



T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Emre ÖZER

ISIL İŞLEMİN VE SiC ÖN KATMANIN 34CrNiMo6
ÇELİĞİNİN BALİSTİK DAVRANIŞINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OSMANIYE – 2015

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

**ISIL İŞLEMİN VE SiC ÖN KATMANIN 34CrNiMo6
ÇELİĞİNİN BALİSTİK DAVRANIŞINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Emre ÖZER

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

**OSMANIYE
HAZİRAN – 2015**

TEZ ONAYI

ISIL İŞLEMİN VE SiC ÖN KATMANIN 34CrNiMo6 ÇELİĞİNİN BALİSTİK DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Emre ÖZER tarafından Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ danışmanlığında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim 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 Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mehmet Seha TATLIER
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, OKÜ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Abdullah AKPOLAT
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gaziantep Üniversitesi

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

Prof. Dr. Abdullah Ali GÜRTEN
Enstitü Müdürü, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Bu Çalışma Yükseköğretim Kurulu (YÖK) Tarafından Desteklenmiştir.

Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP)

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.

Emre ÖZER

ÖZET

ISIL İŞLEMİN VE SiC ÖN KATMANIN 34CrNiMo6 ÇELİĞİNİN BALİSTİK DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Emre ÖZER

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa ÜBEYLİ

Haziran 2015, 112 sayfa

Bu çalışmada, yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı 34CrNiMo6 çeliğinin farklı ısıl işlem koşullarında hem yalın halde hem de silisyum karbür seramik ön katmanı ile kompozit halde balistik davranışı incelenmiştir. 34CrNiMo6 çeliğine denetimli ortamda üç farklı ısıl işlem uygulanmış olup bunlardan biri normalleştirme işlemidir. Diğerleri ise 860 °C’de östenitleştirme sonrası yağda soğutma ve hemen ardından 200 °C ve 400 °C’de menevişleme işlemleridir. Kullanılan SiC seramik plakaların ölçülen sertliği ve boyutları sırasıyla ~ 2483 VSD ve 50x50x8,5 mm şeklindedir. Uygulanan ısıl işlemler sonucunda, çeliğin mekanik özellikleri ve içyapısı incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, ortalama hızları 778,5 m/s olan 7,62 mm zırh delici mermiler ile yapılmıştır. Atışlar yapıldıktan sonra numunelerde oluşan içyapı değişimleri ışık mikroskopunda incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, yalın çeliklerde en iyi balistik başarımlar 200 °C’de menevişlenen numunelerde 70,6 kg/m² ve üzeri alan yoğunluklarında tam başarımla gözlemlenirken, aynı durum kompozit numuneler için arka katmanı 200 °C’de menevişlenmiş, 54,6 kg/m² ve üzeri alan yoğunluklarına sahip numunelerde sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Zırh, Isıl İşlem, Yüksek Dayanımlı-Düşük Alaşımlı Çelik, Kompozit

ABSTRACT

EFFECT OF HEAT TREATMENT AND SiC FRONT LAYER ON THE BALLISTIC BEHAVIOUR OF 34CrNiMo6 STEEL

Emre ÖZER

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

June 2015, 112 pages

In this study, the ballistic behaviour of a high strength-low alloy steel (34CrNiMo6) with various heat treatment conditions was examined in both monolithic and composite containing the SiC ceramic front layer. Three different heat treatments were applied to the 34CrNiMo6 steel in a controlled atmosphere. One of them was normalizing treatment and the others were the tempering treatments at 200 °C and 400 °C after the austenization at 860 °C followed by quenching in an oil bath. The hardness and dimensions of the silicon carbide tile were measured to be ~ 2483 HV and 50x50x8.5 mm respectively. Experimental studies were performed with the 7.62 mm armor piercing (AP) projectiles at an average speed of 778.5 m/s. After the heat treatments, the mechanical properties and microstructure of the samples were investigated. After the ballistic impact testing, the microstructural changes in the steel samples were detected using an optical microscope. According to the experimental results, the best ballistic performance was obtained for the steel sample tempered at 200 °C for the areal densities $\geq 70.6 \text{ kg/m}^2$. On the other hand, the highest ballistic resistance was found at the composite sample, consisting of the backing steel plate tempered at 200 °C, for the areal densities $\geq 54.6 \text{ kg/m}^2$.

Key Words: Ballistic, Armor, Heat Treatment, High Strength–Low Alloy Steel, Composite

Çok kıymetli aileme ve nişanlım Miyase Mağralı'ya...

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 bölümdeki çalışmalarım süresince beni destekleyen diğer değerli bölüm hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince desteklerini esirgemeyen aileme ve nişanlıma da ayrıca teşekkür ederim.

Bu çalışma finansal olarak Türkiye'deki Yükseköğretim Kurulu (YÖK) tarafından desteklenmiştir. Çalışmamı tamamlamada yardımcı olan Astaş Isıl İşlem ve MKE Silahsan A.Ő. firmalarına ve YÖK'e destekleri için minnettarım.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İTHAF SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	8
3. DENEYSEL YÖNTEM.....	21
3.1. Numunelerin Hazırlanması.....	21
3.2. Numunelerin Isıl İşlemi ve İyapı Çalışması.....	29
3.3. Numunelerin Mekanik Testleri.....	32
3.4. Numunelerin Balistik Testleri.....	34
4. DENEY SONUÇLARI ve İRDELEME.....	37
4.1. Mekanik Özellikler.....	37
4.2. İyapı İncelemesi.....	42
4.2.1. Balistik Test Öncesi İncelemeler.....	42
4.2.2. Balistik Test Sonrası İncelemeler.....	42
4.3. Balistik Test Sonuçları.....	48
4.3.1. Çelikler.....	52
4.3.2. Katmanlı Kompozitler.....	63
4.4. Analitik Yöntemlerin İncelenmesi.....	71
4.4.1. Bütüncül Metaller için Analitik Modeller.....	73

4.4.1.1.	Thor Modeli	73
4.4.1.2.	Stone Modeli.....	74
4.4.1.3.	Wijk Modeli.....	75
4.4.1.4.	Pol Modeli	77
4.4.1.5.	Lambert Modeli	78
4.4.1.6.	Alekseevskii ve Tate Modeli	79
4.4.1.7.	Taylor Modeli	80
4.4.1.8.	Thomson Modeli.....	81
4.4.1.9.	Woodward Modeli	82
4.4.1.10.	Übeyli ve Demir Modeli	83
4.4.1.11.	Zaid ve Paul Modeli.....	84
4.4.2.	Katmanlı Kompozitler için Analitik Modeller.....	86
4.4.2.1.	Florence Modeli.....	86
4.4.2.2.	Gelişmiş Florence Modeli.....	89
4.4.2.3.	Woodward Modeli	91
4.4.3.	Analitik Yöntemlerin Karşılaştırılması.....	93
4.4.3.1.	Çelikler	93
4.4.3.2.	Seramik Esaslı Katmanlı Kompozitler.....	97
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	100
	KAYNAKLAR	102
	ÖZGEÇMİŞ	111

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. 34CrNiMo6 çeliğinin kimyasal bileşimi (%) [52].....	21
Çizelge 3.2. Akrilik bazlı yapıştırıcının mekanik özellikleri (kürlenmiş)	25
Çizelge 3.3. Yalın çelik numuneler.....	27
Çizelge 3.4. Katmanlı kompozit numuneler	28
Çizelge 3.5. 7,62 mm ZD merminin özellikleri [56].....	36
Çizelge 4.1. Yalın çeliklerin ölçülen sertlik değerleri.....	37
Çizelge 4.2. Uygulanan her ısıl işlem kümesi için ortalama sertlik değerleri.....	38
Çizelge 4.3. Isıl işlem sonucu numunelerin değişen mekanik özellikleri	39
Çizelge 4.4. Isıl işlem sonucu numunelerin değişen darbe testi verileri.....	41
Çizelge 4.5. Yalın çeliklerin balistik sonuçları	52
Çizelge 4.6. Balistik başarımları gösteren numunelerin batma derinlikleri	59
Çizelge 4.7. Balistik başarımları gösteren numunelerin ortalama batma derinlikleri	60
Çizelge 4.8. Katmanlı kompozit numunelerin balistik sonuçları.....	64
Çizelge 4.9. Wijk modeli [68] hesaplanan veriler.....	93
Çizelge 4.10. Çelikler için hesaplanan koruma kalınlıkları	95
Çizelge 4.11. Çelikler için hesaplanan hız değerleri.....	96
Çizelge 4.12. Kompozitler için hesaplanan en uygun katman kalınlıkları ve oranı ..	98
Çizelge 4.13. Wang ve Lu modeli [97] için kompozit numunelerin en uygun katman kalınlıkları ve toplam alan yoğunlukları	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tarihte kullanılmış silah ve zırhlar, (a) Çok eski zamanlarda kullanılan ağaç ve taştan silah (b) MS 3. yüzyıl timsah derisi zırh Mısır (c) 13. yüzyıl Moğol zırhı (d) 15. yüzyıl zırh İtalya (e) Birinci Dünya Savaşı tank mürettebat zırhı 1916 İngiltere [14].....	2
Şekil 1.2. 13. yüzyıl örgü şeklindeki Türk zırhı [17]	3
Şekil 1.3. Gerinim hızına (s^{-1}) göre uygulanan deney yöntemleri [20].....	5
Şekil 3.1. Numunelerin kesildiği KESMAK KMY 280 model şerit testere	21
Şekil 3.2. CNC Freze tezgahı [52]	22
Şekil 3.3. YDDA çelik numuneler	22
Şekil 3.4. Çekme ve darbe numuneleri	23
Şekil 3.5. Daire kesitli metal malzemeler için çekme numunesi ölçüleri	23
Şekil 3.6. V çentiklerin açıldığı Atinon BV20 marka torna tezgahı	23
Şekil 3.7. SiC seramik plakalar (50x50x8,5 mm)	24
Şekil 3.8. Akrilik bazlı yapıştırıcı ve dozaj tabancası	24
Şekil 3.9. Katmanlı kompozit numunelerin çizgesel gösterimi	25
Şekil 3.10. İkinci balistik test için hazırlanan katmanlı kompozit numuneler	25
Şekil 3.11. İlk balistik test için hazırlanan katmanlı kompozit numuneler (a) Normalleştirme, (b) 200 °C’de menevişleme ve (c) 400 °C’de menevişleme	26
Şekil 3.12. Endotermik gaz (endogaz) ortam denetimli fırın [52]	29
Şekil 3.13. Endogaz üretici	29
Şekil 3.14. Normalleştirme uygulanan numuneler.....	30
Şekil 3.15. 200 °C (sol) ve 400 °C (sağ) menevişleme uygulanan numuneler	30
Şekil 3.16. Gerçekleştirilen ilk balistik test sonrası hazırlanan çelik numuneler.....	31
Şekil 3.17. Metkon METACUT-M 250 marka kesme cihazı (sol), Metkon ECOPRESS 100 marka bakalite alma cihazı (orta), Metkon FORCIPOL 2V marka zımpara ve parlatma cihazı (sağ).....	31

Şekil 3.18. AKB incelenen numunelerin çizgesel gösterimi.....	31
Şekil 3.19. OLYMPUS BX51 marka ışık mikroskobu	32
Şekil 3.20. 600 kN DARTEC-MTS marka çekme cihazı [52]	33
Şekil 3.21. TIME JBW-300A marka darbe cihazı	33
Şekil 3.22. BMS DIGIROCK-RBOV marka sertlik cihazı	33
Şekil 3.23. BMS-MICROBUL marka sertlik cihazı	34
Şekil 3.24. MKE Silahsan A.Ş. atış poligonu [52]	34
Şekil 3.25. Balistik test düzeneğinin çizgesel gösterimi	35
Şekil 3.26. 7,62 mm ZD mermiler [52].....	35
Şekil 3.27. (a) 7,62 mm ZD mermi fişeginin çizgesel görünüm, (b) Merminin kesit görüntüsü [4]	36
Şekil 4.1. Çekme testi sonucunda kırılan çekme numuneleri (Normalleştirme – sol, 200 °C’de menevişleme – orta, 400 °C’de menevişleme – sağ).....	38
Şekil 4.2. Çekme numunelerinin kırılan yüzeyleri (Normalleştirme – sol, 200 °C’de menevişleme – orta, 400 °C’de menevişleme – sağ)	39
Şekil 4.3. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme-gerinim eğrileri	40
Şekil 4.4. Charpy çentik-darbe testi sonrası darbe numuneleri ve kırılan yüzeyleri (Normalleştirme – sol, 200 °C’de menevişleme – orta, 400 °C’de menevişleme – sağ)	41
Şekil 4.5. Atış öncesi numunelerin x500 ve x1000 büyütmelede içyapıları (a) Normalleştirme, (b) 200 °C’de menevişleme ve (c) 400 °C’de menevişleme	43
Şekil 4.6. Normalleştirme uygulanmış numunede delik bölgesi yakınlarında dönüşmüş AKB oluşumları	45
Şekil 4.7. Normalleştirme uygulanmış numunede delik etrafında tam dönüşmüş AKB oluşumu.....	45
Şekil 4.8. Normalleştirme uygulanmış numunede tam dönüşmüş AKB içinde oluşan mikro çatlak.....	46

Şekil 4.9. 200 °C’de menevişlenmiş numunede delik bölgesi yakınlarında dönüşmüş AKB oluşumu	46
Şekil 4.10. 200 °C’de menevişlenmiş numunede delik etrafında tam dönüşmüş AKB oluşumu.....	47
Şekil 4.11. 400 °C’de menevişlenmiş numunede delik etrafında ve yakınlarında dönüşmüş AKB oluşumları.....	47
Şekil 4.12. Normalleştirme uygulanmış numunede delik etrafında görülen mikro çatlak	48
Şekil 4.13. Sert çekirdekli mermiler karşısında çelik plakanın sertliğinin balistik etkinliğe etkisi [60]	49
Şekil 4.14. Hedefte gerçekleşen tıkanma [20] ve halka oluşumu [60]	50
Şekil 4.15. Çelikte oluşabilecek hasar mekanizmaları [60].....	50
Şekil 4.16. Farklı seramik türlerinin yoğunluk ve bağıl balistik etkinlik grafiği [60]	51
Şekil 4.17. (a) Arka katmanın şekil değişimine uğradığı durum (b) Arka katmanın şekil değişimine uğramadığı durum [62]	51
Şekil 4.18. Sünek delik oluşumu ($70,3 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğu).....	53
Şekil 4.19. Normalleştirme uygulanan çeliklerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) $70,6 \text{ kg/m}^2$, b) $94,1 \text{ kg/m}^2$, c) $117,6 \text{ kg/m}^2$, d) $141,1 \text{ kg/m}^2$ ve e) $164,6 \text{ kg/m}^2$	54
Şekil 4.20. 200 °C’de menevişleme uygulanan çeliklerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) 47 kg/m^2 , b) $54,9 \text{ kg/m}^2$, c) $62,7 \text{ kg/m}^2$, d) $66,6 \text{ kg/m}^2$ delinen, e) $66,6 \text{ kg/m}^2$ delinmeyen f) $70,6 \text{ kg/m}^2$, g) $94,1 \text{ kg/m}^2$, h) $117,6 \text{ kg/m}^2$, i) $141,1 \text{ kg/m}^2$ ve j) $164,6 \text{ kg/m}^2$	55
Şekil 4.21. 400 °C’de menevişleme uygulanan çeliklerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) $70,6 \text{ kg/m}^2$, b) $94,1 \text{ kg/m}^2$, c) $117,6 \text{ kg/m}^2$, d) $141,1 \text{ kg/m}^2$ ve e) $164,6 \text{ kg/m}^2$	56
Şekil 4.22. NOS3 numunelerin arka yüzeyinde radyal çatlak oluşumu.....	57
Şekil 4.23. Atış sonrası $94,1 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğunda normalleştirme uygulanmış numune.....	58

Şekil 4.24. Atış sonrası $62,7 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğunda $200 \text{ }^\circ\text{C}$ menevişleme uygulanmış numune	58
Şekil 4.25. Atış sonrası $70,6 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğunda $400 \text{ }^\circ\text{C}$ menevişleme uygulanmış numune	59
Şekil 4.26. (a) $117,6 \text{ kg/m}^2$, (b) $141,1 \text{ kg/m}^2$ ve (c) $164,6 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluklarına sahip numunelerin batma derinliklerinin karşılaştırılması (Normalleştirme – sol, $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de menevişleme – orta, $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de menevişleme – sağ).....	60
Şekil 4.27. Atış sonrası bazı mermi çekirdekleri	61
Şekil 4.28. Normalleştirme uygulanan katmanlı kompozitlerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) $70,3 \text{ kg/m}^2$, b) $93,8 \text{ kg/m}^2$, c) $117,4 \text{ kg/m}^2$, d) $140,9 \text{ kg/m}^2$ ve e) $164,4 \text{ kg/m}^2$	65
Şekil 4.29. $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de menevişleme uygulanan katmanlı kompozitlerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) $46,8 \text{ kg/m}^2$, b) $54,6 \text{ kg/m}^2$, c) $62,5 \text{ kg/m}^2$, d) $70,3 \text{ kg/m}^2$, e) $93,8 \text{ kg/m}^2$, f) $117,4 \text{ kg/m}^2$, g) $140,9 \text{ kg/m}^2$ ve h) $164,4 \text{ kg/m}^2$	66
Şekil 4.30. $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de menevişleme uygulanan katmanlı kompozitlerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) $70,3 \text{ kg/m}^2$, b) $93,8 \text{ kg/m}^2$, c) $117,4 \text{ kg/m}^2$, d) $140,9 \text{ kg/m}^2$ ve e) $164,4 \text{ kg/m}^2$	67
Şekil 4.31. 2,5 mm arka katman kalınlığına sahip 2TC1 numunelerin atış sonrası ön ve arka yüzeylerinde oluşan şekil değişimi.....	68
Şekil 4.32. Balistik test sonrası eğilen arka katman çelikleri (Normalleştirme 5,5 mm – sol, $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de menevişleme 4,5 mm – orta, $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de menevişleme 3,5 mm – sağ)	69
Şekil 4.33. Atış sonrası numune resimleri (a) $93,8 \text{ kg/m}^2$ toplam alan yoğunluğuna sahip NOC2 numunesi, (b) $70,3 \text{ kg/m}^2$ toplam alan yoğunluğuna sahip 2TC4 numunesi ve (c) $70,3 \text{ kg/m}^2$ toplam alan yoğunluğuna sahip 4TC1 numunesi.....	69
Şekil 4.34. Balistik sınır hızı (V_{50}) [63]	72
Şekil 4.35. Mermi darbe hızı (V_d) ve mermi artık hızı (V_a) ile oluşturulan eğri [63]	72
Şekil 4.36. Hedef malzemenin delinme aşaması.....	76

Şekil 4.37. (a) Simetrik şekil değişimi ve (b) Simetrik olmayan şekil değişimi oluşumu.....	81
Şekil 4.38. Konik ve sivri kemer uçlu mermi için r ve L_b değerleri [82].....	82
Şekil 4.39. Zaid ve Paul modeli hedefin delinme anı [85].....	84
Şekil 4.40. Darbe esnasında gerçekleşen konik oluşumu [98].....	90
Şekil 4.41. Woodward hasar modeli [99].....	92

SİMGELER ve KISALTMALAR

A_Y	Alan yoğunluğu	(kg m ⁻²)
\bar{A}_Y	Boyutsuz değişken	(-)
A_a	Merminin (delici parçanın) ortalama darbe alanı	(m ²)
A_d	Şekil değişimi türüne bağlı sabit	(-)
A_m	Merminin şekline bağlı sabit	(-)
A_2	Sabit eğri uydurma parametresi	(-)
AA	Alüminyum alaşımı	(-)
AKB	Adyabatik kayma bandı	(-)
Al	Alüminyum	(-)
AlB ₁₂	Alüminyum borit	(-)
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit (alümina)	(-)
AY	Alan yoğunluğu	(-)
a_{ms}	Mermi ve seramik plakaya bağlı uzunluk	(m)
B	Malzeme sabiti	(-)
B_2	Sabit eğri uydurma parametresi	(-)
B ₄ C	Bor karbür	(-)
Be ₂ B	Berilyum borür	(-)
BeO	Berilyum oksit (berilya)	(-)
BSD	Brinell sertlik değeri	(-)
b	Oluşan deliğin yarıçapı	(m)
C	Malzeme sabiti	(-)
CETP	Cam elyaf takviyeli plastik	(-)
CaO	Kalsiyum oksit	(-)
Cu	Bakır	(-)
c	Her malzeme türü için ayrı deneysel sabit	(-)
c_{hm}	Zırh malzemesine (hedefe) ve mermiye bağlı değişken	(-)
d	Mermi çapı	(m)
d_e	Eşdeğer mermi çapı	(m)
d_k	Koninin aşınma sonrasında taban çapı	(m)
E_e	Etkin kinetik enerji	(J)
E_h	Zırh malzemesinin elastik modülü	(Pa)

E_k	Konik oluşumu için gerekli enerji	(J)
E_p	Toplam plastik şekil değişimi enerjisi	(J)
HHZ	Haddelenmiş homojen zırh	(-)
h	Zırh malzemesinin (hedefin) kalınlığı	(m)
h_{bt}	Arka katmanın darbe hizasında gerçek kalınlığı	(m)
h_i	İkincil parçalara dönüşen malzemenin kalınlığı	(m)
h_s	Seramiğin aşınma sonrasında azaltılmış kalınlığı	(m)
h_x	Yer değiştirme	(m)
h_0	Hedefin balistik koruma sağlayan kalınlığı	(m)
h^*	Nüfuz etme ve delinme arasındaki geçiş kalınlığı	(m)
\bar{h}	Boyutsuz değişken	(-)
IDM	İşlevsel dereceli malzeme	(-)
GEM	Geçirimli elektron mikroskobu	(-)
KPS	Kıvılcım plazma sinterleme	(-)
k	Sehim görünüş sabiti	(-)
L	Mermi uzunluğu	(m)
L_b	Mermi burun uzunluğu	(m)
L_p	Gerçek mermi uzunluğu	(m)
L_s	Mermi son uzunluk (darbe sonrası)	(m)
MgO	Magnezyum oksit	(-)
m	Kütle	(kg)
m_a	Merminin (delici parçanın) artık kütlesi	(kg)
m_b	Arka katmanın etkin bölgesinin kütlesi	(kg)
m_h	Zırh malzemesinin (hedefin) kütlesi	(kg)
m_i	İkincil parçaların kütlesi	(kg)
m_m	Merminin (delici parçanın) kütlesi	(kg)
N	Ölçülen sertlik değeri sayısı	(-)
n	Malzeme sabiti	(-)
P	Batma derinliği	(m)
p	Mermi-hedef bileşimine dayalı deneysel parametre	(-)
RSD-C	Rockwell Sertlik Değeri C	(-)
R_T	Eksenel hedef direnci	(Pa)

R_t	Hedefin delinmeye karşı direnci	(Pa)
r	Merminin yarıçapı	(m)
r_e	Arka katmanın etkin bölgesinin yarıçapı	(m)
S_k	Koniğin yanal alanı	(m ²)
SiC	Silisyum (silikon) karbür	(-)
Si ₃ N ₄	Silisyum nitrür	(-)
SiO ₂	Silisyum (silikon) dioksit	(-)
SİS	Sıcak izostatik sıkıştırma	(-)
s	Malzeme sabiti	(-)
T	Sıcaklık	(°)
T_e	Erime sıcaklığı	(°)
T_h	Hedefin kalınlık ön değeri	(m)
T_0	Referans sıcaklık	(°)
T^*	Normalleştirilmiş sıcaklık (boyutsuz benzer sıcaklık)	(-)
TEM	Taramalı elektron mikroskobu	(-)
Ti	Titanyum	(-)
TiB ₂	Titanyum diborür	(-)
TiBe ₁₂	Titanyum berilyum	(-)
TiC	Titanyum karbür	(-)
u	Merminin anlık delme hızı	(m s ⁻¹)
u_s	Hedef malzemenin sünekliğine bağlı sabit	(-)
V_a	Mermi (delici parça) artık hızı	(m s ⁻¹)
V_d	Mermi (delici parça) darbe hızı	(m s ⁻¹)
V_h	Hedefin hızı	(m s ⁻¹)
V_0	Koruma hızı	(m s ⁻¹)
V_2	Arka katmanın hızı	(m s ⁻¹)
V_{50}	Balistik sınır hızı (sınır hız)	(m s ⁻¹)
VSD	Vickers sertlik değeri	(-)
W	Yapılan toplam iş	(J)
W_b	Oluşan taç yapraklarını eğmek için yapılan iş	(J)
W_d	Yapılan dinamik iş	(J)
W_{min}	En düşük hedef delinme enerjisi	(J)

W_p	Plastik şekil değişimi için yapılan iş	(J)
\bar{w}	Boyutsuz değişken	(-)
x	Eksenel yönde delinme mesafesi	(m)
x_i	Ölçülen her bir sertlik değeri	(RC)
\bar{x}	Ortalama sertlik değeri	(RC)
Y_p	Merminin dinamik dayanımı	(Pa)
Y_T	Hedefin tek eksenli akma dayanımı	(Pa)
Y_2	Arka katmanın dinamik akma dayanımı	(Pa)
YDDA	Yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı	(-)
Y_2O_3	İtriyum oksit	(-)
ZD	Zırh delici	(-)
ZrO_2	Zirkonyum dioksit	(-)
$ZrSiO_4$	Zirkonyum Silikat (Zirkon)	(-)
z	Mermi-hedef bileşimine dayalı deneysel parametre	(-)
z_k	Mermi-seramik bileşimine dayalı deneysel parametre	(m ²)
ΔV	Mermi hız düşümü	(m s ⁻¹)
ΔV_{top}	Toplam mermi hız düşümü	(m s ⁻¹)
α	Her malzeme türü için ayrı deneysel sabit	(-)
α_b	Hedefin malzeme bileşimi (seramik/metal) sabiti	(-)
α_l	Deneysel olarak türetilmiş sabit	(-)
α_m	Yarım koniklik açısı	(°)
β	Her malzeme türü için ayrı deneysel sabit	(-)
β_a	Arka katman malzeme sabiti	(Pa)
β_h	Hedefin delinme direnci parametresi	(-)
β_k	Birim kayma alanına düşen kırılma enerjisi	(kg s ⁻²)
γ	Her malzeme türü için ayrı deneysel sabit	(-)
γ_m	Merminin keskinlik parametresi	(-)
ε	Kopma uzaması	(-)
ε_e	Etkin (eşdeğer) gerinim	(-)
ε_h	Hedef malzemenin uzama miktarı	(%)
ε_m	Kararsızlık gerinimi	(-)
$\dot{\varepsilon}$	Gerinim hızı	(s ⁻¹)

$\dot{\epsilon}^*$	Boyutsuz plastik gerinim hızı	(-)
θ	Darbe açısı	(°)
λ	Her malzeme türü için ayrı deneysel sabit	(-)
ρ	Yoğunluk	(kg m ⁻³)
ρ_h	Zırh malzemesinin (hedefin) yoğunluğu	(kg m ⁻³)
ρ_m	Merminin (delici parçanın) yoğunluğu	(kg m ⁻³)
$\bar{\rho}$	Boyutsuz değişken	(-)
σ	Standart sapma	(-)
σ_A	Akma dayanımı	(Pa)
σ_{ζ}	Çekme dayanımı	(Pa)
σ_a	Akış gerilmesi	(Pa)
σ_e	Etkin gerilme	(Pa)
φ	Seramik konik açısı	(°)
φ_e	Eğilme açısı	(°)

Alt İndisler

h	Hedefin
m	Merminin
n	Normal darbe
θ	Açılı darbe
1	Ön katman (seramik)
2	Arka katman (metal)

Üst İndisler

i	En uygun ölçü
---	---------------

1. GİRİŞ

Ülkelerin kendilerini iç ve dış tehditlere karşı koruma yeteneklerinin geliştirilmesi ve artırılması için savunma teknolojileri üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Günümüzde pek çok ülkenin önem verdiği bu araştırmalara yüksek oranlarda yatırımlar yapılmaktadır. Askeri ve siyasi sebeplerden ötürü ülkelerin kendi denetiminde gerçekleştirdikleri bu araştırmalar çoğunlukla gizli tutulmaktadır. Gelişen silah teknolojisiyle beraber üretilen silahlara karşı koruma amacıyla zırh teknolojisi üzerine çalışmalar yapılıp yeni zırhlar geliştirilmektedir. Zırh uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar savunma sanayisini doğrudan ilgilendirdiğinden, bu yapılan çalışmaları daha da önemli kılmaktadır.

Zırh uygulamalarında birinci ve en önemli aşama malzeme seçimidir. Kullanılacak zırh malzemesinin yüksek balistik dayanıma sahip olması gerekmektedir. İstenilen mekanik özellikleri sağlaması dışında uygun malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar kolay temin edilebilir ve yaygın yöntemler ile kolay şekillendirilebilir olmasıdır. Bütün bunlar göz önünde bulundurulduğunda zırh malzemesi olarak çeliğin yaygın kullanıldığı görölmektedir.

Çelik üzerine yapılmış akademik alanda pek çok balistik çalışma bulunmaktadır [1-10]. Piyasada bulunan standart çelikler kullanıldığı gibi özel üretim çeliklerde kullanılmaktadır. Bu alanda çalışma yapılabilecek çelik türlerinden biri de yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı (YDDA) çeliklerdir. YDDA çeliklerin kullanım alanlarından biri de otomotiv alanıdır. Otomobillerde gövde yapısında, süspansiyon, tekerlekler ve yardımcı parçalarda kullanılmaktadır [11].

Çeliğin mekanik özelliklerini değiştirmek için ısıl işlem kullanılmaktadır. Uygulanan ısıl işleme göre değişen içyapı doğrudan çeliğin mekanik özelliklerini etkilemektedir. En yüksek dayanıma sahip içyapı martenzit olduğu için balistik alanda çelikte en yüksek korumayı martenzit yapıda sağlayacağı öngörülebilir. Hızlı soğutma ile elde edilen ham martenzit yapıdaki çelik çok yüksek dayanıma sahip olmasına rağmen gevrek olduğu için balistik deneylerde kullanıma uygun olmadığından menevişleme işleminin gerekmektedir. Martenzit yapıdaki YDDA çelikler çok yüksek dayanımlara

(>1200 MPa) çıkabildiği gibi otomotiv alanında yüksek sağlamlık ve güvenlik sağladığından gövde yapısı ve güvenlik gerektiren parçalarda kullanılmaktadır [11-13].

Eski çağlarda insanlar ilk silahları avlanmak için üretmişlerdir. Silahların kullanımıyla eski zamanlardan itibaren kendilerini savunabilmek için zırha ihtiyaç duymuşlardır. İlk zırh malzemesi olarak insanlar deriyi kullanmışlardır. Daha sonraları demirin kullanılmasıyla metal zırhlar üretmişlerdir. Bilinen bir gerçektir ki tarihte silah ve zırh teknolojilerinin gelişmesinde en büyük payı savaşlar almıştır. Farklı milletler ve toplumlar kimi zaman toprak ve kaynak, kimi zaman ise sadece kültürel çakışma ya da dini sebepler yüzünden birbirleriyle savaşmışlardır. Tarihte pek çok defa görülmüştür ki kimi zamanlarda ise fikir ayrılıkları yüzünden kendi aralarında savaşmışlardır. İnsanlar savaşlarda sadece kendileri için zırh üretip kullanmamışlardır. Orta çağlardan itibaren kullandıkları hayvanları ve savaş araçlarını da zırhlandırmaya ihtiyaç duymuşlardır. Şekil 1.1’de tarihte kullanılmış silah ve zırhlardan bazıları görülmektedir [14-16].



Şekil 1.1. Tarihte kullanılmış silah ve zırhlar, (a) Çok eski zamanlarda kullanılan ağaç ve taştan silah (b) MS 3. yüzyıl timsah derisi zırh Mısır (c) 13. yüzyıl Moğol zırhı (d) 15. yüzyıl zırh İtalya (e) Birinci Dünya Savaşı tank mürettebat zırhı 1916 İngiltere [14]

13. yüzyılda Türklerin kullandığı tüm vücudu saran örgü şeklindeki çelik zırh döneminin en önemli zırhı olarak kabul edilmektedir. Örgü şeklinde olması toplam

zırh ağırlığında azalma sağlarken zırhın koruma etkinliği ise dönemine göre oldukça yüksektir. Türk zırhının bu özelliği dönemin diğer zırhlarına göre fayda sağlamaktadır. 13. yüzyıl Türk zırhı Şekil 1.2’de gösterilmiştir [17].



Şekil 1.2. 13. yüzyıl örgü şeklindeki Türk zırhı [17]

Çelik, yüksek süneklik ve dayanıma sahip olmasının yanı sıra yüksek yoğunluğa da sahiptir ki bu çeliğin hafif zırh yapımı konusunda en zayıf özelliğidir. Zırh malzemesi için sadece yüksek dayanım önemli değil ağırlıkta çok önemli bir etmendir. Birinci ve İkinci Dünya Savaşı’nda zırh uygulamaları konusundaki bilgi sadece çelik ile sınırlıydı. Çelik zırhlarının fazla ağır olmasından ötürü sadece yavaş ve ağır zırhlı araçlarda kullanımıyla sınırlı kalmıştır. İkinci Dünya Savaşı’ndan itibaren hafif zırhlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için kullanılan uygulamalardan biride seramik ön katmanlı kompozit zırhlardır. Seramik ön katmanlı kompozit zırhlar ilk kez 1960’lı yılların başında arka katmanı güçlendirilmiş cam elyafından oluşan alümina ön katmanlı zırh uygulamasında kullanılmıştır ve bu zamandan itibaren katmanlı kompozit zırhları kullanılmaya devam etmektedir. Günümüzde askeri alanda kullanılan zırhlı araçlar kara, deniz ve hava araçlarını kapsamaktadır. Zırhlı araçlar üzerinde ağırlığın olumsuz yönde etki ettiği unsurlar aşağıda gösterilmiştir [18].

- Hareket kabiliyeti
- Manevra

➤ Yakıt tüketimi

Bu sebeplerden ötürü İkinci Dünya savaşından itibaren daha hafif kompozit zırhlara ihtiyaç duyulmaktadır ve buda kompozit zırh teknolojisinin yakın zamanda çok fazla ilerleyip daha yaygın hale gelmesine neden olmuştur [18].

Günümüzde kullanılan zırh malzemelerini yalın (bütüncül) zırhlar ve kompozit zırhlar olarak iki ana kümeye ayırabiliriz. Yalın zırhlarda kullanılan malzemeler; çelikler, alüminyum alaşımları ve titanyum alaşımlarıdır. Kompozit zırhlar; katmanlı kompozitler ve elyaf takviyeli kompozitler olmak üzere iki alt kümeye ayrılmaktadır. Kompozit zırhlarda birçok farklı metal, seramik ve polimer türü malzemelerin birleşimleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan seramik esaslı katmanlı kompozit zırhlar askeri araçlarda yaygın kullanılmaktadır ve en çok kullanılan seramik zırhları Al_2O_3 , SiC ve B_4C 'dür. Metaller merminin kinetik enerjisini plastik şekil değişimine uğratarak soğururlarken seramikler merminin kinetik enerjisini kırılmaya maruz kalarak soğururlar. Ön katmanda bulunan seramik merminin hızını yavaşlatarak arka katmandaki metalin aldığı darbeyi azaltmaktadır [18].

