

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SİLİSYUM KARBÜR VE ALÜMİNA TAKVİYELİ ALÜMİNYUM
ESASLI İŞLEVSEL DERECELİ MALZEMELERİN BALİSTİK
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

ERHAN BALCI

KOCAELİ 2014

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

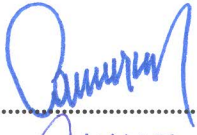


SİLİSYUM KARBÜR VE ALÜMİNA TAKVİYELİ ALÜMİNYUM
ESASLI İŞLEVSEL DERECELİ MALZEMELERİN BALİSTİK
PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ERHAN BALCI

Prof. Dr. Necip CAMUŞCU
Danışman, TOBB ETÜ

Doç. Dr. A. Armağan ARICI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç. Dr. Sedat KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.01.2014

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son yıllarda artan silah gücüne karşı olarak, korunma yöntemleri de gelişmektedir. Geleneksel olarak kullanılan çelik zırhlar, ağırlıklarından dolayı yüksek enerji tüketimine ve hareket kabiliyetinde azalmaya yol açmaktadır. Bu sebeple hafif zırh malzemeleri geliştirilmesi önem kazanmıştır. Yeni bir kompozit türü olan İşlevsel Dereceli Malzemeler potansiyel bir zırh malzemesi olarak düşünülebilir. Bu amaç doğrultusunda seramik takviyeli alüminyum esaslı İşlevsel Dereceli Malzeme üretimi gerçekleştirilerek, balistik teste tabi tutularak balistik başarımları incelenmiştir.

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocalarım Prof. Dr. Necip CAMUŞCU, Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ, Doç. Dr. Armağan ARICI, Yrd. Doç. Dr. Teyfik DEMİR ile çalışma arkadaşlarım Makine Yüksek Mühendisi Bertan SARIKAN, Makine Mühendisi M. Kemal ÖZTAŞ ve Makine Mühendisi Saman AHMADZADEH'e teşekkür ederim. Ayrıca laboratuvar imkanlarından faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne, balistik testlerin gerçekleştirildiği MKEK Silah Fabrikası'na ve bu çalışmayı 110M034 numaralı projesiyle maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ocak - 2014

Erhan BALCI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Alüminyum Alaşımları	3
1.1.1. Alüminyum alaşımlarında dayanım artışı	4
1.2. Kompozit Malzemeler	6
1.2.1. Metal Esaslı Kompozitler	7
1.2.2. İşlevsel derecelendirilmiş malzemeler	9
1.3. Toz Metalurjisi.....	12
1.3.1. Tozların karıştırılması	13
1.3.2. Tozların sıkıştırılması	15
1.3.3. Sinterleme	16
1.4. Balistik.....	16
1.4.1. İç Balistik	16
1.4.2. Dış Balistik.....	17
1.4.3. Terminal Balistik	17
1.5. Zırh Malzemeleri.....	18
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	21
2.1. Toz Boyutlarının Ölçümü.....	21
2.2. Numune Üretimi.....	21
2.2.1. Tozların karıştırılması	24
2.2.2. Kalıbın hazırlanması	26
2.2.3. Ön sıkıştırma aşamaları.....	27
2.2.4. Basınç altında sinterleme	28
2.3. İDM'lerin Makro ve Mikro Görüntülerinin Elde Edilmesi	29
2.4. Yaşlandırma Isıl İşlemi	31
2.5. Sertlik Ölçümü	33
2.6. Üç Nokta Eğme Testleri.....	34
2.7. Balistik Atış Testleri	34
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	38
3.1. İDM'lerin Makro ve Mikro Görüntülerinin Elde Edilmesi.....	38
3.1.1. SiC takviyeli İDM'lere ait içyapı incelemesi.....	38
3.1.2. Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'lere ait içyapı incelemesi	45
3.1.3. İDM'lerde tane boyutu ve gözenek miktarı	47
3.2. Yaşlandırma Isıl İşlemi	49
3.2.1. Yüksek SiC takviyeli İDM'nin 100 °C'de yaşlandırılması	50

3.2.2. Yüksek SiC takviyeli İDM'nin 120 °C'de yaşlandırılması	50
3.2.3. Yüksek SiC takviyeli İDM'nin 150 °C'de yaşlandırılması	51
3.2.4. Düşük SiC takviyeli İDM'nin 100 °C'de yaşlandırılması	52
3.2.5. Düşük SiC takviyeli İDM'nin 120 °C'de yaşlandırılması	53
3.2.6. Düşük SiC takviyeli İDM'nin 150 °C'de yaşlandırılması	53
3.2.7. Yüksek Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin 100 °C'de yaşlandırılması	54
3.2.8. Yüksek Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin 120 °C'de yaşlandırılması	55
3.2.9. Yüksek Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin 150 °C'de yaşlandırılması	56
3.2.10. Düşük Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin 100 °C'de yaşlandırılması	57
3.2.11. Düşük Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin 120 °C'de yaşlandırılması	57
3.2.12. Düşük Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin 150 °C'de yaşlandırılması	58
3.3. Üç Nokta Eğme Testleri	60
3.3.1. SiC takviyeli İDM'lere ait üç nokta eğme testi sonuçları	60
3.3.2. Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'lere ait üç nokta eğme testi sonuçları	63
3.4. Balistik Atış Testleri	67
3.4.1. Balistik deney sonrası numunelerin makro incelenmesi	68
3.4.2. Balistik deney sonrası numunelerin makro incelenmesi	77
3.5. Analitik Modelleme	82
3.5.1. Florence modeli	82
3.5.2. Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin modeli	85
3.5.3. Değiştirilmiş Florence modeli	86
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR	91
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	99
ÖZGEÇMİŞ	100

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Çökelme sertleşmesi aşamaları	5
Şekil 1.2.	Takviye malzemesinin şekillerine göre kompozitler	8
Şekil 1.3.	Toz karıştırma yöntemleri.....	14
Şekil 1.4.	Bilyeli değirmenin gösterimi	14
Şekil 1.5.	Sıkıştırmanın aşamaları.....	15
Şekil 1.6.	Farklı darbe durumlarında muhtemel kırılma şekilleri	18
Şekil 1.7.	Darbe sonrası kopan parçalar ve koruyucu katmanın şematik görünümü.....	19
Şekil 2.1.	Üretimi tamamlanan SiC takviyeli numunelere ait görünüm	22
Şekil 2.2.	Üretimi tamamlanan Al ₂ O ₃ takviyeli numunelere ait görünüm.....	22
Şekil 2.3.	Numunelerin toplu gösterimi	23
Şekil 2.4.	Örnek bir numunenin ölçüleri.....	23
Şekil 2.5.	Al ₂ O ₃ /AA7075 katmanlı kompozitler.....	24
Şekil 2.6.	Al ₂ O ₃ /AA7075 katmanlı bir numunenin ölçüleri	24
Şekil 2.7.	Tozların tartım işlemi.....	25
Şekil 2.8.	Karıştırıcıda kullanılan bilyalar	25
Şekil 2.9.	TURBULA karıştırıcı	26
Şekil 2.10.	Alt destek, üst destek ve kalıp	27
Şekil 2.11.	Kalıbın teknik resmi.....	27
Şekil 2.12.	Ham malzeme	28
Şekil 2.13.	Eş zamanlı olarak gerçekleştirilen presleme ve sinterleme işlemlerinin gösterimi.....	29
Şekil 2.14.	(a) Bakalit öncesi kesilmiş parça ve (b) bakalite alınmış numune.....	30
Şekil 2.15.	(a) Orta %10, üst %20 SiC takviyeli ve (b) orta %20, üst %40 SiC takviyeli numune	30
Şekil 2.16.	(a) Zımparalama işlemi ve (b) parlatma işlemi.....	31
Şekil 2.17.	Işık mikroskobu ile inceleme	31
Şekil 2.18.	Çözeltiyeye alma işleminin gerçekleştirildiği kül fırınının gösterimi	32
Şekil 2.19.	Yaşlandırma işleminin gerçekleştirildiği yağ banyosunun gösterimi.....	33
Şekil 2.20.	a) Sertlik Ölçüm cihazı b) Sertlik ölçümü yapılmış numune.....	33
Şekil 2.21.	Hazırlanan tipik bir üç nokta eğme numunesi (15 mm kalınlıkta)	34
Şekil 2.22.	Atış düzeneğinin şematik gösterimi.....	35
Şekil 2.23.	Numunenin bağlandığı hedef düzeneğinin görünümü.....	36
Şekil 2.24.	Balistik atışların gerçekleştirildiği atış poligonunun şematik gösterimi.....	36
Şekil 3.1.	AA7075 ve %10 SiC takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesi (X200)	39
Şekil 3.2.	%20 SiC takviyeli İDM'ye ait ışık mikroskobu görüntüsü (X200).....	39
Şekil 3.3.	%40 SiC parçacık takviyeli İDM'ye ait tipik bir görüntü (X100).....	40
Şekil 3.4.	120 °C'de 48 saat süre ile yapay yaşlandırılmış düşük SiC takviyeli İDM numunelerine ait SEM görüntüleri a) Alt katman (x1000),	

	b) Orta katman (x500), c) Üst katman (x200) d) Alt-orta katman geçiş (x100).....	41
Şekil 3.5.	Düşük SiC takviyeli yaşlandırılmış numuneden alınan EDS analizi.....	42
Şekil 3.6.	Yaşlandırılmamış düşük SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri a) Alt katman(x1000), b) Orta katman (x200).....	43
Şekil 3.7.	120 °C’de 48 saat süre ile yapay yaşlandırılmış yüksek SiC takviyeli İDM numunelerine ait SEM görüntüleri: a) Alt katman (x500), b) Orta katman (x500), c) Orta-üst katman geçişi (x100), d) Üst katman (x200).....	44
Şekil 3.8.	Yaşlandırılmamış düşük SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri: a) Alt katman (x1000), b) Üst katman (x100).....	45
Şekil 3.9.	AA7075 alt ve %10 Al ₂ O ₃ takviyeli orta katmana ait geçiş bölgesi görüntüsü.....	46
Şekil 3.10.	Al ₂ O ₃ takviyeli İDM’ye ait mikro görüntüler a-) AA7075 (200x) b-) %10 takviyeli (200x) c-) %20 takviyeli (500x).....	47
Şekil 3.11.	Yüksek SiC takviye oranına sahip İDM’nin 100 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	50
Şekil 3.12.	Yüksek SiC takviye oranına sahip İDM’nin 120 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	51
Şekil 3.13.	Yüksek SiC takviye oranına sahip İDM’nin 150 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	52
Şekil 3.14.	Düşük SiC takviye oranına sahip İDM’nin 100 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	52
Şekil 3.15.	Düşük SiC takviye oranına sahip İDM’nin 120 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	53
Şekil 3.16.	Düşük SiC takviye oranına sahip İDM’nin 150 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	54
Şekil 3.17.	Yüksek Al ₂ O ₃ takviye oranına sahip İDM’nin 100 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	55
Şekil 3.18.	Yüksek Al ₂ O ₃ takviye oranına sahip İDM’nin 120 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	55
Şekil 3.19.	Yüksek Al ₂ O ₃ takviye oranına sahip İDM’nin 150 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	56
Şekil 3.20.	Düşük Al ₂ O ₃ takviye oranına sahip İDM’nin 100 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	57
Şekil 3.21.	Düşük Al ₂ O ₃ takviye oranına sahip İDM’nin 120°C’deki sertlik-zaman eğrisi	58
Şekil 3.22.	Düşük Al ₂ O ₃ takviye oranına sahip İDM’nin 150 °C’deki sertlik-zaman eğrisi	59
Şekil 3.23.	Yaşlandırılmamış %20 ve %10 SiC takviyeli İDM’ye ait kuvvet-uzama eğrisi	61
Şekil 3.24.	Yaşlandırılmamış %40 ve %20 SiC takviyeli İDM’ye ait kuvvet-uzama eğrisi	61
Şekil 3.25.	Yaşlandırılmış %20 ve %10 SiC takviyeli İDM’ye ait kuvvet-uzama eğrisi	62
Şekil 3.26.	Yaşlandırılmış %40 ve %20 SiC takviyeli İDM’ye ait kuvvet-uzama eğrisi,	62

Şekil 3.27. Yaşlandırılmamış %20-10 Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	63
Şekil 3.28. Yaşlandırılmamış düşük Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü	64
Şekil 3.29. Yaşlandırılmamış %30-15 Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	65
Şekil 3.30. Yaşlandırılmamış yüksek Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü.....	65
Şekil 3.31. Yaşlandırılmış düşük Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü	66
Şekil 3.32. Yaşlandırılmış düşük Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü	66
Şekil 3.33. Yaşlandırılmış yüksek Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü	67
Şekil 3.34. Numunenin bağlandığı hedef düzeneğin görünümü	68
Şekil 3.35. Metallerde görülen hasar mekanizmaları (a) Sünek Delinme (b) Çukur tipi delinme (c) Zimba etkisiyle delinme.....	69
Şekil 3.36. %40 ve %20 SiC takviyeli 25 mm kalınlıktaki numunenin balistik atış sonrasındaki görüntüsü: a) Mermi girişi, b) Mermi çıkışı.....	70
Şekil 3.37. Yüksek SiC takviyeli numunenin kesit görüntüsü.....	70
Şekil 3.38. %20 ve %10 SiC takviyeli 25 mm kalınlıktaki numunenin balistik atış sonrasındaki görüntüsü: a) Mermi girişi, b) Mermi çıkışı.....	71
Şekil 3.39. %20 ve %10 Al ₂ O ₃ takviyeli 20 mm kalınlıktaki numunenin balistik atış sonrasındaki görüntüsü: a) Mermi girişi, b) Mermi çıkışı.....	71
Şekil 3.40. %30 ve %15 Al ₂ O ₃ takviyeli ve 15 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a) mermi girişi b) mermi çıkışı.....	72
Şekil 3.41. %20 ve %10 Al ₂ O ₃ takviyeli ve 15 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a) mermi girişi b) mermi çıkışı.....	72
Şekil 3.42. Al ₂ O ₃ (10 mm)/AA7075 (7 mm) katmanlı kompozitinin balistik atış sonrası makro görüntüsü a) ön yüzü b) arka yüzü	73
Şekil 3.43. Al ₂ O ₃ (10 mm) -AA7075 (10 mm) katmanlı kompozitinin balistik atış sonrası makro görüntüsü a) ön yüzü b) arka yüzü.....	74
Şekil 3.44. Al ₂ O ₃ (10 mm) -AA7075 (13 mm) katmanlı kompozitinin balistik atış sonrası makro görüntüsü a) ön yüzü b) arka yüzü.....	74
Şekil 3.45. %20 ve %10 SiC takviyeli İDM'nin alt katmanına ait balistik sonrası içyapı görüntüleri	78
Şekil 3.46. %20 ve %10 SiC takviyeli İDM'nin (a) alt ve (b) orta katmanına ait balistik sonrası içyapı görüntüleri	79
Şekil 3.47. %20 ve %10 Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin orta katmanına ait balistik sonrası içyapı görüntüleri	80
Şekil 3.48. %20 ve %10 Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'nin üst katmanının görünümü	81
Şekil 3.49. İki katmanlı zırhın şematik gösterimi	83

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Alüminyum alaşımlarının kodlanması.....	3
Tablo 1.2.	AA7075 alaşımının içeriği.....	4
Tablo 1.3.	Alüminyum alaşımlarının ısıtılabilirlikleri.....	4
Tablo 2.1.	Üretilen SiC takviyeli İDM'lerin bileşimleri.....	21
Tablo 2.2.	Üretilen Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'lerin bileşimleri	21
Tablo 2.3.	7,62 mm AP merminin önemli özellikleri	37
Tablo 3.1.	Düşük SiC takviyeli numunenin alt katmanının kimyasal içeriği	42
Tablo 3.2.	SiC takviyeli İDM katmanlarında ortalama tane boyu (µm).....	47
Tablo 3.3.	Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'de tane boyları	48
Tablo 3.4.	SiC takviyeli İDM'lerin gözenek miktarları (%).....	48
Tablo 3.5.	Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'lerin gözenek miktarları (%)	48
Tablo 3.6.	Yaşlandırılmamış SiC takviyeli İDM'lere ait üç nokta eğme testi sonuçları.....	61
Tablo 3.7.	Yaşlandırılmış SiC takviyeli İDM'lere ait üç nokta eğme testi sonuçları	63
Tablo 3.8.	Al ₂ O ₃ takviyeli İDM'lerin ortalama en yüksek eğilme dayanımları	67
Tablo 3.9.	Hesaplanan balistik tam koruma sağlanan numune kalınlıkları	87

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

ϵ_r	: Maksimum gerinim
$f(a)$: oran
K	: Merminin çarpma anındaki kinetik enerjisi
S	: Membrandaki sabit gerilme
M_p	: Mermi kütlesi
V_p	: Mermi hızı
m_c	: Seramiğin alan yoğunluğu
m_m	: Arka katmanın alan yoğunluğu
a	: Koniklik yarıçapı
σ	: Arka katmanın akma dayanımı
h_m	: Arka katmanın kalınlığı
h_c	: Ön katmanın kalınlığı
a_p	: Mermi yarıçapı.
v_{bl}	: Balistik limit hız
m	: Mermi kütlesi
R	: Merminin yarıçapı
b_i	: Katmanların kalınlıkları
σ_i	: Çekme dayanımları
ϵ_2	: Kırılma uzaması
γ_i	: Katman malzemelerinin yoğunluğudur
α	: Deneysel katsayı
H	: AA7075 katmanının sertliği

Kısaltmalar

AA	: Alüminyum Alaşımı
AEK	: Alüminyum Esaslı Kompozit
FGM	: Functionally Graded Material (İşlevsel Dereceli Malzeme)
GP	: Guiner-Preston
İDM	: İşlevsel Dereceli Malzeme
MEK	: Metal Esaslı Kompozit
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TM	: Toz Metalurjisi

SİLİSYUM KARBÜR VE ALÜMİNA TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI İŞLEVSEL DERECELİ MALZEMELERİN BALİSTİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ÖZET

Zırh üretiminde, tam balistik korumanın düşük ağırlıkla sağlanması en önemli noktalardan biridir. Korumayı daha geleneksel çelik zırh malzemelerine kıyasla daha düşük ağırlıkta sağlayabilmek amacıyla, bu çalışmada seramik takviyeli alüminyum esaslı farklı İşlevsel Dereceli Malzemeler (İDM) ile seramik katmanlı alüminyum alaşımları 7,62 mm çaplı zırh delici mermiler karşısında balistik olarak incelenmiştir. İDM'ler ile seramik katmanlı malzemelerin alüminyum katmanları toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Seramik katman ise piyasadan temin edilerek alüminyum alaşımının üzerine yapıştırılmıştır. Ana yapı olarak alüminyum alaşımlarından AA7075 seçilmiştir. Seramik takviye olarak ise SiC ve Al₂O₃ kullanılmıştır. İDM'ler üç katmandan oluşmaktadır. Tüm malzemelerde arka katman takviyesiz AA7075 alaşımı kullanılarak üretilmiştir. Orta ve üst katmanlarda ise belirli oranlarda seramik takviye kullanılmıştır. Seramik katmanlı alüminyum alaşımında ise Al₂O₃ plaka alüminyum alaşımı üzerinde yapıştırılmıştır. İlk olarak, alüminyum alaşımının en yüksek sertliğe ulaşacağı ısıl işlem koşulunu belirlemek amacıyla, gözlem numuneleri çözeltiye alma ve sonrasında farklı sıcaklıklarda 96 saate kadar yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Ayrıca numunelerin yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış durumdaki üç nokta eğme dayanımları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda atış yapılacak numuneler çözeltiye alma işleminden sonra 120 °C'de 48 saat yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma sonrasında numuneler balistik olarak test edilmiştir. Balistik testler Kırıkkale Silahsan Silah Fabrikası A.Ş. atış poligonunda gerçekleştirilmiştir. Test sonrasında numuneler makro ve mikro olarak incelenmiştir. İDM'ler balistik testlerde başarısız olurken, Al₂O₃ katmanlı, 10 mm ve 13 mm alüminyum alaşımı katmanlı numuneler, mermiyi durdurmayı başarmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balistik, İşlevsel Dereceli Malzeme, Yaşlandırma, Zırh Malzemeleri.

AN INVESTIGATION ON THE BALLISTIC PERFORMANCE OF AA7075 BASED FUNCTIONALLY GRADED MATERIALS WITH SILICON CARBIDE AND ALUMINA REINFORCEMENT

ABSTRACT

One of the important issues on manufacturing armor material is to provide ballistic protection with lower weight. In this study, Functionally Graded Materials (FGM) consisting of ceramic reinforcement and aluminum matrix and bilayered composites consisting of aluminum and ceramic layers were investigated against armor piercing projectile to reduce protection weight with respect to steels. Functionally Graded Materials and aluminum layer of bilayered composite were produced via powder metallurgy technique. Ceramic layer was used as commercially and fixed on the aluminum layer. AA7075 aluminum alloy was chosen as the matrix material. SiC and Al₂O₃ are the ceramic reinforcement materials. Functionally Graded Materials are consisting of three layers. Inner layer of all materials is AA7075 aluminum alloy. The intermediate and outer layers include ceramic reinforcement. Ceramic layer of bilayered composite was Al₂O₃ plate and was fixed on aluminum layer. To find out the peak hardness value of aluminum depending on the heat treatment condition, samples were subjected to solutionizing and then to artificial aging at different temperatures up to 96 hours. Also transverse rupture strengths of aged and solutionized samples were measured. According to test data, samples that will be ballistic tested were aged at 120 °C for 48 hours. After aging process, the FGM and laminated composite samples were tested. The ballistic tests were performed at the polygons of Kırıkkale Silahsan. After that, the test samples were investigated at micro and macro scale. All the FGM samples failed against armor-piercing projectile, while the laminated composites with 10 and 13 mm thick aluminum layer were found to be successful.

Key Words: Ballistics, Functionally Graded Material, Aging, Armor Materials.

GİRİŞ

Tarih boyunca insanlar kendilerini koruma ihtiyacı duymuşlardır. Koruma amacıyla taş ve sopaları silah olarak kullanılmaya başlanmıştır. Zaman içerisinde silahların gelişimine bağlı olarak, kalkan ve zırh ihtiyacı ortaya çıkmıştır. İlk olarak kullanılan zırhlar deriden, ağaçtan ve hindistan cevizi lifinden yapılmıştır (Ford, 2006).

Zamanla gelişen silah teknolojisi insanları daha sağlam zırh malzemeleri arayışına itmiştir. Böylelikle metal zırhlar ortaya çıkmıştır. İlk metal zırhlar örgü şeklindeyken daha sonra plaka halini almıştır. Metal malzemeler arasında çelik hakkında bilginin önemli ölçüde yüksek olması sebebiyle, en yaygın kullanılan zırh malzemeleri çeliklerdir. Fakat çeliklerin yoğunluğunun yüksek olması sebebiyle, kompozit malzemeler son zamanlarda zırh teknolojisinde önemli bir kullanım alanına sahip olmuştur.

Savunma uygulamalarında hafif ve dayanıklı zırh malzemelerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Ağırlığı azaltmanın en önemli avantajları hareket kabiliyetini arttırmak ve enerji tüketimini azaltmaktır. Alüminyum alaşımları yüksek özgül dayanımlarından dolayı tank, zırhlı personel taşıyıcı gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Benzer şekilde titanyum alaşımları da iyi mekanik özelliklerinden dolayı potansiyel zırh malzemeleri arasındadır. Fakat titanyum alaşımları çok pahalı olduğu için, kullanılabilirliği kısıtlanmaktadır.

Kompozit zırh malzemelerinde genel olarak, önde sert bir katman (genellikle seramik) ve arkasında da tokluğu yüksek bir katman (alüminyum alaşımları gibi) bulunmaktadır. Bu durumda hasar anında ön katman parçalanmakta ve zırhın bütünlüğü bozulmaktadır. Bu da çoklu atış durumunda tehlike yaşatmaktadır. Bu sebeple son zamanlarda İşlevsel Derecelendirilmiş Malzemeler (İDM)'in kullanımı ortaya çıkmıştır. Ana yapının belirli bölümüne sert bir malzeme takviye edilerek katmanlı yapı elde edilmiştir.

Bu çalışmada SiC ve Al₂O₃ takviyeli AA7075 esaslı İDM'ler ile Al₂O₃/AA7075 katmanlı kompozitler üç farklı kalınlıkta toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen numuneler yaşlandırma ısıl işlemi ile sertleştirildikten sonra MKEK Silah Fabrikası poligonunda 7,62 mm'lik zırh delici mermiler ile balistik teste tabi tutulmuştur. Ayrıca numuneler 100 °C, 120 °C ve 150 °C'de 96 saate kadar yaşlandırılarak, AA7075 alaşımının ısıl işlem haritası çıkarılmıştır. Üç nokta eğme testi ile yaşlandırma işleminin, malzemenin dayanımına olan etkisi incelenmiştir. Balistik test öncesi ve sonrasında makro ve mikro düzeyde incelemeler yapılarak, İDM'lerin içyapısı gözlemlenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, yer kabuğundan en çok bulunan metaldir ve demirden sonra endüstride en çok kullanılan mühendislik malzemesidir. Doğada sadece kimyasal bileşik olarak bulunur. Alüminyum kullanımı, düşük yoğunluğu ve yüksek ısı ve elektrik iletkenliği sebebi ile gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Ayrıca demire kıyasla erime sıcaklığının düşük olması, üretim maliyetlerinin düşük olmasını sağlamaktadır (Lumley, 2011).

Alüminyumun yoğunluğu $2,7 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Demirin yaklaşık olarak üçte biri yoğunlukta olması, ağırlık açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bunun en önemli etkisi enerji tüketiminin azaltılmasıdır. Ayrıca yüksek ısı ve elektrik iletkenliği bakırdan sonra bu alanda en çok kullanılan malzeme olmasını sağlamaktadır. Erime sıcaklığı yaklaşık olarak $660 \text{ }^\circ\text{C}$ 'dir.

Alüminyum alaşımları, içerisinde en yüksek miktarda bulunan alaşım elementine göre kodlanırlar. Bu element alaşımın mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Tablo 1.1'de alüminyum alaşımlarının kodlanması gösterilmiştir (Lumley, 2011).

Tablo 1.1. Alüminyum alaşımlarının kodlanması
(Lumley, 2011)

Ana Alaşım Elementi	Alaşım Kodu
Al \geq %99	1xxx
Bakır	2xxx
Mangan	3xxx
Silisyum	4xxx
Magnezyum	5xxx
Magnezyum + Silisyum	6xxx
Çinko	7xxx
Diğer	8xxx

Çalışmada düşük yoğunluğu, yüksek dayanım, süneklik ve tokluk özellikleri sebebiyle alüminyum 7075 alaşımı kullanılmıştır. AA 7075 içerisinde çinko, magnezyum ve bakır önemli miktarda bulunmaktadır. Alaşımın içeriği Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.2. AA7075 alaşımının içeriği

Element	Yüzde ağırlık (%)
Çinko	5,1 – 6,1
Magnezyum	2,1 – 2,9
Bakır	1,2 – 2,0
Silisyum	0,5
Demir	0,4
Krom	0,18 – 0,28

1.1.1. Alüminyum alaşımlarında dayanım artışı

Alüminyum alaşımlarında mekanik dayanım artışı iki şekilde gerçekleşir. Bazı alüminyum alaşımlarının sertlik ve dayanımı ısıtma işlemleri ile artırılmaktadır. Bazı alaşımlar ise ısıtma işlemi ile sertleştirilemez. Bu alaşımlar soğuk şekillendirme işlemleri ile sertleştirilirler (Dwight, 1999). Alaşımların ısıtma işlenebilirliği Tablo 1.3’te verilmiştir.

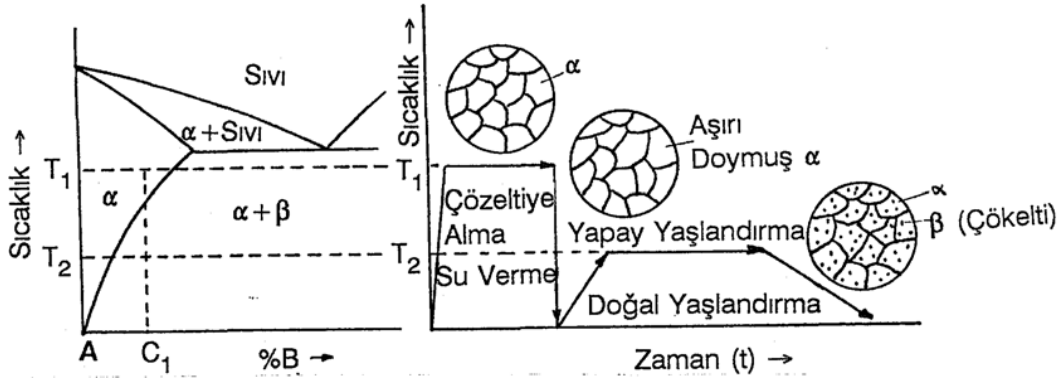
Tablo 1.3. Alüminyum alaşımlarının ısıtma işlenebilirlikleri (Dwight, 1999)

Isıtma işlenebilen	Isıtma işlenemeyen
2xxx	1xxx
4xxx	3xxx
6xxx	5xxx
7xxx	

Isıtma işlenebilen alüminyum alaşımlarında dayanım ve sertlik artışı çökelme sertleşmesi ile gerçekleşmektedir. Çökelme sertleşmesi, alaşımda bulunan en az iki farklı yapıdan birinin diğeri içerisinde çözünmesi ve daha sonra ana faz içerisinde çökmesi ile meydana gelmektedir. Çökelme sertleşmesi çözelti alma, su verme ve yaşlandırma olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Çözelti alma işleminde,

malzeme belirli bir sıcaklığa çıkartılarak alaşım elementlerinin ana yapı içerisinde çözülmesi sağlanmaktadır. Çözülme gerçekleştikten sonra su verilerek malzemenin hızlı bir şekilde soğuması sağlanır. Hızlı soğuma ile çözülen elementlerin çökmesi engellenir ve aşırı doymuş katı çözelti elde edilir. Aşırı doymuş katı çözelti yüksek enerjili ve kararsız haldedir. Son olarak yaşlandırma aşamasında, kararsız durumdaki çözeltinin bozulması sağlanarak, yarı kararlı veya kararlı duruma geçiş gerçekleşir. Ana yapı içerisindeki faz zamanla çöker. Oluşan bu çökeltiler dislokasyon hareketini engelleyerek sertlik artışına sebep olur.

Yaşlandırma işlemi yapay ve doğal olarak iki şekilde gerçekleşir. Doğal yaşlandırma işlemi oda sıcaklığında gerçekleşir. Sıcaklık düşük olduğundan atom hareketi yavaştır. Bu sebeple çökeltme işlemi uzun sürebilir. Yapay yaşlandırma işleminde ise, malzeme nispeten yüksek sıcaklıklara çıkartılarak, çökeltme işleminin daha hızlı gerçekleşmesi sağlanır. Çökeltme işleminin temsili gösterimi Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Çökeltme sertleşmesi aşamaları (Atik, 1994)

7xxx serisi alüminyum alaşımları çökeltme ile sertleştirilen Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarıdır (Sha ve Cerezo, 2004, Chen ve diğerleri, 2009, Lloyd ve Chatuverdi, 1982, Emani ve diğerleri, 2009).

7xxx serisi alüminyum alaşımları için genel olarak çökeltme dizisi (Sha ve Cerezo, 2004, Chen ve diğerleri, 2009, Lloyd ve Chatuverdi, 1982, Emani ve diğerleri, 2009):

Aşırı Doymuş Katı Çözelti → GP Bölgeleri → Yarı Kararlı η' → Kararlı η

şeklindedir.

Yaşlandırma işlemi sırasında en yüksek sertlik değerleri yarı kararlı η' fazının oluşumundan sonra elde edilir. Guiner-Preston bölgeleri ve yarı kararlı η' fazı çökeltmenin ilk aşamalarında oluşur. Oluşan yarı kararlı η' yapısının sertliği belirgin bir şekilde arttırdığı bilinmektedir. Yaşlandırma işlemi bu fazın oluşumundan sonra devam ettirildiği takdirde yarı kararlı $MgZn_2$ çökeltleri kararlı hale geçer. Bu dönüşüm gerçekleştiğinde sertlik azalır (Sha ve Cerezo, 2004, Chen ve diğerleri, 2009, Lloyd ve Chatuverdi, 1982, Emani ve diğerleri, 2009).

1.2. Kompozit Malzemeler

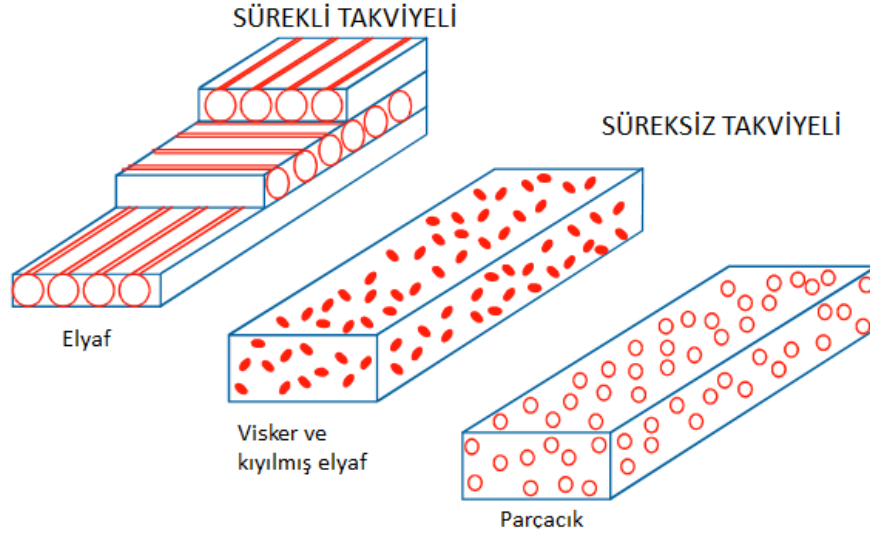
Kompozit malzemeler havacılık, savunma sanayi, biyo-mühendislik ve taşıma endüstrisi gibi alanlarda sıklıkla kullanılırlar. Geleneksel malzemelerde elde edilemeyen ayrıcalıklı özelliklere sahip olması sebebiyle ileri teknoloji uygulamalarında sıkça kullanılan bir malzeme türüdür. Kompozit malzemeler, tek başına istenilen özelliklere sahip olmayan iki veya daha fazla malzemenin belirli şartlar ve oranlarda makro boyutta bir araya getirilmesiyle elde edilmektedir. Geleneksel malzemelere kıyasla daha düşük yoğunlukta ve daha iyi mekanik özelliklere sahip olarak üretilebilen kompozit malzemeler, motorlu araçlarda daha düşük yakıt tüketimi ve daha yüksek performans sağlayabilirler. Ayrıca daha yüksek yorulma direncine sahip olması nedeniyle ürünlerin daha uzun süreler kullanılması gibi avantajlar sağlaması bu malzemelerin çok geniş kullanım alanları bulmasına neden olmuştur (Callister, 2011, Chung, 2010).

