

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER YOĞUNLUKLU POLİETİLEN (UHMWPE)
KUMAŞ TABANLI KOMPOZİT ZIRHLARIN BALİSTİK DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ömer Faruk ÇİÇEK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaşar AYAZ

KASIM 2025

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER YOĞUNLUKLU POLİETİLEN (UHMWPE)
KUMAŞ TABANLI KOMPOZİT ZIRHLARIN BALİSTİK DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Ömer Faruk ÇİÇEK
(36193621005)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yaşar AYAZ

KASIM 2025

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bana destek olan tüm kişi ve kurumlara en içten teşekkürlerimi sunarım.

Öncelikle, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, akademik desteğini ve rehberliğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli tez danışmanım Doç. Dr. Yaşar AYZA'a en derin teşekkürlerimi sunarım. Onun yapıcı eleştirileri ve yönlendirmeleri, bu çalışmanın bilimsel yönünü güçlendirmiştir.

Tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Mehmet Burhan KARAKOÇ ve Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ'e, süreç boyunca sağladıkları katkılar ve kıymetli değerlendirmeleri için teşekkür ederim.

Adıyaman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Mehmet Fatih ŞAHAN'a, nazik destekleri ve katkıları nedeniyle müteşekkirim.

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından desteklenen “Ultra Yüksek Moleküler Yoğunluklu Polietilen (UHMWPE) Kumaş Tabanlı Kompozit Zırhların Balistik Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı FDK-2022-3133 kodlu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle İnönü Üniversitesi Rektörlüğü ile Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine,

Tez çalışması süresince karşılaştığım her sorunda yardımlarını esirgemeyen Makine Mühendisliği Bölümü Asistanı Yusuf Eren ERDOĞDU'ya ve katkılarıyla sürece değerli destek sunan Doç. Dr. Mustafa ALBAYRAK'a teşekkür ederim.

Malzeme hazırlıkları aşamasında özverili yardımlarıyla sürece doğrudan katkı sağlayan İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü yüksek lisans öğrencisi Ayça YILMAZ'a teşekkür ederim.

Tezde bulunan bilimsel çalışmalarımın evrensel ölçülerde geliştirilmesine büyük katkılarda bulunan Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Hakan YALÇINER ve Yapı Anabilim Dalı Başkanı Doç. Dr. Atilla KUMBASAROĞLU'na şükranlarımı sunarım.

Bu süreçte en büyük manevi desteği sağlayan sevgili eşim Merve Zeynep MEMUR ÇİÇEK'e, varlığıyla hayatıma neşe ve ilham katan kızım Nur Hafsa ÇİÇEK'e minnettarım.

Hayatım boyunca bana sevgisiyle yön veren, sabrın ve fedakârlığın ne demek olduğunu yaşayarak öğreten değerli annem Bedriye ÇİÇEK'e sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak; bana doğruyu, sabrı ve çalışmayı öğreten, bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, aramızdan erken ayrılmış sevgili babam Hamit ÇİÇEK'i rahmet ve özlemle anıyor, bu çalışmayı onun aziz hatırasına ithaf ediyorum.

ONUR SÖZÜ

Bu doktora tezinde sunduğum tüm bilgilerin bilimsel etik ve akademik kurallar çerçevesinde tarafımda hazırlandığını, başkalarının çalışmalarından yararlandığım durumlarda kaynak gösterme kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu ve tezimin özgün bir çalışma olduğunu beyan ederim.

“Ultra Yüksek Moleküler Yoğunluklu Polietilen (UHMWPE) Kumaş Tabanlı Kompozit Zırhların Balistik Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı bu doktora tezinin tamamı tarafımdan yazılmış olup, tez süresince herhangi bir kurumdan veya kişiden akademik etik ilkelere aykırı yardım alınmamıştır. Bu çalışma, daha önce başka bir akademik derece veya unvan elde etmek amacıyla kullanılmamıştır.

Ömer Faruk ÇİÇEK

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Balistik Bilimi	2
1.1.1 İç balistik.....	3
1.1.2 Dış balistik.....	4
1.1.3. Terminal (Hedef) balistik	6
1.2 Balistik Zırh Malzemeleri	7
1.2.1 Kevlar	7
1.2.2 Ultra yüksek moleküler yoğunluklu polietilen (uhmwpe) kumaş	9
1.2.3 Seramik.....	11
1.2.4 Titanyum	12
1.2.5 Çelik	15
1.2.6 Poliüre	16
1.2.7 Grafen.....	18
1.2.8 Kompozit malzemeler	19
1.2.9 Kesme kalınlaştırma sıvısı (STF).....	20
1.3 Uluslararası Balistik Test Standartları.....	22
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	25
2.1 Doğal Elyaf Takviyeli Kompozit Zırh Sistemleri.....	25
2.2 Yüksek Performanslı Metalik ve Metal Matrisli Zırh Yapıları	27
2.3 Seramik ve Fonksiyonel Dereceli Kompozit Zırhlar	35
2.4 Yüksek Performanslı Sentetik Elyaf ve Hibrid Polimer Zırhlar	41
2.5 Akıllı Akışkan ve Polimer Kaplama Teknolojilerinin Balistik Performansı	47