➤ Yalın (bütüncül) zırhlar

➤ Kompozit zırhlar

- Katmanlı kompozit zırhlar
- Elyaf takviyeli kompozit zırhlar

Personel için kullanılan zırhlar, yumuşak zırhlar ve sert zırhlar olmak üzere iki kümeye ayrılmaktadır. Yumuşak zırhlar giyen kişinin vücut biçimine uyacak şekilde üretilebilmektedir. Elyaf takviyeli kompozit zırhların yakın zamanda çok gelişmesiyle personel zırhları çok daha hafif ve kullanışlı hale gelmiştir. Yumuşak zırhlar tabanca gibi daha düşük seviyeli balistik tehditlere karşı koruma sağlamaktadır. Tüfek gibi daha yüksek balistik tehditler ya da bıçak gibi kesici uçlu silahlar için uygun değildir. Daha yüksek seviyeli balistik tehditler için sert zırhlar kullanılmaktadır. Sert zırhlar çelik, titanyum ya da seramik gibi koruyucu katmanlar içerebilmektedir. Özellikle hayati organların bulunduğu bölgelere ilave koruyucu

zırh katmanları eklenmektedir. Personel için kullanılan zırhları uygulama alanlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırabiliriz [18].

- Miğfer
- Tam gövde zırhı
- Yelek

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

Şekil 1.3. Gerinim hızına (s⁻¹) göre uygulanan deney yöntemleri [20]

Personel zırhları mermi ya da şarapnel parçalarının yaptığı darbeyi soğurarak koruma sağlarlar. Bu yüzden kullanılan elyafların darbeyi soğurması için yüksek dayanıma ve darbenin neden olacağı yaralanmaları (ezilme gibi) önlemek ya da en aza indirmek için düşük elastikiyete sahip olması gerekmektedir. Günümüzde kullanılan elyaflar; yüksek dayanımlı aramid (Kevlar, Twaron, Technora), yüksek molekül ağırlıklı polietilen (Spectra, Dyneema) ve PBO (polyphenylene benzobisoxazole, Zylon), PIPD (polyhydroquinone-diimidazopyridine, diğer adı M5) elyaflarıdır. Balistik korumayı sağlayan elyaf türüyle beraber elyafların dizilimi, sıklığı ve miktarı da etki etmektedir [19].

Balistik uygulamalarda plastik şekil değişimi yüksek gerinim hızlarında gerçekleşmektedir. Gerinim hızı arttıkça çeliklerin sünek-gevrek geçişine uğradığı bilinmektedir. Değişen gerinim hızlarıyla beraber malzemenin mekanik özelliklerini incelemek için kullanılan deney yöntemi de değişmektedir. Farklı gerinim hızlarına göre uygulanan deney yöntemleri dinamik etmenleriyle beraber Şekil 1.3'te gösterilmiştir [20].

Balistik uygulamalar için en önemli mekanik özelliklerden biri de akış gerilmesidir. Akış gerilmesine etki eden etmenler gerinim hızı, gerinim ve sıcaklıktır. Değişen gerinim hızı, gerinim ve sıcaklık değerleri ile malzemenin akış gerilmesini hesaplamak için kullanılan en yaygın bağıntı Johnson-Cook denklemidir ve denklem (1.1) ile denklem (1.3) arasında verilmiştir [21].

$$\sigma_a(\epsilon_e, \dot{\epsilon}, T) = [\sigma_A + B\epsilon_e^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - (T^*)^s] \quad (1.1)$$

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (1.2)$$

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_e - T_0} \quad (1.3)$$

Denklem (1.1)'de geçen σ_a değeri akış gerilmesini (etkin gerilme) ifade etmektedir. Denklem (1.2)'de geçen $\dot{\epsilon}^*$ değeri, $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ için boyutsuz plastik gerinim hızını ifade etmektedir. Denklem (1.3)'te geçen T^* değeri normalleştirilmiş sıcaklığı (boyutsuz benzer sıcaklık), T değeri gerilmenin hesaplandığı sıcaklığı, T_e değeri malzemenin erime sıcaklığını ve T_0 değeri referans sıcaklığı ifade etmektedirler.

Denklem (1.1)'e baktığımızda bağıntı üç kısımdan (parantez) oluşmaktadır. Birinci kısımda geçen σ_A değeri malzemenin akma dayanımını ifade etmektedir. Denklem birinci parantezi içinde yer alan değerler, $\varepsilon^* = 1$ ve $T^* = 0$ için gerinime karşılık gelen gerilmeyi ifade etmektedir. Malzeme sabiti olan B ve n değerleri gerinim sertleşmesinin etkisini ifade etmektedirler. İkinci ve üçüncü parantez içinde bulunan değerler sırasıyla gerinim hızı ve sıcaklığın etkisini ifade etmektedirler. Bu kısımlarda geçen C ve s değerleri malzeme sabitleridir [20,21].

Bu çalışmada, zırh malzemesi olarak yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı bir çelik olan 34CrNiMo6 çeliği denenmiştir. 860 °C'de östenitleştirme işleminin ardından yağ banyosunda hızlı soğutma ile elde edilen ham martenzit yapıya 200 °C ve 400 °C'de menevişleme işlemleri uygulanmıştır. Üçüncü bir ısıl işlem olarak 860 °C'de normalleştirme işlemi yapılarak çeliğe üç farklı ısıl işlem uygulanmış olup gerçekleştirilen ısıl işlemlerin çeliğin mekanik özelliklerine ve balistik davranışına etkisi incelenmiştir. Yalın çeliklerin dışında her ısıl işlem kümesi için bütün numunelerle aynı alan yoğunluğuna sahip SiC seramik ön katmanlı kompozit yapı elde edilerek katmanlı kompozit yapıdaki balistik başarımları da incelenmiştir. Kullanılan SiC seramik plakalar standart olup 50x50 mm ebatlarında ve 8,5 mm kalınlığındadır. Balistik testlerde 7,62 mm zırh delici mermiler kullanılmıştır. Yalın çelikler 5 farklı kalınlıkta incelenmiş olup her kalınlık için 5'er numune denenmiştir. Katmanlı kompozit numunelerde ise her kalınlık için 3'er numune denenmiştir. Birinci balistik testin ardından 200 °C'de menevişlenen numunelerin tam başarımlarını göstermesi sonucunda daha düşük kalınlıklarda hem yalın çelik halde hem de katmanlı kompozit halde yeniden balistik teste tabi tutulmuştur. Çekme ve darbe testi ile çeliğin mekanik özellikleri incelenirken metalografi testi ile çeliğin iç yapısına bakılmıştır. Balistik test sonrasında delinen numunelerin iç yapısında oluşan adyabatik kayma bantları incelenmiştir. Uygulanan üç ısıl işlem kümesi için de ayrı ayrı yalın çelik numuneler ile SiC ön katmanlı kompozit numunelerin balistik başarımları karşılaştırılmıştır ve bulunan sonuçlar irdelenmiştir. Zırhlarla ilgili mevcut analitik yöntemler incelenmiştir. Yapılan mekanik testler ve deneysel çalışma sonucunda alınan veriler ile önceki çalışmalarda geçen analitik yöntemler kullanılmıştır. Hem yalın çelik hem de katmanlı kompozit numuneler için analitik yöntemlerle karşılaştırma yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Jena ve arkadaşları [1], yaptıkları çalışmada çok yüksek dayanımlı zırh çeliğine 910 °C'de östenitleştirme işleminin ardından yağda soğutma gerçekleştirerek tam martenzit yapı elde etmişlerdir. Ardından kullandıkları numunelere 200, 300, 400, 500 ve 600 °C sıcaklıklarında menevişleme işlemi uygulamışlardır. Isıl işlemlerin ardından mekanik testler ve içyapı incelemesi uygulanarak numunelerin çekme dayanımlarını, sünekliklerini, Charpy darbe dayanımlarını, sertliklerini ve içyapılarını incelemişlerdir. Numunelere 840±15 m/s hıza sahip sert çelik çekirdekli mermilerle dik açıda balistik test uygulamışlardır. Isıl işlem ile değişen mekanik özelliklerin ve mikroyapının çeliğin balistik başarımıyla ilişkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda 200 °C'de menevişlenen numunelerin en iyi balistik başarımına sahip olduklarını gözlemlemişlerdir.

Mishra ve arkadaşları [2], 25 mm kalınlığındaki zırh çeliği plakasına 200 °C'den 600 °C'ye kadar farklı sıcaklıklarda menevişleme işlemi gerçekleştirip 7,62 mm zırh delici (ZD) mermilerle balistik test uygulamışlardır. Menevişleme sıcaklığı arttıkça sertliğin düştüğü ve buna bağlı olarak batma derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. En düşük batma derinliği 200 °C'de menevişlenen plakada görülmüştür. Darbe sonrası numunelerin delik bölgesindeki içyapılarında 400 °C'ye kadar menevişleme sıcaklığında çatlağa neden olan adyabatik kayma bantları (AKB) görülürken 600 °C menevişleme sıcaklığında AKB oluşmamıştır. 200 °C'de menevişlenen ve benzer koşullarda denenilen 5 mm kalınlığındaki plakanın delik bölgesinde AKB görülmüştür.

Jena ve arkadaşları [3], yüksek dayanımlı zırh çeliğine ve 7017 alüminyum alaşımına 830±10 m/s hızında 7,62 mm mermilerle dik açıda balistik test uygulamışlardır. Farklı mekanik özelliklerin balistik davranışına etkisini incelemek için çeliğe iki farklı ısıl işlem uygulanmıştır. Yüksek dayanımlı zırh çeliğini 910 °C'de östenitleştirme işleminin ardından yağda soğutma gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin ardından 200 °C ve 650 °C'de menevişleme uygulanmıştır. 7017 alüminyum alaşımıyla çeliğin balistik sonuçları karşılaştırılmıştır ve AKB oluşumu

gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda en iyi balistik başarımlar 200 °C’de menevişlenen çelikte görülmüştür.

Demir ve arkadaşları [4], 7075 ve 5083 alüminyum alaşımlarının ve yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı 4140 çeliğinin 7,62 mm ZD mermiler altında darbe davranışlarını incelemiştir. Malzemelerin sertliğinin ve dayanımının balistik davranışına etkisini görebilmek için numunelere çeşitli ısıl işlemler uygulamışlardır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda en iyi balistik başarımlarına sahip malzemenin 85 kg/m² ve üzerinde alan yoğunluğu ile balistik korumayı sağlayan 7075-T651 (yaşlandırılmış) alüminyum alaşımı olduğunu gözlemlemiştir.

Demir ve arkadaşları [5], yaptıkları çalışmada AISI 4340 ve DIN100Cr6 yüksek dayanımlı çeliklerinin balistik darbe davranışını incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda 7,62 mm ZD mermiler kullanılarak dört farklı sertlik değeri ve beş farklı alan yoğunluğu denenmiştir. Bu çalışmada çeliklerde sertlik değeri ve alan yoğunluğunun balistik davranışına etkisi incelenmiştir. Farklı sertlik değerleri elde edebilmek için numunelere dört farklı ısıl işlem uygulanmıştır. Numunelerin mekanik ve balistik özellikleri incelenmiştir, atış sonrası mikro ve makro inceleme yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda en yüksek balistik başarımları yaklaşık 50 Rockwell C sertlik değerine (RSD-C) sahip AISI 4340 çeliği göstermiştir ve menevişlenmiş martenzitik çeliğinde balistik davranışını belirlemek için sadece sertliğin yeterli olmadığı görülmüştür. Bu çalışmaya ilave olarak Übeyli ve arkadaşları [6], AISI 4340 ve DIN 100Cr6 çeliklerinde ısıl işlemin AKB oluşumuna etkisini incelemiştir. İçyapıdaki değişiklikleri incelerken hem ışık mikroskobu hem de taramalı elektron mikroskobu (TEM) kullanılmıştır. Yapı-özellik ilişkilerini göstermek için mikro sertlik ölçümleri alınmıştır. Yapılan çalışma sonucunda 49 ve 59 RSD-C’ye sahip numunelerde dönüşmüş bant görülürken incelenen bütün numunelerde bozulmuş bant görülmüştür. Dönüşmüş bantlarda karbür çökeltisi ile ince taneli yapı görülmüştür.

Übeyli ve arkadaşları [7], çelik ve katmanlı kompozitin balistik başarımlarını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı 50CrV4 çeliği ile alümina/alüminyum katmanlı kompoziti sabit üç farklı alan yoğunluğunda

7,62 mm ZD mermiler kullanarak balistik teste tabi tutmuşlardır ve aynı alan yoğunluğuna sahip çelik ve kompozit numuneleri karşılaştırmışlardır. Yapılan deney sonucunda kompozitin çeliğe göre %26 ağırlıkta düşüş sağladığını gözlemlemişlerdir.

Übeyli ve arkadaşları [8], düşük karbonlu ve düşük alaşımlı bir çeliğin ara kritik tavlama koşullarında balistik başarımını incelemişlerdir. Daha yüksek mekanik özellikler elde edebilmek için kullandıkları çelikte ferrit ve martenzit çift fazı elde etmişlerdir. Üç farklı sıcaklıkta ara kritik tavlama ve tam kritik tavlama ile toplamda dört farklı numune kümesi üzerinde 7,62 mm ZD mermiler ile deneysel çalışma yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışma sonucu martenzit oranı arttıkça balistik başarımında artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Demir ve arkadaşları [9], alümina ön katmanına sahip katmanlı kompozit yapıdaki 4340 çeliğinin balistik başarımını 7,62 mm ZD mermiler kullanılarak yapılan deneysel çalışmayla incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada alan yoğunluğu ile arka katman çeliğinin mekanik özelliklerinin kompozitin balistik başarımına etkilerini incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda en iyi balistik dayanımının 40 ya da 50 RSD-C'ye sahip arka katman çeliklerinde sağlandığını gözlemlemişlerdir.

Übeyli ve arkadaşları [10], çelik/alümina katmanlı kompozitin balistik davranışı üzerine çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmada arka katman çeliğinde farklı martenzit oranları ile kompozitte farklı alan yoğunlukları kullanılarak 7,62 mm ZD mermilerle dik açıda balistik test uygulamışlardır. Kullanılan martenzit oranları düşük, orta ve yüksek olmak üzere sırasıyla %32, %55 ve %75'dir. Yapılan deneysel çalışma sonucunda 6 mm kalınlığındaki alümina ön katmanının çift fazlı arka katmandaki çeliğin balistik dayanımını büyük ölçüde arttırdığı görülmüştür.

Holmen ve arkadaşları [22], 6070 alüminyum alaşımından elde ettikleri 20 mm kalınlığındaki plakalara O (tavlanmış), T4 (doğal yaşlandırma), T6 (yapay yaşlandırma) ve T7 (aşırı yaşlandırılmış) farklı ısıl işlemlerini uygulayarak malzemenin balistik özellikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Çekme testi uygulayarak malzemenin farklı ısıl işlemler sonucu gerilme-gerinim davranışını

incelemişlerdir ve ısıtıl işlemler sonucunda malzemenin dayanımında, gerinim sertleşmesinde ve sünekliğinde büyük değişiklikler oluştuğunu gözlemlemişlerdir. 7,62 mm ZD mermiler kullanılarak gerçekleştirilen balistik testlerle farklı bütün ısıtıl işlemler için balistik sınır hızları belirlenmiştir. Yapılan deneysel testlerde O ısıtıl işleminde en sünek yapı elde edilmiş olup balistik testlerde neredeyse hiç parçalanma görülmemiştir. T6 ısıtıl işleminde ise en gevrek yapı elde edilmiş olup çoğunlukla parçalanma görülmüştür. Deneysel sonuçlarda balistik çalışmada bu alaşım için dayanıklılığın parçalanmaya rağmen süneklikten çok daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Sayısal benzetim ve analitik hesaplamalarla deneysel veriler incelenip karşılaştırılmıştır.

Dey ve arkadaşları [23], yaptıkları balistik çalışmada dayanımın çelik plakalar üzerindeki delik oluşumuna etkisini incelemişlerdir. 3 farklı metal malzeme kullanılmış olup bunlar Weldom 460 E, Weldom 700 E ve Weldom 900 E'dir. Gerinim sertleşmesi, gerinim sertleşme hızı, yumuşama sıcaklığı ve üç eksenli gerilmenin malzemelerin dayanımı ve sünekliği üzerindeki etkisini incelemek için üç farklı tip çekme testi uygulanmıştır. Atışlar sırasında basınçlı gaz tabancası ile yuvarlak, konik ve sivri kemer uçlu üç tip mermi kullanılmış olup mermi hızları ölçüm aralığı 150-350 m/s'dir. Kullanılan numuneler 12 mm kalınlığındadır. Deneysel veriler ile doğrusal olmayan sonlu elemanlar kodu LS-DYNA kullanılarak sayısal benzetim yapılmıştır. Yuvarlak uçlu mermi ile yapılan deneylerde akma dayanımı arttıkça balistik sınır hızında azalma görülürken diğer mermilerde bunun tam tersi bir davranış görülmüştür. Weldom 700 E ve Weldom 900 E numunelerine konik uçlu mermi ile yapılan atışlarda mermilerin parçalandığı görülmüştür.

Dey ve arkadaşları [24], yaptıkları çalışmada çift katmanlı çelik plakaların yuvarlak ve sivri kemer uçlu mermilerle deneysel ve sayısal olarak balistik dayanımını incelemişlerdir. Yapılan deneylerde Weldom 700 E malzemesinden toplamda 12 mm kalınlığında yalın ya da katmanlı numuneler kullanılmıştır. Atışlar sırasında basınçlı gaz tüfeği kullanılmış olup farklı hedef birleşimleri için balistik sınır hızları gözlemlenmiştir. Çift katmanlı sistemlerde yuvarlak uçlu mermi kullanıldığında balistik sınırdaki büyük artış gözlemlenirken sivri kemer uçlu mermi kullanıldığında bu üstünlüğün ortadan kalktığı görülmüştür. Çalışma sonucunda mermi ucu

şeklinden bağımsız olarak çift katmanlı numune kullanımının toplam koruma seviyesinde artış sağladığı tespit edilmiştir.

Ali [25], yaptığı çalışmada 34CrNiMo6 çeliğinin büyük ölçekli dövme işlemi için termomekanik çözümlemesini gerçekleştirmiştir. Farklı işlem koşullarının ve soğutma hızlarının içyapı ve son mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Yapılan çalışmada derin deniz uygulamaları için gerekli mekanik özellikler (düşük sıcaklıkta darbe tokluğu ve yüzey sertliği) elde edilmeye çalışılmıştır.

Deniz [26], yaptığı çalışmada AISI 4340 çeliğinden üretilmiş sertleştirilmiş plakaların 7,62 mm ZD mermiler karşısında delinmesi ve mermilerin delme süreçleri incelenmiştir. Yapılan ısıl işlemler ile elde edilen 4 farklı sertlik değerlerinde (39,5, 49,5, 52,5 ve 58,5), ANSYS Autodyn yazılımı kullanılarak 2 ve 3 boyutlu olarak sayısal benzetim yapılmıştır. Yapılan değerlendirmede 2 boyutlu benzetimlerin mermi artık hızları açısından, 3 boyutlu benzetimlerin ise mermi artık hızları ve balistik sınır kalınlıkları açısından uyumlu oldukları görülmüştür. İncelenen sertlik aralığında artan plaka sertliğinin balistik başarımı artırdığı görülmüştür.

Zaera ve arkadaşları [27], yaptıkları çalışmada seramik/metal katmanlı kompozit zırhlarda metalik plaka ile seramik ön katmanı arasında kullanılan yapıştırıcı türünün ve kalınlığının balistik başarımına etkisini matematiksel ve deneysel olarak incelemişlerdir. Sayısal benzetimlerde sonlu farklar yazılımı yardımıyla alüminyum plaka ile alümina ön katmanına düşük kalibre mermilerin uyguladığı darbe kullanılmıştır ve ardından tam boyutlu deneysel testlerle yapıştırıcının etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada 940 m/s darbe hızına sahip 5,9 g Tungsten Karbür çekirdeğe sahip 7,62 mm ZD mermiler kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada iki önemli unsur, seramik ön katmandaki hasar ve metal plakadaki şekil değişimi üzerinde durulmuştur. Epoksi reçinesinde gelen enerjinin %16'sı yapıştırıcıya iletilirken poliüretan yapıştırıcıda bu miktar %1,2 olmuştur, yani neredeyse gelen enerjinin tamamı seramiğe geri yansıtılmıştır. Bu da sayısal benzetimde de görüldüğü gibi seramikte oluşan çekme gerilmesini ve ardından gerçekleşen çatlak oluşumunu hızlandırmıştır. Hem sayısal çalışmada hem de deneysel çalışmada alınan

sonuçlardan yapıştırıcının kalınlığı ne kadar artarsa metal plakada plastik şekil değişiminden etkilenen bölgenin de arttığı yani metal plakanın daha fazla kinetik enerjiyi soğurduğu görülmüştür.

Lopez ve arkadaşları [28], yaptıkları çalışmada alümina/alüminyum zırhında yapıştırıcı katmanın kalınlığının balistik başarımına etkisini incelemişlerdir. Yapıştırıcı olarak epoksi reçine kullanılmıştır ve tam boyut deneysel testlerle beraber sayısal benzetim de yapılmıştır. Yapılan çözümler en iyi başarım için en uygun katman kalınlığını göstermiştir. Bütüncül çelik zırh plakası (Haddelenmiş Homojen Zırh – 60 RC sertlik) yerine ön katman olarak seramik plaka (karbür, nitrür ya da borür) kullanıldığında %65'e kadar ağırlıkta azalma sağlanılmaktadır. Seramiklerin yüksek maliyetinden ötürü personel zırhı dışında ya da tasarımda en büyük önemin hafiflik olmadığı durumlarda bunu dengelemek için alümina kullanılmaktadır. Çalışma sonucunda zırhın etkinliğine yapıştırıcı kalınlığı ile ilgili 3 farklı durumun etki ettiği görülmüştür. Yapıştırıcıdaki kayma gerilmesi kalınlığın azalmasıyla beraber azalmaktadır, seramik ve metal plakanın birbirine bağlı kalmasını sağlamakta ve başarısızlığı önlemektedir. Seramiğin parçalanması ince yapıştırıcı tabakasıyla beraber azalmaktadır ve metal plakanın eğilmesini önlemektedir. Metal plakanın enerji soğurması kalın yapıştırıcı tabakasıyla beraber artmaktadır ve seramikten metale yük aktarımını kolaylaştırmaktadır. Yapılan sayısal benzetim sonucunda her iki durum içinde en iyi başarım için 0,3 mm yapıştırıcı kalınlığı gerektiği tespit edilmiştir.

Madhu ve arkadaşları [29], yaptıkları çalışmada metal plaka ile %95 ve %99,5 saflıktaki alümina ön katmanının farklı hızlardaki 12,7 mm ZD mermilerle balistik başarımlarını incelemişlerdir. Bütün numunelerde batma derinliği (BD) ölçülmüştür. 12,7 mm ZD mermi ile aynı mermi-çapı/plaka-kalınlığı (d/t) oranına sahip 7,62 mm ZD mermilerle de atış yapılmıştır. Yapılan deneylerde kullanılan seramikler 50x50 mm ebatlarındadır ve farklı seramik kalınlıkları ile mermi hızları 500 ile 830 m/s arasında değişmektedir. Ön katman 9 adet seramik plakadan olup kullanılan metal plaka 7017 alüminyum alaşımıdır. Yapılan çalışma sonucunda etkinlik etmeninin sabit olmadığı, değişen kalınlık ve hızlarla beraber değiştiği gözlemlenmiştir. Yüksek saflıktaki alümina (%99,5) diğerine (%95) göre herhangi

kalınlık ve hızda daha yüksek balistik başarımı göstermiştir. Yüksek saflıktaki alüminada artan kalınlıkla beraber balistik etkinlik etmeninin düştüğü görülürken düşük saflıktaki alüminada arttığı gözlemlenmiştir.

Lee ve arkadaşı [30], yaptıkları çalışmada seramik/metal kompozit zırhına 40,7 g çelik mermiler ile atış yaparak deneysel ve sayısal olarak çözümlemesini gerçekleştirmişlerdir. İlave hafif zırhın toplam alan yoğunluğu eşit kalacak şekilde kalınlığını değiştirerek balistik başarımı incelenmiştir. Sayısal çalışmada kompozit zırh sisteminde başlıca ayırt edici özellikler olan mermi aşınması, çatlak ilerlemesi, seramik konik oluşumu ve sırt (arka) plaka parçalanmasını başarılı şekilde yakalayan Düzleştirilmiş Parçacık Hidrodinamiği (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics) şeması [31] kullanılmıştır. Yapılan çözümlemeler sonucunda balistik sınır için en uygun ön katman kalınlığının sırt plakası kalınlığına oranı (h_1/h_2) belirlenmiştir. Deneysel ve sayısal yapılan yaklaşımlar belli bir alan yoğunluğunda tasarım için en uygun h_1/h_2 değeri olduğunu göstermiştir ve bu değer 2,5 civarında olduğu tespit edilmiştir. 1,5 ve 3 arasında h_1/h_2 değerleri için kompozit zırhın başarımında belirgin bir fark görülmemiştir. Yapılan bu çalışmanın hafif seramik/metal zırh sistemleri tasarımını iyileştirmek için yararlı olduğu sonucuna varılmıştır ve mevcut benzetim açılı darbe uygulamalarına genişletilebilmektedir.

Roberson ve arkadaşı [32], yaptıkları çalışmada SiC plakaların 7,62 x 51 mm Tungsten Karbür çekirdekli (1200 Vickers sertlik değeri) mermiler karşısında balistik direncini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada farklı yoğunluk ve sertlik değerlerinde SiC plakalar kullanılmıştır ve çalışma sonunda zırh tasarımında kullanılacak SiC plakanın özellikleri dışında gerekli balistik direnci sağlamak için kritik kalınlığının da önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Sadanandan ve arkadaşı [33], alümina/5083 alüminyum alaşımı ve alümina/43A çeliğinin açılı darbe altında balistik başarımını incelemişlerdir. Deneyde 7,62 mm İsveç FFV zırh delici ve İngiltere yuvarlak çekirdekli mermiler kullanılmıştır. Yapılan çalışmada kompozit numunelerdeki hatalar tanımlanırken, yuvarlak çekirdekli mermi ile zırh delici mermi arasındaki farklara değinilmiştir. Deney sonucunda alının değerler kuramsal ve deneysel modellerle karşılaştırıldığında

uyumlu olduğu görülmüştür. Yapılan çözümlenmeler sonucunda balistik sınır hızının (V_{50}) eğimle beraber arttığı gözlemlenmiştir. Normal ve açılı darbe arasındaki deneysel benzerlik kosinüs ve sekantın kökleri ile ifade edilmiştir.

Anderson ve arkadaşı [34], yaptıkları çalışmada seramik plakalara farklı sınırlandırma uygulayarak balistik başarımlarını incelemişlerdir. Kullandıkları seramik malzeme %99,5 saflıkta ve 2,54 cm kalınlığında alümina plakadır. İki farklı darbe hızında (1,52 ve 1,79 km/s) farklı sınırlandırmalar kullanarak deneysel çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Kullanılan sınırlandırma türleri; tamamen serbest, sadece radyal sınırlandırılmış, radyal-tek plaka sınırlandırma ve radyal-çift plaka sınırlandırma olmak üzere toplamda dört şekildedir. Seramik plakaların arkasında bulunan çelik silindirlerin batma derinlikleri ölçülerek karşılaştırma yapılmıştır ve çalışma sonunda sınırlandırma koşulları arttıkça balistik başarımlarında arttığı sonucuna varılmıştır.

Arslan ve arkadaşları [35], yaptıkları çalışmada basınçsız emdirme yöntemiyle üretilen bor karbür-alüminyum kompozitlerinin balistik başarımlarını incelemişlerdir. Deneysel çalışmada hızları 841 m/s'den yüksek olan AP-M2 zırh delici mermiler ile hızları 853 m/s'den yüksek olan Ball-M2 mermiler kullanılmıştır. Farklı içyapı ve mekanik özelliklerine sahip numuneler kullanılarak yapılan çalışma sonunda yaklaşık 40 kg/m² alan yoğunluğu ile balistik başarımlar sağlanmıştır.

Reaugh ve arkadaşları [36], yaptıkları çalışmada beş farklı seramiğin balistik başarımlarını incelemişlerdir. Kullandıkları malzemeler; alümina, silikon karbür, bor karbür, alüminyum nitrür ve titanyum diborür seramik ön katmanları ile çelik arka katmanından oluşmaktadır. Deneysel çalışmada hızları 1,35 ile 2,65 km/s arasında, uzunluğu 25,4 mm ve çapı 6,35 mm olan tungsten alaşımlı dik dairesel silindir mermiler kullanılmıştır. Kullanılan her seramikte merminin arka katman çeliğine nüfuz etmemesi için gereken en düşük alan yoğunlukları belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda denenen her seramik için mermi darbe hızı arttıkça gereken alan yoğunluğu da doğrusal olarak artarken alüminyum nitrür için bu artış düşüktür. Alüminyum nitrür seramiğinin düşük darbe hızlarında balistik başarımlarını düşüken

kullanılan seramikler arasında yüksek darbe hızında en iyisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Woodward [37], yaptığı çalışmada homojen metal zırhlarının şekil değişimi olmayan ZD mermilere karşı savunduğu birim alanı değerlendirmek için malzemenin kalınlığı, ağırlığı ve maliyeti üzerine sayısal benzetim uygulamıştır. Yaptığı çalışmada üç farklı delinme modeli kullanmıştır. Bunlar sünek delik oluşumu, çukur oluşumu ve yuvarlak uçlu merminin zırh malzemesini tıkamasıdır. Yapılan çalışmada titanyum alaşımları ve Hadfield çeliği gibi farklı malzemelerin verileri kullanılıp uygun zırh seçimi için ölçütler ele alınmıştır.

Murr ve arkadaşları [38], 1100 Al/Cu, soda kireç camı/Cu, soda kireç camı/1100 Al, ferritik paslanmaz çelik/1100 Al numunelerin mermi/hedef davranışlarını TEM ve GEM ile metalografik açıdan incelemişlerdir. Darbe hızları 0,8-6 km/s aralığında olan 3,18 mm çapında küresel mermiler kullanılmıştır. 1 km/s referans hızında oluşan oyukların derinlik/çap oranı 0,2 ile 2,95 aralığında ölçülmüş ve doğrusal olarak yığın yoğunluğu oranları ve elastik modül oranları ile ilişkili olduğu gözlemlenmiştir. Derinlik/çap oranı için yüksek hız (>5 km/s) eşik değerinin doğrusal olarak bu işlevselliklerle ilişkili olduğu görülmüştür ve derinlik/çap oranı 0,4 (1100 Al/Cu) ile 0,85 (ferritik paslanmaz çelik/1100 Al) aralığında ölçülmüştür. İçyapılar krater çeperindeki yeniden kristalleşme bölgelerine göre nitelendirilmiştir ve dislokasyon yoğunluğu bu bölgenin ötesinde azalmaktadır. Deneysel veriler kullanılarak bilgisayar destekli sayısal benzetim yapılmıştır ve alınan sonuçlar uygun mermi/hedef dayanım oranının önemini göstermektedir.

Kelina ve arkadaşı [39], yaptıkları çalışmada Si_3N_4 seramiğinin zırh malzemesi olarak kullanımını geleneksel alümina seramiği ile karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada yalın ve kompozit halde Si_3N_4 kullanımının alümina seramiklerine göre %12–30 oranında daha fazla balistik başarımlar sağladığı görülmüştür. Çalışılan malzemeler arasında plazmalı kimyasal bileşim ile hazırlanan Si_3N_4 matrisli OTM-917 kompoziti en yüksek mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Bileşim seçimi zırh için kütle, boyut ve maliyet gereksinimine göre yapılmıştır.

Gilev [40], Al – Si₃N₄ katmanlı kompozit malzeme üzerine balistik çalışma yapmıştır. Gözenekli Si₃N₄ seramik takviyeli AK5M2 ve AL-23-1 alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Kompozit malzeme içindeki Si₃N₄ miktarı, seramik içindeki bileşenlerin kalınlığı ve yapıdaki oran miktarları üzerine çalışılmıştır. Yapılan çalışmada en yüksek başarımlı kompozit malzeme ve alüminyum alaşımı katmanlarına sahip katmanlı yapı ve örgü tipi iç katmanlara sahip katmanlı örgü yapı göstermiştir.

Medvedovski [41], yaptığı çalışmada alümina seramiğinin balistik özelliklerini incelemiştir. Kullanılan alümina numunelerde alümina ağırlıkça 96, 97, 98, 98,5 ve %99,6 olup Al₂O₃-SiO₂-CaO-MgO ve Al₂O₃-MgO dizgeleri kullanılmıştır. Özel oranlarda alümina–zirkonya seramikleri (dengeleyici madde olarak itriyum oksit) kullanılmış olup alüminanın saflığı en düşük %99,8'dir. Balistik deneyler NIJ 0101.03 ve NIJ 0101.04 standartlarına göre KAR 98K, M16, AK47 ve diğer bazı düşük kalibreli silahlar ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulamaya ve gerekli olan koruma seviyesine göre farklı mermi çeşitleri kullanılmıştır. Medvedovski [42], yaptığı başka bir çalışmada alümina–mullit seramiklerinin balistik başarımlarını ve aşınma direncini incelemiştir. Yeterli miktarda mullit içeren alümina esaslı malzeme ve yüksek sıcaklıkta alümina ve zirkonun etkileşimiyle oluşan mullit, zirkonya ve zirkon içeren alümina esaslı malzeme olmak üzere iki malzeme türü kullanılmıştır. Seramiklerin balistik deneylerinde M16 silahı kullanılmış olup uygun arka katman malzemesi ile birlikte önceki çalışmada kullanılan standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulamaya ve gerekli olan koruma seviyesine göre farklı mermi çeşitleri kullanılmıştır. Balistik başarımları ve aşınma direnci, faz bileşiminin ve iç yapının bir işlevi olarak nitelendirilmiştir.

Haque ve arkadaşları [43], araç zırhı uygulamaları için yüksek hız darbe altında alümina seramik ön katmanlı S2-cam/vinilester kompozitinin balistik başarımlarını incelemiştir. İki bileşenli kompozit sistemde farklı kalınlıklarda balistik sınır, artık hız, enerji kırılımı ve delinme mekanizmasını karşılaştırmışlardır. Alümina seramik plaka kullanılmış olup ara katman olarak epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Farklı alan yoğunlukları elde etmek için değişik arka ve ön katman kalınlıkları kullanılmıştır. En yüksek balistik sınırı elde etmek için en uygun katman kalınlık

oranı (h_1/h_2) ve alan yoğunluğu belirlenmiştir. En uygun katman kalınlık oranının belirlenmesinin amacı en düşük ağırlıkta belirli seviyede balistik koruma sağlayabilmektir. Yapılan çalışma sonucunda en uygun katman kalınlık oranının 1 ile 1,25 arasında olduğu tespit edilmiştir.

