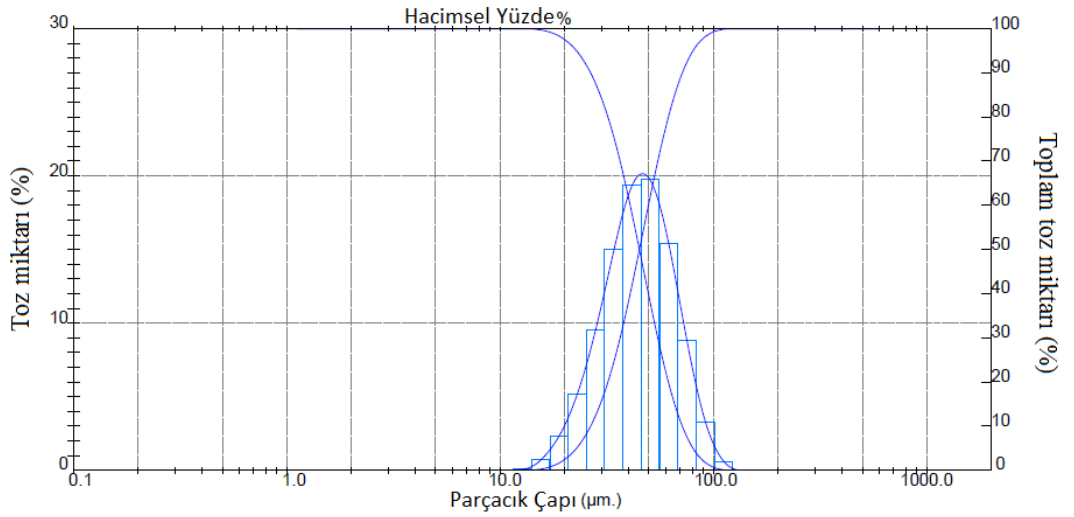
Şekil 4.2 Al tozlarının boyut dağılımı

AA7075 alaşımında alüminyumdan sonra en çok miktarda bulunan Zn tozlarına ait boyut dağılımı Şekil 4.3’de görüldüğü gibidir. Zn parçacıkları ortalama çapları 6µm olarak tespit edilmiş olup, parçacık boyut dağılımının 1 ile 20 µm arasında değiştiği görülmüştür.



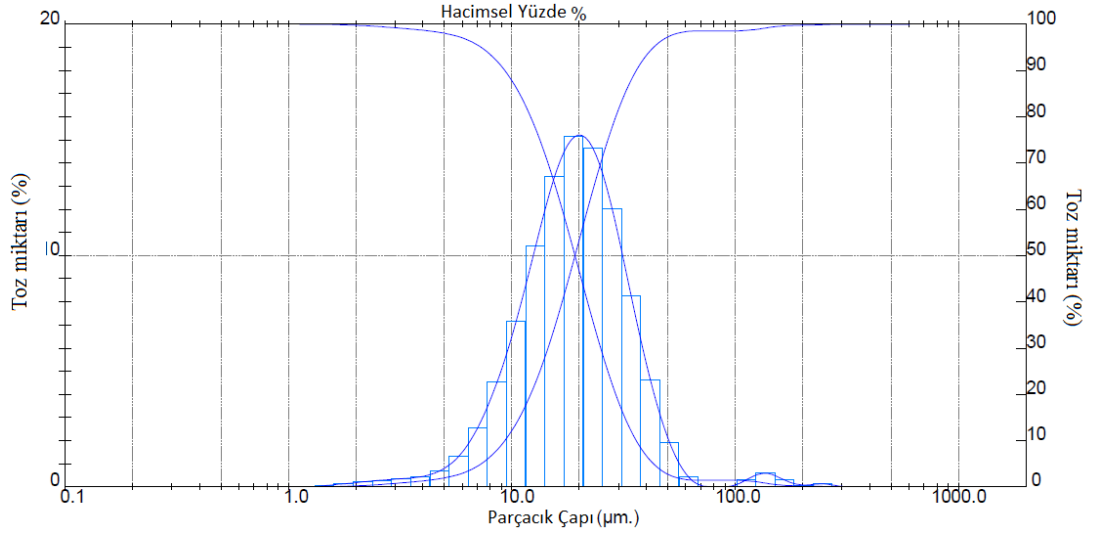
Şekil 4.3 Zn tozlarının boyutsal değişimi

Mg tozlarına ait parçacık boyut dağılımı Şekil 4.4'daki grafikte verilmiştir. Elde edilen verilerden çalışmada kullanılan Mg tozunun ortalama çapının 45µm olduğu tespit edilmiş olup alaşım içerisinde kullanılan diğer tozlara göre daha büyük boyuta sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.4 Mg tozlarının boyutsal değişimi

Cu parçacıklarına ait boyut dağılımı Şekil 4.5’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Cu parçacıkları ortalama 20  $\mu\text{m}$  parçacık çapına sahiptir ve genel olarak normal bir boyut dağılımı sergilemiştir.



Şekil 4.5 Cu tozlarının boyutsal dağılımı

Kullanılan tozların ortalama boyutları Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

Çizelge 4.1 Kullanılan tozların ortalama boyutları

Malzeme	Ortalama Toz Boyutu ( $\mu\text{m}$ )
Al	10,22
Zn	6,66
Mg	45,08
Cu	19,17
Fe	6,66
Cr	33,42
Si	3,53
B <sub>4</sub> C	4,04

Parçacık boyut ve dağılımları üretim aşamasında tozların akışı ve paketlenmeleri üzerinde etkilidir. Toz boyutundaki azalmayla birlikte yüzey alanında artış meydana gelecek ve dolayısıyla parçacıklar arası sürtünme artmaktadır. Artan sürtünme parçacıklar arasındaki akışa direnç oluşturarak daha zayıf bir paketlenme ve akış gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bu durum sıkıştırma, paketleme, karıştırma işlemlerinde doğrudan etkili olmaktadır. Çalışmada kullanılan tozlar genel olarak geniş bir boyut dağılımına sahiptir. Bu durum küçük parçacıkların büyük parçacıklar arasında oluşan boşlukları doldurmasıyla daha iyi bir paketlenme sağlanmasına neden olmaktadır [42].

#### **4.2. Numune Üretimi**

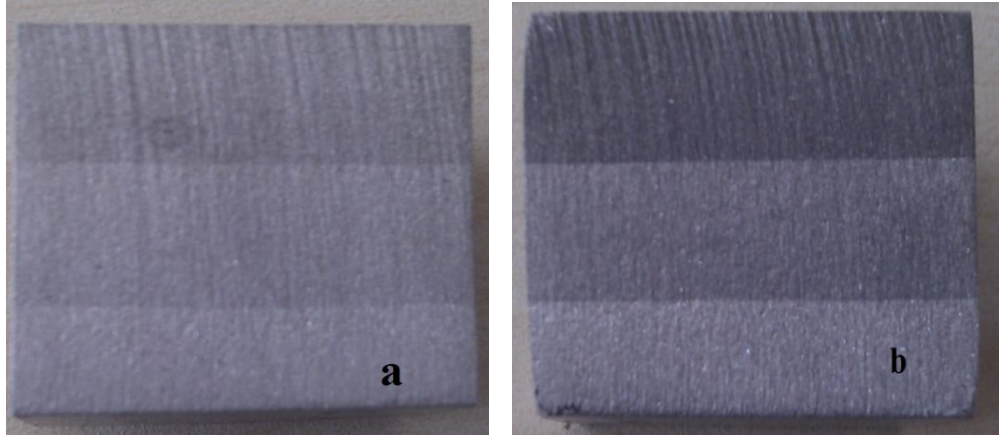
Proje kapsamında yapılması planlanan hacimce %10-20 ve %20-40 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip olmak üzere iki farklı bileşimde hazırlanan numunelerden 15, 20, 25 mm olmak üzere üç farklı kalınlıkta ve her birinden 6 adet üretilmiştir. Toplamda 36 adet B<sub>4</sub>C takviyeli İDM üretimi daha önce planlandığı gibi tamamlanmıştır. Üretilen numunelerin bir kısmının görüntüsü Şekil 4.6'da görüldüğü gibidir.



Şekil 4.6 Üretimi tamamlanan B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait görünüm

Numune üretimi; %10, %20 ve %40 hacimsel takviye oranlarında bileşimi hazırlanan tozların TURBULA karıştırıcı yardımıyla 2 saat süreyle karıştırılması, toz karıştırma işlemi sonrası 3 katmana sahip malzemenin her bir katmanınının 13 MPa basınç altında ön sıkıştırma işlemine tabi tutulması ve 575 °C sıcaklıkta ve 13 MPa basınç altında 30 dk süreyle eş zamanlı sıkıştırma ve sinterleme işlemlerine tabi tutulması işlemlerinin sırasıyla gerçekleştirilmesi sonucu gerçekleştirilmiştir.

%10-20 ve %20-40 B<sub>4</sub>C takviyeli iki numuneye adet makro boyuttaki kesit görüntüsü Şekil 4.7'de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.7 B<sub>4</sub>C takviyeli numunelere ait makro görüntüler a-) %10-20 takviyeli  
b-) %20-40 takviyeli

B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'lerin Şekil 4.7' de verilen kesit görüntülerinden de anlaşılacağı gibi numune katmanları yaklaşık olarak eşit kalınlıkta üretilebilmiştir. Bu durumun üretilen İDM'lerin balistik performansını artıracakı düşünülmektedir.

### 4.3. Balistik test öncesi içyapıların incelenmesi

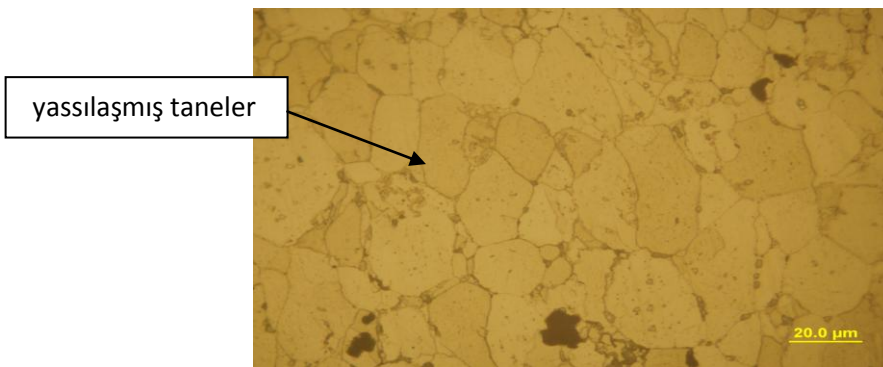
Üretilen numunelerin balistik test öncesinde ışık mikroskobu vasıtasıyla 100, 200, 500 ve 1000 kat büyütmelede görüntüleri alınmıştır. İDM'ler dağlanmış ve dağlanmamış olarak iki farklı durumda incelenmiştir. Dağlanmamış numunelerde takviye parçacıkların ana yapı içerisindeki dağılımları ve gözenek miktarı incelenmeye çalışılmıştır. Ayrıca katmanlar arasındaki geçiş bölgelerinden görüntüler alınarak geçiş bölgelerinin düzgünlüğü incelenmiştir. Dağlanmış numunelerde tane sınırları ve tanelerin yönelimi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca yapıdaki gözenek ve safsızlıkların daha belirgin olarak görülebilmesi, tane yapılarının incelenebilmesi için belirli büyütmelede SEM görüntüleri alınmıştır.

SEM görüntüleri alınacak numuneler yine ışık mikroskobunda incelenen numunelere benzer olarak hazırlanmış ve metalografik olarak incelenmiştir.

#### 4.3.1. Balistik test öncesi İDM'lere ait mikro görüntüler

Üretimi tamamlanan numunelerin ışık mikroskobu görüntüleri takviye parçacık dağılımının homojenliği, yapı içerisindeki kirlilikler, ortalama tane boyutu ve gözenek miktarı hakkında fikir vermesi açısından önemlidir. Buradan sonuçla malzemelerin mekanik özellikleri ve üretim aşamasındaki aksaklıklar ve yapılması gerekenler hakkında yorum yapabilmek daha kolay bir hale gelmektedir.

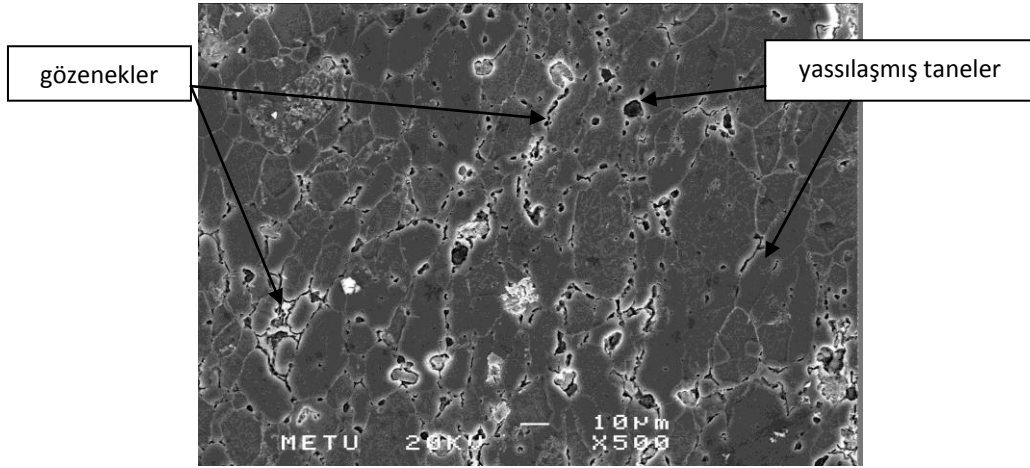
%20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin alt katmanının 1000 ve 100 kat büyütmedeki görüntüleri sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görülmektedir. Işık mikroskobu görüntüleri incelendiğinde tane sınırlarında bir miktar gözenek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapıda bir takım kirlilikler mevcuttur. Sıkıştırma işleminin gerçekleştirildiği yöne dik yönde tane uzaması ve yassılaştırılması meydana geldiği görülmektedir. Şekil 4.10'da %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin alt katmanının 500 kat büyütmedeki SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil incelendiğinde gözenek ve safsızlıkların varlığı belirgin olarak görülmektedir. Ayrıca yine taneler deformasyon yönüne dik yönde incelik uzamıştır.