3. MATERYAL VE YÖNTEM	53
3.1. Deneysel Testlerde Kullanılan Malzemeler	53
3.1.1. Titanyum plaka.....	53
3.1.2. Poliüre tabaka.....	54
3.1.3. Ultra yüksek moleküler yoğunluklu polietilen (uhmwpe) kumaş	57
3.1.4. Alüminyum bal peteği plaka	59
3.1.5. 7.62x51 mm M80 tipi FMJ mermi	60
3.1.6. 7.62x51 mm AP (armor piercing) zırh delici mermi.....	62
3.1.7. 5,56x45 mm kalibre SS109 mermi.....	63
3.2 Uhmwpe Kumaşın EN ISO 13934-1 Çekme Testi Standardına Göre Mekanik	
Özelliklerinin Belirlenmesi.....	64
3.2.1 Numune hazırlama ve test metodu	65
3.2.2 Test cihazı ve parametreleri	67
3.3 Uhmwpe Kumaşın EN ISO 13937-2 Yırtılma Testi Standardına Göre Mekanik	
Özelliklerinin Belirlenmesi.....	68
3.3.1. Numune hazırlama ve test metodu	68
3.3.2. Test cihazı ve parametreleri	69
3.4 Poliüre Tabakanın Çekme Testi ile Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	70
3.5 Deney Malzemelerinin Darbe Testlerinin Yapılması	73
3.6 Balistik Testler	74
3.7 Sonlu Eleman Modelli Analizler.....	83
3.8 FEM Analizlerinde Johnson-Cook Kırılma Modeli	89
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	90
4.1 Darbe Test Sonuçları	90
4.2 Balistik Test Sonuçları.....	99
4.3 Sayısal Test Sonuçları.....	124
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	134
KAYNAKLAR	138
ÖZGEÇMİŞ	150

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Uhmwpe kumaşların teknik özellikleri (Ercümen, 2024)	10
Çizelge 1.2 Balistikte kullanılan seramiklerin mekanik özellikleri (Ongun, 2019)	11
Çizelge 1.3 Uluslararası Balistik Koruma Standartları (Alarçin, 2021)	23
Çizelge 1.4 NIJ STD-0101.06 Balistik Koruma Seviye Tablosu (Sözen, 2019; Tombul, 2024)	24
Çizelge 2.1 Hedef numune kombinasyonları ve kullanılan silah tipleri (Karakoç, 2017)	36
Çizelge 2.2 Hedef numune konfigürasyonları (Alarçin, 2021)	41
Çizelge 2.3 İkinci kademe deneylerinde kullanılan numune kombinasyonları (Özgültekin, 2012)	43
Çizelge 2.4 Aramid ve uhmwpe fiberin genel özellikleri (Saleem et al., 2021)	46
Çizelge 2.5 Hazırlanan numunelere ait özellikler (Saleem et al., 2021)	47
Çizelge 3.1 Titanyum levhaya ait teknik özellikler	53
Çizelge 3.2 Purtop 1000 poliüreye ait teknik özellikler	56
Çizelge 3.3 Line-x XS-100 poliüreye ait teknik özellikler	57
Çizelge 3.4 Bal peteği plaka fiziksel özellikleri	59
Çizelge 3.5 7.62x51 mm FMJ mermi teknik özellikleri (Özer et al., 2024)	61
Çizelge 3.6 7.62x51 mm AP mermi teknik özellikleri	62
Çizelge 3.7 5,56x45 mm mermi teknik özellikleri	63
Çizelge 3.8 uhmwpe kumaşa ait mekanik özellikler	70
Çizelge 3.9 Line-x xs-100 poliüreye ait mekanik özellikler	73
Çizelge 3.10 Balistik Test Standartları (Bozdoğan et al., 2015)	74
Çizelge 3.11 NIJ koruma standartları (Kurban, 2022)	76
Çizelge 3.12 Balistik testlerde kullanılan hedef kombinasyonları ve özellikleri	78
Çizelge 3.13 MGS laminasyon epoksi setine ait teknik özellikler	80
Çizelge 3.14 Ti6Al4V malzeme modeline ait özellikler	86
Çizelge 3.15 Kurşun dolgu malzeme modeline ait özellikler	87
Çizelge 3.16 Bakır ceket malzeme modeline ait özellikler	87
Çizelge 3.17 Analiz parametreleri	89
Çizelge 4.1 Balistik testlere ait ölçümler	111
Çizelge 4.2 Deneysel ve sayısal test sonuçları	132