Übeyli ve arkadaşları [44], yaptıkları çalışmada $Al_2O_3/Al2024$ (alümina/alüminyum) katmanlı kompozitinin 7,62 x 51 mm ZD mermiler ile düşük hız balistik davranışını incelemişlerdir. Arka katman mekanik özelliklerinin, farklı katman yapısının ve yapıştırıcı katmanın kompozit zırhın balistik başarımına etkisi incelenmiştir. Atış sonrası şekil değişim biçimini incelemek için kırılan yüzeylerde TEM kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda alümina ön katman ve Al2024-T6 (yapay yaşlandırma, 490 °C’de bir saat çözündürme ve 220 °C’de bir saat yaşlandırma) arka katmana sahip kalınlık oranı 1-3 arasında olan numuneler en yüksek balistik başarımı sağlamıştır. Ayrıca yapılan çalışmada poliüretan yapıştırıcı katmanın epoksi yapıştırıcı katmana göre daha fazla seramik parçalarını tuttuğu gözlemlenmesine rağmen yapıştırıcı katmanın kompozitlerin balistik başarımı üzerinde fazla bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Übeyli ve arkadaşları [45], silikon karbür takviyeli işlevsel dereceli malzemenin (İDM) zırh malzemesi olarak balistik davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada farklı kalınlıklarda metal ve seramik tozlardan toz metalürjisi yöntemiyle üretilen SiC-AA7075 işlevsel dereceli kompozit kullanılmıştır. Üretilen malzemelerde gözenek oluşumu görülmüştür. Balistik test öncesinde numunelerde çökelti sertleşmesi belirlenmiştir ve mikroskop ile içyapı incelenmiştir. 775-800 m/s hızında 7,62 mm ZD mermiler ile balistik test gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonucunda incelenen İDM’nin 25 mm’ye kadar merminin darbesine dayanamadığı görülmüştür. Denenen numunelerde büyük çatlaklar ve delik oluşumu görülürken numunenin şekil değişim bölgeleri yakınlarında mikro çatlaklar ile bozulmuş ve uzamış taneler görülmüştür.

Balcı ve arkadaşları [46], yaptıkları çalışmada sıcak sıkıştırma ile üretilen üç katmanlı İDM’nin 7,62 mm ZD mermiler ile balistik başarımını incelemişlerdir. İDM numunelerinin alt katmanı takviyesiz AA7075 alaşımından, orta ve üst katmanları ise

çeşitli boyutlarda B_4C parçacıkları içeren AA7075 kompozit katmanlarından oluşmaktadır. Farklı sıcaklıklarda yaşlandırma süresi ile katmanlardaki değişen sertlik değerleri belirlenmiştir. Balistik deneylerde her İDM kümesi aynı bileşim ve kalınlığa sahip olurken beş farklı numune kümesi kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda incelenen İDM'nin artan bor karbür içeriği ve katman kalınlığı ile beraber balistik dayanımının arttığı görülürken, başarısız olan numunelerin katmanlarında ayrılma görülmemiştir. Yapılan çalışma sonucunda incelenen İDM'nin tam başarımlı göstermesi için 25 mm'den daha yüksek kalınlığa sahip olması gerektiği gözlemlenmiştir.

Pettersson ve arkadaşları [47], yaptıkları çalışmada Ti-TiB₂ işlevsel dereceli kompozitin zırh malzemesi olarak kullanımını incelemiştir. Sıkıştırma ve birleştirme işlemi olarak kıvılcım plazma sinterleme yöntemi kullanılmıştır. Balistik deneylerde tungsten çekirdekli 7,62 mm ZD mermiler kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda en uygun bileşimin dış yüksek sertlik zırh katmanının saf seramik olmaması gerektiği görülmüştür. Yapılan çalışmada KPS malzemesinin uygunluğunu doğrulamak için KPS-(Ti)_{0,05}(TiB₂)_{0,95} ve SiS-TiB₂ (sıcak izostatik sıkıştırma) malzemeleri arasında balistik ve mekanik özellikler karşılaştırılmıştır ve sonuç olarak KPS malzemenin tamamen daha iyi koruyucu malzeme olduğu görülmüştür.

Jovicic ve arkadaşları [48], yaptıkları çalışmada epoksi içine gömülü seramik kürelerden oluşmuş arka katmanları içeren işlevsel dereceli kompozit malzemenin balistik başarımlı olduğunu incelemiştir ve deneysel sonuçlar ile seramik plakaya göre ağırlık artışına sebep olmadan 3000 ft/s (1000 m/s) balistik sınır elde edilebileceği görülmüştür. Yapılan çalışmada sayısal modelleme kullanılmıştır. İki farklı model incelenmiştir, bunlar arka katman için yaklaşık elyaf/epoksi çift fazlı model ve epoksi içine gömülü seramik küreler için orana bağlı, hasara dayalı modeldir.

Jeffrey [49], zırh seramiklerinin sertliklerinin belirlenmesi üzerine çalışma yapmıştır. Zırh seramiğinin sertliğinin bilinmesiyle balistik başarımlı ile ilgili kırılma tokluğu, elastik özellikler ve akma dayanımı gibi diğer özellikleri hakkında yorum yapılabilmektedir. Sertlik ölçme yöntemleri oldukça basit yöntemlerdir ve yöntemde kullanılan batıcı ucun geometrisi, batma derinliği, batma yükü, yükleme hızı, sertliği

ölçülen malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve içyapısı sonucu etkilemektedir. Yapılan çalışmada farklı kalitede zırh seramiklerinin farklı batıcı uçlarıyla (Vickers ve Knoop) 0,98-98 N yük aralığında sertlik ölçümleri üzerine çalışılmıştır. En iyi yöntemin 19,6 N batma yükü ile Knoop olduğu sonucuna varılmıştır.

Atapek [50], yaptığı çalışmada zırh çeliklerinde orta karbon ve alaşım elementi ile birlikte bor katkılı özel üretim yeni bir tür alaşımlandırma tasarımı üzerine çalışmıştır. Farklı kompozisyon ve ısıl işlemler uygulanarak değişen içyapının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda istenilen mekanik özelliklerin sadece ısıl işlem ile sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmaya ilave olarak Atapek [51], bor katkılı zırh çeliğinin geliştirilmesi ve balistik başarımının değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Farklı alaşım tasarımı ve uygulanan farklı ısıl işlemler ile malzemenin mekanik özellikleri dışında V_{50} balistik sınır hızı ve yüksek çarpma hızlarındaki başarımı incelenmiştir.

3. DENEYSEL YÖNTEM

3.1. Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada 110 mm çapında yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı 34CrNiMo6 çeliği kullanılmıştır. 34CrNiMo6 çeliği orta karbonlu bir çeliktir. Kullanılan çeliğin kimyasal bileşim incelemesi KOSGEB Adana Laboratuvarında yapılmıştır ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. 34CrNiMo6 çeliğinin kimyasal bileşimi (%) [52]

C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Cu	W
0,345	1,59	1,32	0,648	0,242	0,173	0,0952	0,0646
Co	Sb	Al	Ti	P	V	S	Nb
0,0283	0,0250	0,0229	0,00193	0,0154	0,0114	0,00820	0,00434

YDDA çeliğe üç farklı ısıl işlem uygulanmıştır ve her ısıl işlem için yalın çelik ve kompozit (seramik/çelik) numuneler hazırlanmıştır. Yuvarlak çelik profil, OKÜ Makine Mühendisliği atölyesinde şerit testere (Şekil 3.1) ile kesilmiştir.



Şekil 3.1. Numunelerin kesildiği KESMAK KMY 280 model şerit testere

Kesilen numunelerin iki yüzeyi de SPINNER MVC 1000 model üç eksenli CNC Freze tezgahında (Şekil 3.2) işlenmiştir. Yalın çelik numune kalınlıkları 9, 12, 15, 18, 21 mm ve katmanlı kompozit numunelerdeki arka katman çelik kalınlıkları 5,5, 8,5, 11,5, 14,5 ve 17,5 mm’dir. Bu çalışmada uygulanan her ısıl işlem için, yalın çeliklerde her kalınlıktan 5’er numune hazırlanırken kompozit numunelerde her

kalınlıktan 3'er numune hazırlanmıştır. Hazırlanan çelik numuneler Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Hazırlanan çelik numunelerin kalınlık toleransı $\pm 0,2$ mm'dir.



Şekil 3.2. CNC Freze tezgahı [52]



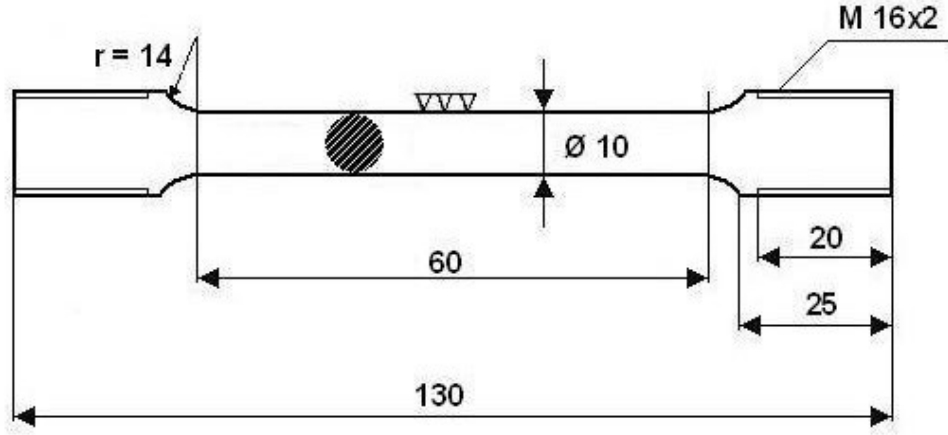
Şekil 3.3. YDDA çelik numuneler

Gerçekleştirilen ilk balistik testin ardından alınan sonuçlardan sonra 200 °C'de menevişleme uygulanan hem yalın çelik hem de katmanlı kompozit numuneler için daha düşük kalınlıklarda çelik numuneler hazırlanmıştır. Bunlar için hazırlanan yalın çelik numune kalınlıkları 6, 7, 8 mm ve arka katman çelik kalınlıkları ise 2,5, 3,5 ve 4,5 mm'dir.

Mekanik testler için hazırlanan çekme ve darbe numuneleri (Şekil 3.4) sırasıyla "TS EN ISO 6892-1" [53] ve "TS EN ISO 148-1" [54] standartlarına uygun olarak hazırlanmış olup çelik numunelerle beraber aynı ısıl işlemler uygulanmıştır. Hazırlanan çekme numunelerinin boyutları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Çekme ve darbe numuneleri



Şekil 3.5. Daire kesitli metal malzemeler için çekme numunesi ölçüleri

Darbe numuneleri şerit testere (Şekil 3.1) ile uygun ölçülerde kesildikten sonra Şekil 3.6'daki Atinon BV20 marka torna tezgahı ile V çentikleri açılmıştır.



Şekil 3.6. V çentiklerin açıldığı Atinon BV20 marka torna tezgahı

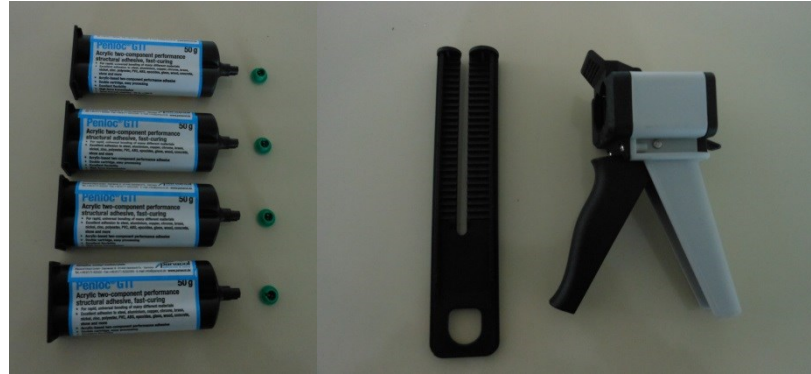
Yalın çelikler ile aynı alan yoğunluğuna sahip olacak şekilde katmanlı kompozit numuneler hazırlanmıştır. Kompozit numunelerde ön katman olarak 50x50 mm ebatlarında ve 8,5 mm kalınlığında SiC seramik plakalar kullanılmıştır. SiC plakaların ağırlığı ~ 66 gr ve yoğunluğu 3,2 gr/cm³'dür. Kullanılan seramik plakalar Nurol Teknoloji A.Ş. firmasından temin edilmiş olup 220-280 bar basınç aralığında

soğuk sıkıştırma sonrası 2150 °C’de vakumlu ortamda sinterleme yöntemi ile üretilmiştir ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. SiC seramik plakalar (50x50x8,5 mm)

Katmanlı kompozit numunelerde yapıştırıcı ara katman olarak akrilik bazlı ticari yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcının kurlenmemiş haldeki yoğunluğu 1,2 g/cm³’tür. Yapıştırıcının mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir. Yapıştırma işlemi sırasında dozaj tabancası kullanılarak aynı miktarda yapıştırıcı sürülmesine dikkat edilmiştir. Akrilik bazlı yapıştırıcı Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

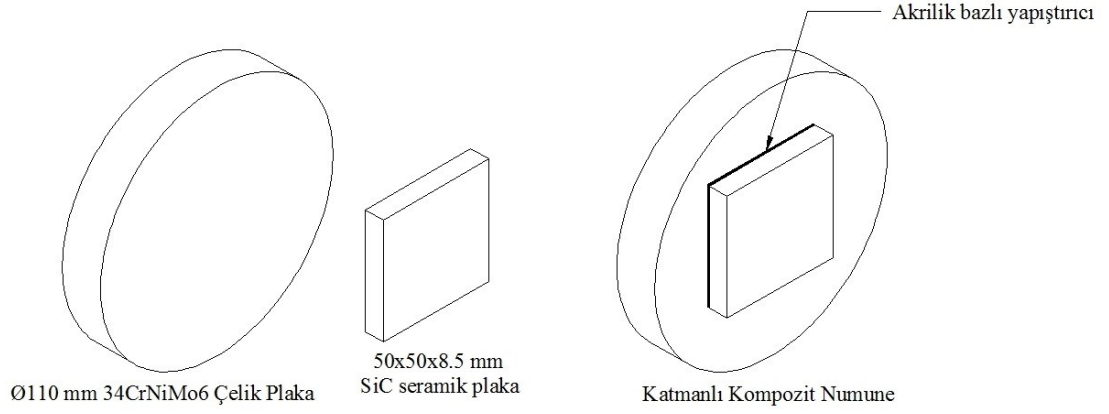


Şekil 3.8. Akrilik bazlı yapıştırıcı ve dozaj tabancası

Bu çalışmada kullanılan katmanlı kompozit numuneler seramik (SiC) ön katmanı, çelik (34CrNiMo6) arka katmanı ve akrilik bazlı yapıştırıcı ara katmanından oluşmaktadır. Katmanlı kompozit numunelerin çizgesel gösterimi Şekil 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.2. Akrilik bazlı yapıştırıcının mekanik özellikleri (kürlenmiş)

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



Şekil 3.9. Katmanlı kompozit numunelerin çizgesel gösterimi

Hazırlanan katmanlı kompozit numuneler Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. İkinci balistik test için hazırlanan katmanlı kompozit numuneler



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.11. İlk balistik test için hazırlanan katmanlı kompozit numuneler
(a) Normalleştirme, (b) 200 °C’de menevişleme ve (c) 400 °C’de menevişleme

Bu çalışmada kullanılan yalın çelik ve katmanlı kompozit numunelerin tamamı numune kodları ve alan yoğunluklarıyla beraber Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te verilmiştir. Alan yoğunlukları (kg/m^2), malzemenin yoğunluğu (kg/m^3) ile numune kalınlığının (m) çarpımıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 3.3. Yalın çelik numuneler

Numune Kodu	Kalınlık (mm)	Alan Yoğunluğu (kg/m^2)
NOS1	9	70,6
NOS2	12	94,1
NOS3	15	117,6
NOS4	18	141,1
NOS5	21	164,6
2TS1	6	47
2TS2	7	54,9
2TS3	8	62,7
2TS4	8,5	66,6
2TS5	9	70,6
2TS6	12	94,1
2TS7	15	117,6
2TS8	18	141,1
2TS9	21	164,6
4TS1	9	70,6
4TS2	12	94,1
4TS3	15	117,6
4TS4	18	141,1
4TS5	21	164,6

Yalın çelikler ve kompozit numuneler için kullanılan alan yoğunlukları hesaplamaları denklem (3.1) ve denklem (3.2)'de verilmiştir.

$$A_{Y_{\text{çelik}}} = \rho_{(1)} h_{(1)} \quad (3.1)$$

$$A_{Y_{\text{kompozit}}} = \rho_{(1)} h_{(1)} + \rho_{(2)} h_{(2)} \quad (3.2)$$

A_Y = Alan yoğunluğu (kg/m^2)

ρ = Yoğunluk (kg/m^3)

h = Zırh malzemesinin kalınlığı (m)

Denklem (3.1) ve denklem (3.2)'de alt indiste geçen 1 değeri çeliği, 2 değeri ise seramiği ifade etmektedir. Balistik deney sonrasında numunelerde karşılaştırma yapabilmek için çeliklerin alan yoğunlukları ile katmanlı kompozit numunelerin toplam alan yoğunlukları aynı olacak şekilde katman kalınlıkları kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Katmanlı kompozit numuneler

Numune Kodu	SiC Ön Katmanı (mm)	34CrNiMo6 Arka Katmanı (mm)	Alan Yoğunluğu (kg/m ²)
NOC1	8,5	5,5	70,3
NOC2	8,5	8,5	93,8
NOC3	8,5	11,5	117,4
NOC4	8,5	14,5	140,9
NOC5	8,5	17,5	164,4
2TC1	8,5	2,5	46,8
2TC2	8,5	3,5	54,6
2TC3	8,5	4,5	62,5
2TC4	8,5	5,5	70,3
2TC5	8,5	8,5	93,8
2TC6	8,5	11,5	117,4
2TC7	8,5	14,5	140,9
2TC8	8,5	17,5	164,4
4TC1	8,5	5,5	70,3
4TC2	8,5	8,5	93,8
4TC3	8,5	11,5	117,4
4TC4	8,5	14,5	140,9
4TC5	8,5	17,5	164,4

NOS1

- Numune numarası (her kalınlıktan yalın çeliklerde 5'er adet, katmanlı kompozitlerde 3'er adet mevcut)
- Numune kümesi
S – yalın çelikler, C – katmanlı kompozitler
- Isıl işlem durumu
NO – Normalleştirme işlemi
2T – 200 °C'de menevişleme işlemi
4T – 400 °C'de menevişleme işlemi

Isıl işlem sonrasında numunelerin birbirleriyle karışmaması ve yapılan testler sonunda incelemelerde kolaylık sağlaması için kodlama kullanılmıştır ve bütün numunelerin üzerine kodlamaları yazılmıştır. Kullanılan ilk kodlamadan farklı olarak

(eski kodlamada numune numarası ve numune kümesi yerine yalnızca numune kalınlığını belirten kodlama kullanılmıştır) deneysel yöntem ve sonuçlar kısmında yeni kodlama kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kodlama şekli aşağıda gösterilmiştir.

3.2. Numunelerin Isıl İşlemi ve İyapı Çalışması

Uygulanan ısıl işlemlerden biri normalleştirme işlemidir. Astaş Isıl İşlem firmasında endotermik gaz (endogaz) ortam denetimli fırınlarda (Şekil 3.12) 860 °C'de 1 saat süreyle östenitleştirme işlemi uygulandıktan sonra havada soğutma yapılarak normalleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12. Endotermik gaz (endogaz) ortam denetimli fırın [52]

Endogaz ortam denetimli fırınlarda endogaz üretici (Şekil 3.13) yardımıyla fırın içerisindeki ortamın karbon oranı ayarlanarak denetimli bir şekilde ısıl işlem gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.13. Endogaz üretici



Şekil 3.14. Normalleştirme uygulanan numuneler

Normalleştirme uygulanan numuneler Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Uygulanan diğer ısıl işlemler 200 °C ve 400 °C'de menevişleme işlemleridir. Menevişleme işlemleri için ilk önce endogaz ortam denetimli fırınlarda 860 °C'de 1 saat süreyle östenitleştirme ve sonrasında yağda soğutma gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem yağı olarak Lubraquench 2210 HBI kullanılmıştır. Bu şekilde elde edilen tam martenzit yapıdaki numunelere 200 °C veya 400 °C'de 1 saat süreyle menevişleme uygulanmıştır. Menevişleme işlemi sonucu elde edilen numuneler Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



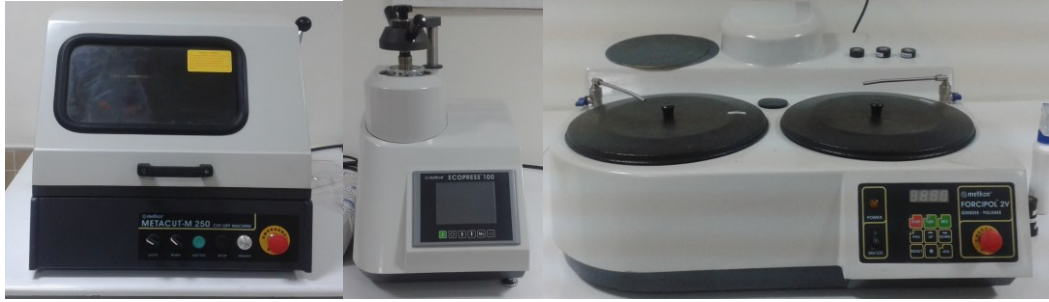
Şekil 3.15. 200 °C (sol) ve 400 °C (sağ) menevişleme uygulanan numuneler

İkinci balistik test için hazırlanan yalın ve arka katman çeliklerine, 200 °C'de menevişlenen diğer çelikler ile aynı ısıl işlemler gerçekleştirilmiştir. İkinci balistik test için hazırlanan çelik numuneler (kompozit numunelerin arka katmanlarıyla birlikte) Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

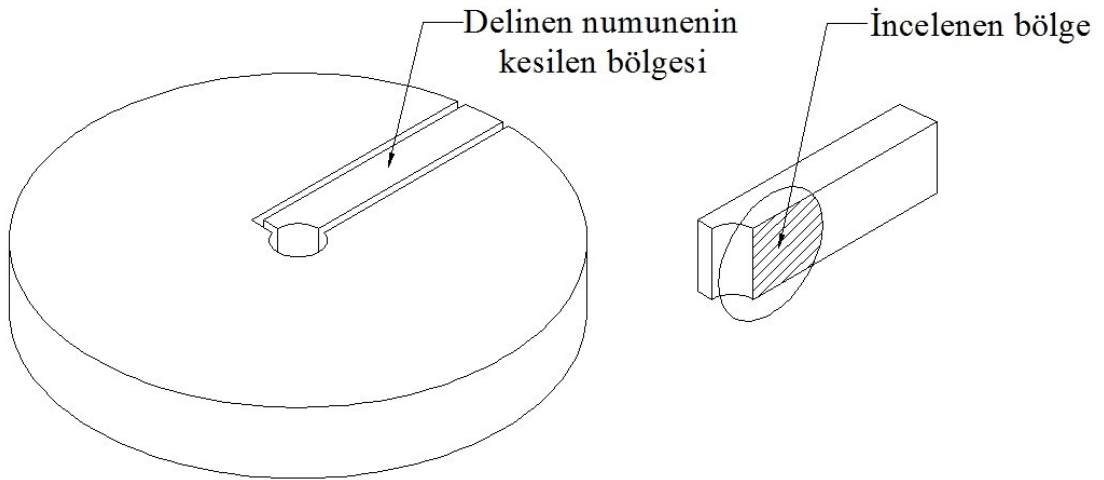


Şekil 3.16. Gerçekleştirilen ilk balistik test sonrası hazırlanan çelik numuneler

Çelik numunelere uygulanan ısıl işlemlerin çeliğin içyapısı üzerindeki etkisi metalografi testiyle incelenmiştir. Metalografi testinde %3 nital dağlayıcı kullanılmıştır. Normalleştirme işlemi için 55 s, 200 °C ve 400 °C menevişleme işlemleri için sırasıyla 90 s ve 75 s sürelerde dağlama gerçekleştirilmiştir. Metalografi testinde kullanılan kesme, bakalite alma ve zımpara/parlatma cihazları Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Metkon METACUT-M 250 marka kesme cihazı (sol), Metkon ECOPRESS 100 marka bakalite alma cihazı (orta), Metkon FORCIPOL 2V marka zımpara ve parlatma cihazı (sağ)



Şekil 3.18. AKB incelenen numunelerin çizgesel gösterimi

Balistik testlerin ardından delinen numunelerin içyapısında oluşan adyabatik kayma bantları her ısıl işlem kümesi için ayrı ayrı incelenmiştir. AKB incelemesi için delik bölgesine yakın yerlerden numune alınmıştır. Alınan numunelerin mermi yönüne dik olan yüzeyinde içyapı incelemesi yapılmıştır. İncelenen bölgenin çizgesel gösterimi Şekil 3.18’de gösterilmiştir. Delik çevresinde içyapıda oluşan AKB incelenirken aynı şekilde %3 nital dağlayıcı ve her ısıl işlem kümesi için aynı dağlama süreleri uygulanmıştır. Gerçekleştirilen bütün metalografi testleri Şekil 3.19’deki OLYMPUS BX51 marka ışık mikroskobunda yapılmıştır.



Şekil 3.19. OLYMPUS BX51 marka ışık mikroskobu

3.3. Numunelerin Mekanik Testleri

Gerçekleştirilen ısıl işlemlerin çeliğin mekanik özelliklerine etkisini incelemek için çekme, darbe ve sertlik testleri uygulanmıştır. Çekme ve darbe testleri KOSGEB Adana Laboratuvarında yapılırken sertlik testi OKÜ Malzeme Laboratuvarında yapılmıştır. Çekme ve darbe testlerinde her ısıl işlem kümesinden 3’er numune hazırlanıp denenirken, sertlik testinde bütün çelik numunelerden ölçüm alınmıştır.

Çekme deneyi “TS EN ISO 6892-1” [53] standardına uygun olarak Şekil 3.20’deki 600 kN DARTEC-MTS marka çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Charpy darbe deneyi “TS EN ISO 148-1” [54] standardına uygun olarak oda sıcaklığında Şekil 3.21’deki TIME JBW-300A marka darbe cihazında gerçekleştirilmiştir. Sertlik testi Rockwell C sertlik ölçme yöntemi ile Şekil 3.22’deki BMS DIGIROCK-RBOV marka sertlik cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.20. 600 kN DARTEC-MTS marka çekme cihazı [52]



Şekil 3.21. TIME JBW-300A marka darbe cihazı



Şekil 3.22. BMS DIGIROCK-RBOV marka sertlik cihazı

SiC seramik plakalara Vickers sertlik testi uygulanmıştır. 3 adet numuneye KOSGEB Adana Laboratuvarında “TS EN ISO 6507-1” [55] standardına uygun olarak Şekil 3.23’teki BMS-MICROBUL marka sertlik cihazında Vickers sertlik testi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.23. BMS-MICROBUL marka sertlik cihazı

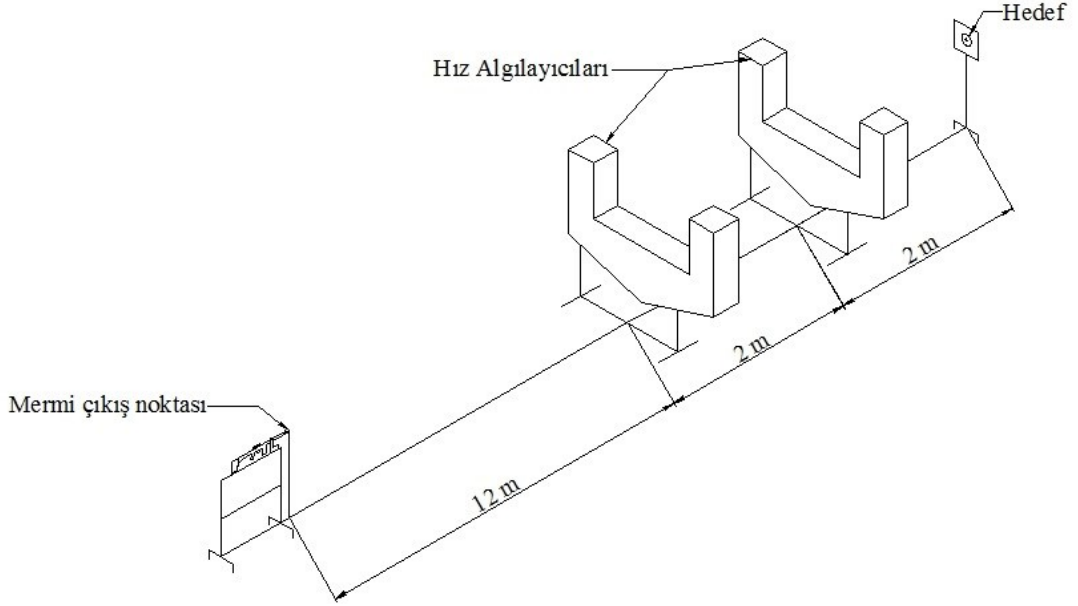
3.4. Numunelerin Balistik Testleri

Bu çalışmada iki defa balistik test yapılmıştır. Birinci balistik testin ardından 200 °C’de menevişlenmiş yalın çeliklerde hiç delinme gerçekleşmediği için daha düşük kalınlıklarda ikinci balistik teste ihtiyaç duyulmuştur. Yapılan bütün balistik testler MKE Silahsan A.Ş. atış poligonunda gerçekleştirilmiştir. Balistik testin yapıldığı poligon Şekil 3.24’te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. MKE Silahsan A.Ş. atış poligonu [52]

Balistik testler 7,62 mm zırh delici mermiler ile gerçekleştirilmiştir. Mermi çıkışı ile hedef arasındaki mesafe 16 m olarak ayarlanmıştır ve hedefler mermi girişi dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Balistik test düzeneğinin çizgesel gösterimi Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25. Balistik test düzeneğinin çizgesel gösterimi

Hedefin 2 m ile 4 m gerisinde bulunan hız algılayıcılar ile mermilerin hızları ölçülüp ortalama değer alınmıştır. Balistik testlerde kullanılan 7,62 mm ZD mermiler Şekil 3.26'da gösterilmiştir ve özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

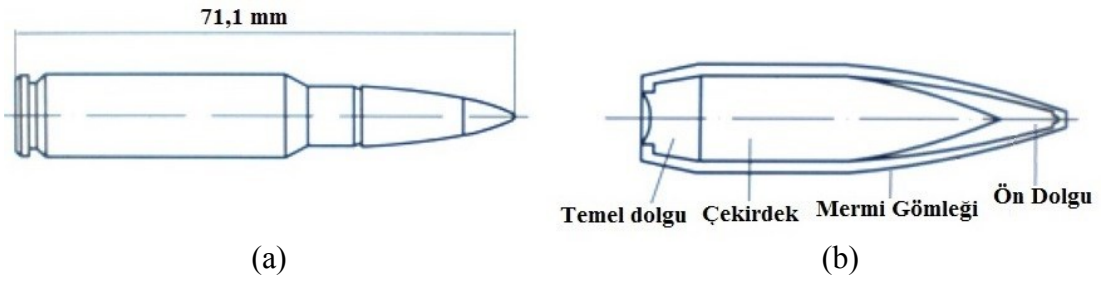


Şekil 3.26. 7,62 mm ZD mermiler [52]

Çizelge 3.5. 7,62 mm ZD merminin özellikleri [56]

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, $\alpha_m=17^\circ$)

7,62 mm ZD merminin çizgesel gösterimi Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. (a) 7,62 mm ZD mermi fişeginin çizgesel görünüm, (b) Merminin kesit görüntüsü [4]

4. DENEY SONUÇLARI ve İRDELEME

4.1. Mekanik Özellikler

Isıl işlemleri gerçekleştirilen çelik numunelerin balistik test öncesi sertlik değerleri Rockwell C sertlik değeri (RSD-C) cinsinden ölçülmüştür. Bütün kalınlıklar için yalnız çelik numunelerin her birinden 5 farklı ölçüm alınmıştır. Her kalınlıktan 5 adet numune bulunduğundan toplamda her kalınlık için ayrı ayrı 25 sertlik değeri ölçülmüş ve ölçülen bu değerlerin ortalamaları alınmıştır. Ortalaması alınan bütün sertlik değerlerinin standart sapması denklem (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.1)$$

σ : Standart sapma

N : Ölçülen sertlik değeri sayısı

x_i : Ölçülen her bir sertlik değeri

\bar{x} : Ortalama sertlik değeri

Yalnız çeliklerin ölçülen ortalama sertlik değerleri ve standart sapmaları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Yalnız çeliklerin ölçülen sertlik değerleri

Numune Kodu	Sertlik (RSD-C)	Standart Sapma	Numune Kodu	Sertlik (RSD-C)	Standart Sapma
NOS1	38,4	1,75	2TS6 [52]	51,3	0,77
NOS2	37,6	1,64	2TS7 [52]	51,3	1,04
NOS3	37,6	1,36	2TS8 [52]	51,1	0,77
NOS4	38,2	1,25	2TS9 [52]	51,5	0,67
NOS5	37,8	0,84	4TS1 [52]	45,6	0,69
2TS1	51,2	0,78	4TS2 [52]	45,7	0,54
2TS2	51,7	0,51	4TS3 [52]	45,1	0,62
2TS3	51,6	0,91	4TS4 [52]	45,7	0,71
2TS4	51,6	0,57	4TS5 [52]	45,7	0,65
2TS5 [52]	52,1	0,65			

Uygulanan her ısıt işlem kümesi için ortalama sertlik değerleri ve standart sapmaları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Uygulanan her ısıt işlem kümesi için ortalama sertlik değerleri

Uygulanan Isıl İşlem	Ortalama Sertlik Değeri (RSD-C)	Standart Sapma
Normalleştirme	37,9	0,33
200 °C’de Menevişleme	51,5	0,29
400 °C’de Menevişleme	45,6	0,24

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi tam martenzit yapıdaki menevişlenmiş çelik numunelerin sertlik değerleri normalleştirme uygulanan numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek sertlik değerleri 200 °C’de menevişlenen numunelerde görülürken, menevişleme sıcaklığının artmasıyla sertlik değerinin azaldığı görülmektedir.