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 (Gay, 1997).

1.2.1. 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 özellikler elde etmek amacıyla son zamanlarda önemli bir kullanım alanına sahip olmuştur. MEK'ler döküm, toz metalurjisi, basınçlı sıvı-metal süzdürme tekniği, derin çekme ve haddeleme gibi yöntemlerle sıcak ve soğuk olarak şekillendirilebilirler (Orhan ve diğerleri, 2007).

Ana yapının metal malzemedan oluştuğu MEK'lerde, metal anayapı genellikle alaşım olarak kullanılmaktadır. 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. Nikel ve kobalt süper alaşımları ana yapı malzemesi olarak kullanılabilir fakat yüksek sıcaklıklarda oksit oluşturmaları nedeniyle tercih edilmemektedir. MEK'lerde takviye malzemesi olarak genellikle parçacık, sürekli ve süreksiz elyaf, tel, visker kullanılmaktadır. Kompozitlerin takviye türlerine göre gösterimi Şekil 1.2'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 matris 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 (Department of Defence, 2002, Rosso, 2003).



Şekil 1.2. Takviye malzemesinin şekillerine göre kompozitler (Froyen, 1994)

Alüminyum esaslı kompozitler yüksek dayanım, süneklik, elektrik ve ısı iletkenliği, korozyon dayanımına sahip olmakla beraber düşük yoğunluktadır. Sönümlenebilirlikleri, aşınma dirençleri iyidir ve termal genleşme katsayısı düşüktür. Ayrıca ısıl işlemler ve plastik şekil değişimi işlemleri ile mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Bu özellikler AEK'in otomobil, havacılık ve uzay endüstrisinde sıkça kullanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi düşük yoğunluklu alaşımlarla kıyaslandığında daha ucuzdur (Torralba ve diğerleri, 2003, Kerti ve Toptan, 2008)

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'ler; katı halde, sıvı halde ve çökeltme olmak üzere üç farklı şekilde üretilirler. 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 (Tan ve Zhang, 1998, Cayron, 2000).

Takviye malzemesinin ana yapı içerisinde homojen bir şekilde dağılması, parçacık takviyeli kompozitlerin malzeme boyunca aynı özellikleri göstermesi açısından oldukça önemlidir. 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 (Nie ve diğerleri, 2007).

Gomez ve arkadaşları (Gomez ve diğerleri, 2009) yaptıkları çalışmada, B₄C ve SiC takviyeli AA6061 alaşımının mekanik özelliklerini incelemiştir. 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 ara yüzey reaksiyonunun görülmediği, T6 ısıl işlemi sonucu sertlik ve dayanım özelliklerinde artış görüldüğü, artan takviye oranının aşınma kaybını azalttığı görülmüştür. Ayrıca B₄C takviyeli kompozitin SiC takviyeliye kıyasla, dayanım, sertlik, süneklik ve aşınma direnci özelliklerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

1.2.2. İşlevsel derecelendirilmiş malzemeler

Son yıllarda hafif zırh üretimi konusunda çalışmalar diğer malzemeler üzerinde yoğunlaşmıştır. Özellikle seramik malzemeler, çok yüksek sertliklere ve basma dayanımlarına sahip olmalarından dolayı, bu konuda ilgi çekici duruma gelmişlerdir. Fakat seramik malzemelerin kırılma tokluklarının çok düşük olması ve gevrek yapılarından dolayı tek başına kullanılmaları mümkün olmamaktadır. Bundan dolayı seramiklerin arkasına bir destek malzeme katmanı konulması gerekmektedir. Bu destek katmanları metal veya polimer esaslı kompozit malzemelerden oluşturulmaktadır. Katmanlar polimer esaslı bir yapıştırıcı kullanarak birleştirilmektedirler. Bu şekilde önde seramik katman arkada ise metal veya

kompozit destek katmanı içeren malzemeler kullanarak elde edilen katmanlı kompozit malzemeler hafif zırh üretiminde önemli bir potansiyele sahiptirler (Wilkins, 1978, Hetherington, 1992, Sadanandan ve Hetherington, 1997, Übeyli ve diğerleri, 2007, Übeyli ve diğerleri, 2008, Shockey ve diğerleri, 1990, Shockey ve diğerleri, 1990, Curran ve diğerleri, 1993, Roeder ve Sun, 2001, Sherman ve Brandon, 1997, Zaera ve diğerleri, 2000, Sherman ve Ben-Shushan, 1998, Kaufmann ve diğerleri, 2003, Florence, 1969, Woodward, 1990, Den Reijer, 1991, Zaera ve Sanchez, 1998, Lee ve Yoo, 2001, Abrate, 2001, Espinosa ve diğerleri, 1998). Zırh çelikleri ile karşılaştırıldıklarında bu malzemelerin çok daha düşük alan yoğunluklarında balistik tehditlere karşı başarılı oldukları yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Fakat katmanlı kompozit zırhların çelik zırhlara göre en zayıf yönleri:

- Kullanılan seramiklerin pahalı olması
- Çoklu atışlara karşı dayanıksız olmalarıdır.

Çoklu atışlara karşı dayanıksız yapıda olmalarının temel nedeni ön seramik katmanın çarpışma esnasında hemen kırılıp dağılması ve arka destek katmandan kolayca ayrılmasıdır. Arayüzeydeki yapıştırıcı bağ çarpma esnasında iki katmanın ayrılmasını engelleyememekte ve bu durum zırhın belli bir bölümünün ardışık atışlara korumasız kalmasına yol açmaktadır.

Katmanlı kompozitlerin bu zayıf yönlerini ortadan kaldırmak için İDM'ler zırh yapımı konusunda önemli bir potansiyel teşkil edebilir (Neubrand ve Rödel, 1997, Kawasaki ve Watanabe, 1997, Chin, 1999). İşlevsel dereceli malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin bileşimlerinin dereceli olarak düzenlenmesiyle elde edilen ve kesite bağlı olarak farklı bileşim ve özellikleri içeren malzemelerdir. Başka bir deyişle, İDM'ler bir yanında bir malzeme, diğer yanında ise başka bir malzeme içermekte olup ara tabakası yapı, bileşim ve özellik olarak bir malzemedan diğerine düzenli olarak değişmektedir. Farklı malzemelerin dereceli olarak düzenlenmesi ile elde edilen bu malzemelerde özellikler kesite göre değişmektedir. İDM'ler yapı, elektrik, kimya, optik, nükleer ve biyomedikal gibi pek çok farklı alanda kullanılmaktadır (Neubrand ve Rödel, 1997). İDM'lerin üretiminde kullanılan başlıca yöntemler; toz metalürjisi, ısıl püskürtme, kaplama, lazer kaplama ve diğer

ısıl-mekanik işlemlerdir (Neubrand ve Rödel, 1997, Kawasaki ve Watanabe, 1997). Özellikle toz metalürjisi uygulaması İDM'lerin üretimi için oldukça uygun bir yöntemdir (Neubrand ve Rödel, 1997, Kawasaki ve Watanabe, 1997).

İDM'lerin potansiyel zırh malzemesi olarak kullanım fikri daha önceden bazı araştırmacılar tarafından önerilmiş ve çok sınırlı ölçekte incelenmiştir. Bu malzemelerin sağladığı temel üstünlük katmanlar arasında metalürjik bir bağ oluşması, katmanlar arası geçişin kademeli olması, dış yüzeyde daha yüksek sertlik ve dayanım sağlaması, iç kısımda daha tok ve sünek bir yapı oluşturmasıdır (Neubrand ve Rödel, 1997, Kawasaki ve Watanabe, 1997, Chin, 1999). Bu şekilde üretilen katmanlı kompozitlerle çoklu atışlara karşı daha dayanıklı bir zırh malzemesi elde edilebilecektir. Aynı zamanda, katmanlı kompozitlerle kıyaslandığında daha ucuz bir malzeme olacağı açıktır. Daha önce de vurgulandığı gibi katmanlı kompozit zırhlarda mermi çarpması sırasında oluşan basma gerilmesi dalgaları arka destek katmandan çekme gerilmesi dalgaları olarak yansımakta ve bu dalgalarda ara yüzeydeki yapıştırıcı bağı kolayca koparmaktadır. Bunun yanında, mermi çarpması esnasında gevrek olan seramik katman hemen kırılıp küçük parçalara ayrılmaktadır. Bunun sonucunda, seramik parçanın ayrıldığı kısım sonraki gelecek tehditlere karşı korumasız kalmaktadır. Hâlbuki İDM'lerde ön kompozit katman arka metal katmana metalürjik bağla bağlanmış olduğu için kopma veya ayrışma gibi sorunlar oluşmayacaktır. İDM'ler üzerinde yapılan mevcut çalışmalar ağırlıklı olarak yapısal (Tsuda ve diğerleri, 1996, Jain ve diğerleri, 2001, Zhu ve diğerleri, 2001, Zhang ve diğerleri, 1995, Lin ve diğerleri, 1999, Miyamoto ve diğerleri, 1995, Jung ve diğerleri, 1999, Jin ve diğerleri, 2005, Kieback ve diğerleri, 2003, , Jin ve diğerleri, 2009, Tohgo ve diğerleri, 2008, Ruiz-Navas ve diğerleri, 2003, He ve diğerleri, 2009, Bhattacharyya ve diğerleri, 2008), ısı (Kawasaki ve Watanabe, 1997) ve nükleer (Ge ve diğerleri, 2000, Wu ve diğerleri, 2005) uygulamalar üzerinedir. Zeming ve arkadaşları (He ve diğerleri, 2009), alümina-demir esaslı İDM üretimi ve mekanik özellikleri konusunu araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada kuru presleme ve basınçsız sinterleme tekniğini kullanarak düz, çatlaksız ve oldukça yüksek yoğunlukta İDM bileşenleri üretmişlerdir. Ayrıca, yapılan mekanik testler sonucunda yekpare alüminaya göre daha yüksek kırılma toklukları elde etmişlerdir (He ve diğerleri, 2009). Bir başka çalışmada ise

(Bhattacharyya ve diğeri, 2008) , Al/SiC ve Ni/Al₂O₃ esaslı İDM'lerin sırasıyla toz metalurjisi ve ısıl püskürtme yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilmiş olup mekanik özellikleri incelenmiştir. Katman sayısı arttıkça İDM'lerin etkin bükme dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir.

İDM'lerin balistik özellikleriyle ilgili olarak ise yapılmış çok sınırlı birkaç çalışma mevcuttur (Pettersson ve diğeri, 2005, Jovicic ve diğeri, 2000, Gooch ve diğeri, 1999). Pettersson ve arkadaşları (Pettersson ve diğeri, 2005), zırh malzemesi olarak Ti-TiB₂ işlevsel dereceli malzemesini incelemiştir. Bu malzemenin kıvılcım sinterleme yoluyla sıkıştırma ve sinterlemesi gerçekleştirilmiş ve 7,62 mm'lik ve tungsten çekirdekli mermilerle balistik testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Ti-TiB₂ İDM'nin TiB₂'ye göre daha üstün balistik başarımlar gösterdiği ortaya çıkmıştır (Pettersson ve diğeri, 2005). Bir başka çalışmada (Jovicic ve diğeri, 2000), epoksi içine gömülmüş seramik küreleri içeren İDM'lerin katı seramiklerle aynı balistik başarımları sergilediği gösterilmiştir. Dutta ve DiPaolo (Dutta ve DiPaolo, 2005) ise dereceli malzemelerin ara yüzeylerdeki yansımalar ve iletimlerden dolayı şok enerjisini daha iyi soğurduğunu belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak, bazı seramik takviyeli metal esaslı kompozitlerin balistik başarımları ile ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır (Karamış ve diğeri, 2003, Karamış ve diğeri, 2006, Karamış ve diğeri, 2006).

1.3. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi tekniği tarih öncesi zamanlardan beri insanlar tarafından kullanılmaktadır. Metal tozları bir kalıp içerisinde sıkıştırılarak istenilen şekilde malzemeler oluşturulması tarih öncesi zamanlardan beri bilinmektedir. TM, tozların işlemden geçirilerek yararlı mühendislik malzemelerine dönüştürülmesi ile ilgilenen bir imalat yöntemidir. Fazların ve gözeneklerin malzeme içerisindeki konumlarının ayarlanabildiği TM yöntemi ile döküm yönteminde olduğu gibi net şekilli parça üretimi gerçekleştirilmektedir. Erime noktası yüksek olan seramikler, bakırlı çelikler, refrakter metaller gibi oldukça geniş yelpazede 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 (Upadhyaya, 2002, German, 2007). Toz metalurjisi genel olarak;

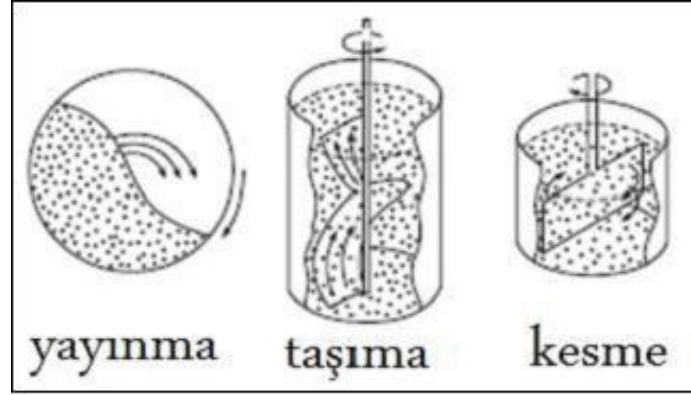
- Karıştırma,
- Ön şekillendirme,
- Sinterleme,
- Son işlemler

aşamalarından oluşmaktadır. Fakat birçok üretim yönteminde olduğu gibi TM’de de farklı ürün grupları için üretim aşamaları değişkenlik gösterebilmektedir. Kullanılan şekil verme işlemine göre sinterleme koşulları ve sinterleme sonrası ürün özellikleri farklılık gösterebilmektedir (Kang, 2005).

1.3.1. Tozların karıştırılması

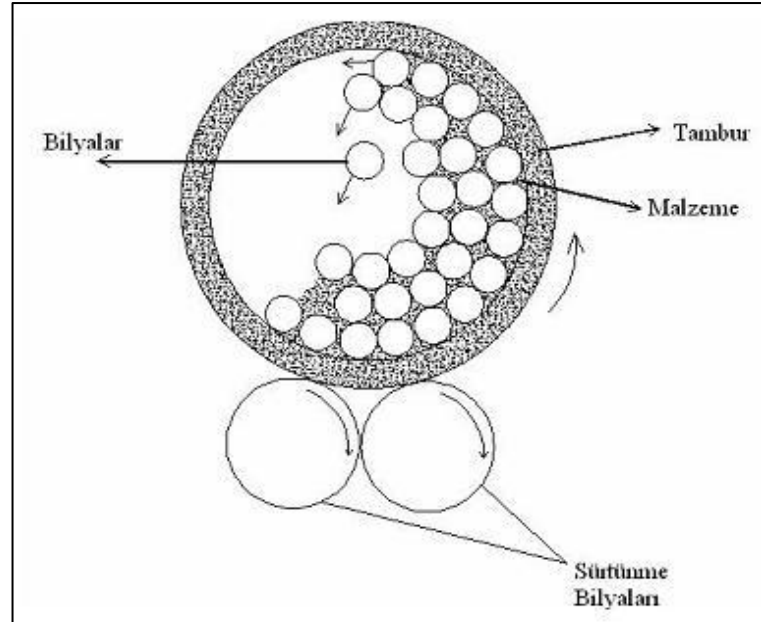
Karıştırma işlemi yeni alaşımların oluşturulması, alaşımın içeriğinde tozların homojen dağılımını sağlamak, toz içerisindeki nem ve taşıma şartlarına bağlı olarak oluşan segregasyonun önlenmesi, eğer gerekliyse sıkıştırma için bağlayıcı eklenmesi ve şekillendirme için toz-bağlayıcı eklenmesi gibi ihtiyaçların karşılanması doğrultusunda gereklidir. Bunlara ek olarak ortamdaki nem oranı nedeniyle oluşabilecek topaklanmalar, karıştırma öncesi düşük sıcaklıklarda yapılan kurutma işlemiyle önlenmektedir. Karıştırma işlemi tozlar kuru haldeyken ya da bir sıvı ortamında yapılabilir. Toz karışımlarının homojenliğini artırmak ve topaklanmayı önlemek amacıyla alkol gibi sinterlemeye etkisi olmayacak sıvılar karıştırma işleminde kullanılabilir 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 1.3’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

karıřtırmada tozların sürekli ayrıřma ve kayma dűzlemleri űzerinde akmaları ile gerçekleřir (Tan ve Zhang, 1998, German, 2007, Meluch, 2009).



Şekil 1.3. Toz karıřtırma yűntemleri (German, 2007)

Kolay tasarlanabilirliđi ve iřlemin pratik oluřu nedeniyle toz karıřtırma yűntemleri içerisinde en çok kullanım alanı bulan yűntem, bilyeli deđirmen vasıtasıyla tozların yayınma mekanizmasıyla karıřtırılmasıdır. İřlemin Őematik gűrűnűmű Şekil 1.4'de gűrűldűđű gibidir. Bilyeli deđirmenle karıřtırma iřleminde kuru tozlar, içine konuldukları silindirin hacmine gűre belirli hızlarda çođunlukla seramik bilyeler yardımıyla karıřtırma iřlemi sađlanır (Kumdalı, 2008).

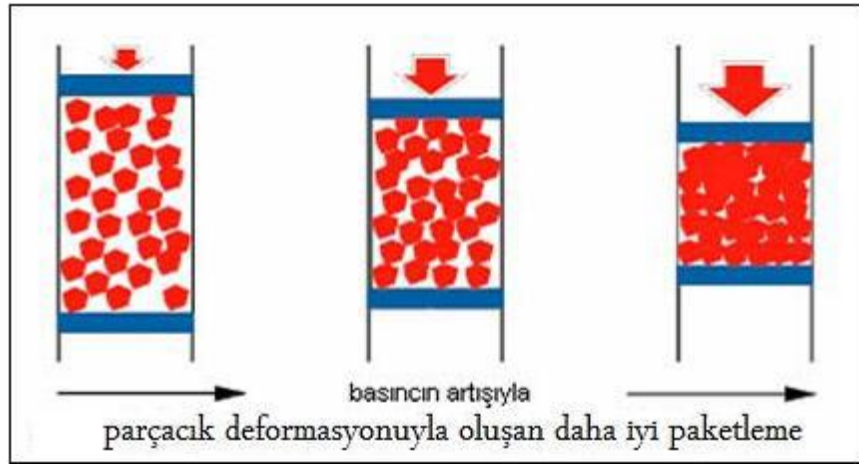


Şekil 1.4. Bilyeli deđirmenin gűsterimi (Kumdalı, 2008)

Wang ve arkadaşları (Wang, 2011) yaptıkları çalışmada parçacık boyut ve dağılımının SiC parçacık takviye Al-Cu alaşımı kompozitlerinin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. 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.

1.3.2. 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 1.5’de şematik olarak gösterildiği gibi üç aşamada incelenebilir.



Şekil 1.5. Sıkıştırmanın aşamaları (Aycan, 2010)

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 (German, 2007).

1.3.3. Sinterleme

Sinterleme işlemi birbirine temas eden parçacıkların, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleriyle veya 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 noktaları 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 (German, 2007, Kang, 2005, Kumdalı, 2008).

1.4. 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 içerisinde ayrılıp hedefe ulaşana kadar geçen süredeki hareketi ile ilgilenir.

1.4.1. İç Balistik

Barutun yanma şekli, merminin namlu içerisindeki hızı ve barut haznesinin tasarımı konularını inceleyen balistik alt dalıdır. Barut-basınç eğrisine göre, basıncı oluşturabilecek duvar kalınlıkları hesaplanabilir (Lowry, 1968). Barut haznesindeki yanma işlemi, barutun sıkıştırılmasıyla başlar. Basınç miktarının artışı yanmayı arttırır. Basınç, mermi atış başlangıç değerine ulaştığında basınç artışı durur ve mermi namlu boyunca harekete geçer bu hareket boyunca çıkan gaz için boşluk

oluşur ve basınç azalmaya başlar. Barutun yanması tamamen bittiğinde bile, namlu içerisindeki gazdan dolayı ivmelenme devam eder ancak ivme hızı artışı azalır.

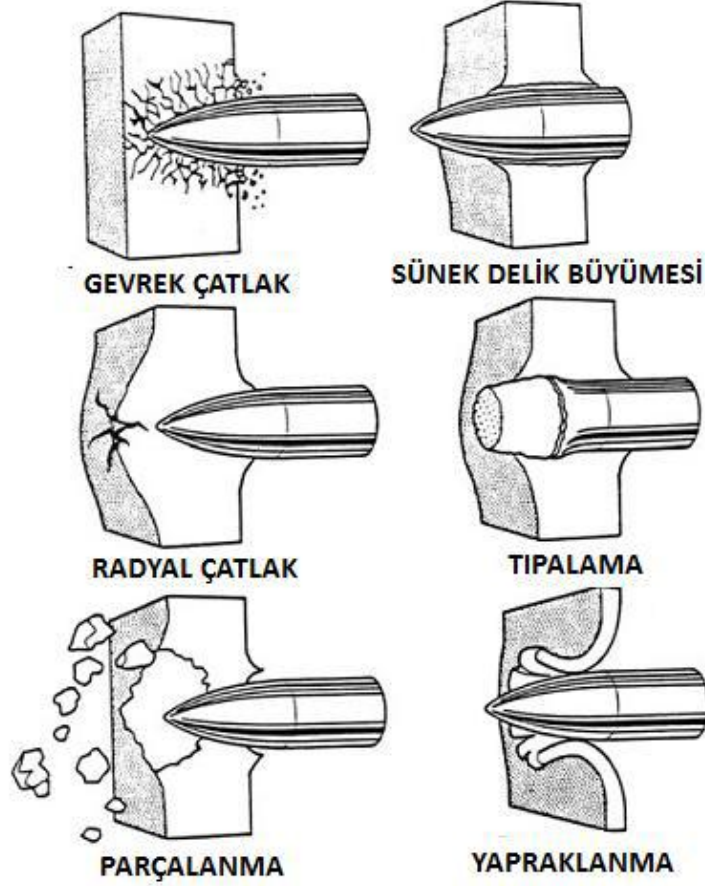
1.4.2. Dış Balistik

Dış balistik ise merminin havadaki hareketini inceleyen balistik dalıdır. Bu kapsamda mermi, hedefe atılan rijit bir nesne olarak ele alınır. Mermi kelimesi füzeleri, silah mermilerini ve uçaktan atılan bombaların vs. tamamını kapsar (Thomas, 1938). Mermi havadayken hareket yönü ile belirli bir açı yapar. Mermi, hareket boyunca farklı kuvvetlerin etkisi altındadır. Merminin hareketi; yerçekimine, hıza, havanın özelliklerine ve merminin hareket yönüne bağlı oluşan hava kuvvetine bağlıdır (Thomas, 1938).

1.4.3. 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 1.6'da 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 (Rosenberg ve Dekel, 2012).

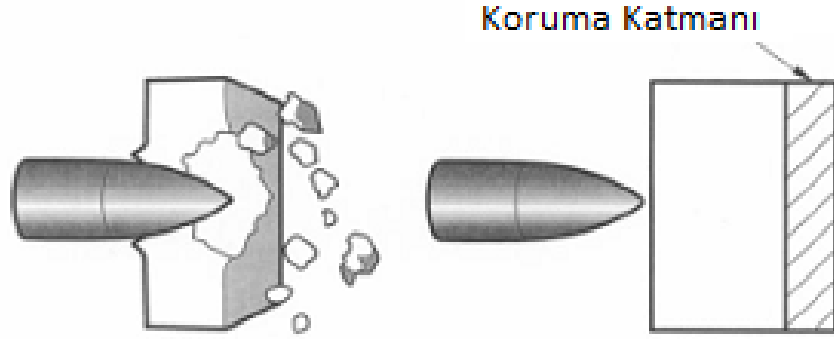


Şekil 1.6. Farklı darbe durumlarında muhtemel kırılma şekilleri (Rosenberg ve Dekel, 2012)

1.5. Zırh Malzemeleri

Zırh malzemeleri, genellikle insanları ya da askeri teçhizat ve cihazları tehditler karşısında korumak amacıyla kullanılmaktadır. Zırhlar pasif, aktif ve reaktif olmak üzere üç ana başlık altında incelenir. 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 sönmümler ve böylece balistik korumayı sağlamış olurlar.

Zırh malzemeleri, çoğunlukla referans bir sisteme göre elde edilen balistik verimlilik kriteri göz önünde bulundurularak değerlendirilir. Balistik koruma; merminin kinetik enerjisini plastik deformasyon ya da çatlak oluşumuyla sönümleyip onu yavaşlatarak, mermiyi parçalayarak, aşındırarak veya hedeften saptırarak gerçekleşir. Zırh malzemesinde çatlak oluşumu söz konusuysa, çatlama sonucu yapıdan kopan parçaların ayrı bir tehlike oluşturmaması için kontrolü sağlanması gerekebilmektedir. Bu durumda zırha Şekil 1.7’de görüldüğü gibi kopan parçaların tehlike oluşturmasını önlemek amacıyla kalkan görevi gören ek bir katman ilave edilmektedir (Rosenberg ve diğerleri, 2009).



Şekil 1.7. Darbe sonrası kopan parçalar ve koruyucu katmanın şematik görünümü (Rosenberg ve diğerleri, 2009)

Zırh malzemelerinde balistik korumayı sağlamanın yanı sıra yoğunluğunun düşük olması son derece önemlidir. 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 veri tabanına sahip olması nedeniyle zırh malzemesi olarak yıllardır kullanılmaktadır. Çeliğin nispeten yüksek yoğunluklu olması nedeniyle genellikle ısıl işlem, soğuk haddeleme gibi işlemlerden geçirilerek dayanım artışı sağlanmakta böylece aynı başarıyı sağlayan zırh malzemesinin ağırlığı azaltılarak zırhlı kullanan personelin hareket kabiliyeti artırılmak istenmektedir.

Kompozit malzemeler düşük yoğunluğu nedeniyle son zamanlarda çeliğe kıyasla 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 başarımları artırmada önemli görevler üstlenmekte olup yüksek maliyete ve düşük işlenebilirliğe sahiptirler (Demir, 2008).

Metal esaslı kompozit zırhlar bir seramik malzeme ile takviye edilerek üstün balistik başarımları sağlamaı 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 karşılarırken 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 başarımlarının arttığı bilinmektedir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Toz Boyutlarının Ölçümü

Toz boyutlarının büyüklüğü özellikle sinterleme sürecini etkilemektedir. Daha küçük toz boyutları daha büyük yüzey alanı oluşturduğu için daha etkin ve hızlı sinterleme işleminin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan tozların boyutları da bu durum göz önüne alınarak seçilmiştir. Parçacık boyut dağılımı Gazi Üniversitesi Toz Metalurjisi Laboratuvarında parçacık boyut ölçüm cihazında belirlenmiştir.

2.2. Numune Üretimi

Üretilen İDM'lerin kimyasal bileşimleri ve tabaka kombinasyonları Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de verilmiştir. Buna göre üç tabakalı ve AA7075 esaslı İDM'ler üretilmiştir. Bu kompozit yapılarda arka tabakada ana yapı olarak AA7075 (ısıtılabilir) alaşımı kullanılmıştır. AA7075 alaşımı; %5,1-6,1 Zn, %2,1-2,9 Mg, %1,2-2,0 Cu, %0,5 Fe, %0,4 Si, %0,3 Mn, %0,18-0,28 Cr ve %0,2Ti içeren yüksek dayanımlı bir alüminyum alaşımıdır.

Tablo 2.1. Üretilen SiC takviyeli İDM'lerin bileşimleri

Katman	Düşük Takviye Oranlı	Yüksek Takviye Oranlı
Ön	%80 AA7075 - %20 Seramik	%60 AA7075 - %40 Seramik
Orta	%90 AA7075 - %10 Seramik	%80 AA7075 - %20 Seramik
Arka	AA7075	AA7075

Tablo 2.2. Üretilen Al₂O₃ takviyeli İDM'lerin bileşimleri

Katman	Düşük Takviye Oranlı	Yüksek Takviye Oranlı
Ön	%80 AA7075 - %20 Seramik	%70 AA7075 - %30 Seramik
Orta	%90 AA7075 - %10 Seramik	%85 AA7075 - %15 Seramik
Arka	AA7075	AA7075

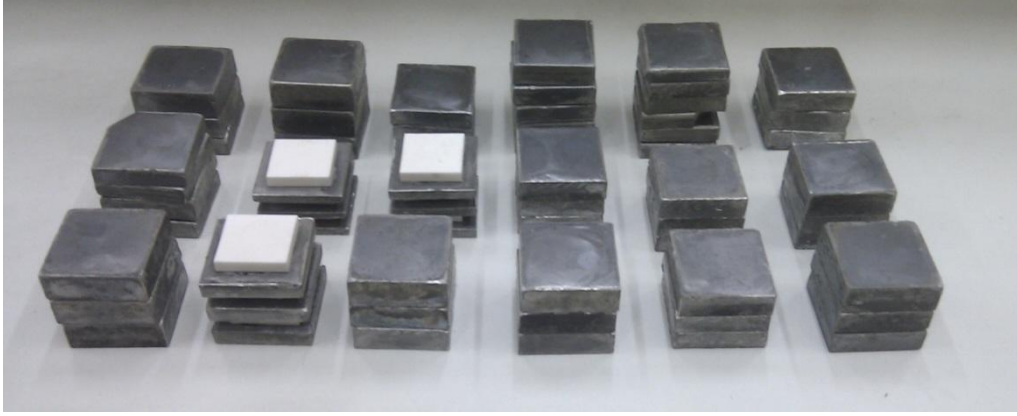
Tez çalışmasında farklı hacim oranlarında SiC ve Al₂O₃ takviyeli İDM'ler üretilmiştir. Üretilen numune kalınlıkları 15, 20 ve 25 mm'dir. Numunelerin eni ve boyu ise 70 mm'dir. Şekil 2.1, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te üretilen İDM'ler gösterilmiştir. Şekil 2.4'te ise örnek bir numunenin ölçüleri görülmektedir.



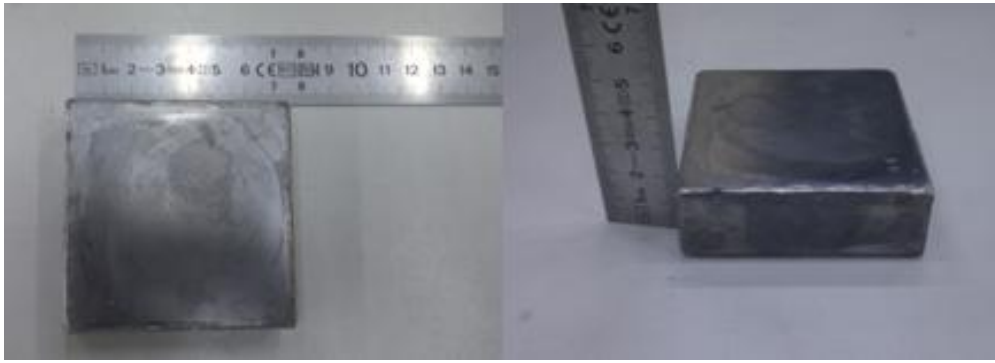
Şekil 2.1. Üretimi tamamlanan SiC takviyeli numunelere ait görünüm



Şekil 2.2. Üretimi tamamlanan Al₂O₃ takviyeli numunelere ait görünüm

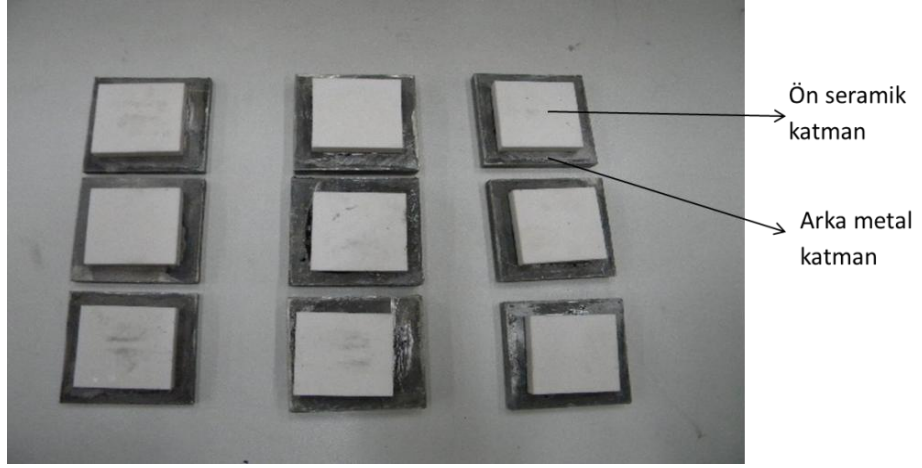


Şekil 2.3. Numunelerin toplu gösterimi

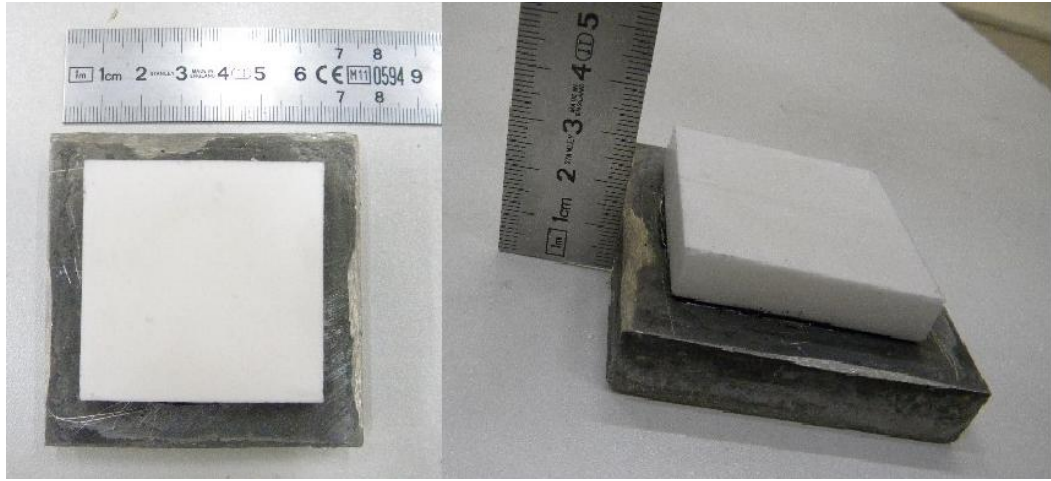


Şekil 2.4. Örnek bir numunenin ölçüleri

İDM'lerle bir karşılaştırma yapmak amacıyla $Al_2O_3/AA7075$ katmanlı kompozitlerinin üretimi ve balistik testleri gerçekleştirilmiştir. $Al_2O_3/AA7075$ katmanlı kompoziti, AA7075'in sıcak presleme yöntemiyle üretilmesi ve sonrasında mevcut Al_2O_3 seramiklerle birbirine yapıştırılması yöntemiyle üretilmiştir. Al_2O_3 seramik katmanı (5 cm x 5 cm, kare şeklinde ve 10 mm kalınlığında), kalınlıkları 7 mm, 10 mm ve 13 mm olan AA7075 katmanları üzerine poliüretan yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Elde edilen numunelere ait bir genel görüntü Şekil 2.5'te verilmiştir. Şekil 2.6'da ise katmanlı numunelerin ölçüleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5. $Al_2O_3/AA7075$ katmanlı kompozitler



Şekil 2.6. $Al_2O_3/AA7075$ katmanlı bir numunenin ölçüleri

2.2.1. Tozların karıştırılması

Tozların miktarları; AA7075 alaşımının bileşimi ile Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de verilen 2 farklı İDM’deki tabakaların bileşimlerine göre hazırlanmıştır. Tartım işlemi de (Şekil 2.7’de gösterildiği gibi) bir hassas terazi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



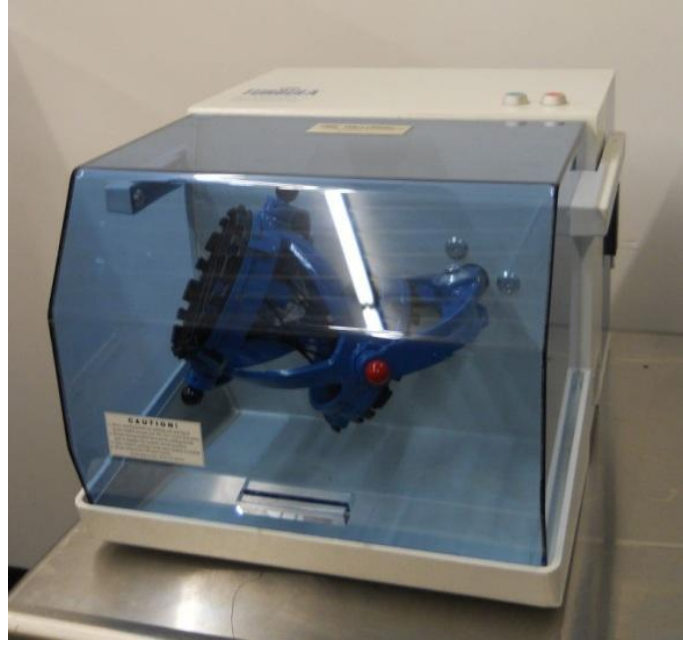
Şekil 2.7. Tozların tartım işlemi

Tozların düzgün dağılımını sağlamak için dönel karıştırıcıda çapı 10 mm olan zirkonya bilyalar eşliğinde 2 saat süre ile karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.8, karıştırıcı bilyalara ait fotoğrafı göstermektedir.