Şekil 4.8 AA7075 katmanına ait ışık mikroskobu görüntüsü (1000x)



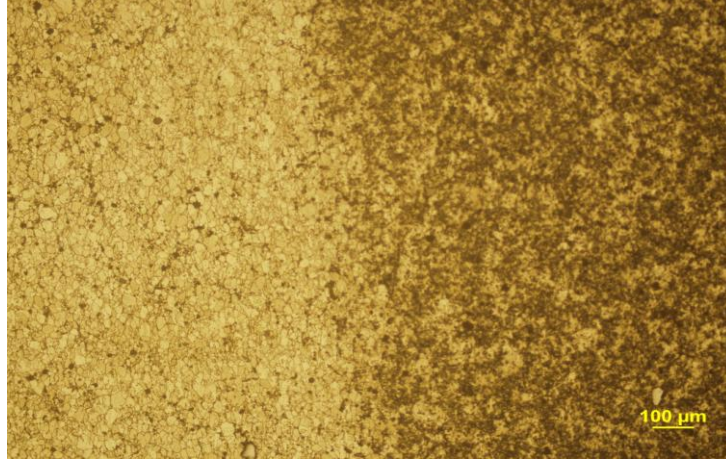
Şekil 4.9 AA7075 katmanına ait ışık mikroskobu görüntüsü (100x)



Şekil 4.10 AA7075 katmanına ait SEM görüntüsü (500x)

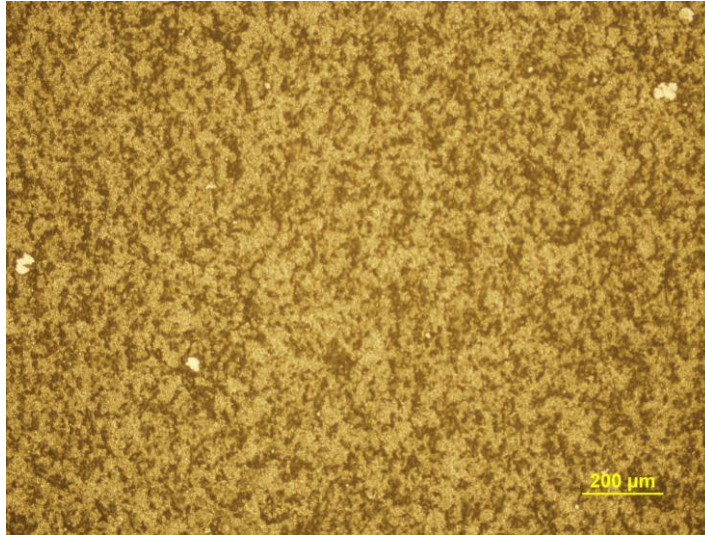
Üretilen İDM'nin balistik performansının yüksek olması ve atış sonrası bütüncül yapısını koruyabilmesi için katmanlar arasındaki geçiş bölgelerinin düzgün olması istenen bir özelliktir. Şekil 4.11'de AA7075 ve %10 B<sub>4</sub>C takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesinin 100 kat büyütmedeki ışık mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde geçiş bölgesinin düzgünlüğünün sağlanabildiği görülmektedir.





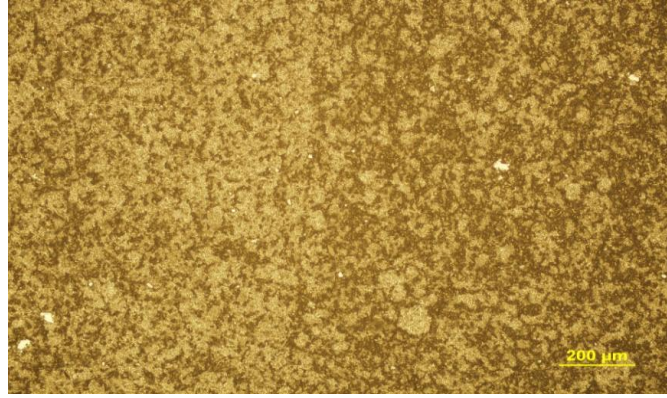
Şekil 4.11 AA7075 ve %10 B<sub>4</sub>C takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesinin ışık mikroskobu görüntüsü (100x)

Şekil 4.12’de %10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM’ye ait kesit görüntüsü verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere takviye parçacık dağılımının genel olarak homojen olduğu ve malzeme boyunca mekanik özelliklerin önemli miktarda değişiklik göstermeyeceği anlaşılmaktadır.

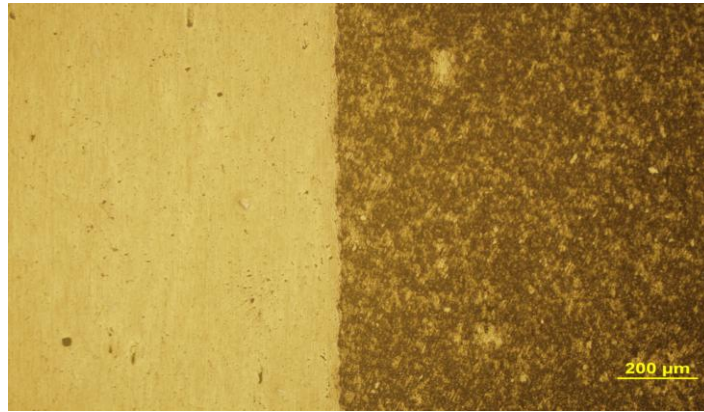


Şekil 4.12 %10 B<sub>4</sub>C takviyeli katmana ait ışık mikroskobu görüntüsü

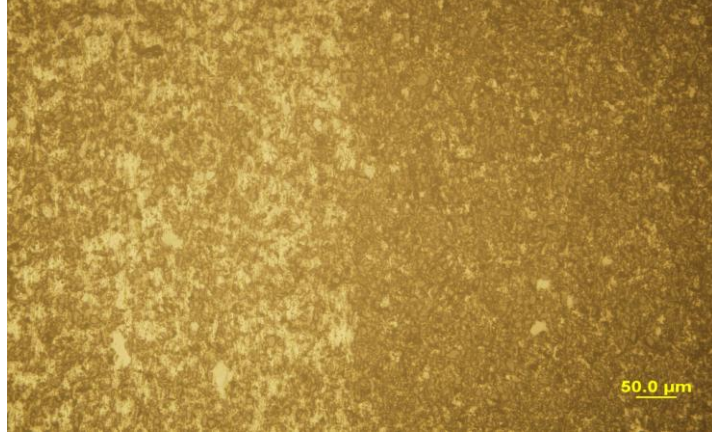
İki farklı bileşime sahip numune grubu için katmanlar arasındaki geçişin düzgün bir şekilde sağlanabildiği Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilen 200 kat büyütmedeki ışık mikroskobu görüntülerinden anlaşılabilir. Ayrıca takviye parçacık miktarının artışına bağlı olarak topaklanmanın bir miktar arttığı ve buna bağlı olarak sinterleme mekanizmasının yavaşlayacağı ve gözenek miktarının artacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 4.13 %10 ve %20 B4C takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesinin ışık mikroskobu görüntüsü (200x)

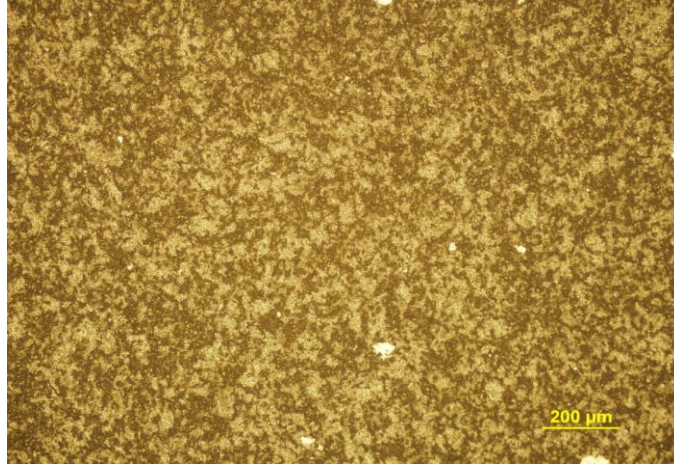


Şekil 4.14 AA 7075 ve %20 B4C takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesinin ışık mikroskobu görüntüsü (200x)

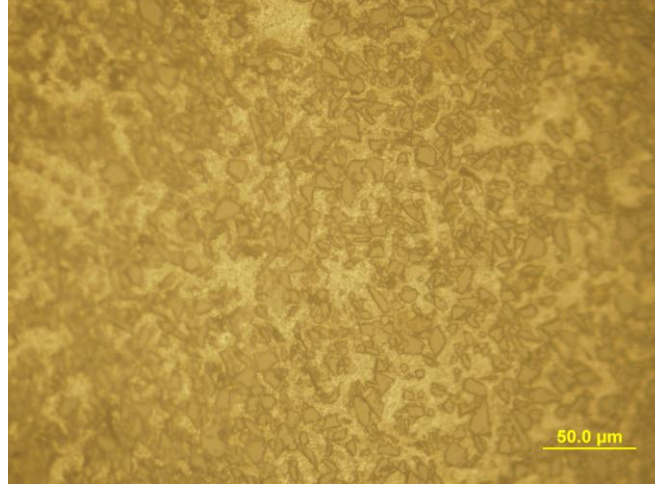


Şekil 4.15 %20 ve %40 B<sub>4</sub>C takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesinin ışık mikroskobu görüntüsü (200x)

Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de sırasıyla %20 ve %40 B<sub>4</sub>C takviyeli katmanlara ait ışık mikroskobu görüntüleri verilmiştir. %20 B<sub>4</sub>C takviyeli katmanda takviye dağılımının büyük ölçüde homojen olduğu fakat %40 takviyeli katmanda daha belirgin bir topaklanma görüldüğü söylenebilir.



Şekil 4.16 %20 B<sub>4</sub>C takviyeli katmana ait ışık mikroskobu görüntüsü (100x)



Şekil 4.17 %40 B<sub>4</sub>C takviyeli katmana ait ışık mikroskobu görüntüsü (500x)

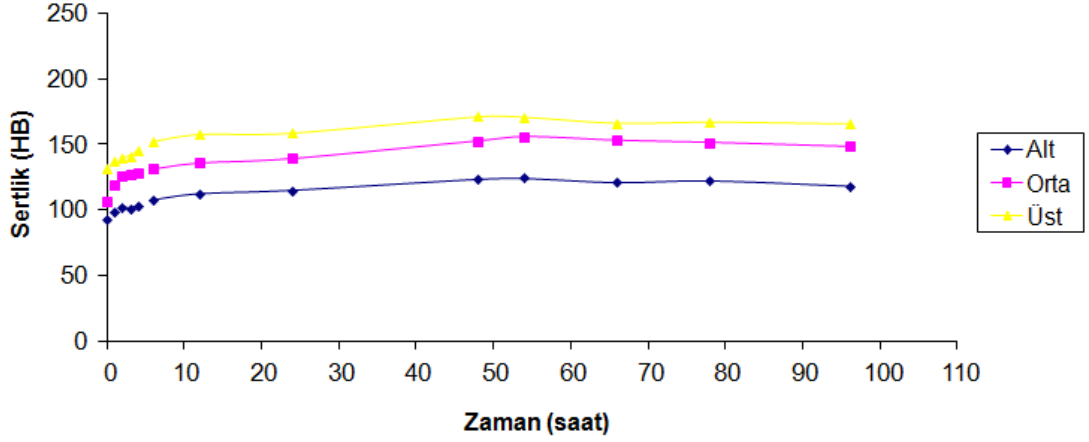
İçyapı incelemeleri sonunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde, karışımın büyük ölçüde tüm katmanlarda homojen olarak gerçekleştiği söylenebilir. Fakat yapı içerisindeki B<sub>4</sub>C takviyesi oranı arttıkça topaklanma miktarının arttığı görülmektedir. Topaklanma artışının yapıdaki gözenek miktarının artışına neden olacağı düşünülmektedir [47, 71]. Toz metalurjisinde yüksek paketleme sağlanmasında, takviye parçacık boyutunun ve oranının yanı sıra bir önemli etken de parçacık şeklidir. Resimler incelendiğinde B<sub>4</sub>C parçacıklarının keskin köşeli ve düzgün olmayan şekillerde olduğu görülmektedir. Bu durum parçacıkların birbirini üzerinden akışını olumsuz etkileyeceğinden, yapının daha zayıf paketlenme özelliği göstermesine neden olacaktır. Ayrıca yapı içerisinde görülen kirliliklerin küçük boyutlardaki tozların kullanımına bağlı olarak, İDM içerisinde yer aldığı düşünülmektedir [42]. Ayrıca geçiş bölgelerine ait resimler incelendiğinde genel olarak geçiş bölgelerinin düzgün olduğu görülmektedir. Düzgün geçiş bölgeleri balistik deney sırasında yapının bütüncül yapısını koruması açısından önem arz etmektedir [52].