Malzemenin en önemli mekanik özelliklerinden biri olan çekme dayanımı çekme testi uygulanarak ölçülmektedir. “TS EN ISO 6892-1” [53] standardına uygun olarak gerçekleştirilen çekme testi ile malzemenin ısıt işlem sonucu değişen akma dayanımı, çekme dayanımı ve uzama gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çekme testi sonucu kırılan çekme numuneleri Şekil 4.1’de görülürken, ölçülen mekanik özellikler Çizelge 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.1. Çekme testi sonucunda kırılan çekme numuneleri (Normalleştirme – sol, 200 °C’de menevişleme – orta, 400 °C’de menevişleme – sağ)

Çizelge 4.3. Isıl işlem sonucu numunelerin değişen mekanik özellikleri

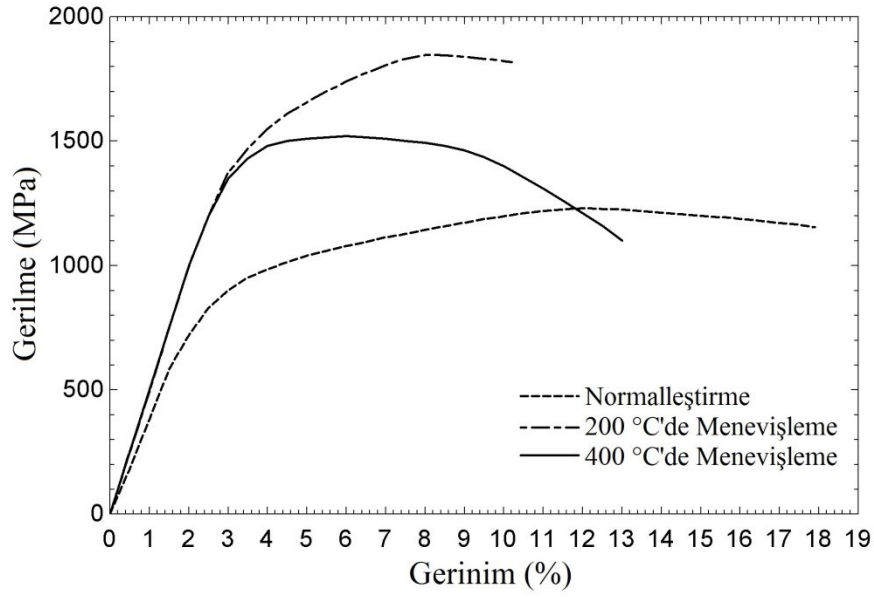
Uygulanan Isıl İşlem	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Normalleştirme	771	1230	14
200 °C’de Menevişleme [52]	1436	1847	8
400 °C’de Menevişleme [52]	1354	1520	12

Yapılan çekme testi sonucunda sertlik değeri yüksek olan numunelerin aynı zamanda yüksek dayanım değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Çizelge 4.3’te görüldüğü gibi menevişlenen numunelerin akma ve çekme dayanımları normalleştirme uygulanan numunelere göre daha yüksek iken, normalleştirme uygulanan numunelerin ise uzama miktarı yani sünekliği menevişlenen numunelerden daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.1’deki çekme testi numunelerinin son boylarına bakıldığı zaman normalleştirme uygulanan (soldaki 3 numune) numunelerin diğer numunelere göre daha fazla uzadığı açıkça görülmektedir. Çekme numunelerinin kırılan yüzeyleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Çekme numunelerinin kırılan yüzeyleri (Normalleştirme – sol, 200 °C’de menevişleme – orta, 400 °C’de menevişleme – sağ)

Şekil 4.2’de gösterilen çekme numunelerinin kırılan yüzeylerini incelediğimizde normalleştirme uygulanan numunelerin (soldaki) menevişleme uygulanan numunelere göre daha düzgün ve sünek kırıldığı açıkça görülmektedir. Uygulanan ısıl işlemlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini daha iyi tanımlamak için çekme testi ile elde edilen gerilme-gerinim eğrileri Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Çekme testi sonucunda elde edilen gerilme-gerinim eğrileri

Çekme testinde elde edilen gerilme-gerinim eğrisinin altında kalan alan tokluğu verir. Şekil 4.3'te verilen eğrilere baktığımızda normalleştirme uygulanan numunelerin tokluğunun diğerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Menevişleme işlemiyle malzemenin dayanım ve sertliği azaltılarak tokluğunun artması sağlanır. Gerilme-gerinim eğrilerine baktığımızda menevişleme sıcaklığının artmasıyla dayanımın düşerek tokluğunun arttığı görülmektedir. Yapılan diğer çalışmalara baktığımızda [1-5,7], kullandıkları çeliklerde menevişleme sıcaklığı arttıkça sertlik ve dayanım düşerken süneklik artmaktadır.

Dayanım kadar önemli bir diğer mekanik özellik ise darbe tokluğudur. Balistik test esnasında numuneler merminin kinetik enerjisi ile doğrudan darbeye maruz kalırlar. Yüksek sertliğe sahip malzemelerin genel olarak gevrek davranış göstermesi beklenir. Eğer numunenin tokluğu düşük ise yani gevrek davranış gösterirse, darbenin etkisiyle numune üzerinde çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi ile numunenin delinmesi yani balistik olarak başarısız olması söz konusudur. Numunelerin darbe tokluklarını belirlemek için Charpy çentik-darbe testi uygulanmıştır. Darbe testi "TS EN ISO 148-1" [54] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş olup, test sonrası darbe numuneleri Şekil 4.4'te ve alınan darbe tokluğu (J/cm^2) ile soğurulan enerji miktarları Joule cinsinden Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Charpy çentik-darbe testi sonrası darbe numuneleri ve kırılan yüzeyleri (Normalleştirme – sol, 200 °C’de menevişleme – orta, 400 °C’de menevişleme – sağ)

Çizelge 4.4. Isıl işlem sonucu numunelerin değişen darbe testi verileri

Uygulanan Isıl İşlem	Darbe Tokluğu (J/cm ²)	Soğurulan Enerji (J)
Normalleştirme	11,63	9,27
200 °C’de Menevişleme	18,9	15,1
400 °C’de Menevişleme	11,67	9,33

Çizelge 4.4’te verilen değerlere baktığımızda 200 °C’de menevişlenen numunelerin darbe tokluğunun diğerlerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Normalleştirme ve 400 °C’de menevişleme uygulanan numunelerin darbe tokluğunun ise birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.

SiC seramik plakaların sertlik değerini ölçmek için “TS EN ISO 6507-1” [55] standardına uygun olarak gerçekleştirilen Vickers sertlik testi sonucunda alınan değerlerin ortalaması alınarak seramik plakaların sertlik değerinin ~ 2483 Vickers sertlik değeri (VSD) olduğu belirlenmiştir.

4.2. İçyapı İncelemesi

4.2.1. Balistik Test Öncesi İncelemeler

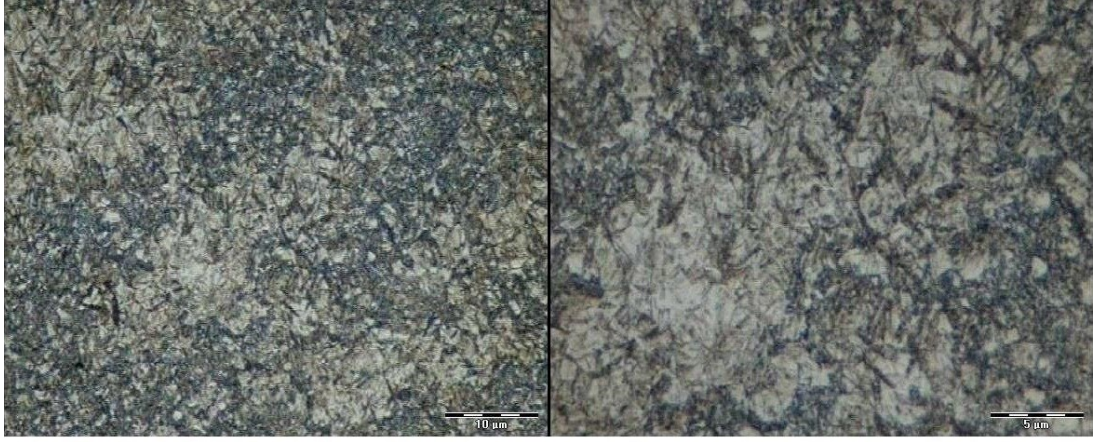
Bu bölümde çeliklere uygulanan 3 farklı ısıl işlemin sonunda içyapıda oluşan değişiklikler incelenmiştir. Yapılan çalışmada %3 nital dağlayıcı (%3 nitrik asit, %97 etanol) kullanılarak her numune kümesine farklı sürelerde dağlama işlemi gerçekleştirilmiş ve ışık mikroskobunda x500 ile x1000 büyütmelerde içyapıları incelenmiştir. İçyapılar Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi içyapılarda tane boyutu çok küçüktür. Tane boyutunun küçük olması sonucu tane sınırları artacağından ve tane sınırları da plastik şekil değişimi sırasında dislokasyon hareketlerini engellediğinden bu dayanımı arttıran bir özelliktir. Menevişlenmiş numunelerde iğnemsiz martenzit yapılar görülmektedir. Martenzit yapıdan kaynaklı dayanımları normalleştirmeden çok daha fazladır. 400 °C'de menevişlenmiş numunede martenzit yoğunluğunun 200 °C'de menevişlenmiş numuneye göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durum yarı kararlı martenzitte hacim merkezli tetragonal yapıda sıkışmış durumda bulunan karbon atomlarının yayınıp karbür ökelteleri oluşturduğunun bir göstergesidir. Bu da malzemenin dayanım ve sertliğinin düşmesine, tokluğunun ise artmasına neden olmaktadır.

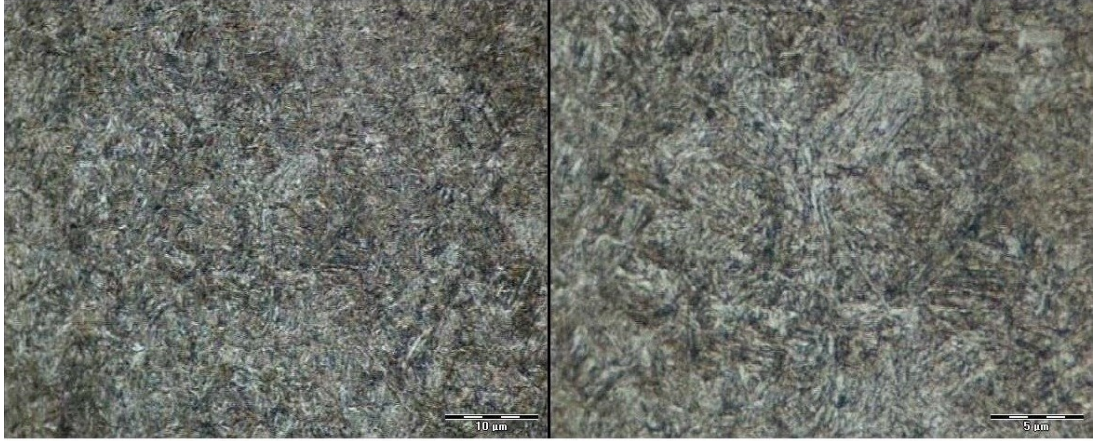
4.2.2. Balistik Test Sonrası İncelemeler

Adyabatik kayma, yüksek gerinim hızlarında metalde oluşan özel bir şekil değişimi biçimidir. Şekil değişiminin adyabatik olması için düşük ısı iletkenliği ve düşük şekil değişimi süresi (yüksek hız) gereklidir. Adyabatik kayma, darbe yükünün bir özelliğidir denilebilir. Plastik akışta yapılan işin %95'i ısıya dönüşür. Yüksek gerinim hızlarında ısının malzemeyi terk etmesi için yeterli zaman bulunmadığından şekil değişimi süreci sabit sıcaklıktan adyabatik hale dönüşür. Yüksek gerinim hızlarında ısı akışının olmadığı düşünülürse malzemenin sıcaklığının artması ve malzemede oluşan ısıl yumuşama sonucu gerinim sertleşmesi hızında belirgin bir azalma beklenir. Dinamik yükler altında malzemede gerçekleşen yüksek kayma şekil

değişimi ve ısı yumuşama sonucunda adyabatik kayma bantları oluşumu gözlemlenir [57].



(a)



(b)



(c)

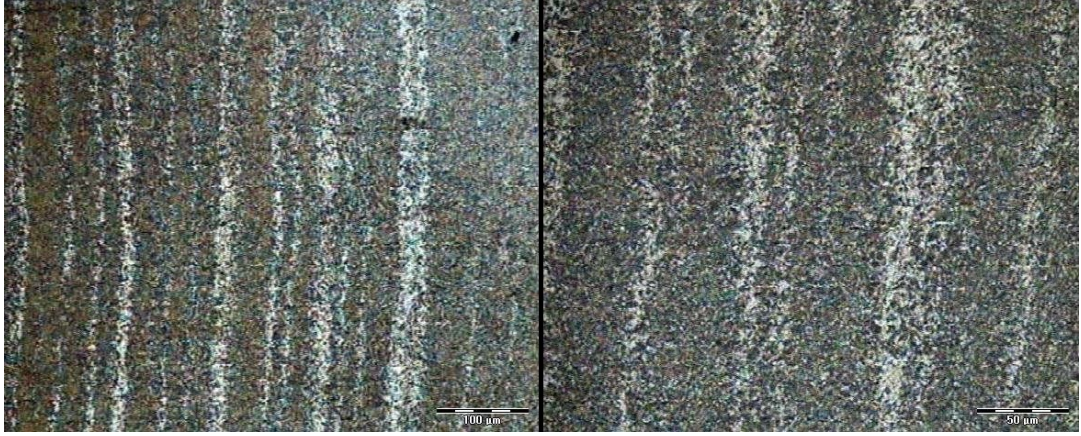
Şekil 4.5. Atış öncesi numunelerin x500 ve x1000 büyütmelerde içyapıları (a) Normalleştirme, (b) 200 °C’de menevişleme ve (c) 400 °C’de menevişleme

AKB bölgesindeki kayma, oluşan şekil değişiminin genel geometrisi ile belirlendiğinden bu bantlarda çok yüksek kayma gerinimi görülür. Gerinim sertleşmesi hızı yeterince düşük olduğu sürece her türlü metal malzemede kayma bandı oluşumu görülür. Su verme (hızlı soğutma) ve menevişleme işlemleri uygulanmış martenzit yapıdaki çeliklerde de kayma bandı oluşumu görülür [20].

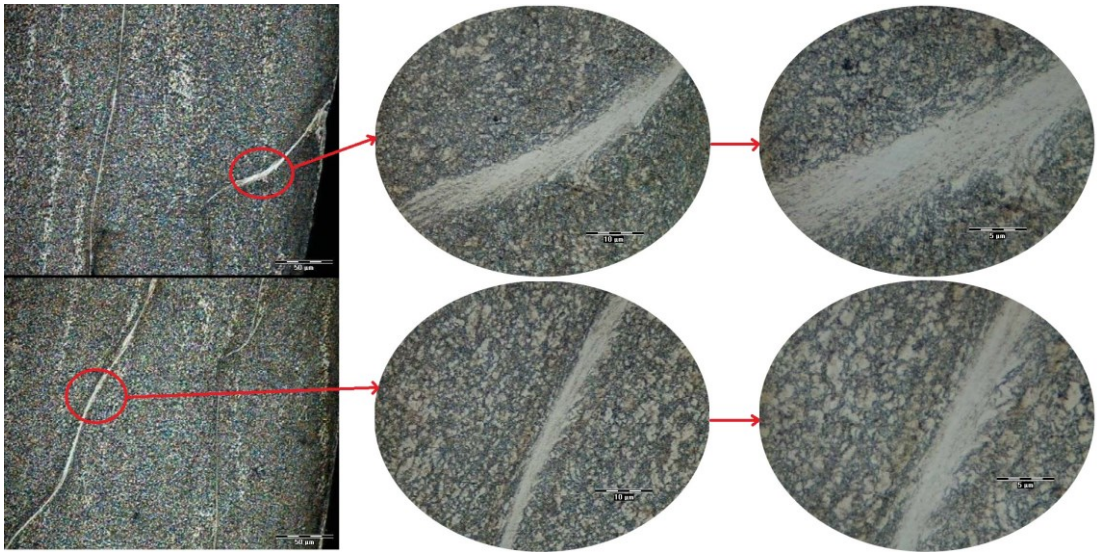
Yapılan çalışmalar incelendiğinde AKB oluşumu için gerekli koşullar üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazılarında kayma bandı oluşumu için gereken en yüksek yük üzerine öneriler sunulmuştur. Bir diğer çalışmada ise bu öneriler geliştirilerek çifte kararsızlık/bölgeselleşme ölçütleri ortaya konulmuştur. Bu değerlendirmede en yüksek yük kararsızlığa karşılık gelmektedir ve bölgeselleşme kararsızlığı takip eden ayrı bir durumdur. Bu ikisi arasındaki gerinimin oldukça önemli olduğu savunulmuştur. Başka bir çalışmada çeliğin menevişleme sıcaklığının AKB yatkınlığına etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada AKB oluşumu için çeliğin ısıtma işlem koşullarına bağlı olan bir kritik gerinim ortaya konulmuştur. Yapılan diğer çalışmalarda ısıtma yumuşama ve ısı iletkenliği hesaba katılarak AKB oluşumu için gerekli kritik gerinim hızı araştırılmıştır. Dönüşümün gerçekleşebilmesi için malzemenin yeterli sıcaklığa ulaşabileceği gerinim hızı üzerine çalışılmıştır. Başka bir çalışmada ise bant oluşumu için gerekli koşulların dayanım ile gerinim hızını içermesi gerektiği savunulmuştur ve deneysel yöntemlerle doğrulanmıştır. 4340 çeliği üzerine yapılan bir çalışmada ise ortalama 0,5 gerinim ve $1,8 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ gerinim hızının dönüşmüş AKB oluşumu için yeterli olduğu görülmüştür. Son olarak kalan çalışmalara bakıldığında bant oluşumu için birlikte gerekli olan gerinim ve gerinim hızı araştırılmıştır. Bunun üzerine yapılan bir çalışmada AKB oluşumunun başlaması için malzemenin birlikte %23 gerinim ve $2,8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ gerinim hızı kritik değerlerine ulaşması gerektiği sonucuna varılmıştır [58].

AKB “bozulmuş” (deformed) ve “dönüşmüş” (transformed) olmak üzere iki kümeye ayrılır. Bozulmuş bantlarda içyapı ana yapıdan farklı olmaz ama taneler büyük oranda kayma ya da şekil değişimine uğrarlar. Dönüşmüş bantlarda ise kristalografik faz dönüşümü görülür ve ışık mikroskopunda beyaz dağlanmış bant olarak görülürler. Malzemeye ve gerçekleşen şekil değişimi koşullarına göre aynı malzemede hem bozulmuş hem de dönüşmüş bant görülebilir [59].

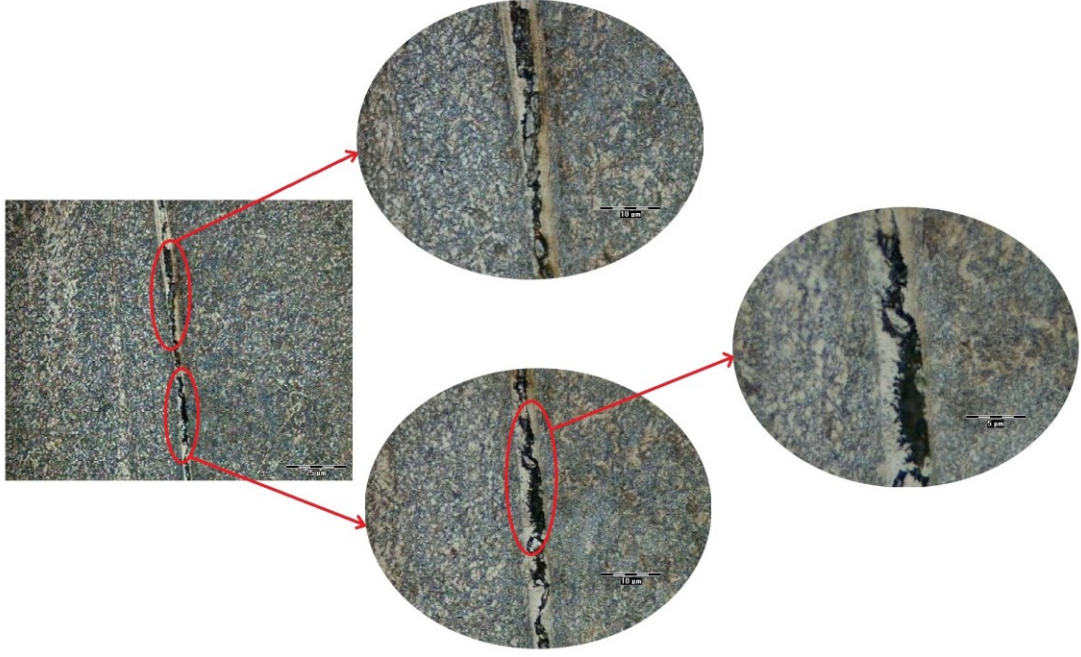
Bu bölümde gerçekleştirilen balistik test sonrasında içyapıda oluşan değişiklikler incelenmiştir ve yapılan çalışma sonunda atış sonrasında çeliklerin içyapısında bir değişiklik olmadığı fakat numunelerin delik bölgesinde AKB oluşumu gözlemlenmiştir. AKB Şekil 3.18'deki gibi delik bölgesi yakınından alınan numunelerin mermi yönüne dik olan yüzeyinde incelenmiştir. İncelenen numunelerde delik bölgesi yakınlığında dönüşmüş AKB oluşmaya başlamıştır. Tam dönüşmüş AKB ise sadece delik etrafında görülmüştür. Normalleştirme uygulanmış numunelerde dönüşmüş AKB oluşumları Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Normalleştirme uygulanmış numunede tam dönüşmüş AKB içinde mikro çatlak oluşumu gözlenmiştir ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Normalleştirme uygulanmış numunede delik bölgesi yakınlığında dönüşmüş AKB oluşumları

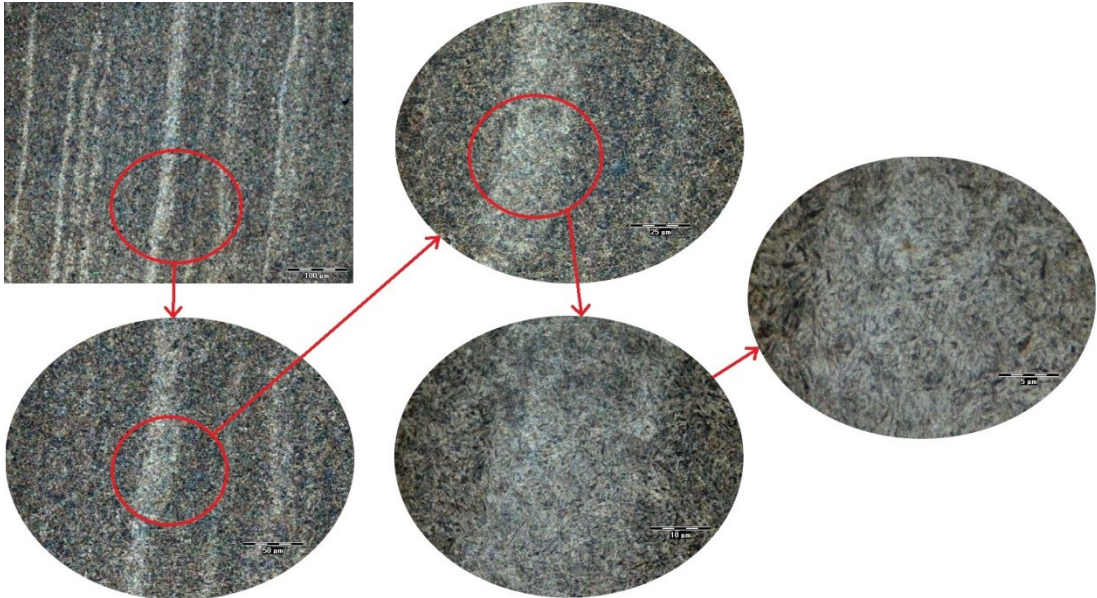


Şekil 4.7. Normalleştirme uygulanmış numunede delik etrafında tam dönüşmüş AKB oluşumu



Şekil 4.8. Normalleştirme uygulanmış numunede tam dönüşmüş AKB içinde oluşan mikro çatlak

200 °C’de menevişlenmiş numunede dönüşmüş AKB oluşumları Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir. 400 °C’de menevişlenmiş numunede dönüşmüş AKB oluşumları da Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. 200 °C’de menevişlenmiş numunede delik bölgesi yakınlarında dönüşmüş AKB oluşumu



Şekil 4.10. 200 °C’de menevişlenmiş numunede delik etrafında tam dönüşmüş AKB oluşumu



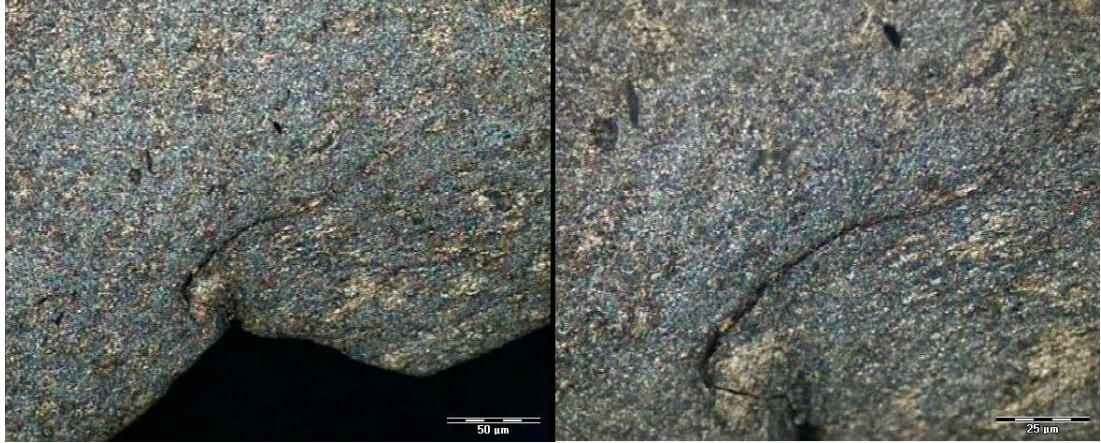
Şekil 4.11. 400 °C’de menevişlenmiş numunede delik etrafında ve yakınlarında dönüşmüş AKB oluşumları

Yapılan önceki çalışmalarda [59], çeliklerde dönüşmüş AKB içindeki mikro sertlik değeri anayapının sertlik değerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Dönüşmüş AKB merkezinde mikro sertlik değeri en yüksek iken kenarlara doğru bir miktar azaldığı ve malzemenin başlangıç sertlik değerinden bağımsız olduğu görülmüştür. Malzemedeki şekil değişimi; yüksek gerinim, yüksek sıcaklık ve hızlı soğuma ile gerçekleştiğinden çok yüksek sertlik değerleri elde edilmektedir.

Übeyli ve arkadaşları [6], yaptıkları çalışmada 4340 ve 100Cr6 çeliklerinde balistik deney sonrası (7,62 mm ZD mermi ile 779 m/s darbe hızında) oluşan AKB incelemişlerdir. Darbe sonrası malzemede oluşan AKB sertlik değerlerinin ana malzemeye göre biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada dönüşmüş AKB elektron mikroskobunda incelenerek beyaz bant üzerinde çok küçük taneler ve yaklaşık 1 μm çapında çökeltiiler görülmüştür. Enerji dağılım spektroskopisi ile çökeltiiler üzerinde yapılan incelemede karbür çökeltisi olduğu

düşünülmüştür. Bu çalışmada oluşan dönüşmüş AKB içinde de benzer çökeltilerin olduğu düşünülmektedir.

Yapılan balistik deney sonrasında normalleştirme uygulanmış numunede delik etrafında mikro çatlak görülmüştür ve Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Normalleştirme uygulanmış numunede delik etrafında görülen mikro çatlak

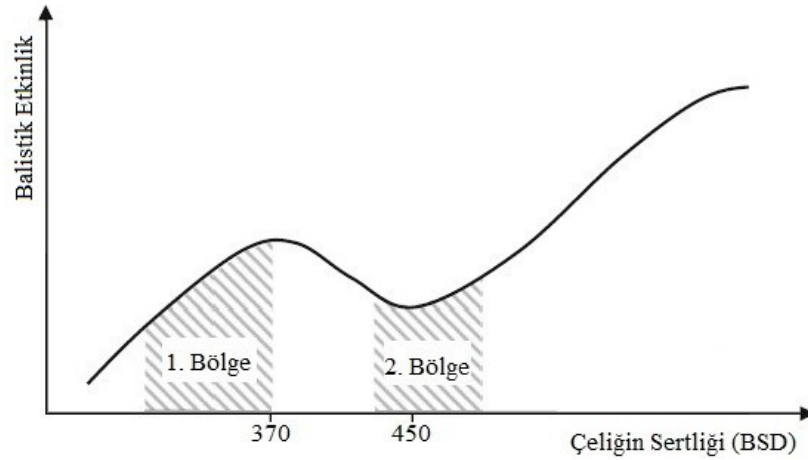
4.3. Balistik Test Sonuçları

Zırh malzemesinin ve merminin mekanik özellikleri, malzemenin balistik başarımını doğrudan etkilemektedir. Mermi ve hedef malzemelerin kimyasal bileşimi, sertliği, dayanımı, hedef malzemenin elastik modülü ve darbe tokluğu, merminin şekli ve boyutları, darbe hızı ve açısı balistik başarımı etkileyen unsurlardır. Seramik esaslı katmanlı kompozit malzemelerde de kullanılan seramik ön katmanın kimyasal bileşimi, saflığı ve sertliği balistik başarımı doğrudan etkilemektedir [20,57,60].

Yüksek darbe hızında mermi hedef malzemeye çarptığı anda malzemedeki ön yüzeyden arka yüzeye doğru basma gerilmesi dalgaları oluşur. Ardından basma dalgaları arka yüzeyden yansiyarak ön yüzeye doğru çekme gerilmesi dalgalarını oluşturur. Bu dalgaların etkileşimi malzemedeki çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesine neden olur. Hedef malzemenin oluşan bu dalgalara dayanabilmesi için dayanım ve tokluk değerlerinin yüksek olması gerekmektedir [20].

Balistik başarımı doğrudan etkileyen özelliklerin başında dayanım gelmektedir. Yüksek dayanıma sahip malzemenin balistik etkinliğinin daha fazla olması beklenir. Fakat malzemenin dayanımını arttırdıkça sünekliği azalır. Sünekliği çok düşük malzemelerde darbe bölgesi etrafında çatlak oluşumları gerçekleşir ve bu da malzemenin balistik etkinliğini düşürür [60].

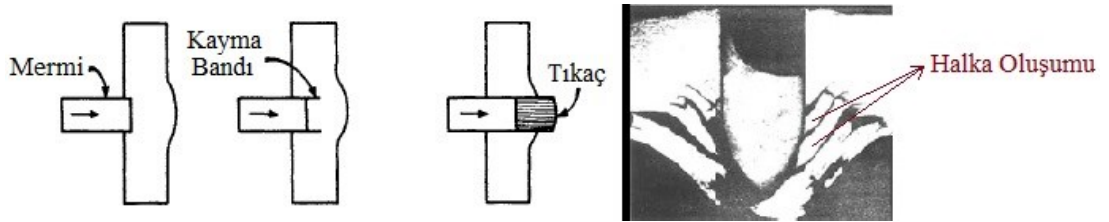
Sertliği düşük malzemelerde sünek delinme oluşumu görülür. Malzemenin sertliği arttıkça balistik etkinliğinin artması beklenir [60]. Hedef malzemenin sertliği artarken belirli aralıkta malzemede oluşan adyabatik kaymalardan ötürü malzemenin dayanımı önemli oranda düşmektedir ve tıkanmaya yol açarak balistik başarısızlığa neden olmaktadır. Malzemenin hasar mekanizmasında yaşanan bu geçiş (sünek delinme → tıkaç oluşumu) özellikle ince plakalarda çok önemlidir. Woodward [61], bu konuda çalışma yaparak malzemede yaşanan bu geçişi anlatan ve adyabatik kayma ile başarısız olan hedeflerin delinme direncini hesaplamada kullanılan bir model ortaya koymuştur. Şekil 4.13'te yaşanan bu geçiş görülmektedir.



Şekil 4.13. Sert çekirdekli mermiler karşısında çelik plakanın sertliğinin balistik etkinliğe etkisi [60]

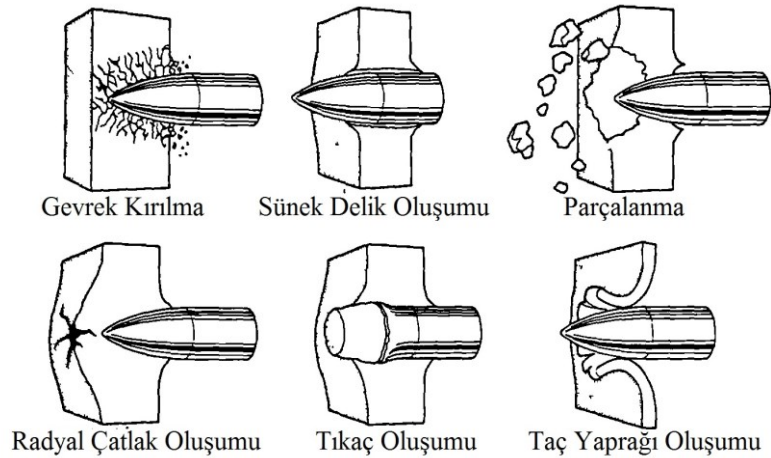
Çeliğin balistik etkinliği 370 Brinell sertlik değeri (Woodward [61], deneysel çalışmada alüminyum ve titanyum alışımlı hedefler kullanmıştır ve bu geçiş sertliğini 350 VSD yani ~ 333 Brinell sertlik değeri olarak belirlemiştir) değerine kadar sürekli artış gösterir ve bu sertliğin ilerisinde adyabatik kaymadan ötürü mermi yolunda kayma hasarları meydana geleceğinden hedefte tıkanma oluşumu ve malzemenin bükülüp esnemesinden kaynaklanan halka oluşumu (Şekil 4.14) gerçekleştiğinden

balistik etkinlik azalır. 450 Brinell sertlik değerinden (BSD) itibaren balistik etkinlikte tekrardan artış gözlemlenir. Çok yüksek sertliğe sahip çelikler kırılğan olur ve bundan dolayı darbe aldıktan sonra darbe noktası civarında hasar oluşumu gözlenir ve buda malzemenin aynı bölgeye çoklu darbe kapasitesini azaltır. Şekil 4.13'te görülen 1. bölge genelde tankların ana gövdelerinin yapıldığı sertlik aralığıdır ve 2. bölgede ise malzemenin sertliğinin sert çekirdekli mermiyi parçalamaya yetecek kadar olması beklenir [60]. Bu çalışmada kullanılan en yüksek sertliğe sahip 200 °C'de menevişlenmiş çelik numuneler 2. bölge sertlik aralığındadır.