Şekil 2.8. Karıştırıcıda kullanılan bilyalar

Tozlar Şekil 2.9'da gösterilen TURBULA karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Homojen bir karışımın olabilmesi için harmanlanan tozlarla birlikte yerleştirilen zirkonya bilyelerin dönme esnasındaki davranışları gözlenerek en uygun karıştırma hızı belirlenmiş ve bütün karıştırma işlemleri denetimli olarak bu hızda yapılmıştır.



Şekil 2.9. TURBULA karıştırıcı

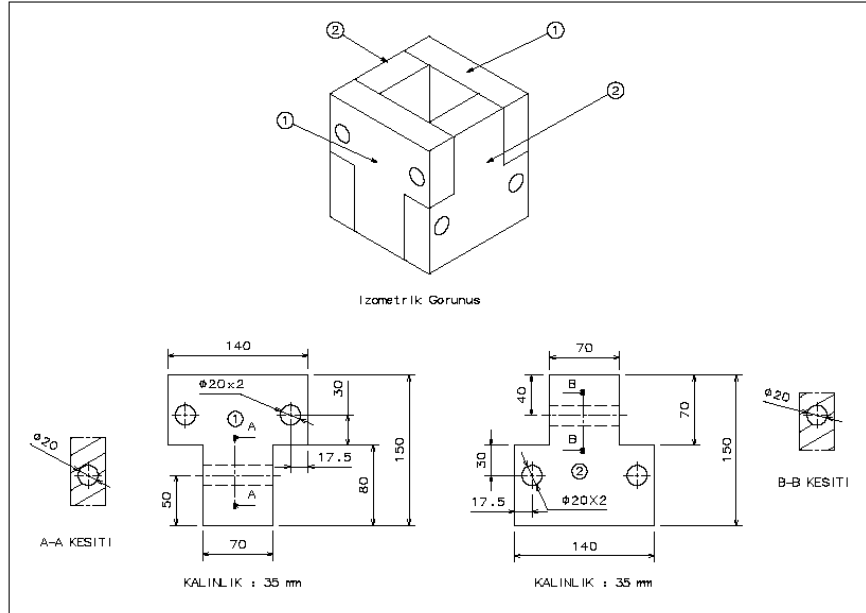
SiC takviyeli numunelerin tozlarının karıştırılması sırasında herhangi bir sorun çıkmamıştır. Tozlar topaklanmadan homojen bir şekilde karıştırılabilmektedir. Ancak Al_2O_3 tozları AA 7075 alaşımı ile karıştırılırken, önemli ölçüde topaklanma oluşmuştur. Bu tozlar ile üretilen numuneler düzgün bir şekilde sinterlenmemiştir. Bu sorunu çözmek için öncelikle Al_2O_3 tozlarını $120\text{ }^{\circ}C$ 'ye ayarlanmış fırında bir saat süre tutarak, nem giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden sonra karıştırma kısmen iyileşse de topaklanmalar tam olarak giderilememiştir. Daha sonra fırında bekletilmiş Al_2O_3 tozunu ve AA 7075 alaşım tozunu karıştırma kabına koyduktan sonra, bir miktar izopropil alkol ilave ederek bilyalar ile karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında tozlar $100\text{ }^{\circ}C$ 'de bir saat bekletilmiş ve alkolün uzaklaştırılması sağlanmıştır. Alkol ilavesi ile yapılan karıştırma işlemi sonrasında topaklanmalar giderilmiştir.

2.2.2. Kalıbın hazırlanması

Ön sıkıştırma ve sıcak preslemede kullanılan kalıp (H13) sıcak iş takım çeliğinden imal ettirilmiştir. Kalıbın her bir işlem başlangıcında, bir önceki sinterlemeden arta kalan çapak ve yüzeye sıvanan tozları temizlemek için üst ve alt desteğiyle beraber sinterlenen malzemeye temas eden yüzeyleri zımparalanmıştır. Şekil 2.10'da kalıp, alt destek ve üst destek parçaları, Şekil 2.11'de ise kalıbın teknik resmi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Alt destek, üst destek ve kalıp



Şekil 2.11. Kalıbın teknik resmi

2.2.3. Ön sıkıştırma aşamaları

Ön sıkıştırma işleminde kalıp toplanarak en alt katman olan AA7075 alaşımı soğuk olarak preslenmiştir. Daha sonra ise kalıp açılıp temizlenmiş ve tekrar toplanarak %10, %15 ya da %20 seramik takviye içeren orta katman tozları sıkıştırılmış alt katmanın üstüne yerleştirilerek ikinci soğuk presleme işlemi yapılmıştır. Son katman içinde kalıp yeniden açılıp temizlenmiş ve yeniden toplanarak %20, %30 ya da %40 seramik takviye içeren üst katman tozları orta katmanın üstüne üçüncü soğuk

presleme için yerleştirilmiştir. Bu şekilde Şekil 2.12'deki gibi ham tabakalar elde edilmiş ve ön sıkıştırma aşamaları tamamlanmıştır. Presin çalışma basıncı 135 bar'dır. Numunenin ebatları 7 x 7 cm (kare) olduğundan cm^2 alana düşen kuvvet yaklaşık olarak 137,6 kg'dır.



Şekil 2.12. Ham malzeme

2.2.4. Basınç altında sinterleme

Ön sıkıştırmada elde edilen katmanlar daha sonra sıcak presleme kalıbına yerleştirilerek sıvı fazlı sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem; birden fazla kimyasal bileşen içeren kompozisyonlarda, bileşenlerden en az birinin ergime sıcaklığının üzerinde yapılan sinterleme işlemi sıvı faz sinterlemesi olarak adlandırılır. Sıvı faz sinterlemesi yayılım katsayısı düşük malzemelerin sinterlenmesi için geliştirilmiş bir yöntemdir. Sinterleme sıcaklığında tane sınırları arasındaki boşluklarda sıvı bir faz oluşturacak olan bu bileşen(ler), çözünme-çökme mekanizması ile yayılım katsayısı düşük olan bu maddelerin taşınımını sağlarlar, böylelikle taneler birbiriyle kaynaşır, gözenekler azalır ve sinterleme gerçekleştirilir.

Sinterleme parametreleri daima bir optimal aralığa sahip olup uygun süre ve sıcaklık değerleri belirlenmelidir. Yüksek sıcaklık ve aşırı sinterleme süresi, tane kabalaşması nedeniyle mekanik özelliklerin düşmesine yol açacaktır. Dolayısıyla sinterlemede malzemenin kendi doğası, toz özellikleri ve üretim yönteminden gelen diğer gereksinimler doğrultusunda uygun şartlar belirlenmelidir.

İDM'lerin sinterlenmesi için TOBB ETÜ Malzeme Laboratuvarındaki eş eksenli sıcak pres kullanılmıştır (Şekil 2.13). İlk aşamada sinterleme işlemi 575 °C sıcaklıkta ve 25 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yapılan incelemelerde gözenek oranının istenilen düzeyde olmaması ve katmanların daha iyi bir şekilde bağlanması göz önüne alınarak sinterleme işlemi 580 °C sıcaklıkta 45 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Sıvı-faz sinterlemesi ile gözenek oluşumunun ortadan kaldırılması ve yüksek yoğunluğa erişilmesi sağlanmıştır. Sinterleme işlemi eş eksenli basma işlemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



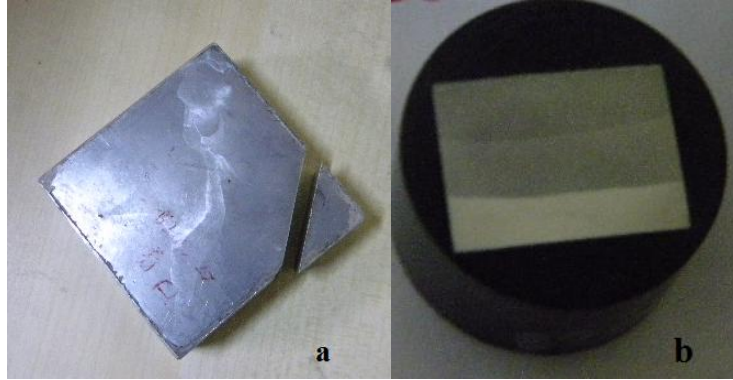
Şekil 2.13. Eş zamanlı olarak gerçekleştirilen presleme ve sinterleme işlemlerinin gösterimi

Sinterleme işlemi tamamlandıktan numune kalıpta soğumaya bırakılmıştır. Numune soğuduktan sonra kalıptan çıkarılmış ve makro ve mikro incelemeler ile yaşlandırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Daha sonra ise numuneler Balistik ve Üç Nokta Eğme testlerine tabi tutulmuştur.

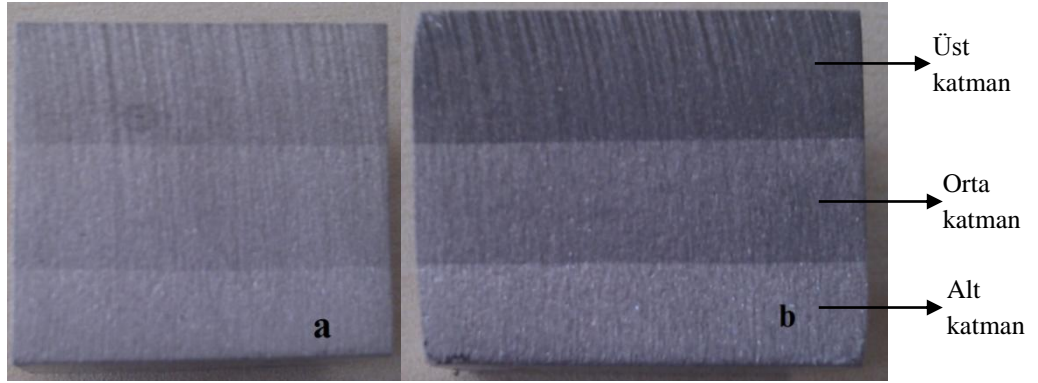
2.3. İDM'lerin Makro ve Mikro Görüntülerinin Elde Edilmesi

Üretilen İDM'lerin içerisinde oluşan katman geçişleri ve kompozit tabakalardaki seramik parçacık dağılımları makro ve mikro olarak incelenmiştir. Bu aşamada malzemenin bir kısmı sırasıyla Şekil 2.14a ve Şekil 2.14b'de gösterilmiş olduğu gibi kesilmiş ve bakalite alınmıştır.

Mikro inceleme öncesi kesilen, sırasıyla %10-%20 SiC ve %20-%40 SiC takviyeli numunelerin katman geçişleri Şekil 2.15a ve Şekil 2.15b'de çıplak gözle rahatça görülebilmektedir.



Şekil 2.14. (a) Bakalit öncesi kesilmiş parça ve (b) bakalite alınmış numune

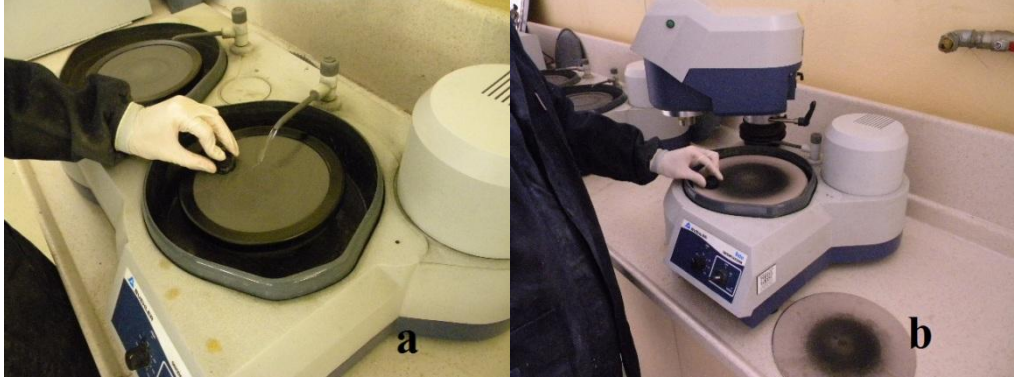


Şekil 2.15. (a) Orta %10, üst %20 SiC takviyeli ve (b) orta %20, üst %40 SiC takviyeli numune

Bakalite alınan her bir numune Şekil 2.16a'da gösterildiği gibi düz ve pürüzsüz bir yüzey elde edebilmek için zımpara makinesiyle zımparalanmıştır. Her bir numune için zımparalama işlemi kabadan inceye doğru değişik (180, 240, 400, 600, 1000'lik) zımparalar kullanılmıştır.

Zımparalama işlemi başlı başına mikro inceleme için yeterli olmadığından bu işlemin devamında elmas süspansiyonlarla, sırasıyla 6 μm , 3 μm , 1 μm kullanılarak numuneler Şekil 2.16b'deki gibi parlatılmıştır. Her bir parlatma süreci sonunda numuneler etil alkolle yıkanıp, kurutulmuştur. Parlatma sonrasında bu numuneler dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem için 400 ml nitrik asit (HNO_3), 200 ml

sülfürik asit (HCl), 6 ml hidroflorik asit (HF) ve 400 ml saf sudan oluşan dağlayıcı çözeltisi hazırlanmıştır.



Şekil 2.16. (a) Zımparalama işlemi ve (b) parlatma işlemi

Bakalite alınmış, zımparalanmış, parlatılmış ve sonrasında dağlanarak mikro incelemeye hazır hale getirilmiş numunelerin Şekil 2.17’de görüldüğü gibi ışık ve taramalı elektron mikroskobunda detaylı bir şekilde incelenmiştir. Mikro incelemelerde her katman için fotoğraflar çekilmiştir.



Şekil 2.17. Işık mikroskobu ile inceleme

2.4. Yaşlandırma Isıl İşlemi

Çalışma kapsamında İDM’lerin yapay yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Üç farklı sıcaklıkta (100 °C, 120 °C ve 150 °C’de) gerçekleştirilen yapay yaşlandırma işlemleri sonucunda sertlik-zaman eğrileri elde edilmiştir.

Yaşlandırma işleminden önce her bir numuneye Şekil 2.18’de görülen kül fırınında 470 °C’de 1 saat süreyle çözeltiye alma işlemi uygulanmış ve ardından oda

sıcaklığında su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Su verme işleminden sonra numunelere Şekil 2.19’da görülen yağ banyosunda yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

Yaşlandırma işlemi, en yüksek sertliğin hangi sıcaklıkta ve sürede elde edilebileceğini belirlemek amacıyla 100 °C, 120 °C ve 150 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta ve farklı zaman aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Yaşlandırma işleminin belirli sürelerinde numunelerin Brinell sertlik değerleri ölçülmüş ve üç farklı sıcaklık için sertlik-zaman eğrileri elde edilmiştir.



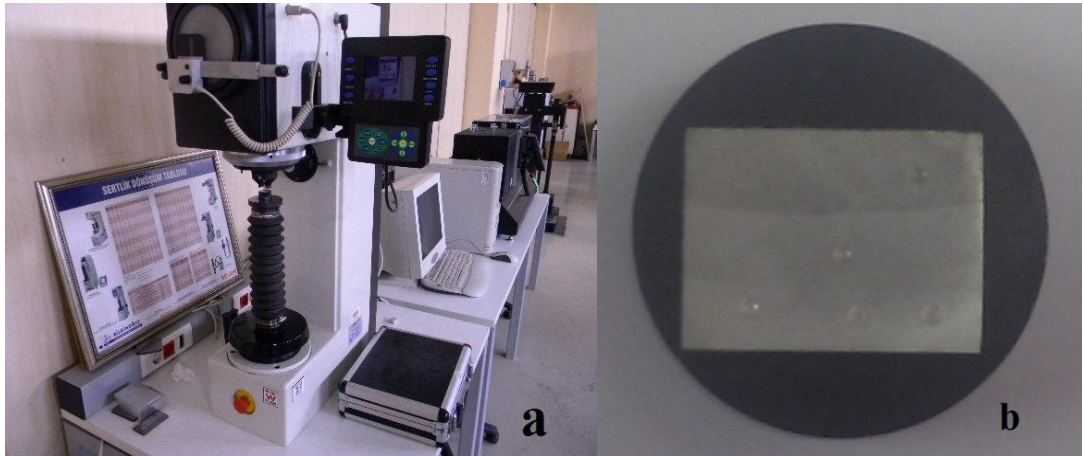
Şekil 2.18. Çözeltiye alma işleminin gerçekleştirildiği kül fırınının gösterimi



Şekil 2.19. Yaşlandırma işleminin gerçekleştirildiği yağ banyosunun gösterimi

2.5. Sertlik Ölçümü

Üretilen numunelerin sertlikleri, çözeltiye alma işlemi sonrasında, yaşlandırma işleminin hemen öncesinde ve yaşlandırma işlemi sırasında belirli zaman aralıklarında ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri Şekil 2.20'de verilen makro-sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Sertlik değerleri Brinell cinsinden ölçülmüştür. Brinell sertlik ölçümleri 2,5 mm bilye çapı ile 187,5 kg yük altında gerçekleştirilmiştir (ASTM, 1984).

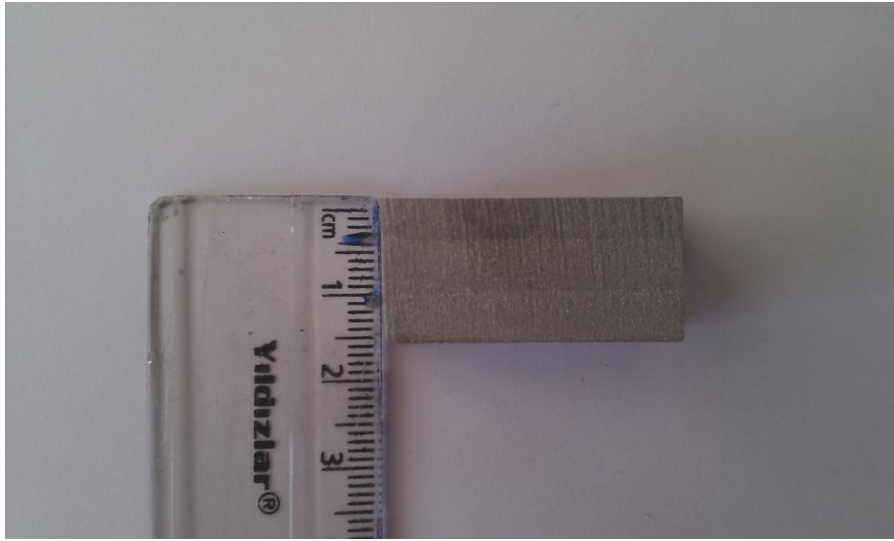


Şekil 2.20. a) Sertlik Ölçüm cihazı b) Sertlik ölçümü yapılmış numune

Yapılan sertlik ölçümleri ile numunelerin yaşlanma karakteristikleri belirlenmiştir. Böylece atış yapılacak numunelerin en yüksek sertliğe hangi sıcaklıkta ve hangi sürede ulaştıkları belirlenmiştir.

2.6. Üç Nokta Eğme Testleri

Üretilen İDM'lerin eğilme davranışlarının incelenmesi amacıyla üç nokta eğme testleri ASTM B 528-05 (ASTM, 2005) standardına uygun olarak yapılmıştır. Üç nokta eğme testi numuneleri, üretilen İDM'lerin 15 mm kalınlıkta, 12,7 mm eninde ve 31,2 mm boyunda olacak şekilde su jetiyle kesilmesi sonucu elde edilmiştir. Testler hem yaşlandırılmamış (sadece çözeltiye alınmış) hem de yaşlandırılmış numunelere (120 °C 'de 48 saat boyunca) uygulanmıştır. Her bir test 3 kez tekrar edilmiş ve ortalaması alınmıştır. Toplamda 24 adet üç nokta eğme testi yapılmıştır. Tipik bir üç nokta eğme numunesinin makro boyuttaki görünümü Şekil 2.21'de verilmiştir. Numunede 3 farklı katman açıkça görünmektedir. Test esnasında yük numunenin yüksek seramik takviyeli katmanı üzerinden uygulanmıştır.



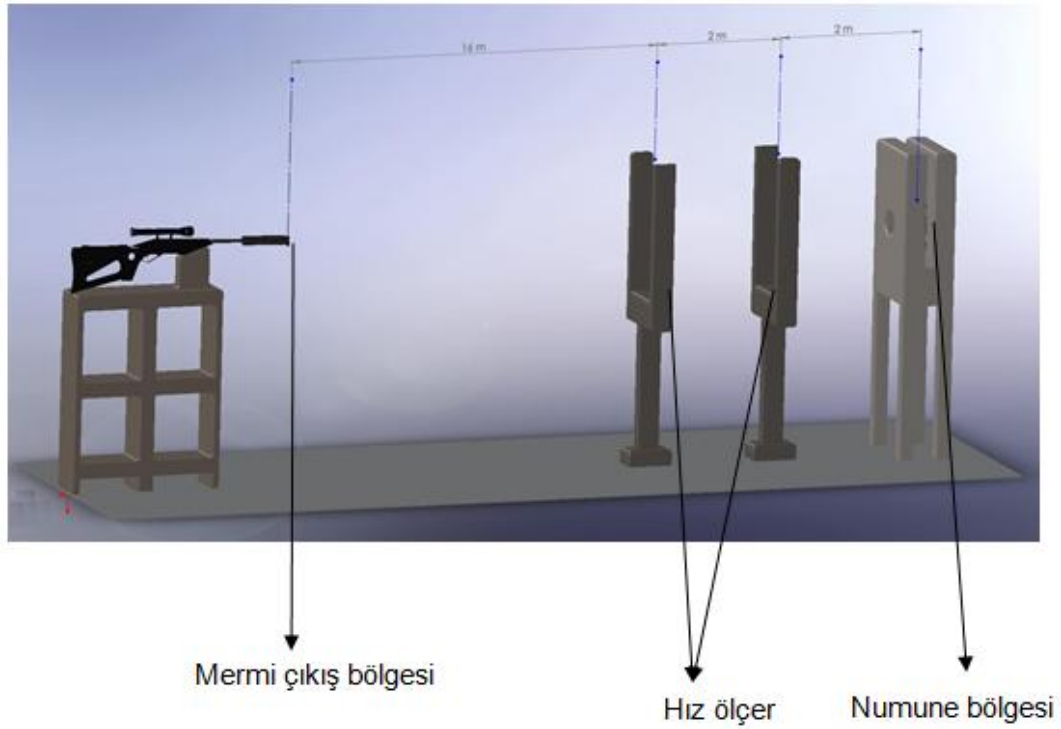
Şekil 2.21. Hazırlanan tipik bir üç nokta eğme numunesi (15 mm kalınlıkta)

2.7. Balistik Atış Testleri

Üretilen İDM'ler yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. SiC ve Al₂O₃ takviyeli 15,20 ve 25 mm kalınlığındaki toplam 72 adet numune ile Al₂O₃ /AA7075 katmanlı 9 numune atışa tabi tutulmuştur. Balistik atış testleri MKE Kırıkkale Silahsan

Fabrikası atış poligonunda gerçekleştirilmiştir. Atış düzeneği Şekil 2.22’de şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.23 ve Şekil 2.24 ise hedef düzeneği ile poligondaki atış düzeneğini göstermektedir.

Atışlarda mermi çıkış yeri ile hedef arasında 20 m’lik mesafe ayarlanmıştır. Balistik testlerde mermi hızları 778 ile 800 m/s arasında değişmiştir ve ortalama hız yaklaşık olarak 789 m/s olarak kaydedilmiştir. Her bir numune tek atışa tabi tutulmuş olup, mermiler hedefe dik olarak gönderilmiştir. Balistik başarımları; merminin numuneye tam olarak girmesi ve delip geçmesiyle ilgilidir. Bir numunenin başarılı olabilmesi için mermiyi durdurması ve tam olarak mermi tarafından delinmemesi (non-perforation) gerekmektedir. Bu şartları sağlayan (delinmeyen) numuneler balistik olarak başarılı sayılacaktır.



Şekil 2.22. Atış düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 2.23. Numunenin bağlandığı hedef düzeneğinin görünümü



Şekil 2.24. Balistik atışların gerçekleştirildiği atış poligonunun şematik gösterimi

Balistik atışlar 7,62 mm'lik zırh delici mermiler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.3, zırh delici merminin özelliklerini vermektedir. Zırh delici mermi sertleştirilmiş çelik çekirdeğe sahip olup en yaygın kullanılan mermi çeşididir.

Tablo 2.3. 7,62 mm AP merminin önemli özellikleri (MIL-C-60617A, 1991)

Tip	Özellik
Fişek uzunluğu	71,12 ±0,76 mm
Fişek ağırlığı	25,47 ±1,75 g
Kılıf malzemesi	7,62 x 51 mm Pirinç (CuZn30)
Çekirdek malzemesi	DIN 100Cr6 (HRC 61-62)
Mermi ağırlığı	9,75 ±0,1 g
Mermi uzunluğu	32,95 mm
Burun çeşidi	Konik (Koni yarım açısı, $\alpha = 17^\circ$)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. İDM'lerin Makro ve Mikro Görüntülerinin Elde Edilmesi

Üretilen numuneler metalografik olarak (zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri yapılarak) hazırlandıktan sonra içyapı resimleri elde edilmiştir. Numunelerin ışık mikroskobu görüntüleri parçacık dağılımının düzgünlüğü, ortalama tane boyutu ve gözenek miktarı hakkında fikir vermesi açısından önemlidir. Buradan elde edilen sonuçlarla malzemelerin mekanik özellikleri ve üretim aşamasındaki aksaklıklar ve yapılması gerekenler hakkında yorum yapabilmek daha kolay bir hale gelmektedir. Optik mikroskop haricinde numuneler taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Ayrıca görüntü işleme teknikleri kullanılarak ortalama tane boyutu hesaplanmıştır.

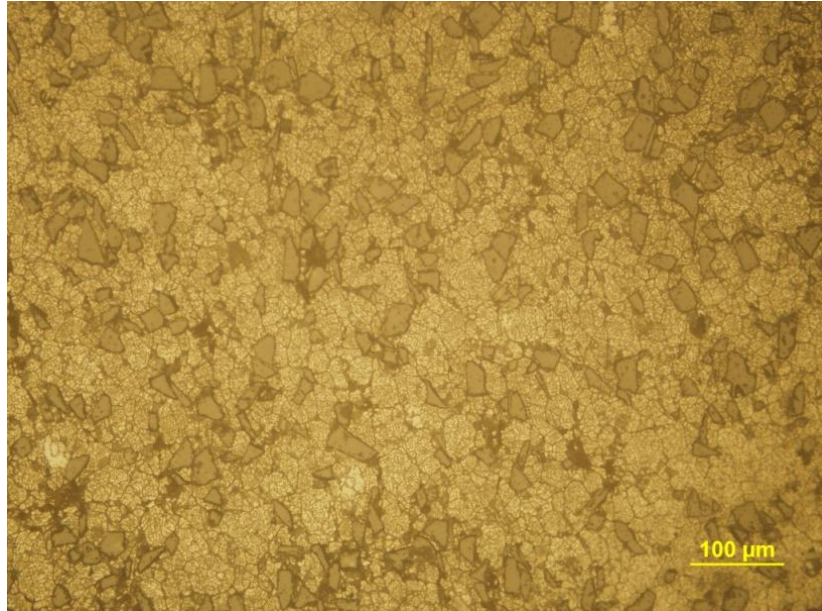
3.1.1. SiC takviyeli İDM'lere ait içyapı incelemesi

Şekil 3.1'de %10 SiC 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. Yapıda bir miktar gözenek bulunduğu fakat malzeme üretimi tam yoğunluk işlemi olarak bilinen sıcak presleme yöntemiyle üretildiği için, bu gözeneklerin malzemenin mekanik özellikleri üzerinde çok fazla bir etkisi olmadığı düşünülmektedir. Katmanlar arası geçiş bölgesi düzgün bir şekilde üretilebilmiştir.



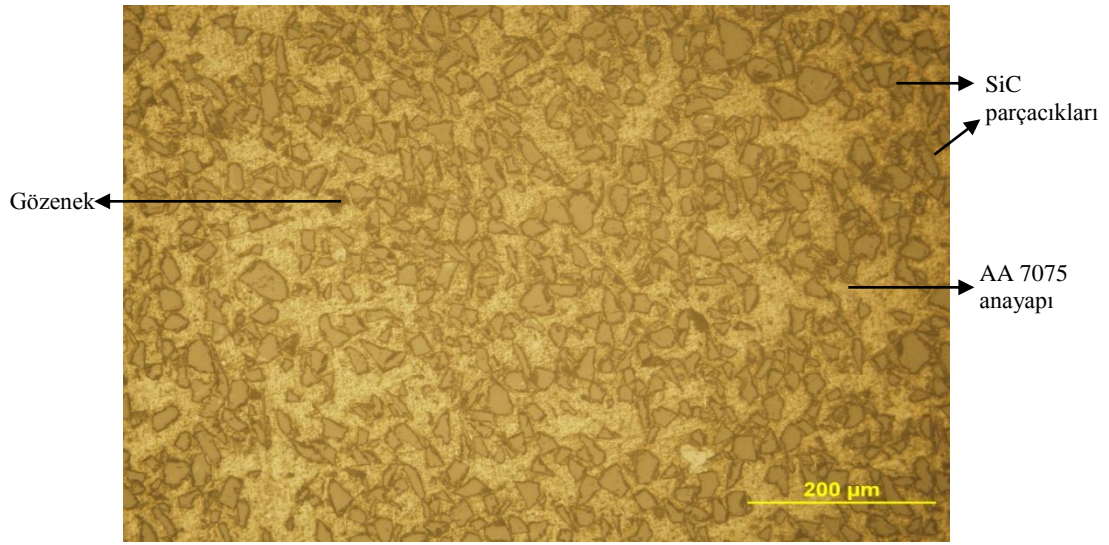
Şekil 3.1. AA7075 ve %10 SiC takviyeli katmanlar arasındaki geçiş bölgesi (X200)

%20 SiC takviye oranına sahip İDM'nin içyapı görüntüsü Şekil 3.2'de verildiği gibidir. Takviye parçacıkları büyük oranda homojen dağılmıştır fakat az da olsa yapı içerisinde gözenek oluşumu ve takviye parçacıkları arasında topaklanma mevcuttur. Fakat bu düşük seviyedeki topaklanmanın malzemenin genel mekanik özelliklerine ve eş yönlülüğüne etkisinin çok düşük olacağı düşünülmektedir.