## 4.4. Mekanik Deneyler

### 4.4.1. Sertlik deneyleri

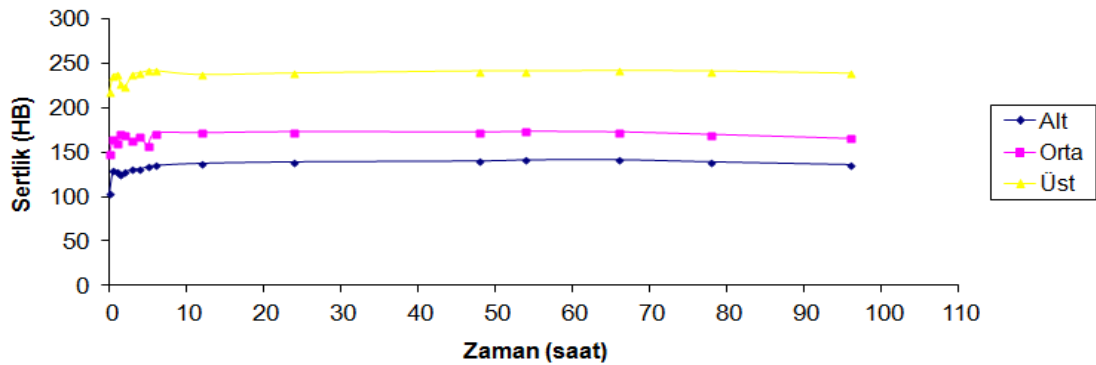
Düşük ( %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli ) ve yüksek ( %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli ) takviyeli olmak üzere iki farklı bileşimdeki İDM'lere öncelikle 470°C'de 1 saat süreyle çözeltilmeye alma ve ardından su verme işlemi uygulanmıştır. Daha sonra İDM'lere 100 °C, 120 °C ve 150 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta 96 saate kadar yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Belirli zaman aralıklarında İDM'lerin her üç katmanının sertlik değerleri ölçülerek yaşlandırma karakteristikleri belirlenmiştir.

%20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin 100°C'de 96 saate kadar yaşlandırılması sonucu sertlik değerlerindeki değişim grafiği Şekil 4.18'de görülmektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek sertlik değerinin, en yüksek B<sub>4</sub>C takviyesine sahip katmanda elde edildiği görülmektedir. Çözeltilmeye alma ve su verme işlemi sonrası alt, orta ve üst katmanda elde edilen sertlik değerleri sırasıyla 92,7 HB, 106,8 HB ve 131,2 HB olarak ölçülmüştür. Yaşlandırma işleminde en yüksek sertlik değerleri 54. saatin sonunda elde edilmiştir. Ölçülen en yüksek sertlik değerleri alt, orta ve üst katmanlar için sırasıyla, 124,2 HB, 155,6 HB, 171 HB'dir. Sertlikteki değişim yaşlandırma işlemi boyunca tüm katmanlarda aynı eğilimdedir.



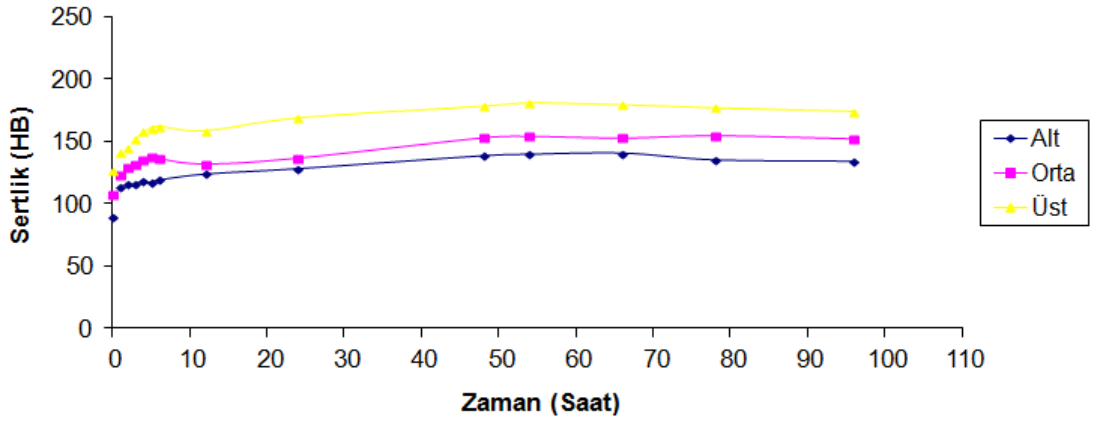
Şekil 4.18 %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin 100°C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi

%40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin 100°C'de 96 saate kadar yaşlandırılması sonucu sertlik değerlerindeki değişim grafiği Şekil 4.19'da görülmektedir.. Çözeltiye alma ve su verme sonrası alt, orta ve üst katmanda sertlik değerleri sırasıyla 103,7 HB, 148,5 HB ve 218,2 HB dir. Beklenildiği gibi yaşlandırmanın tüm zamanlarında %40 takviye oranına sahip katmanda en yüksek sertlik elde edilmiştir. En yüksek sertlik değeri yine 54. saatin sonunda elde edilmiş olup alt, orta ve üst katmana ait en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 141,3 HB, 173 HB, 241,2 HB'dir. Yaşlandırma işlemi boyunca tüm katmanların sertlik değerleri aynı eğilimde ilerlemiştir.



Şekil 4.19 %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin 100 °C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi

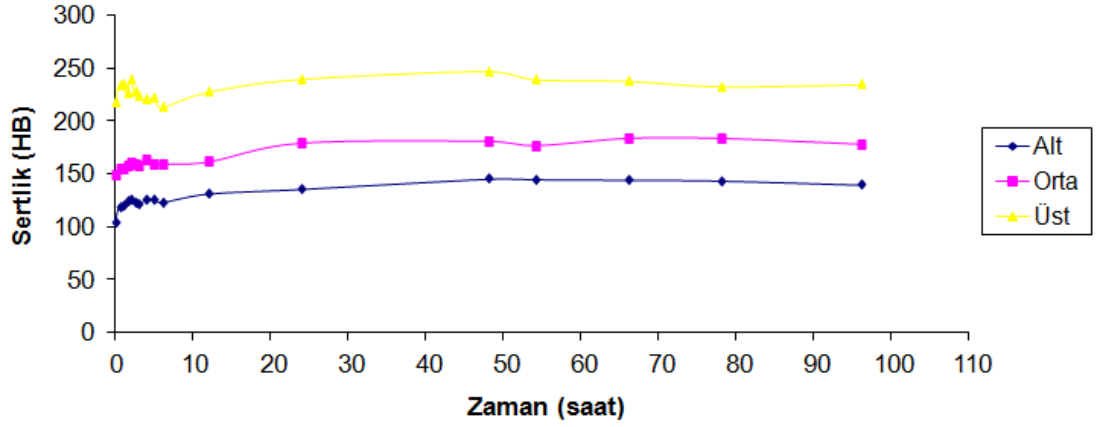
%20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin 120°C'de 96 saate kadar yaşlandırılması sonucu sertlik değerlerindeki değişim grafiği Şekil 4.20'de görülmektedir. Çözeltiye alma işlemi sonrasında alt, orta ve üst katmanların sertlik değerleri sırasıyla, 89,3 HB, 107,8 HB ve 127,5 HB olarak ölçülmüştür. Sonrasında ise belirli aralıklarla sertlik ölçümü yapılmıştır. B<sub>4</sub>C takviyesi olmayan alt katmanın sertlik değeri beklenildiği gibi en düşük çıkmıştır. Bu katmanın en yüksek sertlik değeri 66 saat sonrasında 140,7 HB olarak bulunmuştur. Orta katmanın en yüksek değeri ise aynı şekilde 54 saat sonrasında 154,3 HB olarak ölçülmüştür. %20 B<sub>4</sub>C takviyeli üst katmanın en yüksek sertlik değeri ise 181,2 HB'dir. Aynı şekilde üst katman da en yüksek sertlik değerine 54 saat sonra ulaşmıştır.



Şekil 4.20 %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin 120°C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi

%40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin 120 °C'de 96 saat boyunca gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi sonucunda elde edilen sertlik-zaman grafiği Şekil 4.21'de göstermektedir. Yaşlandırmanın başlangıcında alt, orta ve üst katmandan ölçülen sertlik değerleri sırasıyla 104 HB, 149 HB, 218 HB'dir. Her üç katman için genel yaşlanma karakteristiğinin aynı olduğu Şekil 16'da görülmektedir. Ölçülen en yüksek sertlik değerleri 48 saat sonunda alt, orta ve üst katmanlar için sırasıyla 145,4 HB, 180,9 HB, 247,1 HB olarak elde edilmiştir Buradan sonuçla B<sub>4</sub>C'nin AA7075

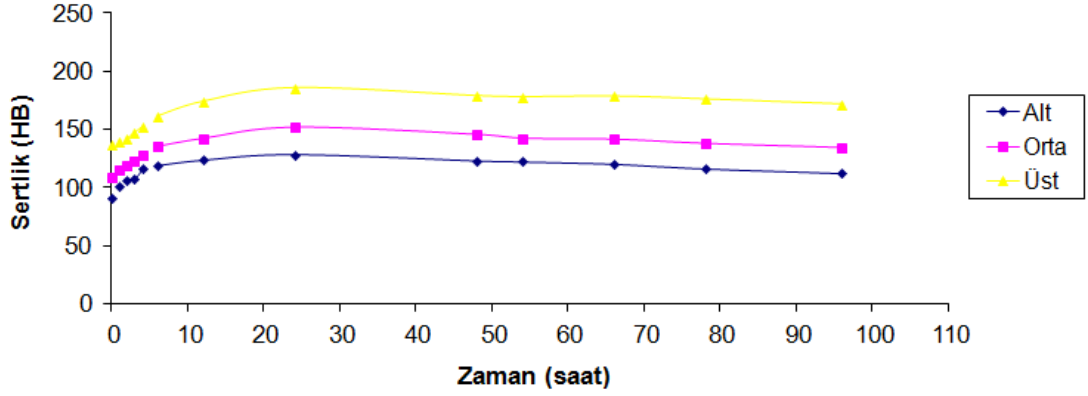
alaşımının yaşlanma karakteristiğini değiştirmediği sadece ulaşılan sertlik seviyesini değiştirdiği görülmüştür.



şekil 4.21 %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin 120°C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi

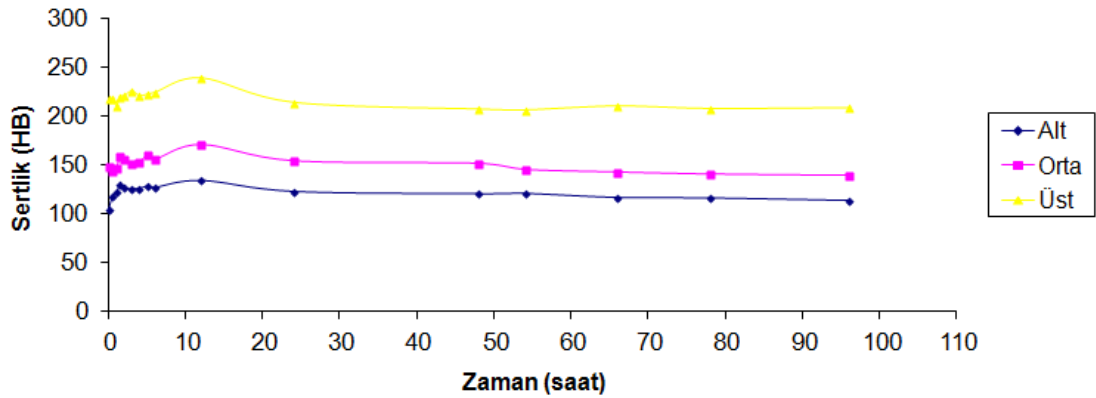
şekil 4.22'de 150°C'de yaşlandırma işlemi sonucunda elde edilen sertlik-zaman eğrisi verilmiştir. ozeltiye alma işleminden sonra alt, orta ve üst katmanın sertlik değerleri sırasıyla 91,1 HB, 108,6 HB, 137,2 HB ölçülmüştür. 150°de yapılan yaşlandırma işleminde en yüksek sertlik değerlerine 24 saatin sonunda ulaşılmıştır. 24 saat sonunda alt katmanın sertlik değeri 128,6 HB olarak tespit edilmiştir. Orta katmanın sertliği 152,3 HB st katmanın sertliği ise 185,6 HB olarak bulunmuştur. Alüminyum ana yapının içindeki B<sub>4</sub>C takviyesinin ana yapının yaşlanma karakteristiği üzerine olan önemli bir etkisinin olmadiği gözlemlenmiştir.





Şekil 4.22 %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin 150°C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi

Yaşlandırma sıcaklığının etkisini daha net gözlemleyebilmek için yaşlandırma işlemi 150 °C'de de yapılmıştır. Şekil 4.23, 150 °C'de elde edilen sertlik-zaman eğrisini göstermektedir. Beklenildiği gibi sertlik seviyesi en yüksek takviye miktarına sahip katmanda elde edilmiştir. Sertlik seviyesi 12 saat sonunda en yüksek değere ulaşmıştır. 12 saatlik yaşlandırma sonunda alt, orta ve üst katmanlar için sertlik değerleri sırasıyla, 135, 171 ve 239 HB olarak gözlemlenmiştir. Sertlik değerleri her üç katman içinde 12 saatten sonra yavaş bir şekilde düşüş göstermeye başlamıştır. Sertlik değeri 66 saat sonunda aynı katmanlar için sırasıyla, 116, 142 ve 210 HB şeklinde ölçülmüştür.