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Orta çağ zırh örnekleri (Alarçin, 2021).....	1
Şekil 1.2. İç balistik süreci (Kong et al., 2024).....	3
Şekil 1.3. Coriolis etkisi (Akçay & Erim, 1992).....	5
Şekil 1.4. İç balistik, dış balistik ve hedef (terminal) balistik (Ercümen, 2024).....	6
Şekil 1.5. Hasar şekilleri (Aydın, 2014).....	6
Şekil 1.6. Seramik-Kevlar zırh sistemi (Guo et al., 2021)	8
Şekil 1.7. Uhmwpe liflerinin bağ yapısı (Ercümen, 2024)	10
Şekil 1.8. Fiber destekli titanyum zırh bileşimi (M. K. Taş, 2019).....	14
Şekil 1.9. Poliüre kimyasal reaksiyonu (Yıldırım, 2019).....	16
Şekil 2.1 Deney ve simülasyondan elde edilen plakaların balistik ve patlamaya dayanıklılığı (Chu et al., 2021)	33
Şekil 2.2. Çok katmanlı kompozit zırh bileşim şeması (P. Hu et al., 2021)	34
Şekil 2.3 Hedef numune birleşim kompozisyonları (Ayvaz, 2016).....	39
Şekil 3.1. Titanyum levha lazer kesimi.....	54
Şekil 3.2. Titanyum plaka (Ti6Al4V)	54
Şekil 3.3. Purtop 1000 poliüre tabaka	55
Şekil 3.4. Line-x XS-100 poliüre tabaka.....	57
Şekil 3.5. rulo uhmwpe kumaş.....	58
Şekil 3.6. uhmwpe kumaş (a) elle kesim, (b) soğutmalı lazer ile kesim, (c) elde edilen kumaşlar	58
Şekil 3.7. Bal peteği teknik çizim (Koç, 2018).....	59
Şekil 3.8. Bal peteği görseli	60
Şekil 3.9. Balistik deneylerde kullanılan 7,62x51mm FMJ mermi ve boyutları (Özer et al., 2024)	61
Şekil 3.10. 7,62x51mm AP (zırh delici) mermi ve boyutları	62
Şekil 3.11. 5,56x45 mm SS109 mermi	64
Şekil 3.12. Kavrama aparatı (a) Elde kaynak ile hazırlanan, (b) Cnc lazer ile hazırlanan.....	65
Şekil 3.13. Kavrama aparatının çekme cihazına yerleşimi (a) Elde kaynak ile hazırlanan, (b) cnc lazer ile hazırlanan.....	66
Şekil 3.14. uhmwpe kumaş çekme numunesi ölçüleri	66
Şekil 3.15. x ve y yönlü uhmwpe kumaşı çekme numuneleri.....	67
Şekil 3.16. Uhmwpe kumaş yırtılma numunesi ölçüleri.....	68
Şekil 3.17. x ve y yönlü uhmwpe kumaşı yırtılma numuneleri	69
Şekil 3.18. ASTM D638 Tip IV çekme testi numune ölçüleri (mm) (Sharma et al., 2019)	71
Şekil 3.19. ASTM D638 Tip IV çekme numuneleri	71
Şekil 3.20. Çekme test makinesi	72
Şekil 3.21. Çekme numunesi yerleşimi ve kopma sonrası görünümü	72
Şekil 3.22. Darbe testleri (a) Test cihazı, (b) Numunenin cihaza yerleşimi	74
Şekil 3.23. NIJ 0101.06 standardına göre test düzeneği (Erdoğan T., 2011).....	77
Şekil 3.24. Kil bazlı destekleyici macun.....	77
Şekil 3.25. MGS laminasyon epoksi seti	79
Şekil 3.26. Çerçeve sistemi	81