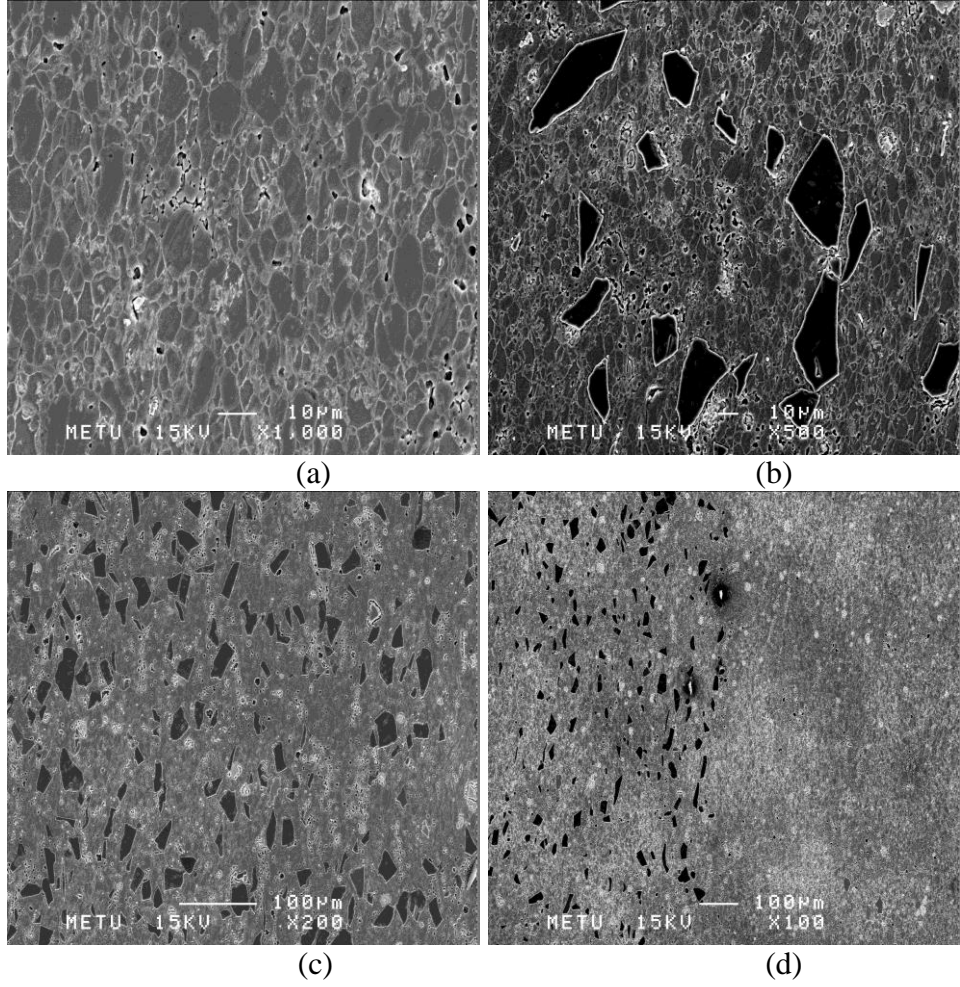
Şekil 3.2. %20 SiC takviyeli İDM'ye ait ışık mikroskobu görüntüsü (X200)

Şekil 3.3, %40 SiC parçacık takviyeli İDM'nin içyapı görüntüsüdür. Toz boyutu; tozların akış hızları ve paketlenmeleri üzerinde etkili olmasına bağlı olarak sinterleme sonrasında üretilen parçaların mekanik özelliklerini büyük ölçüde değiştirirken, daha yüksek paketlenme özellikleri için küçük ve iri toz tanelerinden oluşan farklı toz bileşimleri hazırlanmaktadır. Dolayısıyla elde edilen yapıda küçük ve iri parçacıklardan oluşan yapının yüksek paketlenme özelliği sağlayacağı bilinmektedir (German, 2007). Bu durumun daha iyi mekanik özellikler elde edilmesini sağlayacağı düşünülmektedir.



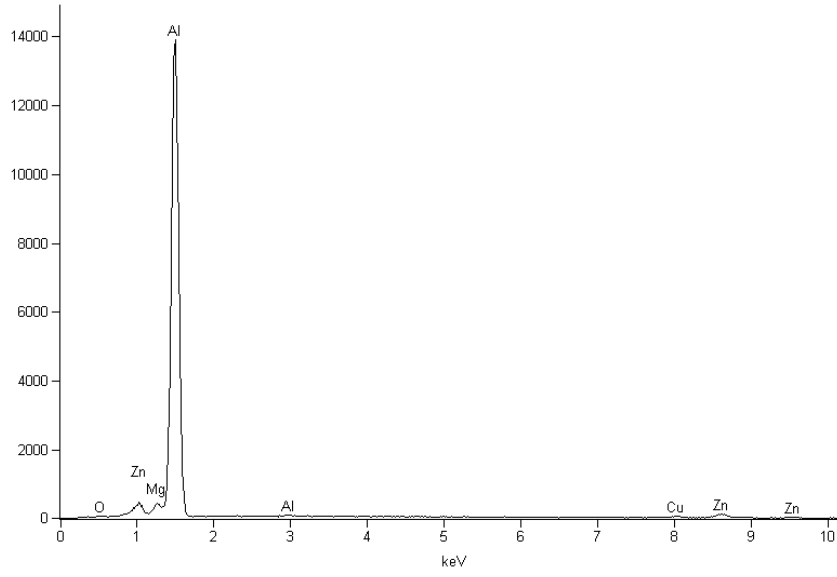
Şekil 3.3. %40 SiC parçacık takviyeli İDM'ye ait tipik bir görüntü (X100)

120 °C'de 48 saat süre ile yapay yaşlandırılan ve çözeltiye alınan düşük SiC takviyeli İDM'ler SEM'de incelenmiştir. Katmanlardan farklı büyütme ile görüntüler alınmıştır. Ayrıca enerji dağıtımlı spektrometre (EDS) yöntemi ile içyapının kimyasal bileşimi incelenmiştir. Yaşlandırılmış numunelerden alınan mikro yapı görüntüleri Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. 120 °C’de 48 saat süre ile yapay yaşlandırılmış düşük SiC takviyeli İDM numunelerine ait SEM görüntüleri a) Alt katman (x1000), b) Orta katman (x500), c) Üst katman (x200) d) Alt-orta katman geçiş (x100)

Şekil 3.4a’da yaşlandırılmış numunenin alt katmanı görülmektedir. Tane sınırlarındaki siyah bölgelerin gözenek olduğu anlaşılmıştır. Tane içlerindeki iri olan beyaz bölgelerin ise malzeme içerisindeki safsızlıklar olduğu düşünülmektedir. Şekil 3.4b’de ise %10 SiC takviyeli orta katmandan alınan SEM görüntüsü verilmiştir. SiC toz boyutlarının geniş bir aralıkta dağıldığı şekilden görülebilir. Bu da daha sıkıştırılabilirliği arttıran bir etkidir. Şekil 3.4c’de %20 takviyeli üst katman görülmektedir. Bu görüntüden yola çıkarak SiC tozlarının ana yapı içerisinde homojene yakın bir dağılım gösterdiği söylenebilir. Geçiş bölgesinin verildiği resimde ise, katmanlar arasındaki geçişin düzgün bir şekilde olduğu görülmektedir. Katmanlar arasında bir ayrışma söz konusu değildir.

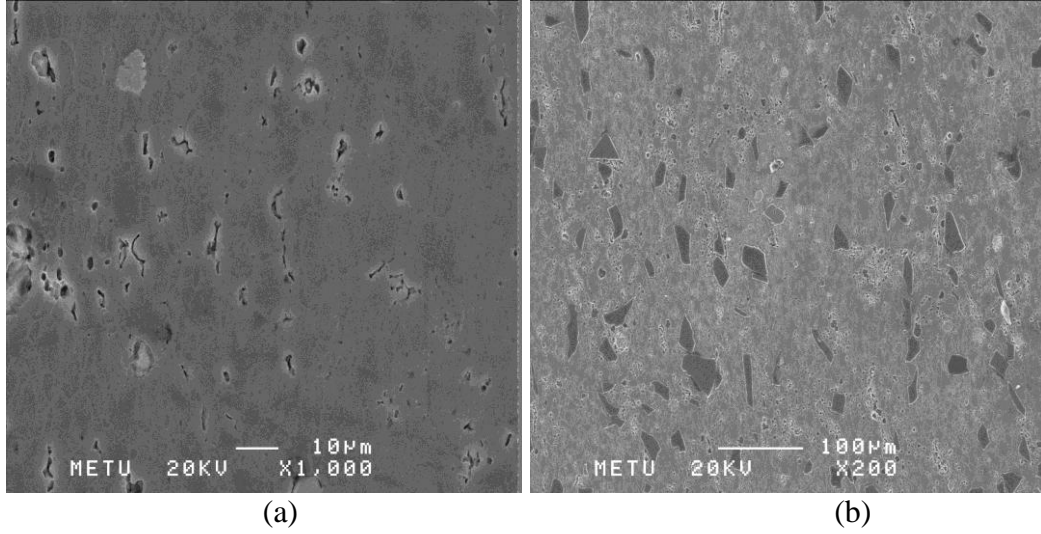


Şekil 3.5. Düşük SiC takviyeli yaşlandırılmış numuneden alınan EDS analizi

Tablo 3.1. Düşük SiC takviyeli numunenin alt katmanının kimyasal içeriği

Element	%Ağırlık	%Atom
Al	89,09	0,82
Mg	0,7	94,67
Cu	2,32	1,05
Zn	7,89	3,46

Şekil 3.5 ve Tablo 3.1’de yaşlandırılmış düşük SiC takviyeli İDM’ye ait EDS analizinin sonuçları görülmektedir. Hazırlanan toz karışımıyla kıyaslandığında sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir. Şekil 3.6’da ise yaşlandırılmamış düşük SiC takviyeli İDM’nin mikro yapı görüntüleri görülmektedir.

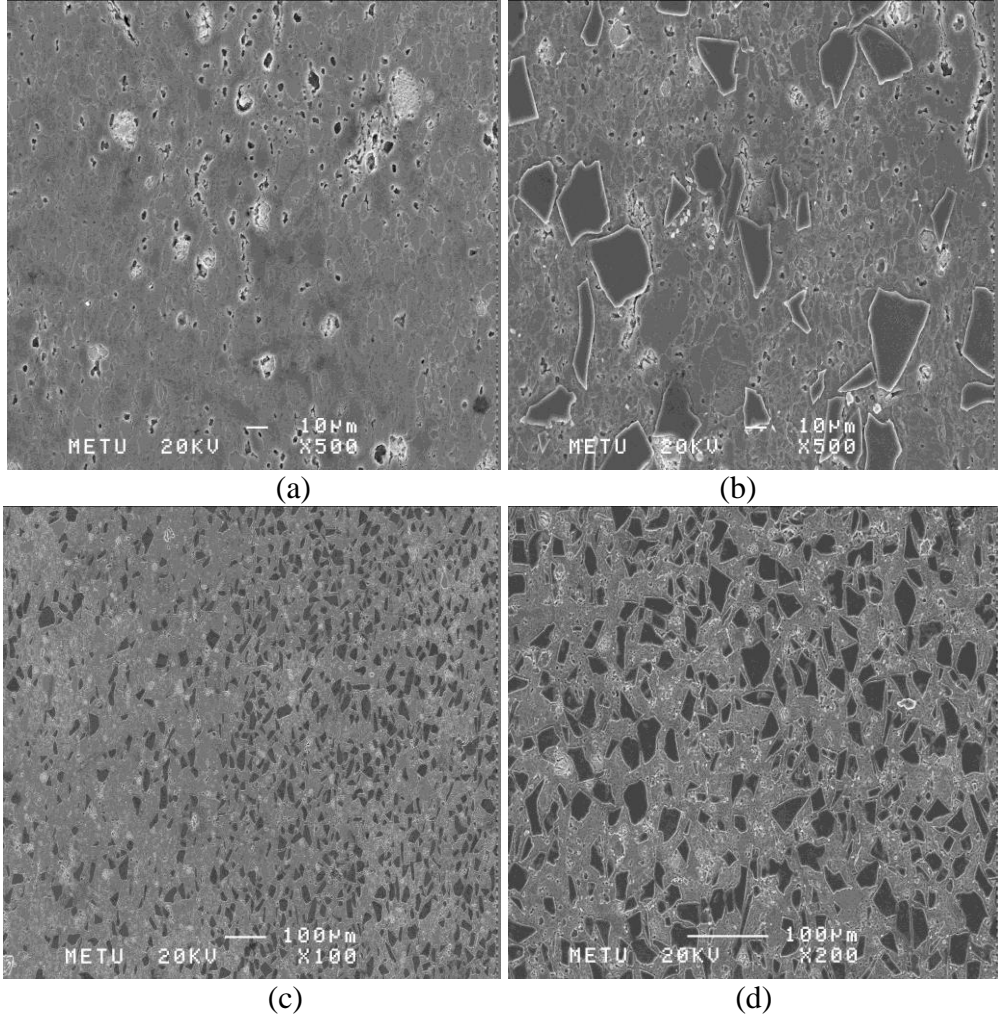


Şekil 3.6. Yaşlandırılmamış düşük SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri a) Alt katman(x1000), b) Orta katman (x200)

Şekil 3.6a'da yaşlandırılmamış numunenin alt katmanı görülmektedir. Tane sınırlarında oluşan gözenekler görülmektedir. Şekil 3.6b'de ise %10 SiC takviyeli orta katman gösterilmiştir. SiC tozlarının dağılımının homojene yakın olduğu anlaşılmaktadır.

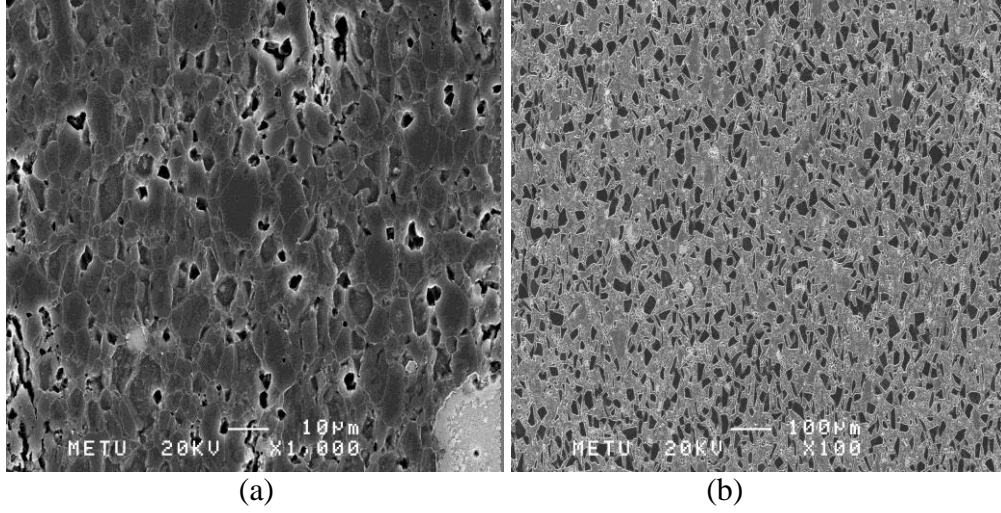
Yüksek SiC takviyeli İDM'ler hem yaşlandırılmış hem de yaşlandırılmamış olarak SEM'de incelenmiştir. Tüm katmanlardan farklı büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır. Düşük takviyeli İDM'lerde olduğu gibi EDS analizi yapılarak numunelerin iç yapısının kimyasal bileşimi araştırılmıştır. Yaşlandırılmış yüksek SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Şekil 3.7a'da yaşlandırılmış yüksek SiC takviyeli İDM'nin alt katmanının SEM görüntüsü verilmiştir. Tane sınırlarında gözenek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 3.7b'de %20 SiC takviyeli orta katman ve Şekil 3.7d'de üst katman görülmektedir. Bu iki resimden SiC toz boyut dağılımının geniş olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3.7c'de ise orta ve üst katmanlar arasındaki geçiş gösterilmiştir. Geçişin düzgün olduğu ve katman ayrışmasının gözlenmediği söylenebilir. Çözeltiye alınmış yüksek SiC takviyeli İDM'lere ait SEM görüntüleri Şekil 3.8'da gösterilmiştir.



Şekil 3.7. 120 °C’de 48 saat süre ile yapay yaşlandırılmış yüksek SiC takviyeli İDM numunelerine ait SEM görüntüleri: a) Alt katman (x500), b) Orta katman (x500), c) Orta-üst katman geçişi (x100), d) Üst katman (x200)

Şekil 3.8a’da düşük SiC takviyeli İDM’nin alt katmanının çözeltiye alma işlemi sonrasındaki SEM görüntüsü görülmektedir. Bu numunede de gözenek oluşumu gözlemlenmiştir. Şekil 3.8b’de ise üst katmanın SEM görüntüsü verilmiştir. Toz dağılımının homojene yakın olduğu söylenebilir. Bu da numunenin her yerinde yakın mekanik davranış göstermesini sağlayacaktır.



Şekil 3.8. Yaşlandırılmamış düşük SiC takviyeli numunelere ait SEM görüntüleri: a) Alt katman (x1000), b) Üst katman (x100)

3.1.2. Al₂O₃ takviyeli İDM'lere ait içyapı incelemesi

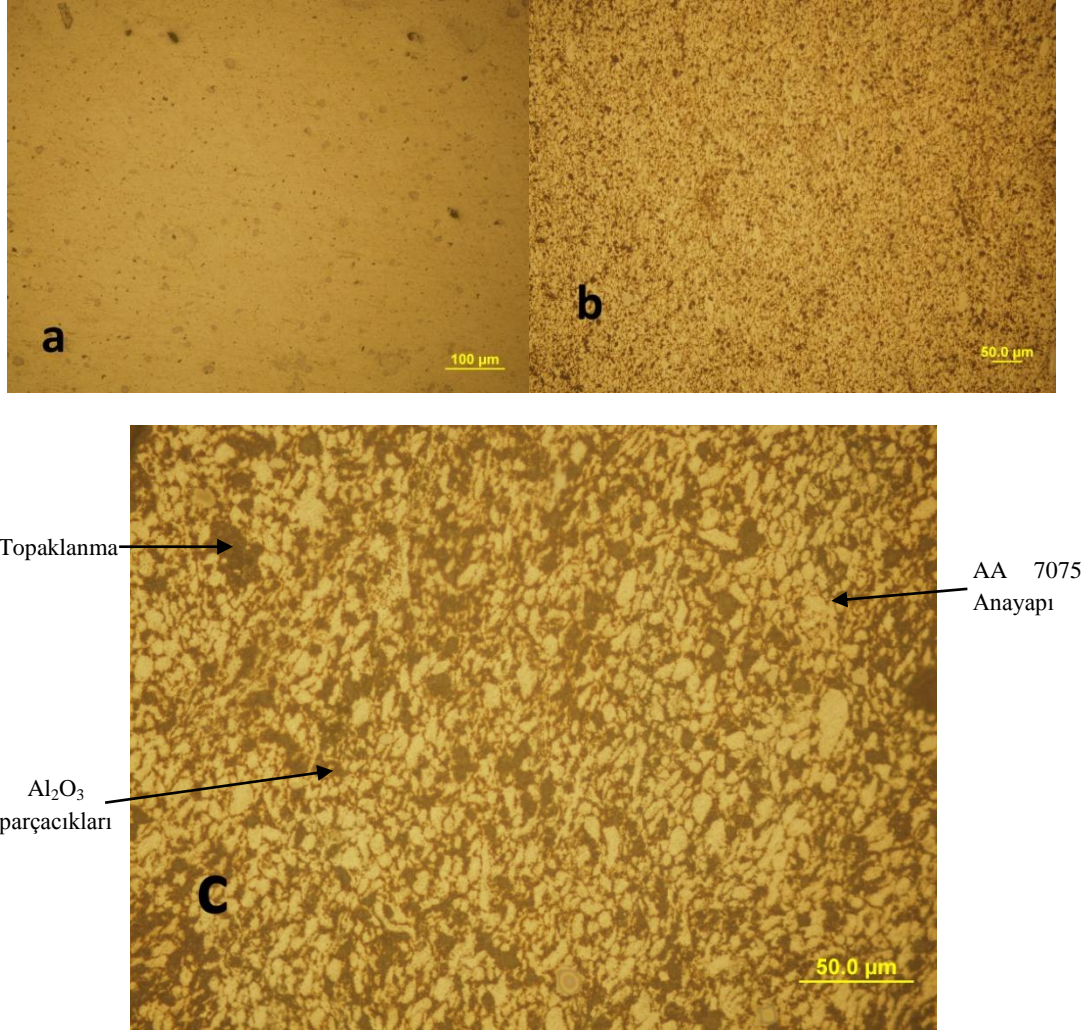
Üretilen Al₂O₃ takviyeli numuneler de metalografik olarak (standart zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri yapılarak) hazırlandıktan sonra ışık mikroskobu altında içyapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Işık mikroskobu altında yapılan içyapı incelemelerinden takviye parçacıkların dağılımı, ortalama tane boyutu ve gözenek miktarları hakkında yorum yapmak mümkün olmuştur. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi katmanlar arası geçiş bölgesi düzgün olarak elde edilebilmiştir. Katmanlar arası geçiş bölgelerinin düzgünlüğü malzemenin balistik başarımını önemli ölçüde etkilemektedir. Düzgün bir geçiş bölgesi balistik atışlar sonrası malzemenin bütüncül yapısını koruyabilmesini ve mermiden gelen basıncın tüm malzeme boyunca düzgün iletilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.9. AA7075 alt ve %10 Al₂O₃ takviyeli orta katmana ait geçiş bölgesi görüntüsü

Şekil 3.10'da verilen mikro görüntülerde düşük Al₂O₃ takviye oranına sahip numune grubunun katmanlarına ait içyapılar görülmektedir. Elde edilen içyapılardan takviye parçacıkları dağılımının göreceli düzgün olduğu görülmektedir. Fakat artan takviye oranına bağlı olarak yapı içinde bir miktar topaklanma ve gözenek oluşumu görülmektedir.

Özellikle %20 Al₂O₃ takviyeli katmanda Şekil 3.10'da verildiği üzere topaklanma açık olarak görülebilmektedir. Malzeme içerisindeki topaklanma miktarının artması malzemenin sinterleme mekanizmasını da etkileyecek ve gözenek miktarını artıracaktır. Yüksek gözenek miktarı mekanik özelliklerin düşmesine neden olacaktır (German, 2007).



Şekil 3.10. Al₂O₃ takviyeli İDM'ye ait mikro görüntüler a-) AA7075 (200x) b-) %10 takviyeli (200x) c-) %20 takviyeli (500x)

3.1.3. İDM'lerde tane boyutu ve gözenek miktarı

İDM'lerdeki tane boyu görüntü işleme yöntemi ile belirlenmiştir. Tane boyu ölçümü ASTM E 112-96e2 (ASTM, 2004) standardına göre yapılmıştır. Tablo 3.2'de görüldüğü gibi, SiC takviyeli İDM'lerin tane boyu katmanlara bağlı olarak 5,4 – 6,6 µm arasında değişmektedir.

Tablo 3.2. SiC takviyeli İDM katmanlarında ortalama tane boyu (µm)

Düşük Takviye Oranlı			Yüksek Takviye Oranlı		
Alt	Orta	Üst	Alt	Orta	Üst
5,66 ± 0,52	5,56 ± 0,94	6,61 ± 0,66	5,40 ± 0,87	6,06 ± 1,22	6,29 ± 0,54

Tablo 3.3’de alümina takviyeli İDM’lerin katmanlarındaki ortalama tane boyutları verilmiştir. Düşük alümina takviyeli numunelerde tane boyutları 5,9 ile 6,6 µm arasında değişirken yüksek alümina takviyeli numunelerde ise 6,3 – 6,8 µm arasında değişmektedir.

Tablo 3.3. Al₂O₃ takviyeli İDM’de tane boyları

Düşük Takviye Oranlı			Yüksek Takviye Oranlı		
Alt	Orta	Üst	Alt	Orta	Üst
6,60 ± 1,52	5,98 ± 1,13	5,95 ± 1,05	6,79 ± 1,38	6,36 ± 1,45	6,37 ± 0,7

İDM’lerdeki gözenek miktarı ise görüntü işleme programı ve bir kod kullanılarak hassas bir şekilde tespit edilmiştir. Tablo 3.4 ve 3.5 sırasıyla SiC ve Al₂O₃ içeren İDM’lerin gözenek miktarlarını vermektedir. Gözenek miktarı katmanlara göre çok az değişmekte olup %1,4 ile %4,2 arasındadır.

Tablo 3.4. SiC takviyeli İDM’lerin gözenek miktarları (%)

	Düşük Takviye Oranlı	Yüksek Takviye Oranlı
Alt katman	2,3	2,6
Orta katman	2,4	2,6
Üst katman	2,6	3,2

Tablo 3.5. Al₂O₃ takviyeli İDM’lerin gözenek miktarları (%)

	Düşük Takviye Oranlı	Yüksek Takviye Oranlı
Alt katman	1,0	0,5
Orta katman	1,6	1,0
Üst katman	4,2	1,4

Gözenek miktarı artan takviye miktarına bağlı olarak artmaktadır. Çünkü takviye olarak kullanılan seramik malzemelerin sertlikleri alüminyum alaşımına kıyasla oldukça yüksektir. Bu da sert seramik parçacıkların yığılmasıyla beraber, ön sıkıştırma ve sinterleme işlemi sırasında uygulanan basıncın tozların ideal bir şekilde sıkışmasına engel olmaktadır. Gözeneklerin azalması ya da tamamen yok edilmesi için daha yüksek basınçlara gereksinim duyulmaktadır.

Tüm ölçüm yapılan numuneler arasında en fazla gözenek miktarı alümina takviyeli numunenin üst katmanında çıkmıştır. Alüminanın sertliği, silisyum karbüre kıyasla daha düşüktür. Bu durumun oluşmasındaki temel etkenin tozların homojen olarak karıştırılmaması olduğu düşünülmektedir. Alümina takviyeli numunelerde homojen karışım sağlamak için farklı karıştırma teknikleri denenmesine rağmen, diğer numunelere kıyasla daha heterojen bir dağılım elde edilmiştir. Bu da gözenek miktarında artışa sebep olmuştur.

3.2. Yaşlandırma Isıl İşlemi

7xxx serisi alüminyum alaşımları çökeltme ile sertleştirilen Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarıdır (Sha ve Cerezo, 2004, Chen ve diğerleri, 2009, Lloyd ve Chatuverdi, 1982, Emani ve diğerleri, 2009).

7xxx serisi alüminyum alaşımları için genel olarak çökeltme dizisi (Sha ve Cerezo, 2004, Chen ve diğerleri, 2009, Lloyd ve Chatuverdi, 1982, Emani ve diğerleri, 2009):

Aşırı Doymuş Katı Çözelti \longrightarrow GP Bölgeleri \longrightarrow Yarı Kararlı η' \longrightarrow Kararlı η

şeklindedir.

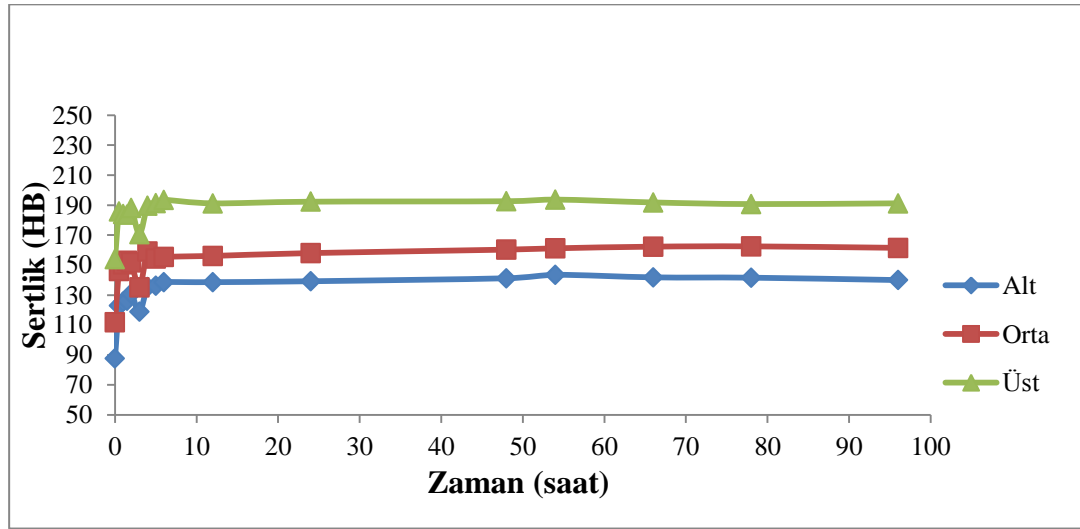
Yaşlandırma işlemi sırasında en yüksek sertlik değerleri yarı kararlı η' fazının oluşumundan sonra elde edilir. GP bölgeleri ve yarı kararlı η' fazı çökeltmenin ilk aşamalarında oluşur. Oluşan yarı kararlı η' yapısının sertliği belirgin bir şekilde arttırdığı bilinmektedir. Yaşlandırma işlemi bu fazın oluşumundan sonra devam ettirildiği takdirde yarı kararlı MgZn_2 çökeltleri kararlı hale geçer. Bu dönüşüm gerçekleştiğinde sertlik azalır (Sha ve Cerezo, 2004, Chen ve diğerleri, 2009, Lloyd ve Chatuverdi, 1982, Emani ve diğerleri, 2009).

Yapay yaşlandırma işleminden önce çözeltiyeye alma işlemi 470 °C'de bir saat süreyle yapılmıştır. Çözeltiyeye alma işlemi sonunda numuneler 20 °C'de suda soğutulmuştur. Sonrasında ise yapay yaşlandırma işlemleri yağ banyosunda 100 °C, 120 °C ve 150 °C'de 96 saate kadar gerçekleştirilmiştir. İşlemler devam ederken

belli aralıklarda sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir numunede en az üç ölçüm alınmış ve ortalamaları kaydedilmiştir.

3.2.1. Yüksek SiC takviyeli İDM'nin 100 °C'de yaşlandırılması

%40 ve %20 SiC takviyeli İDM'nin yaşlanma işlemi bu dönem içerisinde tamamlanmıştır. 100 °C'de 96 saate kadar gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi sonrasında elde edilen sertlik-zaman eğrisi Şekil 3.11'deki gibidir.

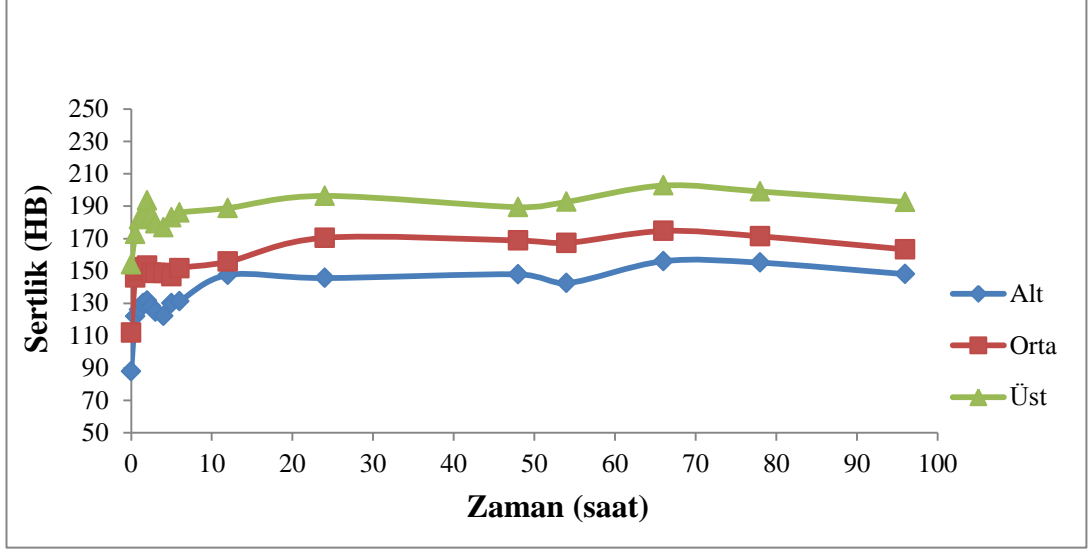


Şekil 3.11. Yüksek SiC takviye oranına sahip İDM'nin 100 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

Yaşlandırma işlemi öncesinde alt, orta ve üst katmanların sertlik değerleri sırasıyla 87,8 HB, 111,8 HB ve 154 HB olarak ölçülmüştür. Daha sonra sertlik değerleri 6. Saate kadar dalgalanarak devam etmiştir. 6 saatten sonra ise sertlik değerlerinin kararlı bir hale geldiği ve değişimin çok az olduğu gözlemlenmiştir. 54 saatin sonunda ise bütün katmanlarda en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Alt katmanın en yüksek sertlik değeri 143,5 HB, orta katmanın en yüksek sertlik değeri 161,2 HB ve üst katmanın en yüksek sertlik değeri 193,7 HB bulunmuştur.

3.2.2. Yüksek SiC takviyeli İDM'nin 120 °C'de yaşlandırılması

Yüksek SiC takviyeli İDM'nin 120 °C'de 96 saate kadar gerçekleştirilen yaşlandırma işlemine ait sertlik zaman eğrisi Şekil 3.12'de verilmiştir.



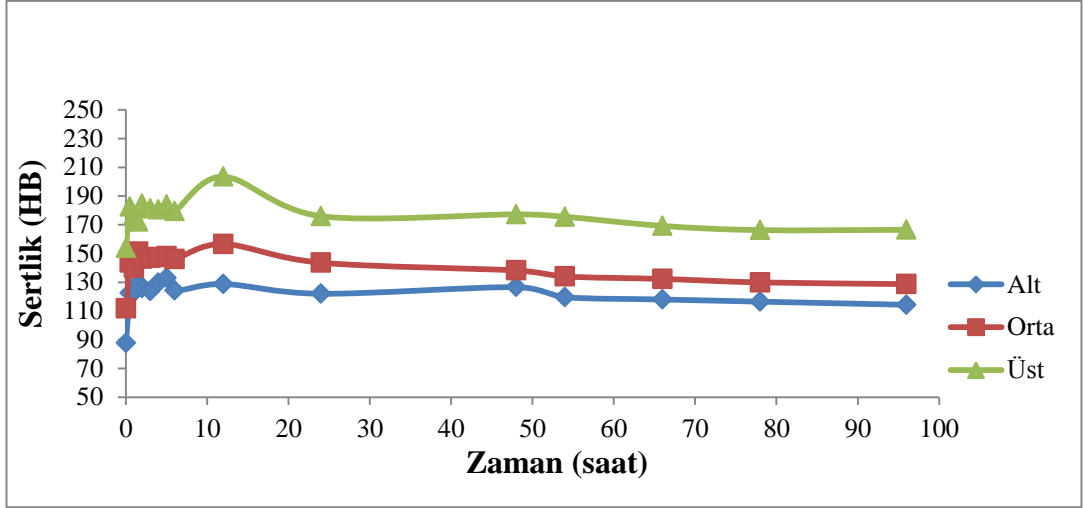
Şekil 3.12. Yüksek SiC takviye oranına sahip İDM'nin 120 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

Numunenin çözeltiliye alma işlemi sonrasında ölçülen sertlik değerleri alt, orta ve üst katman için sırasıyla 113,3 HB, 145,1 HB ve 175,9 HB'dir. 120 °C'de en yüksek sertlik değerleri 66 saatte elde edilmiştir. Alt, orta ve üst katmanların en yüksek sertlik değerleri sırasıyla, 156 HB, 174,7 HB ve 202,8 HB ölçülmüştür.

3.2.3. Yüksek SiC takviyeli İDM'nin 150 °C'de yaşlandırılması

%40 ve %20 SiC takviyeli İDM'nin 150 °C'deki yaşlandırma işlemi sonucunda elde edilen sertlik-zaman grafiği Şekil 3.13'de görülmektedir.