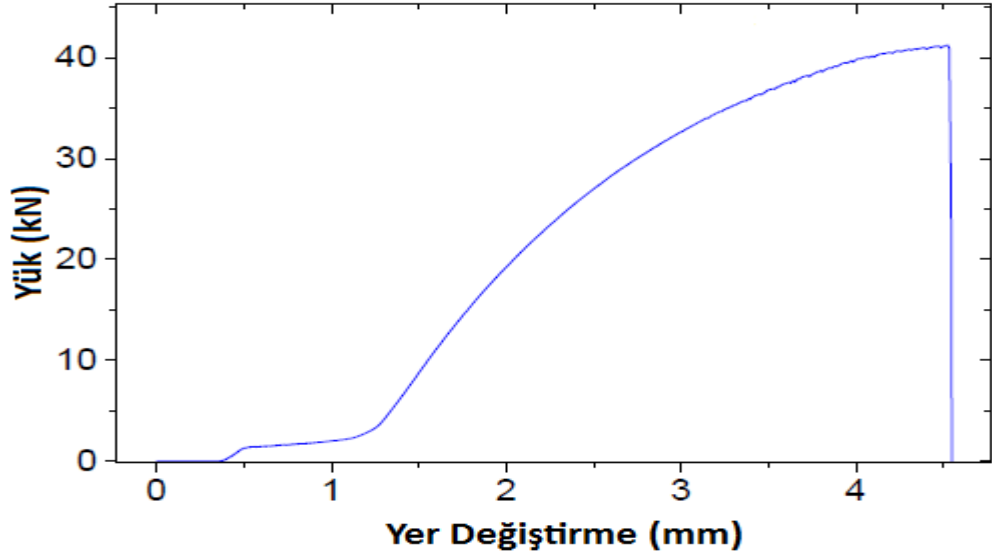
Şekil 4.23 %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin 150°C'deki yaşlandırma-sertlik eğrisi

Yaşlandırma sonuçları incelendiğinde; tüm yaşlandırma koşullarında ve tüm takviye oranlarında en düşük sertlik seviyesinin çözeltiliye alma ve su verme sonrası elde edildiği görülmektedir. Yapıdaki B<sub>4</sub>C miktarı arttıkça sertlik seviyesinin arttığı görülmüştür. Takviyesiz AA7075 katmanında sertlik seviyesi tüm sıcaklıklar için en düşüktür. 100 °C, 120 °C ve 150 °C ‘de yapılan yaşlandırma işlemlerinde ulaşılan en yüksek sertlik değerinin elde edildiği yaşlandırma süreleri farklılık göstermiştir. En yüksek sertlik değerleri 100°C, 120°C ve 150°C için sırasıyla 54, 48-54 aralığı ve 12-24 saat aralığı olarak belirlenmiştir. 120°C ‘de yapılan yaşlandırmaya kıyasla 150 °C’de yapılan yaşlandırma işleminde daha kısa sürelerde en yüksek sertlik değerleri elde edildiği fakat 150°C’de yapılan yaşlandırma sonucunda ulaşılan sertlik seviyesinin daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Tüm yaşlandırma süreleri ve takviye oranları içerisinde en yüksek sertlik değeri %40 B<sub>4</sub>C takviyeli katmanın 120 °C’de 48 saat sonunda elde edilmiştir. Yaşlandırma işleminin gerçekleştiriliği her üç sıcaklık için katmanların genel yaşlanma karakteristiğinin aynı olduğu görülmüştür. B<sub>4</sub>C takviyesinin ana yapının yaşlanma karakteristiğine bir etkisi olmadığı sadece ulaşılan sertlik seviyesini etkilediği gözlemlenmiştir.

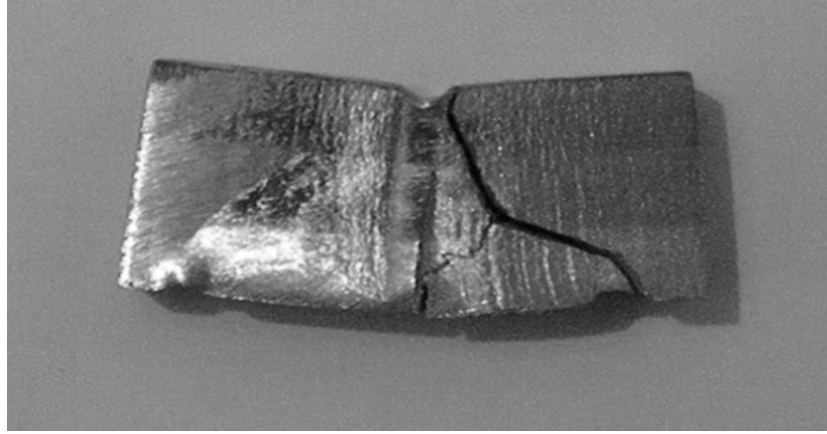
#### **4.4.2. Üç nokta eğme deneyleri**

İDM’lerin üç farklı sıcaklıkta yaşlandırma davranışları incelendikten sonra en yüksek sertlik değerinin 120 °C’de yaklaşık 48 saat sonunda elde edildiği görülmüştür. Üç nokta eğme deneyi öncesinde numunelerin bir kısmı yaşlandırılmış ve yaşlandırmanın malzemenin eğilme davranışına etkisi araştırılmıştır. %40-20 ve %20-10 takviyeli İki farklı bileşime sahip numunelerden, yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış (çözeltiliye alınmış ve su verilmiş ) olmak üzere iki farklı ısıl işlem koşulunda 3’er adet numune test edilmiştir. Toplamda 12 adet numune üç nokta eğme deneyine tabi tutulmuştur. Yük tüm numunelere en yüksek takviye oranına sahip katmandan uygulanmıştır.

%20-10 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip İDM'ye ait su verme sonrası elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.24'de görüldüğü gibidir. %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli malzemenin deneyi sonucunda İDM'nin ortalama en yüksek çapraz kırılma dayanımı 542 MPa olarak belirlenmiştir.  nokta eğme deneyi sonrası numunenin görünümü Şekil 4.25'de görüldüğü gibidir. Numune basma yönüne paralel kırılma davranışı göstermiştir. Ayrıca numunenin alt katmanında gevrek bir kırılma gözlemlenmiştir. Katmanlar arasında bir ayrışma söz konusu değildir.

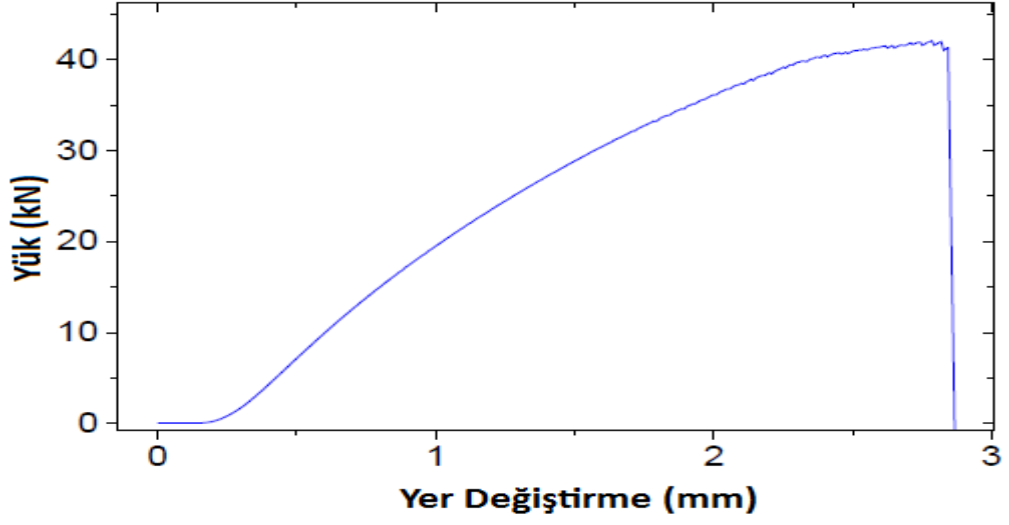


Şekil 4.24 Yaşlandırılmamış %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği

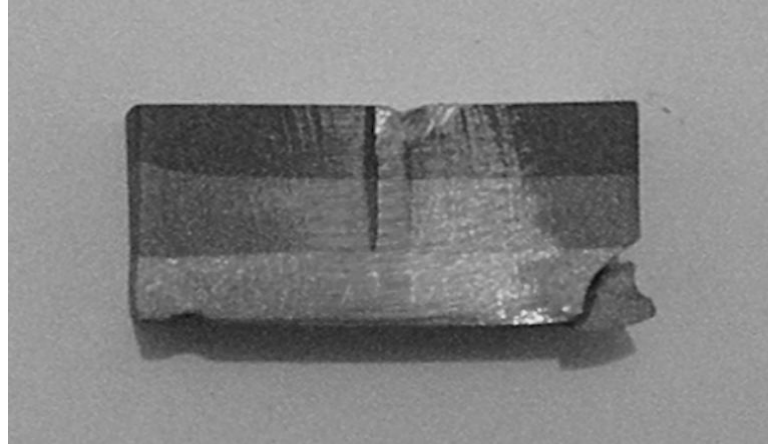


Şekil 4.25 %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin yaşlandırılmamış numunenin üç nokta eğme testi sonrası görünümü

%40-20 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip İDM'ye ait su verme sonrası elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.26'da görüldüğü gibidir. %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli malzemenin deneyi sonucunda İDM'nin ortalama en yüksek çapraz kırılma dayanımı 456 MPa olarak belirlenmiştir. Üç nokta eğme deneyi sonrası numunenin görünümü Şekil 4.27'de görüldüğü gibidir. Resim incelendiğinde yüksek takviye oranı nedeniyle malzemenin rijit yapısını koruduğu ve alt destek bölgesinden çatlayarak kırıldığı görülmektedir.



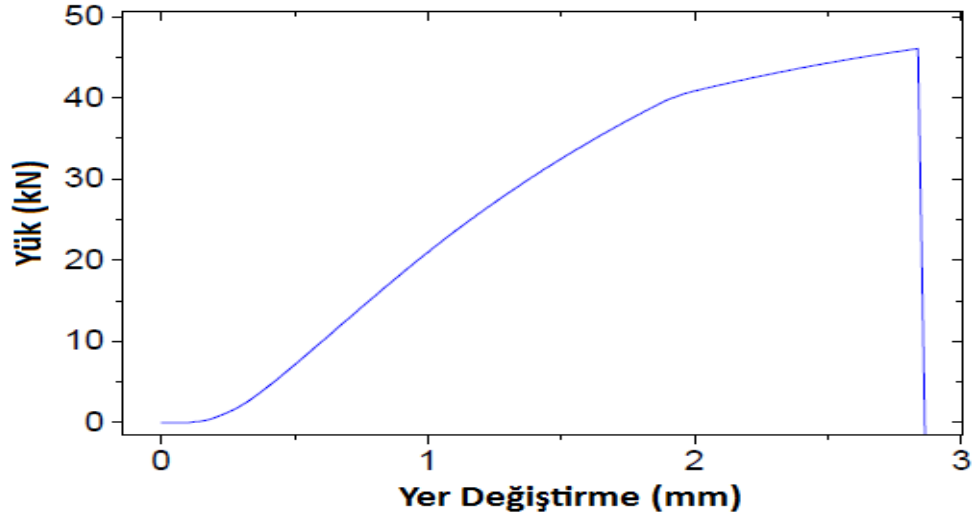
Şekil 4.26 Yaşlandırılmamış %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği



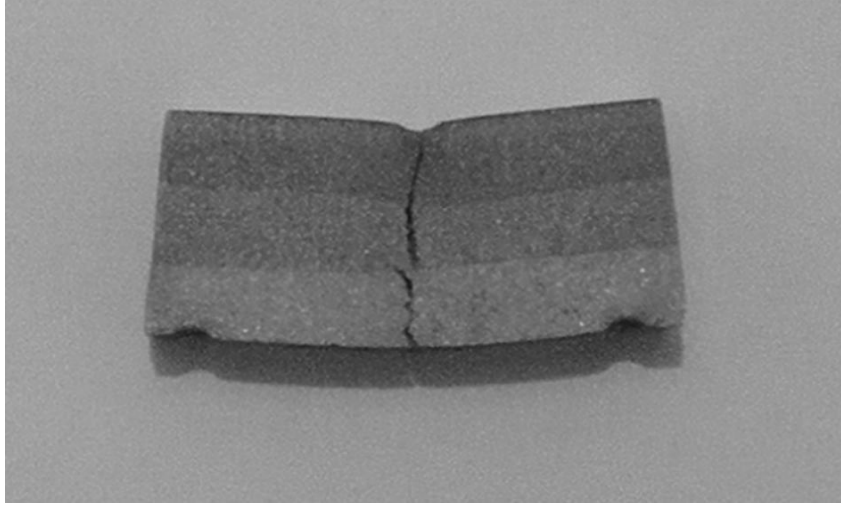
Şekil 4.27 %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli yaşlandırılmamış İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü

%20-10 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip İDM'ye ait yaşlandırma işlemi sonrası elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.28'da görüldüğü gibidir. %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli malzemenin deneyi sonucunda İDM'nin ortalama en yüksek çapraz kırılma dayanımı 568 MPa olarak belirlenmiştir. Üç nokta eğme deneyi sonrası numunenin görünümü

Şekil 4.29’da görüldüğü gibidir. Numune kuvvetin uygulandığı yöne paralel biçimde kırılmıştır. Katmanlar arasında herhangi bir ayrışma ya da bölgesel çatlak oluşumu ve kırılma gözlemlenmemiştir.

