



T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan ÖNDER

**ÖSTEMPERLENMİŞ DÜŞÜK ALAŞIMLI BİR
ÇELİĞİN YÜKSEK HIZ DARBE DAYANIMININ
İNCELENMESİ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

OSMANIYE – 2017

**T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÖSTEMPERLENMİŞ DÜŞÜK ALAŞIMLI BİR ÇELİĞİN
YÜKSEK HIZ DARBE DAYANIMININ İNCELENMESİ**



Sinan ÖNDER

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

**OSMANIYE
NİSAN – 2017**

TEZ ONAYI

ÖSTEMPERLENMİŞ DÜŞÜK ALAŞIMLI BİR ÇELİĞİN YÜKSEK HIZ DARBE DAYANIMININ İNCELENMESİ

Sinan ÖNDER tarafından Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ danışmanlığında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Ana Bilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği/çokluğu ile **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, OKÜ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Kerimcan ÇELEBİ
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Adana BTÜ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mustafa Murat YAVUZ
İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, OKÜ

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve /..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Halil Zeki GÖK
Enstitü Müdürü, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Sinan ÖNDER



ÖZET

ÖSTEMPERLENMİŞ DÜŞÜK ALAŞIMLI BİR ÇELİĞİN YÜKSEK HIZ DARBE DAYANIMININ İNCELENMESİ

Sinan ÖNDER

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

Nisan 2017, 101 sayfa

Bu çalışmada, düşük alaşımlı-yüksek dayanımlı östemperlenmiş AISI 4140 çeliğinin yalın ve katmanlı kompozit biçimlerinin yüksek hız darbe dayanımları incelenmiştir. Katmanlı kompozitlerde ön katman olarak SiC ve Al₂O₃ seramikleri kullanılmıştır. Öncelikle AISI 4140 çeliği denetimli ortamda 860 °C’de östenitleştirmeye tabi tutulmuş sonrasında tuz banyosunda 343 °C’de bekletilmiş ve ardından havada soğutularak çelikte beynit içyapısı elde edilmiştir. Kullanılan silisyum karbür seramik plakaların boyutları 50x50x8,5 mm, alümina plakaların boyutları ise 50x50x9,3 mm şeklindedir. Sonra seramik numunelerin içyapıları taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Östemperleme ısıl işlemi sonucunda, çeliğin içyapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Daha sonra balistik testler, 788,4 m/s ortalama hızındaki 7,62 mm zırh delici mermiler ile gerçekleştirilmiştir. Atışların ardından numunelerin içyapılarında oluşan değişimler ise ışık mikroskobunda incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, yalın çelik numunelerde en iyi balistik başarımlar 109,8 kg/m² alan yoğunluğunda tam başarımla elde edilirken, aynı durum silisyum karbür ön katmana sahip kompozit numunelerde 62,7 kg/m² ve alümina ön katmana sahip kompozit numunelerde 78,4 kg/m² alan yoğunluğu değerlerinde sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Zırh, Östemperleme, Kompozit, Yüksek Dayanımlı–Düşük Alaşımlı Çelik

ABSTRACT

INVESTIGATION ON THE HIGH SPEED IMPACT RESISTANCE OF AN AUSTEMPERED LOW ALLOY STEEL

Sinan ÖNDER
M.Sc., Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

April 2017, 101 pages

In this study, the high speed impact resistance of the austempered high strength-low alloy steel (AISI 4140) was investigated in both monolithic and laminated composite conditions. The SiC and Al₂O₃ ceramic tiles were used as front layers in the laminated composites. First of all, the AISI 4140 steel was austenitized at 860 °C in a controlled environment then was waited in a salt bath at 343 °C. Next, it was cooled in air to obtain bainitic microstructure. The dimensions of the silicon carbide ceramic plates were measured to be 50x50x8.5 mm and the dimensions of the alumina plates were measured as 50x50x9.3 mm. Then the micro structures of the ceramic samples were investigated by a scanning electron microscopy. After the austempering heat treatment, the microstructure and mechanical properties of the steel were examined. After that the ballistic tests were carried out with 7.62 mm armor piercing bullets with an average speed of 788.4 m/s. After the shootings, the changes in the micro structures of the samples were examined by light microscope. As a result of the work carried out, the best ballistic performance in monolithic steel samples was achieved with full protection at an areal density of 109.8 kg/m², whereas the same situation was provided at 62.7 kg/m² in the composite samples with silicon carbide front layer and was provided at 78.4 kg/m² in the composite samples with alumina front layer.

Key Words: Ballistic, Armour, Austempering, Composite, High Strength–Low Alloy Steel



Abim Mustafa KARBEVAZ'a...

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumun belirlenerek tez çalışmamın yürütölmesini üstlenen, çalışmalarım süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmalarım süresince beni destekleyen, bilgi ve tecrübeleriyle katkılarını esirgemeyen Arş. Görevlisi Sayın Emre ÖZER'e teşekkür ederim. Yüksek Lisans yapma hususunda teşvik eden ve bu süreçte desteklerini esirgemeyen abim Mustafa KARBEYAZ'a da ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamı tamamlamada yardımcı olan Astaş Isıl İşlem ve MKE Silahsan A.Ş. firmalarına destekleri için minnettarım.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İTHAF SAYFASI	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	3
3. ZIRH MALZEMELERİ	17
3.1. Zırh Malzemelerinin Dinamik Davranışı ve Önemli Kavramlar.....	17
3.1.1. Gerinim Hızı	17
3.1.2. Gerilme Dalgaları	18
3.1.2.1. Elastik ve Plastik Dalgalar.....	18
3.1.2.2. Şok Dalgaları	19
3.1.3. Akış Gerilmesi	20
3.2. Zırh Malzemesi Türleri	21
3.2.1. Metal Zırh Malzemeleri	21
3.2.1.1. Çelik Zırhlar	22
3.2.1.1.1. Haddelenmiş Homojen Zırh.....	22
3.2.1.1.2. Yüksek Sertlik Zırhı	23
3.2.1.1.3. Değişken Sertliğe Sahip Zırh	23
3.2.1.1.4. Delikli Zırh.....	25
3.2.1.2. Alüminyum Alaşımli Zırhlar	26

3.2.1.3.	Magnezyum Alaşımli Zırhlar.....	27
3.2.1.4.	Titanyum Alaşımli Zırhlar.....	28
3.2.2.	Seramik Zırh Malzemeleri.....	28
3.2.2.1.	Zırh Seramiklerinin Yapısı.....	29
3.2.2.2.	Seramik Zırhlarla İle İlgili İlk Çalışmalar.....	30
3.2.2.3.	Zırh Seramikleri.....	30
3.2.2.3.1.	Alümina (Al_2O_3).....	30
3.2.2.3.2.	Silisyum Karbür (SiC).....	30
3.2.2.3.3.	Bor Karbür (B_4C).....	31
3.2.2.3.4.	Titanyum Diborür (TiB_2).....	31
3.2.2.3.5.	Tungsten Karbür (WC).....	31
3.2.2.3.6.	Silisyum Nitrür (Si_3N_4).....	32
3.2.2.4.	Seramik Zırh Uygulamaları.....	32
3.2.2.4.1.	Şeffaf Zırh Uygulamaları.....	34
3.2.3.	Zırh Uygulamalarında Kullanılan Kompozit Malzemeler ve Dokuma Elyaf Kumaşlar.....	35
3.2.3.1.	Zırh Uygulamalarında Kullanılan Elyaflar.....	36
3.2.3.1.1.	Aramid Elyaflar.....	36
3.2.3.1.2.	Cam Elyaflar.....	37
3.2.3.1.3.	Bazalt Elyaflar.....	38
3.2.3.1.4.	Aşırı Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Elyaflar.....	39
3.2.3.1.5.	Polibenzobisoksazol (PBO) Elyaflar.....	40
3.2.3.1.6.	Karbon Elyaflar.....	40
3.2.3.2.	Uygulama Örnekleri.....	40
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	44
4.1.	Numunelerin Hazırlanması.....	44
4.2.	Numunelerin Isıl İşlem ve İyapı Çalışmaları.....	50
4.3.	Numunelerin Mekanik Deneyleri.....	55
4.4.	Numunelerin Balistik Testleri.....	57
5.	DENEY SONUÇLARI ve İRDELEME.....	60
5.1.	Mekanik Özellikler.....	60

5.2.	İçyapı İncelemesi	63
5.2.1.	Balistik Test Öncesi İncelemeler	63
5.2.2.	Balistik Test Sonrası İncelemeler	66
5.3.	Balistik Test Sonuçları	68
5.3.1.	Çelikler	73
5.3.2.	Katmanlı Kompozitler	81
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	90
	KAYNAKLAR	92
	ÖZGEÇMİŞ	101



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Zırhlı bir aracın zırh uygulamasında seramik tabanlı sistemlerin metal sistemlere kıyasla üstünlükleri ve zayıflıkları (Hazell, 2016).....	33
Çizelge 3.2. Askeri uygulamalarda kullanılan bazı elyafların mekanik özellikleri (Edwards, 2002)	36
Çizelge 4.1. AISI 4140 çeliğinin ağırlıkça kimyasal bileşim oranları (%)	44
Çizelge 4.2. Kürlenmiş akrilik esaslı yapıştırıcının mekanik özellikleri (Özer, 2015)	47
Çizelge 4.3. Yalın çelik numuneler	49
Çizelge 4.4. Katmanlı kompozit numuneler	49
Çizelge 4.5. 7,61 mm ZD merminin özellikleri (USMS, 1991).....	59
Çizelge 5.1. Çelik numunelerin ölçülen sertlik değerleri.....	60
Çizelge 5.2. Östempereleme sonrasında numunelerin mekanik özellikleri.....	61
Çizelge 5.3. Östemperlenmiş numunelerin darbe testi verileri	63
Çizelge 5.4. Yalın çeliklere ait balistik test sonuçları	73
Çizelge 5.5. Farklı çalışmalara ait balistik test sonuçları.....	80
Çizelge 5.6. SiC ön katmanlı kompozit numunelere ait balistik test sonuçları.....	81
Çizelge 5.7. Al ₂ O ₃ ön katmanlı kompozit numunelere ait balistik test sonuçları	82
Çizelge 5.8. Farklı katmanlı kompozit malzemelere ait balistik test sonuçları	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Gerinim hızlarının (s^{-1}) farklı değerleri için uygulanan deney yöntemleri (Meyers, 1994)	17
Şekil 3.2. Arayüzde elastik dalgaların iletimi ve yansıması (Hazell,2016)	18
Şekil 3.3. Mermi etkisiyle oluşan şok dalgasının kuramsal olarak evreleri (Hazell, 2016)	20
Şekil 3.4. Mermi hedef malzemeye çarptığı anda şok dalgası oluşmasına yol açan tek eksenli gerinim alanı (Hazell, 2016)	20
Şekil 3.5. Metal zırh malzemelerinin üretim yöntemleri (Hazell, 2016)	21
Şekil 3.6. Döner taretli döküm zırhtan üretilmiş olan Chieftain AMT (Hazell, 2016)	22
Şekil 3.7. Alman Kral Kaplan tankı (Hazell, 2016)	24
Şekil 3.8. İKSZ'lerin üretiminin şematik olarak gösterimi (Hazell, 2016).....	25
Şekil 3.9. Gövdesi ve kulesi Al alaşımından üretilmiş olan PMKA (Hazell, 2016)..	27
Şekil 3.10. Kristal yapıdaki seramik malzemelerin şematik olarak içyapısı (Hazell, 2016)	29
Şekil 3.11. FSP merminin nüfuz ettiği Kevlar-29 elyaf (Figucia, vd., 1982)	37
Şekil 3.12. Zırhında cam elyaf takviyeli polimer esaslı kompozit kullanılmış olan bir zırhlı araç (Hazell, 2016).....	38
Şekil 3.13. 5,6x45 mm SS 109 (L2A2) mermisi tarafından tahrip edilen Dyneema plakası (Iremonger, 1999)	39
Şekil 3.14. Askeri vücut zırhı (Bhatnagar ve Lang, 2006).....	41
Şekil 3.15. Avrupa ülkeleri askerleri için üretilmiş kask (Bhatnagar ve Lang, 2006)	41
Şekil 3.16. ABD polis zırhlı yeleği (Bhatnagar ve Lang, 2006)	42
Şekil 3.17. Zırhlı araba (Bhatnagar ve Lang, 2006).....	42
Şekil 3.18. Çeşitli uçaklara ait zırhlı parçalar (Bhatnagar ve Lang, 2006)	43
Şekil 4.1. AISI 4140 çelik numuneler	44

Şekil 4.2. Hazırlanan çekme ve darbe numuneleri.....	45
Şekil 4.3. Bu çalışmadaki daire kesitli metal malzemelerde kullanılan çekme numunesi ölçüleri (TSE, 2011b).....	45
Şekil 4.4. Dozaj tabancası ve akrilik esaslı yapıştırıcı (Özer, 2015).....	46
Şekil 4.5. (a) Al ₂ O ₃ ön katmanlı kompozit numune, (b) SiC ön katmanlı kompozit numune.....	47
Şekil 4.6. Yalın çelik numuneler.....	47
Şekil 4.7. SiC ön katmanlı kompozit numuneler	48
Şekil 4.8. Al ₂ O ₃ ön katmanlı kompozit numuneler.....	48
Şekil 4.9. Aynı alan yoğunluğuna sahip numunelerin kümelenmiş gösterimi.....	49
Şekil 4.10. Ortam denetimli kuyu tipi fırın	50
Şekil 4.11. AISI 4140 Çeliğine ait zaman-sıcaklık-dönüşüm (ZSD) diyagramı (Kesti, 2009)	51
Şekil 4.12. Östemperlenme işlemi tamamlanmış AISI 4140 çeliğinden plakalar.....	52
Şekil 4.13. Endogaz üretici	52
Şekil 4.14. Kesme cihazı Metkon Metacut-M 250 (sol), bakalite alma cihazı Metkon Ecompress 100 (orta), zımpara ve parlatma cihazı Metkon Forcipol 2V (sağ)	53
Şekil 4.15. JEOL/JSM-6335F marka taramalı elektron mikroskobu.....	53
Şekil 4.16. ZEISS SUPRA 50 VP marka taramalı elektron mikroskobu.....	54
Şekil 4.17. AKB incelemesi yapılan numunelerin çizgisel gösterimi.....	55
Şekil 4.18. OLYMPUS BX51 model ışık mikroskobu	55
Şekil 4.19. DARTEC-MTS marka çekme cihazı	56
Şekil 4.20. ALŞA 450 CE marka darbe cihazı.....	56
Şekil 4.21. BMS DIGIROCK-RBOV marka sertlik ölçüm cihazı	57
Şekil 4.22. Deneyleerde kullanılan G3 piyade tüfeği	57
Şekil 4.23. Balistik deney düzeneğine ait çizgisel gösterim	58
Şekil 4.24. 7,62 mm ZD mermiler	58

Şekil 4.25. (a) 7,62 mm ZD mermi fişegi çizgisel görünümü, (b) Mermi kesit görüntüsü (MIL-C-60617A, 1991)	59
Şekil 5.1. Çekme deneyi sonucunda kırılan çekme numuneleri	61
Şekil 5.2. Çekme numunelerinin kırılan yüzeyleri	61
Şekil 5.3. Çekme deneyi sonrasında elde edilen gerilme-gerinim eğrisi	62
Şekil 5.4. Charpy çentik-darbe numuneleri ve deney sonrasında kırılan yüzeyleri...	63
Şekil 5.5. Balistik test öncesi numunelerin x500 büyütmede içyapı görüntüsü	64
Şekil 5.6. Balistik test öncesi numunelerin x1000 büyütmede içyapı görüntüsü	64
Şekil 5.7. Al ₂ O ₃ seramik plakanın x500 ve x1000 büyütmelerde TEM görüntüleri..	65
Şekil 5.8. Al ₂ O ₃ seramik plakanın x2500 ve x5000 büyütmelerde TEM görüntüleri....	65
Şekil 5.9. SiC seramik plakanın x5000 büyütmede TEM görüntüsü.....	65
Şekil 5.10. SiC seramik plakanın x10000 büyütmede TEM görüntüsü.....	66
Şekil 5.11. Delik bölgesi yakınlarında görülen dönüşmüş AKB oluşumları	66
Şekil 5.12. Delik etrafında görülen tam dönüşmüş AKB oluşumu.....	67
Şekil 5.13. AKB içinde oluşan mikro çatlaklar.....	68
Şekil 5.14. Çelik plakanın sertliğinin sert çekirdeğe sahip mermiler karşısında balistik etkinliğe etkisi (Rosenberg, 2012)	70
Şekil 5.15. Çelik malzemede oluşabilecek hasar mekanizmaları (Rosenberg, 2012)....	70
Şekil 5.16. Bozucu ve soğurucu malzeme çiftinin oluşturduğu zırh sistemi (Hazell, 2016)	72
Şekil 5.17. (a) Arka katmanda şekil değişiminin bulunduğu durum (b) Arka katmanda şekil değişiminin bulunmadığı durum (Woodward, 1989)	72
Şekil 5.18. Farklı seramik türlerinin bağlı balistik etkinlik ve yoğunluk grafiği (Rosenberg, 2012).....	72
Şekil 5.19. Östemperlenme uygulanan yalın çeliklerin balistik atış sonrasında ön (sol) ve arka (sağ) görüntüleri a) 47 kg/m ² , b) 62,7 kg/m ² , c) 78,4 kg/m ² delinen, d) 78,4	

kg/m ² delinmeyen, e) 94,1 kg/m ² delinmeyen, f) 94,1 kg/m ² delinen, g) 109,8 kg/m ² , h) 125,4 kg/m ² ve i) 141,1 kg/m ²	74
Şekil 5.20. Arka yüzünde radyal çatlak oluşan numunelerin görüntüleri	75
Şekil 5.21. 62,7 kg/m ² alan yoğunluğuna sahip numunenin atış sonrası görüntüsü ..	75
Şekil 5.22. Atışların sonrasında bazı mermi kovanları ve mermi çekirdeklerinin aldığı görüntüler	76
Şekil 5.23. Farklı çalışmalarda elde edilen en iyi balistik başarımlardaki alan yoğunluğu değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi	80
Şekil 5.24. Ön katmanında SiC, arka katmanında östemperlenmiş AISI 4140 çeliği bulunan kompozit numunelerin balistik atış sonrası görüntüleri a) 62,7 kg/m ² iptal olan numune, b) 62,7 kg/m ² , c) 78,4 kg/m ² , d) 94,1 kg/m ² e) 109,8 kg/m ² , f) 125,4 kg/m ² , g) 141,1 kg/m ²	83
Şekil 5.25. Ön katmanında Al ₂ O ₃ , arka katmanında östemperlenmiş AISI 4140 çeliği bulunan kompozit numunelerin balistik atış sonrası görüntüleri a) 62,7 kg/m ² parçalanmış numune, b) 62,7 kg/m ² , c) 78,4 kg/m ² , d) 94,1 kg/m ² e) 109,8 kg/m ² , f) 125,4 kg/m ² , g) 141,1 kg/m ²	84
Şekil 5.26. Balistik test ardından arka katman çeliklerinde görülen eğilme a) AB-2 numunesi b) AB-3 numunesi	85
Şekil 5.27. Atış sonrası delinmeyen arka katman çeliklerinin yüzey görünümü	85
Şekil 5.28. Farklı çalışmalarda elde edilen en iyi balistik başarımlardaki alan yoğunluğu değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi	88

SİMGELER ve KISALTMALAR

A_0	İlk kesit alanı	(m ²)
A_Y	Alan yoğunluğu	(kg m ⁻²)
AA	Alüminyum alaşımı	(-)
AKB	Adyabatik kayma bandı	(-)
AMT	Ana muharebe tankı (MBT)	(-)
Al	Alüminyum	(-)
AlCl ₃	Alüminyum klorür	(-)
AlN	Alüminyum nitrür	(-)
Al ₂ O ₃	Alüminyum dioksit (alümina)	(-)
Au	Altın	(-)
B	Malzeme sabiti	(-)
B	Bor	(-)
B ₄ C	Bor karbür	(-)
BSD	Brinell sertlik değeri	(-)
C	Malzeme sabiti	(-)
C	Karbon	(-)
Co	Kobalt	(-)
Cr	Krom	(-)
Cu	Bakır	(-)
DPH	Düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği	(-)
E	Elastik modül	(Pa)
F	Çekme kuvveti	(N)
GEM	Geçirimli elektron mikroskobu (TEM)	(-)
h	Zırh malzemesi kalınlığı	(m)
HHZ	Haddelenmiş homojen zırh	(-)
İDM	İşlevsel dereceli malzeme	(-)
İKSZ	İki katlı sertlik zırhı	(-)
KPS	Kıvılcım plazma sinterleme	(-)
l_0	İlk boy	(m)
Mg	Magnezyum	(-)
MgAl ₂ O ₄	Magnezyum alüminat spinel	(-)

MKA	Muharebe keşif aracı (CVR)	(-)
Mn	Mangan	(-)
Mo	Molibden	(-)
M _b	Martenzit başlangıç	(-)
<i>n</i>	Malzeme sabiti	(-)
N	Azot	(-)
Na	Sodyum	(-)
Nb	Niobyum	(-)
Ni	Nikel	(-)
PBO	Polibenzobisoksazol	(-)
Pd	Paladyum	(-)
PMKA	Paletli muharebe keşif aracı (CVR(T))	(-)
PSA	Piyade savaş aracı (Warrior IFV)	(-)
RSD-C	Rockwell sertlik değeri C	(-)
<i>s</i>	Malzeme sabiti	(-)
Si	Silisyum	(-)
SiC	Silisyum karbür	(-)
Si ₃ N ₄	Silisyum nitrür	(-)
SİS	Sıcak izostatik sıkıştırma	(-)
<i>T</i>	Gerilmenin hesaplandığı sıcaklık	(°C)
<i>T_e</i>	Ergime sıcaklığı	(°C)
<i>T₀</i>	Referans sıcaklık	(°C)
<i>T*</i>	Boyutsuz benzer sıcaklık (normalleştirilmiş sıcaklık)	(-)
TEM	Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	(-)
Ti	Titanyum	(-)
TiB	Titanyum borür	(-)
TiB ₂	Titanyum diborür	(-)
V	Vanadyum	(-)
W	Tungsten	(-)
WC	Tungsten karbür	(-)
YSZ	Yüksek sertlik zırhı	(-)
ZD	Zırh delici	(-)
ZDKDTM	Zırh delici kanat dengeli tank mermisi (APFSDS)	(-)

Zn	Çinko	(-)
ZSA	Zırhlı savaş aracı (AFV)	(-)
ZSD	Zaman sıcaklık dönüşüm	(-)
ZPT	Zırhlı personel taşıyıcı (APC)	(-)
ZrO ₂	Zirkonyum dioksit (zirkonya)	(-)
Δl	Uzama miktarı	(m)
α_k	Yarım koniklik açısı	(°)
ε	Mühendislik gerinimi	(-)
ε_e	Gerinim	(-)
$\dot{\varepsilon}$	Gerinim hızı	(s ⁻¹)
$\dot{\varepsilon}^*$	Boyutsuz plastik gerinim hızı	(-)
ρ	Yoğunluk	(kg m ⁻³)
σ_a	Akış gerilmesi	(Pa)
σ_A	Akma dayanımı	(Pa)
σ_ζ	Mühendislik gerilmesi	(Pa)
σ_I	Gelen şok dalgası	(Pa)
σ_R	Yansıyan şok dalgası	(Pa)
σ_T	İletilen şok dalgası	(Pa)

Alt İndisler

1	Arka katman (metal)
2	Ön katman (seramik)

1. GİRİŞ

Günümüzde ülkeler savunma teknolojileri üzerine ayrıntılı araştırmalar ve yatırımlar yapmaktadır. Silah teknolojisinde yaşanan gelişmeler zırh teknolojisinde de gelişmeleri zorunlu kılmaktadır. Günümüzde zırh dayanımını artırmak amacıyla eskiden yapılanın aksine malzeme kalınlığını artırmak yerine daha çok malzeme teknolojisindeki yeni gelişmelere başvurulmaktadır. Gelişmiş üretim teknikleri, analitik hesaplama yöntemlerinin kullanımı, kompozit malzemeler ve seramik malzemelerin kullanımıyla geçmişe kıyasla zırh sistemlerinin ağırlığı önemli ölçüde azalırken dayanımları ise önemli ölçüde artmıştır (Hazell, 2016).

Malzeme seçimi zırh uygulamalarında en önemli aşamadır. Zırh malzemesinin balistik dayanımının yüksek olması beklenmektedir. Zırh malzemesinin kolay şekillendirilebilir olması ve temininin kolay olması da beklenen özelliklerdendir. Çeliğin bu özellikleri barındırmasından dolayı halen zırh malzemesi olarak yaygın şekilde kullanıldığı bilinmektedir.

Bu çalışmada, orta karbonlu düşük alaşımlı bir çelik olan AISI 4140 çeliği zırh malzemesi olarak denenmiştir. Çelik 860 °C’de östenitleştirme işlemine tabii tutulduktan sonra tuz banyosunda 343 °C’de 50 dakika boyunca tutulmuş ve alt beynit fazı elde edilmiştir. Gerçekleştirilen ısıl işlemin ardından östemperleme işleminin çeliğin balistik davranışına ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Yalın çelik, silisyum karbür (SiC) seramik ön katmanlı kompozit ve alümina (Al₂O₃) seramik ön katmanlı kompozit olmak üzere aynı alan yoğunluğuna sahip üç farklı numune kümesi oluşturulmuş ve balistik başarımları incelenmiştir. Kullanılan kare şeklindeki SiC ve Al₂O₃ seramik plakalar 50x50 mm ebatında olup SiC plakalar 8,5 mm ve Al₂O₃ plakalar ise 9,3 mm kalınlığındadır. Yalın çelikler ve katmanlı kompozit numuneler 6 farklı alan yoğunluğunda denenmiştir. Yalın çelikler fazladan bir numune kalınlığında daha balistik teste tabii tutulmuştur. Testler 7,62 mm zırh delici (ZD) mermiler ile gerçekteştirilmiştir. Yalın çelik ve katmanlı kompozitlerde her kalınlık değerini için 3’er eş numune denenmiştir.

Çekme testi ve çentik darbe testi ile AISI 4140 çeliğinin ısıtılma sonrası mekanik özellikleri incelenmiş, sertlik değerleri Rockwell sertlik değeri C (RSD-C) cinsinden ölçülmüştür. Ayrıca ışık mikroskobu vasıtasıyla içyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Balistik test sonrasında ise delinen numunelerde oluşan adyabatik kayma bantları da ışık mikroskobuyla incelenmiştir. AISI 4140 çeliğine uygulanan östemperleme işlemi sonrası oluşturulmuş olan ve aynı alan yoğunluğuna sahip yalın çelik numunelerin, seramik ön katmanı SiC'den oluşan kompozit numunelerin ve seramik ön katmanı Al₂O₃'ten oluşan kompozit numunelerin balistik başarımları karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Anderson ve Royal-Timmons, gerçekleştirdikleri çalışmada farklı sınırlandırmalar altında seramik plakaların balistik başarımlarını incelemişlerdir. Deneylerde kullanılan seramik malzeme %99,5 saflığa sahip ve 2,54 cm kalınlığındaki alüminadır. Farklı sınırlandırmalar altında farklı iki darbe hızında (1,79 ve 1,52 km/s) çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Sınırlandırmalar, radyal çift plaka sınırlandırma, radyal tek plaka sınırlandırma, radyal sınırlanmış ve tamamen serbest olacak şekildedir. Alümina seramik plakaların arkasındaki çelik plakaların batma derinlikleri ölçülerek karşılaştırılmış ve sınırlandırma koşulları arttıkça malzemelerin balistik başarımında artış kaydedildiği görülmüştür (Anderson ve Royal-Timmons, 1997).

Arslan ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada basınçsız emdirme yöntemiyle oluşturulan alüminyum (Al)-bor karbür (B₄C) kompozitlerinin balistik başarımlarını inceleme altına almışlardır. Yapılan deneysel çalışmada 841 m/s'den daha yüksek hıza sahip AP-M2 mermiler ile 853 m/s'den daha yüksek hıza sahip Ball-M2 mermiler kullanılmıştır. Farklı mekanik özellik ve içyapılara sahip numunelerle gerçekleştirilen çalışma neticesinde yaklaşık 40 kg/m² alan yoğunluğunda balistik başarım elde edilebilmiştir (Arslan, vd., 2008).

Atapek ve Karagöz, gerçekleştirdikleri çalışmada 7,62 mm ZD mermi karşısında beynit içyapısındaki bir çeliğin darbe davranışını araştırmışlardır. Kullanılan çeliğin içeriği %0,23 karbon (C), %0,19 mangan (Mn), %0,19 silisyum (Si), %2,35 kobalt (Co), %1,4 krom (Cr) şeklindedir. Beynit eldesi için sırasıyla östenitleme, su verme ve tavlama gerçekleştirilerek çelikte 36 RSD-C değerinde sertliğe ulaşılmıştır. Atışlar 0 derecede ve 840 m/s hıza sahip mermilerle gerçekleşmiştir. Atışların ardından delik oluşum bölgelerinde içyapı ve kırılma mekanizmalarıyla ilgili incelemeler yapılmıştır. İçyapıda delinme doğrultusu boyunca adyabatik kayma bantları görülmüştür. Ayrıca delik bölgesinde sünek kırılma gözlemlenmiştir. Adyabatik kayma bantlarına bağlı olarak çatlaklar ve sünek kırılmaya bağlı olarak delik bölgesinde yapraklanma tespit edilmiştir (Atapek ve Karagöz, 2011).

Atapek, zırh çeliğinde yeni bir alaşımlandırma tasarımı üzerine çalışmalar yapmıştır. Çelikte orta karbon ve alaşım elementinin yanında bor katkısı kullanmıştır. Çelikte farklı ısıl işlem ve bileşimler uygulamak suretiyle değişen içyapı özelliklerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde istenen düzeydeki mekanik özelliklere yalnızca ısıl işlem ile ulaşılabileceği sonucu ortaya çıkmıştır (Atapek, 2006).

Balcı ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada sıcak sıkıştırma yöntemiyle üretilen üç katmanlı işlevsel dereceli malzemenin (İDM) balistik başarımını 7,62 mm ZD mermiler kullanarak incelemiştir. İDM numunelerinin orta ve üst katmanı farklı boyutlarda B₄C parçacıkları ihtiva eden 7075 alüminyum alaşımı (AA) kompozit katmanlarından; alt katman bölümü ise takviyesiz AA7075 alaşımından oluşmaktadır. Katmanlardaki değişik sertlik değerleri farklı sıcaklıklardaki yaşlandırma süreleri ile belirlenmiştir. Gerçekleştirilen balistik deneylerde İDM kümeleri aynı kalınlık ve bileşime sahip olurken farklı beş numune kümesi kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde İDM’de bor karbür içeriği ve kalınlığının artmasının balistik başarımı artırdığı görülürken numunelerin hiçbirinde katmanda ayrılma görülmemiştir. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde İDM’de tam başarım görülmesi için 25 mm’den daha fazla kalınlığa sahip olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır (Balcı, vd., 2013).

Chabera ve arkadaşları, kompozit zırh sistemlerinin balistik darbe davranışını inceleme üzerine sayısal ve deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çözümlerden alınan veriler ışığında farklı seramik türleri ile oluşturulmuş iki farklı kompozit zırh tasarlamışlardır. Bu kompozitlerden birinde ön katmanda alümina kullanılırken diğerinde SiC kullanılmıştır. Arka katman için ise yüksek dayanımlı Armox 500T çeliği seçilmiştir. Deneylerde hızı 850 m/s olan 7,62 mm ZD mermiler kullanılmıştır. Ön katmanı ve arka katmanı farklı kalınlıklarda olan ve birbirinden farklı alan yoğunluklarına sahip numuneler oluşturulmuştur. Deney neticesinde en iyi sonuç 6,6 mm kalınlığında SiC ön katmanına ve 6 mm kalınlığında çelik arka katmanına sahip kompozitte elde edilmiştir. Silisyum karbürün üstün mekanik özellikleri sayesinde arka katmanda bulunan çelikte hiçbir deformasyon oluşmamıştır (Chabera, vd., 2015).

Demir ve Übeyli, yaptıkları çalışmada 7,62 mm ZD mermi karşısında AISI 4140 çeliğinde gerçekleşen hasar oluşumunu inceleme altına almışlardır. Balistik test sonrası çeliklerin içyapıları incelenmiş olup numunelerde iki farklı adyabatik kayma bantı oluşumu gözlemlenmiştir. Kayma bantı oluşumu tüm numunelerde gözlemlenirken dönüşmüş bant oluşumları 50 ve 60 RSD-C sertlik değerine sahip numunelerde gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen deney sonuçları, oluşan kayma bantlarının türlerinin ve sertliklerinin; çelik numunelerin sertlik ve balistik dayanımı ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Mermi hareketine karşı direncin artışı dönüşmüş bant oluşumunda etkili olmuştur (Demir ve Übeyli, 2011).