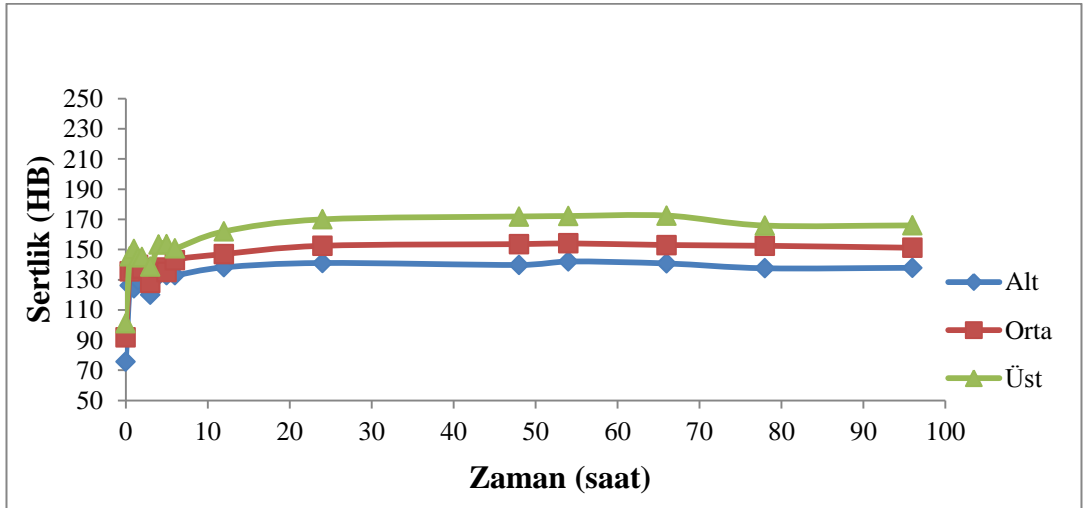
Çözeltiliye alma işlemi sonrasında sertlik değerleri alt katman için 87,8 HB, orta katman için 111,8 HB ve üst katman için 154 HB olarak tespit edilmiştir. Bu sıcaklıkta en yüksek sertlik değerlerine 12 saat sonra ulaşılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri alt, orta ve üst katman için sırasıyla 128,8 HB, 156,6 HB ve 203,5 HB'dir.



Şekil 3.13. Yüksek SiC takviye oranına sahip İDM'nin 150 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

3.2.4. Düşük SiC takviyeli İDM'nin 100 °C'de yaşlandırılması

%20 ve %10 SiC takviyeli İDM numunesi 100 °C'de 96 saate kadar yapay olarak yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma işlemi sonrasında elde edilen sertlik-zaman eğrisi Şekil 3.14'de görülmektedir.



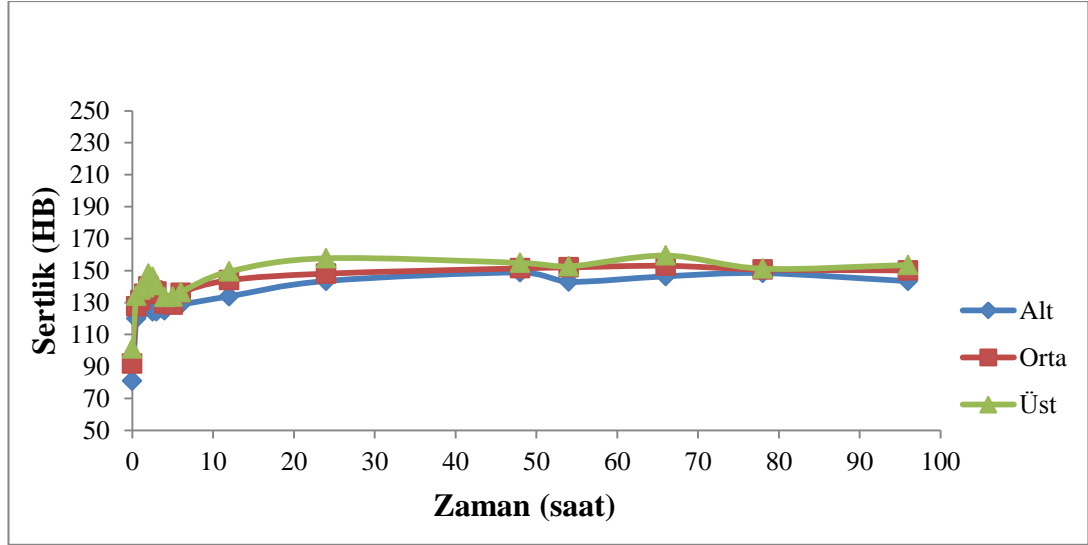
Şekil 3.14. Düşük SiC takviye oranına sahip İDM'nin 100 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

Yaşlandırma işlemine başlamadan önce alt, orta ve üst katmanlardan alınan sertlik değerleri sırasıyla 75,7 HB, 91,8 HB ve 101,2 HB olarak ölçülmüştür. En yüksek sertlik değerleri 54 saat sonunda elde edilmiştir. Alt katmanın en yüksek sertlik

değeri 142,1 HB, orta katmanın en yüksek sertlik değeri 154,1 HB ve üst katmanın en yüksek sertlik değeri 172,2 HB olarak tespit edilmiştir.

3.2.5. Düşük SiC takviyeli İDM'nin 120 °C'de yaşlandırılması

Düşük SiC takviye oranına sahip İDM'nin 120 °C'de 96 saate kadar yaşlandırılması işlemi sonucunda elde edilen sertlik-zaman grafiği Şekil 3.15'de verilmiştir.



Şekil 3.15. Düşük SiC takviye oranına sahip İDM'nin 120 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

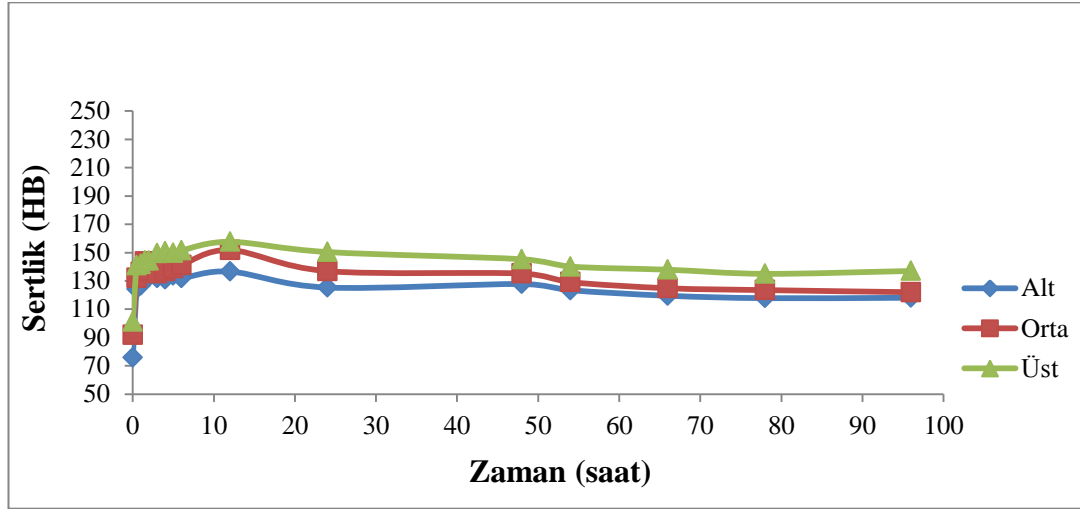
Yaşlandırma işlemi öncesinde numuneden alınan sertlik değerleri alt, orta ve üst katmanlar için sırasıyla 96,6 HB, 115 HB ve 143,7 HB'dir. 120 °C'de yapılan yaşlandırma işleminde en yüksek sertlik değerlerine 48 saatin sonunda ulaşılmıştır. Alt katmanın en yüksek sertliği 148,8 HB'dir. Orta ve üst katmanlar için ise sırasıyla 151,4 HB ve 154,8 HB olarak bulunmuştur.

3.2.6. Düşük SiC takviyeli İDM'nin 150 °C'de yaşlandırılması

%20 ve %10 SiC takviyeli İDM 150 °C'de 96 saate kadar yaşlandırılmıştır. İşlem sırasında belirli zaman aralıklarında sertlik değerleri ölçülerek elde edilen sertlik-zaman grafiği Şekil 3.16'da görülmektedir.

Çözeltiye alma işlemi sonrasında ölçülen sertlik değerleri alt, orta ve üst katman için sırasıyla 75,7 HB, 91,8 HB ve 101,2 HB'dir. Bu sıcaklıkta en yüksek sertlik değerlerine 12 saatte ulaşılmıştır. Alt katman için ölçülen en yüksek sertlik değeri

136,6 HB'dir. Orta katmanın en yüksek sertlik değeri ise 151,8 HB olarak tespit edilmiştir. Üst katmanın en yüksek değeri de 157,6 HB ölçülmüştür.

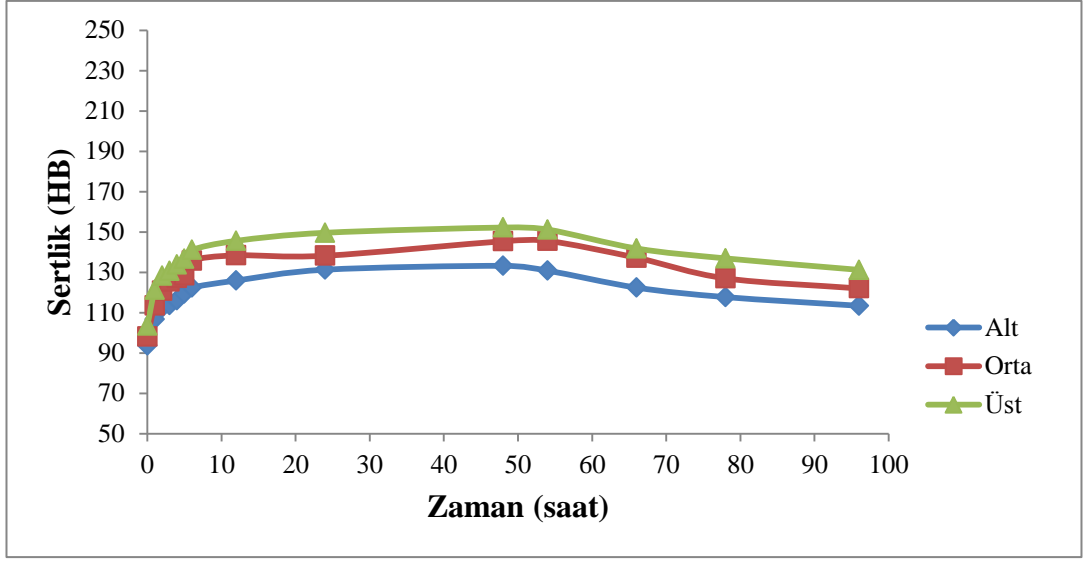


Şekil 3.16. Düşük SiC takviye oranına sahip İDM'nin 150 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

3.2.7. Yüksek Al₂O₃ takviyeli İDM'nin 100 °C'de yaşlandırılması

Şekil 3.17'de yüksek Al₂O₃ takviyesine sahip İDM'nin yaşlandırma sertlik eğrisi verilmiştir. Su verme sonrası alt, orta ve üst katmanın sertlik değerleri sırasıyla; 93 HB, 98 HB ve 103HB olarak ölçülmüştür. İlk 2 saat aralığında her üç katmanın sertliğinde belirgin bir artış gerçekleşmiştir. 54 saate kadar yapılan yaşlandırma işleminde sertlikteki artış devam etmiş ve bu zaman sonunda her üç katmanda en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. 54 saat sonunda elde edilen sertlik değerleri sırasıyla; 130 HB, 145 HB, 151 HB olarak ölçülmüştür. Yaşlandırma işlemine 96 saate kadar devam edilmiş fakat 56 saatten sonra sertlik değerlerinde bir miktar düşüş görülmüştür.

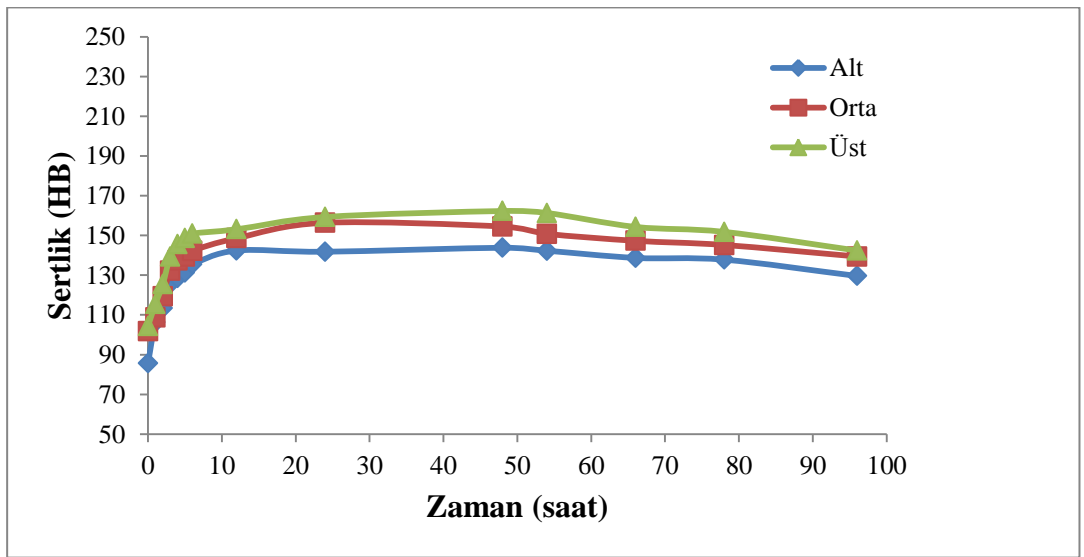
En yüksek Al₂O₃ takviyesine sahip katmanda en yüksek sertlik değeri elde edilmiş fakat genel yaşlanma karakteristiği her üç katmanda yaklaşık olarak aynıdır.



Şekil 3.17. Yüksek Al₂O₃ takviye oranına sahip İDM'nin 100 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

3.2.8. Yüksek Al₂O₃ takviyeli İDM'nin 120 °C'de yaşlandırılması

Şekil 3.18'de %30-15 Al₂O₃ takviyesine sahip İDM'nin 120 °C'de gerçekleştirilen yaşlandırma sertlik eğrisi verilmiştir. Su verme sonrası alt, orta ve üst katmanda elde edilen sertlik değerleri sırasıyla; 85 HB, 101 HB, 104 HB olarak elde edilmiştir. Yaşlandırma işleminin 0-2 saat aralığında sertlikte belirgin bir artış gerçekleşmiş ve sırasıyla; 106 HB, 108 HB, 115 HB sertlik değerlerine ulaşılmıştır.

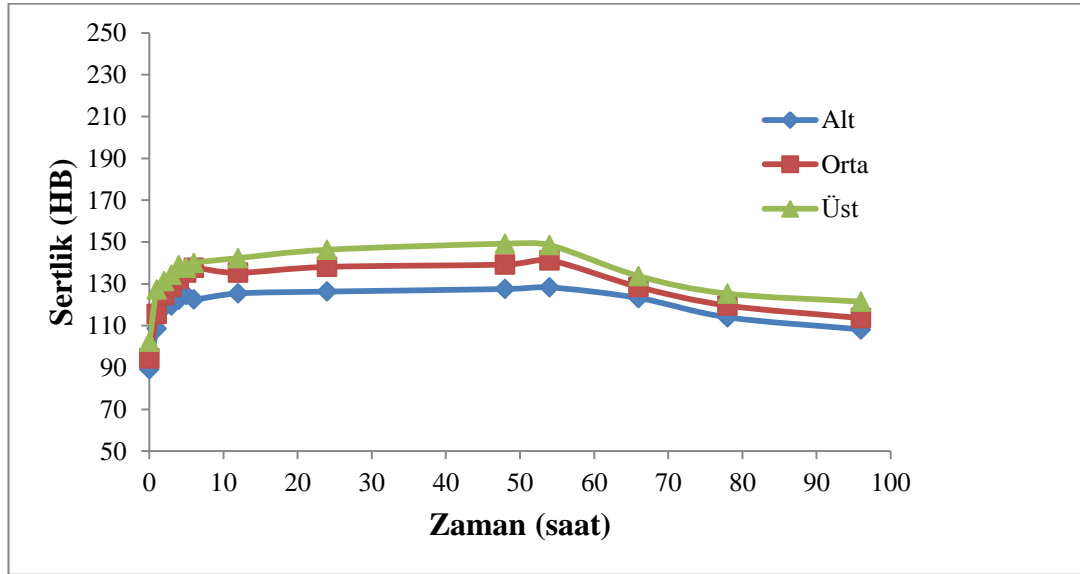


Şekil 3.18. Yüksek Al₂O₃ takviye oranına sahip İDM'nin 120 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

Yaşlandırmanın 48-96 saat aralığında, sertlikte önemli bir artış gerçekleşmemiş, sertlik eğrisi kararlı bir eğilim izlemiştir. En yüksek sertlik değeri %30 takviye oranına sahip katmanda elde edilmiştir ve sertlik değeri 48 saat sonunda 162 HB olarak ölçülmüştür. %30-15 takviye oranına sahip İDM'nin Şekil 3.18'de verilen yaşlandırma eğrisi incelendiğinde %30 takviyeye sahip katmanda en yüksek sertlik değeri 155 HB olarak elde edilmiştir. Artan takviye oranıyla birlikte sertlik değerinin arttığı sonucu elde edilmiştir.

3.2.9. Yüksek Al₂O₃ takviyeli İDM'nin 150 °C'de yaşlandırılması

Şekil 3.19'da %30-15 Al₂O₃ takviyesine sahip İDM'nin yaşlandırma eğrisi verilmiştir. 100 °C, 120 °C ve 150 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilen yaşlandırma işlemlerinde olduğu gibi su verme sonrası sertlik değerleri en düşük seviyede olup 0-2 saat aralığında belirgin artış göstermiştir.

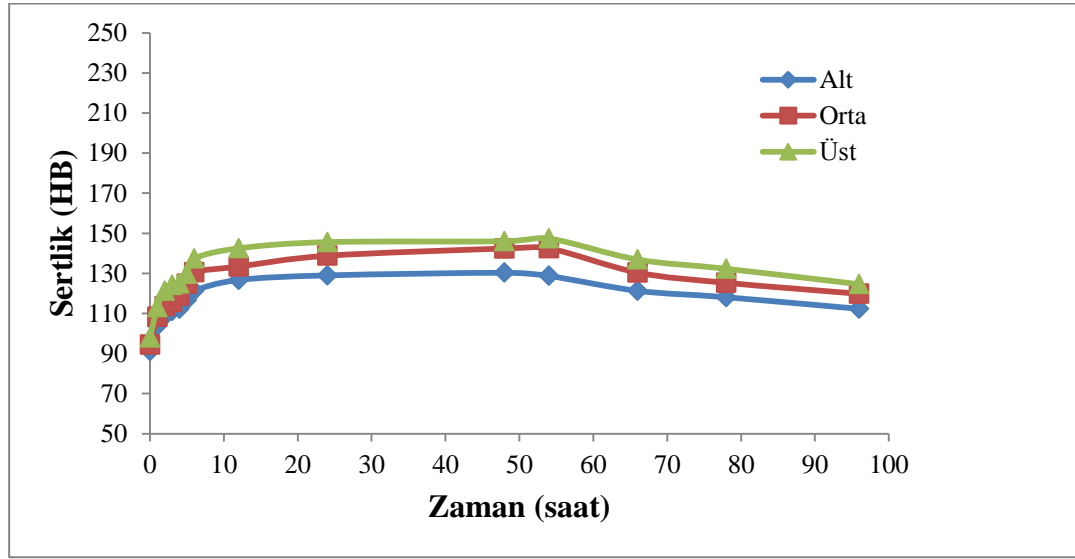


Şekil 3.19. Yüksek Al₂O₃ takviye oranına sahip İDM'nin 150 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

Sertlik artışı 24-48 saat aralığına kadar devam etmiş ve daha sonra 96 saate kadar devam edildiğinde sertlikte önemli miktarda düşüş gerçekleşmiştir. 96 saat sonundaki sertlik değerleri 108HB, 113HB, 121HB olarak elde edilmiştir. Al₂O₃ takviyesi tüm numunelerde ulaşılan sertlik seviyesini etkilemiş fakat genel yaşlanma karakteristiğini değiştirmemiştir.

3.2.10. Düşük Al₂O₃ takviyeli İDM'nin 100 °C'de yaşlandırılması

%20 ve %10 takviye oranına sahip İDM'ler 470 °C'de çözeltilmeye alma ve su verme işlemlerinin ardından 100 °C'de 96 saat süreyle yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma süresince belirli zaman aralıklarında malzemenin sertliği ölçülerek yaşlandırma işleminin zamana bağlı olarak sertliğe etkisi belirlenmiştir. Yaşlandırma boyunca sertliğin zamana bağlı değişimi Şekil 3.20'de görüldüğü gibidir.



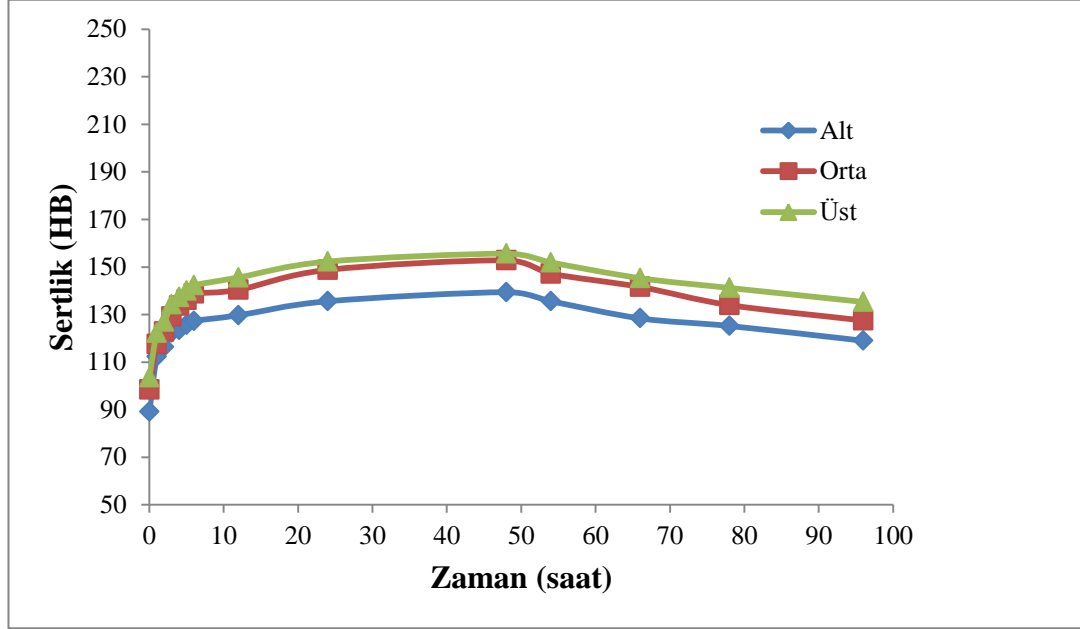
Şekil 3.20. Düşük Al₂O₃ takviye oranına sahip İDM'nin 100 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

Başlangıç koşulunda (çözeltilmeye alma işleminden sonra) alınan sertlik değerleri alt, orta ve üst katmanlar için sırasıyla, 91 HB, 94 HB ve 98 HB olarak tespit edilmiştir. Altı saate kadar her üç katmanda sertlikte gözle görülür bir artış gerçekleşmiş ve 48 saate kadar sertlik değerleri sürekli artış eğilimi göstermiş ve 48-96 saat aralığında sertlik değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Beklenildiği gibi en yüksek sertlik değerleri en yüksek takviye oranına sahip katmanda elde edilmiştir. Al₂O₃ takviyesi AA7075 ana yapısının genel yaşlanma karakteristiğini değiştirmemiştir.

3.2.11. Düşük Al₂O₃ takviyeli İDM'nin 120 °C'de yaşlandırılması

%20 ve %10 Al₂O₃ takviye oranına sahip İDM'nin 120 °C'de 96 saate kadar oluşturulan yaşlandırma eğrisi Şekil 3.21'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Elde edilen yaşlandırma eğrileri incelendiğinde sertlik değerlerinin artan takviye oranıyla

birlikte artış gösterdiği görülmüştür. Yaşlandırmanın tüm zamanlarında (0-96 saat aralığı) en yüksek sertlik değeri %20 takviye oranına sahip katmanda ve en düşük sertlik değeri ise Al₂O₃ takviyesine sahip olmayan AA7075 katmanında elde edilmiştir.



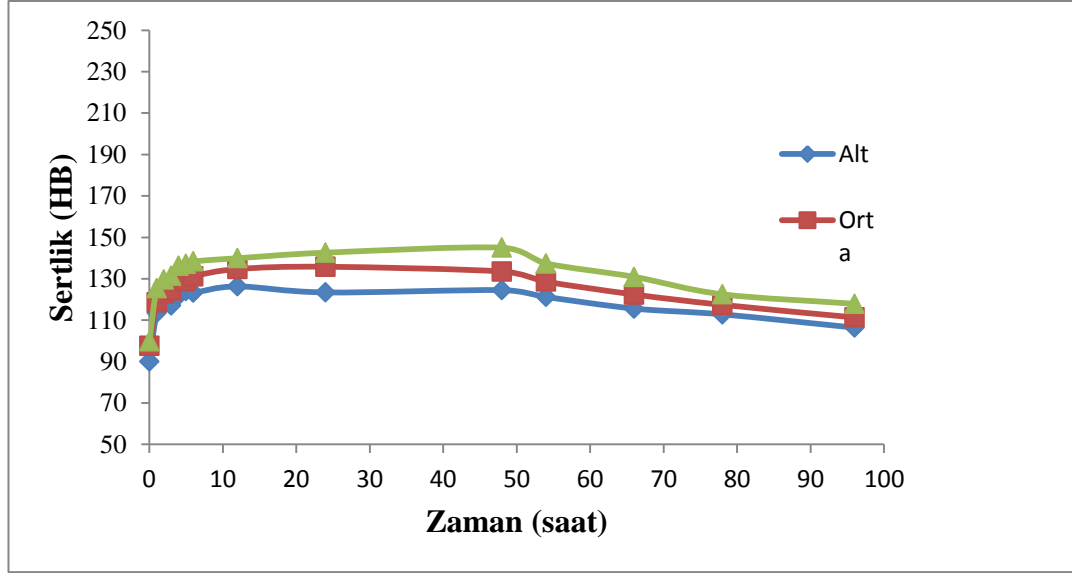
Şekil 3.21. Düşük Al₂O₃ takviye oranına sahip İDM'nin 120°C'deki sertlik-zaman eğrisi

En yüksek sertliğin elde edildiği 48 saatte AA7075, %10 ve %20 katmanlarda sırasıyla; 139 HB, 152 HB, 155 HB sertlik değerleri elde edilmiştir. Artan takviye oranıyla birlikte sertlik değerlerinde artış görülmüş fakat Al₂O₃ takviyesi ana yapının yaşlanma karakteristiğini değiştirmemiştir.

3.2.12. Düşük Al₂O₃ takviyeli İDM'nin 150 °C'de yaşlandırılması

Şekil 3.22'de %20-10 Al₂O₃ takviyeli İDM'nin 150 °C'de gerçekleştirilen yaşlandırmasında sertliğin zamana göre değişim eğrisi verilmiştir. 150°C'de 96 saate kadar yapılan yaşlandırma işleminde en yüksek sertlik değerine 100 °C ve 120 °C'de yaşlandırma işlemlerine göre nispeten daha çabuk ulaşıldığı görülmektedir. Fakat ulaşılan en yüksek sertlik değeri diğer yaşlandırma sıcaklıklarına göre daha düşüktür.

Düşük Al_2O_3 takviyeli İDM'nin yaşlandırmasında 100 °C ve 120 °C'de gerçekleştirilen yaşlandırma işleminde, takviyesiz AA7075 katmanında elde edilen en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 130 ve 139 HB olarak ölçülmüştür. 150 °C'de gerçekleştirilen yaşlandırma işleminde ise AA7075 katmanının en yüksek sertlik değeri 12 saat sonunda 126 HB olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.22. Düşük Al_2O_3 takviye oranına sahip İDM'nin 150 °C'deki sertlik-zaman eğrisi

İDM'lerde seramik takviyenin de alüminyum matrisin yaşlanma karakteri üzerine önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Takviyesiz olan katman ve takviyeli olan katmanların yaşlandırma işlemi süresince sertliği birbirine paralel olarak hareket etmektedir. Takviye oranları sadece ulaşılan en yüksek sertlik değerlerini etkilemektedir.

Beklenildiği gibi bütün numunelerde en yüksek sertlik değerleri takviye oranının en yüksek olduğu katmanlarda bulunmuştur. Takviye oranı arttıkça sertliğin de paralel şekilde yükseldiği grafiklerden görülmektedir. Aynı takviye oranına sahip SiC ve Al_2O_3 takviyeli numuneler kıyaslandığında ise SiC takviyeli İDM'nin sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun sebebi SiC parçacıklarının sertliğinin Al_2O_3 parçacıklarından daha yüksek olmasıdır.

Genel olarak 120 °C'de 48 ile 55 saat aralığında en yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığı anlaşılmıştır. 150 °C'de gerçekleştirilen yaşlandırma işlemlerinde ise

yaklaşık 12 saatte tüm numunelerde en yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Ancak bu sıcaklıkta elde edilen sertlik değerleri 120 °C’de elde edilen sertlik değerlerinden daha düşüktür. Artan sıcaklık yaşlandırma kinetiğini hızlandırmaktadır. Alt tabaka için 120 °C’de elde edilen sertlik değerleri literatürle uyumludur (Emani ve diğerleri, 2009, Sheu ve Lin, 1997). Emami ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada(Emami ve diğerleri, 2009), AA 7075 alaşımının 120 °C’de 48 saat boyunca gerçekleştirilen yapay yaşlandırmadan sonra en yüksek sertlik değerine ulaşıldığı belirtilmiştir (190 HV). Sertlik profilindeki değişim ve sertlik değerleri mevcut çalışma ile uyumludur (Emami ve diğerleri, 2009). Buna ek olarak Sheu ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada ise (Sheu ve Lin, 1997), toz metalurjisi ile üretilmiş AA 7075 alaşımında en yüksek sertlik değeri 170 HV olarak ve 120 °C’de 48 saat süresince yapılan yaşlandırma sonucu elde edildiği vurgulanmıştır.

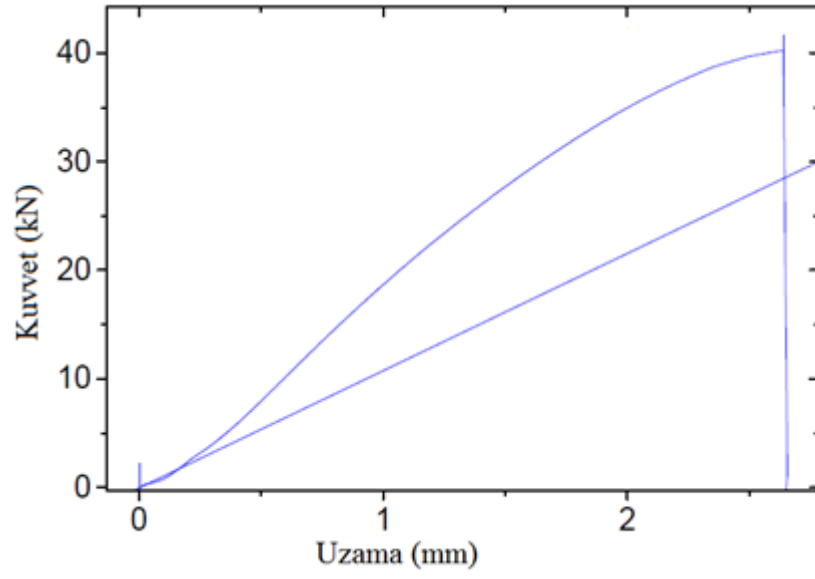
3.3. Üç Nokta Eğme Testleri

Üretilen SiC takviyeli İDM’lere mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Testler, ASTM B 528-05 (ASTM, 2005) standardına göre yapılmıştır. Numuneler 31,2 mm x 12,7 mm x 15 mm boyutlarında denenmiştir.

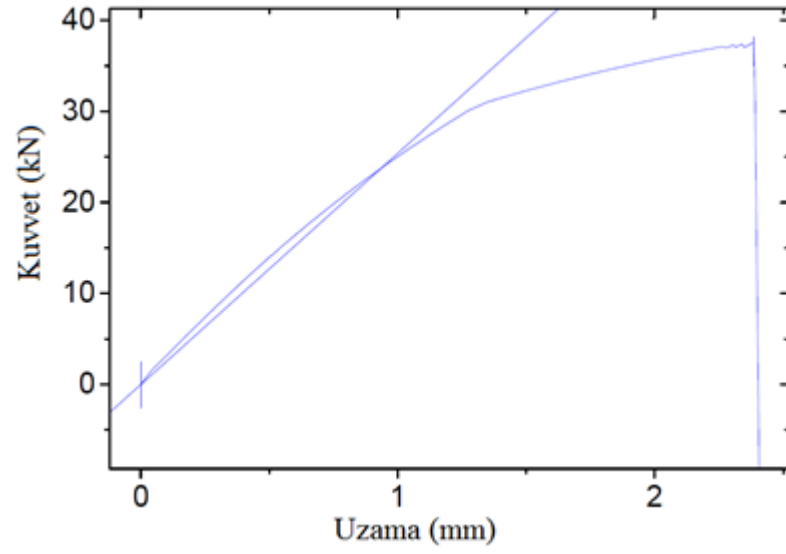
Test hem 120 °C’de en yüksek sertliğe sahip yaşlandırılmış numunelere hem de sadece çözültüye alınmış numunelere uygulanmıştır. Her bir malzeme grubundan üç adet numuneye test yapılmıştır. Testlerde yük takviye oranı yüksek olan katman üzerinden uygulanmıştır.

3.3.1. SiC takviyeli İDM’lere ait üç nokta eğme testi sonuçları

Şekil 3.23’de düşük SiC takviyeli numunelerden birine ait kuvvet-uzama grafiği verilmiştir. Şekil 3.24’de ise yüksek SiC takviyeli numuneye ait kuvvet-uzama grafiği görülmektedir. Tablo 3.6’da de yaşlandırma işlemi uygulanmayan numunelerin test sonuçları bulunmaktadır.