Şekil 3.27. Hedef numuneler (a)100pe, (b)ti+pu+60pe, (c)ti+60pe+pu, (d)ti+pu+100pe+pu, (e)ti+pu+100pe+ti, (f)ti+pu+100pe+pu(reçineli), (g)ti+100pe+ti, (h)ti+bp+100pe+bp, (i)ti+bp+pu+100pe+bp, (j)ti+pu+bp+pu+100pe+pu+bp+pu+ti.....	82
Şekil 3.28. 7,62x51 mm FMJ mermi 3 boyutlu modeli	83
Şekil 3.29. 7,62x51 mm FMJ mermi teknik resim.....	83
Şekil 3.30. Hedef numunelere ait solidworks modelleri (a)100pe, (b)ti+pu+60pe, (c)ti+60pe+pu, (d)ti+pu+100pe+pu, (e)ti+pu+100pe+ti, (f)ti+100pe+ti	84
Şekil 3.31. Ansys Workbench programı arayüzü.....	85
Şekil 3.32. Engineering Data arayüzü.....	86
Şekil 3.33. Hedef numunelere ait mesh işlemi (a)100pe, (b)ti+pu+60pe, (c)ti+60pe+pu, (d)ti+pu+100pe+pu, (e)ti+pu+100pe+ti, (f)ti+100pe+ti	88
Şekil 3.34. Mermi ve hedef malzeme mesh tipi.....	88
Şekil 4.1. Purtop 1000 poliüre tabaka darbe testi ön yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 125j.....	90
Şekil 4.2. Purtop 1000 poliüre tabaka darbe testi arka yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 125j.....	90
Şekil 4.3. Line-x XS-100 poliüre tabaka darbe testi ön yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 125j	91
Şekil 4.4. Line-x XS-100 poliüre tabaka darbe testi arka yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 125j	91
Şekil 4.5. Alüminyum bal peteği darbe testi ön yüz hasarı (a) 50j, (b) 75j, (c) 100j	92
Şekil 4.6. Alüminyum bal peteği darbe testi arka yüz hasarı (a) 50j, (b) 75j, (c) 100j	92
Şekil 4.7. Titanyum levha darbe testi ön yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 150j.....	93
Şekil 4.8. Titanyum levha darbe testi arka yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 150j	93
Şekil 4.9. Purtop 1000 poliüre tabaka enerji-zaman grafiği.....	93
Şekil 4.10. Purtop 1000 poliüre tabaka kuvvet-çökme grafiği.....	94
Şekil 4.11. Line-x XS-100 poliüre tabaka enerji-zaman grafiği	94
Şekil 4.12. Line-x XS-100 poliüre tabaka kuvvet-çökme grafiği	95
Şekil 4.13. Alüminyum bal peteği enerji-zaman grafiği.....	95
Şekil 4.14. Alüminyum bal peteği kuvvet-çökme grafiği	96
Şekil 4.15. Titanyum levha enerji-zaman grafiği.....	96
Şekil 4.16. Titanyum levha kuvvet-çökme grafiği.....	97
Şekil 4.17. 100j altındaki enerji-zaman grafiği.....	98
Şekil 4.18. 100j altındaki kuvvet-çökme grafiği.....	98
Şekil 4.19. uhmwpe kumaş (a) 100 tabaka hedef, (b) hedef ve macun yerleşimi	99
Şekil 4.20. 100pe hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz	99
Şekil 4.21. ti+pu+60pe hedef numune	100
Şekil 4.22. ti+pu+60pe hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz	100
Şekil 4.23. ti+60pe+pu hedef numune	101
Şekil 4.24. ti+60pe+pu hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz	101
Şekil 4.25. ti+pu+100pe+pu hedef numune	102
Şekil 4.26. ti+pu+100pe+pu hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz.....	102
Şekil 4.27. ti+pu+100pe+pu arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (1.atış), (b) 7,62x51 mm (2.atış), (c) 5,56x45 mm.....	103
Şekil 4.28. ti+pu+100pe+ti hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz.....	104
Şekil 4.29. ti+pu+100pe+ti arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (kısa namlulu), (b) 7,62x51 mm (uzun namlulu), (c) 5,56x45 mm	104
Şekil 4.30. ti+pu+100pe+pu (reçineli) hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz	105