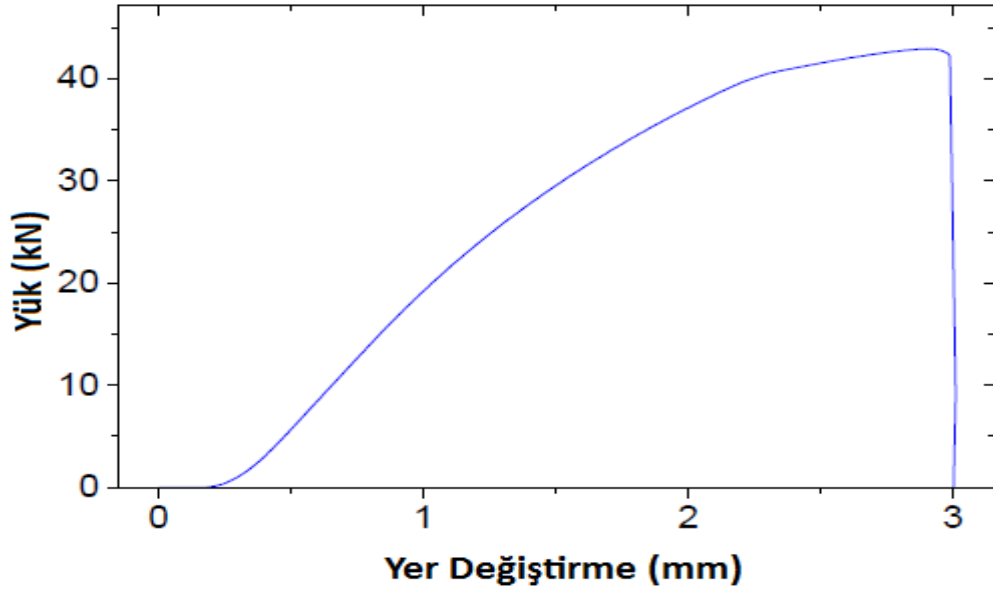


Şekil 4.28 Yaşlandırılmış %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM’ye ait kuvvet-yer değişirme grafiği

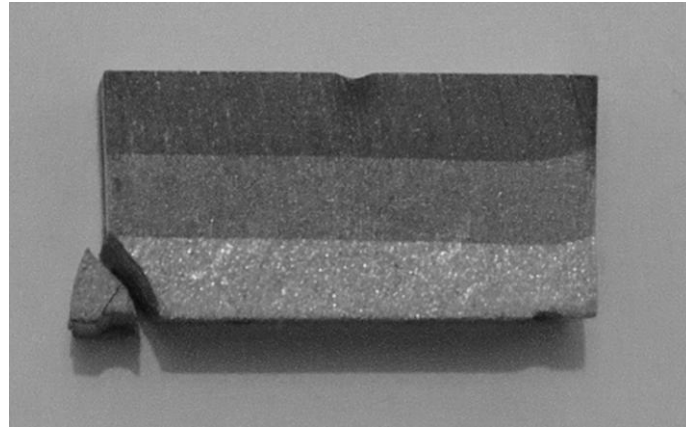


Şekil 4.29 %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli yaşlandırılmış İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü

%40-20 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip İDM'ye ait yaşlandırma işlemi sonrası elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 4.30'de görüldüğü gibidir. %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli malzemenin deneyi sonucunda İDM'nin ortalama en yüksek çapraz kırılma dayanımı 527 Mpa olarak belirlenmiştir. Üç nokta eğme deneyi sonrası numunenin görünümü Şekil 4.31'da görüldüğü gibidir. Yüksek takviye oranı nedeniyle rijitliğini koruyan numune alt destek bölgesinden kırılmıştır.



Şekil 4.30 Yaşlandırılmış %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği



Şekil 4.31 Yaşlandırılmış %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği

Yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış (çözeltiye alınmış ve su verilmiş) düşük ve yüksek takviyeli numunelere yapılan üç nokta eğme deneyleri sonucunda, artan takviye oranlarıyla birlikte İDM'lerin üç nokta eğme dayanımı değerlerinde düşüş



görüldüğü tespit edilmiştir. Deney sonucunda malzemelerin çapraz kırılma dayanımları Çizelge 4.2’de daha açık bir şekilde görülebilmektedir. Çözeltiye alma ve su verme işlemi sonrası %20-10 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip malzemede üç nokta eğme dayanımının %40-20 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip malzemedeki daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yaşlandırma işleminin üç nokta eğme dayanımını artırdığı görülmüştür. Yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış numuneler arasında en yüksek dayanım yaşlandırılmış %20-10 B<sub>4</sub>C takviye oranına sahip numunede elde edilmiştir. %40-20 B<sub>4</sub>C takviyesine sahip numunelerin her iki ısıl işlem koşulunda benzer kırılma davranışı sergilediği görülmüştür. Her iki ısıl işlem koşulunda da numuneler rijitliklerini korumuş ve alt destek bölgesinden kırılmışlardır. Numunelerin katmanları arasında herhangi bir ayrışma gözlemlenmemiştir. Bu durum sinterlemenin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.

Çizelge 4.2 Yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış B<sub>4</sub>C takviyeli İDM’lerin üç nokta eğme dayanımları

Yaşlandırılmamış Numuneler				Yaşlandırılmış Numuneler			
%20-10 B <sub>4</sub> C Takviyeli		%40-20 B <sub>4</sub> C Takviyeli		%20-10 B <sub>4</sub> C Takviyeli		%40-20 B <sub>4</sub> C Takviyeli	
Kuvvet (N)	TRS (MPa)	Kuvvet (N)	TRS (MPa)	Kuvvet (N)	TRS (MPa)	Kuvvet (N)	TRS (MPa)
41500	531.8	40000	440.8	45500	568.2	44000	515.6
42000	538.3	42000	462.8			42500	530.7
43500	557.5	42500	468.3			43000	536.9

#### 4.5. Balistik atış deneyleri

Balistik atış testleri kalınlıkları iki farklı numune grubu için 15mm, 20mm, 25mm olan üç farklı kalınlıktaki numunelerin 120C’de 48 saat yaşlandırılmış koşullarında gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için 3’er adet atış yapılmış toplamda 18 adet numune 7,62 mm’lik zırh delici mermiler karşısında MKEK Kırıkkale Silah

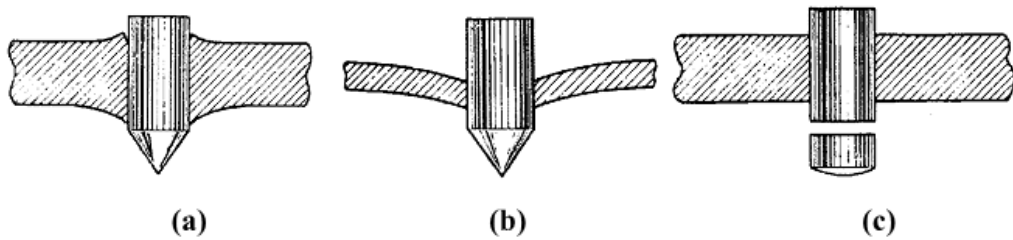
Fabrikası'nda balistik olarak test edilmiştir. Üretilen numunelerin bir kısmının balistik test öncesi görüntüsü Şekil 4.32'de gösterilmiştir



Şekil 4.32 Balistik atışı gerçekleştirilecek olan B<sub>4</sub>C takviyeli numunelerin gösterimi

#### 4.5.1. Balistik test sonrası İDM'lerin makro boyutta incelenmesi

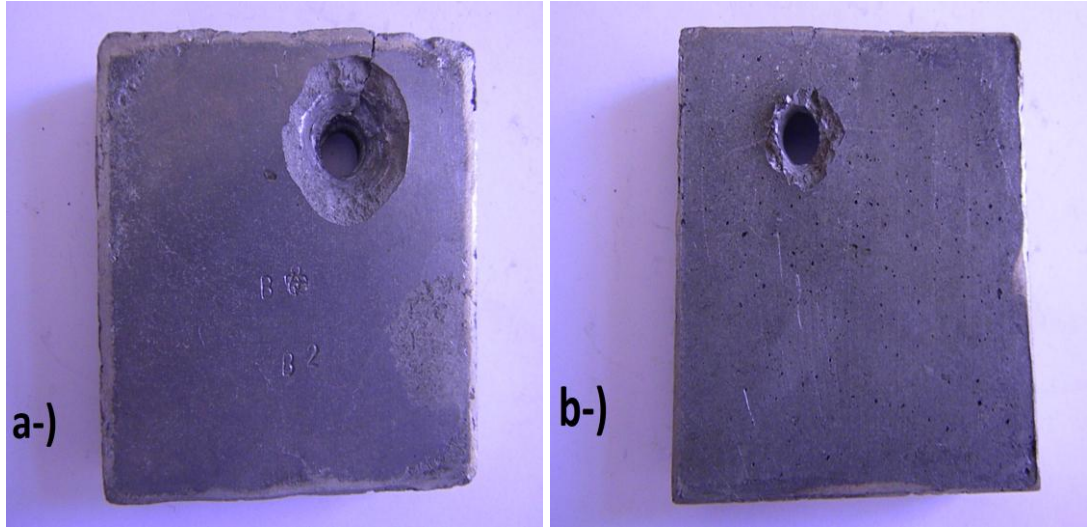
Balistik test sonucunda metallerde meydana gelebilecek hasar mekanizmaları daha önceki yıllarda yapılan çalışmalara göre 3 farklı şekilde gerçekleşmektedir [72,73]. Bu hasar türleri Şekil 4.33'de görüldüğü gibidir



Şekil 4.33 Metallerde görülen hasar mekanizması çeşitleri [72] a) sünek delinme b) çukur tipi delinme c) zımba etkisiyle delinme

Şekil 4.33'te gösterilen hasar mekanizmaları çok gevrek malzemeleri kapsamamaktadır. Gevrek malzemelerin yüksek hızda darbe altında oluşturduğu hasar mekanizmaları radyal çatlak oluşumu, konik yapı oluşumu, kırılma ve parçalanma şeklinde gerçekleşmektedir.

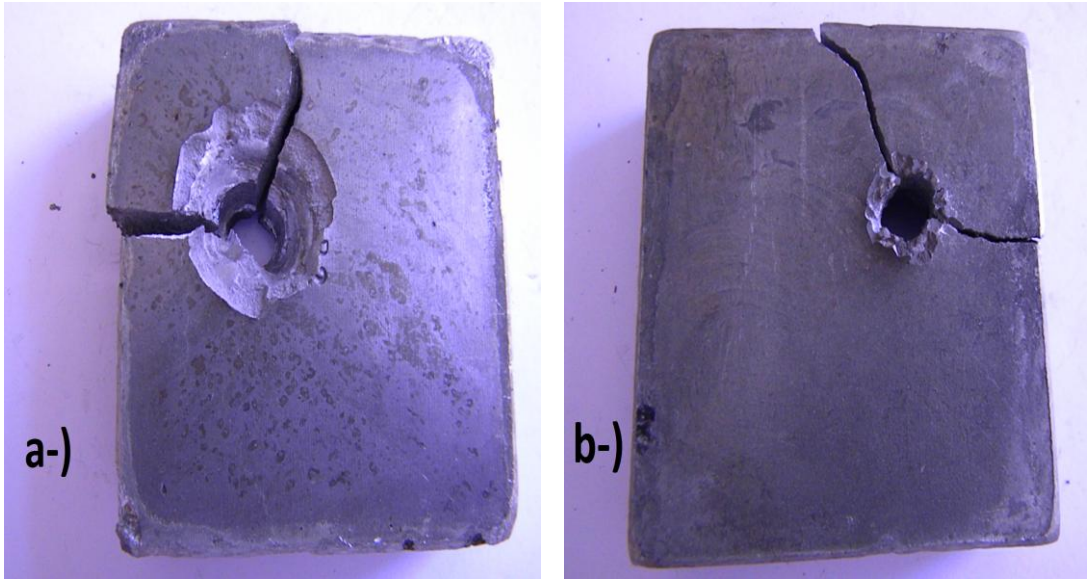
%20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli 15mm kalınlığa sahip İDM'nin balistik atış testi sonrası makro boyuttaki görüntüsü Şekil 4.34'de görüldüğü gibidir. Atış sonrası numune tek parça olarak kalmış ve kırılma gerçekleşmemiştir. Mermi giriş deliği mermi çapına yaklaşık olarak yakın büyüklüktedir fakat mermi çıkışında daha büyük bir delik oluşumu görülmektedir. İDM'de atış sonrası görülen hasar türü zimba tipi delinmeye yakındır.



Şekil 4.34 %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli 15mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi

%20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli 20mm kalınlığa sahip İDM'nin balistik atış testi sonrası makro boyuttaki görüntüsü Şekil 4.35'de görüldüğü gibidir. Atış sonrası numune iki ayrı

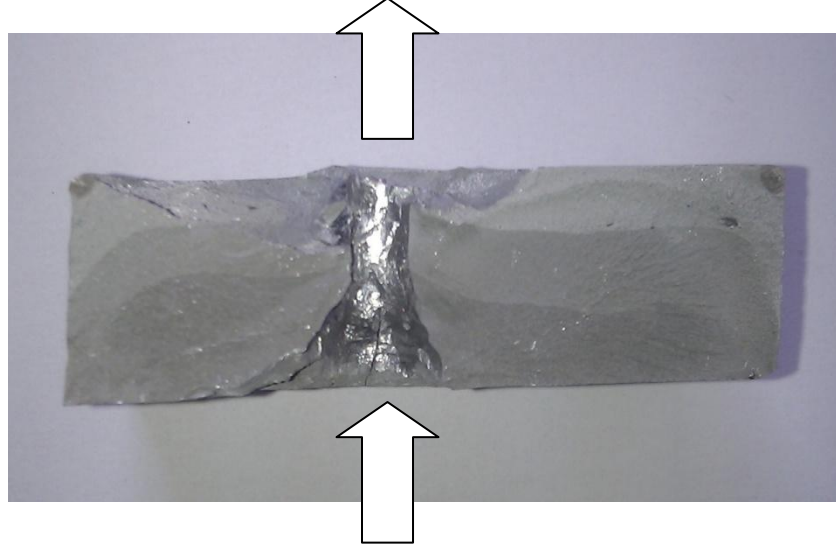
parçaya ayrılmıştır. Mermi giriş bölgesinde yine mermi çapına yakın büyüklükte bir delik açılmış, mermi çıkışında ise daha büyük çapta bir delik gözlemlenmiştir. İDM’de, seramik malzemelerin yüksek hızdaki darbe uygulamalarında görülen konik hasar oluşumu meydana gelmiştir. Ayrıca hasar tipi olarak radyal çatlak oluşumu, konik yapı ve parça kopması görülmektedir. Parçanın katmanları arasında herhangi bir ayrışma görülmemektedir.