Şekil 3.23. Yaşlandırılmamış %20 ve %10 SiC takviyeli İDM'ye ait kuvvet-uzama eğrisi



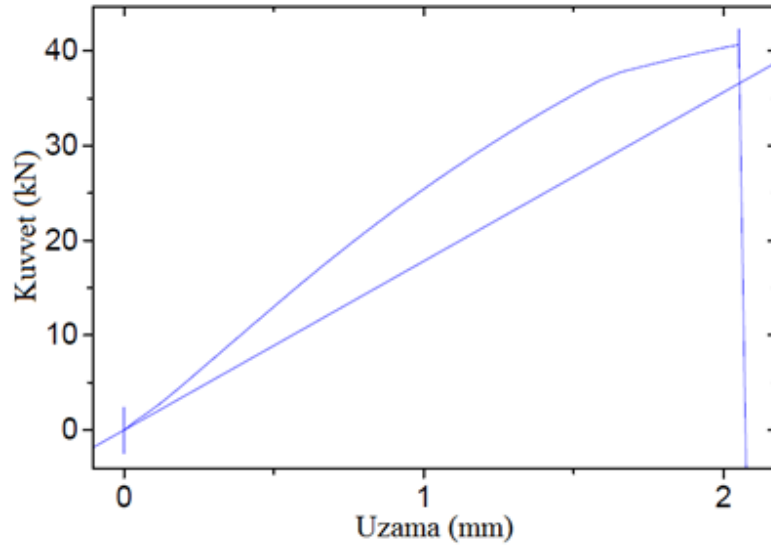
Şekil 3.24. Yaşlandırılmamış %40 ve %20 SiC takviyeli İDM'ye ait kuvvet-uzama eğrisi

Tablo 3.6. Yaşlandırılmamış SiC takviyeli İDM'lere ait üç nokta eğme testi sonuçları

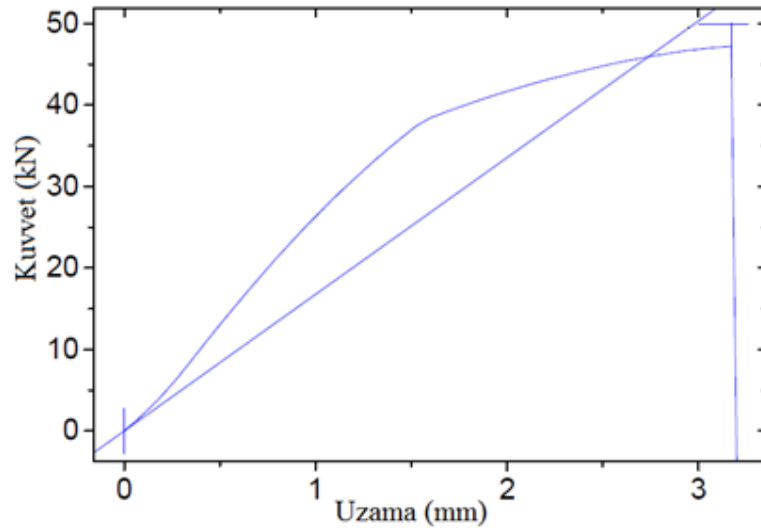
Düşük SiC Takviyeli	Yüksek SiC Takviyeli
491 MPa	450 MPa

%20 ve %10 SiC takviyeli İDM'lerin ortalama çapraz kırılma dayanımı 491 MPa olarak belirlenmiştir. %40 ve %20 SiC takviyeli İDM'lerin ortalama çapraz kırılma dayanımı ise 450 MPa olmuştur.

Yaşlandırılmış düşük SiC takviyeli numuneye ait kuvvet-uzama eğrisi Şekil 3.25'deki gibidir. Şekil 3.26'da ise yaşlandırılmış yüksek SiC takviyeli numunenin kuvvet-uzama eğrisi verilmiştir. Tablo 3.7'de yaşlandırılmış SiC takviyeli İDM'lerin üç nokta eğme testi sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.25. Yaşlandırılmış %20 ve %10 SiC takviyeli İDM'ye ait kuvvet-uzama eğrisi



Şekil 3.26. Yaşlandırılmış %40 ve %20 SiC takviyeli İDM'ye ait kuvvet-uzama eğrisi

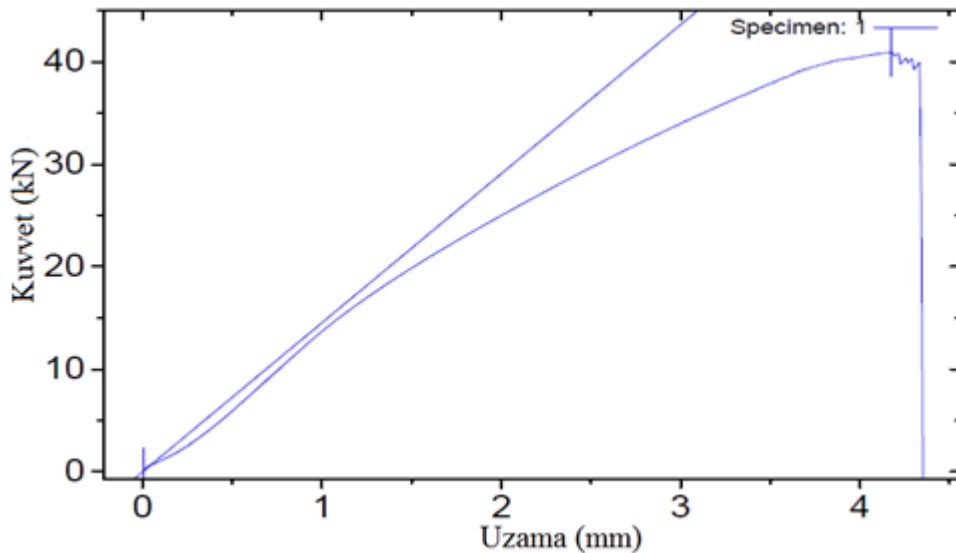
Tablo 3.7. Yaşlandırılmış SiC takviyeli İDM'lere ait üç nokta eğme testi sonuçları

Düşük SiC takviyeli	Yüksek SiC takviyeli
510 MPa	475 MPa

%20 ve %10 SiC takviyeli İDM'lerin ortalama çapraz kırılma dayanımı 510 MPa olarak belirlenmiştir. %40 ve %20 SiC takviyeli İDM'lerin ortalama çapraz kırılma dayanımı ise 475 MPa olmuştur. Üç nokta eğme testinden elde edilen sonuçlara göre artan takviye oranı, çapraz kırılma dayanımının düşük oranda düşmesine sebep olmaktadır. Bunun sebebi SiC takviyesinin ana yapıdan daha gevrek olmasıdır. Bu durum, numunenin eğilmeden gevrek bir şekilde kırılmasına neden olmaktadır. Böylelikle çapraz kırılma dayanımı azalmaktadır. Yaşlandırma işlemi ise takviye oranından farklı olarak çapraz kırılma dayanımını arttırmaktadır. Yaşlandırma işlemi ile birlikte ana yapının sertliği arttığı için uygulanan yüklere daha büyük oranda bir direnç oluşmaktadır.

3.3.2. Al₂O₃ takviyeli İDM'lere ait üç nokta eğme testi sonuçları

Yaşlandırılmamış ve düşük Al₂O₃ takviye oranına sahip İDM'ye ait kuvvet- yer değiştirme grafiği Şekil 3.27'de görüldüğü gibidir.



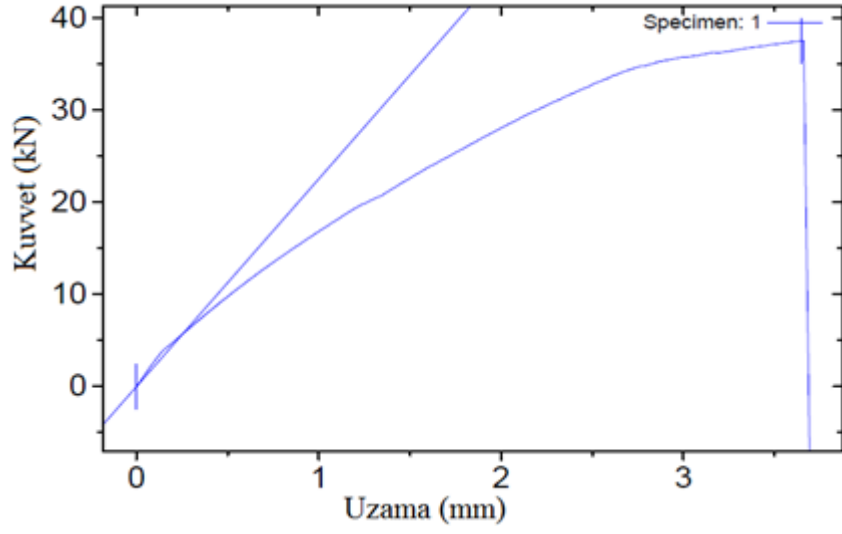
Şekil 3.27. Yaşlandırılmamış %20-10 Al₂O₃ takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği

Üç nokta eğme deneyi sonrası numunenin görünümü Şekil 3.28’de görüldüğü gibidir. Test sırasında yük en yüksek takviye oranına sahip katmandan (%20) uygulanmıştır. Kırılma yükün uygulandığı eksene paralel şekilde gerçekleşmiştir ve katmanlar arasında herhangi bir ayrışma gözlemlenmemiştir. Bu numune grubu için elde edilen en yüksek ortalama eğme dayanımı 432 MPa olarak belirlenmiştir.

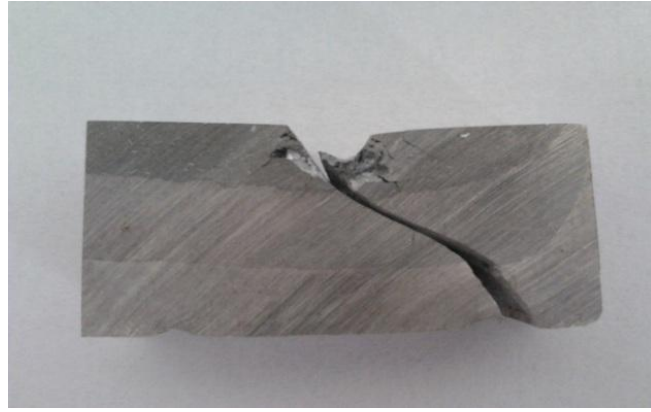


Şekil 3.28. Yaşlandırılmamış düşük Al_2O_3 takviyeli İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü

Yaşlandırılmamış yüksek Al_2O_3 takviyesine sahip numunenin üç nokta testi sırasında elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 3.29’da görüldüğü gibidir. Bu malzeme grubu için ortalama en yüksek eğilme dayanımı 426 MPa olarak belirlenmiştir. Şekil 3.30’da malzemenin kırılma sonrası görünümü verilmiştir. Numune basma yönüne paralel bir kırılma davranışı göstermiş ve katmanlar arasında herhangi bir ayrışma olmamıştır. Kuvvetin uygulandığı bölgede bir miktar gevrek kırılma gerçekleşmiştir. Artan takviye oranıyla birlikte malzemenin tokluğu azalmış ve %30-15 takviyeli numunenin üç nokta eğme dayanımı %20-10 takviyeli numuneye göre daha düşük olarak elde edilmiştir.

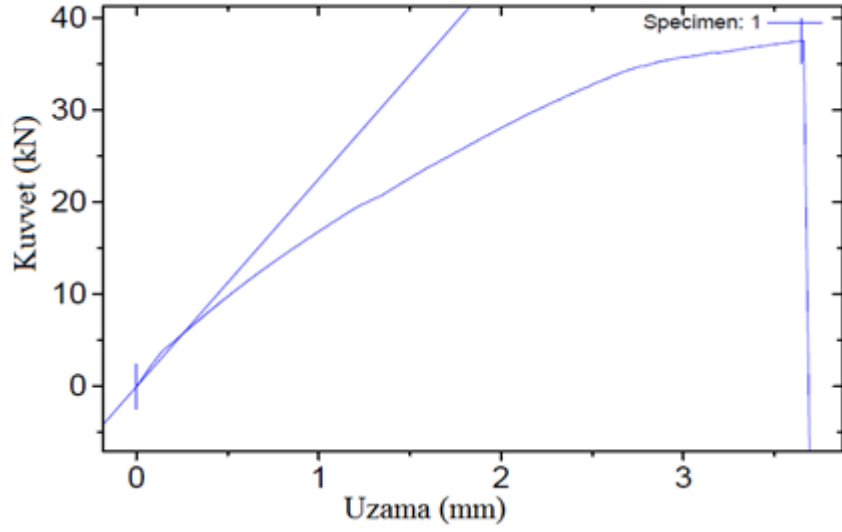


Şekil 3.29. Yaşlandırılmamış %30-15 Al_2O_3 takviyeli İDM'ye ait kuvvet-yer değiştirme grafiği



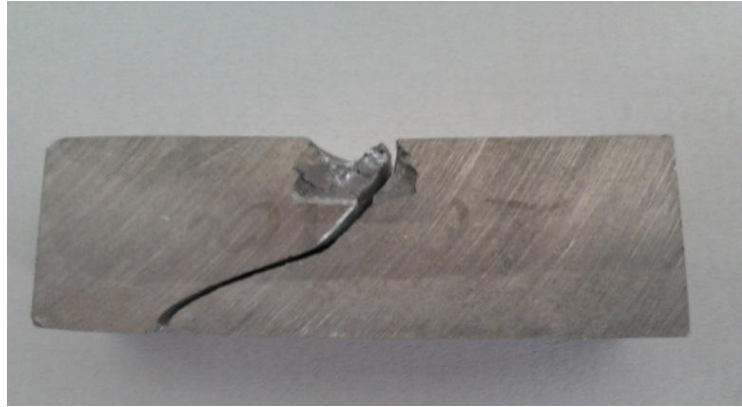
Şekil 3.30. Yaşlandırılmamış yüksek Al_2O_3 takviyeli İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü

Yaşlandırılmış düşük Al_2O_3 takviyesine sahip numunenin üç nokta testi sırasında elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 3.31'de görüldüğü gibidir.



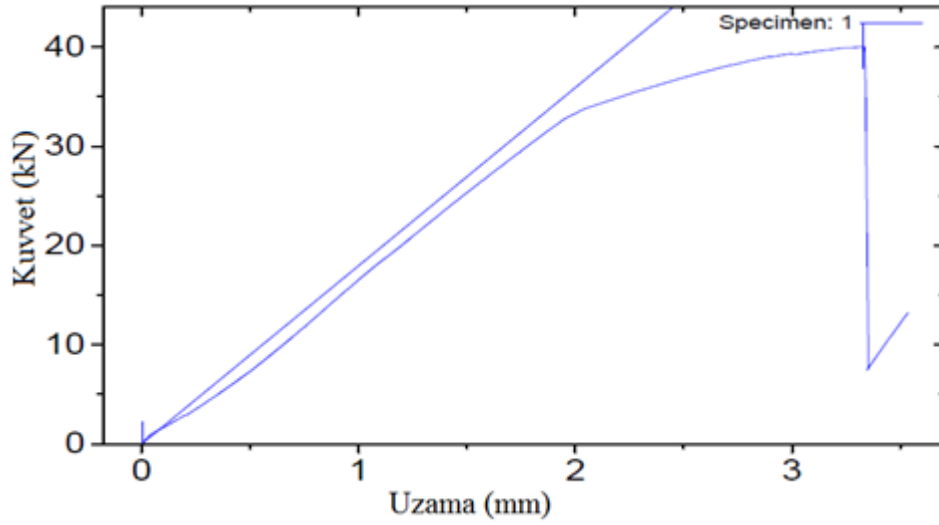
Şekil 3.31. Yaşlandırılmış düşük Al_2O_3 takviyeli İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü

Yaşlandırılmış düşük Al_2O_3 takviyeli numunenin en yüksek ortalama eğilme dayanımı 459 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 3.32'de malzemenin üç nokta eğme deneyi sonrası görüntüsü verilmiştir. Deney sonrası görüntü incelendiğinde malzemenin basma yönüne paralel olarak kırıldığı ve katmanlar arasında herhangi bir ayrışmanın olmadığı görülmektedir. Bu durum malzemeye uygulanan sinterleme işleminin düzgün bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 3.32. Yaşlandırılmış düşük Al_2O_3 takviyeli İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü

Yaşlandırılmış %30-15 Al_2O_3 takviyesine sahip numunenin üç nokta eğme testi sırasında elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 3.33'de verilmiştir.



Şekil 3.33. Yaşlandırılmış yüksek Al_2O_3 takviyeli İDM'nin üç nokta eğme testi sonrası görünümü

Deney sonucunda malzemenin üç nokta eğme deneyi sonrası elde edilen ortalama en yüksek eğme dayanımı 400 MPa olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.8'de düşük ve yüksek takviyeli İDM'lerin iki farklı ısıl işlem koşulunda ortalama en yüksek üç nokta eğme deneyi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek eğme dayanımı düşük takviyeli İDM'nin yaşlandırılmış koşulunda elde edilmiştir. %30-15 takviye numuneler kendi içerisinde incelendiğinde yaşlandırılmış koşulda İDM'nin eğilme dayanımının azaldığı görülmüştür.

Tablo 3.8. Al_2O_3 takviyeli İDM'lerin ortalama en yüksek eğilme dayanımları

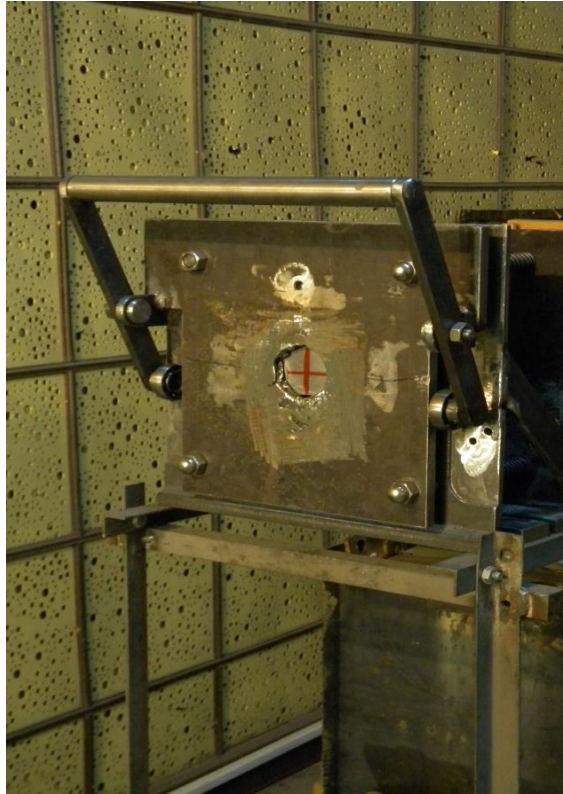
	Düşük Al_2O_3 takviyeli	Yüksek Al_2O_3 takviyeli
Yaşlandırılmış	460 MPa	400 MPa
Yaşlandırılmamış	431 MPa	426 MPa

3.4. Balistik Atış Testleri

Çalışma kapsamında 72 adet İDM balistik teste tabi tutulmuştur. Her bir kalınlıktan (15 mm, 20 mm ve 25 mm), 6 adet numune test edilmiştir. Üretilen İDM'ler balistik testlerde başarısız olmuştur.

İDM'lerin haricinde toplamda 9 adet $Al_2O_3/AA7075$ katmanlı numune üretilip balistik olarak test edilmiştir. Bu numunelerden ise 7 mm AA7075 katmanlı olan numuneler başarısız olurken, 10mm ve 13 mm kalınlıktaki AA7075 ile desteklenen numuneler mermiyi durdurmayı başarmışlardır.

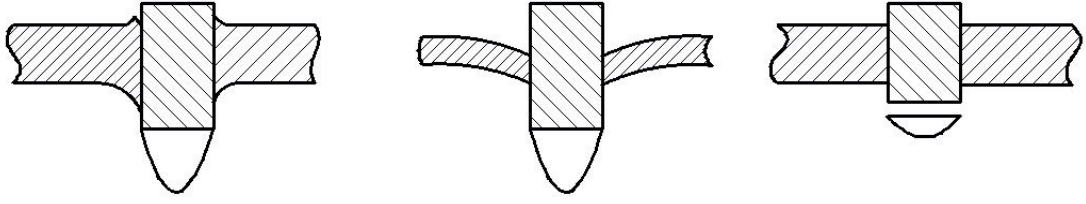
Test numuneleri düzeneğe Şekil 3.34'de görüldüğü gibi bağlanmış ve atışlar 7,62 mm'lik zırh delici mermilerle ortalama 780 m/s hızla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.34. Numunenin bağlandığı hedef düzeneğin görünümü

3.4.1. Balistik deney sonrası numunelerin makro incelenmesi

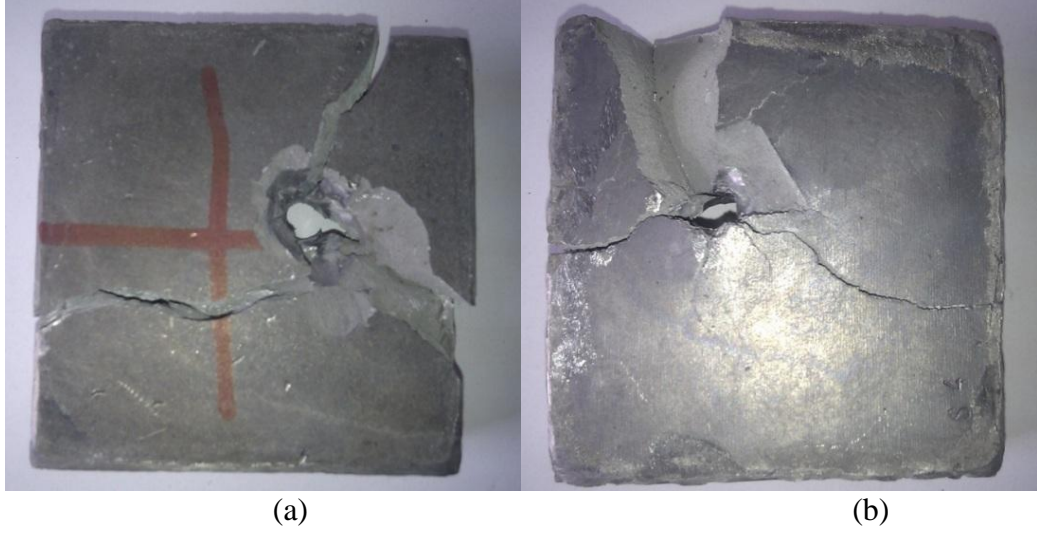
Balistik test sonrasında mermi çarpması esnasında oluşan hasar türleri malzeme türüne ve mekanik özelliklerine bağlı olduğu kadar mermi şekli ve hızı ile de ilgilidir (Zukas ve diğerleri, 1982, Backman ve Goldsmith, 1978, Woodward, 1977). Metal zırh malzemelerinde genel olarak 3 farklı hasar çeşidi görülmektedir. Bu hasar çeşitleri; sünek delinme, çukur tipi delinme ve zimba etkisiyle delinme olarak söylenebilir (Woodward, 1977). Woodward'ın öne sürdüğü hasar mekanizmaları (Woodward, 1977) Şekil 3.35'de görülmektedir.



Şekil 3.35. Metallerde görülen hasar mekanizmaları (a) Sünek Delinme (b) Çukur tipi delinme (c) Zımba etkisiyle delinme (Woodward, 1977)

Seramiklerde oluşan hasar mekanizmaları ise radyal çatlak oluşumu, konik yapı oluşumu ve kırılma şeklinde gözlemlenmektedir (Wilkins, 1978, Hetherington, 1992, Sadanandan ve Hetherington, 1997, Übeyli ve diğerleri, 2007;2008, Shockey ve diğerleri, 1990a;1990b, Curran ve diğerleri, 1993, Roeder ve Sun, 2001, Sherman ve Brandon, 1997, Zaera ve diğerleri, 2000, Sherman ve Ben-Shushan, 1998, Kaufmann ve diğerleri, 2003, Florence, 1969, Woodward, 1990, Den Reijer, 1991, Zaera ve Sanchez, 1998, Lee ve Yoo, 2001, Abrate, 2001, Espinosa ve diğerleri, 1998, Forquin ve diğerleri). Seramik katmanın parçalanmasından sonra metal katmanda mekanik özelliklerine bağlı olarak; sünek delik oluşumu (ductile hole formation), zımba etkisiyle delinme (plugging) veya gevrek kırılma (brittle fracture) oluşabilir (Wilkins, 1978, Hetherington, 1992, Sadanandan ve Hetherington, 1997, Übeyli ve diğerleri, 2007;2008, Shockey ve diğerleri, 1990a;1990b, Curran ve diğerleri, 1993, Roeder ve Sun, 2001, Sherman ve Brandon, 1997, Zaera ve diğerleri, 2000, Sherman ve Ben-Shushan, 1998, Kaufmann ve diğerleri, 2003, Florence, 1969, Woodward, 1990, Den Reijer, 1991, Zaera ve Sanchez, 1998, Lee ve Yoo, 2001, Abrate, 2001, Espinosa ve diğerleri, 1998, Demir, 2008b).

Şekil 3.36'da yüksek SiC takviyeli 25 mm kalınlığındaki İDM'nin balistik test sonrası görüntüsü verilmiştir. Mermi geçerken numuneyi üç parçaya ayırmıştır. Numunede kırılma çatlak oluşumuna bağlı olarak gerçekleşmiştir. Katmanlarda ayrışma görülmemiştir.



Şekil 3.36. %40 ve %20 SiC takviyeli 25 mm kalınlıktaki numunenin balistik atış sonrasındaki görüntüsü: a) Mermi girişi, b) Mermi çıkışı

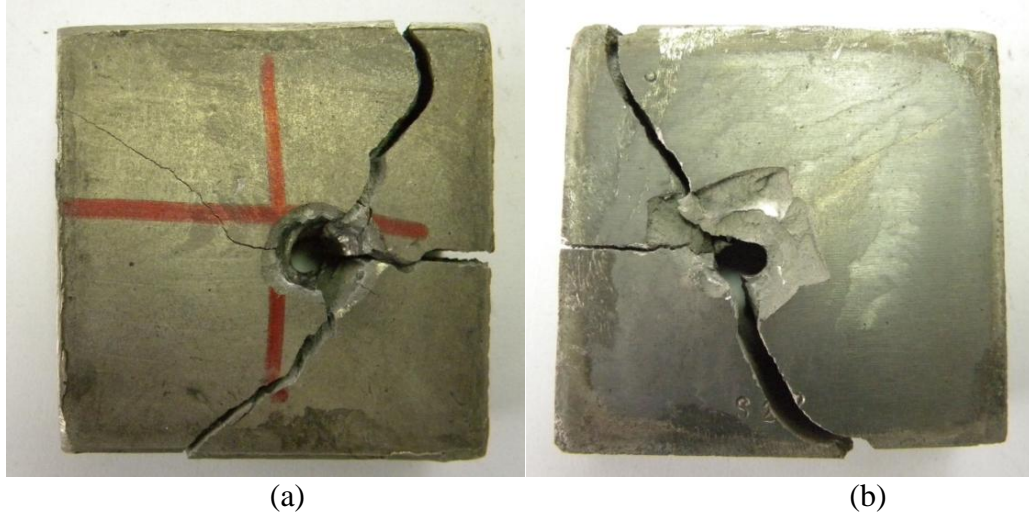
Şekil 3.37’de ise oluşan deliğin kesit görüntüsü gösterilmiştir. Merminin çıkarken yönünün önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir. Bu da numunenin merminin geçişini zorladığının bir göstergesidir. Numunede gevrek delik oluşumu gerçekleşmiştir.



Şekil 3.37. Yüksek SiC takviyeli numunenin kesit görüntüsü

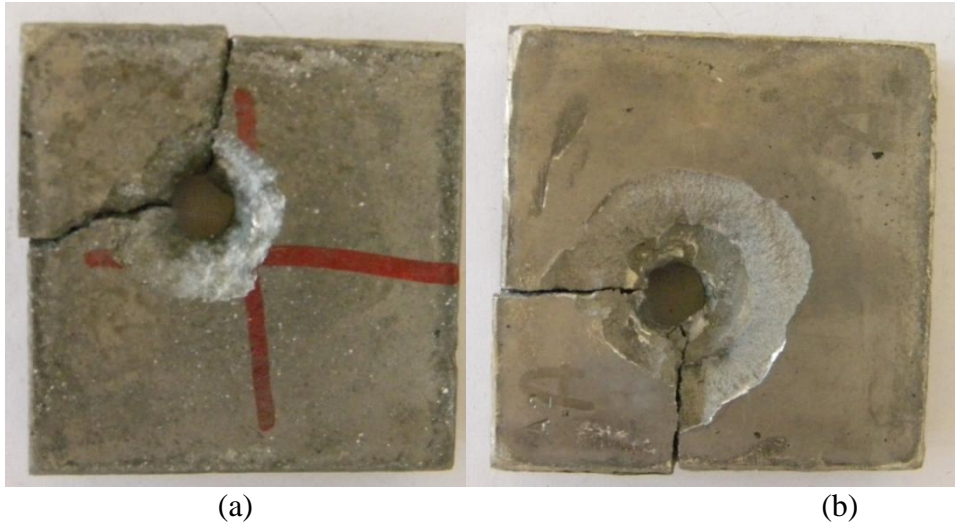
Şekil 3.38’de düşük SiC takviyeli 25 mm kalınlığındaki İDM’nin balistik test sonrası görüntüsü verilmiştir. Numune atış sonrasında üç parçaya ayrılmıştır.

Numunede kırılma çatlak oluşumuna bağlı olarak gerçekleşmiştir. Katmanlarda ayrışma görülmemiştir.



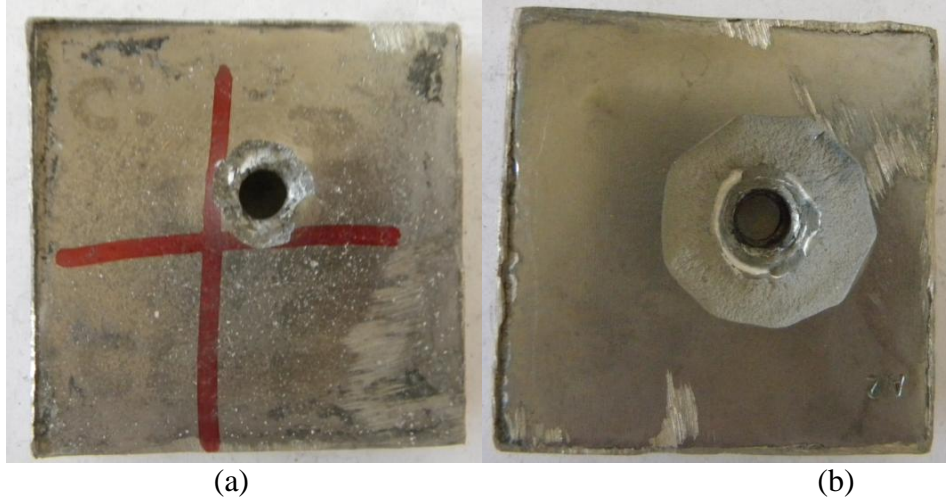
Şekil 3.38. %20 ve %10 SiC takviyeli 25 mm kalınlıktaki numunenin balistik atış sonrası görüntüsü: a) Mermi girişi, b) Mermi çıkışı

Düşük Al_2O_3 takviyeli 20 mm kalınlığındaki numunelerden birinin balistik atış testi sonrası makro görüntüsü Şekil 3.39'da verilmiştir. Mermi üst katmandan ve alt katmandan malzeme kopmasına sebep olmuştur. Merminin girişte açtığı deliğin çapı çıkıştaki deliğin çapından küçüktür. Atış sonrasında numune iki parçaya ayrılmıştır. Katmanlarda ayrışma görülmemiştir.



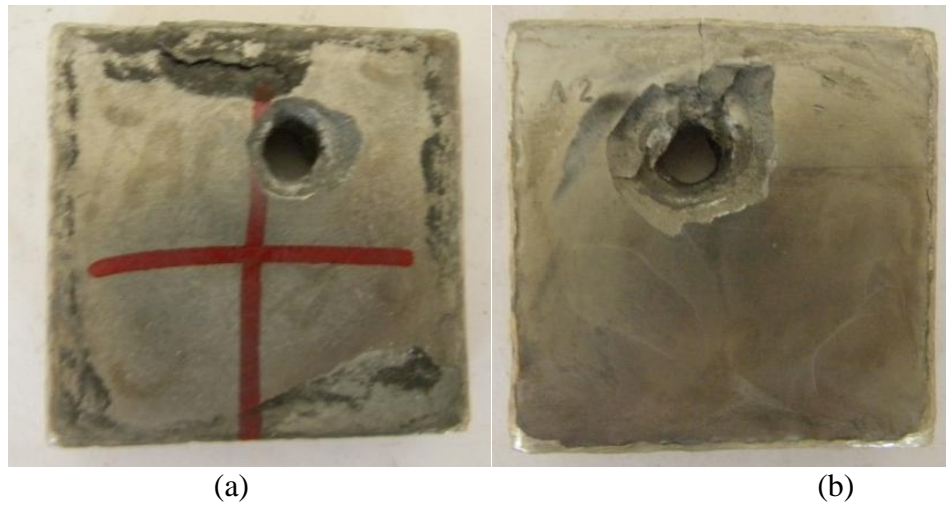
Şekil 3.39. %20 ve %10 Al_2O_3 takviyeli 20 mm kalınlıktaki numunenin balistik atış sonrası görüntüsü: a) Mermi girişi, b) Mermi çıkışı

Yüksek Al_2O_3 takviyeli 15 mm kalınlığa sahip İDM'nin balistik atış testi sonrası makro boyuttaki görüntüsü Şekil 3.40'da görüldüğü gibidir. Takviye oranını artışı, merminin geçişini zorlaştırmıştır. Numune delinmiş, ancak parçalara ayrılmamıştır. Merminin açtığı delik çapı ise düşük takviye oranlı numuneye göre daha küçüktür. Küçük miktarda parça kopması olmuştur. Katmanlarda bir ayrışma olmamıştır.