Şekil 4.31. ti+pu+100pe+pu (reçineli) arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (kısa namlulu), (b) 7,62x51 mm (uzun namlulu).....	105
Şekil 4.32. ti+100pe+ti hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz.....	106
Şekil 4.33. ti+100pe+ti arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (kısa namlulu), (b) 7,62x51 mm (uzun namlulu).....	106
Şekil 4.34. uhmwpe tabakalar arası delaminasyon	107
Şekil 4.35. ti+bp+100pe+bp hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz.....	107
Şekil 4.36. ti+bp+100pe+bp arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (kısa namlulu), (b) 7,62x51 mm (uzun namlulu).....	108
Şekil 4.37. ti+bp+pu+100pe+pu+bp hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz	108
Şekil 4.38. ti+bp+pu+100pe+pu+bp arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (kısa namlulu), (b) 7,62x51 mm (uzun namlulu).....	109
Şekil 4.39. ti+pu+bp+pu+100pe+pu+bp+pu+ti hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz.....	109
Şekil 4.40. ti+pu+bp+pu+100pe+pu+bp+pu+ti macun delinme durumu (a) macun ön yüz, (b) macun arka yüz.....	110
Şekil 4.41. 4 ve 6 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	111
Şekil 4.42. 5 ve 7 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	113
Şekil 4.43. 8 ve 9 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	114
Şekil 4.44. 4 ve 5 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	114
Şekil 4.45. 4 ve 7 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	115
Şekil 4.46. 4 ve 8 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	116
Şekil 4.47. 4 ve 9 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	116
Şekil 4.48. 5 ve 6 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	117
Şekil 4.49. 5 ve 8 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	118
Şekil 4.50. 5 ve 9 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	118
Şekil 4.51. 6 ve 7 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	119
Şekil 4.52. 6 ve 8 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	120
Şekil 4.53. 6 ve 9 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	121
Şekil 4.54. 7 ve 8 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	121
Şekil 4.55. 7 ve 9 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği	122
Şekil 4.56. Hedeflere ait çökme derinliği-ağırlık sütun grafiği.....	123
Şekil 4.57. Hedeflere ait çökme derinliği-ağırlık dağılım grafiği	123
Şekil 4.58. 100pe zamana bağlı deformasyon durumu	124
Şekil 4.59. Mermi uç geometrisinde mantarlaşma.....	125
Şekil 4.60. ti+pu+60pe zamana bağlı deformasyon durumu.....	125
Şekil 4.61. ti+60pe+pu zamana bağlı deformasyon durumu.....	126
Şekil 4.62. ti+pu+100pe+pu zamana bağlı deformasyon durumu	127
Şekil 4.63. ti+pu+100pe+pu maksimum deformasyon	128
Şekil 4.64. ti+pu+100pe+ti zamana bağlı deformasyon durumu	129
Şekil 4.65. ti+pu+100pe+ti maksimum deformasyon	129
Şekil 4.66. ti+100pe+ti zamana bağlı deformasyon durumu	131
Şekil 4.67. ti+100pe+ti maksimum deformasyon	131
Şekil 4.68. Deneysel ve sayısal test sonucu zırh arka yüzünde oluşan çökme miktarları grafiği	133

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

UHMWPE: Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen

STF : Shear Thickening Fluids (Kesme Kalınlaştırma Sıvısı)

FEM : Finite Element Model (Sonlu Eleman Modeli)

PEG : Poli-etilen Glikol

TS : Türk Standartları

NIJ : National Institute of Justice

HNS : High Nitrogen Steel (Yüksek nitrojenli çelik)

RHA : Rolled Homogeneous Armor (Haddelenmiş Zırh Çeliği)

SAP : Soft Armor Plate (Yumuşak Zırh Panel)

BFS : Back Face Signature (Arka Yüz Deformasyonu)

PR : Perforation Rate (Delinme Oranı)

GFRP : Glass Fiber Reinforced Plastic (Cam Elyafı Güçlendirilmiş Plastik)

CEL : Coupled Eulerian–Lagrangian

CLT : Cross-laminated Timber (Çapraz Lamineli Kereste)

SPF-S : Spruce Pine Fir-South

SYP : Southern Yellow Pine

MAS : Multilayered Armor System (Çok Katmanlı Zırh Sistemi)

PPE : Personal Protective Equipment (Kişisel Koruyucu Ekipman)

PTFE : Politetrafloroetilen

ASTM : American Society for Testing and Materials

FGM : Functionally Graded Materials (Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler)

SCP : Sandwich Composite Panels (Sandviç Kompozit Paneller)

DF : Dilatant Fluids (Dilatant Sıvılar)

FGSPs : Functionally Graded Sandwich Plates (Fonksiyonel Dereceli Sandviç Plakalar)

CNT	: Carbon Nanotube
PP	: Polipropilen
FMJ	: Full Metal Jacket (Tam Metal Ceket)
AP	: Armor Piercing (Zırh Delici)
FSP	: Fragments Simulating Projectiles (Mermileri Simüle Eden Parçalar)
CTP	: Cam Elyaf Takviyeli Plastik
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
OSB	: Oriented Strand Board (Yönlendirilmiş Yonga Levha)
PBDMS	: Poliborodimetilsiloksan
COEX	: Coconut shell powder – epoxy composite

ÖZET

Doktora Tezi

ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER YOĞUNLUKLU POLİETİLEN (UHMWPE) KUMAŞ TABANLI KOMPOZİT ZIRHLARIN BALİSTİK DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Ömer Faruk ÇİÇEK