Şekil 4.14. Hedefte gerçekleşen tıkanma [20] ve halka oluşumu [60]

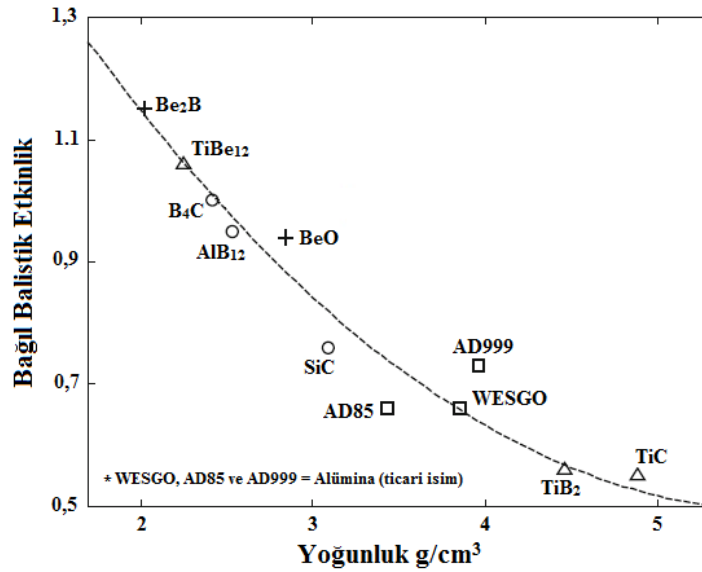
Metal malzemelerde gerçekleşen darbe sonrasında merminin hızına, boyutu ile şekline ve hedef malzemenin mekanik özellikleri ile kalınlığına göre farklı türde hasar mekanizmaları oluşmaktadır [20,57,60]. Metal malzemelerde görülen hasar mekanizmaları Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



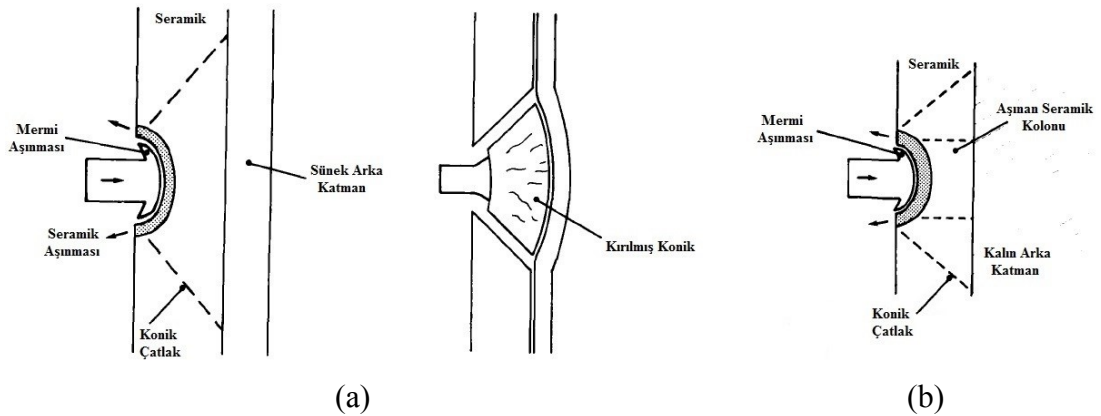
Şekil 4.15. Çelikte oluşabilecek hasar mekanizmaları [60]

Seramik malzemelerde balistik etkinliği kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi ve saflığı doğrudan etkilemektedir [60]. Şekil 4.16'da farklı seramik türlerinin yoğunluk

ve bağıl balistik etkinlik grafiği gösterilmiştir. Metaller merminin kinetik enerjisini plastik şekil değişimine uğratarak soğururlarken, seramikler ise merminin kinetik enerjisini kırılmaya maruz kalarak soğururlar. Mermi yüksek darbe hızında seramik plakaya çarptığı anda mermiyle temas eden bölgede hızla bir aşınma ve toz haline dönüşüm gerçekleşir. Seramik plakada konik çatlaklar oluşumu ve parçalanma gözlemlenir [62]. Merminin seramik/metal katmanlı kompozite yüksek darbe hızında çarptığı anda gerçekleşen durumlar (merminin aşındığı kabul edilmiştir) ve seramik malzemede oluşan konik oluşumu Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Farklı seramik türlerinin yoğunluk ve bağıl balistik etkinlik grafiği [60]



Şekil 4.17. (a) Arka katmanın şekil değişimine uğradığı durum (b) Arka katmanın şekil değişimine uğramadığı durum [62]

Bu çalışmada gerçekleştirilen balistik deneylerin sonuçları çelikler ve katmanlı kompozitler olmak üzere iki başlıkta incelenmiştir.

4.3.1. Çelikler

Gerçekleştirilen ilk balistik testin sonunda, normalleştirme uygulanmış numunelerde 12 mm'ye kadar delinirken 15 mm ve üzerindeki kalınlıklarda tam başarımlar sağlanmıştır. 200 °C'de menevişlenmiş numunelerde 9 mm'ye kadar bütün kalınlıklarda tam başarımlar sağlanırken, 400 °C'de menevişlenmiş numunelerde ise 9 mm'de delinme 12 mm ve üzerinde tam başarımlar görülmüştür. İkinci balistik test ile 200 °C'de menevişleme işleminde daha düşük kalınlıklarda numuneler denenmiştir ve bütün sonuçlar Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Yalın çeliklerin balistik sonuçları

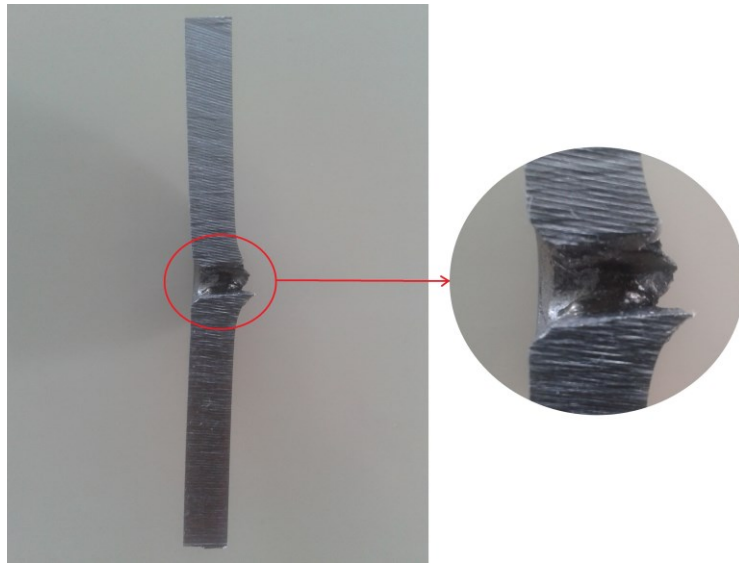
Numune Kodu	Delinme Olasılığı (%)
NOS1	100
NOS2	100
NOS3	0
NOS4	0
NOS5	0
2TS1	100
2TS2	100
2TS3	100
2TS4	50
2TS5 [52]	0
2TS6 [52]	0
2TS7 [52]	0
2TS8 [52]	0
2TS9 [52]	0
4TS1 [52]	100
4TS2 [52]	0
4TS3 [52]	0
4TS4 [52]	0
4TS5 [52]	0

Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi en iyi balistik başarımlar 200 °C'de menevişlenmiş numunelerde 9 mm kalınlığında (70,6 kg/m²) tam başarımlar ve 8,5 mm kalınlığında (66,6 kg/m²) %50 başarımlar ile sağlanmıştır. En düşük balistik başarımlar normalleştirme işleminde görülmektedir. Menevişleme sıcaklığı arttıkça dayanım ve sertlik gibi

mekanik özellikler azalırken balistik başarımın da azaldığı görülmektedir. En yüksek tokluğa normalleştirme işleminde, en yüksek dayanıma ise 200 °C’de menevişleme işleminde sahip olduğumuza göre malzemede dayanımın balistik başarıma tokluktan daha çok etki ettiğini görmekteyiz.

Yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde [1-3,7], kullandıkları çeliklerde menevişleme sıcaklıkları arttıkça mekanik özelliklerin (dayanım ve sertlik) ve balistik başarımın düştüğü görülmektedir. Bu çalışmalarda da balistik başarım için dayanımın süneklikten daha çok önemli olduğu görülmektedir. Holmen ve arkadaşları [22], yaptıkları çalışmada kullandığı 6070 alüminyum alaşımı için balistik başarımda dayanımın süneklikten çok daha fazla etki ettiği sonucuna varmıştır.

Balistik test sonrasında yalın çelik numuneleri incelediğimizde görülen hasar mekanizmaları sünek delik oluşumudur. Sadece normalleştirme işleminde 15 mm kalınlığındaki numunelerde (NOS3) arka yüzeyinde radyal çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise merminin batma derinliğinin numune kalınlığına çok yakın olmasıdır ve bundan dolayı normalleştirme işlemi uygulanmış numuneler için koruma kalınlığının denenen kalınlığa (15 mm, 117,6 kg/m²) çok yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Balistik test sonrası numunelerde oluşan sünek delik oluşumu Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Sünek delik oluşumu (70,3 kg/m² alan yoğunluğu)



(a)



(b)



(c)

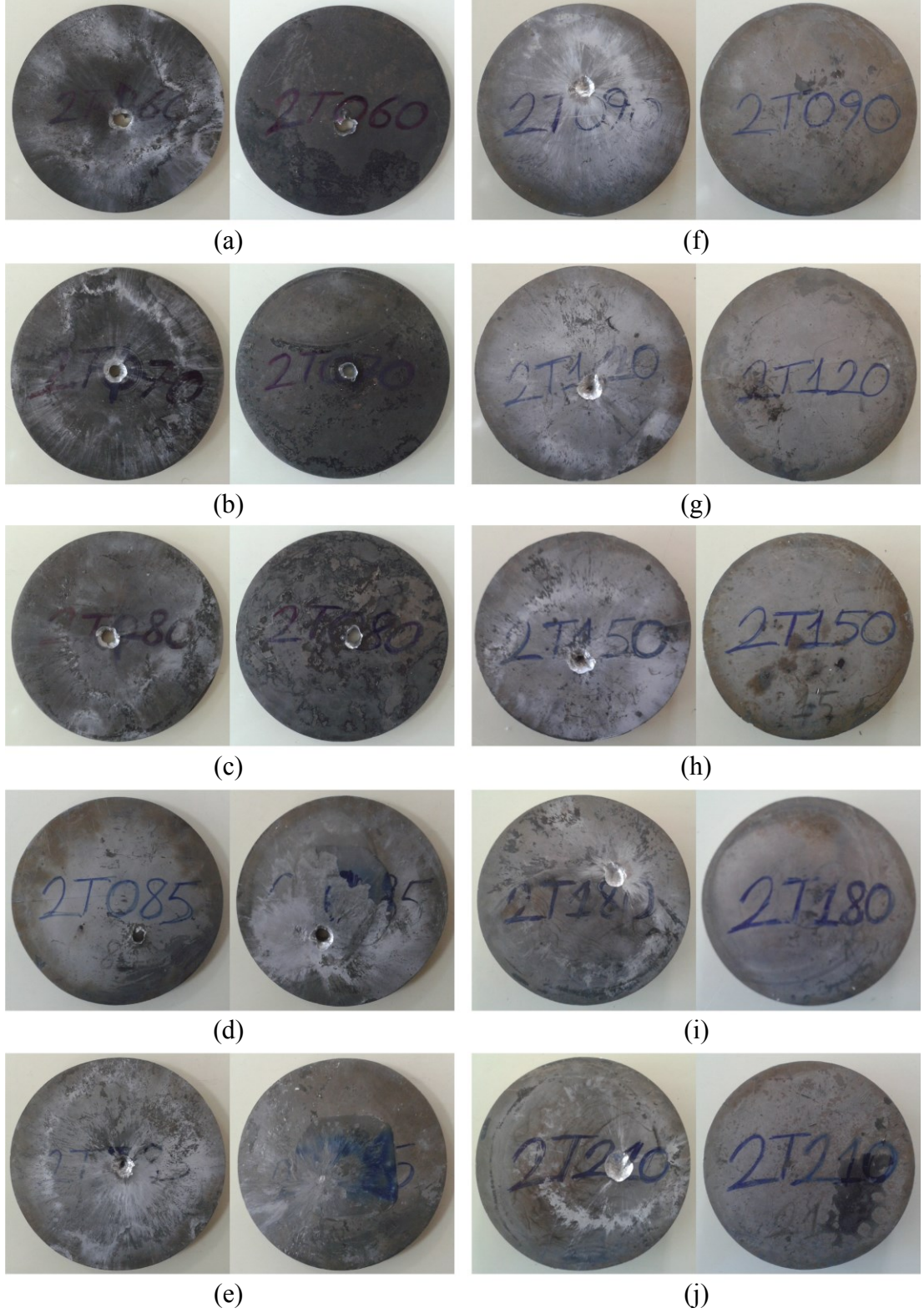


(d)



(e)

Şekil 4.19. Normalleştirme uygulanan çeliklerin atış sonrası ön ve arka resimleri
a) $70,6 \text{ kg/m}^2$, b) $94,1 \text{ kg/m}^2$, c) $117,6 \text{ kg/m}^2$, d) $141,1 \text{ kg/m}^2$ ve e) $164,6 \text{ kg/m}^2$



Şekil 4.20. 200 °C’de menevişleme uygulanan çeliklerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) 47 kg/m², b) 54,9 kg/m², c) 62,7 kg/m², d) 66,6 kg/m² delinen, e) 66,6 kg/m² delinmeyen f) 70,6 kg/m², g) 94,1 kg/m², h) 117,6 kg/m², i) 141,1 kg/m² ve j) 164,6 kg/m²



(a)



(b)



(c)



(d)



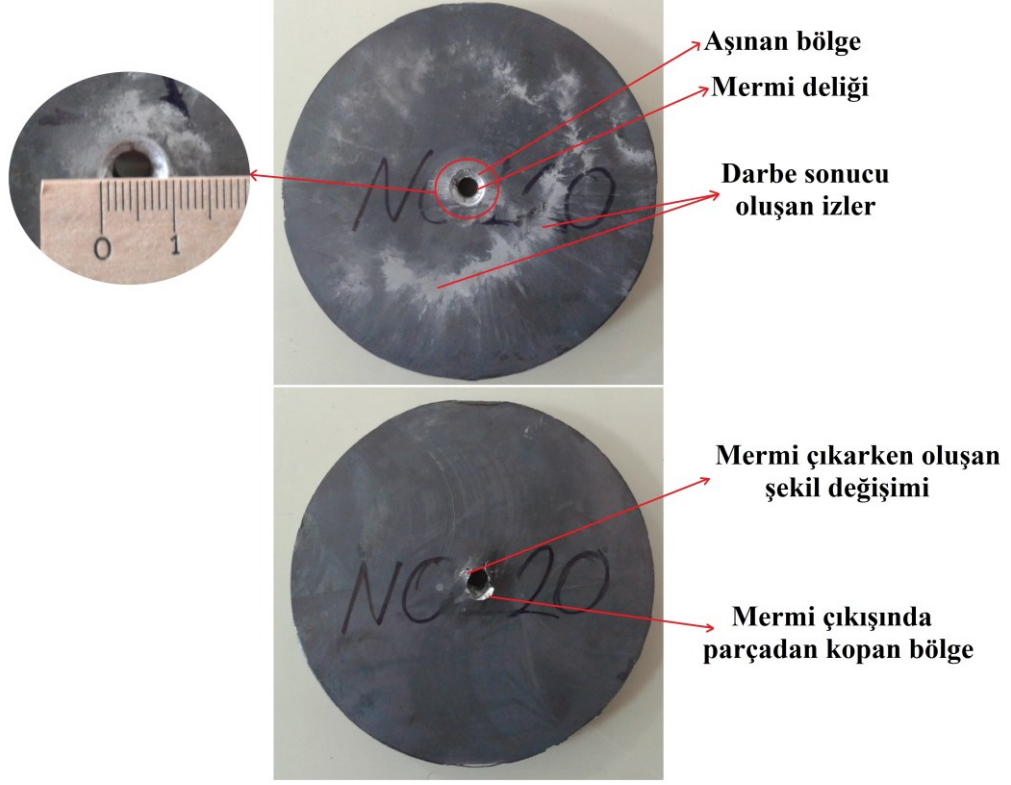
(e)

Şekil 4.21. 400 °C’de menevişleme uygulanan çeliklerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) 70,6 kg/m², b) 94,1 kg/m², c) 117,6 kg/m², d) 141,1 kg/m² ve e) 164,6 kg/m²

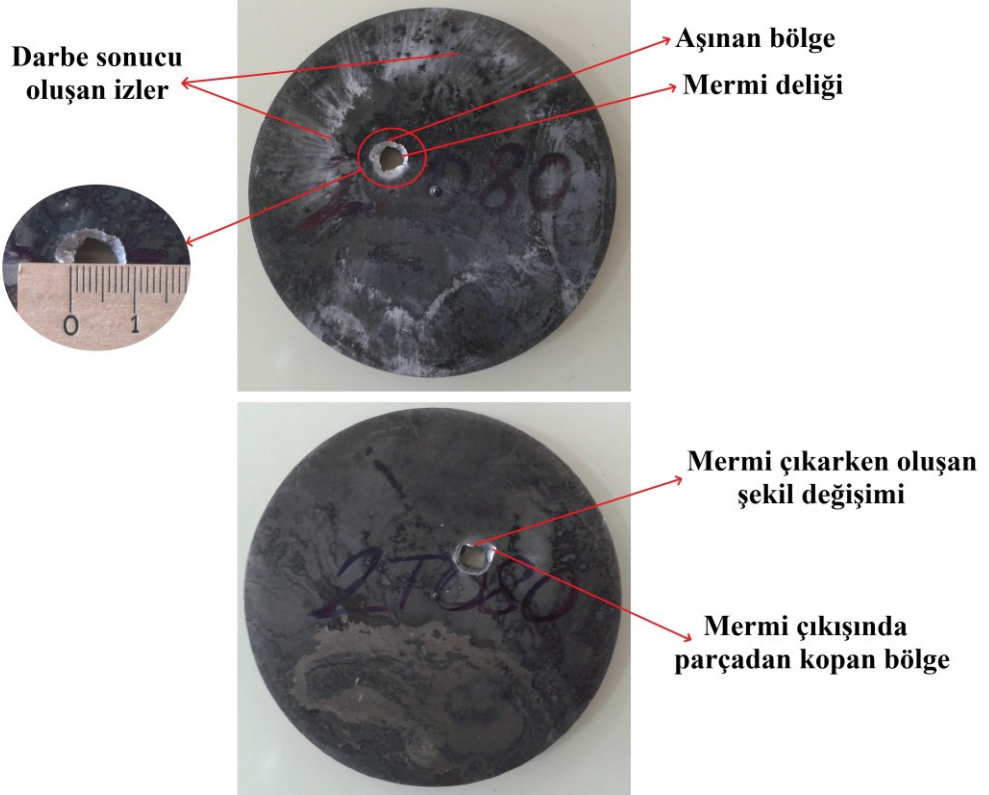
Şekil 4.18’de sünek delik oluşumu görülen numunede mermi çekirdeği hedefe nüfuz ederken malzeme içinde yön değiştirdiği görülmektedir. Balistik test sonrası yapılan incelemeler sonucunda mermi çekirdeği bazı numunelerde yoluna düz devam ederken bazı numunelerde yön değiştirerek değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Balistik test sonrasında normalleştirme, 200 °C’de ve 400 °C’de menevişleme numunelerinin resimleri sırasıyla Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Diğer numunelerden farklı hasar mekanizmasına sahip NOS3 numunelerinin arka yüzeylerinde oluşan radyal çatlak oluşumu Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



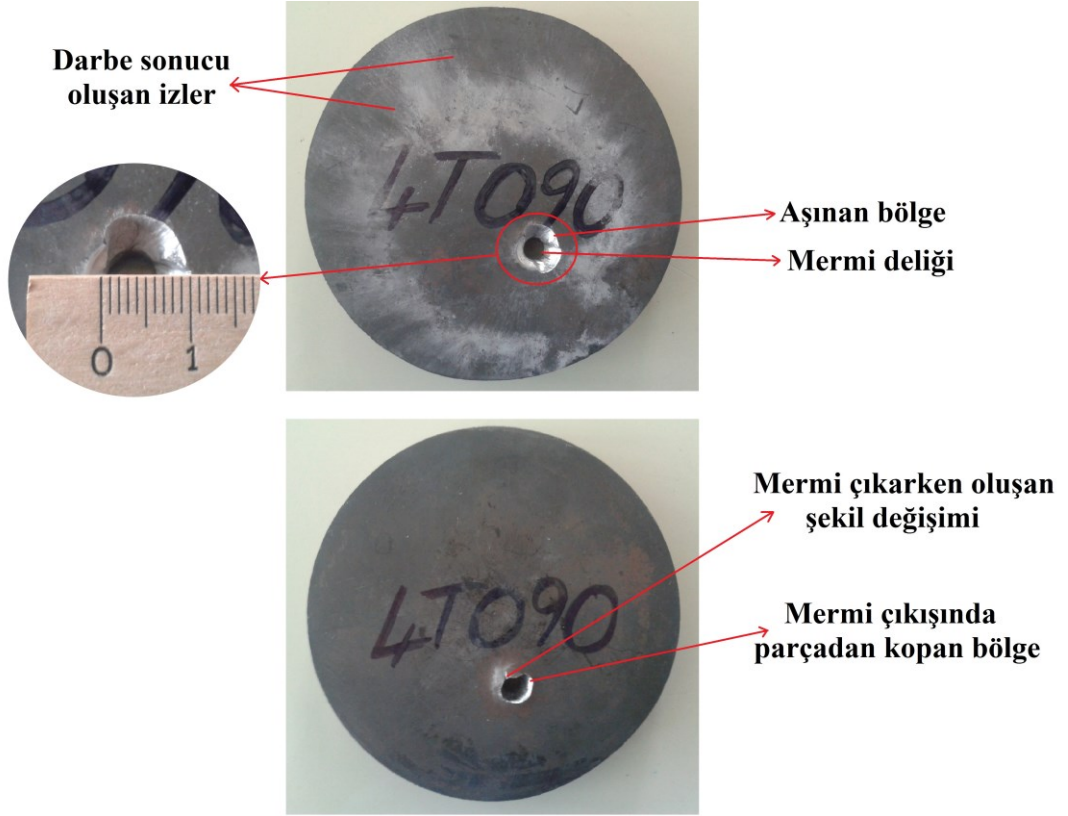
Şekil 4.22. NOS3 numunelerin arka yüzeyinde radyal çatlak oluşumu



Şekil 4.23. Atış sonrası $94,1 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğunda normalleştirme uygulanmış numune



Şekil 4.24. Atış sonrası $62,7 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğunda $200 \text{ }^\circ\text{C}$ menevişleme uygulanmış numune



Şekil 4.25. Atış sonrası $70,6 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğunda $400 \text{ }^\circ\text{C}$ menevişleme uygulanmış numune

Darbe sonrası yüzeylerde oluşan delik oluşumu ile delik bölgesi etrafındaki aşınmayı ve yüzeyde darbe sonucu oluşan izleri incelemek için farklı ısıl işlem kümelerine ait numuneler Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te gösterilmiştir.

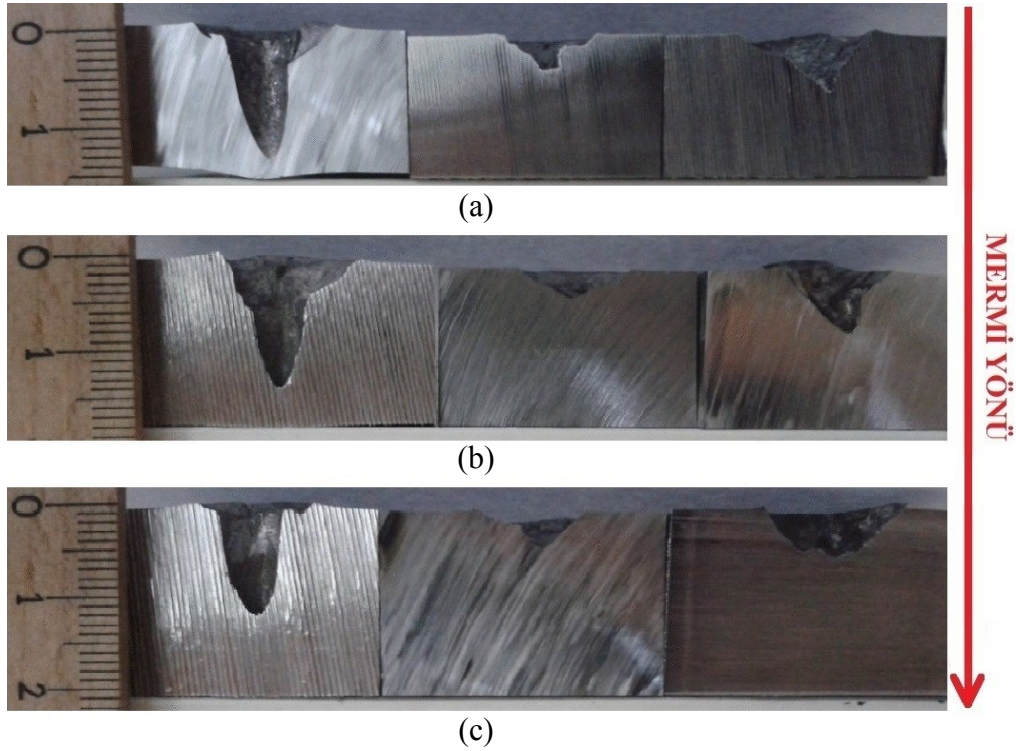
Çizelge 4.6. Balistik başarımlar gösteren numunelerin batma derinlikleri

Uygulanan Isıl İşlem	Numune Kalınlığı (mm)	Batma Derinliği (mm)
Normalleştirme	15	14,1
	18	12,4
	21	12,4
200 °C'de menevişleme	8,5	3,3
	9	3,1
	12	4,4
	15	4
	18	3,6
400 °C'de menevişleme	21	4
	12	6,2
	15	7,6
	18	7,3
	21	7,6

Çizelge 4.7. Balistik başarımlar gösteren numunelerin ortalama batma derinlikleri

Uygulanan Isıl İşlem	Batma Derinliği (mm)
Normalleştirme	13
200 °C’de menevişleme	3,7
400 °C’de menevişleme	7,2

Balistik başarımların bir diğere göstergesi de batma derinliğidir. Mermi hedef malzemeye ne kadar az nüfuz ettiyse o kadar çok koruma sağlamış demektir. Bu yüzden balistik test sonrası merminin batma derinliği çok önemlidir. Balistik başarımlar gösteren numunelerin batma derinlikleri ölçülüp Çizelge 4.6’da, uygulanan ısıll işlemlere göre ortalama batma derinliği ise Çizelge 4.7’de gösterilmiştir. Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi batma derinliği en düşük olan 200 °C’de menevişlenmiş numuneler, en yüksek olan ise normalleştirme uygulanmış numunelerdir. Batma derinliğinden de görüldüğü gibi en iyi balistik koruma 200 °C’de menevişleme işlemi ile sağlanmıştır. Aynı alan yoğunluğundaki (117,6, 141,1 ve 164,6 kg/m²) farklı ısıll işlem numunelerinin karşılaştırılması Şekil 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.26. (a) 117,6 kg/m², (b) 141,1 kg/m² ve (c) 164,6 kg/m² alan yoğunluklarına sahip numunelerin batma derinliklerinin karşılaştırılması (Normalleştirme – sol, 200 °C’de menevişleme – orta, 400 °C’de menevişleme – sağ)



Şekil 4.27. Atış sonrası bazı mermi çekirdekleri

Çelik numuneler üzerinde gerçekleştirilen balistik deney sonrasında çelik çekirdeklerde görülen şekil değişimine uğrayarak veya uğramadan bütün halde kaldığı ve parçalandığı durumlar Şekil 4.27’de gösterilmiştir.

Yapılan çalışmalarda [2-5,7,8,22], kullanılan malzemeler için en iyi balistik başarımdaki alan yoğunlukları incelenmiştir. Mishra ve arkadaşları [2], yaptıkları çalışmada 840 ± 10 m/s darbe hızında en iyi balistik başarımlı kullandığı orta karbonlu yüksek dayanımlı zırh çeliğinde, 200 °C menevişleme sıcaklığında 98 kg/m^2 alan yoğunluğuna karşılık gelen $12,6$ mm batma derinliği ile sağlamıştır. Kullanılan çeliğin en iyi balistik başarımdaki mekanik özellikleri; akma dayanımı 1417 MPa, çekme dayanımı 1808 MPa ve sertliği yaklaşık $52,7$ RSD-C değerindedir. Uzama miktarı ise %12’dir. Bu çalışmada kullanılan darbe hızına çok yakın darbe hızına sahip olmasına, aynı sıcaklıkta menevişlenmiş 34CrNiMo6 çeliği ile çok yakın sertlik ve dayanım özelliklerine sahip olmasına ve hatta tokluğunun ise daha yüksek olmasına rağmen balistik başarımlı sağlanan alan yoğunluğu, bu çalışmada sağlanan $70,6 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğundan daha fazladır. Bunun nedeni kullanılan mermi aynı iken çelik çekirdeğin sertlik değeri yaklaşık 67 RSD-C olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmada kullanılan çelik çekirdeğinin sertlik değeri $61-62$ RSD-C yani daha düşüktür bu da balistik başarımlı arttıran bir unsurdur. Jena ve arkadaşları [3], yaptıkları çalışmada 830 ± 10 m/s darbe hızında en iyi balistik başarımlı kullandıkları çelikte 200 °C menevişleme sıcaklığında $46,8 \text{ kg/m}^2$ alan

yoğunluğunda hafif eğilme ile sağlarken, 7017 alüminyum alaşımında 75,06 kg/m² alan yoğunluğunda hafif eğilme ile sağlamıştır. Yapılan çalışmada 7,62 mm ZD mermiler kullanılmasına rağmen bu çalışmada kullanılan çelik çekirdeğin aksine çekirdek malzemesi olarak kurşun kullanılmıştır. Kullanılan çekirdek malzemesinin bu çalışmadan farklı olması tam bir karşılaştırma yapılmasına engel olmaktadır. Demir ve arkadaşları [4], yaptıkları çalışmada 782 ± 5,4 m/s darbe hızında kullandığı 4140 yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı çelikte 100 kg/m²'de tam başarımlı sağlarken en iyi balistik başarımlı 7075-T651 (yaşlandırılmış) alüminyum alaşımında (AA) 85 kg/m² alan yoğunluğu ile sağlamıştır. Kullanılan 4140 çeliğinin en iyi balistik başarımdaki mekanik özellikleri; akma dayanımı 1400 MPa, çekme dayanımı 1640 MPa ve sertliği 53,4 RSD-C değerindedir. Yaşlandırılmış 7075-T651 AA için ise en iyi balistik başarımdaki mekanik özellikleri; akma dayanımı 500 MPa, çekme dayanımı 570 MPa ve sertliği 170 BSD değerindedir. Her iki malzemenin uzama miktarları sırasıyla %12,7 ve %11'dir. Yapılan çalışmaya baktığımızda gerçekleştirilen ısıtma işlem kümeleri içinde her iki numunede en yüksek sertlik ve dayanım değerlerine sahip değildir. Daha yüksek sertlik ve dayanım değerlerinde malzemelerde çatlak oluşumu ile parçalanma görülmüştür ve bu da balistik başarımlı düşürmüştür. Alınan bu sonuçtan dayanım ve sertliğin yanında malzemenin tokluğunun da balistik başarımlı için çok önemli bir unsur olduğu görülmektedir. İki numunede de en iyi balistik başarımlı sağlanan alan yoğunlukları, bu çalışmada kullanılan çelikte başarımlı sağlanan 70,6 kg/m² alan yoğunluğundan daha yüksektir. Demir ve arkadaşları [5], yaptıkları çalışmada 779 ± 4,5 m/s darbe hızında kullandığı 100Cr6 çeliğinde 100 kg/m²'de tam başarımlı sağlarken en iyi balistik başarımlı 4340 çeliğinde 70 kg/m²'de tam başarımlı ile sağlamıştır. Her iki numunede de arka yüzeyde çatlaklar görülmüştür. Kullanılan 100Cr6 çeliğinde en iyi balistik başarımlı için mekanik özellikler; akma dayanımı 1200 MPa, çekme dayanımı 1570 MPa ve sertlik 40,4 RSD-C değerindedir. 4340 çeliğinde ise iyi balistik başarımlı için mekanik özellikler; akma dayanımı 1300 MPa, çekme dayanımı 1600 MPa ve sertlik 49,5 RSD-C değerindedir. Uzama miktarları sırasıyla %12,3 ve %13'tür. Önceki çalışmada [4] olduğu gibi en yüksek sertlik ve dayanım değerlerine sahip ısıtma işlemlerde en yüksek başarımlı sağlanmamıştır. Bunun nedeni ise aynı şekilde tokluğun balistik başarımlı üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. 100Cr6 çeliğinde en iyi balistik başarımlı sağlandığı alan yoğunluğu bu çalışmada sağlanan

alan yoğunluğundan yüksek iken 4340 çeliğinde aynı alan yoğunluğunda sağlanmışır. Ama darbe sonrasında bu numunelerin arka yüzeylerinde çatlak oluşumu görülürken bu çalışmada kullanılan çelikte görülmemiştir. Bu yüzden 34CrNiMo6 çeliğinin balistik başarımı kimyasal bileşimi kendisine yakın olan 4340 çeliğinden daha yüksek olduğu söylenebilir. Übeyli ve arkadaşları [7], yaptıkları çalışmada 805 ± 15 m/s darbe hızında kullandıkları yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı 50CrV4 çeliğinde en iyi balistik başarımı 200 °C menevişleme sıcaklığında 89 kg/m^2 alan yoğunluğu ile sağlamıştır. 50CrV4 çeliğinin gerçekleştirilen 200 °C menevişleme sonrası mekanik özellikleri; akma dayanımı 1490 MPa, çekme dayanımı 1700 MPa ve sertliği 60 RSD-C değerinde iken uzama miktarı %7'dir. En iyi balistik başarımın sağlandığı alan yoğunluğu bu çalışmadan yüksektir. Bunun nedeni daha yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen çekme dayanımı ve tokluk değerlerinin daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Übeyli ve arkadaşları [8], yaptıkları çalışmada $786 \pm 3,7$ m/s darbe hızında kullandıkları düşük karbonlu-düşük alaşımlı çift fazlı çelikte en iyi balistik başarımı yüksek martenzit oranına sahip numunelerde 118 kg/m^2 alan yoğunluğunda tam başarım ile sağlarken 94 kg/m^2 alan yoğunluğunda %60 başarım sağlamıştır. Martenzit hacim oranı %72 ve sertliği yaklaşık 44,3 RSD-C olan çift fazlı çeliğin balistik başarım sağladığı alan yoğunluğu bu çalışmada elde edilen en iyi başarımdaki alan yoğunluğundan yüksektir. Holmen ve arkadaşları [22], yaptıkları çalışmada kullandığı 6070 alüminyum alaşımı için en iyi balistik başarımı O ısıl işleminde (tavlanmış) 54 kg/m^2 alan yoğunluğunda 348 m/s balistik sınır ile sağlamıştır. Bu değer, 778,5 m/s darbe hızı için yaklaşık $120,8 \text{ kg/m}^2$ alan yoğunluğuna (aynı mekanik özelliklerde numune kalınlığı ile balistik sınırın doğrusal olarak değiştiği varsayılarak) denk gelmektedir. Hesaplanan bu alan yoğunluğu bu çalışmada en iyi balistik başarımda elde edilen alan yoğunluğundan daha yüksektir.

4.3.2. Katmanlı Kompozitler

Seramik esaslı katmanlı kompozitlerde yapılan ilk balistik test sonrasında hiçbir numunede delinme gerçekleşmemiştir. Arka katmanı 200 °C'de menevişlenmiş numunelerde daha düşük alan yoğunluğu ile yapılan ikinci test sonrasında arka katmanı 3,5 mm olan numunelerde ($54,6 \text{ kg/m}^2$) tam başarım sağlanmışır. En düşük

katman kalınlığı 2,5 mm'ye sahip olan numunelerde (46,8 kg/m²) ise delinme gerçekleşmiştir. Aynı alan yoğunluğuna sahip yalın çeliklerde (6, 7 ve 8 mm) tam delinme gerçekleştiğinden ve ilk balistik test sonucunda delinen çeliklerin aksine katmanlı kompozit numuneler delinmediğinden balistik başarımları daha yüksektir. Yapılan balistik testlerde seramik plakaların tamamen parçalanarak yapıştırıcı ara katmandan (akrilik bazlı) koptuğu görölmüştür. Katmanlı kompozit numuneler için alınan balistik test sonuçları izelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Katmanlı kompozit numunelerin balistik sonuçları

Numune Kodu	Delinme Olasılığı (%)
NOC1	0
NOC2	0
NOC3	0
NOC4	0
NOC5	0
2TC1	100
2TC2	0
2TC3	0
2TC4	0
2TC5	0
2TC6	0
2TC7	0
2TC8	0
4TC1	0
4TC2	0
4TC3	0
4TC4	0
4TC5	0

Çizelge 4.8'de göröldüğu gibi arka katmanına normalleştirme ve 400 °C'de menevişleme uygulanan numunelerde yalın çeliklerin aksine delinme görölmemiştir. Bütün ısıl işlem kümelerinin daha düşük alan yoğunluğunda daha yüksek balistik başarımlar sağlanmıştır. Katmanlı kompozit numunelerin yalın çeliklere göre en büyük üstünlüğu daha hafif olmalarıdır.