Demir ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada DIN 100Cr6 ve AISI 4340 çeliklerinin balistik davranışını inceleme altına almışlardır. Çalışmada beş farklı alan yoğunluğu ve dört farklı sertlik değeri kullanılmıştır. 7,62 mm ZD mermilerin kullanıldığı söz konusu çalışmada alan yoğunluğu ve sertlik değerlerinin çeliğin balistik başarımına etkisi incelenmiştir. Dört farklı ısıtma işlemiyle dört farklı sertlik değeri elde edilebilmiştir. Atışların sonrasında mikro ve makro incelemeler gerçekleştirilmiştir. 50 RSD-C değerindeki AISI 4340 çeliği en yüksek balistik başarımı kaydetmiştir. Sadece sertliğin monevişlenmiş martenzitli çelikte balistik davranışın belirlenmesinde yeterli olmadığı tespiti yapılmıştır (Demir, vd., 2009a).

Demir ve arkadaşları, AISI 4140 çeliği, 5083 ve 7075 Al alaşımlarının balistik davranışını incelemiştir. Çalışmada 7,62 mm ZD mermiler kullanılmıştır. Dayanım ve sertliğin balistik başarım üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla malzemelere farklı ısıtma işlemleri uygulanmıştır. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde incelenen malzemeler arasında 7075-T651 Al alaşımı en yüksek balistik başarımına sahip malzeme olmuştur (Demir, vd., 2008).

Demir ve arkadaşları, ön katmanı alüminadan oluşan katmanlı kompozit malzemedeki AISI 4340 çeliğinin balistik başarımını incelemiştir. Çalışmada 7,62 mm ZD mermiler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada arka katman malzemesi olan 4340 çeliğinin mekanik özellikleri ile alan yoğunluğunun kompozit malzemenin balistik başarımına etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen testler

neticesinde en iyi balistik başarımın 40 ve 50 RSD-C değerine sahip arka katman çeliklerinde görüldüğü tespit edilmiştir (Demir, vd., 2009b).

Deniz, gerçekleştirdiği çalışmada AISI 4340 çeliğinden üretilen yalın plaka numunelerin 7,62 mm ZD mermiler tarafından delinmesi ve delinme sürecini incelemiştir. Gerçekleştirilen ısıtım işlemleri ile dört farklı sertlik değeri elde edilmiştir. 2 ve 3 boyutlu sayısal benzetim gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen değerlendirmede iki boyutlu benzetimlerin mermilerin artık hızları, üç boyutlu benzetimlerin balistik sınır kalınlıkları ve mermi artık hızları açısından uyum içinde oldukları gözlemlenmiştir. Artan plaka sertlik değerinin balistik başarımı artırdığı gözlemlenmiştir (Deniz, 2010).

Dey ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada çelik plakalar üzerindeki delik oluşumuna dayanımın etkisini incelemiştir. Weldox 900 E, Weldox 700 E ve Weldox 460 E malzemelerini kullanmışlardır. Üç değişik tip çekme testi uygulayarak üç eksenli gerilme, yumuşama sıcaklığı, gerinim sertleşme hızı ve gerinim sertleşmesinin malzemelerin süneklik ve dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Atışlarda basınçlı gaz silahı ile sivri kemer uçlu, konik ve yuvarlak üç tip mermi kullanılmıştır. Mermi hızları en yüksek 350 m/s değerine ulaşmıştır. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde yuvarlak uçlu mermi kullanılarak yapılan deneylerde balistik sınır hızında, malzeme akma dayanımı arttıkça azalma kaydedilmiştir. Diğer mermilerde bu durumun tersi davranış gözlemlenmiştir (Dey, vd., 2004).

Dey ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada sivri ve yuvarlak uçlu mermiler kullanarak çift katmanlı çelik plakalarda sayısal ve deneysel olarak balistik dayanımı incelemiştir. Deneyler için toplamda 12 mm kalınlığında Weldox 700 E malzemesi kullanılarak katmanlı veya yalın numuneler hazırlanmıştır. Atışlarda basınçlı gaz silahı kullanılmış ve farklı hedef bileşimleri için sınır hızları incelenmiştir. Yuvarlak uçlu mermi kullanıldığında çift katmanlı numunelerde balistik sınırda yüksek artış gözlemlenirken sivri uçlu mermilere bu üstünlük yok olmuştur. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde çift katmanlı numune kullanılmasının koruma seviyesinde artış sağladığı sonucuna ulaşılmıştır (Dey, vd., 2007).

Fu ve arkadaşları, bir çeşit dökme çelikten havada sertleştirme işlemi ile beynit eldesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çelik içeriği %0,30-0,45 C, %1,5-2,5 Mn, %1,5-2 Si, %0,5-1 nikel (Ni) ve çok küçük oranlarda bor (B), titanyum (Ti), vanadyum (V) şeklindedir. Dökme çelikte havada sertleştirme işleminin ardından beynit ve kalıntı östenit eldesi gerçekleşmiştir. 900 °C'den havada soğutma ardından 210 °C derecede tavlama ile sertlik 50 RSD-C, çekme dayanımı 1800 MPa ve darbe dayanımı 30 J /cm² olarak elde edilmiştir (Fu, vd., 2009).

Garbarz ve Niznik-Haranczyk, yaptıkları çalışmada bir çeşit nano yapıdaki beynitik-östenitik çeliğin darbe dayanımını artırmak amacıyla farklı bir ısıl işlem yöntemi geliştirme üzerine çalışmışlardır. Çelik içeriği %0,55 C, %1,82 Si, %1,95 Mn, %1,29 Cr ve %0,72 molibden (Mo) şeklindedir. Çelik martenzit başlangıç (M_b) sıcaklığının altında bir sıcaklık olan 160 °C'ye soğutularak kısmi martenzit eldesi gerçekleştirilmiş ardından eşsıcaklıkta dönüşümle 225 °C'de 70 saat süreyle tutularak beynit eldesi gerçekleştirilmiştir. Bu işleme GSIT çevrimi adı verilmiştir. GSIT çevriminin ardından Charpy darbe enerjisinde geleneksel ısıl işleme göre %69 artış kaydedilmiştir (Garbarz ve Niznik-Haranczyk, 2015).

Haque ve arkadaşları, alümina seramik ön katmanına sahip S2-cam/vinilester kompozit malzemesinin araç zırhı uygulamaları için darbe altında balistik başarımını incelemişlerdir. Farklı kalınlıklarda delinme mekanizması, artık hız, enerji kırılımı ve balistik sınırı karşılaştırmışlardır. Seramik malzeme olarak alümina kullanılmış olup epoksi ara katman yapıştırıcısı olarak seçilmiştir. Birbirinden farklı alan yoğunluklarının elde edilebilmesi amacıyla farklı ön ve arka katman kalınlıkları kullanılmıştır. Balistik sınırın en yüksek değerini elde etmek amacıyla en uygun alan yoğunluğu ve katman kalınlığı oranı belirlenmiştir. Katman kalınlık oranının en uygun değerinin belirlenmesinin amacı olabilecek en hafif durumda balistik koruma sağlayabilmektir. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde katman kalınlık oranının en uygun değerinin 1 ile 1,25 arasında olduğu görülmüştür (Haque, vd., 1999).

Holmen ve arkadaşları, 6070 Al alaşımından 20 mm kalınlığında plakalar hazırlamışlardır. Plakalara T7 (aşırı yaşlandırılmış), T6 (yapay yaşlandırma), T4 (doğal yaşlandırma) ve O (tavlanmış) ısıl işlemlerini uygulamışlardır. Hazırlanan

plakalar üzerinde 7,62 mm ZD mermiler kullanarak balistik test gerçekleştirmişlerdir. Çekme testi uygulayarak malzemenin mekanik özelliklerindeki değişiklikleri incelemişleridir. Malzemenin sünekliğinde, gerinim sertleşmesinde ve dayanımında ısıtılma işlemi sonrası büyük değişiklikler olduğunu kaydetmişlerdir. Yapılan balistik testlerde hemen hemen hiç parçalanmanın görüldüğü O ısıtılma işleminde en yüksek süneklik durumu gözlemlenmiştir. Çoğunlukla parçalanmanın görüldüğü T6 ısıtılma işleminde ise yüksek derecede gevrek yapı elde edilmiştir. Bu amaç için balistik çalışmada dayanımın süneklikten daha etkili olduğu ortaya çıkmıştır. Analitik hesaplamalarla deneysel veriler karşılaştırılmıştır (Holmen, vd., 2013).

Jeffrey, gerçekleştirdiği çalışmada zırh seramiklerinin sertlik tayini üzerine çalışmıştır. Sertliğin bilinmesiyle akma dayanımı, elastik özellikler, kırılma tokluğu üzerine yorum yapılabilmektedir. Sertlik ölçme yöntemlerinde kullanılan batma derinliği, yükleme hızı, batma yükü, malzeme yüzey pürüzlülüğü, uç şekli ve içyapı sonucu etkilemektedir. Gerçekleşen çalışmada Knoop ve Vickers uçlarıyla 0,98-98 N yük aralığı içinde sertlik ölçümleri alınmıştır. 19,6 N batma yüklü Knoop'un en iyi yöntem olduğu görülmüştür (Jeffrey, 2004).

Jena ve arkadaşları, 7017 Al alaşımına ve yüksek dayanımlı zırh çeliğine 830 ± 10 m/s hızına sahip 7,62 mm ZD mermiler ile balistik test uygulamışlardır. Değişen mekanik özelliklerin çeliğin balistik davranışına etkisini incelemek amacıyla zırh çeliğinde iki farklı ısıtılma işlemi gerçekleştirilmiştir. 910 °C'de östenitleştirme ardından çelik yağda soğutulmuştur. Soğutma işleminin ardından 200 °C ve 650 °C'de monevişlemeye tabi tutulmuştur. Zırh çeliği ve 7017 Al alaşımının balistik başarımları karşılaştırılmıştır. Beraberinde adyabatik kayma bandı (AKB) oluşumları gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde en yüksek balistik başarımın 200 °C'de monevişlenen zırh çeliğinde görüldüğü tespit edilmiştir (Jena, vd., 2010a).

Jena ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada yüksek dayanımlı zırh çeliğini 910 °C sıcaklıkta östenitleştirme işlemine tabii tutmuşlar ardından yağda soğutarak tam martenzitik yapı eldesi sağlamışlardır. Numuneler farklı sıcaklıklarda monevişlemeye tabi tutmuşlardır. Gerçekleştirilen ısıtılma işlemlerinin ardından içyapı incelemesi ve mekanik testler uygulanmış olup sertlik, darbe dayanımı, çekme

dayanımı, süneklik incelemesi yapılmıştır. 840 ± 15 m/s hıza sahip mermilerle numuneler balistik teste tabii tutulmuştur. İçyapı ve ısıl işlemin etkisinin eliğın balistik başarımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen alışmalar neticesinde 200 °C’de menevişlenen numunelerin en yüksek balistik başarımı sergiledikleri gözlemlenmiştir (Jena, vd., 2010b).

Jovicic ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada arka katmanlarında epoksi içine gömülü seramik küreler bulunan işlevsel dereceli kompozitin balistik dayanımını incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçları seramiğe göre ağırlık artışı olmadan 1000 m/s balistik sınır elde edilebileceğini göstermiştir. Gerçekleştirilen çalışmada epoksi içinde gömülü küreler için hasara dayalı ve orana bağılı model ile arka katman için çift fazlı yaklaşık elyaf/epoksi modeli incelenmiştir (Jovicic, vd., 2000).

Lee ve Yoo, gerçekleştirdikleri çalışmada seramik/metal katmanlı kompozit zırhına 40,7 g ağırlığındaki elik mermilerle atış yapmış ve zırhın deneysel ve sayısal çözümlemesini ortaya koymuşlardır. Toplam alan yoğunluğu eşit olacak şekilde ilave hafif zırhın kalınlığını değıştirmek suretiyle balistik başarımı incelemişlerdir. Sayısal alışmada Düzleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (DPH) şeması kullanılmıştır. Gerçekleştirilen özömler neticesinde en uygun ön katman/arka katman plakası kalınlığı oranı tespit edilmiştir. Bu oran 2,5 civarındadır. 3 ila 1,5 arasında kompozit malzeme başarımında göze çarpan bir fark görülmemiştir (Lee ve Yoo, 2001).

Lopez ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada alümina/Al zırh malzemesinde yapıştırıcı kalınlığının balistik başarım üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapıştırıcı malzeme olarak epoksi reçine tercih edilmiştir. Deneysel testlerle birlikte sayısal benzetim de gerçekleştirilmiştir. özömler en yüksek başarımı sağlamak için uygun katman kalınlığını vermiştir. Bütün elik zırh plakası yerine (60 RSD-C Sertlik) ön katman malzemesi için seramik plaka kullanıldığı zaman ağırlıkta %65’e kadar azalma elde edilebilmektedir. Seramiklerin yüksek maliyetinden dolayı personel koruyucusu dışında veya tasarımda en büyük önceliğın hafiflik olmadığı şartlarda durumu dengelemek amacıyla alümina kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen alışma neticesinde zırh malzemesi etkinliğine yapıştırıcı kalınlığıyla ilgili üç farklı durumun etkidiğı gözlemlenmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının azalması ile beraber yapıştırıcıdaki

(Medvedovski, 2002). Medvedovski gerçekleştirdiği bir diğer çalışmada alümina-mullit seramik malzemelerinin aşınma direnci ve balistik başarımını inceleme altına almıştır. Seramik malzemelerin balistik deneyleri için M16 silahı kullanılmıştır. Uygun arka katman malzemesi ile gereken koruma seviyesi esas alınarak farklı mermi çeşitleri kullanılmıştır. Aşınma direnci ve balistik başarım içyapı ve faz bileşiminin bir işlevi olarak nitelendirilmiştir (Medvedovski, 2006).

Mirak ve Nili-Ahmadabadi, gerçekleştirdikleri çalışmada düşük alaşımlı ve yüksek dayanımlı bir çeliğe uygulanan birkaç farklı ısıl işlemin çeliğin içyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma için AISI 4130 çeliği seçilmiştir. İçyapı özelliklerini incelemek için taramalı elektron mikroskobu ve ışık mikroskobundan yararlanılmışlar; mekanik özellikleri incelemek için ise Charpy darbe deneyi ve çekme deneyini uygulamışlardır. Yapılan çalışma sonucunda; ardışık östemperleme işlemiyle, geleneksel östemperleme ve havada soğutma işlemine göre çeliğin mekanik özelliklerinde daha iyi artış sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte en yüksek mekanik özelliklere su verme neticesinde ulaşıldığı bilinmektedir. AISI 4130 çeliği ile gerçekleşen bu çalışmada, östemperleme sıcaklığındaki yükselme ile beyritik ferritin genişliğinde uzunluğuna göre daha yüksek artış olduğu görülmüştür (Mirak ve Nili-Ahmadabadi, 2004).

Mishra ve arkadaşları, 200'den 600 °C'ye kadar sıcaklıklarda 25 mm kalınlıktaki zırh çeliği plakasını menevişlemeye tabii tutmuşlardır. Ardından 7,62 mm ZD mermilerle balistik test gerçekleştirmişleridir. Uygulanan menevişleme sıcaklığının artmasının malzemenin sertliğinde düşmeye neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu duruma bağlı olarak batma derinliğinde artma olduğu görülmüştür. Batma derinliğinin en düşük değeri 200 °C'de menevişlemeye tabii olan plakada tespit edilmiştir. Balistik test sonrası delik bölgesindeki içyapılarda 400 °C'ye kadar menevişlenen malzemelerde çatlağa sebep olan AKB görülmüştür. 600 °C menevişleme sıcaklığında adyabatik kayma bandı oluşmamıştır (Mishra, vd., 2012).

Murr ve arkadaşları, ferritik paslanmaz çelik/1100 Al, soda kireç camı/1100 Al, soda kireç camı/bakır (Cu) ve 1100 Al/Cu numunelerin mermi/hedef davranışlarını geçirimsiz elektron mikroskobu (GEM) ve taramalı elektron mikroskobu (TEM) ile

incelemişlerdir. Çalışmada 3,18 mm çapında hızları 0,8-6 km/s aralığındaki küresel mermiler kullanılmıştır. Referans hızı 1 km/s iken oyukların derinlik/çap oranı 2,95 ile 0,2 aralığında ölçülmüştür. Doğrusal olarak elastik modül ve yığın yoğunluğu oranları ile ilişkili olduğu görülmüştür. İyapılar yeniden kristalleşme bölgelerine göre nitelenmekle beraber dislokasyonların yoğunluğu bu bölgeden ötede azalmaktadır. Çalışmadan alınan veriler ile bilgisayar destekli sayısal benzetim gerçekleştirilmiştir. Sayısal benzetimden alınan sonuçlar uygun olan mermi/hedef dayanım değerinin önemini göstermektedir (Murr, vd., 1998).

Pettersson ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada Ti-Titanyum diborür (TiB_2) işlevsel dereceli kompozit malzemenin zırh olarak kullanımını inceleme altına almışlardır. Çalışmada kıvılcım plazma sinterleme (KPS) sıkıştırma ve birleştirme işlemidir. Deneylerde 7,62 mm ZD tungsten çekirdekli mermiler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde yüksek sertlikteki dış zırh katmanının saf seramik malzemeden olmaması gerektiği sonucu ortaya çıkmıştır. Çalışmada KPS'nin uygunluğunu doğrulamak amacıyla KPS-(Ti)0,05(TiB_2)0,95 ve sıcak izostatik sıkıştırma (SİS)- TiB_2 arasında mekanik ve balistik özellikler karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde KPS'nin daha iyi koruyucu olduğu tespiti yapılmıştır (Pettersson, vd., 2005).

Reaugh ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada farklı beş seramiğin balistik davranışını incelemişlerdir. Kullanılan numuneler TiB_2 , alüminyum nitrür (AlN), B_4C , SiC ve Al_2O_3 seramikleri ile çelik arka katmana sahip katmanlı kompozitlerdir. Çalışmada 25,4 mm uzunluğa, 6,35 mm çapa sahip dik dairesel tungsten mermiler kullanılmıştır. Mermi hızları 1,35'den 2,65 km/s'ye değişmektedir. Kullanılan seramiklerde merminin arka katmanı oluşturan çeliğe nüfuz etmemesi için gerekli en düşük alan yoğunluğu değerleri belirlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde her seramik için merminin darbe hızında artış oldukça gerekli alan yoğunluğunun doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. AlN seramiği içinse bu artış düşüktür. AlN'ün düşük darbe hızlarında başarımı düşüktür ancak beş seramik arasında yüksek darbe hızlarında başarım açısından en iyi seramik olduğu görülmüştür (Reaugh, vd., 1999).

Roberson ve Hazell, gerçekleştirdikleri çalışmada SiC plakaların tungsten karbür (WC) çekirdekli 7,62x51 mm mermiler karşısında balistik dayanımını incelemişlerdir. Çalışmada farklı sertlik ve yoğunluğa sahip plakalar kullanılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde zırh tasarımında kullanılacak olan SiC plakalarda plaka özellikleri yanında yeterli balistik dayanımın sağlanması için kritik kalınlık değerinin de önemli olduğu sonucu ortaya çıkmıştır (Roberson ve Hazell, 2003).

Rose ve arkadaşları, Cambridge Üniversitesi'nde akademik bir çalışma olarak üstünbeynit (süperbeynit) isimli bir ürün geliştirmişler ve ardından yaptıkları çalışma Cambridge Üniversitesi, Birleşik Krallık Savunma Bakanlığı ve Tata Steel firması tarafından ortaklaşa yürütülen çalışmalar sonucunda zırh plakası olarak ticari bir ürün haline getirilmiştir. Üretilen çeliğin içeriği %0,85 C, %0,75 Si, %1,4 Mn, %0,015 P, %0,01 S, %1 Cr, %0,3 Mo şeklindedir. Elde edilen çelik çok ince taneli yapıda olup içeriğinde karbürler bulunmamaktadır, kalıntı östenit seviyesi ise oldukça yüksektir. Çekme dayanımı yaklaşık 2200 MPa seviyesindedir ve son halini alana dek üzerinde pek çok deneme ve iyileştirme yapılmıştır (Rose, vd., 2014).

Sadanandan ve Hetherington, alümina/43A çeliği ve alümina/5083 Al alaşımının açılabilir darbe altında balistik başarımını gözlemlemişlerdir. Deneyde İngiltere menşeli yuvarlak çekirdekli mermiler ile 7,62 mm FFV İsveç ZD mermileri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada ZD mermi ve yuvarlak çekirdekli mermi arasındaki farklar incelenirken, kompozit numunelerde bulunan hatalar da tanımlanmıştır. Deneysel değerlerin kuramsal modellerle karşılaştırıldığında uyum gösterdiği görülmüştür. Çözümlemelerde balistik sınır hızının eğimle birlikte arttığı görülmüştür (Sadanandan ve Hetherington, 1997).

Übeyli ve arkadaşları, SiC ile takviye edilmiş işlevsel dereceli malzemenin balistik davranışını araştırmışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmada seramik ve metal tozlardan toz metalürjisi yöntemi uygulanarak üretilen farklı kalınlıklarda SiC-AA7075 İDM kullanılmıştır. Numunelerde balistik testin öncesinde çökelti sertleşmesi belirlenmiştir ve içyapı mikroskop ile incelenmiştir. 7,62 mm ZD mermiler kullanılarak 775-800 m/s hızında balistik test gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deney neticesinde işlevsel dereceli malzemenin 25 mm'ye kadar mermi darbesine dayanamadığı

gözlemlenmiştir. Numunelerde delik oluşumu ve büyük çatlaklar görülmüştür. Ayrıca şekil değişim bölgeleri civarlarında bozulmuş ve uzamış taneler ile mikro çatlaklar gözlemlenmiştir (Übeyli, vd., 2014).

Übeyli ve arkadaşları, bir düşük alaşımlı ve düşük karbonlu çeliğin ara kritik tavlama şartlarında balistik başarımını incelemişlerdir. Numunelerde yüksek mekanik özellikler sağlamak amacıyla çelikte martenzit ve ferrit çift fazı elde etmişlerdir. Tam tavlama ve farklı üç sıcaklıktaki ara kritik tavlama ısı işlemleri uygulanarak ve 7,62 mm ZD mermiler kullanılarak farklı dört adet numune kümesi üzerinde balistik test gerçekleştirilmiştir. Test sonucunda çelikteki martenzit oranının artmasının balistik başarımı artırdığı gözlemlenmiştir (Übeyli, vd., 2010).

Übeyli ve arkadaşları, alümina ön katmanına sahip katmanlı alümina/çelik kompozitinin balistik davranışını konu alan bir çalışma yapmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada arka katman malzemesi olarak kullanılan çelikte farklı martenzit oranları kullanılmıştır. Kompozit malzemede ise farklı alan yoğunlukları kullanılmıştır. Deney numunelerinin balistik testinde 7,62 mm ZD mermiler kullanılmıştır. Kullanılan martenzit oranları %32, %55 ve %75'dir. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde kullanılan 6 mm kalınlıktaki alümina katmanının çelik malzemenin balistik dayanımını belirgin ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir (Übeyli, vd., 2011).

Übeyli ve arkadaşları, DIN 100Cr6 ve AISI 4340 çeliklerinde ısı işleminin ADB oluşumuna etkisini incelemişlerdir. Çeliklerin içyapılarındaki değişikliklerin incelenmesi amacıyla ışık mikroskobu ve de TEM kullanılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma neticesinde 59 ve 49 RSD-C'ye sahip numunelerde dönüşmüş bant gözlemlenmiştir. Dönüşmüş bantlarda ince taneli yapı ve karbür çökeltisi tespit edilmiştir. Tüm numunelerde bozulmuş bant gözlemlenmiştir (Übeyli, vd., 2009).

Übeyli ve arkadaşları, gerçekleştirmiş oldukları bu çalışmada $Al_2O_3/AA2024$ kompozitinin 7,62 mm ZD mermiler kullanarak düşük hız balistik davranışını gözlemlenmişlerdir. Farklı katman yapısı, arka katmanın mekanik özellikleri ve yapıştırıcının kompozit malzemenin balistik başarımına etkisinin araştırmışlardır.

Atışlardan sonra malzemedeki şekil değişim biçimini incelemek amacıyla TEM kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda Al₂O₃ ön katman ile AA2024-T6 arka katmana sahip 1-3 arasında kalınlık oranına sahip numuneler en yüksek başarıyı sağlamıştır. Gerçekleştirilen çalışmada poliüretan yapıştırıcının epoksi yapıştırıcıya oranla seramik parçalarını daha iyi tutuyor olduğu tespit edilmesine rağmen yapıştırıcı katmanın balistik başarımlar açısından kompozitlerde dikkate değer bir etkisi olmadığı görülmüştür (Übeyli, vd., 2008).

Übeyli ve arkadaşları, alümina/Al katmanlı kompoziti ile 50CrV4 çeliğinin balistik başarımlarını karşılaştırmışlardır. Gerçekleştirilen bu çalışmada alümina/Al katmanlı kompoziti ile 50CrV4 çeliğine 7,62 ZD mermiler kullanılarak üç farklı alan yoğunluğunda balistik test uygulanmıştır. Aynı alan yoğunluğuna sahip kompozit ve çelik numuneleri karşılaştırılmıştır. Deney sonucunda kompozit malzemenin çelik malzemeye göre %26 ağırlıkta düşüş üstünlüğü sağladığı görülmüştür (Übeyli, vd., 2007).

Woodward, gerçekleştirdiği çalışmada şekil değişimi olmayan ZD mermiler karşısında homojen metal zırhların savunduğu birim alanı değerlendirmek amacıyla malzemenin maliyeti, ağırlığı ve kalınlığı üzerine sayısal benzetim gerçekleştirmiştir. Gerçekleşen çalışmada farklı üç delinme modeli kullanılmıştır. Yuvarlak uçlu merminin zırh tıkaması, çukur oluşumu ve sünek delik oluşumudur. Çalışmada hadfield çeliği ve titanyum alaşımları gibi malzeme verileri kullanılıp zırh seçimi için önemli ölçütler alınmıştır (Woodward, 1977).

Woodward ve Baxter, yaptıkları çalışmada arkasında metal plakalarla desteklenmiş olan yüksek kaliteli alümina seramiklerinin sivri uçlu ve sivri uçlu olmayan tungsten (W) alaşımlı ve sert çelikten yapılmış mermiler karşısında darbe davranışını incelemiştir. Alümina seramikler üç farklı metal plaka ile desteklenmiştir. Bunlar 5083 Al alaşımı, haddelenmiş zırh çeliği ve yüksek sertlikteki zırh çeliğidir. Gerçekleşen çalışmada seramik malzemenin başarımlarının kullanılan arka plaka malzemesi ve mermi türüne bağlı olduğu görülmüştür. Arka katmanda bulunan malzemeye yakın darbe direncine sahip sivri uçlu mermiler kullanıldığında ilginç

şekilde seramik malzeme için yüksek balistik başarımların alındığı görülmüştür (Woodward ve Baxter, 1994).

Zaera ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri bu çalışmada seramik/metal katmanlı kompozitlerde seramik ön katmanı ile metal plaka arasında kullanılan yapıştırıcı kalınlığı ve türünün balistik başarımlar üzerinde etkisini deneysel ve matematiksel olarak araştırmışlardır. Sayısal benzetimlerde alümina ön katmanı ve Al plakaya düşük kalibreli mermilerce uygulanabilen darbe kullanılmıştır. Sonrasında deneysel testlerle yapıştırıcı etkisi gözlem altına alınmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada 940 m/s hızlı 7,62 mm ZD mermiler kullanılmıştır. WC mermi çekirdekleri 5,9 gramdır. Gerçekleştirilen çalışmada metal plaka şekil değişimi ve seramik ön katman hasarı üzerinde durulmuştur. Epoksi reçinesinde yapıştırıcıya gelen enerjinin %16'sı iletilirken poliüretan yapıştırıcıda %1,2'si iletilmiştir. Dolayısıyla neredeyse gelen enerjinin tümü seramiğe tekrar yansıtılmıştır. Hem deneysel hem de sayısal çalışmada elde edilen sonuçlar yapıştırıcı kalınlığının artmasının, metal plakada daha yüksek kinetik enerji soğrulmasına sebep olduğu ve plastik şekil değişimine uğrayan alanı da artırdığını göstermiştir (Zaera, vd., 2000).

3. ZIRH MALZEMELERİ

3.1. Zırh Malzemelerinin Dinamik Davranışı ve Önemli Kavramlar

3.1.1. Gerinim Hızı

Balistik uygulamalardaki kalıcı şekil değişimleri yüksek gerinim hızlarında oluşmaktadır. Gerinim hızı arttıkça çeliklerde sünek-gevrek geçişinin de oluştuğu bilinmektedir. Malzemelerin mekanik özelliklerini incelemeye kullanılan deney yöntemleri değişen gerinim hızlarıyla değişmektedir. Gerinim hızlarının farklı değerleri için uygulanan deney yöntemleri Şekil 3.1’de dinamik etmenleri ile birlikte gösterilmektedir (Meyers, 1994).

GERİNİM HIZI, s^{-1}	YAYGIN DENEY YÖNTEMLERİ	DİNAMİK ETMENLER	
10^7	YÜKSEK HIZ DARBE - Patlayıcılar - Darbeli ısı - Normal levha darbe - Patlayıcı folyo	ŞOK-DALGA YAYILIM	EYLEMSİZLİK (ATALET) KUVVETİ ÖNEMLİ
10^6	- Levha darbe (basınç-kayma)	KAYMA-DALGA YAYILIM	
10^5	DİNAMİK-YÜKSEK - Taylor örs deneyi - Hopkins basınç çubuğu deneyi - Halka genişletme deneyi	PLASTİK-DALGA YAYILIM	
10^4	DİNAMİK-DÜŞÜK - Yüksek hız hidrolik yada pnömatik cihazlar, cam plastometre	NUMUNE VE CİHAZDAKİ MEKANİK TİTREŞİM ÖNEMLİ	EYLEMSİZLİK (ATALET) KUVVETİ İHMAL EDİLEBİLİR
10^3	SANKİ-STATİK - Hidrolik, servo-hidrolik ya da vidalı kontrol cihazları	SABİT ÇAPRAZKAFA HIZI İLE DENEY, NUMUNE UZUNLUĞU BOYUNCA AYNI GERİLME	
10^2	SÜRÜNME VE GERİLME GEVŞEMESİ - Geleneksel kontrol cihazları - Sürünme kontrol cihazları	METALLERİN VİSKO-PLASTİK TEPKİSİ	
10^1			
10^0			
10^{-1}			
10^{-2}			
10^{-3}			
10^{-4}			
10^{-5}			
10^{-6}			
10^{-7}			
10^{-8}			
10^{-9}			

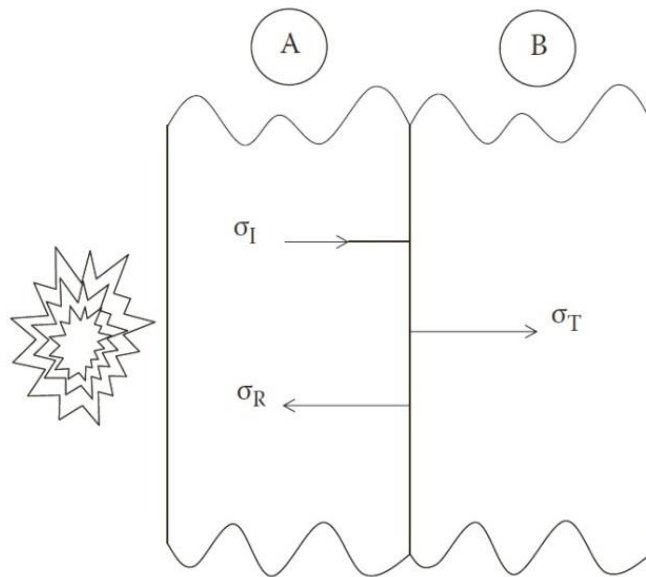
Şekil 3.1. Gerinim hızlarının (s^{-1}) farklı değerleri için uygulanan deney yöntemleri (Meyers, 1994)

3.1.2. Gerilme Dalgaları

Hareketli bir cisim ile durağan bir cisim arasında gerçekleşen herhangi bir temas çarpışma noktasından kaynaklanacak ve mermi ile hedefe aynı anda taşınacak şok dalgaları üretilmesine neden olmaktadır. Dalga yayılım mekanizmalarını anlamak ise zırh tasarımının yapılabilmesi açısından oldukça önem taşımaktadır. Güçlü malzemelerde gerçekleşen düşük hızlı çarpışmalarda elastik dalga oluşumu muhtemelen darbe hızının artırılması dalganın plastik olmasına neden olacaktır. Elastik dalga hızları ultrasonik teknikler kullanılarak kolayca ölçülebilmektedir. Her bir katman arasında iletilen ve yansıtılan gerilmelerin ölçülmesi ise hasar miktarını en aza indirecek şekilde bir tasarım yapılabilmesine olanak sağlamaktadır (Meyers, 1994), (Hazell, 2016).