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

150+xii sayfa

2025

Danışman: Doç. Dr. Yaşar AYZ

Zırh sistemleri, modern savunma teknolojilerinin temel yapı taşlarından biri olarak hem askeri hem de sivil personelin güvenliğini sağlamada kritik rol oynamaktadır. Gelişen mühimmat teknolojileri ve artan darbe enerjisi karşısında geleneksel zırh malzemelerinin yetersiz kalması, çok katmanlı ve yüksek performanslı kompozit zırh sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Bu tez çalışmasında, Ti6Al4V titanyum alaşımı, Line-x XS-100 poliüre kaplama, alüminyum bal peteği ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (uhmwpe) kumaş gibi farklı mekanik özelliklere sahip malzemeler kullanılarak kompozit zırh hedefleri tasarlanmıştır. Farklı yerleşim sıralarıyla oluşturulan farklı konfigürasyona sahip hedef zırhlar, balistik koruma performanslarını değerlendirmek amacıyla sayısal ortamda modellenmiştir. Analizlerin tamamı Ansys Workbench paket programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Sayısal modellemelerde, malzemeler belirli bir sıralama düzenine bağlı kalmaksızın modellenmiştir. Böylece her kombinasyonun NIJ 0101.06 balistik koruma standardına olan uygunluğu araştırılmıştır. Elde edilen simülasyon verileri doğrultusunda, deneysel testlerde kullanılmak üzere 10 adet farklı konfigürasyona sahip balistik zırh geliştirilmiştir. Deneysel testlerde 7,62x51 mm FMJ M80, 7,62x51 mm AP (zırh delici) ve 5,56x45 mm SS109 olmak üzere 3 farklı mühimmat tipi kullanılmıştır. Deney sonuçları ile sayısal analizler arasında yüksek düzeyde benzerlik olduğu görülmüştür. Özellikle arka yüzey deformasyonu, hasar geometrisi ve enerji soğurma kapasitesi bakımından güçlü bir örtüşme sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balistik Zırh, Uhmwpe Fiber, Poliüre, Titanyum

ABSTRACT

Phd. Thesis

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF BALLISTIC BEHAVIOR OF ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE (UHMWPE) FABRIC-BASED COMPOSITE ARMOR

Ömer Faruk ÇİÇEK

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

150+xii page

2025

Supervisor: Doç. Dr. Yaşar AYAZ

Armor systems constitute an essential component in safeguarding the well-being of both military and civilian individuals, serving as foundational elements of contemporary defense technologies. The limitations inherent in traditional armor materials, particularly when confronted with the progression of ammunition technologies and elevated impact energies, necessitate the advancement of multi-layered and high-performance composite armor systems.

In this dissertation, composite armor targets were meticulously designed utilizing materials exhibiting diverse mechanical properties, including Ti6Al4V titanium alloy, Line-x XS-100 polyurea coating, aluminum honeycomb, and ultra-high molecular weight polyethylene (uhmwpe) fabric. Various configurations of target armors, constructed with distinct placement sequences, were systematically modeled within a numerical framework to assess their ballistic protection efficacy. All analytical procedures were conducted utilizing the Ansys Workbench software package.

Within the context of the numerical modeling, the materials were represented in an arbitrary sequence. Consequently, the compliance of each combination with the NIJ 0101.06 ballistic protection standard was thoroughly examined. Based on the simulation data procured, ten distinct configurations of ballistic armor were formulated for implementation in experimental evaluations. Three different types of ammunition, specifically 7.62x51 mm FMJ M80, 7.62x51 mm AP (armor-piercing), and 5.56x45 mm SS109, were employed in the experimental assessments. It was noted that the test outcomes exhibited a considerable degree of congruence with the numerical analyses. Notably, a significant correlation was identified concerning rear surface deformation, damage morphology, and energy absorption capabilities.

Keywords: Armor, Uhmwpe Fiber, Polyurea, Titanium

1. GİRİŞ

İnsanlar tarih boyunca kendilerini dışarıdan gelen tehditlere karşı koruma ihtiyacı hissetmişlerdir. Bu sebeple, çok farklı koruyucu malzemeler geliştirmişlerdir (Çolpankan, 2013). Bıçaklardan, sivri uç veya iğne gibi keskinleştirilmiş ekipmanlardan gelen silahları, mermileri, bıçak tehditlerini önlemek için vücut zırhları tasarlamışlardır (Cheeseman & Bogetti, 2003; Decker et al., 2007). Bu doğrultuda, hayvan derisi, tahta, metal vb. malzemelerden faydalanmışlardır. Daha sonra teknolojinin gelişmesiyle birlikte çelik, seramik, kumaş gibi farklı malzemeler kullanmışlardır.

Orta çağ savaşlarında insan vücudunu ve kafasını koruyabilmek adına Şekil 1.1’de gösterilen koruyucu zırhlar kullanılmıştır. Ancak bu zırhlar, imal edildikleri malzemelerin yüksek yoğunlukları nedeniyle hareket kabiliyetini düşürmüştür.



Şekil 1.1 : Orta çağ zırh örnekleri (Alarçin, 2021)

Ateşli silahların icadıyla birlikte zırh sistemleri de zamanla değişmeye başlamıştır. Karmaşık savaş alanı durumlarıyla başa çıkabilmek adına, düşük yoğunluğa, yüksek anti-penetrasyona ve çoklu darbeye karşı yüksek kapasiteye sahip zırh yapıları üzerine çalışılmıştır. Bu kapsamda, yüksek kalibreli mermilere karşı koyabilmek için çelik zırhlar geliştirilmiştir. Son yıllarda, seramik kompozit zırhlar, koruma yeteneklerini sağlarken ağırlık yönünden avantajlı olması sebebiyle çelik zırhların yerini almıştır. Yüksek sertliğe sahip seramik ve sünek arka plakadan yapılan bu zırhlar, genellikle zırhlı araçlarda ve silahlı helikopterlerde zırh delici mermilere karşı kullanılır.