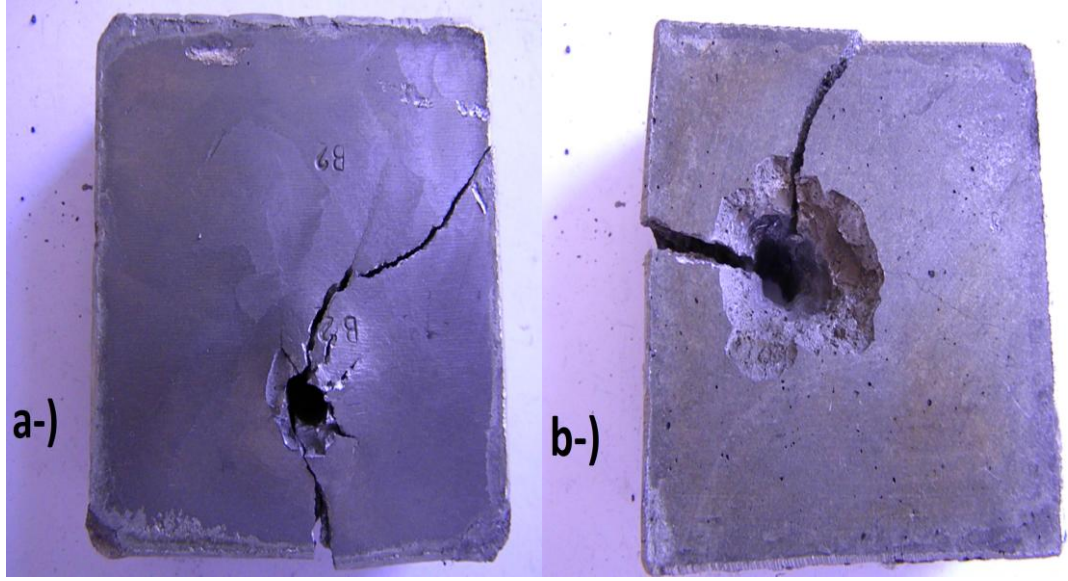
Şekil 4.35 %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli 20mm kalınlıktaki İDM’nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi

%20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli 25mm kalınlığa sahip İDM’nin balistik atış testi sonrası makro boyuttaki görüntüsü Şekil 4.36’da görüldüğü gibidir. Atış sonrası numune iki ayrı parçaya ayrılmıştır. Hasar türü olarak radyal çatlak ve konik yapı oluşumu gözlemlenmiştir. Kalınlık artışına bağlı olarak 7.62’lik zırh delici merminin numuneyi delmekte zorlandığı ve numuneye girdikten sonra yön değiştirdiği %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli 25mm kalınlığındaki test numunesinde açık olarak görülebilmektedir.

Şekil 4.36'da 20mm kalınlıkta %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli numunenin balistik test sonrası kesit görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde mermi geçiş yönünde belirgin bir deformasyon görülmektedir.

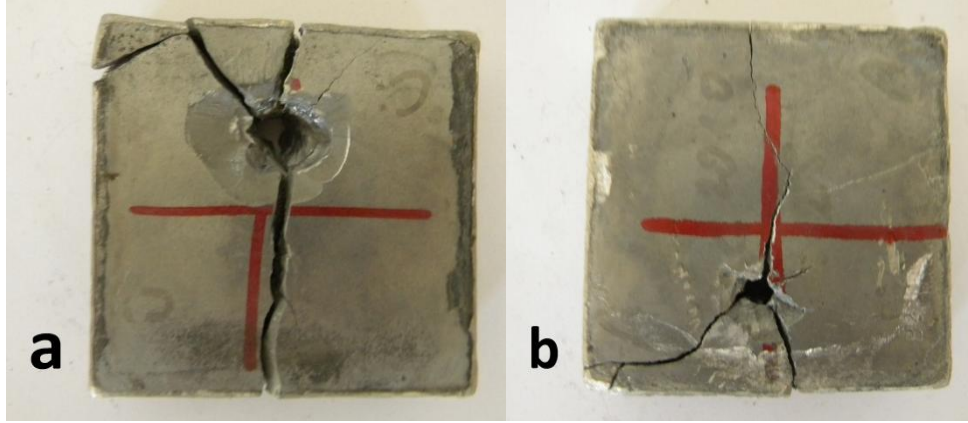


Şekil 4.36 20 mm kalınlıktaki %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin balistik test sonrası kesit görüntüsü



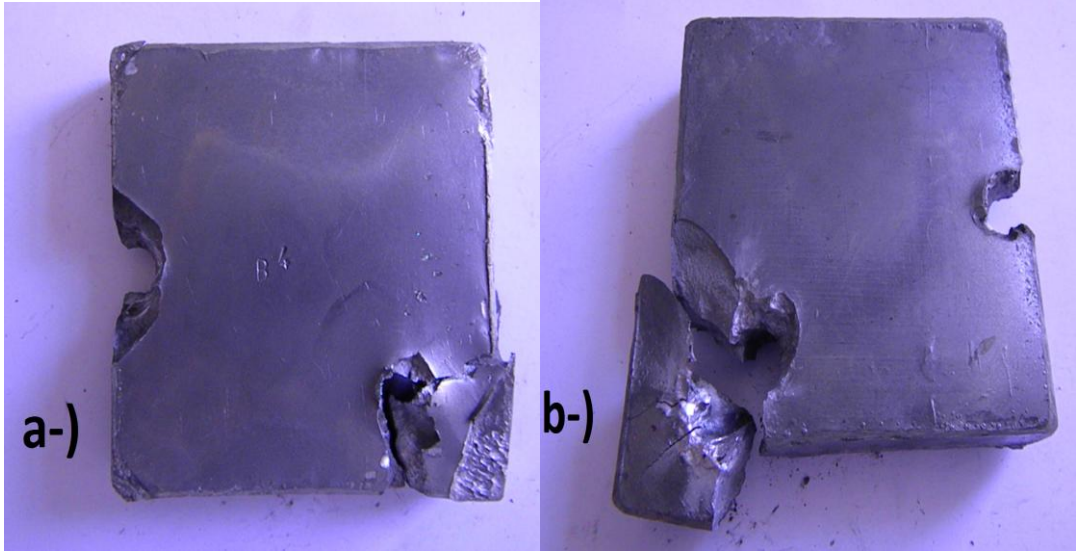
Şekil 4.37 %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli 25 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi

Şekil 4.38'de düşük B<sub>4</sub>C takviyeli 25 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik test sonrası makro görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde mermi girişinde büyük bir delik oluşumu, mermi çıkışında ise daha küçük bir delik oluşumu görülmektedir. Bu durum merminin çıkışta zorlandığının bir göstergesi olarak düşünülmektedir. Numune, balistik atış sonrası 4 parçaya ayrılmış olup, katmanlar arasında herhangi bir ayrılma ve dağılma gözlemlenmemiştir. Bu durum, sinterlenmenin başarılı bir şekilde gerçekleştiğinin ve ara yüzlerdeki metalürjik bağın düzgün oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 4.38 %20-10 B<sub>4</sub>C takviyeli 25 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi girişi b-)mermi çıkışı

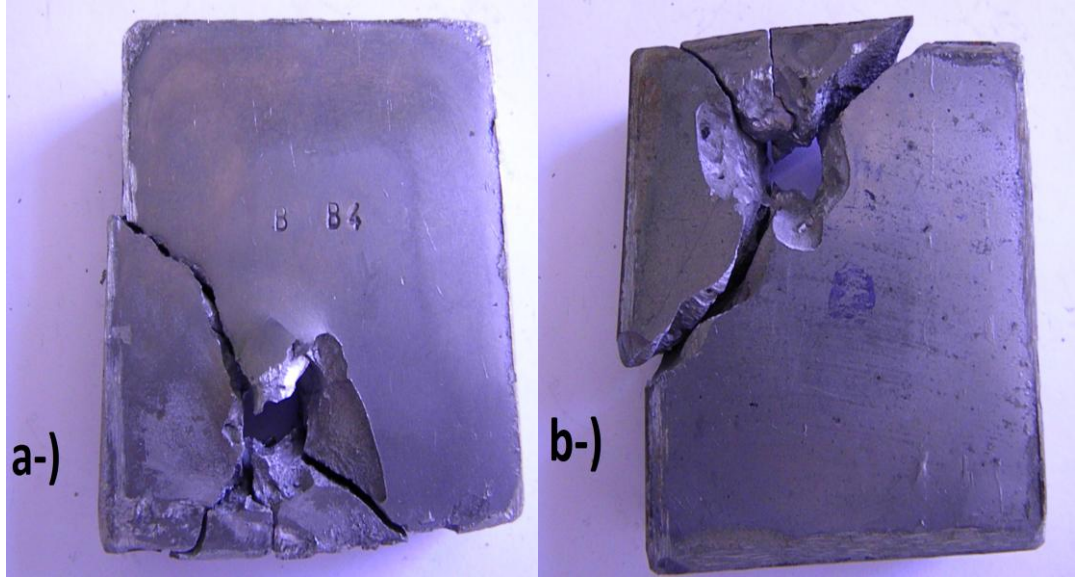
%40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli 15mm kalınlığa sahip İDM'nin balistik atış testi sonrası makro boyuttaki görüntüsü Şekil 4.39'da görüldüğü gibidir. Balistik atışlar sırasında merminin orta noktaya hedeflenmesine rağmen numune ortadan vurulamamış ve iki farklı atış yapılmak zorunda kalınmıştır. Atış sonrasında numuneden parça kopmuştur. Takviye oranının artması İDM'nin balistik başarımını artırmış, mermi belirgin biçimde yön değiştirmiş ve çıkış yönünde çok küçük bir delik oluşmuştur. Mermi gömleği numune içerisinde kalmıştır.



Şekil 4.39 %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli 15 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi

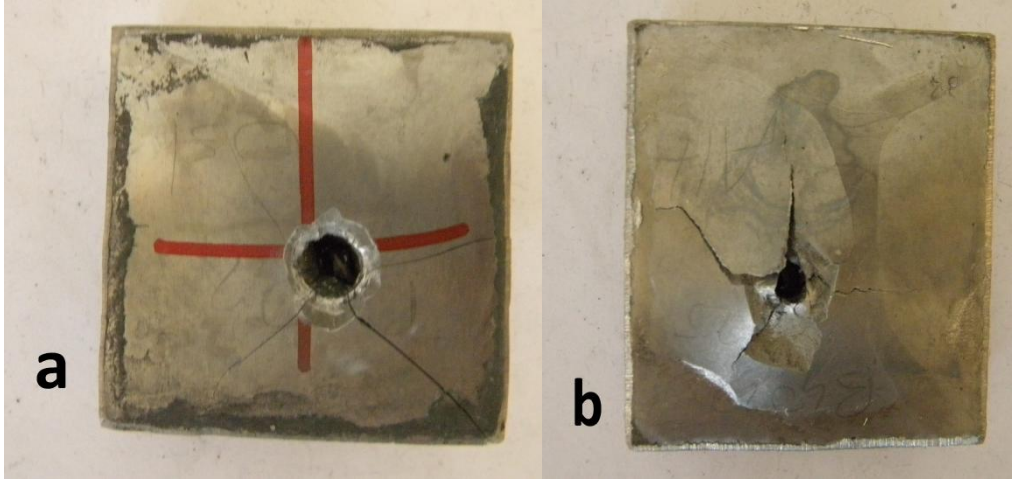
%40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli 20mm kalınlığa sahip İDM'nin balistik atış testi sonrası makro boyuttaki görüntüsü Şekil 4.40'da görüldüğü gibidir. %40 takviyeli numunelerin çoğunluğunda görüldüğü gibi gevrek bir kırılma gözlenmiştir. Atış sonrası numune 4 parçaya ayrılmış ayrıca kopan parçalar üzerinde radyal çatlaklar belirgin biçimde gözlemlenmiştir. Mermi giriş deliği mermi çıkış deliğinden daha küçüktür. Bu durum merminin kompozit içimde zorlandığının bir göstergesidir.





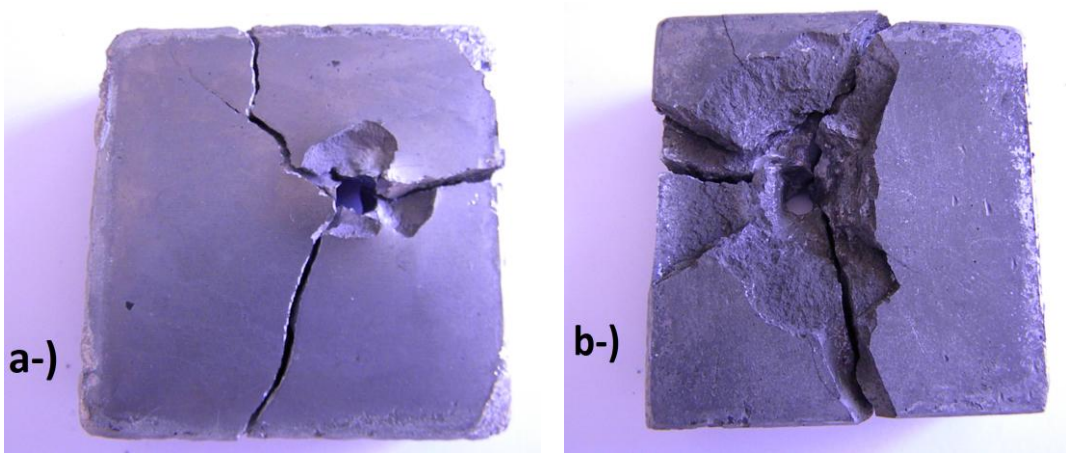
Şekil 4.40 %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli 20 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi

Şekil 4.41'de yüksek B<sub>4</sub>C takviyeli 20 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik test sonrası makro görüntüsü verilmiştir. Mermi girişinde, mermi çıkışına göre daha büyük bir delik olduğu gözlemlenmiştir. Görüntü incelendiğinde merminin malzemeyi deldiği fakat mermi gömleğinin numune içerisinde kaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca numune üzerinde çatlak oluşumu gözlenmiş olsa da, numune parçalanmamış ve bütüncül yapısını korumuştur. Yapı içerisinde yüksek oranda B<sub>4</sub>C takviyesi bulunmasının balistik başarımı artırdığı düşünülmektedir fakat yüksek oranda seramik takviyesi sinterleme işlemini zorlaştıracak ve nihai üründe gözenek oluşumu artacaktır. Oluşan gözenekler etrafında yüksek gerilme yoğunluğu oluşacak ve numune daha kolay çatlayacak veya kırılacaktır.