(a)



(b)



(c)

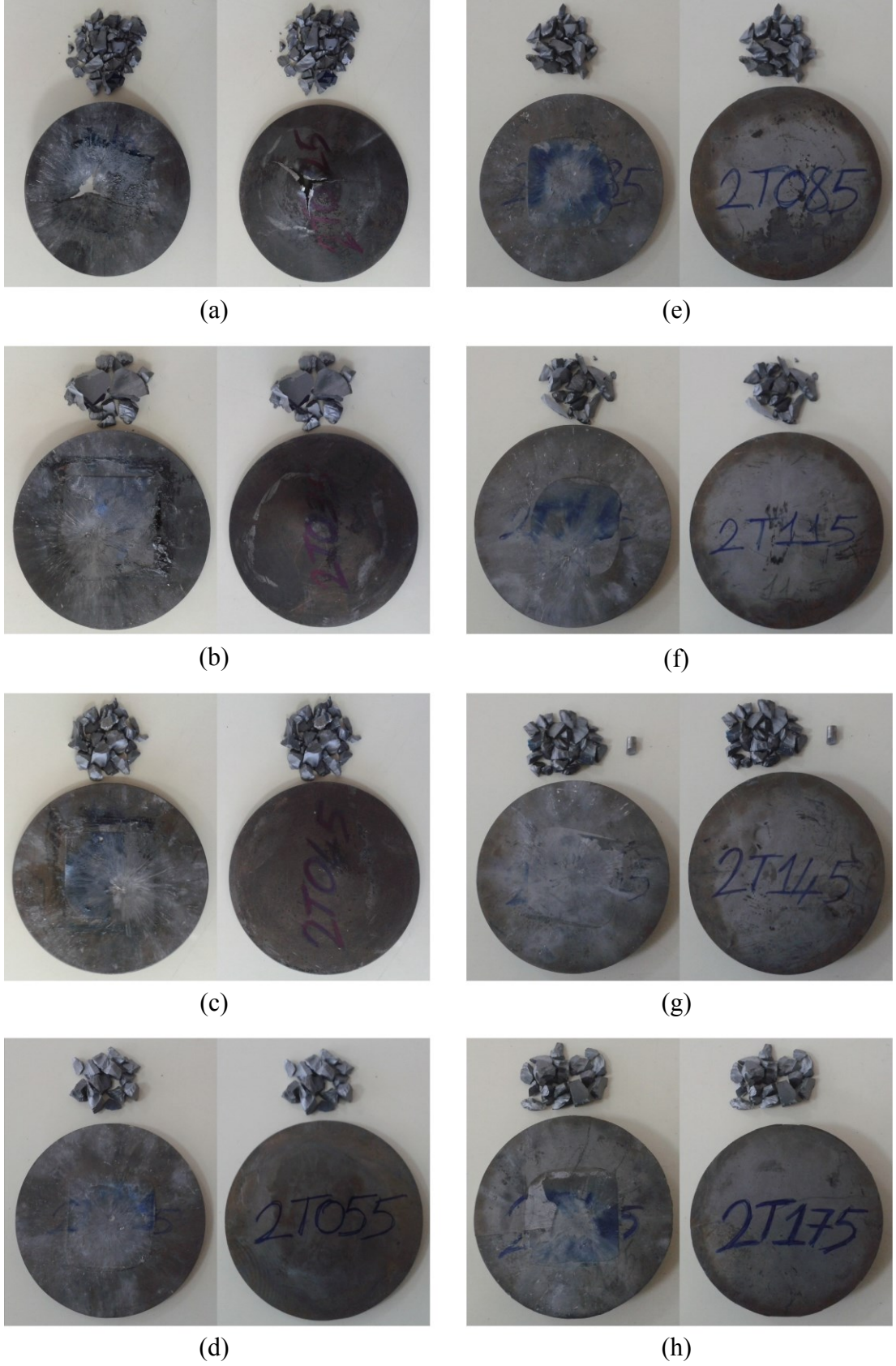


(d)



(e)

Şekil 4.28. Normalleştirme uygulanan katmanlı kompozitlerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) $70,3 \text{ kg/m}^2$, b) $93,8 \text{ kg/m}^2$, c) $117,4 \text{ kg/m}^2$, d) $140,9 \text{ kg/m}^2$ ve e) $164,4 \text{ kg/m}^2$



Şekil 4.29. 200 °C’de menevişleme uygulanan katmanlı kompozitlerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) 46,8 kg/m², b) 54,6 kg/m², c) 62,5 kg/m², d) 70,3 kg/m², e) 93,8 kg/m², f) 117,4 kg/m², g) 140,9 kg/m² ve h) 164,4 kg/m²



(a)



(b)



(c)



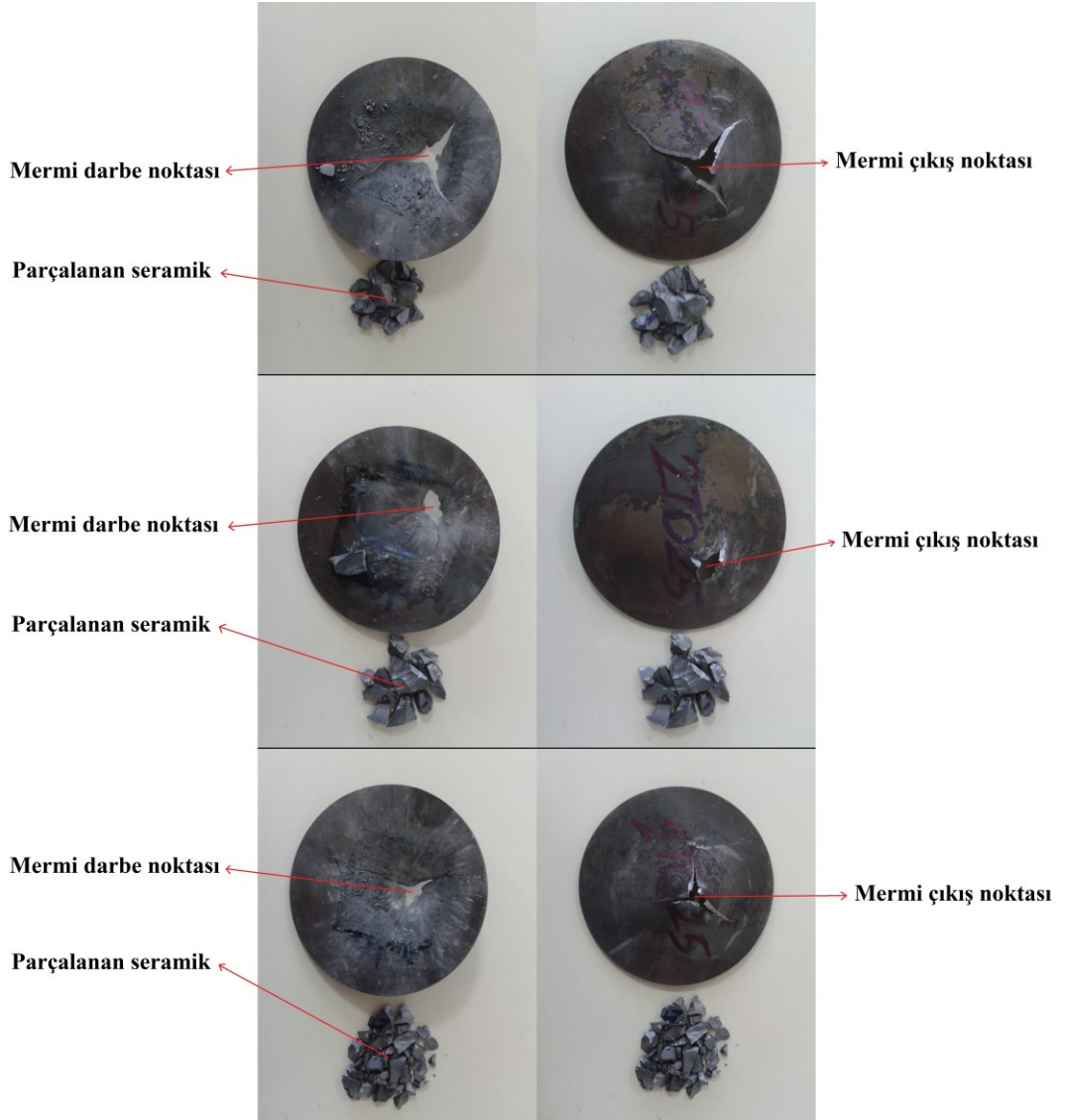
(d)



(e)

Şekil 4.30. 400 °C’de menevişleme uygulanan katmanlı kompozitlerin atış sonrası ön ve arka resimleri a) 70,3 kg/m², b) 93,8 kg/m², c) 117,4 kg/m², d) 140,9 kg/m² ve e) 164,4 kg/m²

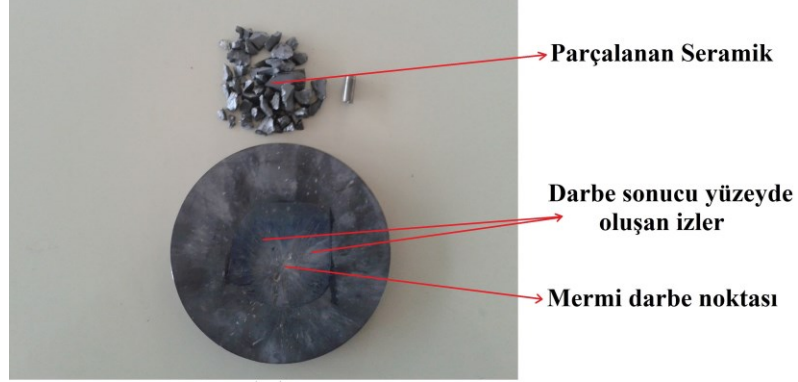
Yalın çeliklerde en iyi balistik başarımlar (2TS5, 70,6 kg/m²) için katmanlı kompozitlerde ağırlıktan ~ %22,7 azalma sağlanarak aynı balistik başarımlar elde edilmiştir. Balistik test sonrası katmanlı kompozit numuneler Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da gösterilmiştir. En düşük arka katman kalınlığına sahip 2TC1 numunelerde darbe sonrasında arka katmanlarında yüksek radyal gerilme sonucunda geniş çatlaklar ve şekil değişimi görülmüştür. Balistik darbe sonrası 2TC1 numuneleri Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Balistik test sonrasında balistik başarımlar gösteren katmanlı kompozitlerden 2TC2, 2TC3 ve NOC1 numunelerinin arka katmanlarında şekil değişimi (eğilme) görülmüştür ve numuneler Şekil 4.32'de gösterilmiştir.



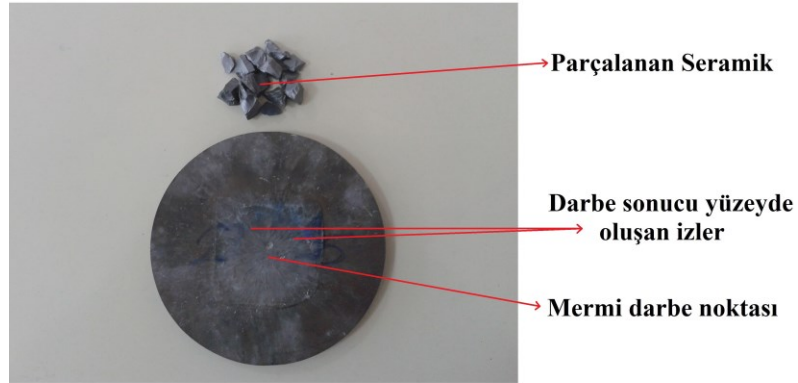
Şekil 4.31. 2,5 mm arka katman kalınlığına sahip 2TC1 numunelerin atış sonrası ön ve arka yüzeylerinde oluşan şekil değişimi



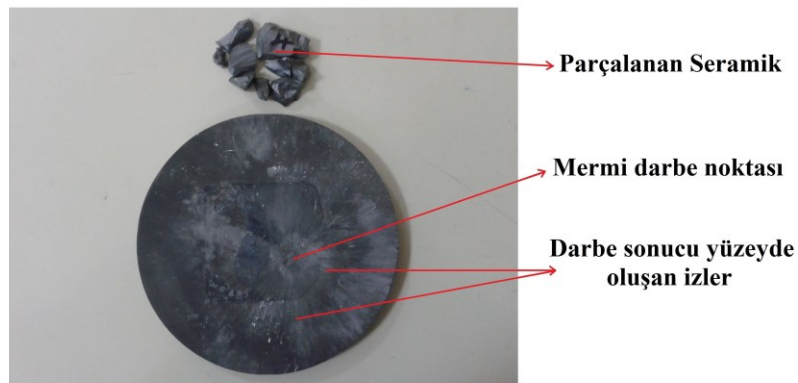
Şekil 4.32. Balistik test sonrası eğilen arka katman çelikleri (Normalleştirme 5,5 mm – sol, 200 °C’de menevişleme 4,5 mm – orta, 200 °C’de menevişleme 3,5 mm – sağ)



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.33. Atış sonrası numune resimleri (a) 93,8 kg/m² toplam alan yoğunluğuna sahip NOC2 numunesi, (b) 70,3 kg/m² toplam alan yoğunluğuna sahip 2TC4 numunesi ve (c) 70,3 kg/m² toplam alan yoğunluğuna sahip 4TC1 numunesi

Darbe sonrasında katmanlı kompozit numunelerinin yüzeyinde oluşan durumları incelemek için farklı arka katman ısıl işlem kümelerine ve alan yoğunluklarına sahip numuneler Şekil 4.33'te verilmiştir.

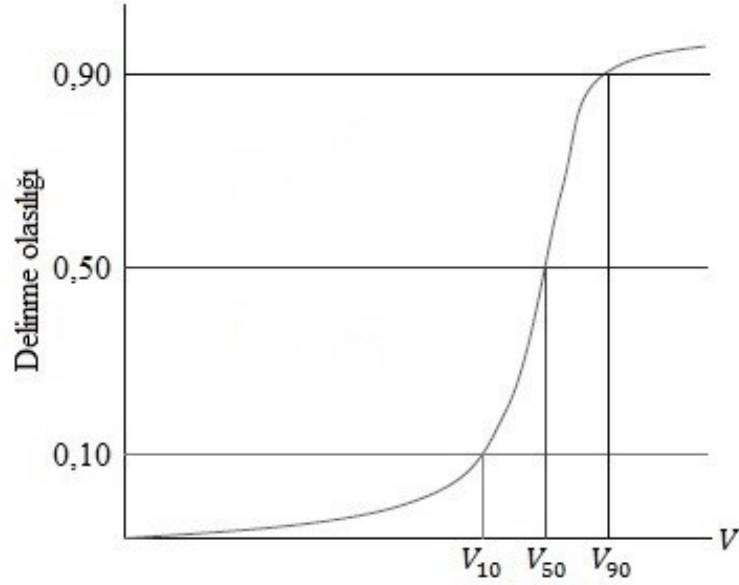
Yapılan çalışmalarda [7,9,10,44], kullanılan katmanlı kompozit malzemelerde en iyi balistik başarımlar için alan yoğunlukları incelenmiştir. Übeyli ve arkadaşları [7,44], yaptıkları çalışmada 805 ± 15 m/s darbe hızında kullandıkları Al2024-T6 arka katmana sahip alümina (1900 VSD) ön katmanlı numunelerde en iyi balistik başarımları 66 kg/m^2 'de tam başarımla sağlarken 51 kg/m^2 'de %50 başarımla sağlamıştır. Bu çalışmada kullanılan seramiklerin kalınlıkları (8,5 mm) sabit yani alan yoğunlukları $27,2 \text{ kg/m}^2$ 'dir. En iyi balistik başarımlar için arka katman alan yoğunluğu $27,4 \text{ kg/m}^2$ ve katman kalınlıkları oranı (seramik/metal) 2,43'tür. Yapılan çalışmada [7,42] ise seramik katman kalınlıkları değişkenlik gösterirken arka katman kalınlıkları sabittir ve en yüksek balistik başarımlar için bu değer 13 kg/m^2 'ye denk gelen 4,75 mm'dir. En iyi başarımda; tam başarımlar için seramiğin alan yoğunluğu 53 kg/m^2 ve katman kalınlıkları oranı (seramik/metal) 2,95 iken %50 başarımda bu değerler sırasıyla 38 kg/m^2 ve 2,11'dir. Yapılan çalışmaya baktığımızda, toplam alan yoğunluğunun büyük kısmını seramik ön katmanı oluştururken bu çalışmada ise arka katman oluşturmaktadır. Bunun nedeni SiC seramiğinin yoğunluğu alüminadan düşük iken 34CrNiMo6 çeliğinin yoğunluğu da alüminyum alaşımından yüksektir yani kompozit katmanlarının yoğunluk farkı bu çalışmada çok daha yüksektir. Yapılan çalışmada en yüksek başarımlar sağlanan iki katmanlı kompozit numuneye ek olarak üç katmanlı kompozit numune de (metal/seramik/metal) denenmiştir ve alınan balistik başarımların iki katmana göre daha düşük olduğu görülmüştür. En yüksek balistik başarımlar için tam başarımların elde edildiği alan yoğunluğu, bu çalışmada elde edilen alan yoğunluğundan yüksektir. Ayrıca önceki yapılan çalışmada [44] yapıştırıcı ara katman olarak poliüretan ve epoksi denenmiştir. Kullanılan ara katmanların akma dayanımları sırasıyla 1,4 MPa ve 25 MPa iken kesme dayanımları sırasıyla 0,7 MPa ve 12 MPa'dır. Deneysel çalışma sonucunda, poliüretan yapıştırıcı katmanın epoksi yapıştırıcı katmana göre darbe sonrasında daha fazla seramik parçalarını tuttuğu gözlemlenmesine rağmen yapıştırıcı katmanın kompozitlerin balistik başarımları üzerinde fazla bir etkisi olmadığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan akrilik bazlı yapıştırıcının darbe sonrasında seramik parçalarını tutamadığı görülmüştür. Demir ve

arkadaşları [9], yaptıkları çalışmada $785 \pm 6,2$ m/s darbe hızında kullandıkları 4340 arka katmana sahip alümina (1900 VSD) ön katmanlı numunelerde en iyi balistik başarımı 55 kg/m^2 alan yoğunluğu ile sağlamıştır. Yapılan çalışmada sabit seramik katman kalınlığı kullanılmış olup bu değer $23,7 \text{ kg/m}^2$ 'ye denk gelen 6 mm'dir. Kullanılan seramik katmanın alan yoğunluğu bu çalışmadan daha düşüktür ve en iyi balistik başarımda kullanılan katman kalınlıkları oranı yine bu çalışmadan daha düşük olan 1,5 değerindedir. Yapılan çalışmada en iyi balistik başarımın elde edildiği alan yoğunluğu, bu çalışmada en iyi başarımın elde edildiği alan yoğunluğuyla aynıdır yani aynı balistik başarımda elde edilmiştir. 4340 çeliğinin bütüncül halde kullanıldığı çalışmada [5] en iyi balistik başarımın elde edildiği ısıl işlemin aksine daha yüksek menevişleme sıcaklığında yani daha yüksek tokluk ile daha düşük sertlik ve dayanım değerlerine sahip arka katmanda en iyi balistik başarımda elde edilmiştir. Übeyli ve arkadaşları [10], yaptıkları çalışmada $786 \pm 3,7$ m/s darbe hızında kullandıkları alümina (1900 VSD)/çift fazlı çelik katmanlı kompozitinde en iyi balistik başarımı en yüksek martenzit hacim oranında arka katmana sahip numunelerde 94 kg/m^2 ile sağlamıştır. Kullanılan alümina seramiklerin katman kalınlıkları ve alan yoğunlukları önceki çalışma [9] ile aynıdır. En yüksek balistik başarımda, katman kalınlıkları oranı 0,67 değerindedir ve elde edilen alan yoğunluğu bu çalışmadan yüksektir.

4.4. Analitik Yöntemlerin İncelenmesi

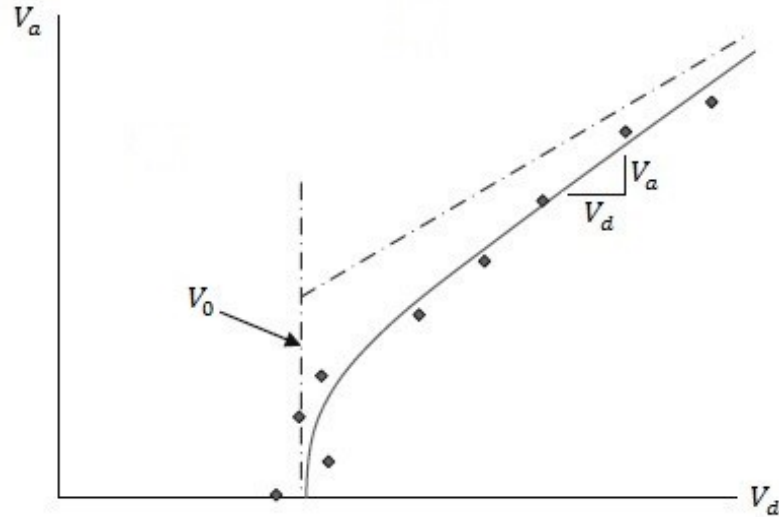
Zırh malzemeleri için balistik sınır hızı (sınır hız, V_{50}) çok önemli kavramdır. Balistik sınır hızı, kullanılan merminin zırh malzemesini %50 oranda delme olasılığının bulunduğu hızıdır [63]. Balistik sınır hızı genellikle deneysel olarak merminin, zırh malzemesini deldiği en düşük hızı ile zırh malzemesinin hiç delinmediği en yüksek hızının ortalaması ile elde edilmektedir. Balistik sınır hızının istatistiksel gösterimi Şekil 4.34'te verilmiştir.

Balistik sınırı belirlemek için merminin artık hızı (V_a) ölçülür ve mermi darbe hızı (V_d) ile oluşturulan eğri kullanılır. Balistik sınırı belirlemek için kullanılan eğri Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Mermi artık hızı ise, merminin zırh malzemesini tam deldiği andaki mermi çıkış hızıdır [63].



Şekil 4.34. Balistik sınır hızı (V_{50}) [63]

Balistik sınıra etki eden etmenler; zırh malzemesinin ve merminin sertliği, darbe açısı, merminin yoğunluğu, mermi ucunun şekli ve merminin uzunluk-çap oranıdır [63]. Bunların dışında, zırh malzemesinin dayanım ve süneklik gibi mekanik özellikleri de balistik sınırı etkileyen unsurlardır [64].



Şekil 4.35. Mermi darbe hızı (V_a) ve mermi artık hızı (V_a) ile oluşturulan eğri [63]

Önceki çalışmalar incelendiğinde, yapılan analitik yaklaşımlar enerji ve momentum yöntemlerine dayanarak balistik korumanın sağlanacağı zırh kalınlığını ya da kullanılan merminin artık hızının belirlenmesini hedeflemektedir [64]. Analitik

yöntemler çelikler ve seramik esaslı katmanlı kompozitler olmak üzere iki başlıkta incelenmiştir.

4.4.1. Bütüncül Metaller için Analitik Modeller

4.4.1.1. Thor Modeli

Thor projesi altında, çeşitli metal ve metal dışı malzemelerin çelik parçalara karşı dayanımı araştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda boy/çap oranı yaklaşık 1 olan kısa silindir ve silindir üzerine küp şeklindeki SAE 1020 çeliğinden yapılmış yaklaşık 0,32 ile 30,78 gr kütlede delici parçalar kullanılmıştır. Balistik araştırma laboratuvarında ışık-gaz tabancası kullanılarak yaklaşık 3658 m/s kadar yüksek darbe hızlarına çıkılmıştır [65,66].

Yapılan çalışma sonucunda, deneysel veriler kullanılarak belirli bir delici parça şekli varsayılmadan tahmini yaklaşımla üç adet denklem çıkarılmıştır ve bu denklemler ile delici parçanın artık hızı (V_a), artık kütlesi (m_a) ile en önemlisi koruma hızı (V_0) hesaplanmaktadır. Parametreleriyle beraber denklem (4.2), denklem (4.3) ve denklem (4.4) aşağıda gösterilmiştir [65,66].

$$V_a = V_d - 10^c (hA_a)^\alpha m_m^\beta (\sec \theta)^\gamma V_d^\lambda \quad (4.2)$$

$$m_a = m_m - 10^c (hA_a)^\alpha m_m^\beta (\sec \theta)^\gamma V_d^\lambda \quad (4.3)$$

$$V_0 = 10^{c_1} (hA_a)^{\alpha_1} m_m^{\beta_1} (\sec \theta)^{\gamma_1} \quad (4.4)$$

V_a = Delici parçanın artık hızı (m/s)

V_d = Delici parçanın darbe hızı (m/s)

V_0 = Koruma hızı (nüfuz etmenin gerçekleşmediği en yüksek hız, m/s)

h = Zırh malzemesinin kalınlığı (m)

A_a = Delici parçanın ortalama darbe alanı (m²)

m_m = Delici parçanın gerçek kütlesi (kg)

m_a = Delici parçanın artık kütlesi (delinme sonrası kalan kütle, kg)

θ = Darbe açısı (°)

$c, \alpha, \beta, \gamma, \lambda$ = Deneysel olarak türetilmiş her malzeme türü için ayrı sabitler

Denklemlerde kullanılan sabit parametreler ($c, \alpha, \beta, \gamma, \lambda$) her denklem için ayrı ayrı yapılan çalışmada verilmiştir. Kullanılan malzemeler; magnezyum, alüminyum alaşımı 2024-T3, titanyum alaşımı, dökme demir, yüzeyi sertleştirilmiş çelik, yumuşak ve sert homojen çelik, bakır, kurşun ve Tuballoy (Rafine edilmiş doğal uranyum) ile sınırlıdır. Deneysel olarak türetilen bu sabitler belirli bir delici parça şeklinden bağımsız olarak kullanılan zırh malzemesine göre değişmektedir [65].

Balistik testlerde kullanılan zırh malzemeleri belli bir yoğunluğa ve sertliğe sahiptirler. Balistik testler her malzeme için farklı, belirli bir alan yoğunluğu aralığında, darbe hızı aralığında ve delici parça boyutu (kütlesi) aralığında gerçekleştirilmiştir [65]. Thor modeli tamamen deneysel sonuçlara dayandığından ve bu çalışma kapsamında kullanılan malzeme deneysel verilerde mevcut olmadığından bu model kullanılmamıştır.

4.4.1.2. Stone Modeli

Stone [67], yaptığı çalışmada sert malzemeler (zırh plakaları, vb.), sıkı akışmaz malzemeler (kum, yumuşak zemin, vb.) ve yumuşak malzemeler (sıvı, vb.) gibi farklı yapıdaki malzeme türleri için batma derinliğinin hesaplanması üzerine yaklaşımlar yapmıştır. Ayrıca çok katmanlı sert malzemeler için de yaklaşımda bulunmuştur.

Sert malzemeler için toplam batma derinliği yaklaşımını; merminin kinetik enerjisinin birim alana oranının, hedef malzeme parametrelerine bölümü olarak yapmıştır. Batma derinliği denklemi parametreleriyle beraber aşağıda denklem (4.5)'te gösterilmiştir [67].

$$P = \left(\frac{m_m V_d^2}{2\pi r^2} \right) \left(\frac{2}{\rho_h c_{hm}} \right) \quad (4.5)$$

P = Batma derinliği (m)

m_m = Merminin kütlesi (kg)

V_d = Mermi darbe hızı (sınır koşulu-delinmenin sıfır olduğu an, m/s)

r = Merminin yarıçapı (m)

ρ_h = Hedef malzemenin yoğunluğu (kg/m^3)

c_{hm} = Hedef malzemenin plastik bölgedeki malzeme özellikleri ile merminin şekline bağlı bir değişken

Bu çalışma kapsamında kullanılan zırh çeliği bu deneyde denenmediğinden, denklemde kullanılan hedef malzeme türüne bağlı değişkenden (c_{hm}) dolayı bu model kullanılmamıştır.

4.4.1.3. Wijk Modeli

Wijk ve arkadaşları [68], yaptıkları çalışmada sert yapıda çelik ve metal hedeflerin mermiler karşısında delinmesi üzerine model ortaya koyulmuştur. Delik oluşumu nüfuz etme ve delinme olmak üzere iki aşamada incelenmiştir. Yapılan modelde hedef malzeme delinme dayanımı adında boyutsuz bir parametre kullanılmıştır ve bu değer yaklaşık 5 olduğu varsayılmıştır. Toplam batma derinliği denklem (4.6)'da gösterilmiştir.

$$P = \frac{2m_m V_d^2}{\pi d^2 \beta_h Y_T} \quad (4.6a)$$

$$\beta_h = R_T / Y_T \approx 5 \quad (4.6b)$$

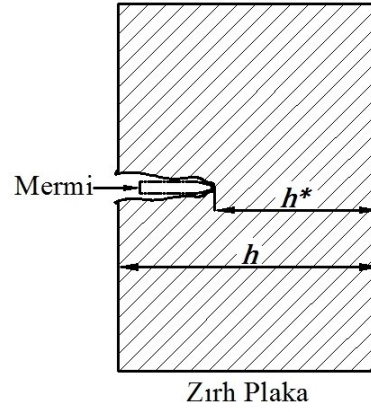
d = Mermi çapı (m)

β_h = Hedefin delinme direnci parametresi (sabit katsayı)

Y_T = Hedef malzemenin tek eksenli akma dayanımı (Pa)

R_T = Eksenel hedef direnci (Pa)

Nüfuz etme aşamasında merminin önündeki hedef malzeme elastik-plastik şekil değişimi ile özellikle yanal alana yer değiştirir. Delinme aşamasında ise merminin önündeki hedef malzeme parçalanır. Merminin uç noktasıyla hedef malzeme arka yüzeyi arasındaki mesafe (h^*) belirli bir noktaya geldikten sonra delinme aşaması başlar [68]. Şekil 4.36'da delinme aşaması görülmektedir. Belirli bir kalınlıktaki sert metal plakanın en düşük delinme enerjisi denklem (4.7) ile hesaplanmaktadır [68].



Şekil 4.36. Hedef malzemenin delinme aşaması

$$W_{min} = (\pi/8)dh(\pi h + \gamma_m d)Y_T \quad h < h^* \quad (4.7a)$$

$$W_{min} = (\pi/4)(h - h^*)d^2\beta_h Y_T + (\pi/8)dh^*(\pi h^* + \gamma_m d)Y_T \quad h \geq h^* \quad (4.7b)$$

W_{min} = En düşük hedef delinme enerjisi (J)

h = Hedefin kalınlığı (m)

h^* = Nüfuz etme ve delinme arasındaki geçiş kalınlığı (m)

γ_m = Merminin keskinlik parametresi (sabit katsayı)

Denklem (4.7)'de kullanılan γ_m , hedefin mermiye karşı delinme direncini gösteren ve deneysel olarak belirlenen bir parametredir. Merminin keskinliği azaldıkça bu parametre artmaktadır. 7,62 mm ZD mermi için bu değer 1 olarak alınmaktadır [68].

Hedef malzeme kalınlığı (h) geçiş kalınlığından (h^*) küçük olursa nüfuz etme başlangıç aşaması yok demektir, yani mermi önündeki hedef malzemeyi tamamen parçalayacaktır. Geçiş kalınlığı h^* denklem (4.8) ile hesaplanmaktadır [68].

$$h^* = (d/2\pi) (2\beta_h - \gamma_m) \quad (4.8)$$

Mermi hedef malzemeye nüfuz etmeye başladığında delinme dayanımı artmalıdır ve merminin ucu hedefin yeterince içine girdiği zaman sabit bir değerde dengelenmelidir. Merminin ucu arka yüzeye yaklaştığında ise delinme dayanımı azalacaktır ve ikincil parçaların oluşumu başlayacaktır. İkincil parçalar mermi hızı ile

aynı hızda dışarı atılacaktır. Oluşan ikincil parçaların kütlesi denklem (4.9) ile hesaplanmaktadır [68].

$$m_i \approx (\pi/4)d^2h_i\rho_h \quad (4.9)$$

m_i = İkincil parçaların kütlesi (kg)

h_i = İkincil parçalara dönüşen malzemenin kalınlığı (m)

Malzemenin delinmesi esnasında çıkan bütün malzemelerin (mermi ve ikincil parçalar) hızlarının aynı V_a olduğunu ve sürtünme gibi hiçbir enerji kaybının olmadığını varsayarsak, merminin ve ikincil parçaların çıkış hızı (artık hız) denklem (4.10) ile hesaplanabilir [68].

$$V_a = \sqrt{\frac{m_m V_d^2 - 2W_p}{m_m + m_i}} \quad (4.10)$$

Yapılan bu çalışmada numunelerde oluşan ikincil parçaların kütlesi hesaplanamayacağından dolayı artık hızın hesabı bu model ile mümkün değildir. Bu modelde sadece toplam batma derinliği, denklem (4.6) kullanılarak balistik başarımlar sağlanmış numunelerde batma derinlikleri karşılaştırılabilir.

4.4.1.4. Pol Modeli

Pol ve arkadaşları [69], metal hedeflerin dik açıda sivri kemer uçlu mermiler karşısında delinmesini incelemişlerdir. Enerji dengesi ve yapılan iş kullanılarak analitik yaklaşım yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada toplam yapılan işi üç kısımda incelemişlerdir. Delinme esnasında yapılan toplam iş (W); plastik şekil değişimi için yapılan işi (W_p), cismin yeni bir konuma taşınması için yapılan işi (yapılan dinamik iş W_d) ve oluşan taç yapraklarını eğmek için yapılan işi (W_b) kapsamaktadır. Yapılan işlerin ve toplam işin denklemleri aşağıda denklem (4.11), denklem (4.12), denklem (4.13) ve denklem (4.14)'te gösterilmiştir.

$$W_p = (\pi/2)b^2\sigma_{A(h)}h \quad (4.11)$$

$$W_d = \frac{2\pi\rho_h V_d^2 b^4 h^2}{3L_b^2} \quad (4.12)$$

$$W_b = \frac{\pi^2 b h^2 \sigma_{A(h)}}{4} \quad (4.13)$$

$$W = W_p + W_d + W_b \quad (4.14)$$

$\sigma_{A(h)}$ = Hedefin akma dayanımı (Pa)

b = Oluşan deliğin yarıçapı (merminin yarıçapı ile eşit kabul ediliyor, m)

L_b = Mermi burun uzunluğu (m)

Delinme esnasında yapılan toplam iş, merminin darbe hızı ile artık hızının kinetik enerjileri farklarına eşitlenmiştir ve artık hız sıfır alınarak balistik koruma sağlandığı kabul edilmiştir. Balistik sınır (V_{50}), denklem (4.15) ile hesaplanmaktadır ve m_m merminin kütlesidir [69].

$$V_{50} = (2W/m_m)^{1/2} \quad (4.15)$$

Pol modeli kullanılarak her ısıl işlem kümesinde (akma dayanımları) numune kalınlıklarına göre balistik sınır hesaplanıp, deneyde kullanılan ortalama mermi hızı ile balistik korumanın sağlanıp sağlanamayacağı karşılaştırılabilir.

4.4.1.5. Lambert Modeli

Lambert modeli [70,71], delinme sonrası merminin artık hızının (V_a) belirlenmesini sağlamaktadır ve hesaplanışı denklem (4.16), denklem (4.17), denklem (4.18) ve denklem (4.19)'da gösterilmektedir.

$$V_a = \begin{cases} 0, & 0 \leq V_d \leq V_{50} \\ \alpha_l(V_d^p - V_{50}^p), & V_d > V_{50} \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\alpha_l = \frac{m_m}{m_m + (m_h/3)} \quad (4.17)$$

$$p = 2 + (z/3) \quad (4.18)$$

$$z = (h/d) \sec^{0,75} \theta \quad (4.19)$$

α_l = Deneysel olarak türetilmiş sabit

p, z = Mermi-hedef bileşimine dayalı deneysel parametre

m_m = Merminin kütlesi (kg)

m_h = Hedefin kütlesi (kg)

θ = Darbe (eğiklik) açısı ($^\circ$), normal (dik) darbe için “0” alınır.