3.1.2.1. Elastik ve Plastik Dalgalar

Çarpışma sonucu oluşan gerilmenin hedef malzemenin akma dayanımından daha düşük olduğu durumlarda oluşan dalgalar elastik dalgalardır. Şekil 3.2’de bir arayüz boyunca elastik dalgaların iletimi ve yansıması gösterilmektedir. σ_I dalgası A malzemesi boyunca ilerler ve arayüzle birlikte devreye girer. B malzemesine σ_T sıkışma gerilme dalgası iletilir. B malzemesinden σ_R dalgası yansır (Hazell, 2016).



Şekil 3.2. Arayüzde elastik dalgaların iletimi ve yansıması (Hazell,2016)

σ_I = Gelen şok dalgası (Pa)

σ_R = Yansıyan şok dalgası (Pa)

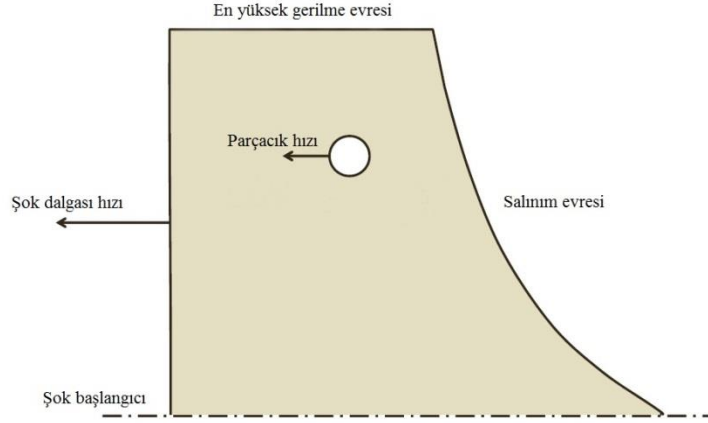
σ_T = İletilen şok dalgası (Pa)

Çarpışma sonucu oluşan gerilmenin hedef malzemenin akma dayanımından daha yüksek olduğu durumlarda elastik ve plastik dalgalardan oluşan iki dalgalı bir yapı oluşmaktadır. Plastik dalgalar malzemede kalıcı şekil değişmesi oluşmasında rol oynayan dalgalardır. Şekil 3.1’de anlatılan dalga iletim ve yansımaya ait esaslar plastik dalgalar için de geçerlidir (Meyers, 1994), (Hazell, 2016).

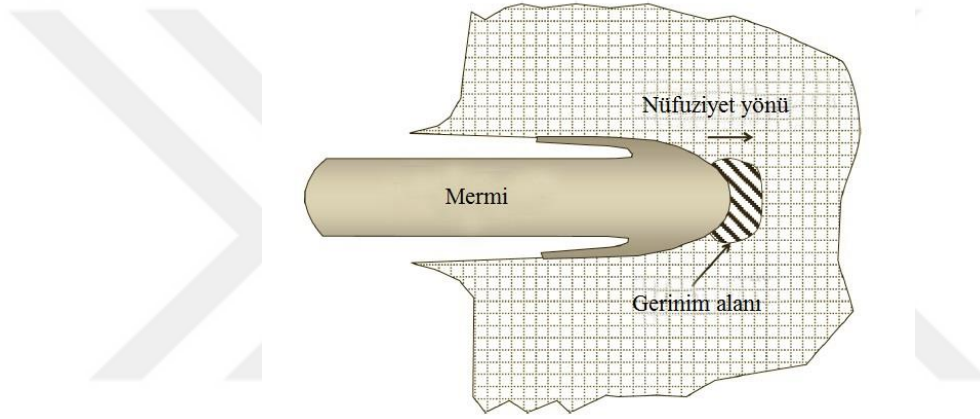
3.1.2.2.Şok Dalgaları

Şok dalgaları, mermi gibi ani basınç değişikliklerine neden olan olguların bir akışkan ya da esnek bir katı ortam içinde yarattıkları güçlü basınç dalgalarıdır. Gerilme genliğinin büyüklüğü malzeme dayanımını büyük ölçüde aştığında kesme gerilmeleri ihmal edilebilmekte ve konu hidrodinamik olarak ele alınabilmektedir. Şok dalgaları silindirik bir çubukta hareket eden elastik-plastik dalgaların aksine genlik ile dikleşmektedirler ve yayılımları sesten hızlıdır. Mermi etkisiyle oluşan bir şok dalgasının kuramsal olarak evreleri Şekil 3.3’te gösterilmektedir. Gerçek şok dalgalarını etkileyen başka unsurlar da olmakla birlikte Şekil 3.3’teki gösterim bazı değişkenlerin tanımlanmasını olanaklı kılmaktadır. Öncelikle oluşan şok, şok cephesinde ani bir gerilme artışına neden olacak ve buna sıcaklık ve yoğunluk artışı da eşlik edecektir. En yüksek gerilmeye gerilme seviyesi sabit kalmaktadır ve bu sürenin uzunluğu şok süresi olarak tanımlanır. Daha sonra salınım evresi gerçekleşmekte ve şok son bulmaktadır (Hazell, 2016).

Bir mermi, hedef malzemeye temas ettiği anda mermi ucu ve çevresinde karmaşık bir gerilme durumu gelişmektedir. Mermi yüzeyinin hemen altında şok oluşmasına neden olan tek eksenli bir gerilme hali ortaya çıkmaktadır. Söz konusu gerginlik alanı oldukça küçük bir bölge içerisindedir. Şekil 3.4’te mermi hedef malzemeye çarptığı anda şok dalgası oluşmasına yol açan tek eksenli gerginlik alanı gösterilmektedir (Hazell, 2016).



Şekil 3.3. Mermi etkisiyle oluşan şok dalgasının kuramsal olarak evreleri (Hazell, 2016)



Şekil 3.4. Mermi hedef malzemeye çarptığı anda şok dalgası oluşmasına yol açan tek eksenli gerinim alanı (Hazell, 2016)

3.1.3. Akış Gerilmesi

Akış gerilmesi, balistik uygulamalarda yüksek öneme sahip mekanik özelliklerden biridir. Akış gerilmesini etkileyen etmenler sıcaklık, gerinim ve gerinim hızıdır. Değişen sıcaklık, gerinim ve gerinim hızı değerleriyle malzemeye ait akış gerilmesini hesaplamada kullanılan Johnson-Cook denklemi, denklem (3.1) ile denklem (3.3) arasında verilmektedir (Johnson ve Cook, 1983).

$$\sigma_a(\varepsilon_e, \dot{\varepsilon}, T) = [\sigma_A + B\varepsilon_e^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - (T^*)^s] \quad (3.1)$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \quad (3.2)$$

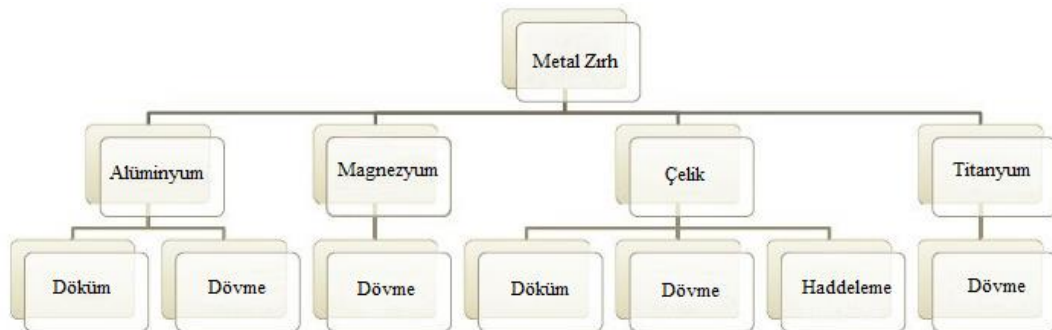
$$T^* = \frac{T - T_0}{T_e - T_0} \quad (3.3)$$

Denklem (3.1)'deki σ_a değeri akış gerilmesini ifade etmektedir. Denklem (3.2)'deki $\dot{\epsilon}^*$ değeri, $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ eşitliği için boyutsuz plastik gerinim hızıdır. Denklem (3.3)'teki T^* değeri boyutsuz benzer sıcaklığı (normalleştirilmiş sıcaklık), T_e değeri malzemeye ait erime sıcaklığını, T değeri gerilmenin hesaplandığı sıcaklık değerini, T_0 ise referans sıcaklığı ifade etmektedir. Denklem (3.1)'de üç kısımdan oluşan bağıntının ilk kısmında geçen σ_A değeri malzemeye ait akma dayanımını ifade etmektedir. Denklemde geçen s ve C değerleri de malzeme sabitleridir (Meyers, 1994), (Johnson ve Cook, 1983).

3.2. Zırh Malzemesi Türleri

3.2.1. Metal Zırh Malzemeleri

Metallerin zırhlarda yoğun şekilde kullanıldığı bilinmektedir. Temel olarak 4 farklı metal zırh malzemesi çeşidi bulunmaktadır. Bunlar Al, magnezyum (Mg), çelik ve titanyumdur. Çelik ve Al kullanımı ise Mg ve Ti'a kıyasla daha öndedir. Bu durumun nedenleri olarak çelik ve alüminyumun işlenebilme ve kaynak edilebilme kabiliyetleri ile daha ucuz olmaları öne çıkmaktadır. Şekil 3.5'te metal zırh malzemeleri ile üretilen zırhların hangi yöntemlerle üretildikleri gösterilmiştir (Hazell, 2016).



Şekil 3.5. Metal zırh malzemelerinin üretim yöntemleri (Hazell, 2016)

Günümüzde döküm yöntemiyle zırh üretimi eskiden olduğu kadar tercih edilmemektedir. Bunun başlıca nedeni dövme yoluyla daha güçlü plakalar elde edilebilmesidir. Ayrıca döküm malzemelerde gözenek oluşumu sorunu bulunmaktadır ve malzemelerin tokluk değeri genel olarak düşüktür. Zırh dökümlerinde 1970'lerde birtakım iyileştirmeler yapılmış ve geleneksel döküme kıyasla daha fazla süneklik ve balistik dayanım değerleri elde edilebilmiştir (Papetti, 1980). Şekil 3.6'da döner taretli döküm zırhtan üretilmiş olan Chieftain Ana Muharebe Tankı (AMT) gösterilmektedir (Hazell, 2016).

3.2.1.1. Çelik Zırhlar

Çelik zırhlı araçlarda bugüne kadar en yaygın kullanılan malzemedir. Yüksek mekanik özellikleri, imalat kolaylığı ve zırh malzemeleri içinde ucuz bir malzeme olması zırh gövdeleri için çeliği tercih edilir kılmıştır. Çelik araç zırhı olarak ilk kez 1. Dünya Savaşında tanklarda kullanılmıştır (Hazell, 2016).



Şekil 3.6. Döner taretli döküm zırhtan üretilmiş olan Chieftain AMT (Hazell, 2016)

3.2.1.1.1. Haddelenmiş Homojen Zırh

Haddelenmiş homojen zırhlar (HHZ) yaklaşık bir asırdır zırh malzemesi olarak kapsamlı şekilde kullanılmaktadır. Çelik, sıcak hadde merdanelerinden geçirildikten

sonra haddelenmiş plaka 820 ila 860 °C sıcaklık arasında ısıtılır ve ardından yağda veya suda soğutulur. Oluşan ürün sert ama kırılğan yapıdaki martenzit fazıdır. Kırılğan yapının azaltılması ve daha sünek bir malzeme elde edilebilmesi için 400 ila 650 °C sıcaklıklar arasında tavlama işlemi gerçekleştirilir. Nihai ürün sert ve daha sünektir (Hazell, 2016).

3.2.1.1.2. Yüksek Sertlik Zırhı

Yüksek sertlik zırhları (YSZ), 430 Brinell sertlik değerinden (BSD) daha yüksek sertliğe sahip homojen yapıdaki çelik zırhlardır. Üretim yöntemi HHZ üretim yöntemine benzer olmakla birlikte bu zırhlarda son tavlama işlemi 200 °C sıcaklığa yakın sıcaklık değerlerinde yapılmaktadır. Modern YSZ gelişimi büyük ölçüde Vietnam Savaşı sırasında gerçekleşmiştir. Bir çeşit top mühimmata karşı koyabilecek ince çelik zırha ihtiyaç duyulması üzerine yaklaşık 500 BSD'de YSZ üretilmiştir. Bununla birlikte araçlarda sert zırh kullanımı bundan daha önceki yıllara uzanmaktadır (Hazell, 2016). Birinci Dünya Savaşı tanklarında kullanılan çelik zırhın ince çelik zırhları 420 ila 650 BSD'ye sahiptir. Bu zırh türünün zayıf yanı sertliğin arttıkça tokluğun tehlikeye düşmesi ve kırılğanlığın buna bağlı olarak artmasıdır (Ogorkiewicz, 1991).

3.2.1.1.3. Değişken Sertliğe Sahip Zırh

Değişken sertlik tabakalarına sahip tek bir çelik levhanın kullanılmasının birçok faydası bulunabilmektedir. Kalın bir düşük karbonlu çeliğin bir yüzüne yüzey sertleştirme işleminin uygulanması ile hem sert parçalanabilen hem de sünek soğurucu özelliklerin bir malzemede toplanabilmesi mümkün olabilmektedir. Elde edilen başlıca fayda altta kalan daha sünek destek tabakasının yüzeyde oluşan çatlağı durdurabilmesidir (Hazell, 2016).

Yüzey sertleştirilmesi karbürleme işlemi ile elde edilebilmektedir. Çeliğin yüzeyi C açısından zengin bir malzeme ile 850 ila 900 °C sıcaklıklarda katı sıvı veya gaz ortamda ısıtılarak östenit fazına ulaşmış olan çeliğe C atomlarının yayılımını sağlar. C yüzeyden çeliğe girdikten sonra çeliğin bileşimine bağlı bir oranda içeri doğru

yayılır. Daha sonra çelikte istenen malzeme özelliklerinin elde edilebilmesi amacıyla çelik ayrıca bir ısıl işlemde geçirilir. Sonuç olarak ince sertleştirilmiş ve C bakımından zengin bir yüzey tabakasına sahip çelik malzeme elde edilir (Hazell, 2016).

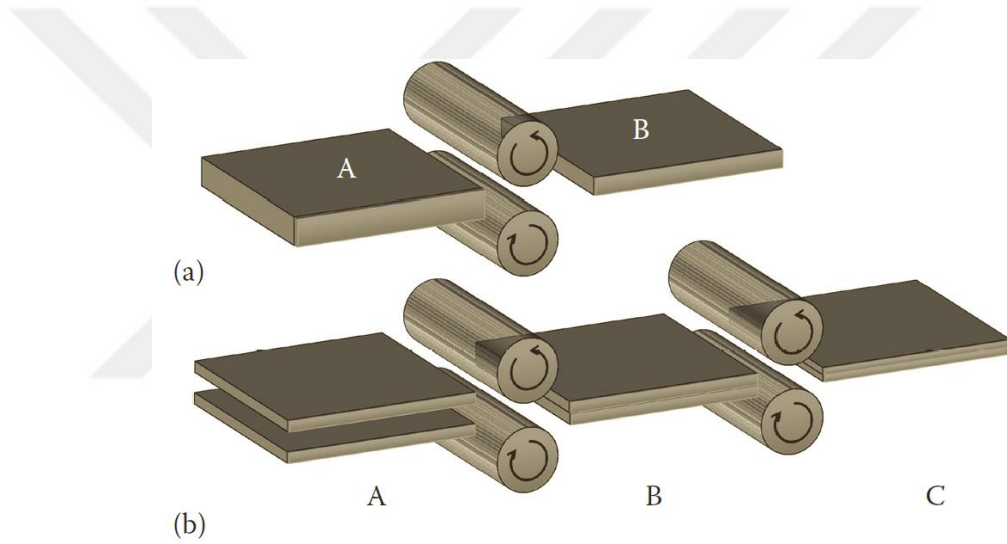
Zırh teknolojisinde bu yöntem ilk olarak 1890'lı yıllarda savaş gemilerinde uygulanmıştır. 1920'lerde ve 1930'larda ise tanklarda Vickers-Armstrong tarafından uygulanmıştır (Ogorkiewicz 1991). Bu tanklarda kullanılan zırh plakaları yüzeyde 600 BSD daha yumuşak olan alt tabakada ise yaklaşık 400 BSD'ye sahipti. Plakalar 20 mm kalınlığında ve döneminin ZD mermilerini yenmekte başarılı olsa da plakaları kaynak yoluyla birleştirmek imkânsızdı. Bu nedenle birleştirmeler perçin ve cıvata kullanılarak yapılıyordu (Hazell, 2016).

İkinci Dünya Savaşı sırasında Alman Kral Kaplan tanklarının zırhlarında alevle yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış çelik plakalar kullanılmıştır. Bu işlemde zırh plakalarının yüzeyi alev kullanılarak östenit fazı oluşana kadar ısıtılmakta ardından su verme yoluyla soğutulmaktadır. Sonuçta yüzeyde sert ama kırılğan martenzit tabakası oluşmaktadır. Şekil 3.7'de zırhı alevle yüzey sertleştirme işlemi ile üretilmiş olan Alman Kral Kaplan tankı görülmektedir (Doig, 2002).



Şekil 3.7. Alman Kral Kaplan tankı (Hazell, 2016)

Çift sertlik değerine sahip bir plakanın üretilmesinin etkili bir başka yolu da iki farklı çeliğin haddeleme işlemi kullanılarak birbirine yapıştırılmasıdır. Bu sayede iki ayrı sertlik değerine sahip iki farklı çelik plaka bir plakada birleştirilmiş olur. İkinci Dünya Savaşı öncesinde kullanılmaya başlayan bu teknoloji iki katlı sertlik zırhı (İKSZ) olarak bilinir hale gelmiştir. Bu işlemde Ni alaşımli iki ayrı çelik plakanın arasında metalürjik bir bağ oluşana dek haddeleme uygulanmaktadır. Genellikle yüzey plakasının C içeriğini ve sertliğini artırmak amacıyla ayrıca bir ısıl işlem uygulanır. 7,62 mm ZD mermiler karşısında İKSZ'lerin balistik başarımının YSZ'lerden yüksek olmasına rağmen üretimin karmaşıklığı ve maliyet açısından ucuz olmamasından dolayı pek çok zırh üreticisi tarafından çok tercih edilen bir yöntem değildir. Şekil 3.8'de İKSZ'lerin üretimi şekilsel olarak görülmektedir (Hazell, 2016).



Şekil 3.8. İKSZ'lerin üretiminin şematik olarak gösterimi (Hazell, 2016)

3.2.1.1.4. Delikli Zırh

Yüksek sertlikteki bir çelik plakada gerçekleştirilmiş delik açma işleminin ZD mermilerin yolunu kesintiye uğratarak etkili bir şekilde parçalanması veya istikrarsız hareket etmesine yol açtığı görülmüştür. Bu tür zırh sistemleri aracın temel zırhından bir miktar önde delikli sert bir tabaka içerir. Delikli yapıdaki boşluklar mermi çekirdeğinin parçalanması veya sekmesi için fayda sağlar. Temel zırh, çekirdek delikli levha tarafından bozulduktan sonra ortaya çıkan parçalara balistik açıdan dayanım sağlamak adına yeterli olmalıdır. Mermi çekirdeğine dinamik eğilme yükleri uygulamak mermide çekme kırılmasının oluşmasını sağlayacaktır. Bu tür zırhların

boyut hesapları plaka özellikleri, delik çap ve mesafeleri hesaplanarak gerçekleştirilir (Hazell, 2016).

Delikli zırh sistemleri ilk olarak zırhlı personel taşıyıcılar (ZPT) ve piyade savaş araçlarında (PSA) kullanılmıştır. Zırh delici kanat dengeli tank mermisi (ZDKDTM) mühimmatına karşı koymak amacıyla delikli bir zırh sistemi tasarlama çalışması yapıldıysa da sonuçlar beklendiği kadar iyi olmamıştır (Weber, 2002).

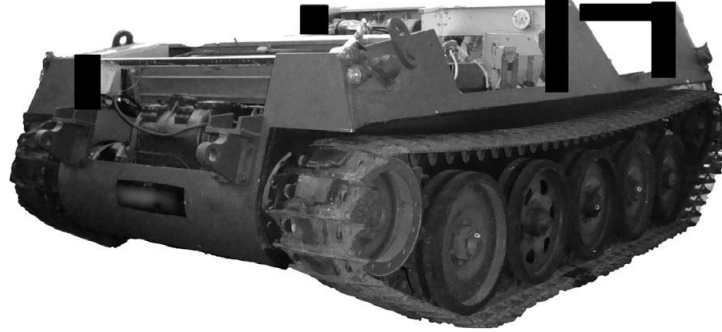
3.2.1.2. Alüminyum Alaşımli Zırhlar

Alüminyumun ilk askeri kullanımı 19. yy ortalarında Fransa'da gerçekleşmiştir. Alüminyum klorür ($AlCl_3$) ve sodyum (Na) arasında gerçekleştirilen tepkime neticesinde H. Sainte-Claire Deville tarafından bir çeşit metal üretilmiş ve tasarlanmıştır. Üretilen yeni metalin hafif vücut zırhında kullanılabileceği düşünülmüş ve hükümet desteğini toplamıştır (Polmear, 1989). Daha sonraki dönemlerde elde edilen metalin zırh uygulamalarında kullanılamayacak kadar yumuşak olduğunun düşünülmesine karşın Al alaşımlarının dövülmüş olan bazı türleri zırhlı savaş aracı (ZSA) üretimlerinde başarıyla kullanılmıştır (Hazell, 2016).

1960'lı yıllarda İngiliz savaş araçlarından bazı keşif araçlarında ve M113 zırhlı personel taşıyıcı dâhil olmak üzere ZSA'ların tasarımında Al alaşımli zırh kullanılmıştır. M113 ile ABD Ordusu havayolu ile taşınabilir hafif zırhlı amfibi tipi bir araç üretmeyi amaçlamıştır. Hafif ve orta ağırlığa sahip araç uygulamalarında Birleşik Krallığa ait muharebe keşif aracı (MKA) araç ailesi ve ABD'nin M113 araçlarında Al alaşımli zırhlar kullanılmasının başlıca nedeni 7,62 mm ve 14,5 mm ZD mermilere karşı gerekli olan malzemenin alan yoğunluğunun çeliğe göre daha düşük olmasıdır (Hazell, 2016).

İngilizlerin üretmiş olduğu paletli muharebe keşif aracı (PMKA) kulenin (taret) yanısıra Al alaşım plakadan üretilmiş gövdeye sahip ilk araçtı. PMKA'da sıkı ağırlık sınırlamaları ve gerekli koruma seviyesi nedeniyle 5083 Al alaşımı yerine yeni geliştirilen AA7309 kullanılmıştır. AA7309 bir çeşit Al-çinko (Zn)-Mg alaşımıydı. Kuvvetli bir çökelti sertleştirme ısıl işleminden geçirilerek üretilmiştir ve AA5083'ten

çok daha yüksek dayanım özellikleri ve balistik özelliklere sahiptir. ZD mühimmata karşı haddelenmiş homojen çelik zırhtan da daha iyi balistik başarımlar göstermiştir. Şekil 3.9’da PMKA gösterilmektedir (Hazell, 2016).



Şekil 3.9. Gövdesi ve kulesi Al alaşımından üretilmiş olan PMKA (Hazell, 2016).

On yıl sonra benzer bir Al alaşımı olan AA7017 piyade savaş aracında (PSA) zırh plakası olarak kullanılmıştır. Bu araçta gövde AA7017 alaşımından üretilirken kule HHZ’den üretilmiştir. Araçta bu alaşımın seçilme nedeni gerilme korozyonu oluşma ihtimalini azaltmaktır. AA7017 alaşımı AA7309’dan daha sert ama daha az toktur (Hazell, 2016).

Al alaşım zırhlar hafif olmak gibi önemli bir üstünlüğe sahipken birçok olumsuz özelliğe de sahiptirler. Bunların başında da gerilmeli korozyon çatlaması gelmektedir. Gerilmeli korozyon çatlakları alaşım elemanları bir çekme gerilmesine maruzken bir çeşit korozyon yapıcı tarafından saldırıya uğradıklarında ortaya çıkmaktadır. Al alaşımları kullanılarak üretilmiş araçlarda iç savma kalkanları kullanılması da genellikle gerekmektedir. Çeliğe kıyasla daha düşük ergime sıcaklıklarına sahip olduklarından sıcaklık arttıkça daha yumuşak olmaktadır (Hazell, 2016).

3.2.1.3. Magnezyum Alaşımlı Zırhlar

Mg yalnız başına oldukça kırılgan ve zayıf bir metaldir. Bu yüzden mühendislik uygulamalarında bir alaşımın içinde bulunmaksızın kullanılmazlar. Genellikle Al, Zn gibi metallerle yaptıkları alaşımlarla kullanılırlar. (McCauley, vd., 2002).

Mg esaslı zırhların ilk denemeleri İkinci Dünya Savaşı yıllarında uçak zırhları için denemiş olsa da istenen başarı elde edilememiştir (Sullivan, 1943). Bununla birlikte son yıllarda işleme teknolojilerinde yaşanan gelişmelerle birlikte zırh uygulamaları için Mg alaşımlarına olan ilgi artmıştır (Cho, vd., 2009). Mg alaşımlarının olumlu yönü düşük yoğunluklara sahip olmalarıdır. Bununla birlikte düşük yoğunluklu ve göreceli olarak düşük rijitlik değerlerine sahip olmaları bu malzemelerin mermi içine büyük yıkıcı dalgalar vermelerine engeldir (Hazell, 2016).

3.2.1.4. Titanyum Alaşımli Zırhlar

Titanyum zırh tasarımı için oldukça cazip bir malzemedir. Göreceli olarak yüksek dayanıma, sertliğe ve düşük yoğunluğa sahiptir. Ayrıca kaynak yapılabilir ve ısıl işlenebilir bir malzemedir. Ancak Ti plakası çelik maliyetinin yaklaşık 10 ila 20 katı maliyete sahiptir (Hazell, 2016).

Ti alaşımli zırh, M2 Bradley ZSA'da komutan kapağı ve üst zırh korumasında, M777'nin geri tepme silindirinde ağırlık azaltmak amacıyla ve M1A2 Abrams AMT'nin zırhlı bileşenleri dâhil olmak üzere çeşitli zırh uygulamalarında kullanılmıştır (Montgomery ve Wells, 2001). Zırhlarda kullanılan bir alaşım olan Ti-6Al-4V alaşımının balistik uygulamalar için geliştirilmesi 1950'li yıllarda gerçekleşmiştir. Bu alaşım o yıllardan beri titanyumun en önemli alaşımlarından biri haline gelmiştir. Hem ABD hem de Avrupa'da Ti alaşımlarının satışının yarısını oluşturmuştur (Polmear, 1989).

Ti zırhın adyabatik kesme ile başarısız olma eğilimi ve balistik saldırıya maruz kaldığında bozulma gösterebileceği gerçeğinden dolayı genellikle çelik gibi diğer malzemelerle birlikte kullanılır (Bruchey ve Burkins, 1998).

3.2.2. Seramik Zırh Malzemeleri

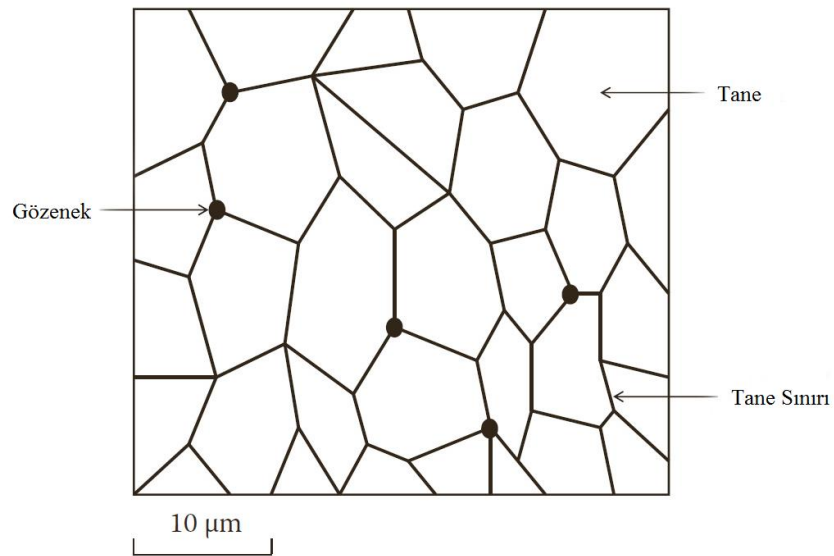
Seramik terimi, yanmış malzeme anlamına gelen keramikos kelimesinden türetilmiştir. Seramik malzemelerin üretimi pişirme adı verilen yüksek sıcaklık işlemiyle gerçekleştirilir. Seramik malzemeler, metal olmayan ve metal elementlerin

birbirlerine tamamen iyonik veya kısmen iyonik ve kovalent bağlarla bağlandığı metal dışı inorganik bileşiklerdir. Seramik malzemelerin kimyasal bileşimi, karmaşık fazlardan basit bileşiklere kadar geniş bir aralıkta değişir (Smith, 1996), (Callister ve Rethwisch, 2010).

Binbaşı Neville Monroe Hopkins, 1918’de ince bir seramik tabakasının ince bir çelik levhanın balistik dayanımını geliştirdiğini keşfettiğinde zırhta sert bir gevrek malzeme kullanımı fikri ilk kez ortaya çıkmıştır (Dunstan ve Volstad, 1984). Geliştirilen ilk zırh tasarımlarında da daha sünek bir malzeme ile desteklenmiş sert bir seramik ön malzeme kullanılmıştır. Dolayısıyla günümüzde halen kullanılan sönümleyici/soğurucu ikili yapısının temelleri 1918’lere dayanmaktadır (Hazell, 2016).

3.2.2.1. Zırh Seramiklerinin Yapısı

Zırh uygulamalarında kullanılan seramikler çok sayıda taneli yani polikristalin malzemelerdir. Bu taneler atomların sıralı düzenlenişinin tekrarlanabilirlik derecesi ile tanımlanır ve bir tane sınırı ile ayrılır. Buna ek olarak imalat aşamasında oluşan gözenekler de yapıda var olabilmektedir. Şekil 3.10’da kristal yapıdaki seramik malzemelerin içyapısı şematik olarak görülebilmektedir (Hazell, 2016).



Şekil 3.10. Kristal yapıdaki seramik malzemelerin şematik olarak içyapısı (Hazell, 2016)

3.2.2.2. Seramik Zırhlarla İle İlgili İlk Çalışmalar

Seramik esaslı zırhlar için ilk patentler Goodyear Aerospace firması tarafından 1970 yılında alınmıştır. İlk patent başvurusunda seramik yüzlü Al kaplama bir zırh oluşturulmuştur (Cook, 1970).

Wilkins (Wilkins, 1967), (Wilkins, vd., 1967), (Wilkins, 1968), (Wilkins, 1969) iki bileşenli bir seramik zırh sistemini en uygun hale getirmek için hedef ve mermi arasındaki etkileşimi iyi analiz etmenin önemini keşfedip yüksek hızlı fotoğrafçılık, flaş X-ışını ve sayısal modelleme tekniklerini kullanarak balistik başarımlarını takip etmiştir (Hazell, 2016).

3.2.2.3. Zırh Seramikleri

3.2.2.3.1. Alümina (Al_2O_3)

Alüminanın sinterlenmiş durumda oksit olmayan sıcak sıkıştırılmış diğer seramiklere kıyasla imalatı daha ucuzdur. Bununla birlikte SiC ve B_4C ile kıyaslandığında daha düşük bir sertliğe ve yüksek yoğunluğa sahiptir. Yüksek saflıktaki alümina sert çekirdekli ZD mermilere karşı oldukça etkili bir koruma sağlar (Hazell, 2016).