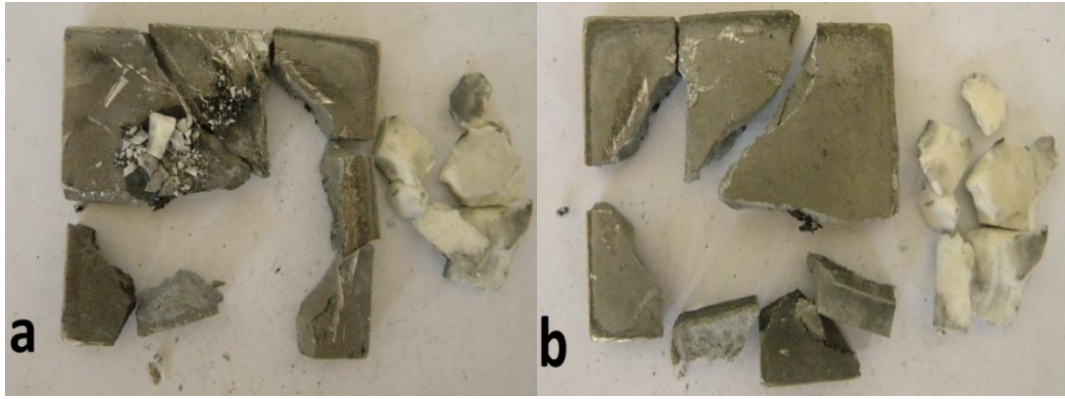
Şekil 3.40. %30 ve %15 Al_2O_3 takviyeli ve 15 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a) mermi girişi b) mermi çıkışı

Şekil 3.41'de düşük Al_2O_3 takviyeli 15 mm kalınlığındaki numunelerden birinin balistik atış testi sonrası görüntüsü verilmiştir. Numune delinmiş, radyal çatlaklar oluşmaya başlamış ancak kırılma gerçekleşmemiştir. Mermi girişinde ve çıkışında numunede parça kopması görülmüştür. Katmanlarda ayrışma meydana gelmemiştir.



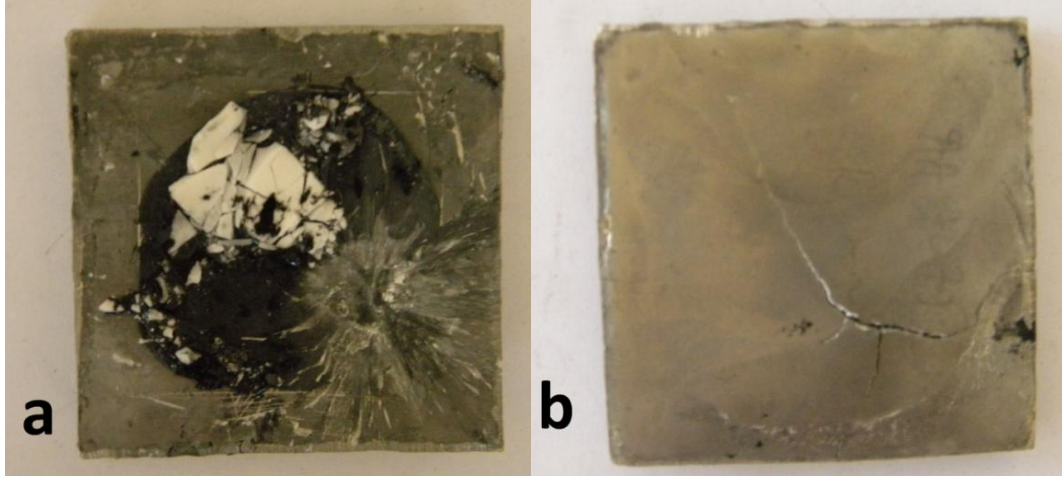
Şekil 3.41. %20 ve %10 Al_2O_3 takviyeli ve 15 mm kalınlıktaki İDM'nin balistik atış sonrası görüntüsü a) mermi girişi b) mermi çıkışı

Üretilen katmanlı kompozitlerde üst katmanda 10 mm'lik Al_2O_3 seramikleri, alt katmanda ise farklı kalınlıklarda AA7075 katmanı kullanılmıştır. Kalınlıklar, İDM'ler ile eşdeğer alan yoğunluklarına karşılık gelecek şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3.42'de 7 mm AA7075 katman kalınlığına sahip kompozit malzemenin balistik test sonrası görüntüsü verilmiştir. Merminin ilk temas ettiği ön seramik katman beklendiği gibi test sonrasında parçalanmıştır ve alt katman merminin kalan enerjisini sönmlemede başarılı olamamış ve sonuçta numune başarısız olmuştur.



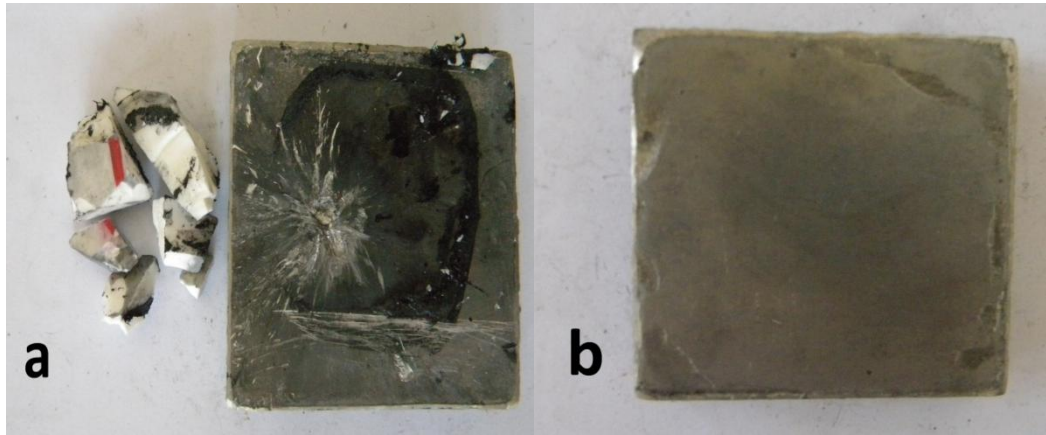
Şekil 3.42. Al_2O_3 (10 mm)/AA7075 (7 mm) katmanlı kompozitin balistik atış sonrası makro görüntüsü a) ön yüzü b) arka yüzü

Şekil 3.43'de 10 mm kalınlığında arka katmana sahip Al_2O_3 /AA7075 katmanlı kompozitin balistik test sonrası makro görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde üstteki seramik katmanın parçalandığı ve alttaki AA7075 katmanının merminin kalan enerjisini sönmlediği ve balistik korumayı sağladığı görülmektedir. AA7075 arka yüzeyi incelendiğinde merminin temas ettiği bölgeden bir çatlak oluşumu başladığı görülmektedir fakat alt katman bütüncül yapısını korumuş ve parçalanmamıştır. 10 mm AA7075 ve 10 mm Al_2O_3 katmanı olmak üzere toplam 20 mm'de katmanlı kompozit tam balistik başarımı sağlamıştır.



Şekil 3.43. Al_2O_3 (10 mm) -AA7075 (10 mm) katmanlı kompozitinin balistik atış sonrası makro görüntüsü a) ön yüzü b) arka yüzü

Şekil 3.44'de 13 mm AA7075 katman kalınlığına sahip Al_2O_3 -AA7075 katmanlı kompozitinin balistik test sonrası makro görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde üst katmandaki Al_2O_3 katmanının parçalandığı, alttaki AA7075 katmanının ise bütüncül yapısını koruduğu gözlemlenmiştir. Darbe sonrasında AA7075 katmanı üzerinde herhangi bir çatlak oluşumu söz konusu değildir ve Al_2O_3 -AA7075 katmanlı kompoziti toplamda 23 mm'de (10 mm Al_2O_3 + 13 mm AA7075) tam olarak balistik korumayı sağlamıştır.



Şekil 3.44. Al_2O_3 (10 mm) -AA7075 (13 mm) katmanlı kompozitinin balistik atış sonrası makro görüntüsü a) ön yüzü b) arka yüzü

Test edilen numuneler seramik takviyeli olduğundan, numunelerde genel olarak sünek delik oluşumu gözlemlenmemiştir. Numunelerde zımba etkisiyle delinmeye

benzer hasar görülmüştür. Kırılmalar; radyal çatlak oluşumu veya merminin parça numuneden parçalar kopmasına bağlı olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 3.36 ve 3.37’de verilen yüksek SiC takviyeli İDM’nin görüntüsü incelendiğinde, radyal çatlak oluşumu görülmektedir. Bu numunede üç adet çatlak oluşmuştur. Mermi, numunede konik bir delik oluşturmuştur. Bu da gevrek delik oluşumuna işaret etmektedir. Bu numunede takviye oranı oldukça fazla olduğundan, katmanlarda herhangi bir yönelim gerçekleşmemiştir.

Al₂O₃ takviyeli numunelerde gerçekleşen hasar diğer İDM numunelerine kıyasla daha karışık bir yapıdadır. Şekil 3.39’da görülen atış sonrası görüntüde, radyal çatlaklar görülmektedir. Radyal çatlaklar gevrek kırılmanın en önemli işaretlerinden biridir. Yine zımba etkisi ile delinmeye benzer bir hasar gerçekleşmiştir.

Katmanlı kompozitlerde ise mermi malzemeye çarptığında, ön katman olan Al₂O₃ katmanı parçalanmıştır ve özellikle merminin çarpma bölgesinde seramik tozlaşması ve çok küçük parçalara ayrılma gerçekleşmiştir. Seramik katmanın parçalanmasında sonra AA 7075 katmanının sünek olarak kırılması bekleniyordu. Özellikle Woodward’ın (Woodward, 1977) gözlemlediği çukur tipi delinme, bu malzeme çeşidi için uygun bir hasar tipidir. Ancak numune beklenmeyen bir şekilde parçalara ayrılmıştır. Bunun nedeni olarak numunede yer alan gözeneklerin çarpma esnasında çatlak oluşumu ve ilerlemesini sağlaması düşünülebilir. Bu durum gevrek bir kırılma şeklidir. Şekil 3.42’de verilen katmanlı numune bu duruma güzel bir örnektir.

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 artışına bağlı olarak sinterleme işleminin zorlaşacağı ve üretimi tamamlanan malzeme içerisindeki gözeneklerin, yüksek gerilme konsantrasyonları oluşturarak gevrek bir kırılmaya neden olacağı yapılan testlerden anlaşılmıştır.

İDM numunelerinde seramik takviyeli kompozit katmanların bulunması mermi çarpması anında deformasyon şeklini etkilemektedir. Her ne kadar numunelerin orta ve üst katmanlarındaki sertlik artışı sağlanmış olsa da, bu durum malzemenin sünekliğini azaltmakta ve çatlak oluşumunu kolaylaştırmaktadır. Buna ek olarak, alüminyum alaşımı içinde yer alan seramik parçacıkların mermiyi etkin bir şekilde aşındıramadığı ve numunelerin balistik etkinliğini artıramadığı sonucuna varılmıştır.

Al₂O₃ /AA7075 katmanlı numunelerde ise AA7075 katmanının kalınlığındaki artışın malzemenin balistik başarımını artırdığı görülmüştür. Test edilen katmanlı kompozitlerin seramik takviyeli İDM'lere göre balistik testlerde daha başarılı olduğu ve test edilen 3 alan yoğunluğunun ikisinde tam koruma sağladığı gözlemlenmiştir. Elde edilen deneysel bulgular ışığı altında Al₂O₃ /AA7075 katmanlı kompozitinin yaklaşık 65 kg/m² alan yoğunluğunda tam balistik koruma sağladığı belirlenmiştir.

Test edilen İDM'lerin balistik başarımları alümina/4340 çeliği (Demir ve diğerleri, 2009a) ve alümina/alüminyum katmanlı kompozitlerine (Übeyli ve diğerleri, 2008) kıyasla da çok daha düşük bulunmuştur. Bu katmanlı kompozitlerin sırasıyla 55 ve 66 kg/m² alan yoğunluklarında 7.62 mm zırh delici mermiyi başarıyla durdurdukları tespit edilmişti. İDM'lerin aynı balistik başarımı sağlaması için kalınlıklarının daha fazla olması gerektiği sonucuna varılmıştır. İDM'lerin hasara uğramasındaki ana nedenlerden birisi seramiklere oranla mermiyi aşındırma ve parçalamadaki etkinliklerinin daha düşük olması (daha düşük sertliklere sahip olmalarından dolayı) şeklindedir.

İkinci bir neden olarak seramik/metal katmanlı kompozitlerinin balistik darbe dayancı, mermi çarpması esnasında ön seramik katmanda oluşan konik yapıdan dolayı artmaktadır. Çünkü bu yapı merminin kinetik enerjisini daha geniş bir alana yaymaktadır (Wilkins, 1978, Hetherington, 1992, Sadanandan ve Hetherington, 1997, Shockey ve diğerleri, 1990, Shockey ve diğerleri, 1990, Curran ve diğerleri, 1993). Balistik atışlardan sonra İDM numunelerinde konik bir yapı oluşumu gözlemlenememiştir. İDM'lerdeki kompozit katmanların mermi ilerlemesine karşı

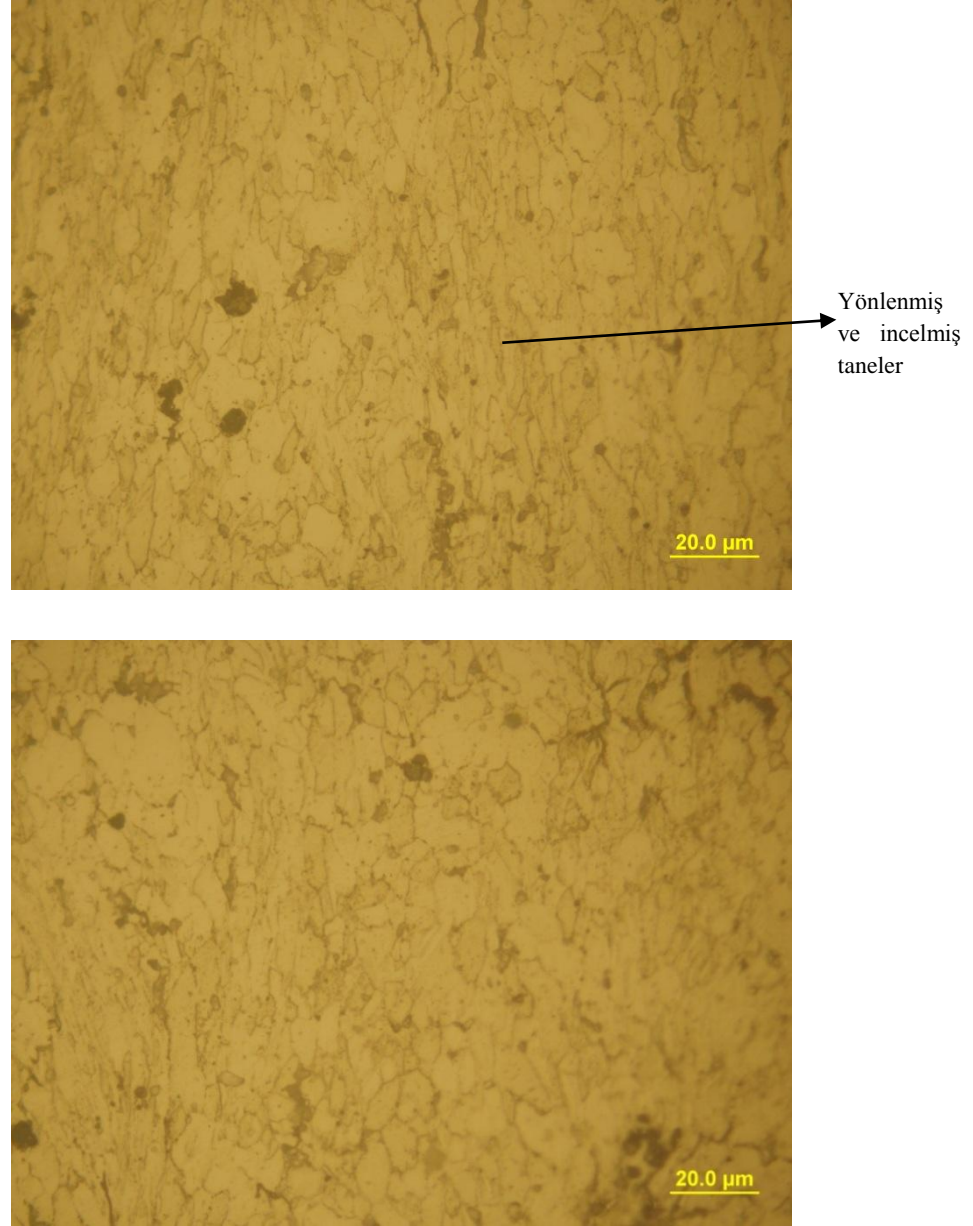
kuvvetli ve sert bir engel oluşturamadığı ve malzemenin gevrek şekilde kırılmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.

3.4.2. Balistik deney sonrası numunelerin makro incelenmesi

Balistik sonrası numunelerin özellikle merminin geçtiği bölgede (deliğin hemen yanındaki bölgelerde) içyapıları incelenmiştir. Merminin numune kalınlığı boyunca hareketi ve ilerlemesi neticesinde tanelerde yönlenme, incelme ve şekil değişimi (deformasyon) gözlemlenmiştir. Bu değişimler deliğe yakın bölgelerde gözlemlenirken, delikten uzaklaştıkça bu deformasyonun ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, numunelerde merminin çarpması esnasında mikro çatlaklar, dallı çatlaklar da oluşmuştur. Bazı numunelere ait balistik sonrası içyapı resimleri Şekil 3.45 – 3.48 arasında verilmiştir.

Yüksek gerinim hızlarında gerçekleşen deformasyonlar malzeme içyapısında birtakım değişikliklere yol açmaktadır (Dormeval, 1987, Wright, 2002, Aeberli ve Pratt, 1985, Rogers, 1979, Manganello ve Abbott, 1972, Zener ve Hollomon, 1944, Derep, 1987, Übeyli ve diğerleri, 2010, Übeyli ve diğerleri, 2009, Demir ve Übeyli, 2011, Übeyli ve diğerleri 2011). Özellikle balistik testlerde yüksek hızlara sahip mermilerin malzeme ile çarpışması esnasında iki farklı bant oluşumu gözlemlenmekte olup bunlar genel olarak adyabatik kayma bantları olarak adlandırılmaktadır (Dormeval, 1987, Wright, 2002, Aeberli ve Pratt, 1985, Rogers, 1979, Manganello ve Abbott, 1972, Zener ve Hollomon, 1944, Derep, 1987). Bu bantlar şekil değiştirmiş bant (deformed band) ve dönüşmüş bant (transformed band) olarak adlandırılmaktadır (Dormeval, 1987, Wright, 2002, Aeberli ve Pratt, 1985, Rogers, 1979, Manganello ve Abbott, 1972, Zener ve Hollomon, 1944, Derep). Adyabatik kayma bantları yüksek hızlı deformasyon sonucu bölgesel oluşan ısının malzeme tarafından atılamaması ve sonuç olarak tanelerin boyutlarında incelme, yönlenme ve yeniden kristalleşmenin yanı sıra içyapısında da değişimlere yol açabilir (Dormeval, 1987, Wright, 2002, Aeberli ve Pratt, 1985, Rogers, 1979, Manganello ve Abbott, 1972, Zener ve Hollomon, 1944, Derep, 1987). Şekil değiştirmiş bant yapısında kimyasal olarak bir değişiklik ve/veya faz değişimi gözlemlenmemektedir. Bu tür bant yapısında tanelerin yönlenmesi,

incelmesi ve şekillerinde değişiklik gözlemlenir (Dormeval, 1987, Wright, 2002, Aeberli ve Pratt, 1985, Rogers, 1979).

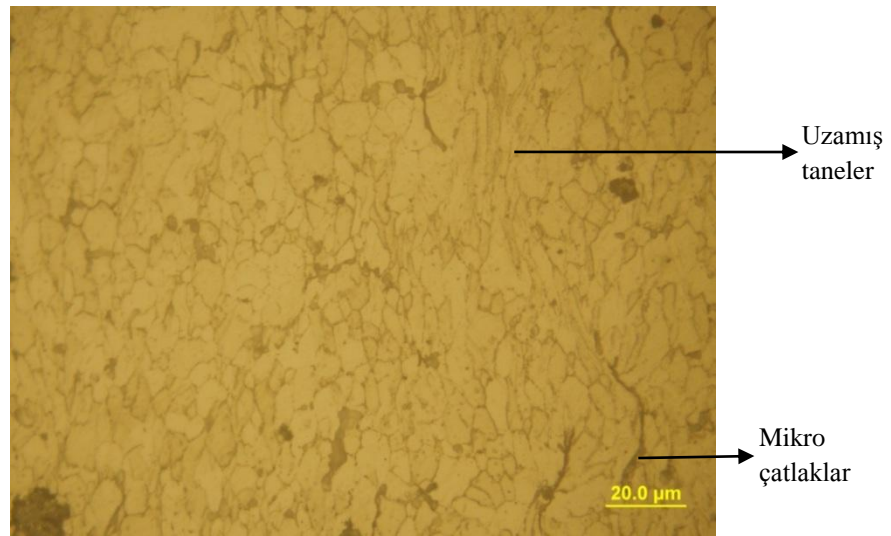


Şekil 3.45. %20 ve %10 SiC takviyeli İDM'nin alt katmanına ait balistik sonrası içyapı görüntüleri (Mermi yönü aşağı doğrudur)

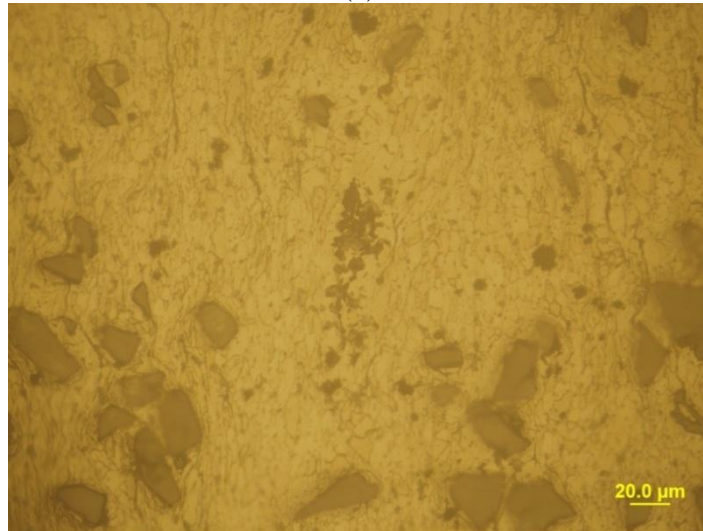
Dönüşmüş bantlar beyaz bantlar olarak ta adlandırılmaktadır çünkü bu tür bantlar ışık mikroskopunda anayapı içinde beyaz bir şerit gibi görünmektedir. Dönüşmüş bantlarda faz değişimleri ve çok ince tanelerin oluşumu gözlemlenmektedir (Dormeval, 1987, Wright, 2002, Aeberli ve Pratt, 1985, Rogers, 1979). Bu tür bantlar, ileri ki aşamalarda malzemede çatlak oluşumu ve hasara yol açmaktadır.

Oluşan bant türü, sıklığı ve özellikleri malzemeye ve test şartlarına bağlı olarak değişmektedir (Dormeval, 1987, Wright, 2002, Aeberli ve Pratt, 1985, Rogers, 1979, Manganello ve Abbott, 1972, Zener ve Hollomon, 1944, Derep, 1987, Übeyli ve diğerleri, 2010, Übeyli ve diğerleri, 2009, Demir ve Übeyli, 2011, Übeyli ve diğerleri 2011).

Balistik atış sonrası numunelerde sıkça mikro çatlak oluşumları da gözlemlenmiştir. Bu çatlakların oluşumunda gözeneklerin de etkin olduğu düşünülmektedir. Birçok çatlağın başlangıç yeri olarak gözeneklerin olduğu tespit edilmiştir



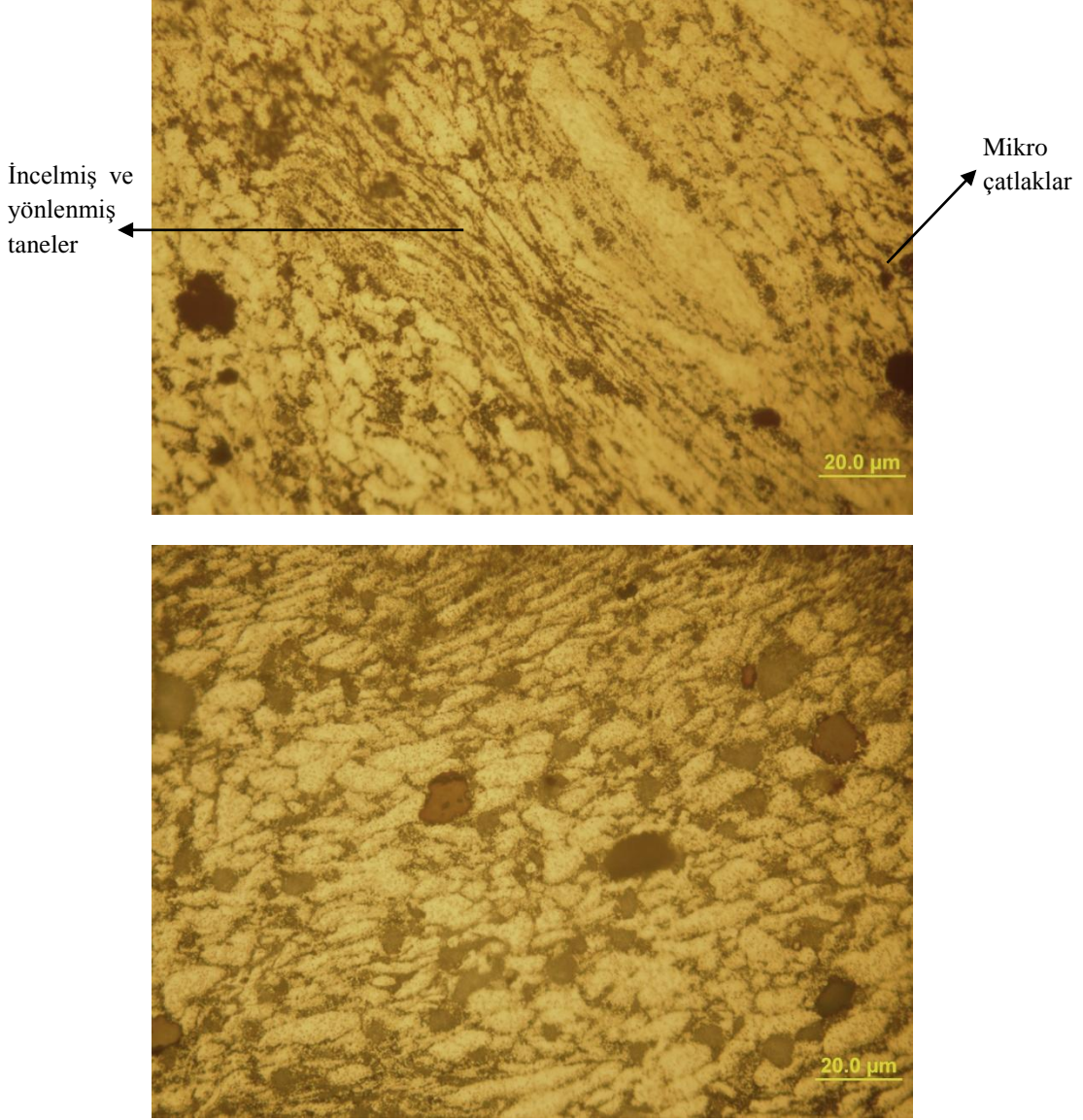
(a)



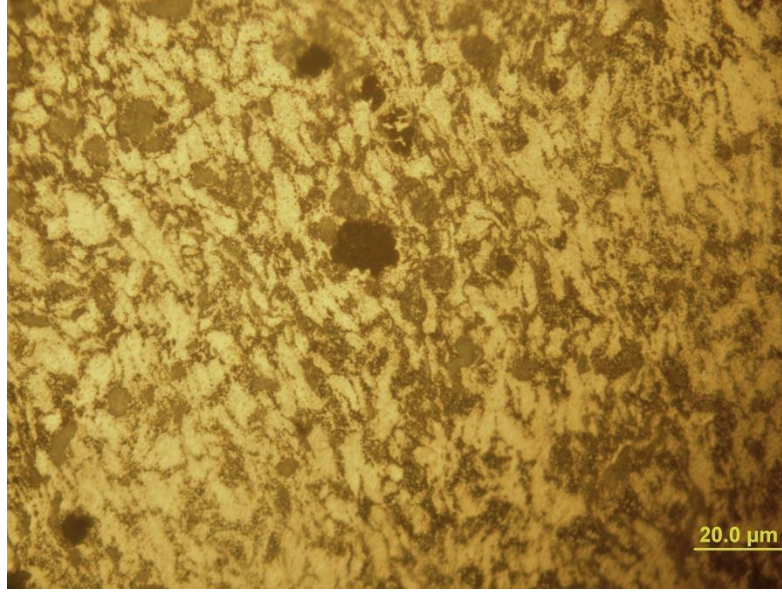
(b)

Şekil 3.46. %20 ve %10 SiC takviyeli İDM'nin (a) alt ve (b) orta katmanına ait balistik sonrası içyapı görüntüleri (Mermi yönü aşağı doğrudur)

Şekil 3.47’de Al_2O_3 takviyeli İDM’nin orta katmanına ait balistik sonrası görüntü verilmiştir. Taneler merminin geçiş doğrultusunda uzamıştır. Yapı içerisinde mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu mikro çatlaklar makro düzeyde kırılmaya sebep radyal çatlakların oluşmasına yol açmaktadırlar



Şekil 3.47. %20 ve %10 Al_2O_3 takviyeli İDM’nin orta katmanına ait balistik sonrası içyapı görüntüleri (Tane incilmesi oluşumu gözlenmektedir.)



Şekil 3.48. %20 ve %10 Al₂O₃ takviyeli İDM'nin üst katmanının görünümü (Tane incelmesi oluşumu gözlenmektedir.)

Daha önce yapılan çalışmalardan birinde (Übeyli ve diğerleri, 2010), 7,62 mm'lik zırh delici mermilerle test edilen çift fazlı bir çelikte sadece şekil değiştirmiş bantlar tespit edilmişti. Bu bantlarda tanelerin yönlenmesi ve şekil değişiklikleri gözlemlenmişti. Yine, 7,62 mm'lik zırh delici mermilerle balistik deneyleri yapılan AISI 4140, AISI 4340 ve DIN100Cr6 çeliklerinde bant oluşumları incelenmiştir (Übeyli ve diğerleri 2009, Demir ve Übeyli, 2011). Bu malzemelerde sertlik seviyesi 49 veya 59 Rockwell C iken, her iki bant türünün de oluştuğu kaydedilmiştir (Übeyli ve diğerleri 2009, Demir ve Übeyli, 2011). Buna ek olarak, dönüşmüş bantların sertliklerinin anayapıdan ve şekil değiştirmiş bantlardan çok daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun temel nedeninin ise dönüşmüş bantlarda nano-boyutlu ince çökeltilerin oluşması ve tanelerin küçülmesi olarak vurgulanmıştır (Übeyli ve diğerleri 2009, Demir ve Übeyli, 2011).

Son zamanlarda yapılan bir çalışmada ise (Übeyli ve diğerleri 2011) alümina/çelik katmanlı kompozit yapısına 7,62 mm'lik zırh delici mermilerin çarpması sonucu arka çelik katmanda sadece şekil değiştirmiş bant oluşumu gerçekleştiği gözlemlenmiştir. İncelenen malzemelerde şekil değiştirmiş bantların oluşumu gözlemlenirken, dönüşmüş bant oluşumuna rastlanmamıştır. Şekil değiştirmiş

bantlarda tanelerin deformasyonu, tane incilmesi ve deformasyon yönünde yönlendirmeleri tespit edilmiştir.

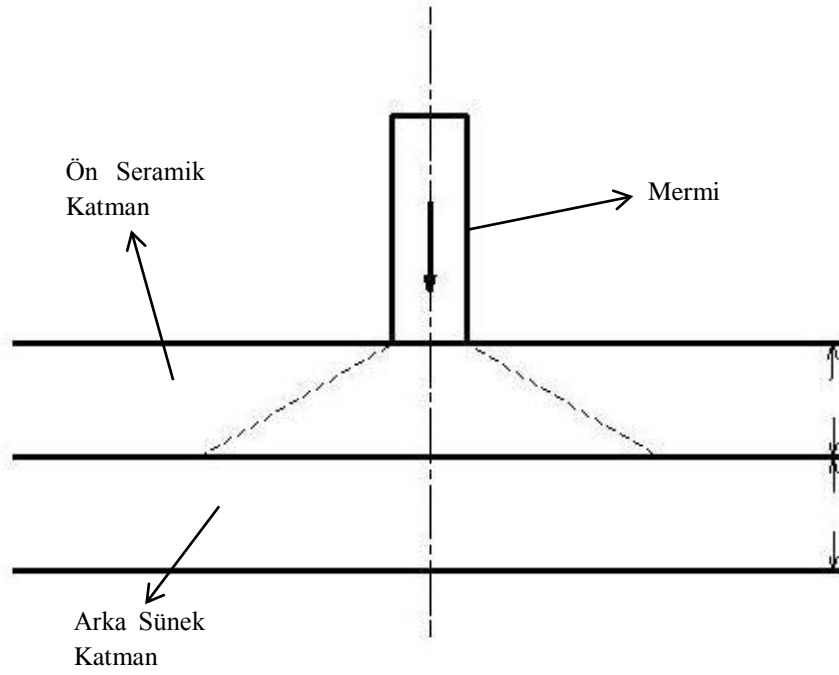
Şekil değiştirmiş bant yapısında sadece tanelerin büyüklüklerinde ve yönlendirmelerinde değişiklik gözlemlenirken içyapıda bir değişim (kristal yapı değişikliği) gözlemlenmemektedir (Dormeval, 1987, Wright, 2002, Aeberli ve Pratt, 1985).

3.5. Analitik Modelleme

Analitik modellemeler ile balistik başarımın sağlanacağı mermi hızı ya da malzeme kalınlığı hesaplanabilmektedir. Seramik ön katman ve sünek bir arka katmandan oluşan iki katmanlı kompozit zırhın analitik modellemesinde Florence modeli uygun bir çözüm olarak görülmektedir (Florence, 1969). Florence modelinin haricinde Woodward ve Hetherington'un çıkardıkları bağıntılar da seramik ön katmanlı zırhların analitik olarak incelenmesinde kullanılabilir (Woodward, 1977, Hetherington, 1992). Ayrıca bazı araştırmacılar da bu model üzerinde eklemeler veya çıkarmalar yaparak yeni modeller ortaya çıkarmışlardır. Bu çalışmalardan birinde Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin Florence modeline seramik katmanın mekanik özelliklerini ve enerji kaybını ekleyerek modifiye etmişlerdir (Ben-Dor ve diğerleri, 2009, Elperin ve diğerleri, 2005).

3.5.1. Florence modeli

Florence, iki katmanlı kompozit zırhı basit olarak Şekil 3.49'daki gibi göstermiştir. Mermi, kısa silindir çubuk olarak düşünülmüştür. Silindirin çapı, zırh delici çekirdeğin çapı olarak alınmıştır.