Balistik uygulamalar için geliştirilmiş seramikler arasında alümina (Al_2O_3) en düşük fiyata sahiptir. Ancak yoğunluğu yüksek ve koruyuculuğu zayıftır. Seramik zırh sınıfının en pahalısı olan bor karbür (B_4C), üstün sertliği ve düşük yoğunluğu ile yüksek balistik performans sunar. Silisyum karbür (SiC) ise hem yoğunluk, hem sertlik hem de fiyat olarak bu ikisinin arasında yer almaktadır. Bu özellikler silisyum karbürü en çok tercih edilen seramik zırh malzemesi yapmaktadır.

Vücut zırhı üretimi için, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek dayanıklılık ve yüksek enerji emilimi ile karakterize edilen aramid (Kevlar®, Twaron®, Technora®), ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (Spectra®, Dyneema®) ve polibenzoksazol (Zylon®) gibi yüksek performanslı liflerden yapılmış kumaşlar yaygın olarak kullanılmıştır (Srivastava et al., 2011; Tan et al., 2005).

Son birkaç yıldır araştırma ilgisi, patlama ve balistik koruyucu yapılar için kullanılabilen hafif malzemelerin araştırılmasına doğru kaymıştır. Farklı kompozit ve katmanlı plaka düzenlemeleri bu tür araştırmaların odak noktası olmuştur. Geleneksel olarak kullanılan metal alaşımlarının kısmi ikameleri olarak farklı kumaş ve elastomer türleri araştırılmıştır. Poliüre, bu tür uygulamalar için son zamanlarda araştırmalara konu olan bir malzemedir (Mohotti et al., 2015). Hasardan önce önemli miktarda enerjiyi emme yeteneği nedeniyle poliüre, patlama, balistik ve diğer darbe olaylarının neden olduğu dinamik yükleme altında yapısal ve kompozit sistemler için koruyucu bir kaplama veya ara katman malzemesi olarak çalışılmıştır.

Bu çalışma ile farklı zırh malzemelerinin balistik performansını uluslararası standartlara göre araştırmak amaçlanmıştır. Bu kapsamda, özgün bir kompozit zırh yapısı önerisi sunularak literatüre katkı sağlanması hedeflenmektedir.

1.1. Balistik Bilimi

Balistik bilimi, mermilerin ve diğer mühimmatların hareketini inceleyen bir bilim dalıdır (Deniz, 2009). Bu alan, mühendislik, fizik ve askeri teknolojiler gibi birçok bilim dalını bir araya getirir.

“Balistik” kelimesi, orta çağda askerlerin kale yapılarına zarar verebilmeleri için geliştirilen bir mancınık sisteminden türemiştir (Öztemür, 2024). Bu sisteme “Balista” denir (Lawton, 2004). Balista sistemi ile kaya, ok ve benzeri cisimler karşı tarafa fırlatılarak düşmana

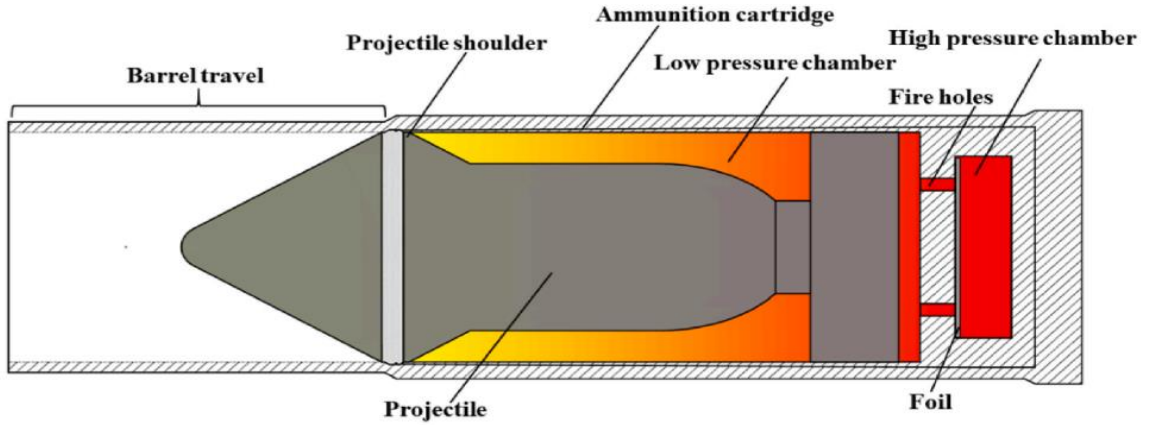
zarar verilmek istenmiştir. Fırlatma için birçok matematiksel hesaplama yapılmıştır. Bu hesaplamalar balistik biliminin temellerini oluşturmuştur.