3.2.2.3.2. Silisyum Karbür (SiC)

SiC, alüminanın mekanik özelliklerine kıyasla daha üstün özelliklere sahip olduğundan dolayı zırh uygulamalarında her geçen gün daha yoğun kullanılmaya başlamıştır. Yüksek yoğunluklu SiC üretilmesi için bir takım özel işlemler uygulanması gerekmektedir. Zırh uygulamaları için üretilecek SiC malzemeler üç farklı yolla üretilmektedir. Bunlar basınçsız sinterleme, sıcak sıkıştırma ve tepkimeyle bağlanma yoluyla üretimdir. Basınçsız sinterleme için 2000 °C üzerinde sıcaklıklara ihtiyaç duyulmakta olup gerçekleştirilmesi zor bir süreçtir. Sıcak sıkıştırma zırh uygulamaları için çok yüksek balistik dayanım değerlerine sahip seramikler sunmaktadır ancak maliyeti yüksek bir yöntemdir. Tepkimeyle bağlanma yoluyla üretim diğer yöntemlerle kıyaslandığında ucuz bir yöntemdir ancak bu yolla

üretilen seramiklerin balistik dayanımı da sıcak sıkıştırma ile elde edilen seramiklerin dayanımından düşük olmaktadır (Hazell, 2016).

3.2.2.3.3. Bor Karbür (B₄C)

Zırh uygulamalarında kullanılan B₄C'nin en kullanışlı şekli sıcak sıkıştırma ile üretilmektedir. Diğer zırh seramiklerine kıyasla çok yüksek sertlik değerlerine ve daha düşük yoğunluk değerlerine sahip olan B₄C'nin yüksek şok değerlerinde kırılma eğiliminin yüksek olması nedeniyle iyi balistik başarımlar veremediği görülmüştür. Yüksek hızlı yoğun çekirdekli mermiler karşısında bu mermiler tarafından oluşturulan şok gerilmesi nedeniyle mermide meydana gelen fiziksel değişimlerin balistik dayanımında düşüşe neden olduğu düşünülmektedir (Chen, vd., 2003).

3.2.2.3.4. Titanyum Diborür (TiB₂)

TiB₂ diğer seramiklerle kıyaslandığında yoğun bir seramiktir. Sinterlemesi zor olduğu için sıcak sıkıştırılarak üretilir. Balistik dayanım açısından oldukça başarılı bir seramik olmasının yanında pahalı bir zırh malzemesidir. Maliyeti sıcak sıkıştırılmış bir SiC'nin yaklaşık 3 ila 4 katı kadardır. Elektriksel iletken bir malzeme olduğu için elektro boşaltım yöntemleriyle işlenmeye açıktır. Sıcak sıkıştırılmış TiB₂'nin işlenmesi diğer yöntemlerle zor olduğu için elektriksel iletkenlik işlenebilirlik açısından büyük kazanç sağlar (Hazell, 2016).

3.2.2.3.5. Tungsten Karbür (WC)

WC, diğer zırh seramikleri ile kıyaslandığında yüksek sertlik ve yoğunluk değerlerine sahip bir zırh seramiğidir (Gooch, vd., 2000). Günümüzde üretilen WC seramiklerin çoğu sermettir. Yani Co veya Ni gibi bir seramik ve metal bağlayıcının bir alaşımıdır. Çok yüksek yoğunlukta (15,7 g/cm³) WC eldesi için Cercom firması %99,6 saflıkta seramik üreten bir sıcak sıkıştırma yolu geliştirmiştir. Üretilen bu yoğun WC de TiB₂ gibi elektriksel olarak iletkenidir. Bu sayede elektro boşaltım yöntemleri kullanılarak işlenebilmektedir (Hazell,2016).

3.2.2.3.6. Silisyum Nitrür (Si_3N_4)

Şekillendirilmiş Si tozlarının azot (N) bakımından zengin bir ortamda ateşlendiği tepkime-bağlama işlemi yoluyla üretilebilmektedir. Ancak bu şekilde üretilen ürünün gözenekliliği yüksektir bu da malzemeyi balistik uygulamalar için elverişsiz hale getirmektedir. Bununla birlikte Si_3N_4 sinterlenerek veya sıcak sıkıştırılarak bazı zırh uygulamalarında kullanılabilen ve yeterli balistik dayanımı sağlayabilmektedir (Hazell, 2016).

3.2.2.4. Seramik Zırh Uygulamaları

Seramik zırhlar helikopter koltukları, helikopter zemin plakaları, zırhlı savaş araçları, mühendislik araçları ve vücut zırhı gibi pek çok yapıda koruyucu olarak yoğun şekilde kullanılmaktadır.

Seramik zırh teknolojisinin savaşlarda ilk kullanımı Vitenam Savaşı'nda gerçekleşmiştir. Düşük seviyeli sortiler helikopter ve mürettebatı silah ateşlerine karşı savunmasız bırakmaktaydı. Bu nedenle 1965'te ilk seramik tabanlı hava karoseri helikopter için üretilmiştir (Rolston, vd., 1968). 1965 yılında UH-1 Huey helikopterinin pilot ve yardımcı pilotlarının koltuklarında cam elyaf takviyeli B_4C esaslı bir çeşit kompozit zırh kullanılmıştır. Elde edilen zırh 7,62 mm ZD mühimmata karşı yeterli korumayı sağlamıştır. Benzer sistemler AH-1 Kobra helikopterinde de kullanılmıştır (Dunstan ve Volstad, 1984).

1966 yılında ilk seramik gövde zırh yelek zırh panelleri de dâhil edilmiş şekilde koruma geliştirmeleri ile birlikte helikopter mürettebatına verilmiştir. 1968 ila 1970 yılları arasında helikopter mürettebatı zırhında gerçekleştirilen bu geliştirmelerin ölümcül olmayan yaraların sayısını %27 ölümlerin sayısını ise %53 oranında azalttığı düşünülmektedir (Dunstan ve Volstad, 1984).

1980'li yıllarda savaş alanı uygulamalarında kullanılan seramik tabanlı zırh malzemelerinin çoğunda alümina kullanılmıştır. Alüminanın imalatı SiC ve B_4C 'ye göre daha ucuzdur. Düşük kalınlıklarda bile yüksek hızlı küçük silah mermilerini

durdurabilmektedir. Küçük silah mermilerine karşı SiC ve B₄C sistemleri kullanıldığında eklenen balistik başarımlar eklenen maliyete oranla oldukça düşüktür. Balistik başarımlar açısından küçük bir artış için yüksek bir maliyet gereksinimi oluşmaktadır. Bu durum 1980'lerden bu yana küçük dalgalanmalar gösterse de söz konusu durumda bir değişiklik olmamıştır. Bununla birlikte vücut veya uçak zırhı gibi ağırlık azalmasının yüksek önem içerdiği hallerde maliyet artışı göz ardı edilebilmektedir (Hazell, 2016).

Seramik malzemelerin kentsel alanda kullanılan hafif zırhlı araçlarda kullanımının bazı üstün yanları bulunmaktadır. Seramiklerin çok hızlı şekilde küçük parçalara ayrılması arka kısımda bulunan metalin korunmasına fayda sağlarken pek çok kompozit malzemede toplam korumada çeliklere göre daha iyi dayanım göstermektedirler. Ayrıca seramik kullanımı ağırlıkta büyük düşüş sağlamaktadır (Hazell, vd., 2012).

Çizelge 3.1. Zırhlı bir aracın zırh uygulamasında seramik tabanlı sistemlerin metal sistemlere kıyasla üstünlükleri ve zayıflıkları (Hazell, 2016)

Metal zırha kıyasla üstünlükler	Metal zırha kıyasla zayıf yönler
Belirli kalınlıklarda iyi balistik dayanım değerleri	Yüksek şok etkisindeki çarpmalarda yetersiz balistik dayanım
Zırh uygulaması için hafiflik sağlar	Ana yapıya ilave malzeme takviyesi gerektirir
Sert malzeme	Düşük kırılma tokluğu
Yüksek miktarlarda taşıma açısından ucuz yük	Üretim açısından pahalı malzeme
	Üretim açısından temini zor malzeme

1970'lerde Princeton Havacılık Araştırma görevlileri ve ABEX/Norton seramik firması tarafından geliştirilen bir yaklaşımla seramik döşemelerde hassas metal döküm de kullanılmıştır. Bu yaklaşımın daha sonraki bir aşamasında ise seramik karo üzerine metal yalıtımlı yapılar sıkıştırılmıştır. Gerçekleştirilen bu tasarımlar seramik karo balistik dayanımını yaklaşık iki katına çıkarmıştır (Gooch, 2011).

Pelet haline getirilmiş seramik zırh uygulamasının balistik dayanımda yüksek artış sağladığı görülmüştür. Bu türden zırh uygulamaları İsrail'in Mofet Etzion Ltd. tarafından üretilen hafifleştirilmiş balistik zırh (LIBA) ve İsrail'in Plasan Sasa şirketi tarafından üretilen çok katmanlı zırh (SMART) uygulamalarında görülmektedir. (Cook, vd., 1979).

Seramik zırhların dayanımının artırılması için farklı dönemlerde farklı yollar aranmıştır. Bunların dikkate değer bazı örnekleri şu şekilde sıralanabilir:

- Seramik katmanın çarpışma sırasında öncelikli olarak hasara uğrayıp mermi hızını mümkün olabildiğince azaltması için çalışmalar yapılması (Nanda, vd., 2011).
- Seramik tanecik boyutunun düşürülmesi sayesinde balistik dayanımının artırılması (Strassburger, vd., 1999).
- İşlevsel olarak kademeli zırh malzemelerinin tasarlanması (Hazell, 2016).

Son yaklaşım 1960'ların sonlarında Wilkins ve arkadaşları tarafından önerilmiştir. Söz konusu olan bu yaklaşım, seramiklerin sertlik, metallerin ise süneklik ve tokluk özelliklerini birleştirmeyi esas alan tek bir malzeme formu geliştirmeyi içermektedir (Wilkins vd., 1969). Bu tür malzemeler ön yüzünde seramik bulunduran arka katmanlarda ise metal içeren malzemelerdir. Bu tekniğin yayınlanmış bir örneği 1998 yılında Gooch ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Ön yüzünde titanyum borür (TiB) bulunan malzemenin arka katmanlarında yüksek Ti içeriği bulunan metaller kullanılmış en arka katmanda ise saf Ti kullanılmıştır (Gooch, vd., 1998).

3.2.2.4.1. Şeffaf Zırh Uygulamaları

Bazı uygulamalar şeffaf zırh uygulamalarını zorunlu kılmaktadır. Bu tür zırh uygulamaları için genellikle sert borosilikat camı gibi camlar tercih edilir. Ancak ağır ve sert tehditlere karşı oldukça kalın camların kullanılması zorunlu kalmaktadır. Örneğin 7,62 mm ZD mermiye karşı kullanılması gereken cam kalınlığı 60 ila 100 mm arasındadır. Kalınlık arttıkça ağırlık artmakta ve şeffaflık da azalmaktadır. Bu

kalınlık değerleri ise özellikle zırhlı azaçlar için istenmeyen durumlar oluşturmaktadır (Hazell, 2016).

Cam esaslı Şeffaf zırh üretilmesinde bir başka yol da Şeffaf kristal seramik kullanmaktır. Günümüzde ilgi gösterilen üç farklı Şeffaf kristal seramik vardır. Bunlar alüminyum oksinitrit, magnezyum alüminat spinel ($MgAl_2O_4$) ve tek kristal Al_2O_3 yani safirdir (Hazell, 2016).

Seramiklerle ilgili günümüze kadar pek çok çalışma yapılmış olsa da halen araştırmaya açık pek çok konu bulunmaktadır. Bunların başlıcalarını sıralamak gerekirse; ufalanmış parçacıkların akış özelliklerinin ayrıntılı Şekilde anlaşılması, Şok yükler altındaki dayanım davranışı ve Şok yük altında dayanım artırmak için işleme teknikleri Şeklindedir. Bu çalışmaların özünde ise merminin seramik ile temas ettiği kısa anın daha ayrıntılı ve kuvvetli çözümlenmesi yatmaktadır (Hazell, 2016).

3.2.3. Zırh Uygulamalarında Kullanılan Kompozit Malzemeler ve Dokuma Elyaf Kumaşlar

Kompozit malzeme arzu edilen özellikleri elde edecek Şekilde bir araya getirilmiş iki veya daha fazla farklı malzemedен oluşturulmuş malzemedir. Çeşitli kompozit malzeme türleri olmakla birlikte genellikle bir kompozit malzeme bir anayapı malzemesi ve bir takviye malzemesinden oluşmaktadır.

Dokuma elyaf kumaşlar, çok yüksek gerilme dayanımına ve düşük yoğunluklara sahiplerdir. Balistik uygulamalarda kullanılan elyaflar oldukça yüksek enerji soğurma kabiliyetine sahiptir. Çizelge 3.2'de askeri uygulamalarda kullanılan bazı elyafların mekanik özellikleri verilmektedir (Hazell, 2016).

Günümüzde balistik koruma amacıyla kullanılan dokuma elyaf kumaşların büyük çoğunluğu katmanlı olarak kullanılmaktadır. Hafif olma üstünlükleri günümüzde vücut zırh sistemlerinde yoğun olarak kullanılabilmelerini sağlamaktadır (Hazell, 2016).

Çizelge 3.2. Askeri uygulamalarda kullanılan bazı elyafların mekanik özellikleri (Edwards, 2002)

Elyaf	ρ (kg/m ³)	σ_c (MPa)	Özgül Dayanım (m ² /s ²)	E (GPa)	Kopma Uzaması (%)
Aramid (Düşük elastik modüllü)	1440	2900	2,01 x 10 ⁶	60	3,6
Aramid (Yüksek elastik modüllü)	1450	2900	2,00 x 10 ⁶	120	1,9
Polietilen (Düşük elastik modüllü)	970	2700	2,78 x 10 ⁶	89	3,5
Polietilen (Yüksek elastik modüllü)	970	3200	3,30 x 10 ⁶	99	3,7
E -Camı	2600	3500	1,35 x 10 ⁶	72	4,8
S -Camı	2500	4600	1,84 x 10 ⁶	86	5,2
Karbon (Yüksek dayanım)	1780	3400	1,91 x 10 ⁶	240	1,4
Karbon (Yüksek elastik modüllü)	1850	2300	1,24 x 10 ⁶	390	0,5

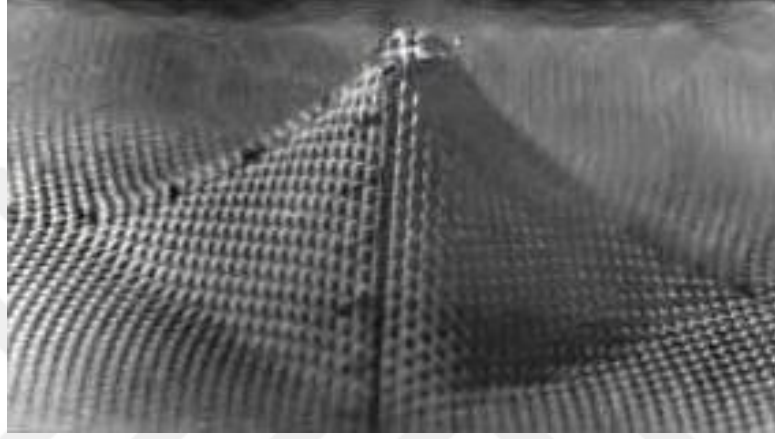
3.2.3.1. Zırh Uygulamalarında Kullanılan Elyaf lar

3.2.3.1.1. Aramid Elyaf lar

Kevlar ilk olarak 1960'larda DuPont firması tarafından aromatik polyamidlerden üretilmiştir. Teijin Aramid firması tarafından üretilmiş olan Twaron da Kevlar benzeridir ve bu elyaflar aramid elyaf sınıfındadır. Benzen halkaları içeren polimer moleküllerinden türetilmektedirler (Hazell, 2016). Aramid elyaflar elyaf yönünde oldukça iyi özellikler sergilerler ancak moleküllerin birbiri arasındaki zayıf bağdan dolayı anizotropiktirler, elyaf yönüne dik yönde elastiklik modülleri düşüktür ve bölünmeye duyarlıdır (Cheng, vd., 2005).

Stephanie Kwolek tarafından keşfedilmiş olan Kevlar, vücut zırhı tasarımında geniş çapta kullanılmaktadır Birçok polis memuru ve asker hayatını bu malzemeye

borçludur (Hazell, 2016). Vücut zırhında kullanılan Kevlar sıkı dokuma şeklinde ve birden fazla kata sahip olarak üretilmektedir. Dokumalar düz veya sepet örgü şeklinde olabilmektedir. Gevşek dokuma malzemelerin balistik dayanımı daha düşük olmaktadır (Cheeseman ve Bogetti, 2003). Şekil 3.11’de 200 m/s hıza sahip bir FSP mermisinin nüfuz ettiği sepet örgü yapısına sahip Kevlar-29 sınıfında aramid elyaf görülmektedir. Mermi temasıyla elyaf balistik açıdan başarım göstermiş olup elyaf üzerinde konik yapı oluşumu gözlenmiştir (Figucia, vd., 1982).



Şekil 3.11. FSP merminin nüfuz ettiği Kevlar-29 elyaf (Figucia, vd., 1982)

3.2.3.1.2. Cam Elyaf

Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler HMS Wilton gibi zırhlı savaş araçlarından çeşitli gemilere kadar farklı bir takım askeri uygulamalarda kullanılmıştır (Mouritz, vd., 2001). Birleşik Krallık’taki Gelişmiş Zırhlı Araç Programı’nda cam elyaf takviyeli polimer esaslı kompozit kullanılarak benzeri koruma seviyelerine sahip metalik sistemlere kıyasla ağırlıkça yaklaşık %10 ila %15 ağırlık kazancının sağlandığı uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte maliyetin izin verdiği durumlarda E-camı yerine S-camı kullanılarak daha hafif zırh sistemlerinin geliştirilebileceği de bilinmektedir. Şekil 3.12’de Birleşik Krallık’taki Gelişmiş Zırhlı Araç Programı’nda zırhında cam elyaf takviyeli polimer esaslı kompozit kullanılmış olan bir zırhlı araç görülmektedir (Hazell, 2016).



Şekil 3.12. Zırhında cam elyaf takviyeli polimer esaslı kompozit kullanılmış olan bir zırhlı araç (Hazell, 2016)

Cam elyaf takviyeli polimer esaslı kompozit malzemeler genel olarak şok yüklemelerine karşı iyi direnç göstermektedirler. Karbon esaslı kompozitlerin aksine balistik atağa maruz kaldıklarında yeterli enerji emilimini göstermektedirler. Dolayısıyla bu durum karbon elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla onları zırh uygulamalarında daha tercih edilir kılmıştır (Hazell, 2016).

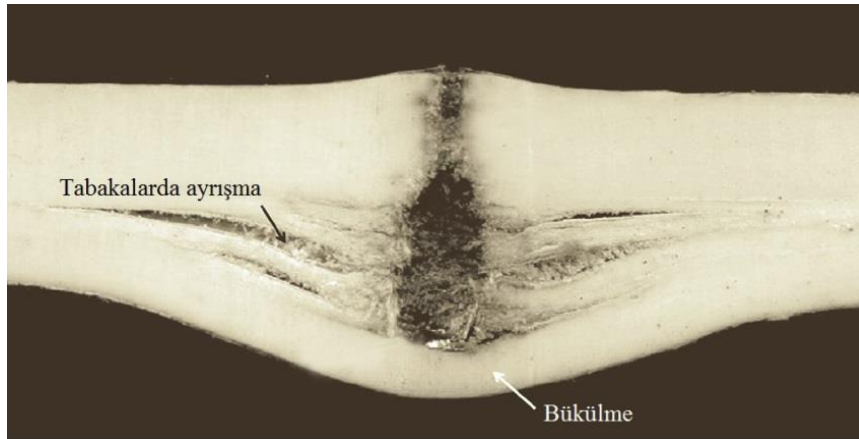
3.2.3.1.3. Bazalt Elyafı

Bazalt elyafı, yer kabuğundan kolaylıkla temin edilebilen magmatik kayalardan türetilmektedir. En olumlu tarafı hammadde bolluğu nedeniyle pek çok elyafa kıyasla ucuz olmasıdır. Kolay ekstrüzyon edilebilmeleri cam elyaf takviyeli sistemlerle rekabet edebilen sistemlerin üretimini mümkün kılmaktadır. Aşırı yüksek molekül ağırlıklı polietilenlerin aksine yüksek sıcaklıklarda ısı dirençleri oldukça iyidir. Aynı zamanda düşük sıcaklıklarda özelliklerini koruyan malzemelerdir (Hazell, 2016). Bugüne kadar bazalt elyafının balistik koruma amacıyla kullanımı açısından az sayıda araştırma olmakla birlikte Aberdeen Proving Ground'daki ABD Ordu Araştırma Merkezi'nde yapılan bazı çalışmalar umut vadetmiştir. FSP mermilerine karşı bazalt esaslı kompozitlerin S-cam takviyeli epoksi lamine kompozitlere karşılaştırılabilir bir balistik başarımlar gösterdiği görülmüştür (Spagnuolo, vd., 2011).

3.2.3.1.4. Aşırı Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Elyaf lar

Aşırı yüksek molekül ağırlıklı polietilen elyaf takviyeli kompozitlerde anayapı malzemesi de elyaf malzemesi ile aynıdır. Bu durum onu benzersiz kılmaktadır. Bu elyaf kümesinde Dyneema ve Spectra olmak üzere iki temel marka mevcuttur. Bu elyafların hafif zırh çözümleri açısından iki üstün özelliği bulunmaktadır. Bunlardan biri yüksek enerji soğurma kapasitesi diğeri yüksek elastik dalga hızıdır (Jacobs ve Van Dingenen 2001). Dyneema düşük tehditler için yani düşük kalınlıklarda kullanım için uygun bir malzeme iken yüksek kalınlıklardaki zırh uygulamaları için çok ucuz bir ürün değildir. Hollanda Ordusu'na hizmet veren Patria XA 188 zırhlı savaş aracında sığınak kalkanı olarak kullanılmaktadır. Aşırı yüksek molekül ağırlıklı polietilen takviyeli kompozitlerde ayrışma sıcaklığı düşüktür. Elyaf lar 144 °C ila 152 °C'de erir. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda dayanımı oldukça düşmektedir (Hazell, 2016).

Dyneema seramik yüz lü bir zırh sisteminin parçası veya tek başına bir zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.13'te 5,6x45 mm SS 109 (L2A2) merminin nüfuz ettiğ i Dyneema plakası gösterilmektedir. Plaka mermiyi durdurmakta başarılı olmuştur. Hem plakada bulunan katlar hem de mermi bozunmuştur. Ancak plakada son katlar parçalanmamış ve bükülerek direnç göstermiştir (Hazell, 2016).



Şekil 3.13. 5,6x45 mm SS 109 (L2A2) mermisi tarafından tahrip edilen Dyneema plakası (Iremonger, 1999)

3.2.3.1.5. Polibenzobisoksazol (PBO) Elyaf lar

Son yıllarda önemi artan ancak halen balistik açıdan çok fazla kullanılmayan birkaç elyaf türü bulunmaktadır. Bunlardan biri de PBO elyaf larıdır. Zylon ticari ismi altında üretilen bu elyaf ların kimyasal adı poli-p-fenilen-2,6-benzobisoksazoldur. Vücut zırhı uygulamalarında kullanılan bu elyaf türü 5,2 GPa gibi yüksek çekme dayanımı değerine sahiptir ancak uygulamalarda tartışmalı sonuçlara sahiptir (Hazell, 2016).

ABD Ulusal Adalet Divanı Zylon elyaf tan üretilmiş bir personel zırhı giyen polis memurunun ölümcül şekilde yaralanması üzerine bir rapor yayınlamış ve zırhın ısı ve nem gibi çevresel koşullardan etkilenerek bozulduğunu belirtmiştir (Hart, 2015). PBO elyaf ların daha sonraki dönemlerde iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır ancak bu çalışmaların da başarısızlıkla sonuçlandığı kabul edilmektedir (Walsh, vd., 2006).

3.2.3.1.6. Karbon Elyaf lar

Karbon elyaf takviyeli kompozitler son yıllarda bisiklet karolarından uçak gövdelerine kadar oldukça geniş bir alanda kullanılır hale gelmiştir. Ancak balistik uygulamalarda kullanım açısından çok uygun ve tercih edilen bir malzeme değildir. Balistik yüklere karşı tepkisi zayıf bir malzemedir. Hafif yapısal sertliğe ihtiyaç duyulan askeri uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Karbon elyaf takviyeli polimer esaslı kompozitlerin varlığının balistik darbe sonrasında panellerin yapısal bütünlüğünü koruduğunun tespit edildiği bazı havacılık uygulamaları bulunmaktadır (Horsfall, vd., 2000).

3.2.3.2. Uygulama Örnekleri

Şekil 3.14'te ABD ordusunun kullandığı bir vücut zırhı görülmektedir. Zırh ABD Ordu Asker Sistem Merkezi tarafından tasarlanmış olup hafif vücut zırhı gereksinimi üzerine hayata geçirilmiştir. Zırhın ilk üretimi 1999 yılında gerçekleşmiştir. Zırhta dokuma kumaş halinde yüksek dayanımlı aramid elyaf kullanılmıştır. Yaklaşık yelek ağırlığı 3,8 kilogramdır (Bhatnagar ve Lang, 2006).



Şekil 3.14. Askeri vücut zırhı (Bhatnagar ve Lang, 2006)

Şekil 3.15’de Avrupa ülkelerinin 1990’larda çelik kaskların yerine kullanılmak üzere üretmiş oldukları askeri kasklar görülmektedir. Fransızların kullandığı kasklar dokuma olmayan çarpaz yerleştirilmiş yüksek modüllü polietilen elyaf kullanılarak diğer ülkelerin kaskları ise fenolik esaslı dokuma aramid elyaf takviyeli katmanlı kompozit kullanılarak üretilmiştir (Bhatnagar ve Lang, 2006).



Şekil 3.15. Avrupa ülkeleri askerleri için üretilmiş kask (Bhatnagar ve Lang, 2006)

Şekil 3.16’da ABD Polis Teşkilatı tarafından kullanılmakta olan bir çeşit vücut zırhı görülmektedir. En yüksek dayanım gösteren türlerinde yüksek modüllü polietilen elyaflar, aramid elyaflar ve PBO elyaflar farklı oranlarda birlikte kullanılmaktadır (Bhatnagar ve Lang, 2006).



Şekil 3.16. ABD polis zırhlı yeleş (Bhatnagar ve Lang, 2006)

Devlet kurumlarında çalışan bazı üst düzey yöneticilerin araçlarında son yıllarda çelik zırh yerine daha hafif zırh malzemeleri tercih edilmektedir. Bu tür araçlarda kullanılan başlıca zırh malzemeleri yüksek modüllü polietilen elyaf ve aramid elyaflardır. Geçmişte tercih edilen çelik zırh kullanımı motor ve süspansiyon sisteminde de değiştirmeleri zorunlu kılmıştır. Ancak söz konusu elyafların zırhlarda kullanımı hafiflikleri nedeniyle bu gereksinimi ortadan kaldırmıştır. Şekil 3.17’te zırhlı bir araba görölmektedir (Bhatnagar ve Lang, 2006).



Şekil 3.17. Zırhlı araba (Bhatnagar ve Lang, 2006)

Şekil 3.18’de MH-47 Chinook, MH-60 Blackhawk ve UH1H Super Huey uçaklarında kullanılmış olan kokpit ve zemin zırhları görölmektedir. Zırhlarda ön yüzde SiC veya B₄C seramikler kullanılırken arka yüzde çapraz yerleştirilmiş yüksek

modüllü polietilen elyaflar bazı parçalarda ise dokuma aramid elyaf takviyeli fenolik esaslı malzemeler kullanılmıştır (Bhatnagar ve Lang, 2006).



Şekil 3.18. Çeşitli uçaklara ait zırhlı parçalar (Bhatnagar ve Lang, 2006)

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada 80 mm çapında orta karbonlu düşük alaşımlı AISI 4140 çeliği kullanılmıştır. AISI 4140 çeliğinin yalın, Al₂O₃ ön katmanlı ve SiC ön katmanlı kompozit biçimleri oluşturulmuştur. Deneyler için seçilen ve kullanılan çelik malzemenin kimyasal bileşim incelemesi Adana KOSGEB Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AISI 4140 çeliğinin ağırlıkça kimyasal bileşim oranları (%)

C	Si	Mn	P	S	Ti
0,378	0,223	0,688	0,015	0,007	0,007
Al	Cr	Mo	Ni	V	Co
0,018	0,970	0,199	0,032	0,010	0,009

AISI 4140 çeliği Adana’da hizmet veren Doğuş Metal firmasında KMT 300 KDG model şerit testere vasıtasıyla kesildikten sonra numunelerin iki yüzeyi de aynı firmada bulunan MAGERLE marka satıl taşlama tezgâhında işlenmiştir. Yalın çelik için 6, 8, 10, 12, 14, 16 ve 18 mm kalınlıklarında, SiC ön katmanlı kompozit için 4,63, 6,63, 8,63, 10,63, 12,63 ve 14,63 mm kalınlıklarında ve Al₂O₃ ön katmanlı kompozit için 3,42, 5,42, 7,42, 9,42, 11,42 ve 13,42 mm kalınlıklarında çelik plakalar elde edilmiştir. Her kalınlıktan 3’er eş numune hazırlanmıştır. Çelik numuneler Şekil 4.1’de gösterilmekte olup numunelerin kalınlık toleransı $\pm 0,15$ mm’dir.

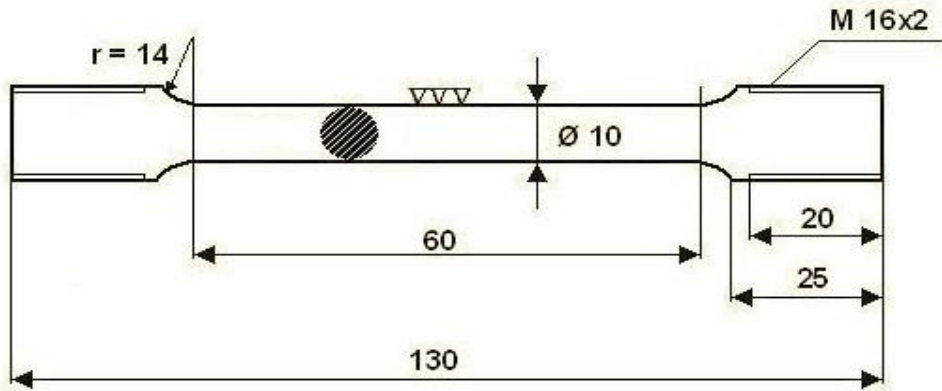


Şekil 4.1. AISI 4140 çelik numuneler

Mekanik testlerin gerçekleştirilmesi amacıyla hazırlanmış olan çentik darbe ve çekme numuneleri (Şekil 4.2) sırasıyla “TS EN ISO 148-1” (TSE, 2011a) ve “TS EN ISO 6892-1” (TSE, 2011b) standartlarına uygun şekilde hazırlanmıştır ve bu numunelere de çelik numunelere uygulanan ısıl işlemlerin aynıları uygulanmıştır. Çekme numuneleri boyutları Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Hazırlanan çekme ve darbe numuneleri

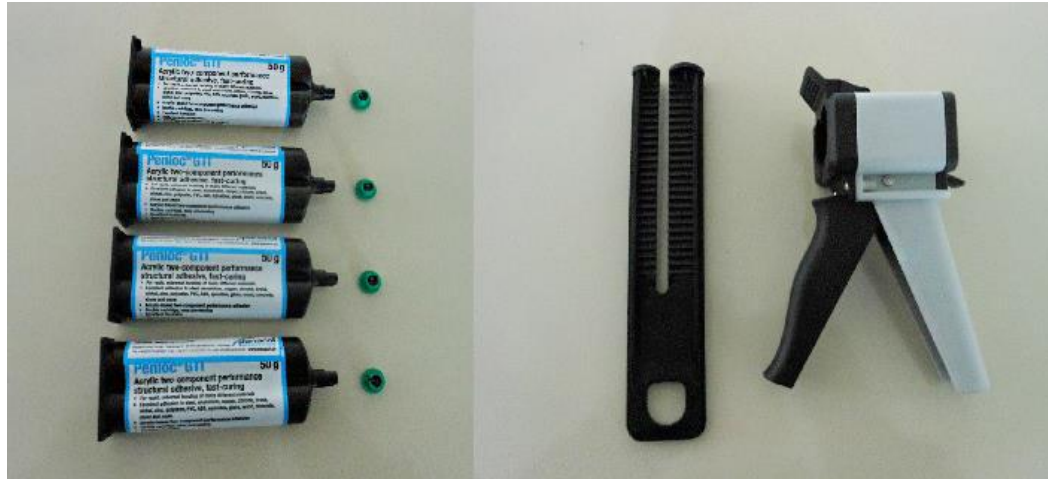


Şekil 4.3. Bu çalışmadaki daire kesitli metal malzemelerde kullanılan çekme numunesi ölçüleri (TSE, 2011b)

Çentik darbe numuneleri standartta verilen boyutlarda Doğuş Metal firmasında, KMT 300 KDG model şerit testere ile kesildikten sonra aynı firmada bulunan Atinon BV20 model torna tezgâhı kullanılarak numunelerin V çentikleri açılmıştır. Çekme deneyi numuneleri ise Adana’da hizmet veren Kanöver Metal firmasında, TOS TN50 marka torna tezgahında standartta verilen boyutlarda işlenerek hazırlanmıştır.