Bu modelde p parametresinin bir üst sınırı olmalıdır ve yapılan çalışmada $p \leq 8$ değerleri için uygun sonuçlar verdiği görülmüştür [70,71]. Bu çalışmada elde edilen verilerle bu modelin karşılaştırılması mümkün değildir.

4.4.1.6. Alekseevskii ve Tate Modeli

Alekseevskii ve Tate modeli [72-76], değiştirilmiş Bernoulli denklemine dayanmaktadır fakat delinme sırasında sürekli azalan merminin dinamik dayanımı (Y_p) ile hedefin delinmeye karşı direnci (R_t) arasındaki farkı ayırt etmektedir. Yapılan çalışmada şekil değişimine uğrayan uzun çubuk deliciler kullanılmıştır. Alekseevskii ve Tate modeli denklem (4.20), denklem (4.21) ve denklem (4.22)'de gösterilmektedir.

$$0,5\rho_m(V_d - u)^2 + Y_p = 0,5\rho_h u^2 + R_t \quad (4.20)$$

$$Y_p = 1,7\sigma_{A(m)} \quad (4.21)$$

$$R_t = \sigma_{A(h)} \left[\frac{2}{3} + \ln \left(\frac{0,57E_h}{\sigma_{A(h)}} \right) \right] \quad (4.22)$$

ρ_m = Merminin yoğunluğu (kg/m^3)

ρ_h = Hedefin yoğunluğu (kg/m^3)

$\sigma_{A(m)}$ = Merminin akma dayanımı (Pa)

$\sigma_{A(h)}$ = Hedefin akma dayanımı (Pa)

E_h = Hedefin elastik modülü (Pa)

Denklem (4.20)'de bulunan u değeri merminin anlık delme hızıdır ve delinme gerçekleşmediği durumlarda azalarak sifıra doğru gider, delinme gerçekleştiği

durumlarda ise delinme sonrasında artık hıza eşit olur. Bu çalışmada elde edilen verilerle bu modelin karşılaştırılması mümkün değildir.

Walker ve Anderson [77], yaptıkları çalışmada Alekseevskii ve Tate modelini [72-76] kullanmışlardır. Sayısal benzetim ile yapılan karşılaştırmalarda delinmenin başlangıcında ve sonlarına doğru gerçekleşen geçici değişimleri yeterince tanımlamadığı görülmüştür. Alekseevskii ve Tate modeli [72-76] üzerinden sayısal benzetim yapılarak zamana bağlı yeni bir yaklaşım yapılmıştır. Şekil değişimine uğrayan ve uğramayan, her iki mermi tipi için de uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. Zamana bağlı değişkenleri içerdiğinden bu model incelenmemiştir.

Allen ve Rogers modeli [78], şekil değişimine uğrayan uzun çubuk deliciler ile ilgili yayınlanan ilk çalışmadır. Yapılan çalışmada iki kademeli ışık gaz tabancası ile 7075-T6 alüminyum alaşımı hedefler kullanılmıştır. Deneysel çalışmada farklı malzemelerden yapılmış çubuklar kullanılmıştır. Deneysel ve analitik çalışmalar sonunda kullanılan delici çubuk için balistik sınır (V_{50}) denklemi ortaya konmuştur. Kullanılan mermi tipinin bu çalışmadan tamamen farklı olması ve bu modelde kullanılan deneysel verilerin bu çalışmada kullanılan malzemeyle aynı olmadığından incelenmemiştir.

4.4.1.7. Taylor Modeli

Taylor [79], kademeli konik mil ile ince plastik plaka üzerinde yaptığı teste malzeme üzerinde delik oluşumunu incelemiştir. Yaptığı çalışmada şekil değişimi simetrik ya da simetrik olmayan şekilde iki türlü oluşabileceğini göstermiştir. Malzemenin kalınlığı yüksek olduğunda simetrik şekil değişimi görülürken malzemenin kalınlığının düşük olduğu durumlarda simetrik olmayan şekil değişimi görülmüştür. Oluşan iki şekil değişimi türü de Şekil 4.37’de gösterilmiştir.

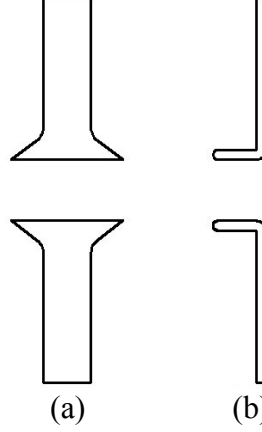
H. A. Bethe’nin [80] çalışmasından faydalanarak ortaya konulan Taylor modeli [79] denklem (4.23)’de gösterilmiştir.

$$W = 0,5A_d\pi b^2 h\sigma_{A(h)} \quad (4.23)$$

W = Yapılan toplam iş (J)

h = Hedefin kalınlığı (delinme öncesi, m)

A_d = Şekil değişimi türüne bağlı sabit (simetrik şekil değişimi için 2,66 ve simetrik olmayan şekil değişimi için 1)



Şekil 4.37. (a) Simetrik şekil değişimi ve (b) Simetrik olmayan şekil değişimi oluşumu

Yapılan çalışmada, aynı delik yarıçapında simetrik şekil değişimi için gereken toplam iş simetrik olmayan şekil değişiminin 2,66 katı olduğu görülmüştür. Eğer Bethe'nin gerinim varsayımı kullanılsaydı, simetrik şekil değişimi için A_d sabiti 4 olacaktı. Deneysel çalışmada uygulanan ortalama mermi hızını (778,5 m/s) kullanarak, merminin kinetik enerjisi yaptığı işe eşitlenip koruma kalınlıkları hesaplanabilir. Hesaplanan bu kalınlıklar deney sonuçları ile karşılaştırılabilir.

Wilkins ve Guinan [81], Taylor'un [79] yaptığı deneysel yöntemden faydalanarak yeni bir model sunmuştur. Bu model merminin ilk uzunluğu ve son uzunluğunu (darbe sonrası oluşan mantar tipi şekil değişimi) kullanıp metalin dinamik akma dayanımını belirlemektedir. Homojen şekil değişimi varsayılarak ve enerji dengesi kullanılarak yapılan yaklaşım sayısal deneyleri doğrulamak için sıklıkla kullanılmaktadır.

4.4.1.8. Thomson Modeli

Thomson [82], Taylor modelini [79] kullanarak sivri kemer ve konik uçlu mermiler için yeni bir model sunmuştur. Kullandığı modelde merminin yapacağı şekil değişimi

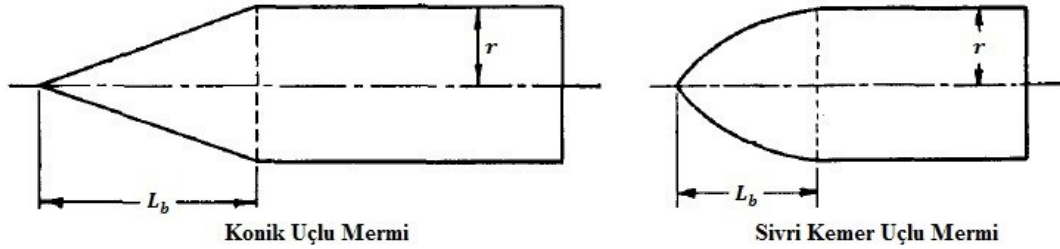
(simetrik olmayan), şekil değişimi için gereken iş ve dinamik işi hesaba katmıştır. Thomson modeli denklem (4.24)'te gösterilmiştir.

$$W = \pi r^2 h [0,5\sigma_{A(h)} + A_m \rho_h (V_d r / L_b)^2] \quad (4.24)$$

W = Merminin yaptığı toplam iş (J)

A_m = Merminin şekline bağlı sabit (konik uç için 1 ve sivri kemer uç için 1,86)

Denklem (4.24)'te geçen r ve L_b değerleri merminin boyutunu temsil etmektedir ve Şekil 4.38'de görülmektedir.



Şekil 4.38. Konik ve sivri kemer uçlu mermi için r ve L_b değerleri [82]

Deneysel çalışmada uygulanan ortalama mermi hızını kullanarak, merminin kinetik enerjisi yaptığı işe eşitlenebilir. Bu sayede her numune kümesi için koruma kalınlıkları hesaplanabilir ve hesaplanan bu kalınlıklar deney sonuçları ile karşılaştırılabilir.

4.4.1.9. Woodward Modeli

Woodward [83], Taylor [79] ve Thomson [82] modelinden yararlanarak yeni bir model sunmuştur. Konik uçlu mermiler karşısında sünek malzemelerde hedef kalınlığı yüksek olduğunda sünek delik oluşumu (Şekil 4.37a) görülürken, delik çapı yaklaşık hedef kalınlığına eşit olduğu durumda hasar mekanizmasında değişim gerçekleşmektedir ve çukur oluşumu (Şekil 4.37b) görülmektedir. Woodward modelinde çukur oluşumu esnasında yapılan toplam iş (W) hesaplanmaktadır ve denklem (4.25)'te gösterilmiştir.

$$W = (\pi/2)bh\sigma_{a(h)}(b + (\pi/2)h) + 1,42\pi\sigma_{A(h)}h(h/1,81)^2 \quad (4.25)$$

$\sigma_{a(h)}$ = Hedefin akış gerilmesi (Pa)

b = Merminin ya da deliğin yarıçapı (m)

Bu model oluşabilecek bütün hasar mekanizmaları için uygun sonuçlar vermemektedir. Sünek malzemeler için uygun sonuçlar verirken, daha düşük süneklilikte oluşan hasar mekanizmalarında (taç yaprağı oluşumu, parçalanma, gevrek kırılma, adyabatik kayma hasarı gibi) yeterince başarılı değildir. Akış gerilmesi (σ_a) verisi bu çalışmada mevcut olmadığı için bu model ile kullanılmamıştır.

4.4.1.10. Übeyli ve Demir Modeli

Übeyli ve Demir modelinde [84], Thomson modeli [82] üzerinden hedef malzemenin tokluk ve sünekliliği eklenerek yeni bir model ortaya konmuştur. Bunun için hedef malzemenin çekme testinde elde edilen uzama miktarı (%) kullanılmıştır. Bu modelde diğerinden farklı olarak akma dayanımı yerine çekme dayanımı (σ_c) kullanılmıştır. Thomson modelinde [82] merminin yaptığı toplam iş (W) darbe anındaki kinetik enerjisine ($0,5m_mV_d^2$) eşitlenerek bir kalınlık ön değeri (T_h) elde edilir. Hedefin uzama miktarı (ε_h) ve sünekliliğe bağlı sabiti (u_s) kullanılarak önceden bulunan kalınlık ön değerinden (T_h) hedef malzemenin balistik koruma sağlayan kalınlığı (h_0) elde edilir. Übeyli ve Demir modeli denklem (4.26) ve denklem (4.27)'de gösterilmiştir.

$$T_h = \frac{(0,5m_mV_d^2)/36}{\pi r^2 [0,5\sigma_{c(h)} + A_m \rho_h (V_d r / L_b)^2]} \quad (4.26)$$

$$h_0 = \left[\frac{(100 - (\varepsilon_h u_s))}{100} \right] T_h \quad (4.27)$$

A_m = Mermi şekline bağlı sabit (konik uç için 1 ve sivri kemer uç için 1,86)

Sünekliğe bağlı sabit olan u_s değeri eğer hedef malzemenin sünekliği %13'den büyükse 2, küçükse 3 olarak alınmaktadır. Denklem (4.26)'te kullanılan 36 değeri, alınan sabit bir deneysel parametredir. Bu modelden elde edilen verilerle deney sonuçları karşılaştırılabilir.

4.4.1.11.Zaid ve Paul Modeli

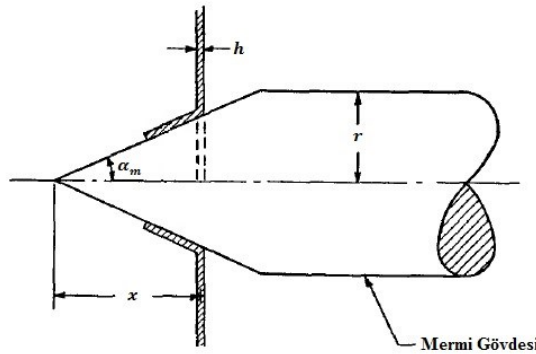
Zaid ve Paul modeli [85], ince plakalı malzemeleri yüksek hızdaki konik uçlu mermilerle normal darbe altında balistik olarak incelemiştir. Yapılan bu modellemede görülen hasar mekanizmaları taç yaprağı oluşumu ve çukur oluşumudur. Yapılan deneysel çalışmada taç yapraklarında radyal gerinme görülmediğinden modellemede buna göre yapılmıştır. Yapılan bu modelde mermi hız düşümü (ΔV) sunulmuştur ve denklem (4.28), denklem (4.29) ve denklem (4.30)'da gösterilmiştir.

$$\Delta V = V_d - u \quad (4.28)$$

Mermi hız düşümü, merminin darbe hızı (V_d) ile anlık hızının (u) farkına eşittir.

$$\Delta V(x) = [\pi \rho_h h (x \tan \alpha_m)^2 / m_m] u \sin \alpha_m \quad (4.29)$$

Mermi hız düşümünün (ΔV) yeterince düşük olması durumunda, denklem (4.29)'da merminin anlık hızı (u) yerine darbe hızı (V_d) kullanılabilir. Denklemde kullanılan ifadeler Şekil 4.39'da gösterilmiştir.



Şekil 4.39. Zaid ve Paul modeli hedefin delinme anı [85]

Mermi gövdesi hedef ile kesiştiği anda toplam hız düşümü (ΔV_{top}) elde edilmektedir ve yaklaşık değeri denklem (4.30)'da gösterilmiştir.

$$\Delta V_{top} \approx (\pi \rho_h h r^2 / m_m) V_d \sin \alpha_m \quad (4.30)$$

Bu model ile delinen numunelerin toplam hız düşümleri denklem (4.30) ile hesaplanarak artık hızları (V_a) elde edilebilir.

Yalın zırhlar için yapılan diğer çalışmalar [86-91] incelenmiştir. Recht ve Ipson [86], hedef kalınlığı yaklaşık mermi çapına eşit olan plakalar için bir model sunmuştur. Yapılan çalışmada dik ve eğik açılı darbeler kullanılmıştır. Dik uygulanan darbeler için hasar mekanizması olarak tıkaç oluşumu görülmektedir. Bu uygulamada delinme esnasında oluşan tıkaç ve hedef plaka arasında kayma enerjisinin hızdan bağımsız olduğu düşünülerek artık hız (V_a) hesaplanmıştır. Gupta ve Madhu [87], 10 ila 25 mm kalınlığı aralığında düşük karbonlu çelik numunelere çekirdek çapı 6,2 mm olan ZD mermiler ile balistik test uygulamıştır. Yapılan deneysel çalışmada hızları 820 m/s olan mermiler ile hedef yüzeyine dik ve açılı darbeler uygulanmıştır. Elde edilen deneysel verilerle normal (dik açılı) ve açılı darbe için analitik modelleme yapılmıştır. Açılı darbe için yapılan yaklaşımda, Goldsmith ve Finnegan [88] tarafından tanımlanan yüzde boyutsuz hız düşümünden faydalanılmıştır. Gupta ve Madhu [89], yaptıkları başka bir çalışmada yalın ve çok katmanlı olarak düşük karbonlu çelik, HHZ çeliği ve alüminyum malzemelerinin balistik başarımlarını incelemiştir. Deneysel çalışmada normal ve açılı darbeler kullanılmıştır. Kullanılan plaka kalınlıkları 4,7 ila 40 mm arasındadır. Plaka kalınlıklarının mermi çapına oranı 0,75 ila 6,5 arasındadır ve mermi hızları 800-880 m/s aralığındadır. Gupta ve Ansari [90], farklı kalınlıklardaki alüminyum numuneler üzerinde sivri kemer uçlu mermilerle normal darbe altında balistik deney gerçekleştirmişlerdir. Uygulanan deneysel çalışma ile analitik modelleme yapılarak balistik sınır ve artık hız denklemleri sunulmuştur. Levy ve Goldsmith [91], ince plakalı malzemelerin yarı küresel uçlu mermiler ile normal darbe altında delinme ve nüfuz etme (tam delinmenin gerçekleşmediği) aşamalarını incelemiştir. Deneysel çalışmada düşük karbonlu çelik ve 2024 AA kullanılmıştır.

4.4.2. Katmanlı Kompozitler için Analitik Modeller

4.4.2.1. Florence Modeli

Florence modeli [92], seramik ön katman ve sünek arka katmandan oluşan iki katmanlı kompozit zırhlarda balistik sınırın (V_{50}) hesaplanması için model sunmuştur. Bu model denklem (4.31) ve denklem (4.32)'de gösterilmektedir.

$$(V_{50})^2 = \frac{\alpha_b \varepsilon_{(2)} \sigma_{\zeta(2)} h_{(2)} z_k [(\rho_{(1)} h_{(1)} + \rho_{(2)} h_{(2)}) z_k + m_m]}{0,91 m_m^2} \quad (4.31)$$

$$z_k = \pi (r + 2h_{(1)})^2 \quad (4.32)$$

ε = Kopma uzaması

ρ = Yoğunluk (kg/m^3)

z_k = Mermi-seramik bileşimine dayalı deneysel parametre

Florence modelinde [92], hedefin malzeme bileşimi (seramik/metal) sabiti olan α_b ifadesi 1 olarak alınmaktadır. Ben-Dor ve arkadaşları [93], yaptıkları çalışmada Florence modelini [92] kullanarak en uygun alan yoğunluğu ve katman kalınlığı için yaklaşık analitik denklemler sunmuştur. Bu denklemler zırh bileşenlerinin belirleyici malzeme özelliği parametreleri, merminin kesit alanı ve ağırlığı ile darbe hızının işlevidir. Bu çalışmada sunulan yaklaşımlar denklem (4.33) ile denklem (4.42) arasında gösterilmektedir.

$$A_Y = \rho_{(1)} h_{(1)} + \rho_{(2)} h_{(2)} \quad (4.33)$$

$$\bar{h}_{(i)} = h_{(i)} / r, \quad i = 1, 2 \quad (4.34)$$

$$\bar{\rho}_{(i)} = \pi r^3 \rho_i / m_m, \quad i = 1, 2 \quad (4.35)$$

$$\bar{w} = V_{50} \sqrt{\frac{0,91 \rho_{(2)}}{\alpha_b \varepsilon_{(2)} \sigma_{\zeta(2)}}} \quad (4.36)$$

$$\bar{A}_Y = \pi r^2 A_Y / m_m \quad (4.37)$$

Denklem (4.33)'te geçen A_Y , alan yoğunluğunu ifade etmektedir. Denklem (4.34) ile denklem (4.37) arasında geçen \bar{h} , $\bar{\rho}$, \bar{w} ve \bar{A}_Y boyutsuz değişkenlerdir ve i değeri ön katman (seramik) için 1 ve arka katman (metal) için 2 olarak alınmaktadır. Yapılan yaklaşımlardan biride darbe hızı (V_d), artık hız (V_a) ve balistik sınır (V_{50}) arasındadır ve denklem (4.38)'de gösterilmiştir.

$$(V_d/V_{50}) - (V_a/V_{50}) = 1 \quad (4.38)$$

Hetherington ve Rajagopalan'ın [94] yaptıkları çalışmada geçen veriler kullanılarak $\alpha_b = 0,9$ olarak alınmıştır. Yapılan çalışmada [93] sunulan yaklaşımlardan biride en uygun katman kalınlıkları oranıdır ve denklem (4.39)'da gösterilmiştir.

$$h_{(2)}^{(i)}/h_{(1)}^{(i)} \approx 0,3(\rho_{(1)}/\rho_{(2)}) \quad (4.39)$$

Denklemlerde kullanılan simgelerin üst indislerinde bulunan i ifadesi en uygun durumu yani en uygun ölçüyü belirtmektedir. \bar{A}_Y , $\bar{h}_{(1)}$ ve $\bar{h}_{(2)}$ için en uygun durum denklem (4.40), denklem (4.41) ve denklem (4.42)'de gösterilmiştir.

$$\bar{A}_Y^{(i)} = (0,04 + 1,12\bar{\rho}_{(1)})\bar{w}^{0,425} \quad (4.40)$$

$$\bar{h}_{(1)}^{(i)} = \frac{(0,04+1,12\bar{\rho}_{(1)})\bar{w}^{1,895}}{\bar{\rho}_{(1)}(\bar{\rho}_{(1)}+1,29\bar{w}^{1,47}+0,1)} \quad (4.41)$$

$$\bar{h}_{(2)}^{(i)} = \frac{[(0,04+1,12\bar{\rho}_{(1)})\bar{w}^{1,895}][0,29+(0,1+\bar{\rho}_{(1)})\bar{w}^{-1,47}]}{\bar{\rho}_{(2)}(\bar{\rho}_{(1)}+1,29\bar{w}^{1,47}+0,1)} \quad (4.42)$$

Ben-Dor ve arkadaşları [95], yaptıkları başka bir çalışmada tahminlerin doğruluğunu arttırmak için deneysel veriler kullanıp tespit edilebilir bir katsayı α_b sunarak bu modeli genelleştirmişlerdir. Yapılan bu çalışmada sunulan en uygun $\bar{h}_{(1)}$ ve $\bar{h}_{(2)}$ değerleri denklem (4.43) ve denklem (4.44)'te gösterilmiştir.

$$\bar{h}_{(1)}^{(i)} = (588,5\bar{\rho}_{(1)} - 407,2\sqrt{\bar{\rho}_{(1)}} + 78,2)\bar{A}_Y - 0,25 \quad (4.43)$$

$$\bar{h}_{(2)}^{(i)} = \left(\frac{\bar{A}_Y}{\bar{\rho}_{(2)}} \right) - \left(\frac{\bar{\rho}_{(1)} \left[\left(588,5 \bar{\rho}_{(1)} - 407,2 \sqrt{\bar{\rho}_{(1)}} + 78,2 \right) \bar{A}_Y - 0,25 \right]}{\bar{\rho}_{(2)}} \right) \quad (4.44)$$

Bu model kullanılarak kompozit numuneler için balistik sınır (V_{50}) hesaplanabilir ve her ısıl işlem kümesinde kullanılan alan yoğunlukları için en uygun katman kalınlıkları ve katman kalınlıkları oranı belirlenebilir.

Hetherington [96], zırlı taşıtlarda kullanılan hafif iki bileşenli kompozit zırh sistemlerinde tasarımı iyileştirmek için bir yöntem kurmaya çalışmıştır. Florence kuramsal modeli [92] kullanılmış olup ifadeler en uygun katman kalınlıkları oranı için geliştirilmiştir. Hetherington [96], bu modelde seramiğin parçalanması esnasında harcanan enerjiyi ihmal edip tamamının arka katmana iletildiğini kabul etmiştir. Yapılan deneylerde alümina/alüminyum hedefleri ile 7,62 mm ZD mermiler kullanılmıştır. Kuramsal tahminler ve deneysel veriler arasında yakın uyumluluk gözlenmiştir. Sunulan modelde denklem (4.39)'daki gibi en uygun katman kalınlıkları oranı belirlenmiştir ve denklem (4.45) ile denklem (4.46)'da gösterilmiştir.

$$\frac{h_{(1)}^{(i)}}{h_{(2)}^{(i)}} \approx \left(\frac{8A_Y - \rho_{(1)}r}{2A_Y + \rho_{(1)}r} \right) \frac{\rho_{(2)}}{\rho_{(1)}} \quad (4.45)$$

Denklem (4.45)'te geçen $\rho_{(1)}r$ ifadesi alan yoğunluğundan (A_Y) önemli ölçüde küçükse ($\rho_{(1)}r \ll A_Y$) denklem (4.46) geçerli olacaktır.

$$h_{(1)}^{(i)} / h_{(2)}^{(i)} \approx 4(\rho_{(2)} / \rho_{(1)}) \quad (4.46)$$

Yapılan çalışmada [96]; alümina/alüminyum için 2,9, alümina/cam elyaf takviyeli plastik (CETP) için 2,5 ve alümina/Kevlar için 1,6 en uygun katman kalınlıkları oranı ($h_{(1)}^{(i)} / h_{(2)}^{(i)}$) belirlenmiştir. Bu yaklaşım ile yapılan bu çalışmada kullanılan numuneler için en uygun katman kalınlıkları oranı ($h_{(1)}^{(i)} / h_{(2)}^{(i)}$) belirlenebilir.

Wang ve Lu [97], Florence modelinden [92] yola çıkarak iki bileşenli kompozit zırh için en uygun katman kalınlığını sunmuştur. Hetherington modelinin [96] aksine kullandıkları modelde sabit bir alan yoğunluğu bulunmamaktadır. Toplam katman kalınlığı için sadece kompozit zırh malzemelerinin yoğunlukları ($\rho_{(1)}$, $\rho_{(2)}$) kullanılarak en uygun katman kalınlığı hesabı yapılmaktadır ve denklem (4.47) ile denklem (4.48)'de gösterilmiştir.

$$f(h) = \sqrt{25(2\rho_{(2)} - \rho_{(1)})^2 + 96\rho_{(2)}(\rho_{(1)} - \rho_{(2)})} \quad (4.47)$$

$$\frac{h_{(1)}^{(i)}}{h_{(2)}^{(i)}} = \frac{-5(2\rho_{(2)} - \rho_{(1)}) + f(h)}{7\rho_{(1)} + 2\rho_{(2)} - f(h)} \quad (4.48)$$

Yapılan çalışmada [97]; alümina/alüminyum için 4,2, alümina/cam elyaf kompozit için 4,3 ve alümina/Kevlar için 4,5 en uygun katman kalınlıkları oranı belirlenmiştir. Bu yaklaşım kullanılarak toplam katman kalınlığı için en uygun katman kalınlığı oranı ($h_{(1)}^{(i)}/h_{(2)}^{(i)}$) ve her numune kümesi için uygun katman kalınlıkları hesaplanabilir.

4.4.2.2. Gelişmiş Florence Modeli

Ben-Dor ve arkadaşları [98], yaptıkları çalışmada Florence modelini [92] geliştirip en uygun zırh tasarımı için kullanılmıştır. Tek bir darbe durumunda alan yoğunluğu ve toplam zırh kalınlığının en üst düzeye çıkarılması ile en alt seviyeye indirilmesi incelenmiştir. Tekrarlan darbe ile zırh tasarımı üzerine de çalışma yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada alüminyum/alümina zırhı kullanılmıştır. Sunulan model denklem (4.49) ile denklem (4.55) arasında gösterilmiştir.

$$E_k = \beta_k S_k \quad (4.49)$$

$$S_k = \pi h_{(1)}(r + a_{ms})/\cos \varphi \quad (4.50)$$

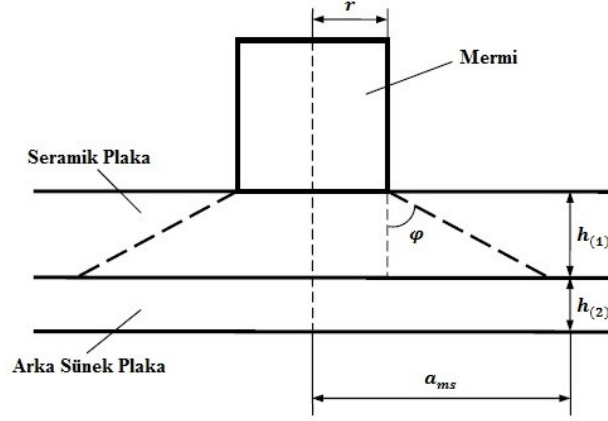
$$a_{ms} = r + h_{(1)} \tan \varphi \quad (4.51)$$

$$E_k = \text{Konik oluşumu için gerekli enerji (J)}$$

β_k = Enine kayma için birim kayma alanına düşen kırılma enerjisi (kg/s²)

S_k = Seramik malzemede oluşan koniğin yanal alanı (m²)

Darbe esnasında gerçekleşen konik oluşumu ile denklem (4.50) ve denklem (4.51)'de geçen seramik konik açısı (φ) ve a_{ms} uzunluğu Şekil 4.40'da gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Darbe esnasında gerçekleşen konik oluşumu [98]

Florence modelinde [92], seramik konik açısı $\varphi = 63^\circ$ olarak alınmıştır. Ben-Dor ve arkadaşlarının [98] sunduğu balistik sınır (V_{50}) denklem (4.52) ile denklem (4.55) arasında gösterilmiştir.

$$V_{50} = \frac{\sqrt{\pi\beta_a a_{ms}^2 h_{(2)}(m_m + m_{(1)} + m_{(2)})}}{m_m} + \sqrt{\frac{2\beta_k S_k}{m_m}} \quad (4.52)$$

$$m_{(1)} = (1/3)\pi\rho_{(1)}h_{(1)}(r^2 + a_{ms}r + a_{ms}^2) \quad (4.53)$$

$$m_{(2)} = \pi\rho_{(2)}h_{(2)}a_{ms}^2 \quad (4.54)$$

$$\beta_a = \varepsilon_{(2)}\sigma_{ç(2)}/0,91 \quad (4.55)$$

m = Kütle (kg)

β_a = Arka katman (metal) malzeme sabiti

Yapılan bu çalışmada seramik konik açısı (φ) verisi mevcut olmadığından ve konik oluşumu için gerekli enerji (E_k) hesaplanamayacağından dolayı bu modelin kullanılması mümkün değildir.

4.4.2.3. Woodward Modeli

Woodward [99], seramik esaslı kompozit zırhlar için model tasarlamıştır. Kullandığı modelde oluşan hasar mekanizmaları seramik için konik oluşumu ve parçalanma, arka katman için ise sünek delik oluşumunu (ince plakalar için çukur oluşumu) içermektedir. Yapılan hesaplamalarda seramik konik açısı (φ) 68° olarak alınmıştır ve sunulan model denklem (4.56) ile denklem (4.61) arasında gösterilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan dayanım; akma dayanımı, akış gerilmesi ya da aşınma basıncı olarak sunulmuştur. Model incelenirken dayanım olarak akma dayanımı alınmıştır.

$$W = \pi h_{(2)} h_x \sigma_{A(2)} [(2/3)h_{(2)} + 0,5h_x] \quad (4.56)$$

h_x = Yer değiştirme (merkezdeki plaka şekil değişimi, m)

Denklem (4.56)'da geçen W , arka katmanın çukur oluşumu esnasında yapılan toplam işi ifade etmektedir ve Woodward ile arkadaşlarının [100] yaptıkları çalışmadan alınmıştır. Şekil değişimi sonunda gerçekleşen yer değiştirmeyi hesaplamak için arka katmanın merkezinde oluşan kararsızlık gerinimi hesaplanmıştır ve denklem (4.57) ile denklem (4.59) arasında gösterilmiştir.

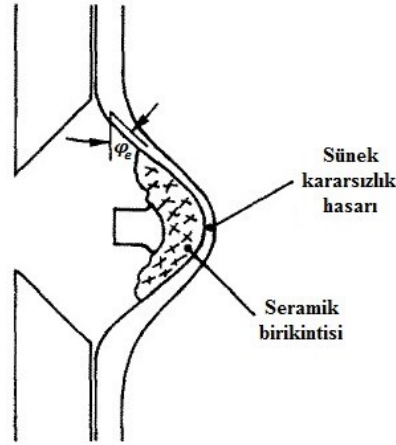
$$\sigma_e = A_2 + B_2 \varepsilon_e^n \quad (4.57)$$

$$11B_2 \varepsilon_m^{n+1} - 4(2n + 1)B_2 \varepsilon_m^n + 11A_2 \varepsilon_m - 4A_2 = 0 \quad (4.58)$$

$$\varepsilon_m = \ln(3 \cos \varphi_e - 2) \quad (4.59)$$

A_2, B_2, n = Sabit eğri uydurma parametreleri

Denklem (4.57)'de geçen σ_e ve ε_e , arka katmanın etkin gerilme-gerinimini ifade etmektedir. Denklem (4.58) ve denklem (4.59)'da geçen ε_m , arka katmanın merkezinde oluşan kararsızlık gerinimi ve φ_e ise şekil değişimine uğrayan arka katmanın eğilme açısını ifade etmektedir. Eğilme açısı (φ_e) hesaplandıktan sonra basit geometri ile yer değiştirme (h_x) hesaplanabilir. Eğilme açısı (φ_e) Şekil 4.41'de gösterilmiştir.



Şekil 4.41. Woodward hasar modeli [99]

$$E_e = \frac{m_m V_d^2}{2} + \left(\frac{\pi}{8}\right) \left[\frac{\rho(1)h_s}{5} + \frac{\rho(2)h(2)}{3} \right] \left[\frac{d_k^4 V_h^2}{(d_k - d)^2} \right] \quad (4.60)$$

h_s = Seramiğin aşınma sonrasında azaltılmış kalınlığı (m)

d_k = Koninin aşınma sonrasında taban çapı (m)

V_h = Hedefin hızı (m/s)

Denklem (4.60)'da geçen E_e , etkin kinetik enerjiyi ifade etmektedir ve yapılan toplam işe (W) eşittir. Şekil değişimi esnasında koniğin içindeki seramik ve koniğin taban çapıyla temas eden arka katman ileri doğru ivmelenecektir. Denklem (4.56) ve denklem (4.60) ile hesaplanan hedefin hızı (V_h) bu kısımların (ivmelenen seramik ve arka katman) hızını vermektedir. Eğer aşınma esnasında seramiğin kalınlığı sıfıra kadar inerse ($h_s = 0$) daha yüksek mermi hızı arka katmana iletilecektir. Bu durumun yaşanması halinde denklem (4.61) geçerli olacaktır.

$$\frac{m_m (V_2 - V_d)^2}{2} = \frac{\pi d^2 h(2) \sigma_{A(2)}}{2} \quad (4.61)$$

V_2 = Arka katmanın hızı (m/s)

Bu çalışmada elde edilen deneysel veriler bu model için yetersiz kaldığından kullanılmamıştır.

Seramik esaslı katmanlı kompozit zırhlar için sunulan diğer önemli çalışmalar ise Zaera ve Sanchez-Galvez [101], den Reijer [102], Gonçalves ve arkadaşları [103] ile Chocron Benloulo ve Sanchez-Galvez'in [104] sunduğu kuramsal modellerdir. Bu modeller bu çalışmada kullanılmadığından incelenmemiştir.

4.4.3. Analitik Yöntemlerin Karşılaştırılması

Analitik yöntemler ile karşılaştırma yapılırken darbe hızı (V_d) olarak deney çalışmasında kullanılan ortalama mermi hızı 778,5 m/s alınmıştır. Analitik yöntemlerde kullanılan mermi ölçüleri için çekirdeğin ölçüleri kullanılmıştır. Mermi kütlesi (m_m) 4,63 g, mermi çapı (d) 5 mm, mermi uzunluğu (L) 28 mm, mermi burun uzunluğu (L_b) 12 mm ve merminin yarım koniklik açısı (α_m) 17° olarak alınmıştır. Hedef yoğunlukları için çeliğin yoğunluğu (çelik ρ_h , kompozit $\rho_{(2)}$) $7,84 \text{ g/cm}^3$ ve seramiğin yoğunluğu ($\rho_{(1)}$) $3,2 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır.