Şekil 3.49. İki katmanlı zırhın şematik gösterimi (Florence, 1969)

Şekilden yola çıkarak, ilk olarak maksimum gerinim için basit formül elde edilmiştir;

$$\varepsilon_r = 1,82 \times f(a) \times K/S \quad (3.1)$$

$$K = \frac{1}{2} M_p V_p^2 \quad (3.2)$$

$$S = \sigma h_m \quad (3.3)$$

$$f(a) = \frac{M_p}{[M_p + (m_c + m_m) \pi a^2] \pi a^2} \quad (3.4)$$

$$a = a_p + 2h_c \quad (3.5)$$

Denklemlerde ε_r , maksimum gerinimi göstermektedir. K, merminin çarpma anındaki kinetik enerjisi, S oluşan sabit gerilmedir. Merminin kütlesi M_p ve merminin hızı V_p ile gösterilmiştir. Seramik ve arka katmanın alan yoğunlukları sırasıyla m_c ve m_m ile ifade edilmiştir. Koniklik yarıçapı a, arka katmanın dayanımı

σ , arka katmanın kalınlığı h_m ve ön katmanın kalınlığı h_c ile gösterilmiştir. a_p ise merminin yarıçapıdır.

Bu modelde arka katmanın davranışı rijit plastik olarak ele alınmıştır.

Elde edilen maksimum gerinim kriterini kullanarak, zırh malzemesi için balistik limit hız şu şekilde hesaplanmıştır:

$$V_p = \left[\frac{\epsilon_r S}{0,91 M_p f(a)} \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

Çıkarılan bu model kullanılarak $Al_2O_3/AA7075$ katmanlı numuneler için ortalama 768 m/s hızındaki mermiyi durdurabilecek minimum arka katman kalınlığı hesaplanmıştır.

Hesaplamalarda mermi kütlesi $M_p=9,75$ g olarak alınmıştır. Mermi çekirdeğinin kütlesi $a_p=3,175$ cm'dir. AA7075 katmanının akma dayanımı $\sigma=462 \times 10^2$ N/cm² ve maksimum gerinim $\epsilon=0,11$ olarak alınmıştır. Al_2O_3 katmanının alan yoğunluğu $m_c=3,6$ g/cm² ve AA7075 katmanının alan yoğunluğu $m_m=2,81$ g/cm²'dir.

Bu bilgileri kullanarak 2 numaralı denklem çözüldüğünde 768 m/s hızındaki mermiyi durdurmak için gerekli olan AA7075 katmanı kalınlığı 3,1 mm olarak hesaplanmıştır. Ancak deneylerde 7 mm kalınlığında AA7075 arka katmanlı olan numuneler başarısız olmuşlardır. Deney sonuçlarına göre, bu değerin 7 mm ile 10 mm arasında olması gerekliydi. Bu model, yapılan testlerle uygun bir sonuç vermemiştir.

Ayrıca, bu model kullanılarak, test edilen farklı arka katman kalınlıklarındaki katmanlı kompozitler için balistik hız sınırları da belirlenmiştir. Buna göre:

7 mm kalınlığında AA7075 katmanlı kompozit numune için balistik sınır hızı:

$$V_p = 1378 \text{ m/s}$$

10 mm kalınlığında AA7075 katmanlı kompozit numune için balistik sınır hızı:

$$V_p = 1647 \text{ m/s}$$

13 mm kalınlığında AA7075 katmanlı kompozit numune için balistik sınır hızı:

$$V_p = 1878 \text{ m/s elde edilmiştir.}$$

Hetherington, Florence modelinin üzerinde değişiklik yaparak, toplam kalınlığı bilinen bir katmanlı zırh malzemesi için katman kalınlıkları için bir oran hesaplamıştır. Hetherington'un çıkardığı denkleme göre:

$$\frac{h_c}{h_m} = \frac{-5(2\rho_m - \rho_c) + \sqrt{25(2\rho_m - \rho_c)^2 + 96\rho_m(\rho_c - \rho_m)}}{7\rho_c + 2\rho_m - \sqrt{25(2\rho_m - \rho_c)^2 + 96\rho_m(\rho_c - \rho_m)}} \quad (3.7)$$

olur. Denklemdede;

h_c : Ön katmanın kalınlığı

h_m : Arka katmanın kalınlığı

ρ_c : Ön katmanın yoğunluğu

ρ_m : Arka katmanın yoğunluğudur.

Hetherington modeline göre hesaplama yapıldığında, $\frac{h_c}{h_m}$ oranı 0,6 çıkmaktadır.

3.5.2. Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin modeli

Ben-Dor, Dubinsky ve Elperin Florence modeline seramik malzemenin mekanik özelliklerini ve kırılma esnasındaki enerji kayıplarını ekleyerek Denklem 3.8'de verilen modeli çıkarmışlardır.

$$v_{bl}^2 = \frac{\alpha \varepsilon_2 \sigma_2 b_2 z [(\gamma_1 b_1 + \gamma_2 b_2) z + m]}{0.91 m^2} \quad (3.8)$$

$$z = \pi(R + 2b_1)^2 \quad (3.9)$$

Denklemden v_{bl} balistik limit hız, m mermi kütlesi, R merminin yarıçapı, b_i katmanların kalınlıkları, σ_i çekme dayanımları, ε_2 kırılma uzaması ve γ_i de katman malzemelerinin yoğunluğudur. α ise deneysel veriler kullanılarak bulunan deneysel katsayıdır.

Bu modelde araştırmacıların kendi deney sonuçlarına uygun olarak elde ettikleri sabitler kullanılmıştır. Yapılan çalışmalara bağlı olarak böyle bir sabit elde edilemeyeceğinden dolayı, bu model tez çalışmasında kullanılan numunelere uygulanamamıştır.

3.5.3. Değiştirilmiş Florence modeli

Florence modeli, deney sonuçlarına yakın bir sonuç vermekteydi. Fakat Florence oluşturduğu modelde, malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertlik gibi mekanik özelliklerinin etkisini düşünmemiştir. Bu modele yapılacak eklemelerle, deney sonuçlarına daha yakın sonuçlar elde etmek mümkündür. AA7075 destek katmanının sertliğinin etkisi modele eklenerek, deney sonuçlarına uygun bir model elde edilmiştir. Bu model;

$$V_p = \left[\frac{u \varepsilon_r S}{0,91 M_p f(a)} \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

$$u = \frac{1}{20} \ln HB \quad (3.11)$$

Bu denklemde HB; AA7075 katmanının sertliğini (HB) belirtir. Yapılan sertlik ölçümlerinde AA7075 katmanının sertliği ortalama olarak 145 HB olarak ölçülmüştür.

Elde edilen bu modele göre, mermiyi durdurabilecek arka katman kalınlığı, 9,1 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer deney sonuçlarıyla uyumludur. 7 mm arka katman kalınlığı olan numune mermiyi durduramazken, 10 mm arka katman kalınlığı olan numune mermiyi durdurmayı başarmıştır.

Tablo 3.9. Hesaplanan balistik tam koruma sağlanan numune kalınlıkları

Kullanılan Model	Hesaplanan AA7075 Katman Kalınlığı (mm)
Florence Modeli	3,1
Değiştirilmiş Florence Modeli	9,1

Florence modeline (Florence, 1969) sertliğin etkisinin katılmasıyla elde edilen model, deney sonuçlarıyla oldukça uyumlu bir sonuç vermiştir. Florence modelinde (Florence, 1969) yapılan değişiklikle oluşturulan denklem yardımıyla üretilen numuneler için balistik korumanın sağlanacağı kalınlıkların hesaplanabileceğini göstermiştir. Bu sayede zırh malzemesi için optimum kalınlık ve ağırlık hesaplanması mümkündür.

Fakat hassas bir model ortaya konabilmesi için farklı kalınlıklara sahip daha fazla sayıda numunenin test edilmesi gerekmektedir. Malzemeler için etkin bir model elde edilebilmesi için (hem seramik hem de metal katman için çok sayıda kalınlık değerleri kullanılarak) daha fazla sayıda numuneler denenmesi ve ayrıca malzemelerin dinamik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada elde edilen değiştirilmiş Florence modeli kısıtlı sayıda (3 farklı kalınlıkta) denenmiş alümina/AA7075 numuneleri için geçerlidir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İDM numune üretimleri sıcak presleme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Numunelerin içyapı incelemesinde, katmanlar arası ayrışmanın olmadığı ve sinterlemenin etkin olarak gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Parçacık dağılımının genel olarak homojen olduğu tespit edilmiştir. Fakat takviye oranının artması karıştırmayı zorlaştırdığından, özellikle yüksek alümina takviyeli katmanlarda belirgin bir topaklanma tespit edilmiştir. Takviye malzemelerinin boyut dağılımı geniş aralıklıdır. Bu da paketlenme özelliğinin artmasını sağlayarak, mekanik özellikler üzerinde olumlu etki yaratmaktadır (German, 2005). Malzeme türüne göre gözenek oranlarının %0,5 ile %4,2 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Yaşlandırma işlemi tüm numune gruplarına uygulanarak sertlik-yaşlanma süresi grafikleri elde edilmiştir. En yüksek sertlik değerleri 120 °C’de gerçekleştirilen yaşlandırma işlemi sonunda elde edilmiştir. Seramik takviye artışının sertliği arttırdığı fakat sertleşme karakteristiğine etki etmediği gözlemlenmiştir. Beklendiği gibi silisyum karbürün daha yüksek sertliğe sahip olmasından dolayı, SiC seramik takviyeli numunelerin sertlikleri Al₂O₃ takviyeli numunelere kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Sıcaklık artışında bağlı olarak, en yüksek sertliğe ulaşma süresi kısaldığı ancak 150 °C’de ölçülen en yüksek sertlik değerinin, 120 °C’de ölçülen en yüksek sertlik değerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. AA7075 alaşımı için 120 °C’de elde edilen sertlik verilerinin literatürde yer alan çalışmalarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Emani ve diğerleri, 2009, Sheu ve Lin, 1997).

Üç nokta eğme testleri ile numunelerin çapraz kırılma dayanımları belirlenmiştir. Çapraz kırılma dayanımı en yüksek olan numunenin düşük SiC takviyeli numune olduğu görülmüştür. SiC veya Al₂O₃ katkılı İDM’lerde takviye oranı artışının çapraz kırılma dayanımını belirgin ölçüde düşürdüğü, yaşlandırma işleminin ise çapraz kırılma dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir.

Yaşlandırma işlemi ile içyapı ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinden sonra üretilen İDM'ler balistik teste tabi tutulmuşlardır. Tüm atışlarda 7,62 mm'lik zırh delici mermi kullanılmıştır. Test edilen 15, 20 ve 25 mm kalınlığındaki tüm İDM'ler balistik testlerde başarı gösterememiştir. Özellikle yüksek SiC takviyeli 25 mm kalınlığındaki numuneler merminin gömleğini tutup çekirdeğin ilerleme yönünü önemli ölçüde değiştirmişlerdir. Yüksek SiC takviyeli 15, 20 ve 25 mm kalınlığındaki numunelerin alan yoğunlukları sırasıyla 41,7 kg/m², 55,5 kg/m² ve 69,4 kg/m²'dir. Dolayısıyla, mermi geçişini sağlamak için alan yoğunluğunu arttırmak ve daha kalın numuneler üretmek gerekmektedir. Fakat daha kalın numunelerin üretimi ile hafif zırh yapısı elde edilemeyecektir çünkü katmanlı kompozitlerde düşük alan yoğunluklarında (< 66 kg/m²) tam balistik koruma sağlanabilmektedir (Übeyli ve diğerleri 2008, Demir ve diğerleri 2009a). Önceki yapılan çalışmalarda; Alümina/Al2024 katmanlı kompozitinde 66 kg/m²'lik alan yoğunluğunda (Übeyli ve diğerleri 2008), Alümina/Al4340 katmanlı kompozitinde ise 55 kg/m²'lik alan yoğunluğunda (Demir ve diğerleri 2009a) tam balistik koruma sağlanmıştı. Ayrıca, aynı şartlarda 4340 çeliği üzerinde yapılan bir çalışmada, bu malzemenin 70 kg/m²'lik alan yoğunluğunda balistik olarak başarılı olduğu gözlemlenmişti (Demir, 2008b, Demir ve diğerleri, 2009b). Buna ek olarak, test edilen Al₂O₃/AA7075 katmanlı numunelerde; AA7075 katmanının kalınlığı 10 mm ve 13 mm olan numuneler mermiyi durdurmayı başarmışlardır. Başarılı olan numunelerin alan yoğunlukları ise yaklaşık olarak 63 kg/m² ve 71 kg/m²'dir. 55 kg/m² alan yoğunluğunda ve AA7075 katman kalınlığı 7 mm olan numune ise mermi geçişi sırasında parçalanarak testte başarısız olmuştur. Dolayısıyla, seramik/metal katmanlı kompozitlerinin balistik korumada daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun temel nedenleri olarak:

- Katmanlı kompozitlerde ön katman olarak yer alan seramik tabaka, İDM'lerde yer alan seramik takviyeli metal tabakaya kıyasla mermiyi aşındırma ve parçalamada çok daha başarılı ve etkindir.
- Kompozit tabakalarda yer alan seramik parçacıkların bir bütünlük sağlamadıkları için anayapı içinde merminin geçişine etkin bir direnç gösteremedikleri belirlenmiştir.

- Seramik/metal katmanlı kompozitlerde seramik katmanda merminin çarpması sırasında konik bir yapı oluşumu (Wilkins, 1978, Shockey ve diğerleri 1990a, Shockey ve diğerleri, 1990b, Roeder ve Sun 2001, Curran ve diğerleri 1993) gözlemlenmektedir. Bu konik yapı merminin kinetik enerjisini daha geniş bir yüzeye yaymakta ve böylelikle arka katmanı daha iyi korumaktadır (Wilkins, 1978, Shockey ve diğerleri 1990a, Shockey ve diğerleri, 1990b, Roeder ve Sun 2001, Curran ve diğerleri 1993). Böyle bir yapı oluşumu İDM'lerin balistik sonrası incelemesinde gözlemlenmemiştir.
- İDM'lerde seramik parçacıklar yapı içinde dağılmış olmasından dolayı bütüncül (monolithic) seramikler kadar mermi ilerlemesine karşın etkin bir sürtünme ve aşındırma işlevini gerçekleştirememektedirler.

Çalışmanın ilerletilerek daha iyi sonuç elde edilebilmesi için;

- Sinterleme basıncı artırılarak gözenek miktarı daha da azaltılabilir.
- Sinterleme atmosferi değiştirilerek mekanik özelliklerde iyileştirme sağlanabilir.
- Farklı takviye malzemeleri, takviye oranları ve katman kalınlıkları için balistik testler tekrarlanabilir.

KAYNAKLAR

Abrate S., Modeling of impacts on composite structures, *Composite Structures*, 2001, **51**, 129-138.

Aeberli K. E., Pratt P. L., The effect of explosive loading on the microstructure of some metals and alloys, *Journal of Materials Science*, 1985, **20**, 316-330.

Anderson Jr. C. E., Hohler V., Walker J. D., Stilp A. J., The influence of projectile hardness on ballistic performance, *Int. J. of Impact Eng*, 1999, **22**, 619-632.

ASTM B 528-05, Standard test method for transverse rupture strength of metal powder specimens, 2005.

ASTM Standards, Designation E 112-96e2, Standard Methods for Determining Average Grain Size, 2004.

ASTM Standards, Designation E10-84, Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials, 1984.

Atik E., Yaşlandırılabilir Bir Al-Al₂O₃ Kompozitinde Aşınma Dayanımı Açısından Optimum Mekanik Özelliklerin ve Üretim Şartlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 1994, 33808.

Aycan F., Yaşlandırma Isıl İşleminin SiC ve Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Alüminyum Alaşımı Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010, 289978.

Bhattacharyya M., Kumar A. N., Kapuria S., Synthesis and characterization of Al/SiC and Ni/Al₂O₃ functionally graded materials, *Mat. Sci. Eng. A*, 2008, **487**, 524-535.

Callister, W.D., Rethwisch, D.G., *Materials Science and Engineering*, 9th ed., Wiley, New Jersey, 2011.

Cayron C., Tem study of interfacial reactions and precipitation mechanisms in Al₂O₃ 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

Chen J., Zhen L., Yang S., Shao W., D, S., Investigation of precipitation behavior and related hardening in AA 7075 aluminium alloy, *Materials Science and Engineering A*, 2009, **500**, 34-42.

- Chin E. S. C., Army focused research team on functionally graded armor composites, *Mat. Sci. Eng. A*, 1999, **259**, 155-161.
- Chung, D. D. L., *Composite Materials: Science and Applications*, 2nd Edition, Springer, New York, 2010.
- Curran D. R., Seaman L., Cooper T., Shockey D. A., Micromechanical model for comminution and granular flow of brittle material under high strain rate application to penetration of ceramic targets. *Int. J. Impact Eng.*, 1992, **13**, 53-83.
- Demir T., Übeyli M., Yıldırım R. O., Karakaş M. S., Response of alumina/4340 steel laminated composites against the impact of 7.62 mm armor piercing projectiles, *Science and Engineering of Composite Materials*, 2009, **16**(2), 89-98.
- Demir T., Übeyli M., Yıldırım R. O., Effect of hardness on the ballistic impact behavior of high-strength steels against 7.62 mm armor piercing projectiles, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2009, **18**(2), 145-153.
- Demir T., Übeyli M., Yıldırım R. O., Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile, *Mater. Des.*, 2008, **29**, 2009-2016.
- Demir T., 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, 2008, 216721.
- Den Reijer P. C., Impact on Ceramic Faced Armours, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, Holland, 1991.
- Department of Defense, *Composite Materials Handbook: Metal matrix composites*, U.S.A, 2002.
- Derep, J. L., Microstructure transformation induced by adiabatic shearing in armour steel, *Acta Metall.*, 1987, **35**, 1245-1249.
- Dikshit S. N. , Kutumbarao V. V., Sundararajan G., The influence of plate hardness on the ballistic penetration of thick steel plates, *Int J. of Impact Eng.*, 1995, **16**(2), 293-320.
- Dormeval R., The adiabatic shear phenomenon in Materials at High Strain Rates, *Elsevier Applied Science*, 1987, 47-69.
- Dutta P. K., DiPaolo B., Shock attenuation in graded materials, *Proceedings of the Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Seoul, Korea, June, 2005.
- Dwight, J., *Aluminium Design and Construction*, E&FN Spon Routledge, New York, 1999.

- Edwards M. R., Mathewson A., The ballistic properties of tool steel as a potential improvised armour plate, *Int. J. of Impact Eng.*, 1997, **19**(3), 297-309.
- Elperin T., Ben-Dor G., Dubinsky A., Optimization of two-component composite armor against ballistic impact, *Composite Structures*, 2005, **69**, 89-94.
- Emani S. V., Benedyk J., Nash P., Chen, D., Double aging and thermomechanical heat treatment of AA7075 aluminum alloy extrusions, *Journal of Materials Science*, 2009, **44**, 6384-6391.
- Espinosa H. D., Dwivedi S., Zavattieri P. D., Yuan G., A numerical investigation of penetration in multilayered material/structure systems, *Int. J. of Solids Struct.*, 1998, **35**(22), 2975-3001.
- Florence A. L., Interaction of projectiles and composite armour, Part II, *Stanford Research Institute*, Menlo Park. California, U.S.A., 5-9, 1969.
- Ford R., *Weapon: A Visual History of Arms and Armour*, DK Publishing, Londra, 2006.
- Froyen, L., Verlinden, B., Aluminium matrix composite materials, *Training in Aluminium Application Technologies*, 1994, Lecture 1402.
- G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. Elperin, Improved Florence model and optimization of two-component armor against single impact or two impacts, *Composite Structures*, 2009, **88**, 158-165.
- Gay D., Hoa S. V., Tsai S. W., *Composite Materials: Design and Applications*, Crc Press, Paris, 1997.
- Ge C. C., Li J. T., Zhou Z. J., et al., Development of functionally graded plasma facing materials, *J. Nucl. Mater.*, 2000, **283-287**, 1116-1120.
- German, R. M., Tercüme: Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*, Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara, 15-500, 2007.
- Gomez, L., Busquets-Mataix, D., Amigo, V., Salvador, M.D., Analysis of boron carbide aluminium matrix composites, *Journal of Composite Materials*, 2009, **43**, 987-995.
- Gooch W. A., Chen B. H. C., Burkins M. S., Palicka R., Rubin J., Ravichandran R, Development and ballistic testing of a functionally gradient ceramic/metal applique, *Mater. Sci. Forum*, 1999, 308–311.
- Gupta N. K., Madhu V., An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered plates, *Int. J. of Impact Eng.*, 1997, **19**, 395-414.

- Gupta N. K., Madhu V., Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates, *Int. J. of Impact Eng.*, 1991, **12**(3), 333-343.
- He Z., Ma J., Tan G. E. B., Fabrication and characteristics of alumina-iron functionally graded materials, *J. Alloy Compd.*, 2009, **486**, 815-818.
- Hetherington, J. G., The optimization of two component composite armors, *Int. J. Impact Eng.*, 1992, **12**, 409-414.
- Hu C. J., Lee P. Y., Ballistic performance and microstructure of modified rolled homogeneous armor steel, *J. of the Chinese Inst. of Engineers*, 2002, **25**, 99-107.
- Jain M., Sadangi R. K., Cannon W. R., Kear B. H., Processing of functionally graded WC/Co/Diamond, *Nanocomposites, Scripta Mater.*, 2001, **44**, 2099-2103.
- Jin G., Takeuchi M., Honda S., Nishikawa T., Awaji H., Properties of multilayered mullite/Mo functionally graded materials fabricated by powder metallurgy processing, *Mater. Chem. Phys.*, 2005, **89**, 238-243.
- Jin X., Wu L., Sun Y., Guo L., Microstructure and mechanical properties of ZrO₂/NiCr functionally graded materials, *Mat. Sci. Eng. A*, 2009, **509**, 63-68.
- Jovicic J., Zavaliangos A., Ko F., Modeling of the ballistic behavior of gradient design composite armors, *Compos. Part A*, 2000, **31**, 773-784.
- Jung Y. G., Paik U., Choi S. C., Influence of the particle size and phase type of zirconia on the fabrication and residual stress of zirconia/stainless steel 304 functionally gradient material, *J. Mater. Sci.*, 1999, **34**, 5407-5416.
- Kang, S-J. L., *Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure*, Elsevier, Jordon Hill, Oxford, 2005.
- Karamış M. B., Cerit A. A., Nair F., Surface characteristics of projectiles after frictional interaction with metal matrix composites under ballistic condition, *Wear*, 2006, **261**, 738-745.
- Karamış M. B., Nair F., Taşdemirci A., Analyses of metallurgical behaviour of Al-SiCp composites after ballistic impacts, *Compos. Struct.*, 2004, **64**, 219-226.
- Karamış M. B., Nair F., Taşdemirci A., Failure and tribological behaviour of the AA5083 and AA6063 composites reinforced by SiC particles under ballistic impact, *Compos. Part A*, 2003, **34**, 217-226.
- Kaufmann C., Cronin D., Worswick M., Pageau G., Beth A. Influence of material properties on the ballistic performance of ceramics for personal body armor, *Shock Vib.*, 2003, **10**, 51-58.
- Kawasaki A., Watanabe R., Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials, *Ceramics International*, 1997, **23**, 73-83.

- Kawasaki A., Watanabe R., Evaluation of thermomechanical performance for thermal barrier type of sintered functionally graded materials, *Compos. Part B*, 1997, **28B**, 29-35.
- Kerti, I., Toptan, F., Microstructural variations in cast B₄C- reinforced aluminium matrix composites, *Materials Letters*, 2008, **62**, 1215-1218.
- Kieback B., Neubrand A., Riedel H., Processing techniques for functionally graded materials, *Mat. Sci. Eng. A*, 2003, **362**, 81-105.
- Kumdalı, F., Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 213547.
- Lee M., Yoo Y. H., Analysis of ceramic/metal armour systems, *Int. J. of Impact Eng.*, 2001, **25**, 819-829.
- Lin C. Y., Bathias H. B., Mcshane H. B., Rawlings R. D., Production of silicon carbide Al2124 alloy functionally graded materials by mechanical powder metallurgy technique, *Powder Metall.*, 1999, **42**, 29-34.
- Lloyd D. J., Chatuverdi M. C., A calorimetric study of aluminum alloy AA-7075, *Journal of Materials Science*, 1982, **17**, 1819-1824.
- Lowry E.D., *Interior Ballistics*, Doubleday & Company, New York, 1968
- Lumley, R., *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*, Woodhead Publishing, Oxford, 2011
- Manganello J., Abbott K. H., Metallurgical factors affecting the ballistic behavior of steel targets, *J. of Mater., JMLSA*, 1972, **17**, 231-239.
- Maweja K., Stumpf W., Fracture and ballistic-induced phase transformation in tempered martensitic low-carbon armour steels, *Mater. Sci. Eng. A*, 2006, **432**, 158-169.
- Maweja K., Stumpf W., The design of advanced performance high strength low-carbon martensitic armour steels, Microstructural considerations, *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **480**, 160-166.
- Maweja K., Stumpf W., The design of advanced performance high strength low-carbon martensitic armour steels, Part 1, Mechanical property considerations, *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **485**, 140-153.
- Meluch, L., Warm Compaction of Aluminium Alloy Alumix 123, Doktora Tezi, University of Birmingham, 2009.
- MIL-C-60617A, Military Specification, Cartridge, 7.62 mm: NATO, Armor Piercing, M61, 1991.

- Miyamoto Y., Li Z., Kang Y. S., Tanihata K., Fabrication and properties of alumina-based hyperfunctional ceramics with symmetrically compositional gradient structures, *Powder Metall.*, 1995, **42**, 933-938.
- Neubrand A., Rödel J., Gradient materials: An overview of a novel concept, *Z. Metallkd.*, 1997, **88**, 358-371.
- 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*, 2007, **48**(5), 990-995.
- Ogorkiewicz R. M., Advances in armor materials, *Int. Defense Review* 4, 349-352, 1991.
- Orgorkiewicz R. M., Armor for combat vehicles, *New Armor Materials, Mach. Des.*, 1969, 36-42.
- Orhan, A., Gür, A.K., Çalgülü, U., Alüminyum matriksli B₄C takviyeli kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2007, **4**, 8-13.
- Pettersson A., Magnusson P., Lundberg P., Nygren M., Titanium-titanium diboride composites as part of a gradient material, *Int. J. of Impact Eng.*, 2005, **32**, 389-399.
- Reddy G. M., Mohandas T., Papukutty K. K., Effect of welding process on the ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments, *J. of Mater. Process. Technol.*, 1998, **74**, 27-35.
- Roeder B. A., Sun C. T., Dynamic penetration of alumina/aluminum laminates: experiments and modeling, *Int. J. Impact Eng.*, 2001, **25**, 169-185.
- Rogers H. C., Adiabatic plastic deformation, *Ann. Rev. Mater. Sci.*, 1979, **9**, 283-311.
- Rosenberg, Z., Dekel, E., *Terminal Ballistics*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012
- 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*, 2009, **36**, 588-596.
- Rosso, M., Ceramic and metal matrix composites: route and properties, *12th International Scientific Conference of Achievements in Mechanical and Materials Engineering*, 36-48, AMME, 2003
- Ruiz-Navas E. M., Garcia R., Gordo E., Velasco F. J., Development and characterization of high-speed steel matrix composites gradient materials, *J. Mater. Process. Tech.*, 2003, **143-144**, 769-775.

Sarıkan B., İşlevsel Derecelendirilmiş Bor Karbür Takviyeli AA7075 Esaslı Kompozitlerin 7,62 mm'lik Zırh Delici Mermiler Karşısındaki Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013, 346519.

Sadanandan S., Hetherington J. G., Characterization of ceramic/steel and ceramic/aluminium armours subjected to oblique impact, *Int. J. Impact Eng.*, 1997, **19**, 811-819.

Sha G., Cerezo A., Early-stage precipitation in Al–Zn–Mg–Cu alloy (7050), *Acta Materialia*, 2004, **52**, 4503–4516.

Sherman D., Ben-Shushan T., Quasi-static impact damage in confined ceramic tiles, *Int. J. Impact Eng.*, 1998, **21**, 245-265.

Sherman D., Brandon D. G., The ballistic failure mechanisms and sequence in semi-infinite supported alumina tiles, *J. Mater. Res.*, 1997, **12**, 1135-1343.

Sheu C. Y., Lin S. J., Ageing behavior of SiC_p-reinforced AA 7075 composites, *Journal of Materials Science*, 1997, **32**, 1741-1747.

Shockey D. A., Marchand A. H., Skaggs S. R., Cort G. E., Burkett M. W., Parker R., Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods, *Int. J. Impact Eng.*, 1990, **9**, 263-275.

Shockey D. A., Rowcliffe D. J., Dao K. C., Seaman L., Particle Impact Damage in Silicon Nitride, *J. Am. Ceram. Society*, 1990, **73**, 1613-1619.

Tan, M.J., Zhang, X., Powder metal matrix composites: selection and processing, *Material Science and Engineering*, 1998, **A244**, 80-85.

Thomas J.H., *Elements of Ordnance*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1938

Thompson W. T., An approximate theory of armour penetration, *Int. J. Appl. Phys.*, 1995, **26**(1), 80-82.

Tohgo K., Iizuka M., Araki H., Shimamura Y., Influence of microstructure on fracture toughness distribution in ceramic-metal functionally graded materials, *Eng. Fract. Mech.*, **2008**, 75, 4529-4541.

Torralba, J. M., Costa, C. E., Velasco, F., P/M Aluminium matrix composites: an overview, *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **133**, 203-206.

Tsuda K., Ikegaya A., Isobe K., Kitagawa N., Nomura T., Development of functionally graded sintered hard materials, *Powder Metall.*, 1996, **89**, 296-300.

Upadhyaya, G.S., *Powder Metallurgy Technology*, Cambridge International Science Publishing, Cambridge, 2002.

- Übeyli M., Yıldırım O., Ögel B., Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al₂O₂₄ laminated composites, *J. of Mater. Process. Technol.*, 2008, **196**, 356-364.
- Übeyli M., Yıldırım R. O., Ögel B., On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors, *Mater. Design*, 2007, **28(4)**, 1257-1262.
- 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*, 2011, **A528**, 1131-1137.
- Wilkins M. L., Mechanics of penetration and perforation, *Int. J. Eng. Sci.*, 1978, **16**, 793-807.
- Woodward R. L., A rational basis for the selection of armour materials, *The J. of Aust. Inst. of Metals*, 1977, **22**, 167-170.
- Woodward R. L., A simple one-dimensional approach to modeling ceramic composite armour defeat, *Int. J. of Impact Eng.*, 1990, **9(4)**, 455-474.
- Wright T. W., The physics and mathematics of adiabatic shear bands, *Cambridge University Press*, Cambridge, 2002.
- Wu A. H., Cao W. B., Ge C. C., Li J. F., Kawasaki A., Fabrication and characteristics of plasma facing SiC/C functionally graded composite material, *Mater. Chem. Phys.*, 2005, **91**, 545-550.
- Zaera R., Sanchez-Galvez A, Analytical modeling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armour, *Int. J. of Impact Eng.*, 1998, **21(3)**, 133-148.
- Zaera R., Sánchez-Sáez S., Pérez-Castellanos J. L., Navarro C., Modeling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact, *Composites. Part A: Appl. Sci. and Manuf.*, 2000, **31**, 823-833.
- Zener C., Hollomon J. H., Effect of strain rate upon plastic flow of steel, *J. Appl. Phys.*, 1944, **15**, 22-32.
- Zhang L. M., Liu J., Yuan R. Z., Hirai T., Properties of TiC-Ni₃Al composites and structural optimization of TiC-Ni₃Al functionally gradient materials, *Mat. Sci. Eng. A*, 1995, **203**, 272-277.
- Zhu J., Lai Z., Yin Z., Jeon J., Lee S., Fabrication of ZrO₂-NiCr functionally graded material by powder metallurgy, *Mater. Chem. Phys.*, 2001, **68**, 130-135.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

SCI Yayın Bilgileri:

Balcı E., Sarıkan B., Übeyli M., Camuşcu N., Yıldırım R. O., On the ballistic performance of the AA7075 based functionally graded material with boron carbide reinforcement, *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 2013, **51**, 257-262.

Sarıkan B., **Balcı E.**, Übeyli M., Camuşcu N., Investigation on the aging behaviour of the functionally gradient material consisting of boron carbide and an aluminum alloy, *Materiali in Tehnologije*, 2012, **46**, 393-397.

Übeyli M., **Balcı E.**, Sarıkan B., Öztaş M. K., Camuşcu N., Yıldırım R. O., Keleş Ö., The ballistic performance of SiC-AA7075 functionally graded composite produced by powder metallurgy, *Materials & Design*, (kabul edildi, basım aşamasında).

Bildiriler:

Balcı E., Sarıkan B., Übeyli M., Camuşcu N., Impact behavior of the multilayered B4C/AA7075 functionally graded materials against armor piercing projectile, *XVII. International Conference on Mechanics of Composite Materials*, Riga, Latvia, May, 2012.

Sarıkan B., **Balcı E.**, Übeyli M., Camuşcu 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, November, 2011.

Sarıkan B., Öztaş M. K., **Balcı E.**, Übeyli M., Camuşcu N., Keleş Ö., Yapay yaşlandırmanın SiC ve 7075 alüminyum alaşımı içeren bir işlevsel dereceli malzemenin sertliği üzerine etkisi, *6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, Türkiye, Ekim, 2011.

Übeyli M., **Balcı E.**, Sarıkan B., Camuşcu N., Production and characterization of a functionally graded material reinforced with alumina, *18th International Conference, Mechanika*, Kaunas, Lithuania, April, 2013.

Übeyli M., **Balcı E.**, Sarıkan B., Camuşcu N., Yıldırım R. O., A comparison on the impact resistance of alumina/AA 7075 laminated composite and alumina-AA 7075 graded material, *4th International & 25th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, Kolkata, India, December, 2012

ÖZGEÇMİŞ

Erhan BALCI 22.06.1987 tarihinde İstanbul Bakırköy’de doğmuştur. İlköğrenimini İstanbul Bahçelievler’de bulunan Siyavuşpaşa İlköğretim Okulu’nda 2001 yılında tamamlamıştır. 2005 yılında da Sakarya Akyazı’da bulunan Şht. Yzb. Halil İbrahim Sert Lisesi’nden mezun olmuştur. 2012 yılı Nisan ayında hayatını Elif KOMUT BALCI ile birleştirmiştir.

2005 yılında girdiği TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2011 yılında mezun olmuştur.

2011 yılı Ocak ayında TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisansa başlayarak, 2012 yılı Şubat ayına kadar aynı üniversitede Araştırma Görevlisi olarak çalışmıştır.

2012 yılı Şubat ayında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalına ÖYP ile Araştırma Görevlisi olarak atanmış olup görevine devam etmektedir.