Yalın çelik numunelerle eşit alan yoğunluğuna sahip seramik ön katmanlı kompozit numuneler hazırlanmıştır. Seramik ön katmanlı kompozit numunelerde bir kümede 8,5 mm kalınlığında ve 50x50 mm boyutlarında SiC seramik plakalar diğer kümede ise 9,3 mm kalınlığında ve 50x50 mm boyutlarında Al₂O₃ plakalar kullanılmıştır. SiC plakaların yoğunluğu 3,10 g/cm³, Al₂O₃ plakaların yoğunluğu ise 3,86 g/cm³'tür. Seramik plakaların yoğunlukları Arşimet ilkesinden yararlanılarak hesaplanmış olup her iki seramik için de 4'er farklı plakanın yoğunlukları bulunmuş daha sonra bulunan yoğunluk değerlerinin ortalamaları alınmıştır. SiC plakaların temini Nurol Teknoloji A.Ş. firmasından gerçekleştirilmiştir. Plakalar 220-280 bar basınçta soğuk sıkıştırılmış ardından 2150 °C'de vakumlu ortamda sinterlenerek üretilmiştir (Özer, 2015).

Seramik ön katmanlı kompozit numunelerde ara katmanda yapıştırıcı olarak akrilik esaslı yapıştırıcı tercih edilmiştir. Yapıştırıcının kürlenmemiş durumdaki yoğunluğu 1,2 g/cm³'tür. Çizelge 4.2'de mekanik özellikleri gösterilmiştir. Yapıştırma esnasında dozaj tabancası kullanmak suretiyle eşit miktarda yapıştırıcı sürülmesine özen gösterilmiştir. Dozaj tabancası ve akrilik esaslı yapıştırıcı Şekil 4.4'te gösterilmiştir (Özer, 2015).



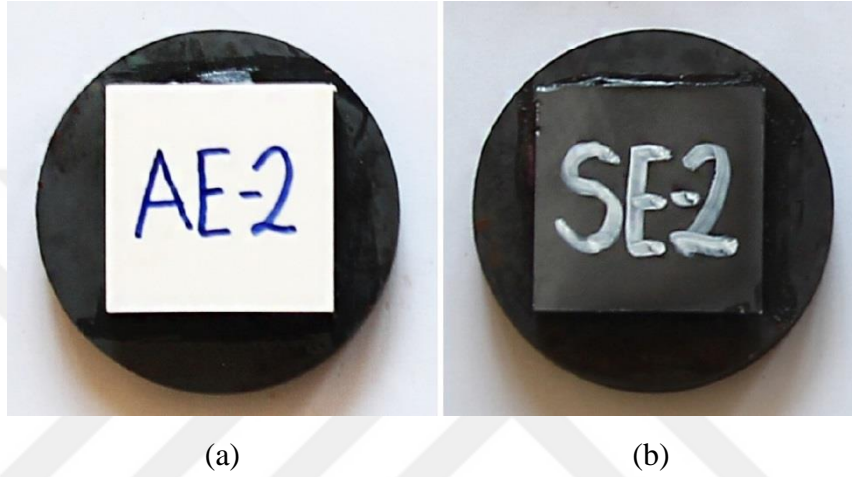
Şekil 4.4. Dozaj tabancası ve akrilik esaslı yapıştırıcı (Özer, 2015)

Çalışmada kullanılan katmanlı kompozit numunelerin bir kümesi Al₂O₃ seramik ön katmanı, yapıştırıcı ara katmanı ve AISI 4140 çelik arka katmanından diğer kümesi ise SiC ön katmanı, yapıştırıcı ara katmanı ve AISI 4140 çelik arka katmanından oluşmaktadır. Al₂O₃ ön katmanlı kompozit bir adet numune ve SiC ön katmanlı

kompozit bir adet numunenin görüntüsü Şekil 4.5'te, hazırlanan numunelerin kümelenmiş görüntüsü ise Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Kurlenmiş akrilik esaslı yapıştırıcının mekanik özellikleri (Özer, 2015)

Sertlik (Shore D)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Elastik Modül (MPa)
55	~ 7,67	~ 3,5	462



Şekil 4.5. (a) Al_2O_3 ön katmanlı kompozit numune, (b) SiC ön katmanlı kompozit numune



Şekil 4.6. Yalın çelik numuneler

Çalışmada kullanılmış olan katmanlı kompozit ve yalın çelik numuneler alan yoğunlukları ve numune kodlarıyla birlikte Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Alan yoğunlukları (kg/m^2), numune kalınlığı (m) ile malzeme

yoğunluğunun (kg/m^3) çarpılması yoluyla hesaplanmıştır. Alan yoğunlukları hesaplarında kullanılan denklemler denklem (4.1) ve denklem (4.2)'de verilmiştir.

$$A_{Y_{\text{çelik}}} = \rho_{(1)} h_{(1)} \quad (4.1)$$

$$A_{Y_{\text{kompozit}}} = \rho_{(1)} h_{(1)} + \rho_{(2)} h_{(2)} \quad (4.2)$$

A_Y = Alan yoğunluğu (kg/m^2)

ρ = Yoğunluk (kg/m^3)

h = Zırh malzemesi kalınlığı (m)

Denklem (4.1)'de ve denklem (4.2)'de alt indiste bulunan 1 değeri çeliği ifade ederken 2 değeri ise seramiği ifade etmektedir. Kullanılan numunelerde deney sonrası karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla katmanlı kompozitler ve yalın çeliklerin toplam alan yoğunlukları eşit olacak şekilde katmanların kalınlıkları hesaplanmıştır.



Şekil 4.7. SiC ön katmanlı kompozit numuneler



Şekil 4.8. Al_2O_3 ön katmanlı kompozit numuneler

Çizelge 4.3. Yalın çelik numuneler

Numune Kodu	Kalınlık (mm)	Alan Yoğunluğu (kg/m ²)
YA	6	47,04
YB	8	62,72
YC	10	78,40
YD	12	94,08
YE	14	109,76
YF	16	125,44
YG	18	141,12

Çizelge 4.4. Katmanlı kompozit numuneler

Numune Kodu	Seramik Ön Katmanı (mm)	AISI 4140 Arka Katmanı (mm)	Alan Yoğunluğu (kg/m ²)
SB	8,5	4,63	62,72
SC	8,5	6,63	78,40
SD	8,5	8,63	94,08
SE	8,5	10,63	109,76
SF	8,5	12,63	125,44
SG	8,5	14,63	141,12
AB	9,3	3,42	62,72
AC	9,3	5,42	78,40
AD	9,3	7,42	94,08
AE	9,3	9,42	109,76
AF	9,3	11,42	125,44
AG	9,3	13,42	141,12



Şekil 4.9. Aynı alan yoğunluğuna sahip numunelerin kümelenmiş gösterimi

Numune kodlarında ilk harf olarak Y, S ve A kullanılmış olup Y harfi ile başlayan numuneler yalın çelik, S harfi ile başlayan numuneler SiC ön katmanlı kompozit ve A harfi ile başlayan numuneler Al₂O₃ ön katmanlı kompozittir. Numune kodlarındaki ikinci harfler için A, B, C, D, E, F ve G harfleri kullanılmış olup ikinci harfleri aynı olan numuneler aynı alan yoğunluğuna sahiptir. Balistik deneyler için her numuneden 3'er adet hazırlanmış olup numune kodlarında belirtilen 1, 2 ve 3 rakamları birbiri ile aynı özellikte olan bu 3 adet numuneyi ayırmak amacıyla kullanılmıştır. Aynı alan yoğunluğu değerine sahip katmanlı kompozitler ve yalın çelikler Şekil 4.9'da kümelenerek gösterilmiştir.

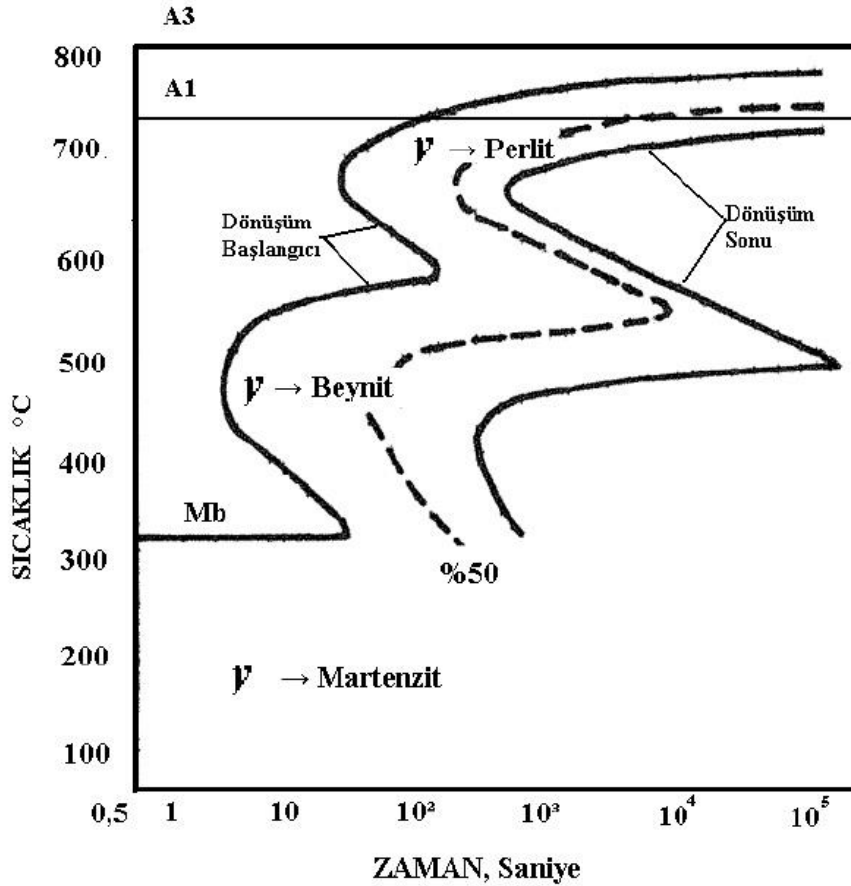
4.2. Numunelerin Isıl İşlem ve İyapı Çalışmaları

Isıl işleme girmek üzere hazırlanmış olan 57 adet çelik plaka ile çekme ve çentik darbe numuneleri 10 bölüme ayrılmış ve her bölüm için ayrı ayrı östempereleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Astaş Isıl İşlem firması bünyesindeki bir adet ortam denetimli kuyu tipi fırında 860 °C'de 1 saat süresince östenitleştirme işlemi gerçekleştirilmiş ardından numuneler 343 °C sıcaklıktaki tuz banyosuna aktarılmıştır. Tuz banyosunda 50 dakika boyunca bekletilen numuneler daha sonra buradan alınarak havada soğumaya bırakılmıştır. Şekil 4.10'da östenitleştirme işleminin gerçekleştirildiği ortam denetimli kuyu tipi fırın gösterilmektedir.



Şekil 4.10. Ortam denetimli kuyu tipi fırın

Gerçekleştirilen çalışmada balistik deney öncesi ısıl işlem uygulanan tüm AISI 4140 çelik malzemelerin içyapısının alt beynite dönüşmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.11’de AISI 4140 çeliğine ait zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı gösterilmektedir. Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramında da görüldüğü gibi AISI 4140 çeliğinde içyapının alt beynite dönüşebilmesi için numunelerin sıcaklığının yaklaşık 30 saniyelik bir süre içerisinde M_b sıcaklığının biraz üzerindeki bir sıcaklıkta ısıl dengeye ulaşması gerekmektedir. Tuz banyosuna aktarım gerçekleştikten sonra ısıl dengenin mümkün olan en kısa sürede sağlanabilmesi amacıyla tüm malzemeler 10 kümeye ayrılarak ve bu işlem için özel olarak üretilmiş küçük malzeme sepetleri kullanılarak östemperlemeye tabii tutulmuştur. Şekil 4.12’de östemperleme işlemi tamamlanmış ve henüz sepet içerisinden çıkarılmamış olan malzemeler gösterilmektedir.



Şekil 4.11. AISI 4140 Çeliğine ait zaman-sıcaklık-dönüşüm (ZSD) diyagramı (Kesti, 2009)

Östemperleme işleminde ortam denetimli kuyu tipi fırın içerisindeki C oranı endogaz üretici (Şekil 4.13) vasıtasıyla sağlanmış olup tüm ısıl işlem denetimli bir şekilde

gerçekleşmiştir. Tuz banyosunda ise baryum nitrat ve sodyum siyanür tuz karışımı kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Östemperlenme işlemi tamamlanmış AISI 4140 çeliğinden plakalar



Şekil 4.13. Endogaz üretici

Çelik numunelere uygulanmış olan östemperleme işleminin çeliğin içyapısı üzerindeki etkisi metalografiyle incelenmiştir. Gerçekleştirilen metalografi testinde dağlayıcı olarak %3 nital dağlayıcı çözelti kullanılmıştır. 60 saniye sürede dağlama

gerçekleştirilmiştir. Metalografide kullanılan kesme, zımpara/parlatma ve bakalite alma cihazları Şekil 4.14’te gösterilmiştir.

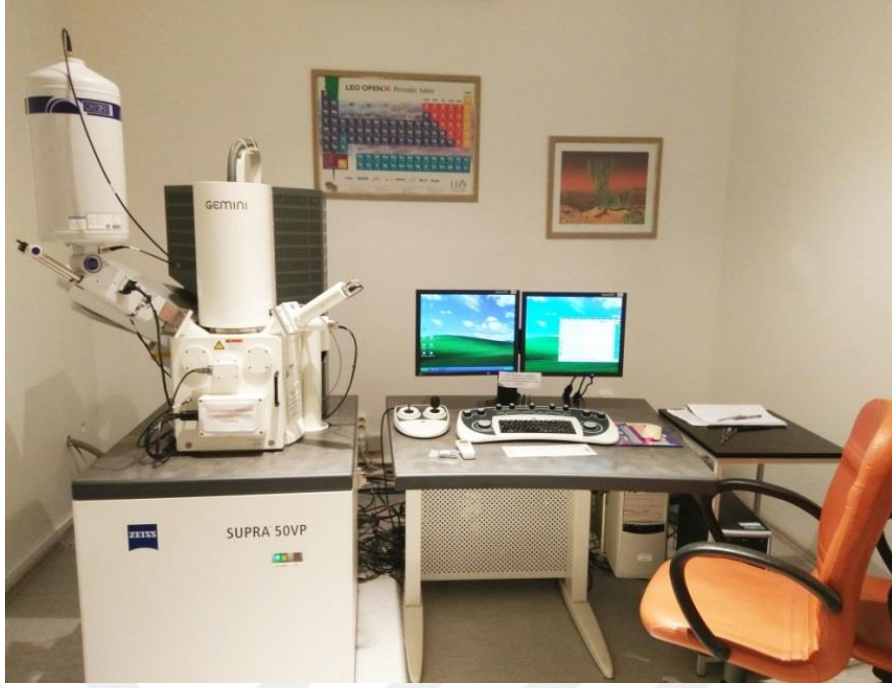


Şekil 4.14. Kesme cihazı Metcon Metacut-M 250 (sol), bakalite alma cihazı Metcon Ecopress 100 (orta), zımpara ve parlatma cihazı Metcon Forcipol 2V (sağ)

Al_2O_3 seramik plakaların içyapı incelemesi TEM kullanılarak TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsünde gerçekleştirilmiştir. Numuneler kırıldıktan sonra incelenecek olan kırılmış yüzeyleri basınçlı hava ile temizlenmiş ve Polaron marka püskürtmeli kaplayıcı ile 60 s süresince altın (Au)-paladyum (Pd) (80/20) ile kaplanmıştır. Ardından JEOL/JSM-6335F marka TEM’de içyapı görüntüleri alınmıştır. İçyapı görüntülerini almak amacıyla kullanılmış olan TEM Şekil 4.15’te gösterilmiştir.



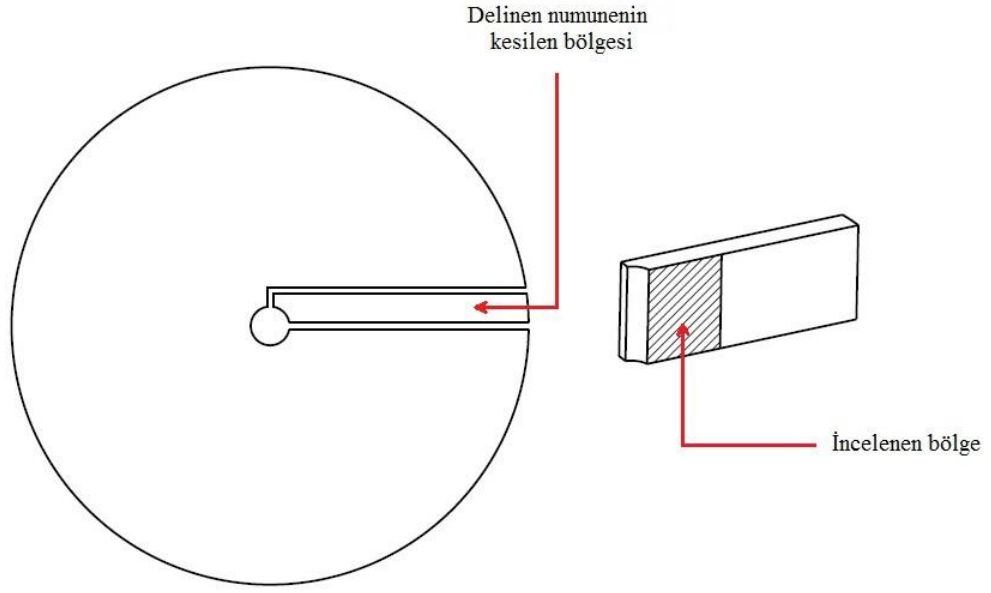
Şekil 4.15. JEOL/JSM-6335F marka taramalı elektron mikroskobu



Şekil 4.16. ZEISS SUPRA 50 VP marka taramalı elektron mikroskobu

SiC seramik plakaların içyapı incelemesi ise TEM kullanılarak Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. Numuneler kırıldıktan sonra incelenecek olan kırılmış yüzeyleri basınçlı hava ile temizlenmiş ardından dağlanmaksızın ve kaplanmaksızın Zeiss Supra 50 VP marka TEM'de in-lens modunda içyapı görüntüleri alınmıştır. İçyapı görüntülerini almak amacıyla kullanılmış olan TEM Şekil 4.16'da gösterilmiştir.

Balistik deneylerin gerçekleştirilmesinin ardından delik oluşumu gözlenen numunelerde içyapıda oluşan AKB incelenmiştir. AKB incelemelerinin yapılması amacıyla oluşan deliğe yakın bölgelerden numune alınmıştır. İçyapı incelemeleri numunelerin mermi yönüne dik durumda olan yüzeyinde yapılmıştır. İnceleme yapılan bölgenin çizgisel gösterimi Şekil 4.17'de verilmektedir. Delik oluşumu görülen bölgede içyapıda oluşan AKB incelemesinde %3 nital dağlayıcı kullanılmış ve 25 saniye dağlama süresi uygulanmıştır. Tüm metalografi incelemeleri Şekil 4.18'de gösterilmekte olan OLYMPUS BX51 model ışık mikroskobunda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.17. AKB incelemesi yapılan numunelerin çizgisel gösterimi



Şekil 4.18. OLYMPUS BX51 model ışık mikroskobu

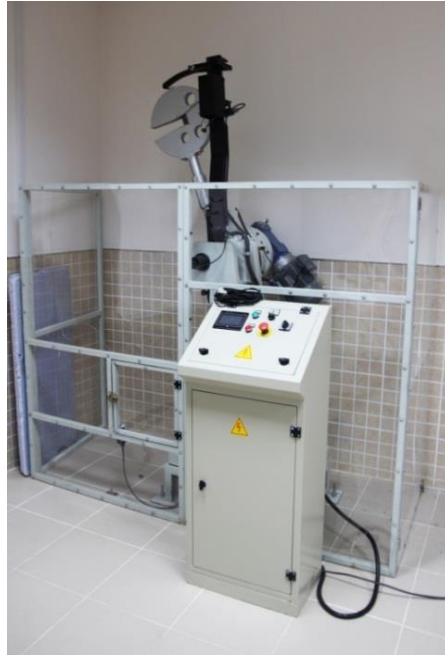
4.3. Numunelerin Mekanik Deneyleri

Gerçekleştirilen östemperleme ısı işleminin AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla sertlik, darbe ve çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi KOSGEB Adana Laboratuvarında yapılırken darbe deneyi ve sertlik ölçümleri OKÜ Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında yapılmıştır. Darbe ve çekme deneyleri için 3'er adet numune hazırlanmıştır. Sertlik ölçümleri ise tüm çelik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çekme deneyi Şekil 4.19’da gösterilmekte olan DARTEC-MTS marka cihazda “TS EN ISO 6892-1” (TSE, 2011b) standardına uygun olarak; Charpy darbe deneyi Şekil 4.20’de gösterilmekte olan ALŞA 450 CE marka cihazda “TS EN ISO 148-1” (TSE, 2011a) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri ise Şekil 4.21’de gösterilmekte olan BMS DIGIROCK-RBOV marka cihazda Rockwell C sertlik ölçüm yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.19. DARTEC-MTS marka çekme cihazı



Şekil 4.20. ALŞA 450 CE marka darbe cihazı



Şekil 4.21. BMS DIGIROCK-RBOV marka sertlik ölçüm cihazı

4.4. Numunelerin Balistik Testleri

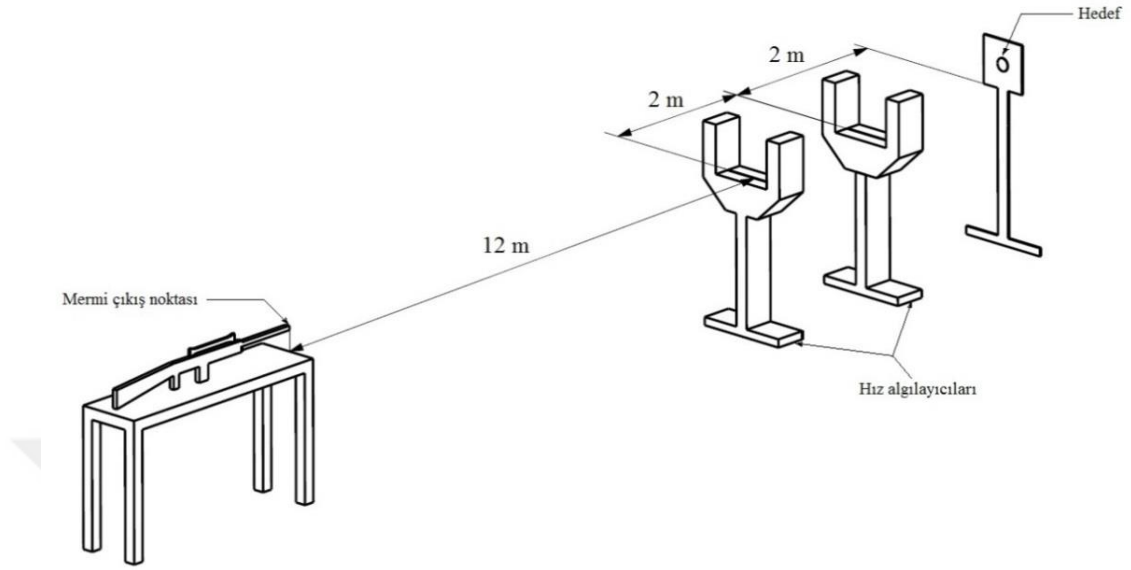
MKE Silahsan A.Ş. bünyesinde bulunan atış poligonunda balistik testler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan silah Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Deneylerde kullanılan G3 piyade tüfeği

Balistik testler 7,62 mm ZD mermiler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mermi çıkış noktası ile hedef arası mesafe 16 m olarak ölçülmüş ve ayarlanmıştır. Hedefler

merminin hedefe girişi dik olacak vaziyette yerleştirilmiştir. Balistik deney düzeneğine ait çizgisel gösterim Şekil 4.23'te verilmektedir.



Şekil 4.23. Balistik deney düzeneğine ait çizgisel gösterim

Hız algılayıcılar ile mermi hızları ölçülmüş ve ortalama hız değeri hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan ZD mermiler Şekil 4.24'te gösterilmiştir.

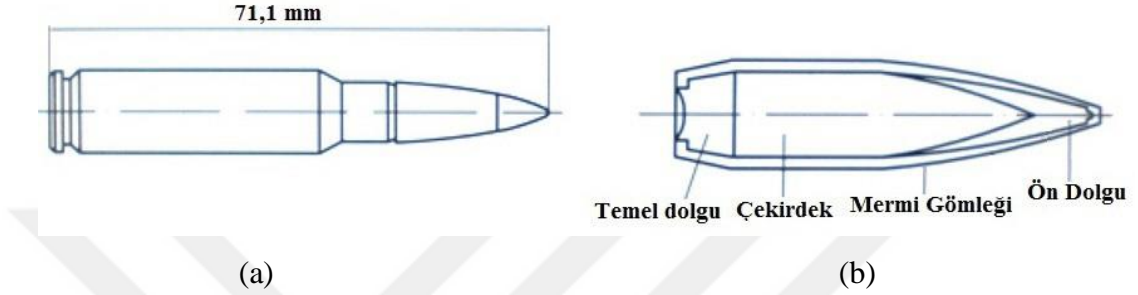


Şekil 4.24. 7,62 mm ZD mermiler

Kullanılan 7,62 mm ZD mermilerin özellikleri Çizelge 4.5'te (USMS, 1991) çizgisel gösterimi ise Şekil 4.25'te gösterilmiştir (Demir, vd., 2008).

Çizelge 4.5. 7,61 mm ZD merminin özellikleri (USMS, 1991)

Fişek uzunluğu	71,12 ± 0,76 mm
Fişek kütlesi	25,47 ± 1,75 g
Gömlek malzemesi	7,62x51 mm Pirinç (CuZn30)
Çekirdek malzemesi	DIN 100Cr6 (61- 62 RSD-C)
Mermi kütlesi	9,75 ± 0,7 g
Mermi uzunluğu	32,95 mm
Burun çeşidi	Konik (yarım koniklik açısı, $\alpha_k = 17^\circ$)



Şekil 4.25. (a) 7,62 mm ZD mermi fişegi çizgisel görünümü, (b) Mermi kesit görüntüsü (MIL-C-60617A, 1991)

5. DENEY SONUÇLARI ve İRDELEME

5.1. Mekanik Özellikler

Balistik test öncesinde, ısıtılma işlemi tamamlanan çelik numunelerin (RSD-C) değerinden sertlik değerlerinin ölçümleri alınmıştır. Çelik numunelerin her birinin üzerinden 5 ölçüm alınmıştır. Her kalınlıktan 3 adet numune bulunduğu için toplamda her kalınlık değeri için 15 sertlik ölçümü alınmış ve bu alınan sertlik değerlerinin ortalamaları hesaplanmıştır. Çelik numunelere ait ortalama sertlik değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Kullanılan SiC seramik plakaların sertliği ~ 2483 Vickers sertlik değeri (Özer, 2015) ve Al₂O₃ seramik plakaların sertliği ise ~ 1900 Vickers sertlik değeri olarak belirlenmiştir (Übeyli, vd., 2008).