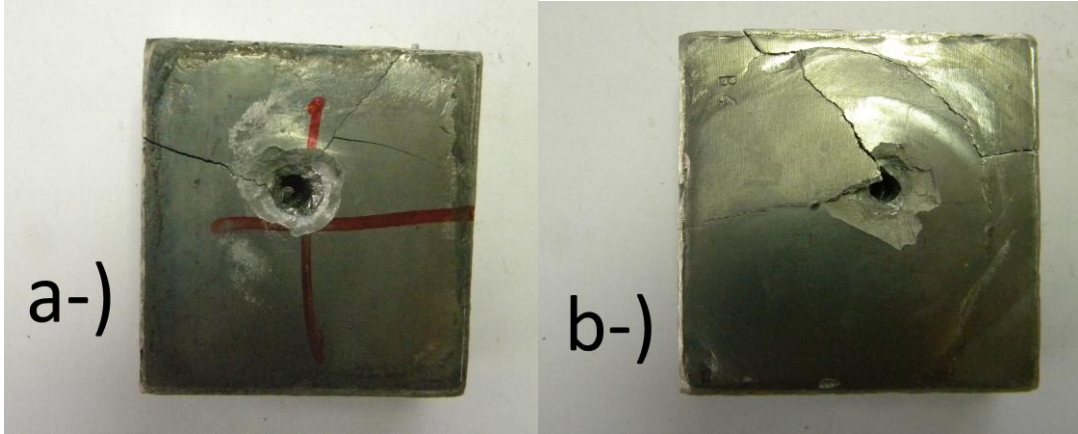
Şekil 4.41 %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli 20 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi girişi b-)mermi çıkışı

%40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli 25 mm kalınlığa sahip İDM'nin balistik atış testi sonrası makro boyuttaki görüntüsü Şekil 4.42'de görüldüğü gibidir. Atış sonrası numune 4 parçaya ayrılmıştır. Ayrıca katmanlar arasında gerçekleşen ayrılma numunenin üretimi esnasında bir takım sinterleme problemlerinin olduğunu göstergesidir.



Şekil 4.42 %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli 25 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi

%40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli 25mm kalınlığa sahip İDM'nin balistik atış testi sonrası makro boyuttaki görüntüsü Şekil 4.43'de görüldüğü gibidir. Atış sonrası İDM bütüncül yapısını korumuş katmanlar arasında herhangi bir ayrışma gözlemlenmemiş ve numune tek parça olarak kalmıştır. Mermi çıkış çapı giriş çapından daha küçüktür ve mermi gömleği numune içerisinde kalmıştır.



Şekil 4.43. %40-20 B<sub>4</sub>C takviyeli 25 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a-) mermi çıkışı b-) mermi girişi

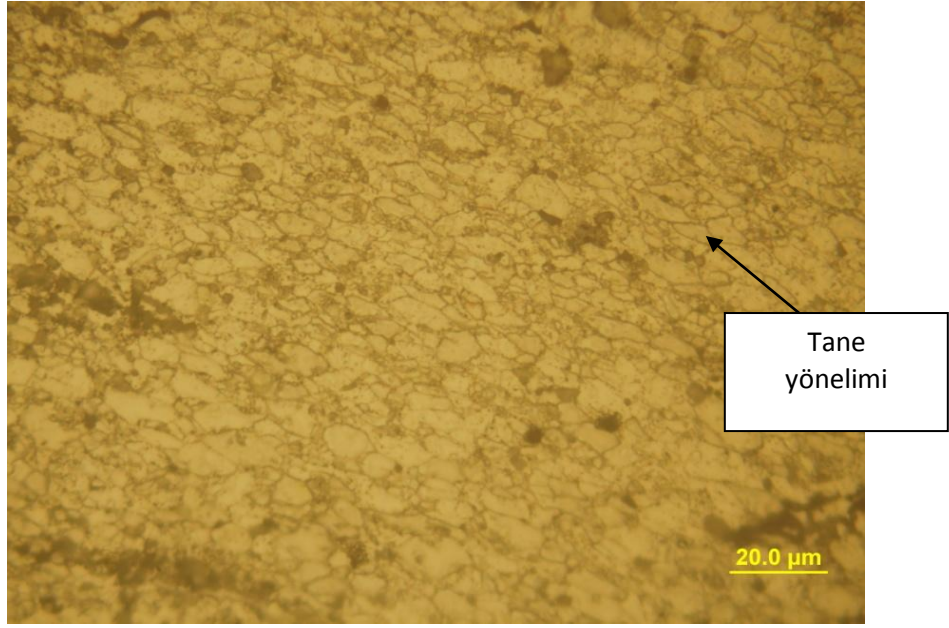
Balistik test atışları gerçekleştirilen numunelerde katman kalınlığı arttıkça malzemenin balistik olarak daha yüksek başarımlar gösterebileceği anlaşılmıştır. Buna ek olarak yüksek takviye oranlarında İDM'nin sertliğinin artmasına bağlı olarak mermi çekirdeğinin daha çok aşınacağı ve dolayısıyla balistik başarımın artacağı beklenmektedir fakat seramik takviye oranının artmasına bağlı olarak sinterleme işleminin zorlaşacağı ve üretimi tamamlanan malzeme içerisindeki gözeneklerin, yüksek gerilme yoğunluğu oluşturarak gevrek bir kırılmaya neden olacağı yapılan testlerden anlaşılmıştır.

#### **4.5.2. Balistik test sonrası İDM'lerin mikro boyutta incelenmesi**

Yüksek uzama hızlarında, deformasyonun gerçekleştiği bölgede oluşan ısının atılamaması sonucu, malzeme içyapısında adyabatik kayma bandı oluşumu gözlemlenmektedir. Adyabatik kayma, balistik uygulamalar, yüksek hızlı talaşlı imalat, parçalanma ve aşınma gibi bir çok durumda önemli bir etkiye sahiptir. Oluşan adyabatik kayma bantları yüksek gerilim hızlarından beklenmedik gevrek kırılmalara neden olabilmektedirler [74, 75, 76]. Adyabatik kayma bantları dönüşmüş bant ve bozulmuş bant olarak ikiye ayrılmaktadır. Dönüşmüş bantta kristalografik faz dönüşümleri meydana gelirken, bozulmuş bantta içyapıda bir değişiklik olmadan sadece tane dizilim ve yönelimleri değişmektedir [77].

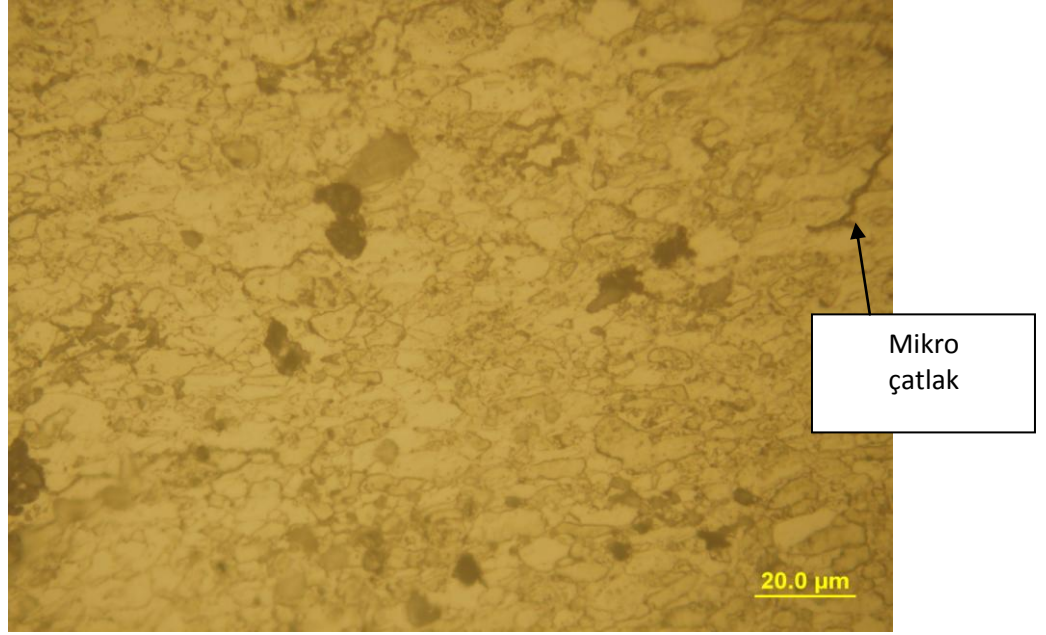
Balistik sonrası İDM'lerin delik bölgesinden kesit alınarak, deliğe en yakın bölgelerden ışık mikroskobu vasıtasıyla mikro görüntüler elde edilmiştir. Bu görüntüler yardımıyla malzeme içerisindeki tane deformasyonları ve mikro boyuttaki çatlaklar gözlemlenmiştir. Delik bölgesine yaklaştıkça tane deformasyonu artmakta, delik bölgesinden uzaklaşıldığında ise balistik atış sonrası yüksek hızdaki darbenin etkileri azalmaktadır.

Şekil 8.44'de düşük B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin alt katmanına ait mikro yapı görülmektedir. Elde edilen mikro yapıda merminin geçtiği bölgelerden tane deformasyonu oluşumu gözlemlenmiştir. Tane deformasyonu merminin hareket yönünde tanelerin incelik uzaması şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.44 Düşük B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin alt katmanının balistik test sonrası mikro görüntüsü

Şekil 4.45'de balistik test sonrası mermi giriş bölgesinin ışık mikroskobuyla incelenmesi sonucunda yapıdaki gözenek çevrelerinde mikro çatlaklar bulunduğu görülmüştür. Oluşan bu mikro çatlakların balistik atış sırasındaki radyal çatlakların nedeni olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.45 Düşük B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'nin alt katmanının balistik test sonrası mikro görüntüsü

Balistik atışlar sonrası alt katmana ait içyapı incelemelerinde merminin hareketi yönünde şekil değiştirmiş bantların varlığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yapıda mikro çatlakların mevcut olduğu, mevcut çatlakların gözeneklerin yoğun olduğu bölgelerde daha çok yer aldığı ve bu çatlakların balistik atışlar sırasında İDM'lerin balistik performansını olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Çalışmada kullanılan tozların boyut dağılımı geniş bir aralıktadır.
- 3 katmanlı AA7075 esaslı B<sub>4</sub>C takviyeli İDM'lerin eş zamanlı uygulanan sıkıştırma ve sinterleme işlemiyle %40 takviye oranına kadar başarılı olarak üretilebildiği görülmüştür.
- Katmanlar arası geçiş bölgeleri düzgün olarak elde edilebilmiştir.
- Takviye parçacıkların ana yapı içerisinde genel olarak homojen dağılım gösterdiği fakat takviye oranı arttıkça topaklanma miktarının arttığı gözlemlenmiştir.
- Işık mikroskobu incelemelerinde alt katmanda bir miktar gözenek oluşumu gözlemlenmektedir.
- 100, 120 ve 150 °C'de 96 saate kadar gerçekleştirilen yaşlandırma işleminde en yüksek sertlik değerinin %40 B<sub>4</sub>C takviyeli katmanın 120°C'de 48 saat yaşlandırılması sonucunda elde edildiği görülmüştür.
- En düşük sertlik değeri tüm yaşlandırma zaman ve sıcaklıklarında AA 7075 katmanında (takviyesiz katman) elde edilmiştir.
- Ana yapı içerisinde B<sub>4</sub>C parçacıklarının ulaşılan sertlik seviyesini önemli seviyede etkilediği fakat AA7075'in yaşlanma karakteristiği üzerinde bir etkiye sahip olmadığı anlaşılmıştır.
- Üç nokta eğme deneyleri sonucunda en yüksek çapraz kırılma dayanımı düşük takviyeli ve yaşlandırılmış numunelerde elde edilmiştir.
- Ana yapı içerisindeki B<sub>4</sub>C miktarı ve malzeme kalınlığı arttıkça balistik performansın artırdığı görülmüştür.
- Balistik atışlar sonrasında numunelerin büyük çoğunluğunda katmanlar arasında bir ayrışma gözlemlenmemiş ve katmanlar arası metalürjik bağın düzgün olduğu anlaşılmıştır.

- Hasar tipi olarak konik yapı oluşumu, radyal çatlaklar ve parça kopması gözlemlenmiştir.
- Atışlar sonrası numunelerin delik bölgelerine yakın yerlerde yapılan incelemelerde tane yapısının inceliği uzadığı ayrıca yapı içerisinde mikro çatlak oluşumları gözlemlenmiştir.