4.4.3.1. Çelikler

Wijk modelinde [68], tek eksenli akma dayanımı (Y_T) olarak çekme testinde elde edilen akma dayanımları kullanılmıştır. Her ısıl işlem kümesi için hedef delinme direnci parametresi (β_h) 5 alınarak batma derinlikleri (P) hesaplanmıştır. Ayrıca her ısıl işlem kümesinin deneysel çalışmada elde edilen ortalama batma derinlikleri kullanılarak hedef delinme direnci parametreleri (β_h) hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Wijk modeli [68] hesaplanan veriler

Isıl İşlem	Normalleştirme	200 °C Menevişleme	400 °C Menevişleme
$\beta_h = 5$ için P (mm)	18,5	10	10,6
β_h	7,1	13,5	7,3

Çizelge 4.9'da görüldüğü gibi batma derinlikleri normalleştirme işlemi için yüksek çıkarken menevişleme işlemleri için daha düşük çıkmıştır. Her ısıl işlem kümesi için hesaplanan batma derinlikleri arasındaki ilişki deneysel çalışmada elde edilen balistik

başarım ile uyumludur. En yüksek balistik başarımlar deneysel çalışmada olduğu gibi 200 °C’de menevişleme ısıl işleminde görülürken menevişleme işlemlerinde hesaplanan batma derinliklerinin birbirine yakın olması malzemelerin akma dayanımlarının birbirine çok yakın olduğundan kaynaklanmaktadır. Deney sonuçları ile hesaplanan batma derinlikleri arasındaki farklar normalleştirme, 400 °C’de ve 200 °C’de menevişleme işlemleri için sırasıyla yaklaşık %42,3, %47,2 ve %170,3 değerlerindedir. Hedef malzemenin sertlik ve dayanım değerleri arttıkça hesaplanan batma derinlikleri deneysel sonuçtan giderek uzaklaşmaktadır. Bunun nedeni hedef malzemenin artan sertlik ve dayanım değerleri ile delinme direncinin de artmasıdır. Her ısıl işlem kümesi için hesaplanan β_h değerlerine baktığımızda, yükselen sertlik ve dayanım değerleri ile beraber artarak yükseldiği görülmektedir.

Taylor modeli [79] ve Thomson modelinde [82] yapılan toplam iş (W) merminin numuneye çarptığı andaki kinetik enerjisine ($0,5m_mV_d^2$) eşitlenerek her ısıl işlem kümesi için koruma kalınlıkları hesaplanmıştır. Taylor modelinde [79] geçen şekil değişimi türüne bağlı A_d sabiti 2,66 (simetrik şekil değişimi) olarak alınmıştır. Woodward [83], delik çapı ($2b$) ve hedef kalınlığı (h) oranı 1’e geldiği zaman şekil değişimi türünde dönüşüm (simetrik→simetrik olmayan) gerçekleştiğini sunmuştur. Bu çalışmada 5 mm ve altında yalın çelik numune kullanılmadığı ve deneysel çalışmada oluşan şekil değişimleri ile uyumlu olduğu için simetrik şekil değişimi tercih edilmiştir. Übeyli ve Demir [84] modelinde kullanılan sabitler yapılan bu çalışmaya göre yeniden düzenlenerek “Değiştirilmiş Übeyli ve Demir modeli” oluşturulmuştur. Model üzerinde yapılan ilk değişiklikte (1) deney sabiti olarak kullanılan 36 yerine 5 ve sünekliğe bağlı u_s sabiti için uzama değeri %12 ve üzerinde ise 2, altında ise 4 olarak alınmıştır. Übeyli ve Demir modelindeki [84] gibi malzeme dayanımı olarak çekme dayanımı kullanılmıştır. Yapılan ikinci değişiklikte ise (2) birincisinden (1) farklı olarak kullanılan 5 sabiti yerine 6 alınmıştır ve çekme dayanımı yerine akma dayanımı kullanılmıştır. Übeyli ve Demir modeli [84] Thomson modelinden [82] uyarlanmıştır ve Thomson modelinde [82] ise malzeme dayanım değerleri olarak akma dayanımı kullanılmıştır. Bulunan sonuçlar Çizelge 4.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Çelikler için hesaplanan koruma kalınlıkları

Isıl İşlem	Taylor (mm)	Thomson (mm)	Übeyli ve Demir ¹ (mm)	Übeyli ve Demir ² (mm)
Normalleştirme	69,7	120,8 (45,4)	12,5	14,5
200 °C Menevişleme	37,4	77,4 (29,1)	8,6	8,8
400 °C Menevişleme	39,7	80,9 (30,4)	11,2	10,3

1 Değiştirilmiş Übeyli ve Demir modeli (çekme dayanımı)

2 Değiştirilmiş Übeyli ve Demir modeli (akma dayanımı)

Çizelge 4.10'da görüldüğü gibi Taylor modeli [79] ile Thomson modelinde [82] bulunan sonuçlar çok yüksek çıkmıştır. Thomson modelinin [82] Taylor modelinden [79] daha yüksek çıkmasının sebebi Thomson modelinde [82] simetrik olmayan şekil değişimini kullanmıştır. Bu çalışmada, balistik deney sonrası oluşan şekil değişimi ise simetrik şekildedir. Taylor'a [79] göre simetrik şekil değişimi için gereken enerji simetrik olmayan şekil değişimine göre 2,66 kat daha fazladır. Bu değer göz önünde bulundurularak Thomson modeli [82] ile yeniden hesaplama yapıldığında çıkan sonuçlar normalleştirme, 200 °C ve 400 °C'de menevişleme işlemleri için sırasıyla 45,4, 29,1 ve 30,4 mm'dir. Bu sonuçlar Taylor modeline [79] göre deneysel verilere daha yakındır. Taylor [79] ve Thomson [82] modelinde menevişlenmiş numunelerin koruma kalınlıklarının birbirine çok yakın çıkmasının nedeni malzemelerin akma dayanımlarının çok yakın olmasıdır. Değiştirilmiş Übeyli ve Demir modelinde (1 ve 2) hesaplanan sonuçlar ile deney sonuçları karşılaştırıldığında oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Normalleştirme uygulanan numunelerde 12 mm'ye kadar delinirken 15 mm numunelerde tam başarımla görülmüştür. 200 °C'de menevişleme uygulanan numunelerde 9 mm'de tam koruma sağlanırken 8,5 mm'de %50 başarımla ve 8 mm'de tam delinme görülmüştür. 400 °C'de menevişleme uygulanan numunelerde ise 9 mm'de delinme görülürken 12 mm'de tam başarımla sağlanmıştır. Akma dayanımı kullanılan Değiştirilmiş Übeyli ve Demir modelinde (2), normalleştirme ısıl işlemi için hesaplanan koruma kalınlığı daha yüksek çıkmıştır. Deneysel çalışmada 15 mm numunelerde ortalama yaklaşık 14,1 mm batma derinliği görüldüğünden koruma kalınlığının denenen kalınlığa yakın olduğu düşünülmüştür. Bu sebepten akma dayanımı kullanılan modelin (2), çekme dayanımı kullanılan modele (1) göre daha iyi sonuçlar verdiği söylenebilir. Deneysel alınan sabitlerin (5

ve 6) kullanılması, Thomson modelinde [82] alınan şekil değişimi biçimi olarak ince levhalarda görülen çukur oluşumundan kaynaklanmaktadır.

Pol modeli [69] kullanılarak bütün numuneler için balistik sınır (V_{50}) hesaplanmıştır. Zaid ve Paul modelinde [85], delinen numuneler için toplam mermi hız düşümleri (ΔV_{top}) hesaplanmıştır. Hesaplanan toplam hız düşümleri (ΔV_{top}) darbe hızından (V_d) çıkarılarak artık hızlar (V_a) hesaplanmıştır. Normalleştirme uygulanan numunelerde batma derinlikleri mermi burun uzunluğundan ($L_b = 12$ mm) yüksek olduğu için merminin gövdesi çelik plakaya girmiştir. Bu yüzden normalleştirme uygulanan numunelerde tamamı için hesaplama yapılmıştır. Bulunan sonuçlar Çizelge 4.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Çelikler için hesaplanan hız değerleri

Numune Kodu	Pol Modeli V_{50} (m/s)
NOS1	442,4
NOS2	578,7
NOS3	714,9
NOS4	851,0
NOS5	987,0
2TS1	417,3
2TS2	479,5
2TS3	541,7
2TS4	572,7
2TS5	603,7
2TS6	789,7
2TS7	975,5
2TS8	1161,2
2TS9	1346,9
4TS1	586,2
4TS2	766,8
4TS3	947,3
4TS4	1127,6
4TS5	1307,9

Çizelge 4.11’e baktığımızda, Pol modelinde [69] çıkan sonuçların ısıl işlem kümeleri arasında birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Normalleştirme işlemine baktığımızda kullanılan darbe hızında (778,5 m/s) balistik başarımlar gösteren numunelerde (NOS3, NOS4 ve NOS5) %50’den fazla delinme görülmüştür.

Hesaplanan balistik sınır hızları NOS3 numunesindeki gibi darbe hızından düşük olması gerekirken NOS4 ve NOS5 numunelerinde yüksek çıkmıştır. 200 °C’de menevişleme işlemine baktığımızda hesaplanan balistik sınır hızları deney sonucuyla uyumluyken 2TS4, 2TS5 ve 2TS6 numunelerinde durum farklıdır. Hesaplanan balistik sınır hızlarına göre 2TS4 ve 2TS5 numunelerinin %50’den fazla delinmesi gerekirken deneysel çalışmada görülen bu değerler sırasıyla yaklaşık %39 ve %34’tür. 2TS6 numunesine baktığımızda ise balistik sınır hızı darbe hızına çok yakın çıkmıştır ama deneysel çalışmada görülen delinme değeri yaklaşık %37’dir. 400 °C’de menevişleme işlemine baktığımızda 4TS2 ve 4TS3 numunelerinde delinme miktarları sırasıyla %52 ve %51 yani balistik sınıra çok yakındır. Hesaplanan balistik sınır hız değerleri 4TS2 numunesinde darbe hızına çok yakınken 4TS3 numunesinde darbe hızından yüksektir. Genel olarak bu modele baktığımızda numunelerin bir kısmında hesaplanan balistik sınırın deneysel çalışmada alınan sonuçlar ile uyumsuz olduğu görülmektedir. Bunun ana nedeni gerçekleşen hasar mekanizmasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada numunelerde sünek delik oluşumu görülürken, Pol modelinde [69] kullanılan hasar modeli daha gevrek olan taç yaprağı oluşumudur. Hasar mekanizmasının değişmesiyle yapılan toplam iş değişeceğinden bu farklar görülmektedir.

4.4.3.2. Seramik Esaslı Katmanlı Kompozitler

Hetherington modeli [96] kullanılarak en uygun katman kalınlıkları oranı $(h_{(1)}^{(i)}/h_{(2)}^{(i)})$ hesaplanmıştır. Ben-Dor ve arkadaşlarının [93-95] sunduğu model kullanılarak en uygun katman kalınlıkları $(h_{(1)}^{(i)}, h_{(2)}^{(i)})$ ve katman kalınlıkları oranı $(h_{(1)}^{(i)}/h_{(2)}^{(i)})$ hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12’de görüldüğü gibi en uygun katman kalınlık oranları $(h_{(1)}^{(i)}/h_{(2)}^{(i)})$ çok yüksek çıkmıştır. Seramik ön katman kalınlıkları arka katman kalınlıklarına göre çok daha yüksektir. Bunun sebebi seramik ve çeliğin arasındaki yoğunluk farkıdır. Kullanılan bu modellerde yoğunluk farkı arttıkça katman kalınlıkları arasındaki farkta artmaktadır ve bu yüzden bu çalışmada kullanılan malzeme birleşimi

(SiC/34CrNiMo6) üzerinde uygulanması uygun değildir. Bu modeller daha çok alümina/alüminyum alaşımı gibi yoğunluk farkı daha az olan katmanlı kompozitler için daha uygundur. Birinci çalışma [93] ile ikinci çalışma [95] arasındaki fark birinci çalışmada [93] değişen arka katmanın mekanik özelliklerine göre sunduğu en uygun alan yoğunlukları ($A_Y^{(i)}$) bu çalışmada kullanılan deneysel veriler ile farklılık gösterirken, ikinci çalışmada [95] sunulan en uygun alan yoğunlukları ($A_Y^{(i)}$) bu çalışmadaki verilerle aynıdır. Kullanılan bütün modellerde en uygun katman kalınlık oranları ($h_{(1)}^{(i)}/h_{(2)}^{(i)}$) birbirine çok yakın çıkmıştır. Wang ve Lu modelinde [97] ise katman kalınlıkları oranı negatif çıktığından yapılan hesaplamada mutlak değer alınmıştır ve toplam katman kalınlığı için en uygun katman kalınlıkları oranı 2,35 hesaplanmıştır. Kullanılan her numune için en uygun katman kalınlıkları ve toplam alan yoğunlukları Çizelge 4.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. Kompozitler için hesaplanan en uygun katman kalınlıkları ve oranı

Numune Kodu	Ben-Dor ¹			Ben-Dor ²			Hetherington
	$h_{(1)}^{(i)}$ (mm)	$h_{(2)}^{(i)}$ (mm)	$\frac{h_{(1)}^{(i)}}{h_{(2)}^{(i)}}$	$h_{(1)}^{(i)}$ (mm)	$h_{(2)}^{(i)}$ (mm)	$\frac{h_{(1)}^{(i)}}{h_{(2)}^{(i)}}$	$\frac{h_{(1)}^{(i)}}{h_{(2)}^{(i)}}$
NOC1	13,9	1,7	8,37	16,6	2,2	7,64	9,14
NOC2	16,2	1,9	8,40	22,4	2,8	7,95	9,30
NOC3	18,1	2,1	8,42	28,2	3,5	8,14	9,40
NOC4	19,7	2,3	8,43	34,0	4,1	8,27	9,46
NOC5	21,2	2,5	8,43	39,7	4,7	8,37	9,51
2TC1	10,8	1,3	8,27	10,9	1,5	7,08	8,84
2TC2	12,0	1,4	8,32	12,8	1,7	7,32	8,96
2TC3	13,0	1,6	8,35	14,7	2,0	7,50	9,06
2TC4	13,9	1,7	8,37	16,6	2,2	7,64	9,14
2TC5	16,2	1,9	8,40	22,4	2,8	7,95	9,30
2TC6	18,1	2,1	8,42	28,2	3,5	8,14	9,40
2TC7	19,7	2,3	8,43	34,0	4,1	8,27	9,46
2TC8	21,2	2,5	8,43	39,7	4,7	8,37	9,51
4TC1	13,9	1,7	8,37	16,6	2,2	7,64	9,14
4TC2	16,2	1,9	8,40	22,4	2,8	7,95	9,30
4TC3	18,1	2,1	8,42	28,2	3,5	8,14	9,40
4TC4	19,7	2,3	8,43	34,0	4,1	8,27	9,46
4TC5	21,2	2,5	8,43	39,7	4,7	8,37	9,51

1 Birinci çalışma [93]

2 İkinci çalışma [95]

Çizelge 4.13. Wang ve Lu modeli [97] için kompozit numunelerin en uygun katman kalınlıkları ve toplam alan yoğunlukları

Numune Kodu	Wang ve Lu modeli ($h_{(1)}^{(i)} / h_{(2)}^{(i)} = 2,35$)		
	$h_{(1)}^{(i)}$ (mm)	$h_{(2)}^{(i)}$ (mm)	Toplam Alan Yoğunluğu (kg/m^2)
NOC1	9,8	4,2	64,2
NOC2	11,9	5,1	78,0
NOC3	14,0	6,0	91,7
NOC4	16,1	6,9	105,5
NOC5	18,2	7,8	119,2
2TC1	7,7	3,3	50,4
2TC2	8,4	3,6	55,0
2TC3	9,1	3,9	59,6
2TC4	9,8	4,2	64,2
2TC5	11,9	5,1	78,0
2TC6	14,0	6,0	91,7
2TC7	16,1	6,9	105,5
2TC8	18,2	7,8	119,2
4TC1	9,8	4,2	64,2
4TC2	11,9	5,1	78,0
4TC3	14,0	6,0	91,7
4TC4	16,1	6,9	105,5
4TC5	18,2	7,8	119,2

Çizelge 4.13'te görüldüğü gibi bu modelde de seramik kalınlığı çelik kalınlığından yüksek çıkmıştır ama diğer modellerin aksine bu modelde en uygun katman kalınlıkları birbirlerine çok daha yakındır. Bu model toplam alan yoğunluğunu değil toplam katman kalınlığını kullandığından hesaplanan katman kalınlıklarının toplam alan yoğunlukları bu çalışmadan farklıdır. Bu modelde hesaplanan toplam alan yoğunlukları deneysel çalışmada kullanılan alan yoğunluklarından daha düşük çıkmıştır.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

- Kullanılan çelikte, menevişleme işleminde sertlik, dayanım ve balistik başarımların değerleri normalleştirme işlemine göre daha yüksektir.
- Kullanılan çelikte, menevişleme sıcaklığı arttıkça tokluk artarken sertlik ve dayanım ile balistik başarımlar azalmaktadır.
- Kullanılan çelikte, malzemenin dayanımı balistik başarımlara tokluğundan daha çok etki etmektedir.
- Kompozit numuneler, yalın çeliklere göre daha düşük alan yoğunluğunda daha yüksek balistik başarımlar göstermektedirler.
- Balistik deney sonrasında numunelerin içyapılarında değişiklik görülmemiştir. Delik bölgesi yakınlarında dönüşmüş AKB oluşmaya başlarken delik etrafında tam dönüşmüş AKB (beyaz bant) gözlemlenmiştir.
- Yalın çeliklerde en iyi balistik başarımlar, 200 °C'de menevişlenmiş numunelerde 70,6 kg/m² ve üzeri alan yoğunluklarında tam başarımlar ve 66,6 kg/m² alan yoğunluğunda %50 başarımlar ile elde edilmiştir. Seramik esaslı katmanlı kompozitlerde ise en iyi balistik başarımlar, arka katmanı 200 °C'de menevişlenmiş numunelerde 54,6 kg/m² ve üzeri alan yoğunluklarında tam başarımlar ile elde edilmiştir.
- Bu çalışmada kullanılan 34CrNiMo6 çeliğine yakın kimyasal bileşime sahip olan 4340 çeliğinde [5] menevişleme sonrası aynı alan yoğunluğunda balistik başarımlar sağlanmıştır. 4340 çeliğinin [5] arka yüzeyinde darbe sonrası çatlak görülürken bu çalışmada kullanılan çelikte görülmemiştir. Bu yüzden 34CrNiMo6 çeliğinin 4340 çeliğinden daha iyi balistik başarımlar sağladığı söylenebilir. (Kullanılan mermi ile darbe hızları aynı ve malzeme sertlikleri birbirine yakın)
- Balistik başarımlar sağlamış yalın çeliklerde; en düşük batma derinliği 200 °C'de menevişlenmiş numunelerde 70,6 kg/m² alan yoğunluğunda 3,14 mm ile görülürken, 200 °C'de menevişlenmiş numunelerde ortalama 3,76 mm ile elde edilmiştir.

- Bu çalışmada kullanılan darbe hızına çok yakın hızda 7,62 mm ZD mermi ile test edilen, 200 °C’de menevişlenmiş 34CrNiMo6 çeliğine çok yakın sertlik ve dayanım özelliklerine sahip ve tokluğu daha yüksek olan orta karbonlu yüksek dayanımlı zırh çeliğinde [2] 98 kg/m² alan yoğunluğunda balistik başarımlar sağlanmıştır. Bu çalışmada elde edilen alan yoğunluğundan yüksek çıkmasının nedeni kullanılan çelik çekirdeğin sertlik değeri bu çalışmada kullanılan 61-62 RSD-C değerinden daha yüksek olan 67 RSD-C olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Kullanılan çekirdeğin sertlik değerinin, hedef malzemenin mekanik özellikleri kadar balistik başarıma etki eden önemli bir unsur olduğu söylenebilir.
- Seramik esaslı katmanlı kompozit (SiC/34CrNiMo6) zırhlarda, yalnız çeliklerdeki en iyi balistik başarımlar (70,6 kg/m²) için ~%22,7 ağırlıkta azalma sağlanarak aynı balistik başarımlar elde edilmiştir.
- Poliüretan yapıştırıcı katmanın epoksi yapıştırıcı katmana göre darbe sonrasında daha fazla seramik parçalarını tuttuğu gözlemlenirken [44], bu çalışmada kullanılan akrilik bazlı yapıştırıcı darbe sonrasında seramik parçalarını tutamamıştır.
- Bu çalışmada 34CrNiMo6 çeliğinin bütüncül halde sağladığı en yüksek balistik başarımdaki mekanik özellikleri ile katmanlı kompozit halde en yüksek balistik başarımların sağlandığı arka katmanın mekanik özellikleri aynıdır. 4340 çeliğinde ise bütüncül halde kullanıldığı çalışmada [5] elde edilen en düşük başarımdaki mekanik özellikleri ile katmanlı kompozit halde kullanıldığı çalışmada [9] elde edilen en yüksek balistik başarımdaki arka katmanın mekanik özellikleri aynıdır. Zırh çeliklerinde, bütüncül halde başarımlar sağladığı mekanik özellikleri ile katmanlı kompozit halde başarımlar sağladığı mekanik özellikleri değişkenlik gösterebilir. Bütüncül halde elde edilen balistik başarımlar ile katmanlı kompozit halde balistik başarımlar tahmini yapmak yanıltıcı sonuçlar verebilir.

KAYNAKLAR

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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, 2009.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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, 2009.

- [10] 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.
- [11] Kuziak, R., Kawalla, R., Waengler, S., Advanced high strength steels for automotive industry, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8(2), 103-117, 2008.
- [12] Xiaodong Z., Zhaohui, M., Li, W., Current status of advanced high strength steel for auto-making and its development in baosteel, Baosteel Research Institute, Shanghai-China, 2005.
- [13] Galan, J., Samek, L., Verleysen, P., Verbeken, K., Houbaert, Y., Advanced high strength steels for automotive industry, *Revista de Metalurgia*, 48(2), 118-131, 2012.
- [14] Ford, R., Grant, R.G., Gilbert, A., Parker, P., Holmes, R., *Weapon: a visual history of arms and armor*, DK Publishing, New York, 2010.
- [15] Eggenberger, D., *An encyclopedia of battles: accounts of over 1,560 battles from 1479 B.C. to the present*, Dover Publications Inc., New York, 1985.
- [16] Tucker, S.C., *Battles that changed history : an encyclopedia of world conflict*, ABC-CLIO, California, 2011.
- [17] Robinson H.R., *Oriental armour*, Walker, New York, 1967.
- [18] Bhatnagar, A., *Lightweight Ballistic Composites Military and Law-Enforcement Applications*, Woodhead Publishing Limited and CRC Press, Cambridge-England, 2006.
- [19] Tarakçıoğlu, I., Gülümser, T., Kanat, Z.E., Süpüren, G., Çay, A., Balistik lifler (bölüm 1), *Tekstil ve Konfeksiyon*, 4, 232-236, 2007.
- [20] Meyers, M.A., *Dynamic behavior of materials*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1994.
- [21] Johnson, G.R., Cook, W.H., A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, *Seventh International Symposium on Ballistics*, 541-547, Hague-Netherlands, 19-21 April 1983.
- [22] 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.

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Ali, N.A., Thermomechanical processing of 34CrNiMo6 steel for large scale forging, The University of Sheffield Department of Material Science and Engineering, Doctor of Philosophy, Sheffield-UK, 276, 2014.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Lee, M., Yoo, Y.H., Analysis of ceramic/metal armour systems, *International Journal of Impact Engineering*, 25(9), 819-829, 2001.
- [31] Gingold, R.A., Monaghan, J.J., Smoothed particle hydrodynamics - Theory and application to non-spherical stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, 375-389, 1977.
- [32] 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.

- [33] 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.
- [34] Anderson Jr., C.E., Royal-Timmons, S.A., Ballistic performance of confined 99.5%-Al₂O₃ ceramic tiles, *International Journal of Impact Engineering*, 19(8), 703-713, 1997.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] Gilev, V.G., Rapid fracture of layered shields based on Al-Si₃N₄ composite material, *Metal Science and Heat Treatment*, 45(5-6), 177-182, 2003.
- [41] Medvedovski, E., Alumina ceramics for ballistic protection: Part 1, *American Ceramic Society Bulletin*, 81(3), 27-32, 2002.
- [42] Medvedovski, E., Alumina-mullite ceramics for structural applications, *Ceramics International*, 32(4), 369-375, 2006.
- [43] 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.

- [44] Übeyli, M., Yıldırım, R.O., Ögel, B., Investigation on the ballistic behavior of Al₂O₃/Al2024 laminated composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 196(1-3), 356-364, 2008.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] Jovicic, J., Zavaliangos, A., Ko, F., Modeling of the ballistic behavior of gradient design composite armors, *Composites: Part A*, 31(8), 773-784, 2000.
- [49] Jeffrey, J.S., Recommendations for determining the hardness of armor ceramics, *International Journal of Ceramic Product Development and Commercialization*, 1(3), 219-225, 2004.
- [50] Atapek, Ş.H., Zırh çeliklerinin fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda geliştirilmesi ve karakterizasyonu, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli*, 141, 2006.
- [51] Atapek, Ş.H., Bor katkılı bir zırh çeliğinin fiziksel metalurjik esaslar doğrultusunda geliştirilmesi ve balistik performansının değerlendirilmesi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli*, 228, 2011.
- [52] Özer, E., Farklı sıcaklıklarda menevişlenmiş yüksek dayanımlı-düşük alaşımlı bir çeliğin balistik başarımının incelenmesi, *15th International Materials Symposium*, 140-144, Denizli-Türkiye, 15-17 October 2014.
- [53] TS EN ISO 6892-1, *Metalik Malzemeler - Çekme Deneyi - Bölüm 1: Oda Sıcaklığında Deney Metodu*, 2011.
- [54] TS EN ISO 148-1, *Metalik Malzemeler - Charpy Vurma Deneyi - Bölüm 1: Deney Metodu*, 2011.

- [55] TS EN ISO 6507-1, Metalik Malzemeler - Vickers Sertlik Deneyi - Bölüm 1: Deney Metodu, 2007.
- [56] MIL-C-60617A, Military Specification, Cartridge, 7.62 mm: NATO, Armor Piercing, M61, 1991.
- [57] Zukas, J.A., High velocity impact dynamics, John Wiley & Sons Inc., New York, 1990.
- [58] Dodd, B., Bai, Y., Adiabatic shear localization: Frontiers and advances, Elsevier, London, 2012.
- [59] Dornmeval, R., Materials at high strain rates, (Editor: Blazynski, T.Z.), Elsevier Applied Science, England, 1987.
- [60] Rosenberg, Z., Dekel, E., Terminal ballistics, Springer, London, 2012.
- [61] Woodward, R.L., The penetration of metal targets which fail by adiabatic shear plugging, International Journal of Mechanical Sciences, 20(9), 599-607, 1978.
- [62] Woodward, R.L., A basis for modelling ceramic composite armour defeat, Research Report MRL-RR-3-89, DSTO Materials Research Laboratory, Australia, 1989.
- [63] Carlucci, D.E., Jacobson, S.S., Ballistics: theory and design of guns and ammunition, CRC Press, New York, 2008.
- [64] Corbett, G.G., Reid, S.R., Johnson, W., Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: a review, International Journal of Impact Engineering, 18(2), 141-230, 1996.
- [65] The resistance of various metallic materials to perforation by steel fragments; empirical relationships for fragment residual velocity and residual weight, Project Thor Technical Report No. 47, April 1961.
- [66] The resistance of various non- metallic materials to perforation by steel fragments; empirical relationships for fragment residual velocity and residual weight, Project Thor Technical Report No. 51, April 1963.
- [67] Stone, G.W., Projectile penetration into representative targets, Sandia Report SAND94-1490, Sandia National Laboratories, October 1994.
- [68] Wijk G., Hartmann, M., Tyrberg, A., A model for rigid projectile penetration and perforation of hard steel and metallic targets, Scientific Report FOI-R-1617-SE, FOI – Swedish Defence Research Agency, April 2005.

- [69] Pol, M.H., Bidi, A., Hoseini, A.V., Liaghat, G.H., Analysis of normal penetration of ogive - nose projectiles into thin metallic plates, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 3(2), 186-189, 2009.
- [70] Lambert, J.P., Jonas, G.H., Towards standardization in terminal ballistics testing: Velocity representation, Technical Report BRL-R-1852, USA Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1976.
- [71] Lambert, J.P., A residual velocity predictive model for long rod penetrators, Technical Report ARBRL-MR-02828, USA Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 1978.
- [72] Alekseevskii, V.P., Penetration of a rod into a target at high velocity, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2(2), 63-66, 1966.
- [73] Tate, A., A theory for the deceleration of long rods after impact, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 15(6), 387-399, 1967.
- [74] Tate, A., Further results in the theory of long rod penetration, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 17(3), 141-150, 1969.
- [75] Tate, A., Long rod penetration models—Part I. A flow field model for high speed long rod penetration, *International Journal of Mechanical Sciences*, 28(8), 535-548, 1986.
- [76] Tate, A., Long rod penetration models—Part II. Extensions to the hydrodynamic theory of penetration, *International Journal of Mechanical Sciences*, 28(9), 599-612, 1986.
- [77] Walker, J.D., Anderson Jr, C.E., A time-dependent model for long-rod penetration, *International Journal of Impact Engineering*, 16(1), 19-48, 1995.
- [78] Allen, W.A., Rogers, J.W., Penetration of a rod into a semi-infinite target, *Journal of the Franklin Institute*, *Journal of the Franklin Institute*, 272(4), 275-284, 1961.
- [79] Taylor, G.I., The formation and enlargement of a circular hole in a thin plastic sheet, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1, 103-124, 1948.
- [80] Bethe, H.A., An attempt at a theory of armor penetration, Ordnance Laboratory Report R-492, Frankford Arsenal, May 1941.
- [81] Wilkins, L.M., Guinan, M.W., Impact of cylinders on a rigid boundary, *Journal of Applied Physics*, 44(3), 1200-1206, 1973.

- [82] Thomson, W.T., An approximate theory of armor penetration, *Journal of Applied Physics*, 26(1), 80-82, 1955.
- [83] Woodward, R.L., The penetration of metal targets by conical projectiles, *International Journal of Mechanical Sciences*, 20(6), 349-359, 1978.
- [84] Demir, T., Metal ve katmanlı zırh malzemelerinin 7.62 mm'lik zırh delici mermiler karşısında balistik başarımlarının incelenmesi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 128, 2008.
- [85] Zaid, M., Paul, B., Mechanics of high speed projectile perforation, *Journal of the Franklin Institute*, 264(2), 117-126, 1957.
- [86] Recht, R.F., Ipson, T.W., Ballistic perforation dynamics, *Journal of Applied Mechanics*, ASME, 30(3), 384-390, 1963.
- [87] Gupta, N.K., Madhu, V., Normal and oblique impact of a kinetic energy projectile on mild steel plates, *International Journal of Impact Engineering*, 12(3), 333-343, 1992.
- [88] Goldsmith, W., Finnegan, S.A., Normal and oblique impact of cylindro-conical and cylindrical projectiles on metallic plates, *International Journal of Impact Engineering*, 4(2), 83-105, 1986.
- [89] Gupta, N.K., Madhu, V., An experimental study of normal and oblique impact of hard-core projectile on single and layered plates, *International Journal of Impact Engineering*, 19(5-6), 395-414, 1997.
- [90] Gupta, N.K., Ansari, R., Gupta, S.K., Normal impact of ogive nosed projectiles on thin plates, *International Journal of Impact Engineering*, 25(7), 641-660, 2001.
- [91] Levy, N., Goldsmith, W., Normal impact and perforation of thin plates by hemispherically-tipped projectiles—I. Analytical considerations, *International Journal of Impact Engineering*, 2(3), 209-229, 1984.
- [92] Florence, A.L., Interaction of projectiles and composite armor Part II, AMMRC CR 69-15, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, 64, 1969.
- [93] Ben-Dor, G., Dubinsky, A., Elperin, T., Frage, N., Optimization of two component ceramic armor for a given impact velocity, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 33(3), 185-190, 2000.

- [94] Hetherington, J.G., Rajagopalan, B.P., An investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armors, *International Journal of Impact Engineering*, 11(1), 33-40, 1991.
- [95] Ben-Dor, G., Dubinsky, A., Elperin, T., Optimization of two-component composite armor against ballistic impact, *Composite Structures*, 69(1), 89-94, 2005.
- [96] Hetherington, J.G., The optimization of two component composite armours, *International Journal of Impact Engineering*, 12(3), 409-414, 1992.
- [97] Wang, B., Lu, G., On the optimisation of two-component plates against ballistic impact, *Journal of Materials Processing Technology*, 57(1-2), 141-145, 1996.
- [98] Ben-Dor, G., Dubinsky, A., Elperin, T., Improved Florence model and optimization of two-component armor against single impact or two impacts, *Composite Structures*, 88(1), 158-165, 2009.
- [99] Woodward, R.L., A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat, *International Journal of Impact Engineering*, 9(4), 455-474, 1990.
- [100] Woodward, R.L., O'Donnell, R.G., Baxter, B.J., Nicol, B., Pattie, S.D., Energy absorption in the failure of ceramic composite armours, *Materials Forum*, 13, 174-181, 1989.
- [101] Zaera, R., Sanchez-Galvez, Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours, 21(3), 133-148, 1998.
- [102] Den Reijer, P.C., Impact on ceramic faced armour, Doctor of Philosophy, Delft University of Technology, 197, 1991.
- [103] Gonçalves, D.P., Melo, F.C.L., Klein, A.N., Al-Qureshi, H.A., Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(2-3), 307-316, 2004.
- [104] Chocron Benloulou, I.S., Sanchez-Galvez, V., A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors, *International Journal of Impact Engineering*, 21(6), 461-471, 1998.

ÖZGEÇMİŞ

1. **Adı Soyadı** : Emre ÖZER
2. **Doğum Tarihi** : 25.10.1985
3. **Ünvanı** : Araştırma Görevlisi
4. **Öğrenim Durumu** :

Derece	Bölüm/Program	Okul/Üniversite	Bitirme Yılı
Lise	Fen Bilimleri	Adana Fen Lisesi	2003
Lisans	Makine Mühendisliği	Çukurova Üniversitesi	2009

5. **Akademik Ünvanlar:**

Görevi	Bölümü	Kurumu	Yıl
Araştırma Görevlisi	İmalat Mühendisliği	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2013 –

6. **İş Tecrübesi:**

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yıl
Üretim Mühendisi	Kastamonu Entegre Ağaç Sanayi	2011 – 2013
Araştırma Görevlisi	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2013 –

7. **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler:**

- Özer E, Übeyli M, On the Impact Failure Mechanisms in an Armor Material Consisting of Silicon Carbide and Tempered Steel Layers, 22nd International Conference on Materials and Technology, 20-22 October 2014, Portoroz SLOVENIA.
- Özer E, Farklı Sıcaklıklarda Menevişlenmiş Yüksek Dayanımlı-Düşük Alaşımli Bir Çeliğin Balistik Başarımının İncelenmesi, 15th International Materials Symposium (IMSP'2014), 15-17 October 2014, Denizli TURKEY.

- Özer E, Übeyli M, A study on the impact resistance of laminated composites containing silicon carbide and normalized steel layers, XVIII International Conference on Mechanics of Composite Materials (MCM-2014), 02-06 June, 2014, Riga-LATVIA.