Çizelge 5.1. Çelik numunelerin ölçülen sertlik değerleri

Numune Kodu	Numune Kalınlığı	Ortalama Sertlik (RSD-C)	Numune Kodu	Numune Kalınlığı	Ortalama Sertlik (RSD-C)
YA	6 mm	42,7	SE	10,63 mm	40,7
YB	8 mm	41,4	SF	12,63 mm	40,2
YC	10 mm	41,2	SG	14,63 mm	40,0
YD	12 mm	40,4	AB	3,42 mm	44,8
YE	14 mm	40,0	AC	5,42 mm	42,4
YF	16 mm	40,5	AD	7,42 mm	41,9
YG	18 mm	39,6	AE	9,42 mm	42,2
SB	4,63 mm	42,8	AF	11,42 mm	41,8
SC	6,63 mm	40,9	AG	13,42 mm	41,3
SD	8,63 mm	42,1			

Çekme deneyi gerçekleştirilerek çelik melzemedede östemperleme sonrasında değişen çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzama gibi mekanik özellikler belirlenmiştir. Çekme deneyi "TS EN ISO 6892-1" (TSE, 2011b) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası kırılmış olan çekme numuneleri Şekil 5.1'de, deney sonuçlarını gösteren ölçülen mekanik özellikler Çizelge 5.2'de, çekme numunelerinin kırılan yüzeyleri Şekil 5.2'de, çekme deneyi ile elde edilen ortalama verilerle

oluşturulan mühendislik gerilmesi–mühendislik gerinimi eğrisi ise Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



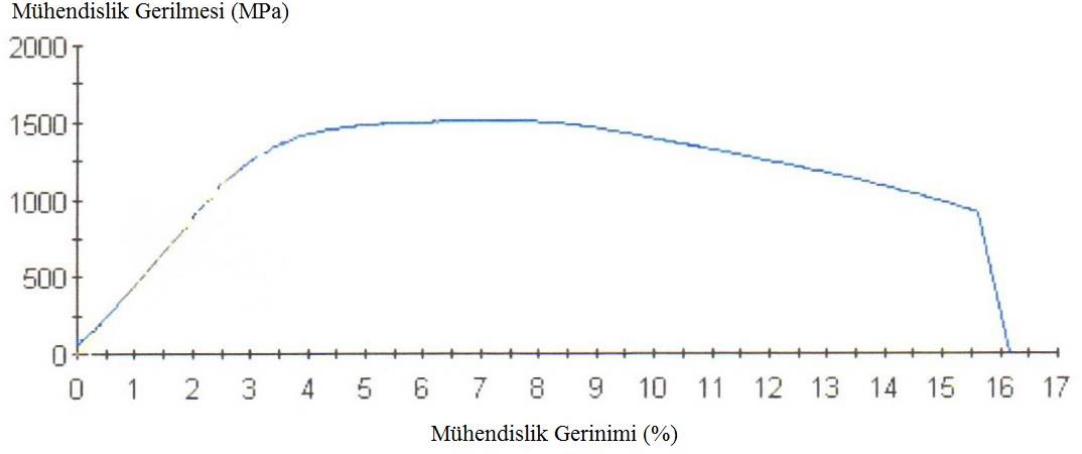
Şekil 5.1. Çekme deneyi sonucunda kırılan Çekme numuneleri

Çizelge 5.2. Östemperleme sonrasında numunelerin mekanik zellikleri

Numune No	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
1	1282	1510	14
2	1269	1502	14
3	1294	1521	14
Ortalama	1282	1511	14



Şekil 5.2. Çekme numunelerinin kırılan yüzeyleri



Şekil 5.3. Çekme deneyi sonrasında elde edilen gerilme-gerinim eğrisi

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5.2)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.3)$$

σ = Mühendislik gerilmesi (Pa)

F = Çekme kuvveti (N)

A_0 = İlk kesit alanı (m²)

ε = Mühendislik gerinimi

Δl = Uzama miktarı (m)

l_0 = İlk boy (m)

E = Elastik modül (Pa)

Dayanım gibi önemli diğer bir mekanik özellik de darbe tokluğudur. Balistik deneyde numuneler doğrudan merminin oluşturduğu darbeye maruz kalırlar. Numunenin tokluğu düşük ise ve buna bağlı olarak gevrek davranış göstermesi durumunda darbenin etkisiyle numunede çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi ve numunenin delinmesi buna bağlı olarak da numunenin balistik olarak başarısızlığı söz konusu olacaktır. Darbe tokluklarının ölçülmesi için Charpy çentik-darbe deneyi gerçekleştirilmiştir. Darbe deneyi TS EN ISO 148-1 (TSE, 2011a) standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası elde edilen kırılma enerjisi ve darbe tokluğu değerleri Çizelge 5.3'te verilmiştir. Kırılma enerjisi yüksek olan malzemenin darbe

tokluğu da yüksek olmaktadır. Deneylerde kullanılan numuneler ve kırılan yüzeyleri ise Şekil 5.4’te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Charpy çentik-darbe numuneleri ve deney sonrasında kırılan yüzeyleri

Çizelge 5.3. Östemperlenmiş numunelerin darbe testi verileri

Numune No	Kırılma Enerjisi (Joule)	Darbe Tokluğu (J/cm ²)
1	27,5	34,38
2	34,5	43,13
3	28,2	35,25

5.2. İyapı İncelemesi

5.2.1. Balistik Test Öncesi İncelemeler

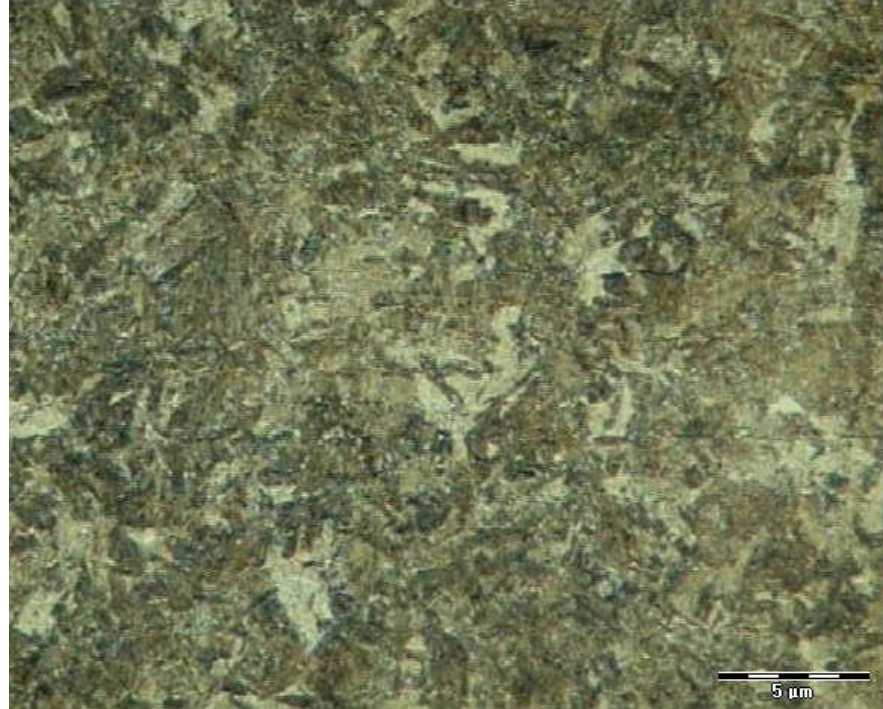
Bu bölümde östemperlenmiş çelik numunelerin ısı işlem sonrasındaki iyapıları incelenmiştir. İyapı incelemesi için 3% nital dağlayıcı (97% etanol, 3% nitrik asit) kullanılmıştır. Işık mikroskopunda x500 ve x1000 büyütmelemlerde iyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. İyapılar Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da gösterilmiştir. Küçük tane boyutu daha çok tane sınırı anlamına gelmektedir. Plastik şekil değişimi esnasında tane sınırları dislokasyon hareketleri önünde engel oluşturmaktadır. Bu durum dayanımı artıran bir özellik olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’daki iyapı görüntülerinde görüldüğü üzere tane boyutları çok küçüktür. Gerçekleştirilen östemperleme ısı işleminin ardından iyapıda alt beynit eldesi gerçekleşmiştir. Katmanlı kompozit numunelerin ön katmanlarında kullanılmış

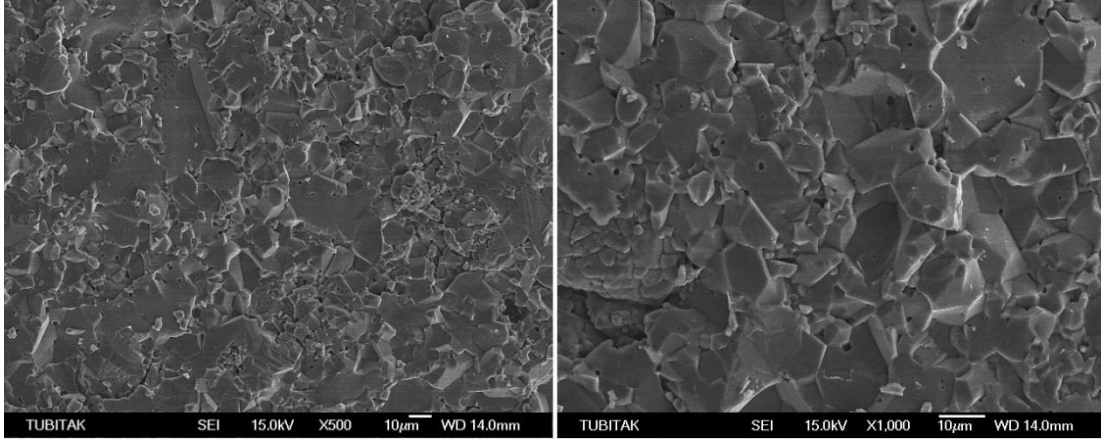
olan Al_2O_3 seramik plakalarına ait TEM görüntüleri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de; SiC seramik plakalarına ait TEM görüntüleri ise Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da gösterilmektedir.



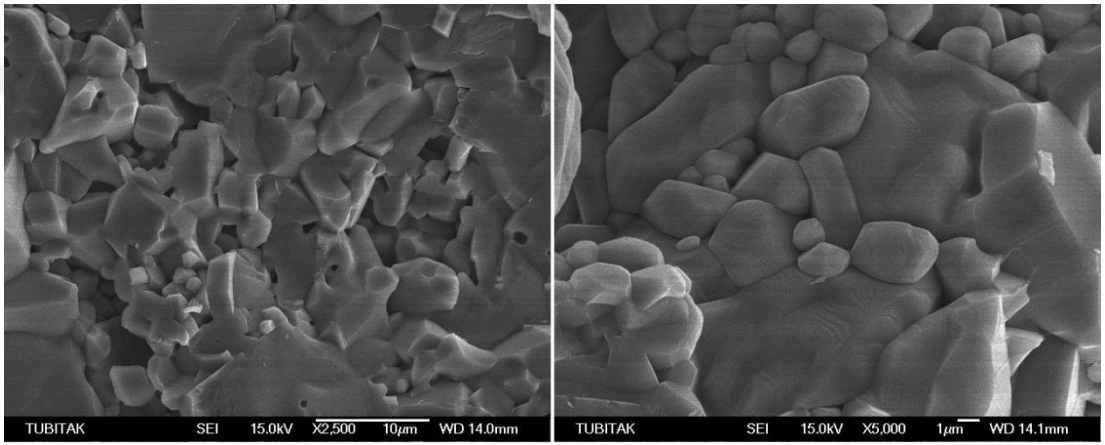
Şekil 5.5. Balistik test öncesi numunelerin x500 büyütmede içyapı görüntüsü



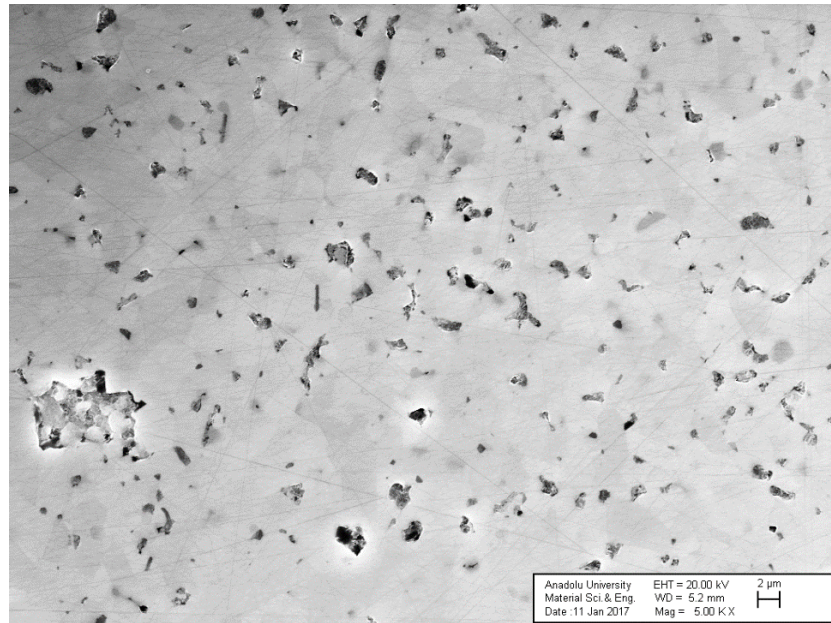
Şekil 5.6. Balistik test öncesi numunelerin x1000 büyütmede içyapı görüntüsü



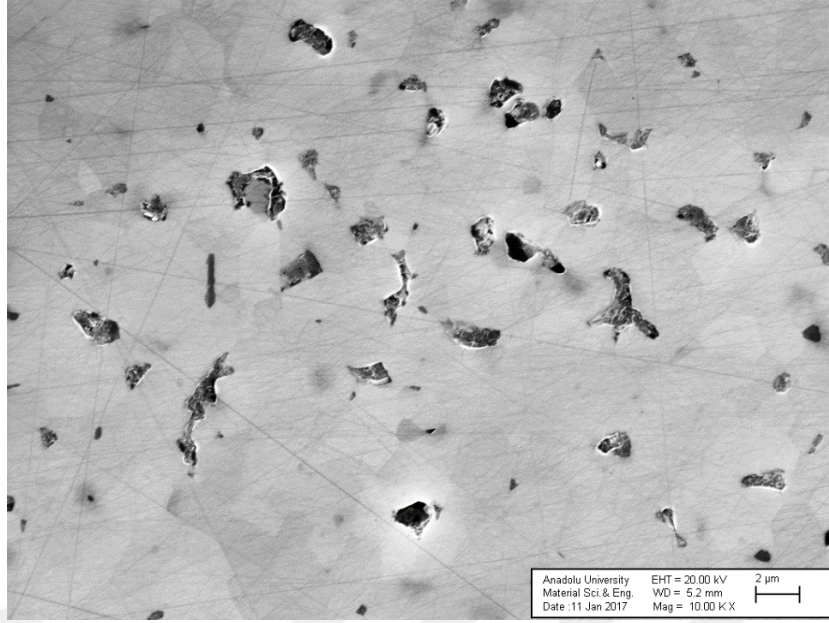
Şekil 5.7. Al₂O₃ seramik plakanın x500 ve x1000 büyütmelerde TEM görüntüleri



Şekil 5.8. Al₂O₃ seramik plakanın x2500 ve x5000 büyütmelerde TEM görüntüleri



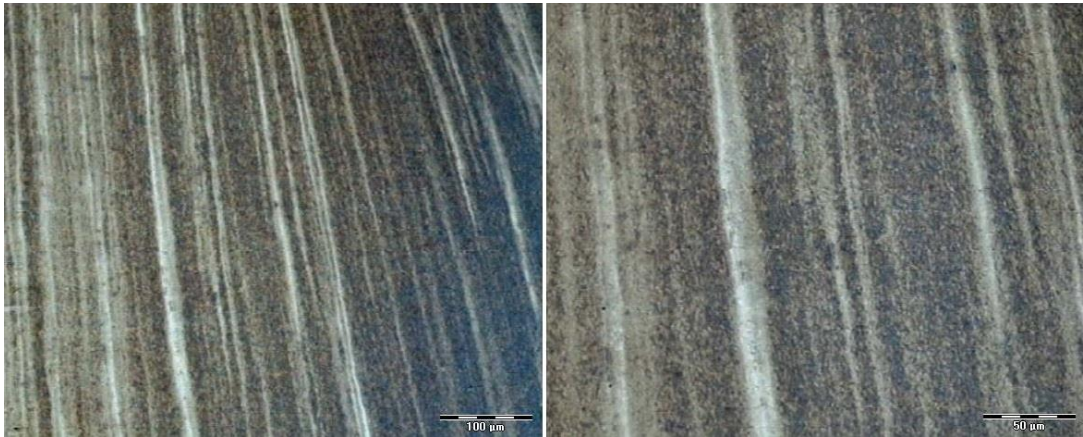
Şekil 5.9. SiC seramik plakanın x5000 büyütmede TEM görüntüsü



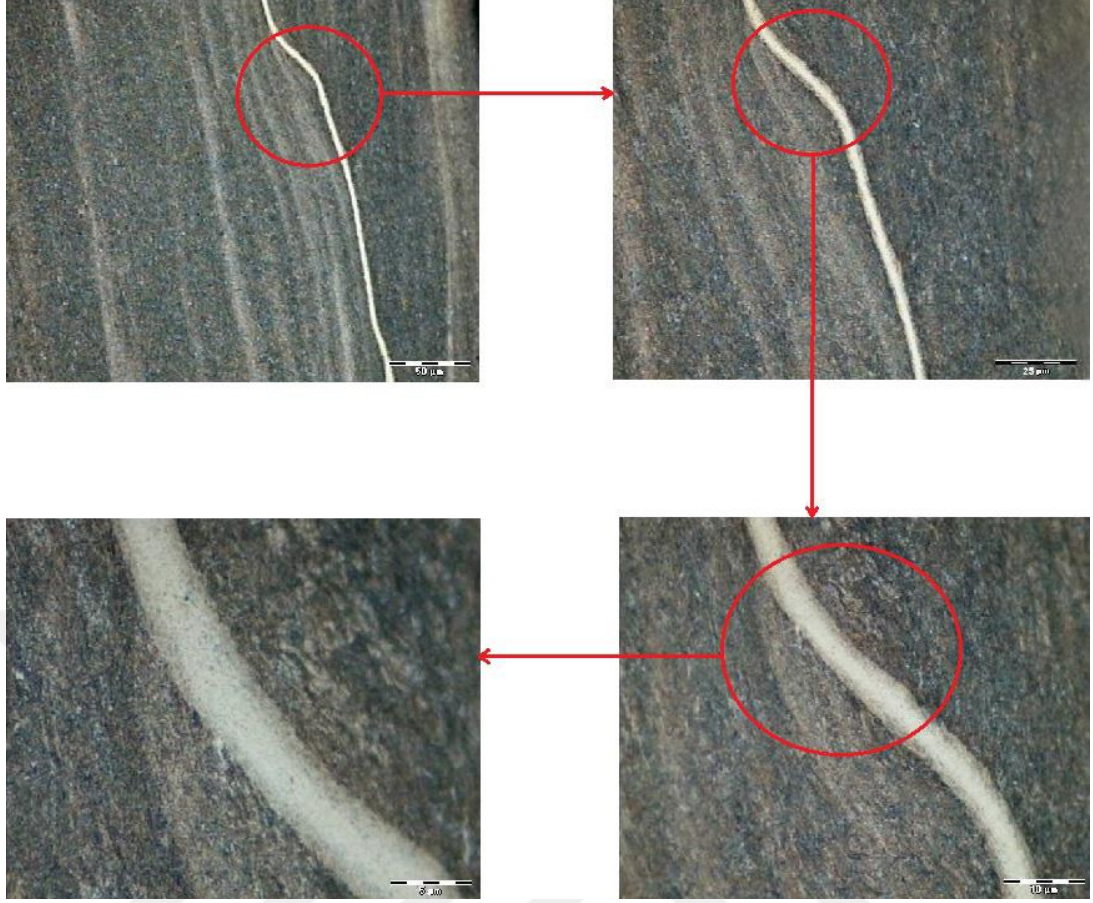
Şekil 5.10. SiC seramik plakanın x10000 büyütmede TEM görüntüsü

5.2.2. Balistik Test Sonrası İncelemeler

Adyabatik kayma, metallerde yüksek gerinim hızları altında oluşan bir tür şekil değişimidir. Adyabatik şekil değişimi gelişmesi için yüksek hız yani düşük şekil değişimi süresi ve düşük ısıl iletkenliği yani yüksek gerinim hızlarında oluşan ısının malzemeden uzaklaşması için yeterli zaman bulunmaması gereklidir. Malzemede sıcaklığın artması ve ısıl yumuşama neticesinde gerinim sertleşmesi hızında azalma meydana gelir. Malzemede oluşan ısıl yumuşama ve yüksek hızlara sahip dinamik yükler altında gerçekleşen yüksek kayma şekil değişimi sonucunda AKB oluşur (Zukas, 1990).



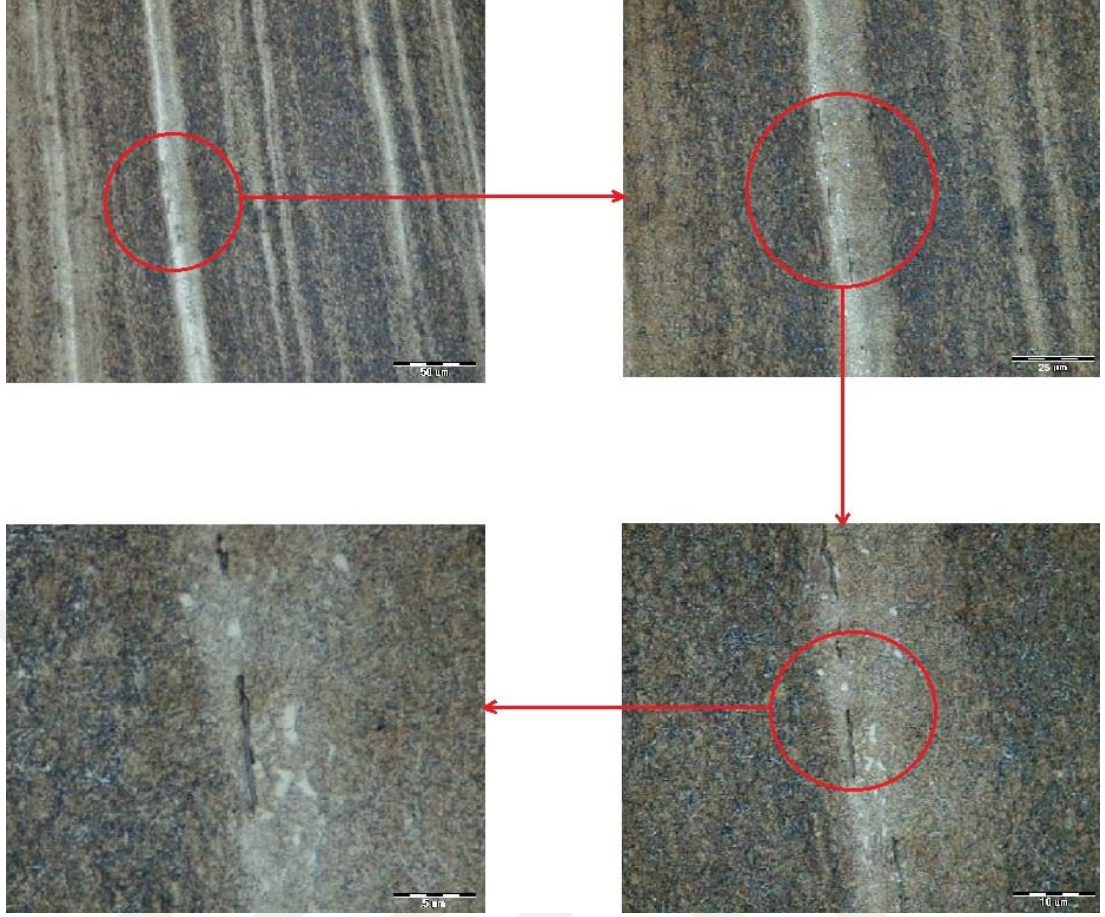
Şekil 5.11. Delik bölgesi yakınlarında görülen dönüşmüş AKB oluşumları



Şekil 5.12. Delik etrafında görülen tam dönüşmüş AKB oluşumu

AKB dönüşmüş ve bozulmuş olmak üzere iki türdür. Dönüşmüş bantların yapısında kristalografik faz dönüşümü söz konusudur ve ışık mikroskopunda dağlanmış beyaz bant olarak görülürler. Bozulmuş bantlarda ise içyapı ana yapıyla aynıdır. Ancak taneler büyük oranda şekil değişimi veya kaymaya uğrarlar (Dormeval, 1987).

Gerçekleştirilen balistik testin ardından yapılan incelemede çeliklerin içyapısında değişiklik olmadığı görülmüştür. Ancak numunelerin delik bölgesinde AKB gözlemlenmiştir. AKB Şekil 4.16'da gösterildiği gibi delik bölgesinden alınan numunelerin mermi geliş yönüne dik yüzeyinde incelenmiştir. İnceleme altına alınan numunelerde delik bölgesi yakınında dönüşmüş AKB oluşumunun başladığı görülürken tam dönüşmüş AKB ise yalnızca delik etrafında gözlemlenmiştir. Şekil 5.11'de dönüşmüş AKB oluşumları, Şekil 5.12'de delik etrafında görülen tam dönüşmüş AKB ve Şekil 5.13'te AKB içinde oluşan mikro çatlaklar gösterilmektedir.



Şekil 5.13. AKB içinde oluşan mikro çatlaklar

5.3. Balistik Test Sonuçları

Zırh malzemesinin balistik başarımını etkileyen başlıca iki özellik arasında tercih edilen zırh malzemesi türü ve merminin mekanik özellikleri yer almaktadır. Zırh malzemeleri ve merminin dayanımı, sertliği, kimyasal bileşimi; zırh malzemelerinin darbe tokluğu ve elastik modülü, merminin darbe hızı ve açısı, boyut ve şekli balistik başarımı doğrudan etkileyen unsurlardandır. (Meyers,1994), (Zukas,1990).

Gerçekleştirilen balistik çalışmada mevcut bulunan 57 adet numune için 57 atış yapılmış ve bu atışların her birinde mermi hızı sayısal bir cihazda görüntülenerek kayıt altına alınmıştır. Tüm mermi hızlarının kayıt edilmesinin ardından ortalama mermi hızı 788,4 m/s olarak hesaplanmıştır.

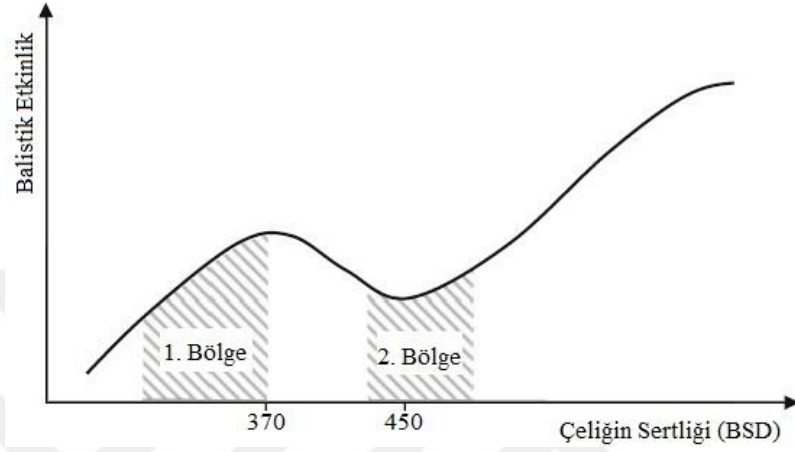
Hedef malzemeye mermi çarptığında hedef malzemenin ön yüzünden arka yüzüne doğru basma gerilmesi dalgaları meydana gelir. Ardından bu dalgalar arka yüzeyden yansır ve malzemenin ön yüzüne doğru çekme gerilmesi dalgaları meydana gelir. Çekme ve basma gerilmesi dalgalarının etkileşimi hedef malzemede çatlak oluşumu ve ilerlemesinin oluşmasına neden olur. Oluşan bu dalgalara hedef malzemenin dayanabilmesi için tokluk ve dayanım değerlerinin yeterli olması gerekmektedir (Meyers,1994).

Dayanım, malzemenin balistik başarımını etkileyen özelliklerin başında gelmektedir. Yüksek dayanım değerlerine sahip malzemelerin balistik başarımlarının daha yüksek olması beklenir. Ancak malzemenin dayanımının artırılması sünekliğini azaltacaktır. Sünekliği çok düşük olan malzemelerde darbe bölgesinde çatlak oluşumları meydana gelir ve bu durum malzemenin balistik etkinliğini düşürmektedir (Rosenberg, 2012).

Sertlik değerleri düşük olan malzemeler daha sünek olduklarından dolayı bu malzemelerde sünek delinme meydana gelmektedir. Malzemede sertlik arttıkça malzemenin balistik başarımının artması beklenir (Rosenberg, 2012). Malzemenin sertliği artarken belirli bir aralıkta oluşan adyabatik kaymalardan dolayı malzeme dayanımı büyük oranda düşmekte ve adyabatik kaymalar tıkanmaya neden olarak balistik başarısızlık doğurmaktadır. Malzemede hasar mekanizmasında gerçekleşen bu sünek delinme-tıkaç oluşumu geçişi, özellikle ince et kalınlığına sahip plakalarda oldukça önemlidir. Woodward bu konuda bir çalışma gerçekleştirmiş ve adyabatik kayma nedeniyle başarısız olan hedef malzemelerin delinme direncini hesaplamak amacıyla kullanılan bir model geliştirmiştir. Şekil 5.14'te gerçekleşen bu geçiş görülmektedir (Woodward, 1978).

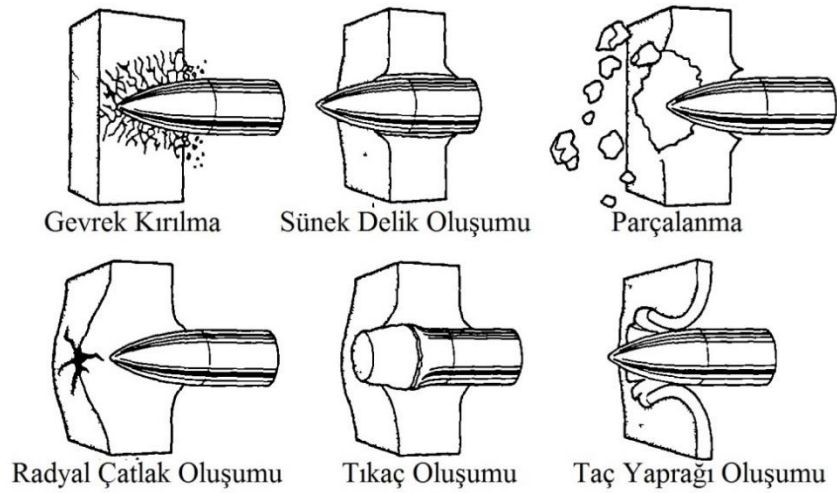
Çeliğin balistik etkinliği 370 BSD'ye kadar sürekli artış gösterir. Bu sertlik değerinden sonra adyabatik kaymadan dolayı merminin yolunda kayma hasarlarından kaynaklı hedefte tıkanma oluşumu ve malzemenin esneyip bükülmesinden kaynaklı halka oluşumu gerçekleşeceğinden balistik etkinlikte düşüş meydana gelecektir. 450 BSD'den sonra balistik etkinlikte yeniden artış gözlemlenir. Çok yüksek sertlik değerine sahip çelikler daha kırılıgandır bu yüzden darbe almalarının ardından darbe bölgesi civarında hasar oluşumu meydana gelir bu durum da malzemenin aynı bölgede

çoklu darbe karşılama yeteneğini düşürür. Şekil 5.14'te görülen 1. bölge genellikle tank ana gövdelerinde tercih edilen sertlik aralığıdır. 2. bölgede ise sertlik değerinin sert çekirdeğe sahip mermiyi parçalamaya yetecek ölçüde olması beklenir. Metal malzemelerde darbe sonrası görülen hasar mekanizmaları Şekil 5.15'de gösterilmektedir (Rosenberg, 2012).



Şekil 5.14. Çelik plakanın sertliğinin sert çekirdeğe sahip mermiler karşısında balistik etkinliğe etkisi (Rosenberg, 2012)

Zırh tasarımcısının kullanabileceği iki temel zırh türü bulunmaktadır. Bunları pasif ve reaktif sistemler olarak adlandırmak mümkündür. Pasif sistemlerde mermi tek başına zırh bileşenlerinin malzeme özelliklerine göre durdurulmaktadır. Reaktif sistemlerde ise bozulma ve sapma ile merminin yıkıcı etkisini azaltmak amaçlanmaktadır (Hazell, 2016).

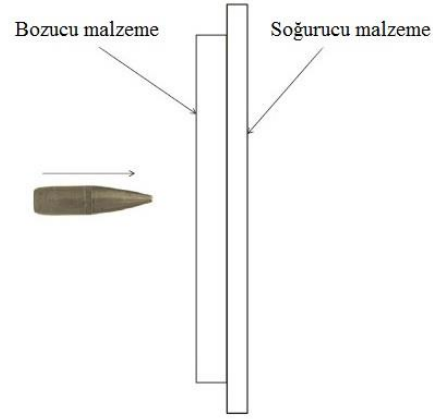


Şekil 5.15. Çelik malzemede oluşabilecek hasar mekanizmaları (Rosenberg, 2012)

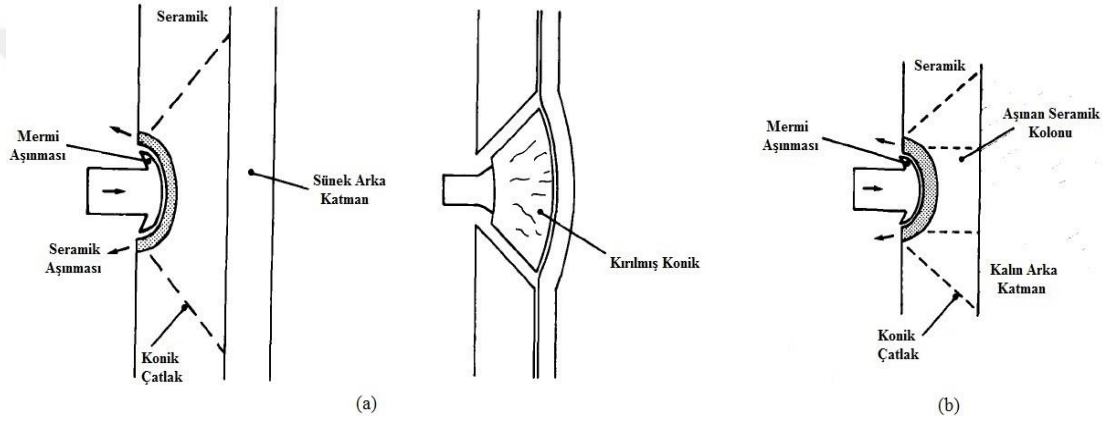
Zırh sistemlerinin mümkün olabildiğince etkili ve hafif olması arzu edilmektedir. Bunun sağlanabilmesi için de düşük yoğunluklu ve darbeye karşı yüksek dirençli sistemleri tercih etme gereği doğmaktadır. Zırh malzemelerini malzeme özellikleri ve mermiye karşı davranış biçimine göre iki farklı kümede incelemek mümkündür. Zırh malzemeleri doğada ya enerjii yıkıcı ya da enerjii soğurucu olma eğilimindedir. Enerjii yıkma eğiliminde olan malzemeler yüksek dayanımlı çelikler veya seramikler gibi yüksek dayanımlı malzemeler içerisinde tercih edilirler. Bu malzemelerin amacı gelen mermii köreltmek veya çabucak aşındırmaktır. Mermi parçalanırsa merminin sahip olduğu kinetik enerji parçalara ayrılmış ve dağıtılmış olur. Enerjii soğurucu malzemeler ise mermi veya mermi parçalarının sahip olduğu kinetik enerjii plastik deformasyon yoluyla soğurma eğilimindedir. Zırh sisteminin enerji soğurucu bileşenleri hasara uğramadan önce büyük miktarda plastik şekil değışimine uğrayabilme yeteneğine sahip malzemelerdir. Çoğu uygulamada bozucu malzemenin soğurucu bir malzemeye bağlandığı görülmektedir. Bu sayede merminin kinetik enerjisinin büyük bir kısmı bozucu malzeme tarafından bozunmakta, kalan kısmı ise soğurucu malzeme tarafından soğurulmakta ve hasar oluşmaksızın koruma sağlanabilmektedir. Şekil 5.16'da bozucu ve soğurucu malzeme ikilisinin oluşturduğu zırh sistemi şematik olarak gösterilmektedir (Hazell, 2016). Bu çalışmada bozucu malzeme olarak Al_2O_3 ve SiC seramik plakaları, soğurucu malzeme olarak AISI 4140 çeliğı kullanılmıştır.