Çalışmanın devamında yapılabilecek ek çalışmalar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Sinterleme basıncı artırılarak ve sinterleme atmosferi değiştirilerek mekanik özelliklerde iyileşme sağlanabilir.
- Aynı malzeme türü için B<sub>4</sub>C takviye oranları, katman kalınlık ve oranları değiştirilerek tekrar balistik deneyler gerçekleştirilebilir.
- Ayrıntılı elektron mikroskobu incelemeleri yapılarak yaşlandırma sonucu oluşan çökelti gözlemlenebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] Ford, R., *Weapon: A Visual History of Arms and Armour*, DK Publishing, 2006.
- [2] Dirk, B., Department of Arms and Armor, The Metropolitan Museum of Art, [www.metmuseum.org](http://www.metmuseum.org), erişim tarihi : 23 Şubat 2012.
- [3] Den Reijer, PC., *Impact on faced armor*, PhD thesis, Delft Technical University, 1991
- [4] Ichikawa, K., *Functionally graded materials in 21st century*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2001.
- [5] Rosenberg, Z., Dekel, E., *Terminal Ballistics*, Springer, Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [6] Rumley, R., *Fundamental of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*, Woodhead Publishing, Oxford, 2011.
- [7] ASM Handbook, *Properties and Selection, Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, Volume 02, 1990.
- [8] Askeland, D.R., *The Science and Engineering of Materials*, Cengage Learning, 2010.
- [9] Jin-feng, L., Zhuo-wei, P., Chao-xing, L., Zhi-qiang, J., Wen-jung, C., Zi-qiao, Z., *Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments*, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 18 (2008), 755-762.
- [10] Dwight, J., *Aluminium Design and Construction*, E&FN Spon Routledge, New York, 1999.
- [11] Smith, W.F., *Materials Science and Engineering*, McGraw-Hill, 2001.
- [12] Lloyd, D. J., Chatuverdi, M. C., "A calorimetric study of aluminum alloy AA-7075", *Journal of Materials Science*, 17, 1819-1824, 1982.
- [13] Sarıkan, B., Öztaş, M.K., Balcı, E., Übeyli, M., Camuşçu, N., Keleş, Ö., *Yapay yaşlandırmanın SiC ve 7075 alüminyum alaşımı içeren bir işlevsel dereceli malzemenin sertliği üzerine etkisi*, 6th. Powder metallurgy conference, METU, ANKARA, 2011.
- [14] Hadianfard, M.J., Mai, Y.W., Healy, J.C., *Effect of ceramic reinforcement on the ageing behavior of an aluminium alloy*, *Journal of Materials Science*, 28, 3665-3669, 1993.
- [15] Callister, W.D., Rethwisch, D.G., *Materials Science and Engineering*, Wiley, New Jersey, 2011.
- [16] Chung, D.D.L., *Composite Materials: Science and Applications*, Second Edition, Springer, New York, 2010.
- [17] Gay, D., Hoa, S.V., Tsai, S.W., *Composite Materials: Design and Applications*, Crc Press, Paris, 1997.
- [18] Orhan, A., Gür, A.K., Çalgülü, U., *Alüminyum matriksli B<sub>4</sub>C takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi*, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 8-13, 2007.

- [19] Department of Defence, Composite Materials Handbook: Metal matrix composites, U.S.A, 2002.
- [20] Rosso, M., Ceramic and metal matrix composites: route and properties, 12.th International Scientific Conference of Achievements in Mechanical and Materials Engineering, 36-48, AMME, 2003.
- [21] Froyen, L., Verlinden, B., Aluminium matrix composite materials, Training in Aluminium Application Technologies, Lecture 1402, 1994.
- [22] Torralba, J.M., Costa, C.E., Velasco, F., P/M Aluminium matrix composites: an overview, Journal of Materials Processing Technology, 133, 203-206, 2003.
- [23] Kerti, I., Toptan, F., Microstructural variations in cast B<sub>4</sub>C- reinforced aluminium matrix composites, Materials Letters, 62, 1215-1218, 2008.
- [24] Tan, M.J., Zhang, X., Powder metal matrix composites: selection and processing, Material Science and Engineering, A244, 80-85, 1998.
- [25] Cayron, C., Tem study of interfacial reactions and precipitation mechanisms in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> short fiber and high volume fraction SiC particle reinforced Al-4Cu-1Mg-0.5Ag squeeze-cast composites, Presentee au departement des materiaux, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2000.
- [26] Nie, C.Z., Gu, J.J., Liu, J.L., Zhang, D., Production of boron carbide reinforced 2024 Aluminium matrix composites by mechanical alloying, Materials Transactions, Vol. 48, No. 5, 990-995, 2007.
- [27] Karabaş, K., 2006, Bor Karbür Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [28] Atasoy, A., Bor Karbür Üretiminde Metalik Alüminyum Toz İlavesinin Etkisi, 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Turkey, 2011.
- [29] Namtae, C., Processing of boron carbide, Phd thesis, Georgia Institute of Technology, Schools of Materials Science and Engineering, USA, 2006.
- [30] Ünal, R., Sarpün, İ.H., Yalın, H.A., Erol, A., Özdemir, T., Tuncel, S., The mean grain size determination of boron carbide (B<sub>4</sub>C) – aluminium (Al) and boron carbide (B<sub>4</sub>C) – nickel (Ni) composites by ultrasonic velocity technique, Materials Characterization, 56, 241-244, 2006.
- [31] Roy, T.K., Subramanian, C., Suri A.K., Pressureless sintering of boron carbide, Ceramics International, 32, 227-233, 2006.
- [32] Gomez, L., Busquets-Mataix, D., Amigo, V., Salvador, M.D., Analysis of boron carbide aluminium matrix composites, Journal of Composite Materials, 43, 987-995, 2009.
- [33] Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T., Functionally graded material: an overview, Proceedings of the World Congress on Engineerings, Vol III, London, 2012.
- [34] Kawasaki, A., Watanabe, R., Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials, Ceramics International, 23, 73-83, 1997.
- [35] Marin, L., Numerical solution of the Cauchy problem for steady-state heat transfer in two dimensional functionally graded materials, International Journal of Solids and Structures, 42, 4338-4351, 2005.

- [36] Shen, H, Functionally Graded Materials: Nonlinear Analysis of Plates and Shells, Crc Press, 2009.
- [37] Ruiz-Navas, E.M., Gordo, E., Garcia, R., Development and characterization of 430L matrix composites gradient materials, *Materials Research*, Vol. 8, No. 1, 1-4, 2005.
- [38] Konez, A., Alagöz, H., Topal, S., Gülgeç, M., Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretim teknikleri ve kullanım alanları, *Mühendis ve Makine*, Cilt. 46, Sayı 547, 1-25,
- [39] Nemat-Alla, M.M., Ata, M.H., Bayoumi, M.R., Khair-Eldeen, W., Powder metallurgical fabrication and microstructural investigations of Aluminium/Steel functionally graded material, *Material Sciences and Applications*, 2, 1708-1718, 2011.
- [40] Lin, C.Y., Bathias, C., McShane H.B., Rawlings, R.D., Production of silicon carbide Al 2124 alloy functionally graded materials by mechanical powder metallurgy technique, *Powder Metallurgy*, Vol. 42, No. 1, 1999.
- [41] Upadhyaya, G.S., *Powder Metallurgy Technology*, Cambridge International Science Publishing, Cambridge, 2002.
- [42] German, R. M., Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Tercüme: Saritaş, S., Türker, M., Durlu, N., *Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları: 05*, Ankara, 2007.
- [43] Kang, S-J. L., Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure, Elsevier, Jordon Hill, Oxford, 2005.
- [44] Fang, Z.Z., Sintering of Advanced Materials: Fundamental and Processes, Woodhead Publishing, Cambridge, 2010.
- [45] Meluch, L., Warm Compaction of Aluminium Alloy Alumix 123, Doktora Tezi, University of Birmingham, 2009.
- [46] Kumdalı, F., 2008, Alüminyum Matrisli B<sub>4</sub>C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [47] Wang, Z., Song, M., Sun, C., He, Y., Effect of particle size and distribution on the mechanical properties of SiC reinforced Al-Cu alloy composites, *Materials Science and Engineering*, A528, 1131-1137, 2011.
- [48] Kouzeli, M. Mortensen, A., Size dependent strengthening of in particle reinforced aluminium, *Acta Materialia*, 50, 39-51, 2002.
- [49] Aycan, F. 2010, Yaşlandırma Isıl İşleminin SiC ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Parçacık Takviyeli Alüminyum Alaşımı Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB E.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü
- [50] Hogg, P. J., Composites for ballistic applications, Department of Materials, Queen Mary, University of London.
- [51] Rosenberg, Z., Ashuach, Y., Yeshurun, Y., Dekel, E., On the main mechanisms for defeating AP projectiles, long rods and shaped charge jets, *International Journal of Impact Engineering*, 36, 588-596, 2009.
- [52] Demir, T., 2008, Metal ve Katmanlı Zırh Malzemelerin 7,62mm'lik Zırh Delici Mermiler Karşısındaki Balistik Başarımlarının İncelenmesi, , *Yüksek*

*Lisans Tezi*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, , Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [53] Chin, E., Army focused research team on functionally graded armor composites, *Material science and engineering*, A259, 155-161, 1999.
- [54] Gooch, W.A., Burkins, M.S., Development and ballistic testing of a functionally gradiend ceramic/metal applique, U. S. Army Reseach Laboratory, SM(2), 15, 1-11.
- [55] Lee, M., Yoo, Y.H., Analysis of ceramic/metal armour systems, *International Journal of Impact Engineering*, 25, 819-829, 2001.
- [56] Jena, P.K., Mishra, B., Kumar, K.S., Bhat, T.B., An experimental study on the ballistic behavior of some metallic armour materials against 7.62mm deformable projectile, *Materials and Design*, 31, 3308-3316, 2010.
- [57] Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Investigation on the ballistic behavior of various alloys against 7.62 mm armour piercing projectile, *Materials and Design*, 29, 2009-2016, 2010.
- [58] Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Ögel, B., Investigation on the ballistic behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>24</sub> laminated composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 196, 356-364, 2008.
- [59] Forquin, P., Arias, A., Zaera, R., The ballistic behavior of mortars reinforced with ceramic particles: Influence of reinforcement, Millpress, Rotterdam, 2005.
- [60] Savio, S.G., Ramanjaneyulu, K., Madhu, V., Bhat, T.B., An experimental study on ballistic performance of boron carbide tiles, *International Journal of Impact Engineering*, 38, 535-541, 2011.
- [61] Ong, C.W., Boey, C.W., Hixson, R.S., Sinibaldi, J.O., Advanced layer personnel armor, *International Journal of Impact Engineering*, 38, 369-383, 2011.
- [62] Tasdemirci, A., Tunusoğlu, G., Güden, M., The effect of the interlayer on the ballistic performance of ceramic/composite armor: Experimental and numerical study, *International Journal of Impact Engineering*, 44, 1-9, 2012.
- [63] Madhu, V., Ramanjaneyulu, K., Bhat, Balakrishna., Gupta, N.K., An experimental study of ceramic armour subjected to projectile impact, *International Journal of Impact Engineering*, 32, 337-350, 2005.
- [64] Shokrieh, M.M., Javadpour, G.H., Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor, *Composite Structure*, 82, 269-276, 2008.
- [65] Templeton, D.W., Gorsich, T.J., Holmquist, T., Computational study of a functionally ceramic-metallic armor, 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain, 2007.
- [66] Sheu, C.Y., Lin, S.J., Ageing behavior of SiCp-reinforced AA7075 composites, *Journal of Materials Science*, 32, (1997), 1741-1747
- [67] Sarıkan, B., Balcı, E., Übeyli, M., Camuşçu, N., Investiation on the aging behaviour of the functionally gradient material consisting of boron carbide and an aluminium alloy, *Materials and technology*, 46, 393-397, 2012.

- [68] ASTM Standards, Designation E10-84, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, 1984.
- [69] ASTM Standards, Designation B528-99, Standard Test Method for Transverse Rupture Strength of Metal Powder Specimens, 1999.
- [70] MIL-C-60617A, Military Specification, Cartridge, 7.62 mm: NATO, Armor Piercing, M61, 1991.
- [71] Sahin, Y., Preparation and some properties of SiC particle reinforced aluminium alloy composites, *Materials and Design*, 24, 671-679, 2003.
- [72] Woodward, R.L., A rational basis for the selection of armor materials, *The Journal of Aust Inst of Metals*, 22, 167-170, 1977.
- [73] Sadanandan, S., Heterington, J.G., Characterisation of ceramic/steel and ceramic/aluminium armours subjected to oblique impact, *Int. Journal of Impact Engineering*, 19, 811-819, 1997.
- [74] C. Zener C, J.H. Hollomon, *Journal of Applied Physics*, 15, 22, 1994.
- [75] H. C. Rogers, C. V. Shastry, *Material Factors in Adiabatic Shearing in Steels, Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals*, 285-298, 1981.
- [76] Wright, T.W., *The Physics and Mathematics of Adiabatic Shear Bands*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [77] Dornmeval, R., *The adiabatic shear phenomenon in Materials at High Strain Rates*, (Ed. T.Z. Blazynski), Elsevier Applied Science, 1987.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SARIKAN, Bertan  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 20.01.1986 Terme  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (505) 817 23 47  
E-mail : bsarikan@etu.edu.tr

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği	2010

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-2012	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2012-halen	MKEK Barut Fabrikası	Bakım Onarım Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

#### Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan (SCI ve/veya SCI-E tarafından taranan dergilerde)

- **Sarıkan, B.**, Balcı, E., Übeyli, M., Camuşçu, N., An investigation on the aging behavior of the functionally gradient material consisting of boron carbide and aluminum alloy, Materials and Technology (Materiali in Tehnologije), 46(4), 2012.
- Balcı, E., **Sarıkan, B.**, Übeyli, M., Camuşçu, N., Yıldırım, R.O., On the ballistic performance of the AA7075 based functionally graded material with boron carbide reinforcement, Kovove Materialy-Metallic Materials (kabul edildi, basım aşamasında)

### Uluslararası Konferans Bildirileri

- Öztaş, M.K., **Sarıkan, B.**, Übeyli, M., Camuşçu, N., Keleş, Ö., Production of the Functionally gradient Material Based on an Aluminum Alloy, The Eleventh International Scientifically-Practical Conference, Saint-Petersburg, Rusya Federasyonu, 2011.
- **Sarıkan, B.**, Balcı, E., Übeyli, M., Camuşçu, N., An investigation on the aging behavior of the functionally gradient material consisting of boron carbide and aluminum alloy, 19th Conference of Materials and Technology, Portoroz – Slovenia, 22-23 November 2011.
- **Sarıkan, B.**, Balcı, E., Öztaş, M.K., Übeyli, M., Camuşçu, N., Keleş, Ö., Yapay yaşlandırmanın SiC ve 7075 alüminyum alaşımı içeren bir işlevsel dereceli malzemenin sertliği üzerine etkisi, 6th International Powder Metallurgy Conference, Ankara-TÜRKİYE, October, 2011.
- Balcı, E., **Sarıkan, B.**, Übeyli, M., Camuşçu, N., Impact behavior of the multilayered B<sub>4</sub>C/AA7075 functionally graded materials against armor piercing projectile, XVII. International Conference on Mechanics of Composite Materials, Riga-Latvia, May 28 – June 01, 2012.