Metallerin büyük kısmı merminin sahip olduğu kinetik enerjii plastik şekil değışimine uğrayarak soğururken, seramikler ise kırılmaya uğrayarak soğururlar. Mermi seramik plakaya çarptığında, plakada önce konik çatlak oluşumu ardından da parçalanma gözlemlenir. Mermi seramik/metal katmanlı kompozit zırha yüksek hızda çarptığında gerçekleşen durumlar ve seramik plakada gelişen konik oluşumu Şekil 5.17'de gösterilmektedir. Şekilde merminin aşındığı kabul edilmektedir (Woodward, 1989).

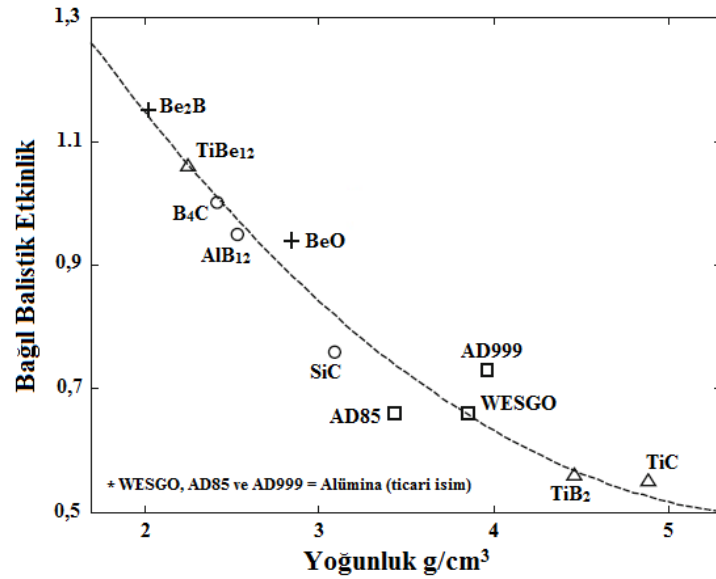
Seramik malzemelerde, malzemenin balistik etkinliğini kullanılan seramiğın saflığı ve kimyasal bileşimi doğrudan etkilemektedir. Şekil 5.18'de farklı seramik türlerinin bağıl balistik etkinlik ve yoğunluk grafiğı gösterilmektedir (Rosenberg, 2012).



Şekil 5.16. Bozucu ve soğurucu malzeme çiftinin oluşturduğu zırh sistemi (Hazell, 2016)



Şekil 5.17. (a) Arka katmanda şekil değişiminin bulunduğu durum (b) Arka katmanda şekil değişiminin bulunmadığı durum (Woodward, 1989)



Şekil 5.18. Farklı seramik türlerinin bağıl balistik etkinlik ve yoğunluk grafiği (Rosenberg, 2012)

5.3.1. Çelikler

Östemperlenmiş yalın çeliklere ait gerçekleştirilen balistik test sonucunda 12 mm'ye kadar delinme gerçekleşirken 14 mm ve üzerindeki kalınlığa sahip numunelerde tam başarımlar sağlanmıştır. Yalın çelik numunelere ait test sonuçları Çizelge 5.4'te gösterilmektedir. Çizelge 5.4'te görüldüğü üzere en iyi balistik başarımlar 14 mm kalınlığında ($109,8 \text{ kg/m}^2$) tam başarımla sağlanmıştır.

Balistik testin ardından yalın çelik numuneler incelendiğinde görülen başlıca hasar mekanizmasının sünek delik oluşumu olduğu görülmüştür. Bununla birlikte YD1, YE2, YE3 ve YG1 numunelerinin arka yüzeylerinde radyal çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Nedeni mermi batma derinliğinin numunenin kalınlığına oldukça yakın olmasıdır. Yalın çeliklerin test sonrası görüntüleri Şekil 5.19'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Yalın çeliklere ait balistik test sonuçları

Numune Kodu	Kalınlık (mm)	Başarıml Durumu	Delinme Olasılığı (%)
YA-1	6 mm	Başarısız	100
YA-2		Başarısız	
YA-3		Başarısız	
YB-1	8 mm	Başarısız	100
YB-2		Başarısız	
YB-3		Başarısız	
YC-1	10 mm	Başarısız	66
YC-2		Başarılı	
YC-3		Başarısız	
YD-1	12 mm	Başarılı	66
YD-2		Başarısız	
YD-3		Başarısız	
YE-1	14 mm	Başarılı	0
YE-2		Başarılı	
YE-3		Başarılı	
YF-1	16 mm	Başarılı	0
YF-2		Başarılı	
YF-3		Başarılı	
YG-1	18 mm	Başarılı	0
YG-2		Başarılı	
YG-3		Başarılı	



Şekil 5.19. Östemperlenme uygulanan yalın çeliklerin balistik atış sonrasında ön (sol) ve arka (sağ) görüntüleri a) 47 kg/m², b) 62,7 kg/m², c) 78,4 kg/m² delinen, d) 78,4 kg/m² delinmeyen, e) 94,1 kg/m² delinmeyen, f) 94,1 kg/m² delinen, g) 109,8 kg/m², h) 125,4 kg/m² ve i) 141,1 kg/m²



Şekil 5.20. Arka yüzünde radyal çatlak oluşan numunelerin görüntüleri



Şekil 5.21. 62,7 kg/m² alan yoğunluğuna sahip numunenin atış sonrası görüntüsü

Balistik test ardından yapılan incelemelerde bazı numunelerde mermi çekirdeğinin yoluna düz devam ettiği bazı numunelerde ise çarpma sonrası yön değiştirdiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.20’de test sonrası radyal çatlak oluşumu görülen numuneler gösterilmektedir. Numunelerde delik bölgesinde oluşan aşınma, darbe sonucu oluşan izler, mermi çıkış anında oluşan şekil değişimi ve mermi çıkış anında parça kopması yaşanan bölgenin incelenmesi amacıyla $62,7 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğuna sahip bir adet çelik numune Şekil 5.21’de gösterilmiştir.

Yalın çelikler üzerinde gerçekleştirilen balistik deney ardından çelik mermi çekirdeklerinden bazıları şekil değişimine uğramaksızın bütün halde kalmış, bazıları şekil değişimine uğramış, bazıları ise çarpma etkisiyle parçalanmıştır. Şekil 5.22’de atışların sonrasında bazı mermi kovanları ve mermi çekirdeklerinin aldığı görüntüler verilmektedir.



Şekil 5.22. Atışların sonrasında bazı mermi kovanları ve mermi çekirdeklerinin aldığı görüntüler

Bu bölümde, malzeme içeriği ve uygulanan ısıl işlemler bakımından benzer çeliklere uygulanan balistik deneyler araştırılmış ve sonuçlar bu çalışmada elde edilenlerle mukayese edilmiştir. Demir ve arkadaşlarının, (Demir, vd., 2008) gerçekleştirdikleri çalışmada $782 \pm 5,4 \text{ m/s}$ darbe hızına sahip mermi ile balistik testi yapılan 4140 çeliğinde 100 kg/m^2 ’de tam başarımlı sağlanmış, en iyi balistik başarımlı ise yaşlandırılmış Al alaşımı 7075-T651’te 85 kg/m^2 alan yoğunluğuyla kaydedilmiştir. Çalışmada kullanılan 4140 çeliğine ait en iyi balistik başarımlıdaki çekme dayanımı 1640 MPa , akma dayanımı 1400 MPa ve sertlik değeri $53,4 \text{ RSD-C}$ ’dir. 7075-T651 AA’ya ait en iyi balistik başarımlıdaki çekme dayanımı 570 MPa , akma dayanımı 500 MPa ve sertlik değeri 170 BSD ’dir. Gerçekleştirilen çalışmaya bakıldığında çok yüksek dayanım ve sertlik değerlerinde numunelerde çatlak oluşumu ve parçalanma

gözlemlenmiş olup söz konusu durum da balistik başarımı düşürmüştür. Bu sonuç göz önüne alındığında sertlik ve dayanımın yanında tokluğun da balistik başarımlar açısından önemli olduğu açıkça görülebilmektedir. 4140 çeliğine ait en iyi balistik başarımın sağlandığı alan yoğunluğu değeri, bu çalışmada kullanılan östemperlenmiş 4140 çeliğinin en iyi balistik başarımındaki alan yoğunluğu değeri olan $109,8 \text{ kg/m}^2$ 'den düşüktür. Bu çalışmada kullanılan östemperlenmiş 4140 çeliğinin çekme dayanımı değeri 1511 MPa, akma dayanımı değeri 1282 MPa ve sertliği 41,4 RSD-C olup bu değerler Demir ve arkadaşlarının (Demir, vd., 2008) çalışmasında kullanılan 4140 çeliğinin sertlik ve dayanım değerlerinden daha düşük değerlerdir. Sertlik ve dayanım değerlerinin daha düşük olmasının temel nedeni ise uygulanan östemperleme ısıl işlemi sonucunda çıkılabilen sertlik ve dayanım değerlerinin daha düşük kalmış olmasıdır.

Atapek ve Karagöz'ün (Atapek ve Karagöz, 2011), gerçekleştirdiği çalışmada ağırlık bakımından %0,23 C, %0,19 Si, %0,19 Mn, %0,5 Mo, %1,4 Cr, %2,35 Co, %0,04 Ni içeriğine sahip 12,7 mm kalınlığındaki çelik numuneye sırasıyla östenitleme, su verme ve $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de menevişleme işlemleri uygulanarak beynit içyapısına sahip numune elde edilmiştir. Elde edilen numunenin çekme dayanımı 1270 MPa ve sertliği 36 RSD-C'dir. Numuneye 7,62 mm ZD mermi ile 840 m/s mermi hızında 30 m uzaklıktan balistik test uygulanmıştır. Balistik test sonucunda $99,57 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğuna sahip numunede taçlanma tipi delik oluşumu görülmüştür. Bu çalışmada ise $94,1 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğu değerindeki 3 numuneden biri delinmezken diğer ikisi delinmiştir. Atapek ve Karagöz'ün (Atapek ve Karagöz, 2011), gerçekleştirdiği çalışmada uygulanan ısıl işlem neticesinde elde edilen dayanım ve sertlik değerleri bu çalışmada elde edilenlerden düşüktür. Bu durum da $99,57 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğuna sahip beynit içyapısındaki çelikte oluşan delinmeyi açıklamaktadır. Atapek ve Karagöz'ün (Atapek ve Karagöz, 2011), gerçekleştirdiği çalışmada da bu çalışmada olduğu gibi içyapıda tam dönüşmüş AKB oluşumu gözlemlenmiştir.

Demir ve arkadaşlarının (Demir, vd., 2009a), gerçekleştirdiği çalışmada $779 \pm 4,5 \text{ m/s}$ hıza sahip 7,62 mm ZD mermilerle 100Cr6 ve AISI 4340 çelikleri üzerinde balistik deney yapılmıştır. AISI 4340 çeliğinde en iyi balistik başarımlar 70 kg/m^2 'de tam başarımlar elde edilerek sağlanmış, 100Cr6 çeliğinde ise 100 kg/m^2 'de

tam başarımla ile sağlanmıştır. 100Cr6 eliğinde balistik başarımla en iyi olduğu durumda çekme dayanımı 1570 MPa, akma dayanımı ise 1200 MPa ve sertlik ise 40,4 RSD-C değerindedir. AISI 4340 eliğinde balistik başarımla en iyi olduğu durumda çekme dayanımı 1600 MPa, akma dayanımı 1300 MPa ve sertlik ise 49,5 RSD-C değerindedir. En yüksek dayanım ve sertlik değerlerinde tokluğun balistik başarımla üzerindeki etkisinden dolayı en yüksek başarımla sağlanamamıştır. Her iki malzemeye ait numuneler de martenzit içyapısına sahiptir. Bu çalışmada kullanılan stemperlenmiş AISI 4140 eliğinin çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik değerleri ile Demir ve arkadaşlarının (Demir, vd., 2009a), çalışmasında kullanılan 100Cr6 eliğine ait çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik değerleri oldukça yakın olmakla birlikte 85 kg/m² alan yoğunluğunda 100Cr6 numunelerinin tamamı delinmiş, AISI 4140 eliğinde 78,4 kg/m² alan yoğunluğunda her 3 numuneden 2'si delinmiş; 100 kg/m² alan yoğunluğunda 100Cr6 numunelerde tam başarımla sağlanmış ve 109,8 kg/m² alan yoğunluğunda AISI 4140 eliğinde tam başarımla sağlanmıştır. Sonuçlar göz önüne alındığında tam başarımla sağlanan alan yoğunluğu değerlerinin yakınlığı gözlenebilmektedir. Demir ve arkadaşlarının (Demir, vd., 2009a), çalışmasında kullanılan AISI 4340 eliğinde 1550 MPa ekme dayanımı, 1200 MPa akma dayanımı ve 39,5 RSD-C sertlik değerine sahip olan martenzit i yapısındaki menevişlenmiş numunelerde tam başarımla 115 kg/m²'de sağlanabilmıştir. Söz konusu numunelerde tam başarımla sağlanabilen alan yoğunluğu değerinin de bu çalışmada tam başarımla sağlanabilen 109,8 kg/m² alan yoğunluğu değerine yakınlığı açıkça grlmektedir. Deney sonuçlarından da görülebildiği gibi birbirine yakın çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik değerlerinde içyapının beynit veya martenzit olmasının her üç elik türü için de balistik başarımla açısından belirgin bir fark yaratmadığı gözlemlenmiştir. AISI 4340 eliğinin 70 kg/m² alan yoğunluğu ile bu çalışmada tam başarımla sağlanan 109,8 kg/m² alan yoğunluğundan daha düşük bir değerde tam başarımla sağlayabilmesinin, martenzit içyapısındaki AISI 4340 elik numunelerinin en iyi balistik başarımla sahip olduğu dayanım ve sertlik değerlerinin bu çalışmadaki AISI 4140 eliğinin sahip olduğu sertlik ve dayanım değerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Übeyli ve arkadaşları (Übeyli, vd., 2007), 805 ± 15 m/s darbe hızına sahip 7,62 mm ZD mermilerle 50CrV4 eliği üzerinde balistik testler yapmışlardır. 50CrV4 elik

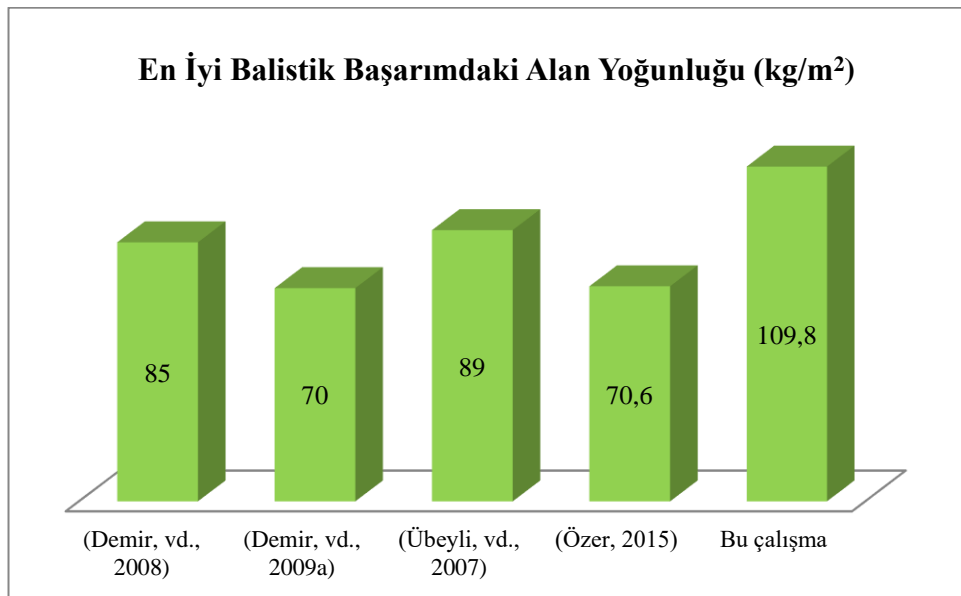
numunelerinde en iyi balistik başarımları 89 kg/m^2 alan yoğunluğu değerinde $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de menevişlenmiş numunelerde kaydedilmiştir. 50CrV4 çeliğinde en iyi balistik başarımdaki çekme dayanımı 1700 MPa , akma dayanımı 1490 MPa ve sertlik ise 60 RSD-C değerindedir. 50CrV4 çeliğinin 89 kg/m^2 alan yoğunluğu ile bu çalışmada tam başarımları sağlanan $109,8 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğundan daha düşük bir değerde tam başarımları sağlayabilmesinin, martenzit içyapısındaki 50CrV4 çelik numunelerinin en iyi balistik başarımları sahip olduğu dayanım ve sertlik değerlerinin bu çalışmadaki AISI 4140 çeliğinin sahip olduğu sertlik ve dayanım değerlerinden daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Übeyli ve arkadaşları (Übeyli, vd., 2010), gerçekleştirdikleri çalışmada ağırlık bakımından $0,28 \text{ C}$, $0,21 \text{ Cr}$, $1,45 \text{ Mn}$, $0,13 \text{ V}$, $0,20 \text{ Si}$ ve $0,01 \text{ Nb}$ içeriğine sahip çelik numunelere uyguladıkları farklı ısıl işlemlerle düşük, orta ve yüksek martenzit oranlı çift fazlı numuneler elde etmişler ve bu numunelere $786 \pm 3,7 \text{ m/s}$ darbe hızındaki $7,62 \text{ mm}$ ZD mermilerle balistik test uygulamışlardır. Deney sonucunda en iyi balistik başarımları 118 kg/m^2 alan yoğunluğundaki yüksek martenzit içeriğine sahip numunelerde tam başarımları ile sağlanmıştır. En iyi balistik başarımdaki numunelerin sertliği yaklaşık $44,3 \text{ RSD-C}$ ve hacimce martenzit oranı 72% 'dir. En iyi balistik başarımların sağlandığı alan yoğunluğu değerinin bu çalışmada elde edilen en iyi balistik başarımdaki $109,8 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğu değerinden yüksek olduğu görülmektedir. $44,3 \text{ RSD-C}$ sertlik değerinin bu çalışmadaki AISI 4140 çelik numunelerinin sertliğinden daha yüksek olması, bu sonucun oluşmasında çift fazlı çeliğin en iyi balistik başarımdaki dayanım değerlerinin bu çalışmada elde edilen dayanım değerlerinden düşük olabileceği düşüncesini akla getirmekle beraber çift fazlı çeliğin dayanım değerlerinin bilinmemesi nedeniyle kesin bir yargıya varılamamaktadır. Farklı birkaç malzemenin balistik testlerine ait sonuçlar Çizelge 5.5'te verilmektedir. Çizelgede en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değerleri, çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik değerleri malzemelerin tam başarımları sergilediği durumlardaki değerlerdir. Balistik testlerin tamamı $7,62 \text{ mm}$ ZD mermiler ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.5'te verilen çalışmalarda elde edilen en yüksek balistik başarımlardaki alan yoğunluğu değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.24'te verilmektedir. Çizelge 5.5 ve Şekil 5.24'te gösterilen verilerle yapılan

karşılaştırmalar ışığında, malzemelerin sertlik ve dayanımlarının yanı sıra tokluklarının balistik başarımlarında etkili olduğu bir kez daha görülmektedir.

Çizelge 5.5. Farklı çalışmalara ait balistik test sonuçları

Yapılan Çalışma	Kullanılan Malzeme	En İyi Balistik Başarımda Çekme Dayanımı (MPa)	En İyi Balistik Başarımda Akma Dayanımı (MPa)	En İyi Balistik Başarımda Sertlik	En İyi Balistik Başarımdaki Alan Yoğunluğu (kg/m ²)
(Demir, vd., 2008)	AISI 4140 çeliği	1640	1400	53,4 RSD-C	100
(Demir, vd., 2008)	7075-T651 yaşlandırılmış Al alaşımı	570	500	170 BSD	85
(Demir, vd., 2009a)	100Cr6 çeliği	1570	1200	40,4 RSD-C	100
(Demir, vd., 2009a)	AISI 4340 çeliği	1600	1300	49,5 RSD-C	70
(Übeyli, vd., 2007)	50CrV4 çeliği	1700	1490	60 RSD-C	89
(Özer, 2015)	34CrNiMo6 çeliği	1847	1436	51,5 RSD-C	70,6
Bu çalışma	AISI 4140 çeliği	1511	1282	41,4 RSD-C	109,8



Şekil 5.23. Farklı çalışmalarda elde edilen en iyi balistik başarımlardaki alan yoğunluğu değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi

5.3.2. Katmanlı Kompozitler

SiC ön katmanlı kompozit numunelere ait balistik test sonuçları Çizelge 5.6'da ve Al₂O₃ ön katmanlı kompozit numunelere ait balistik test sonuçları Çizelge 5.7'de gösterilmektedir. Katmanlı kompozitlerde gerçekleştirilen balistik testlerin sonrasında SiC ön katmanına sahip SB-1 numunesinde mermi seramik ön katmanının dışında bir bölgeye isabet etmiş olup bu nedenle numune değerlendirilmeye alınamamıştır. Diğer SiC ön katmanlı kompozit numunelerin tamamı delinmeksizin testi başarıyla geçmiştir. Alümina ön katmanına sahip numunelerden ise yalnızca AB-1 numunesi delinirken diğer Al₂O₃ ön katmanlı kompozit numunelerin tamamı delinmeksizin testi başarıyla geçmiştir. Balistik testlerin ardından seramik plakaların tamamının parçalandığı ve yapıştırıcı ara katmandan ayrıldığı görülmüştür.

Çizelge 5.6. SiC ön katmanlı kompozit numunelere ait balistik test sonuçları

Numune Kodu	AISI 4140 Çelik Arka Katmanı (mm)	Başarım Durumu	Delinme Olasılığı (%)
SB-1	4,63 mm	İptal	0
SB-2		Başarılı	
SB-3		Başarılı	
SC-1	6,63 mm	Başarılı	0
SC-2		Başarılı	
SC-3		Başarılı	
SD-1	8,63 mm	Başarılı	0
SD-2		Başarılı	
SD-3		Başarılı	
SE-1	10,63 mm	Başarılı	0
SE-2		Başarılı	
SE-3		Başarılı	
SF-1	12,63 mm	Başarılı	0
SF-2		Başarılı	
SF-3		Başarılı	
SG-1	14,63 mm	Başarılı	0
SG-2		Başarılı	
SG-3		Başarılı	

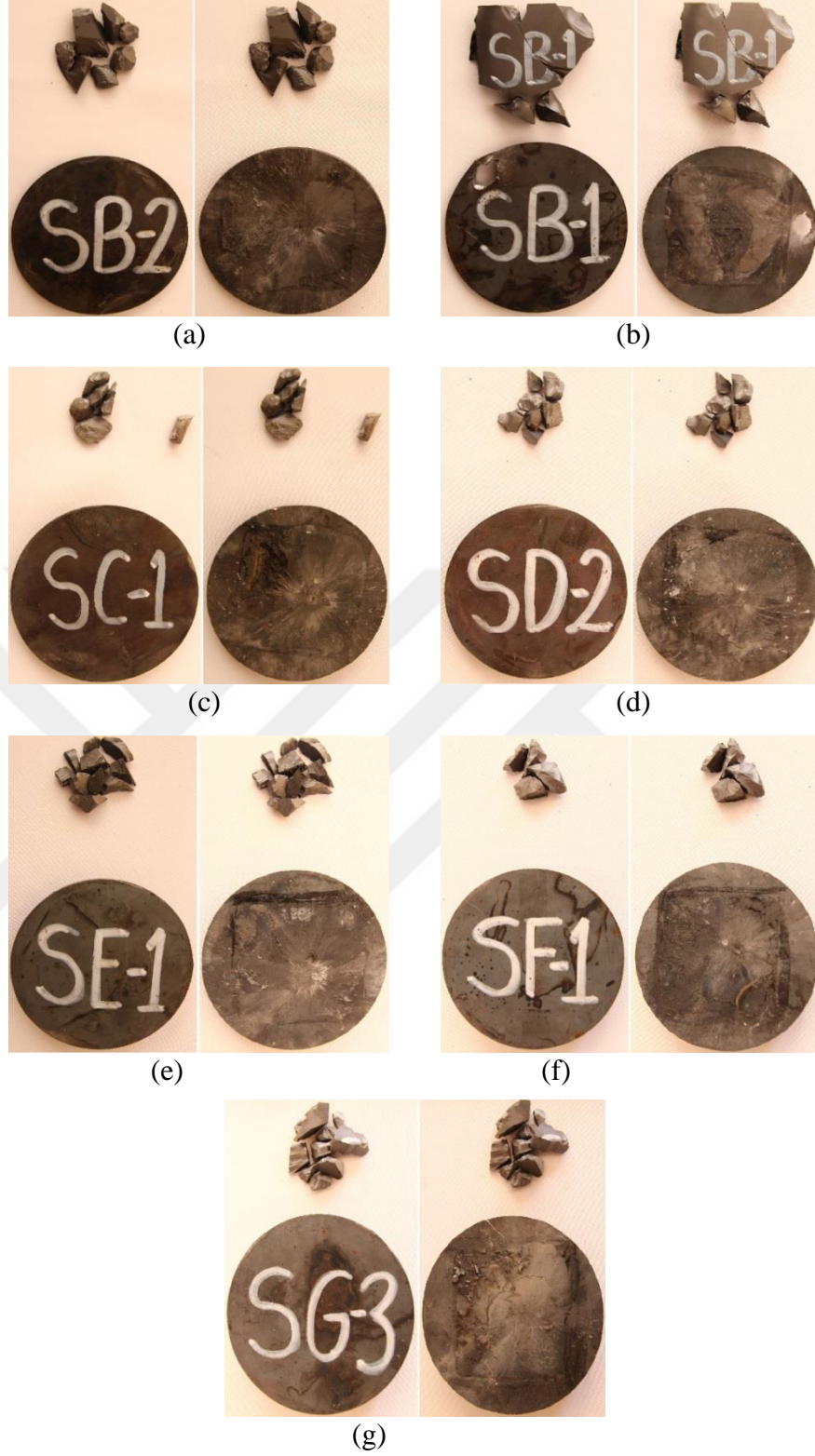
Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7'deki sonuçlar incelendiğinde aynı alan yoğunluğundaki östemperlenmiş yalın 4140 çelik numunelerle kıyaslandığında seramik ön katmanlı kompozit numunelerle daha yüksek balistik başarım sağlandığı görülmektedir. Ayrıca

katmanlı kompozit numuneler yalın çeliklerle kıyaslandığında en büyük üstünlüklerinden biri de hafif olmalarıdır.

Çizelge 5.7. Al₂O₃ ön katmanlı kompozit numunelere ait balistik test sonuçları

Numune Kodu	AISI 4140 Çelik Arka Katmanı (mm)	Başarım Durumu	Delinme Olasılığı (%)
AB-1	3,42 mm	Başarısız	33
AB-2		Başarılı	
AB-3		Başarılı	
AC-1	5,42 mm	Başarılı	0
AC-2		Başarılı	
AC-3		Başarılı	
AD-1	7,42 mm	Başarılı	0
AD-2		Başarılı	
AD-3		Başarılı	
AE-1	9,42 mm	Başarılı	0
AE-2		Başarılı	
AE-3		Başarılı	
AF-1	11,42 mm	Başarılı	0
AF-2		Başarılı	
AF-3		Başarılı	
AG-1	13,42 mm	Başarılı	0
AG-2		Başarılı	
AG-3		Başarılı	

Katmanlı kompozit numunelerin balistik test sonrası görüntüleri Şekil 5.24 ve Şekil 5.25’de gösterilmiştir. Al₂O₃ ön katmanlı kompozit numunelerde en iyi balistik başarım 78,4 kg/m² alan yoğunluğu değerinde tam başarım ile SiC ön katmanlı numunelerde ise 62,7 kg/m² alan yoğunluğu değerinde tam başarım ile sağlanmıştır. Yalın çelik numunelerde en iyi balistik başarımın 109,8 kg/m² alan yoğunluğu değerinde sağlanabildiğini göz önüne alındığında seramik ön katman kullanımı sayesinde Al₂O₃ ön katmanlı kompozitte ağırlıktan ~ %28,6 azalma ve SiC ön katmanlı kompozitte ise ağırlıktan ~ %42,9 azalma sağlanarak yalın çelik numunelerde elde edilen balistik başarımla aynı başarımın elde edilebildiği görülmüştür. Balistik test neticesinde AB-2 ve AB-3 numunelerinin çelik katmanlarında eğilme görülmüş olup eğilen çelik katmanlar Şekil 5.26’da gösterilmektedir. Atışların sonrasında delinmeyen arka katman çeliklerinin yüzeyinde oluşan durumlar Şekil 5.27’de gösterilmektedir.



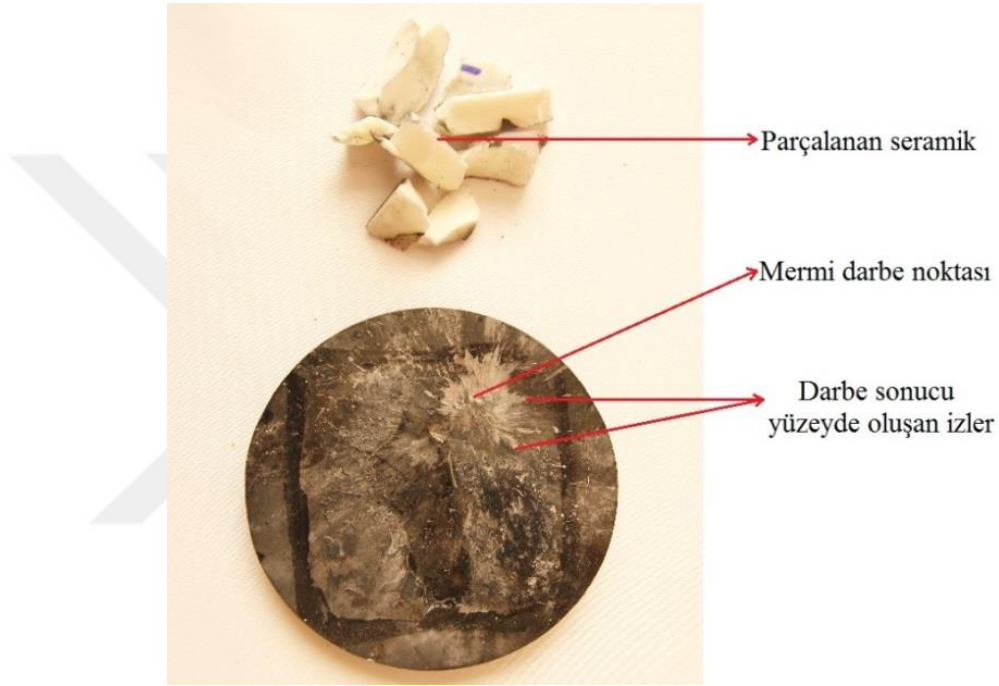
Şekil 5.24. Ön katmanında SiC, arka katmanında östemperlenmiş AISI 4140 çeliği bulunan kompozit numunelerin balistik atış sonrası görüntüleri a) $62,7 \text{ kg/m}^2$ iptal olan numune, b) $62,7 \text{ kg/m}^2$, c) $78,4 \text{ kg/m}^2$, d) $94,1 \text{ kg/m}^2$ e) $109,8 \text{ kg/m}^2$, f) $125,4 \text{ kg/m}^2$, g) $141,1 \text{ kg/m}^2$



Şekil 5.25. Ön katmanında Al_2O_3 , arka katmanında östemperlenmiş AISI 4140 çeliği bulunan kompozit numunelerin balistik atış sonrası görüntüleri a) $62,7 \text{ kg/m}^2$ parçalanmış numune, b) $62,7 \text{ kg/m}^2$, c) $78,4 \text{ kg/m}^2$, d) $94,1 \text{ kg/m}^2$ e) $109,8 \text{ kg/m}^2$, f) $125,4 \text{ kg/m}^2$, g) $141,1 \text{ kg/m}^2$



Şekil 5.26. Balistik test ardından arka katman çeliklerinde görülen eğilme
a) AB-2 numunesi b) AB-3 numunesi



Şekil 5.27. Atış sonrası delinmeyen arka katman çeliklerinin yüzey görünümü

Bu bölümde, daha önceki çalışmalarda balistik testi gerçekleştirilen bazı seramik ön katmanlı kompozitlerle bu çalışmada kullanılanların balistik test sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçlar ortaya konmuştur.

Übeyli ve arkadaşlarının (Übeyli, vd., 2007), gerçekleştirdiği çalışmada ön katmanında alümina ve arka katmanında Al2024-T6 bulunan kompozit numunelere 805 ± 15 m/s darbe hızında balistik test uygulanmıştır. En iyi balistik başarımları, 66 kg/m^2 alan yoğunluğu değerinde elde edilmiştir. Bu çalışmada ön katmanda kullanılan alümina seramiklerinin tümü 9,3 mm kalınlığındadır. Bu yüzden her biri $35,9 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğuna sahiptir. En iyi balistik başarımda AISI 4140 arka

katman çeliğinin alan yoğunluğu $42,5 \text{ kg/m}^2$ ve seramik/metal katman kalınlığı oranı $1,72$ 'dir. Übeyli ve arkadaşlarının (Übeyli, vd., 2007) çalışmasında, tam başarımın sergilendiği en iyi balistik başarımda alümina seramiğinin alan yoğunluğu 53 kg/m^2 ve seramik/metal kalınlık oranı $2,95$ 'dir. Arka katmanın alan yoğunluğu ise 13 kg/m^2 'dir. Tam başarımın elde edildiği alan yoğunluğu değeri, bu çalışmadaki alümina ön katmanlı kompozitin en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değerinden düşüktür. Ancak bu çalışmada kullanılan SiC ön katmanlı kompozitlerde tam başarımın elde edildiği en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değerinden ise yüksektir. Bu durumun en belirgin nedeni silisyum karbürün alüminaya kıyasla balistik dayanımının yüksek olmasıdır. Übeyli ve arkadaşlarının (Übeyli, vd., 2007), çalışmasında seramik/metal kalınlık oranının $5,05$ olduğu aynı ön katman ve arka katman malzemesine sahip olan, toplam alan yoğunluğu 70 kg/m^2 olan numunelerin tamamı başarısız olmuştur. Bu durum da uygun seramik/metal kalınlık oranının belirlenmesinin balistik başarımlar üzerinde ne denli öneme sahip olduğunu bir kez daha göstermektedir. Seramik ön katman/arka katman kalınlık oranı üzerine yapılan çalışmaların üzerinde durmak gerekirse; Florence (Florence, 1969), gerçekleştirdiği çalışmada seramik ön katman kalınlığı ile arka katman malzemesi kalınlığı arasında bir bağıntı ortaya koymuştur. Hetherington (Hetherington, 1992), Florence'in bağıntısını sadeleştirerek tasarımda kolaylık sağlamıştır. Wang ve Lu (Wang ve Lu, 1996), Hetherington'un yaklaşımı üzerinde çalışmışlar ve seramik/arka katman kalınlık oranının $2-2,5$ olduğu durumda en iyi balistik başarımın sağlanabileceği yaklaşımında bulunmuşlardır. Lee ve Yoo (Lee ve Yoo, 2001), ise çalışmalarının sonucunda en uygun seramik/arka katman kalınlık oranının $1,5$ ila 3 arasında olduğunu savunmuşlardır. Übeyli ve arkadaşlarının (Übeyli, vd., 2007), çalışmasında kullanılan alümina ön katmanlı kompozitte ve bu çalışmada kullanılan SiC ön katmanlı ve Al_2O_3 ön katmanlı kompozitlerde tam başarımın sergilendiği en iyi balistik başarımlardaki seramik/metal kalınlık oranı, Lee ve Yoo'nun (Lee ve Yoo, 2001), belirtmiş oldukları aralıktadır.

Demir ve arkadaşları (Demir, vd., 2009b) gerçekleştirdikleri çalışmada ön katmanında alümina ve arka katmanında 4340 çeliği bulunan kompozit numunelere $785 \pm 6,2 \text{ m/s}$ darbe hızında balistik test uygulamışlardır. Çalışmada kullanılan seramiğin kalınlığı sabit olup 6 mm 'dir. Bu değer $23,7 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğuna denk gelmektedir.

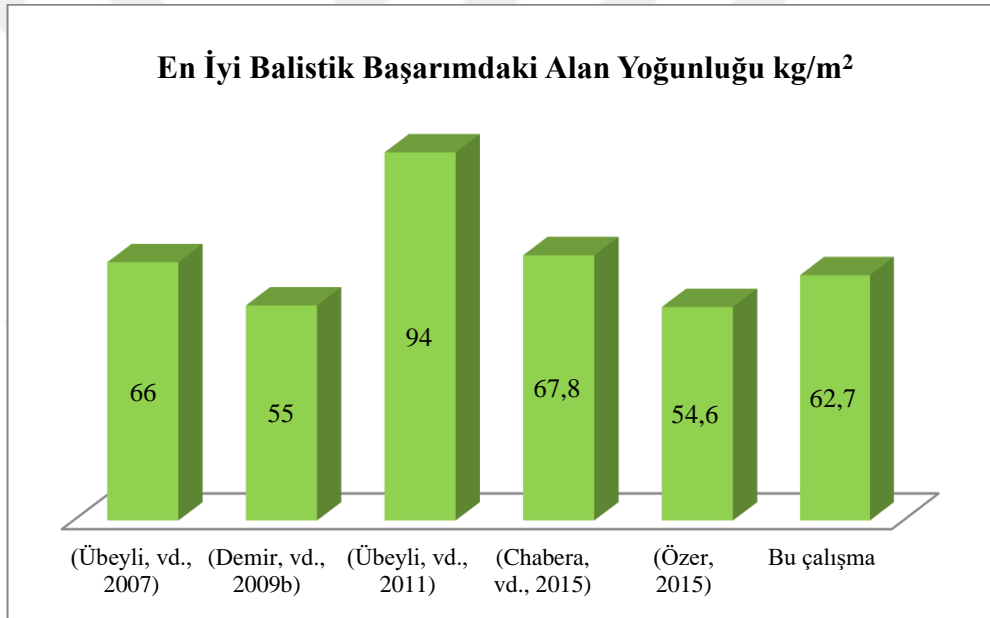
Kullanılan seramik katman kalınlığı bu çalışmadakinden daha düşüktür. En iyi balistik başarımdaki seramik/metal kalınlık oranı 1,5 olup bu oran da bu çalışmadaki orandan düşüktür. En iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değeri 55 kg/m^2 olup bu çalışmadaki alümina ön katmanlı kompozit numunelerin en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değerinden düşüktür. Demir ve arkadaşlarının (Demir, vd., 2009b), çalışmasında en iyi balistik başarımdaki 4340 çeliği sertlik ve dayanım değerleri ile bu çalışmada en iyi balistik başarımdaki 4140 çeliği sertlik ve dayanım değerleri oldukça yakındır. Balistik başarımdan açısından gerçekleşen farkın en belirgin nedenlerinin malzemelerin tokluk değerlerinin ve seramik/metal kalınlık oranlarının farklı olmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada SiC ön katmanlı kompozit numunelerde en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değeri olan $62,7 \text{ kg/m}^2$ Demir ve arkadaşlarının (Demir, vd., 2009b), çalışmasındaki en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğundan yüksek olmakla birlikte bu çalışmada deneme yapılan en düşük alan yoğunluğu değerinin $62,7 \text{ kg/m}^2$ olmasından dolayı bu iki kompozit numune arasında tam bir kıyaslama yapılamamaktadır.

Übeyli ve arkadaşlarının (Übeyli, vd., 2011) gerçekleştirdiği çalışmada alümina/çift fazlı çelik katmanlı kompozitine $786 \pm 3,7 \text{ m/s}$ darbe hızında balistik test uygulanmıştır. Kullanılan alümina katmanının kalınlığı sabit olup 6 mm'dir. En yüksek balistik başarımda 94 kg/m^2 alan yoğunluğu değerindeki martenzit hacim oranı en yüksek olan numunelerde sağlanmıştır. En iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu bu çalışmadaki en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğundan yüksektir.

Chabera ve arkadaşları (Chabera, vd., 2015) yaptıkları çalışmada alümina ön katmanlı ve çelik arka katmanlı kompozit numuneler ile SiC ön katmanlı ve çelik arka katmanlı kompozit numuneler üzerinde 850 m/s darbe hızında 7,62 mm ZD mermilerle balistik test gerçekleştirmişlerdir. Çelik malzeme olarak her iki numune kümesinde de Armox 500T çeliği kullanılmıştır. Balistik açıdan en uygun katman kalınlıklarının belirlenmesi amacıyla sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Balistik testlerin sonucunda en iyi balistik başarımda 6,6 mm SiC ve 6 mm çelik katman kalınlığına sahip $67,8 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğundaki numunede elde edilmiştir. En iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değeri bu çalışmadaki en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değerinden yüksektir.

Çizelge 5.8. Farklı katmanlı kompozit malzemelere ait balistik test sonuçları

Gerçekleştirilen Çalışma	Kullanılan Ön Katman Malzemesi	Kullanılan Arka Katman Malzemesi	En İyi Balistik Başarımdaki Alan Yoğunluğu (kg/m ²)
(Übeyli, vd., 2007)	Al ₂ O ₃	Al2024-T6	66
(Demir, vd., 2009b)	Al ₂ O ₃	AISI 4340 çeliği	55
(Übeyli, vd., 2011)	Al ₂ O ₃	Çift Fazlı çelik	94
(Chabera, vd., 2015)	SiC	Armox 500T çeliği	67,8
(Özer, 2015)	SiC	34CrNiMo6 çeliği	54,6
Bu çalışma	Al ₂ O ₃	AISI 4140 çeliği	78,4
Bu çalışma	SiC	AISI 4140 çeliği	62,7



Şekil 5.28. Farklı çalışmalarda elde edilen en iyi balistik başarımlardaki alan yoğunluğu değerlerinin karşılaştırmalı gösterimi

Özer, (Özer, 2015) yaptığı çalışmada SiC ön katmanlı kompozit numuneler ile yalın çelik numuneler üzerinde balistik test gerçekleştirmiştir. Numunelerin tümünde arka katman çeliği ve yalın çelik olarak 34CrNiMo6 kullanılmış olup çalışmada normalleştirme uygulanmış, 200 °C’de menevişlenmiş ve 400 °C’de menevişlenmiş 3 farklı çelik kümesi oluşturulmuştur. Balistik testlerde 7,62 mm ZD mermiler kullanılmış olup silah ve hedef arasındaki mesafe bu çalışmada olduğu gibi 16 m olarak belirlenmiştir. Balistik testlerin sonucunda katmanlı kompozitlerde en iyi

balistik başarımlarım 200 °C menevişleme uygulanan katmanlı kompozit numunelerde 54,6 kg/m² alan yoğunluğunda, yalın çeliklerde ise 200 °C’de menevişlenmiş numunelerde 70,6 kg/m² alan yoğunluğunda tam başarımla elde edilmiştir. Katmanlı kompozit numunelerin en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değeri bu çalışmadaki en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değerinden düşüktür. Bu çalışmada 62,7 kg/m² alan yoğunluğundan daha düşük bir alan yoğunluğunda SiC ön katmanlı kompozitlerde balistik test yapılmamış olması nedeniyle tam bir kıyaslama yapılamamaktadır. Bununla birlikte Özer’in çalışmasında (Özer, 2015), ön katmanda SiC kullanımıyla ağırlıktan ~%22,7 azalma sağlanırken bu çalışmada ~%42,9 azalma sağlanmıştır. Farklı birkaç katmanlı kompozit malzemenin balistik testlerine ait sonuçlar Çizelge 5.8’de verilmektedir. Çizelge 5.8’de belirtilen en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değerleri malzemelerin tam başarımlar sergilediği durumlardaki değerlerdir. Balistik testlerin tamamı 7,62 mm ZD mermiler ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.8’de verilen çalışmalarda elde edilen en yüksek balistik başarımlardaki alan yoğunluğu değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.28’de verilmektedir.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Gerçekleştirilen bu çalışmada alınan sonuçlar ve sonuçlar üzerine sunulan öneriler aşağıda verilmiştir;

- Yalın çelik numunelerde en iyi balistik başarımla, $109,8 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğunda tam başarımla sağlanırken, Al_2O_3 ön katmanlı kompozitlerde $78,4 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğunda tam başarımla ve SiC ön katmanlı kompozitlerde $62,7 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğunda tam başarımla sağlanmıştır.
- Seramik ön katmanlı kompozit numuneler yalın çelik numunelere göre daha yüksek balistik başarımla sergilemişlerdir.
- Balistik testlerin ardından yapılan içyapı incelemelerinde numunelerin içyapılarında değişiklik gözlemlenmemiştir. Delik bölgesi yakınında dönüşmüş AKB oluşmaya başlarken tam dönüşmüş AKB yalnızca delik etrafında görülmüştür.
- Aynı şartlar altında (Kullanılan mermi, silah-hedef arası mesafe) 34CrNiMo6 çeliği ile gerçekleştirilen balistik testlerde (Özer, 2015), yalın halde en iyi balistik başarımla sağlandığı alan yoğunluğu değerinin bu çalışmada yalın halde en iyi balistik başarımda elde edilen alan yoğunluğu değerinden daha düşük olduğu görülmüş olup bu durum çeliğin türüne ve 34CrNiMo6 çeliğine uygulanan ısı işlemler sonucunda çeliğin içyapısının martenzite dönüşmesi ile elde edilen yüksek sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerine bağlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan östemperlenmiş beynit içyapısına sahip AISI 4140 çeliğinin darbe tokluğu değerlerinin daha yüksek olması balistik başarımla açısından sonucu değiştirmemiştir.
- Demir ve arkadaşlarının (Demir, vd., 2008) çalışmasındaki 4140 çeliğine ait en iyi balistik başarımla sağlandığı alan yoğunluğu değeri, bu çalışmada kullanılan östemperlenmiş 4140 çeliğinin en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değeri olan $109,8 \text{ kg/m}^2$ 'den düşüktür. Bu çalışmada kullanılan östemperlenmiş 4140 çeliğinin sertlik ve dayanım değerleri Demir ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan 4140 çeliğinin sertlik ve dayanım değerlerinden daha düşük değerlerdir. Sertlik ve dayanım değerlerinin daha düşük olmasının temel nedeni ise uygulanan östemperlenme ısı işlemi ve bu

ıslı işlem ile elde edilmiş olan beynit içyapısına sahip çeliğin martenzit içyapısındaki aynı tür çeliğe kıyasla sertlik ve dayanım değerlerinin düşük olmasıdır.

- Bu çalışmadaki SiC ön katmanlı kompozitlerde en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu, Al₂O₃ ön katmanlı kompozitlerdeki en iyi balistik başarımdaki alan yoğunluğu değerinden düşüktür. Bu sonuç SiC'nin alüminadan daha üstün balistik başarımla sergilediğini bir kez daha göstermiştir. Ancak en iyi balistik başarımın sağlandığı alan yoğunluğu değerlerinin yakınlığı da dikkat çekmektedir.
- Bu çalışmada, seramik ön katman kullanımını sayesinde Al₂O₃ ön katmanlı kompozitte ağırlıktan ~ %28,6 azalma ve SiC ön katmanlı kompozitte ise ağırlıktan ~ %42,9 azalma sağlanarak yalın çelik numunelerde elde edilen balistik başarımla aynı başarımla elde edilebilmiştir.
- Bu çalışmada, seramik ön katmanı çelik arka katmana yapıştırımda kullanılan akrilik bazlı yapıştırıcının balistik test sonrasında seramik parçalarını tutmadığı görülmüştür.
- Seramiklerin tokluklarının artırılması amacıyla elyaf takviyeli seramik ön katmanlı kompozitler denenebilir.
- Ticari üretimi yapımda olan üstünbeynit (Rose, vd., 2014), isimli zırh çeliği seramik ön katmanlı kompozit numunede arka katman malzemesi olarak denenebilir.
- Balistik etkinliğinin Al₂O₃ ve SiC'den daha yüksek olduğu kanıtlanmış olan seramikler ön katman malzemesi olarak katmanlı kompozitlerde denenebilir.

KAYNAKLAR

- Anderson Jr., C.E., Royal-Timmons, S.A., Ballistic performance of confined 99.5%- Al_2O_3 ceramic tiles, *International Journal of Impact Engineering*, 19(8), 703-713, 1997.
- Arslan, G., Kalemtaş, A., Tunçer, N., Yeşilay, S., Kara, F., Turan, S., Bor karbür-alüminyum kompozit zırhların balistik performansının belirlenmesi, TÜBİTAK, Proje No: 105M-349, Eskişehir, 2008.
- Atapek, Ş.H., Karagöz S., Balistic impact behaviour of a tempered bainitic steel against 7,62 mm armour piercing projectile, *Defence Science Journal*, 61(1), 81-87, 2011.
- Atapek, Ş.H., Zırh çeliklerinin fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda geliştirilmesi ve karakterizasyonu, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 141, 2006.
- 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, *Kovové Materiály (Metallic Materials)*, 51, 257-262, 2013.
- Bhatnagar, A., Lang, D., Military and law enforcement applications of lightweight ballistic materials, (Editör: Bhatnagar, A.), *Lightweight ballistic composites*, Woodhead Publishing Limited, England, 364-397, 2006.
- Bruchey, W.J., Burkins, M.S., Suppression of material failure modes in titanium armors, *Proceedings of the 17th International Symposium on Ballistics*, Midrand- South Africa, 23-27 Mart, 1998.
- Callister, W.D., Retwisch, W.D., *Materials science and engineering*, John Wiley & Sons Inc., USA, 2010.
- Chabera, P., Boczkowska, A., Morka, A., Kedzierski, P., Niezgoda, T., Oziębło, A., Witek, A., Comparison of numerical and experimental study of armour system based on alumina and silicon carbide ceramics, *Bulletin of the Polish Academy of Science*, 63(2), 2015.
- Cheeseman, B.A., Bogetti, T.A., Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates, *Composite Structures*, 61(1-2), 161-173, 2003.

- Cheng, M., Chen, W., Weerasooriya, T., Mechanical properties of Kevlar KM2 single fiber, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Transactions of the ASME, 127(2), 197-203, 2005.
- Chen, M., McCauley, J.W., Hemker, K.J., Shock-induced localized amorphization in boron carbide, *Science*, 299(5612), 1563-1566, 2003.
- Cho, K., Sano, T., Doherty, K., Yen, C., Gazonas, G., Montgomery, J., Moy, P., Magnesium technology and manufacturing for ultra lightweight armored ground vehicles, Aberdeen Proving Ground, MD: Army Research Laboratory, Scotland, 2009.
- Cook, R.L., Hampshire, W.J., Kolarik, R.V., Ballistic armor system, Goodyear Aerospace Corporation, Delaware-USA, 1979.
- Cook, R.L., Hard faced ceramic and plastic armor, Goodyear Aerospace Corporation, Delaware-USA, 1970.
- Demir, T., Übeyli M., A micro-damage investigation on a low-alloy steel tested using a 7.62-mm AP projectile, *Materials and Technology*, 45(2), 2011.
- 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, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(2), 145-153, 2009a.
- Demir, T., Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile, *Materials and Design*, 29(10), 2009-2016, 2008.
- 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*, 16(2), 89-98, 2009b.
- Deniz, T., Ballistic penetration of hardened steel plates, Middle East Technical University The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master of Science, Ankara, 113, 2010.
- Dey, S., Borvik, T., Hopperstad, O.S., Leinum, J.R., Langseth, M., The effect of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes, *International Journal of Impact Engineering*, 30(8-9), 1005-1038, 2004.
- Dey, S., Borvik, T., Teng, X., Wierzbicki, T., Hopperstad, O.S., On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical

- investigation, *International Journal of Solids and Structures*, 44(20), 6701-6723, 2007.
- Doig, A., *Military metallurgy*, Maney Publishing, London, 2002.
- Dormeval, R., *Materials at high strain rates*, (Editor: Blazynski, T.Z.), Elsevier Applied Science, England, 1987.
- Dunstan, S., Volstad, R., *Flak Jackets: 20th Century Military Body Armour*, Osprey Publishing Ltd, London, 1984.
- Edwards, M.R., *Materials for military helicopters*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 216(2), 77-88, 2002.
- Figucia, F., Williams, C., Kirkwood, B., Koza, W., *Mechanisms of improved ballistic fabric performance*, *Proceedings for the Army Science Conference*, 383-397, New York-USA, 15-18 June 1982.
- Florence, L., *Interaction of projectiles and composite armour. Part II*, Stanford Research Institute, California-USA, 1969.
- Fu, H.G., Kuang, J.C., Bai, G.Q., Wang, L.T., *Study of medium carbon air hardened bainitic cast steel*, *Materials Technology*, 24(4), 247-252, 2009.
- Garbarz B., Niznik-Haranczyk B., *Modification of microstructure to increase impact toughness of nanostructured bainite-austenite steel*, *Materials Science and Technology*, 31(7), 773-780, 2015.
- Gooch, W.A., Burkins, M.S., Palicka, R., *Ballistic development of U.S. high density tungsten carbide ceramics*, *Journal de Physique IV France*, 10(9), 741-746, 2000.
- Gooch, W.A., Burkins, M.S., Palicka, R., Rubin, J., Ravichandran, R., *Development and ballistic testing of a functionally gradient ceramic/metal applique*, *Proceedings of 17th International Symposium on Ballistics*, Midrand-South Africa, 23-27 March 1998.
- Gooch, W.A., *Overview of the development of ceramic armor technology: Past, present and the future*, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 32(5), 195-213, 2011.
- Haque, A., Abutalib, A., Rahul, K., Vaidya, U.K., Mahfuz, H., Jeelani, S., *Ballistic performance of monolithic ceramic backed by S2-glass/vinyl ester composites*,

- 12th International Conference of Composite Materials, Paper 481, Paris-France, July 1999.
- Hart, S.V., NIJ special report: Third status report to the attorney general on body armor safety initiative testing and activities, National Institute of Justice, Washington, DC: U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs, 2005.
- Hazell, P.J., *Armour materials, theory and design*, CRC Press, USA, 2016.
- Hazell, P.J., Lawrence, T., Stennett, C., The defeat of shaped charge jets by explosively driven ceramic and glass plates, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 9(2), 382-392, 2012.
- Hetherington, J.G., The optimization of two component composite armours, *International Journal of Impact Engineering*, 12(3), 409-414, 1992.
- Holmen, J.K., Johnsen, J., Jupp, S., Hopperstad, O.S., Borvik, T., Effect of heat treatment on the ballistic properties of AA6070 aluminium alloy, *International Journal of Impact Engineering*, 57, 119-133, 2013.
- Horsfall, I., Austin, S.J., Bishop, W., Structural ballistic armour for transport aircraft, *Materials and Design*, 21(1), 19-25, 2000.
- Iremonger, M.J., Polyethylene composites for protection against high velocity small arms bullets, *Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics*, Texas-USA, 15-19 November 1999.
- Jacobs, M.J.N., Van Dinengen, J.L.J., Ballistic protection mechanisms in personal armour, *Journal of Materials Science*, 36(13), 3137-3142, 2001.
- Jeffrey, J.S., Recommendations for determining the hardness of armor ceramics, *International Journal of Ceramic Product Development and Commercialization*, 1(3), 219-225, 2004.
- Jena, P.K., Mishra, B., Kumar, K.S., Bhat, T.B., An experimental study on the ballistic impact behavior of some metallic armour against 7.62 mm deformable projectile, *Materials and Design*, 31(7), 3308-3316, 2010.
- Jena, P.K., Mishra, B., RameshBabu, M., Babu, A., Singh, A.K., SivaKumar, K., Bhat, T.B., Effect of heat treatment on mechanical and ballistic properties of a high strength armour steel, *International Journal of Impact Engineering*, 37(3), 242-249, 2010.
- Jovicic, J., Zavaliangos, A., Ko, F., Modeling of the ballistic behavior of gradient design composite armors, *Composites: Part A*, 31(8), 773-784, 2000.

- Lee, M., Yoo, Y.H., Analysis of ceramic/metal armour systems, *International Journal of Impact Engineering*, 25(9), 819-829, 2001.
- Lopez-Puente, J., Arias, A., Zaera, R., Navarro, C., The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study, *International Journal of Impact Engineering*, 32(1-4), 321-336, 2005.
- Kelina, I.Y., Dobrinskii, Y.I., Efficiency of the use of silicon nitride ceramics as an armor material, *Refractories and Industrial Ceramics*, 38(6), 220-223, 1997.
- Kesti, E., Ç - 4140 çeliğinin, mikro yapı ve mekanik özelliklerine su verme ortamının etkilerinin araştırılması, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 91, 2009.
- Kuhn, H., ASM handbook: mechanical testing and evaluation (Editörler: Kuhn, H., Medlin, D.), ASM International, USA, 2000.
- Madhu, V., Ramanjaneyulu, K., Balakrishna Bhat, T., Gupta, N.K., An experimental study of penetration resistance of ceramic armour subjected to projectile impact, *International Journal of Impact Engineering*, 32(1-4), 337-350, 2005.
- Medvedovski, E., Alumina ceramics for ballistic protection: Part 1, *American Ceramic Society Bulletin*, 81(3), 27-32, 2002.
- Medvedovski, E., Alumina-mullite ceramics for structural applications, *Ceramics International*, 32(4), 369-375, 2006.
- Meyers, M.A., *Dynamic behaviour of materials*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1994.
- MIL-C-60617A, Military Specification, Cartridge, 7,62 mm: NATO, Armor Piercing, M61, United States Military Standard (USMS), 1991.
- Mirak, A.R., Nili-Ahmadabadi, M., Effect of modified heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a low alloy high strength steel, *Materials Science and Technology*, 20(10), 897-902, 2004.
- Mishra, B., Jena, P.K., Ramakrishna, B., Madhu, V., Bhat, T.B., Gupta, N.K., Effect of tempering temperature, plate thickness and presence of holes on ballistic impact behavior and ASB formation of a high strength steel, *International Journal of Impact Engineering*, 44, 17-28, 2012.
- Montgomery J.S., Wells, M.G.H., Titanium armor applications in combat vehicles, *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 53(4), 29-32, 2013.

- Mouritz, A.P., Gellert, E., Burchill, P., Challis, K., Review of advanced composite structures for naval ships and submarines, *Composite Structures*, 53(1), 21-24, 2001.
- Murr, L.E., Quinones, S.A., Ferreyra, E., Ayala, A., Valerio, O.L., Hörz, F., Bernhard, R.P., The low-velocity-to-hypervelocity penetration transition for impact craters in metal targets, *Materials Science and Engineering A*, 256(1-2), 166-182, 1998.
- Nanda, H., Appleby-Thomas, G.J., Wood, D.C., Hazell, P.J., Ballistic behaviour of explosively shattered alumina and silicon carbide targets, *Advances in Applied Ceramics*, 110(5), 287-292, 2011.
- Ogorkiewicz, R.M., *Technology of Tanks II*, vol. 2, Coulsdon, Surrey, UK: Jane's Information Group, 1991.
- Özer, E., Isıl işlemin ve SiC ön katmanın 34CrNiMo6 çeliğinin balistik davranışına etkisinin incelenmesi, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Osmaniye, 112, 2015.
- Papetti, D.J., *Metallic armor materials*, (Editör: Laible, R.C.), *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Elsevier, New York, 145–167, 1980.
- Pettersson, A., Magnusson, P., Lundberg, P., Nygren, M., Titanium-titanium diboride composites as part of a gradient armour material, *International Journal of Impact Engineering*, 32(1-4), 387-399, 2005.
- Polmear, I.J., *Light alloys: Metallurgy of the light metals*, In *Metallurgy and Materials Science*, (Editör: Honeycombe, R.W.K., Hancock, P.), Edward Arnold, London, 1989.
- Reaugh, J.E., Holt, A.C., Wilkins, M.L., Cunningham, B.J., Hord, B.L., Kusubov, A.S., Impact studies of five ceramic materials and pyrex, *International Journal of Impact Engineering*, 23(1), 771-782, 1999.
- Roberson, C., Hazell, P.J., Resistance of Silicon Carbide to Penetration by a tungsten carbide cored projectile, *Ceramic Armor and Armor Systems*, 151, 165-174, 2003.
- Rolston, R.F., Bodine, E., Dunleavy, J., Breakthrough in armor, *Space/Aeronautics*, 55-63, 1968.
- Rosenberg, Z., Dekel, E., *Terminal ballistics*, Springer, London, 2012.

- Rose, A.J., Mohammed, F., Smith, A.F.W., Davies, P.A., Clarke, R.D., Superbainite: laboratory concept to commercial product, *Materials Science and Technology*, 30(9), 1094-1098, 2014.
- Sadanandan, S., Hetherington, J.G., Characterisation of ceramic/steel and ceramic/aluminium armours subjected to oblique impact, *International Journal of Impact Engineering*, 19(9-10), 811-819, 1997.
- Smith, W.F., *Principles of materials science and engineering*, McGraw-Hill Inc., USA, 1996.
- Spagnuolo, D.M., Napadensky, E., Sano, T., Wolbert, J.P., Investigation of basalt woven fabrics for military applications, Aberdeen Proving Ground Army Research Laboratory, UK, 2011.
- Strassburger, E., Senf, H., Rothenhausler, H., Lexow, B., Krell, A., Influence of grain size and microstructure on the ballistic resistance of alumina, *Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics*, Texas-USA, 15-19 November 1999.
- Sullivan, J.F., *Aircraft armor - ballistic characteristics of a magnesium alloy*, MA: Watertown Arsenal Laboratory, UK, 1943.
- TS EN ISO 148-1, *Metalik Malzemeler - Charpy Vurma Deneyi - Bölüm 1: Deney Metodu*, 2011.
- TS EN ISO 6892-1, *Metalik Malzemeler - Çekme Deneyi - Bölüm 1: Oda Sıcaklığında Deney Metodu*, 2011.
- 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 and Design*, 56, 31-36, 2014.
- Übeyli, M., Demir, T., Deniz H., Yıldırım, R.O., Keleş, Ö., Investigation on the ballistic performance of a dual phase steel against 7.62mm AP projectile, *Materials Science and Engineering A*, 527(7-8), 2036-2044, 2010.
- Übeyli, M., Deniz, H., Demir, T., Ögel, B., Gürel, B., Keleş, Ö., Ballistic impact performance of an armor material consisting of alumina and dual phase steel layers, *Materials and Design*, 32(3), 1565-1570, 2011.
- Übeyli, M., Demir, T., Yıldırım, R.O., Aycan, M.F., Effect of heat treatment on the formation of adiabatic shear bands in high strength steels impacted by AP projectiles, *Kovové materiály(Metallic Materials)*, 47(6), 409-413, 2009.

- Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Ögel, B., Investigation on the ballistic behavior of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al2024}$ laminated composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1-3), 356-364, 2008.
- Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Ögel, B., On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors, *Materials and Design*, 28(4), 1257-1262, 2007.
- Walsh, P.J., Hu, X., Cunniff, P., Lesser, A.J., Environmental effects on poly-p-phenylenebenzobisoxazole fibers. II. Attempts at stabilization, *Journal of Applied Polymer Science*, 102(4), 3819-3829, 2006.
- Wang, B., Lu, G., On the optimisation of two-component plates against ballistic impact, *Journal of Materials Processing Technology*, 57, 141-145, 1996.
- Weber, K., Protection efficiency of structured targets against KE projectiles, *Proceedings of the 20th International Symposium on Ballistics, Orlando-USA, 23-27 September, 2002.*
- Wilkins, M.L., Second progress report of light armor program, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore-USA, 1967.
- Wilkins, M.L., Honodel, C.A., Swale, D., An approach to the study of light armor, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore-USA, 1967.
- Wilkins, M.L., Third progress report of light armor program, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore-USA, 1968.
- Wilkins, M.L., Cline, C.F., Honodel, C.A., Fourth progress report on light armor program, University of California, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore-USA, 1969.
- Woodward, R.L., A basis for modelling ceramic composite armour defeat, *Research Report MRL-RR-3-89, DSTO Materials Reseach Laboratory, Australia, 1989.*
- Woodward, R.L., A rational basis for the selection of armour materials, *The Journal of the Australian Institute of Metals*, 22(3-4), 167-170, 1977.
- Woodward, R.L., Baxter B.J., Ballistic evaluation of ceramics: Influence of test conditions, *International Journal of Impact Engineering*, 15(2), 119-124, 1994.
- Woodward, R.L., The penetration of metal targets by conical projectiles, *International Journal of Mechanical Sciences*, 20(6), 349-359, 1978.

Zaera, R., Sanchez-Saez, S., Perez-Castellanos, J.L., Navarro, C., Modelling of the adhesive layer in mixed ceramic/metal armours subjected to impact, *Composites: Part A*, 31(8), 823-833, 2000.

Zukas, J.A., *High velocity impact dynamics*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1990.



ÖZGEÇMİŞ

1. Adı Soyadı : Sinan ÖNDER

2. Doğum Tarihi : 22.08.1984

3. Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Okul/Üniversite	Bitirme Yılı
Lise	Fen Bilimleri	Dört Yol Deneme Lisesi	2002
Lisans	Makine Mühendisliği	Kocaeli Üniversitesi	2009
Lisans	İşletme	Anadolu Üniversitesi	2012

4. İş Tecrübesi:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Ar-Ge Mühendisi	Farel Plastik A.Ş.	2010 – 2011
Bakım Onarım Mühendisi	Botaş A.Ş.	2013 –