Balistik, genellikle 3 alt başlıkta incelenir.

1.1.1 İç balistik

İç balistik, bir merminin ateşlenme anından itibaren namluyu terk edene kadar geçen süredeki hareketini ve bu süreçte meydana gelen fiziksel ve kimyasal olayları inceleyen balistik biliminin bir alt dalıdır (Aydın, 2014). Bu süre zarfında gerçekleşen süreçler, merminin hızlanmasını ve namludan çıkış hızını belirler. İç balistik çalışmaları, silahların performansını optimize etmek ve güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir.

İç balistik süreci, ateşleme ile başlar. Ateşleme iğnesi kapsüle vurduğunda kapsül içindeki kimyasal bileşikler yanar ve barutun ateşlenmesini sağlar. Barutun yanması sonucu büyük miktarda gaz ve ısı açığa çıkar. Bu gazlar, merminin arkasında yüksek bir basınç oluşturur ve mermiyi ileri doğru iter. Mermi, namlu boyunca ilerlerken hızlanır ve namluyu terk ettiğinde en yüksek hızına ulaşır. Namludan çıktığı anda gazlar serbest kalır ve basınç hızla düşer. Şekil 1.2’de iç balistik şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : İç balistik süreci (Kong et al., 2024)

İç balistikte önemli kavramlar arasında barut yükü, namlu uzunluğu, basınç eğrisi, ısı ve sürtünme yer alır. Barut yükü, kullanılan barut miktarı ve tipi, merminin hızını ve atışın gücünü doğrudan etkiler. Namlu uzunluğu, merminin hızlanma süresini ve dolayısıyla namludan çıkış hızını belirler. Uzun namlular, merminin daha fazla hızlanmasını sağlar. Barut yanarken oluşan

basınç, merminin hareketi boyunca değişir ve bu basınç eğrisi, iç balistik analizlerinde önemli bir rol oynar. Ayrıca, barut yanması sırasında açığa çıkan ısı, namlu içinde yüksek sıcaklıklara neden olur ve mermi ile namlu arasındaki sürtünme, merminin hızlanmasını etkiler.

İç balistikte kullanılan teknolojiler arasında balistik sensörler, yüksek hızlı kameralar, bilgisayar simülasyonları ve balistik laboratuvarları bulunur. Balistik sensörler, namlu içindeki basınç ve sıcaklık değişimlerini ölçmek için kullanılır (Felix et al., 2023). Yüksek hızlı kameralar, merminin namlu içindeki hareketini ve hızlanmasını gözlemlemek için kullanılır. Bilgisayar simülasyonları, iç balistik süreçlerinin detaylı modellenmesi ve analiz edilmesi için kullanılır. Bu simülasyonlar, farklı barut türleri, namlu uzunlukları ve mermi tipleri üzerinde deneyler yapılmasını sağlar. Balistik laboratuvarları ise deneysel atış testlerinin gerçekleştirildiği ve verilerin toplandığı ortamlardır.

İç balistik çalışmaları, silah performansının optimizasyonu, güvenlik ve mühimmat geliştirme açısından büyük önem taşır. İç balistik analizleri, silahların daha verimli ve güçlü olmasını sağlar. Barut türleri, mermi tasarımları ve namlu uzunlukları gibi değişkenlerin optimize edilmesi, daha iyi performans sağlar. Yanlış barut yüklemeleri veya hatalı silah tasarımları tehlikeli sonuçlar doğurabilir. İç balistik çalışmaları, bu tür risklerin minimize edilmesine yardımcı olur. Ayrıca, yeni nesil mermilerin ve mühimmatların geliştirilmesi, iç balistik analizlerine dayanır. Daha hızlı, güçlü ve etkili mermilerin tasarımı için iç balistik bilgisi kritiktir.

1.1.2 Dış balistik

Dış balistik, merminin namluyu terk etmesinden hedefe ulaşana kadar geçen süredeki hareketini inceleyen balistik alt dalıdır (Humphrey & Kumaratilake, 2016). Bu süre zarfında mermi, atmosfer koşullarının etkisi altında kalır ve hareketi bu koşullardan doğrudan etkilenir. Dış balistik, merminin hedefe doğru yol alırken izlediği yolu, hızını, rotasını ve stabilitesini analiz eder (Stepanov & Vavilov, 1997). Merminin dış balistik hareketi, atış anından itibaren etkili olan çeşitli faktörler tarafından şekillendirilir. Bu faktörler arasında yerçekimi, hava direnci, rüzgar ve Coriolis etkisi gibi unsurlar bulunur.

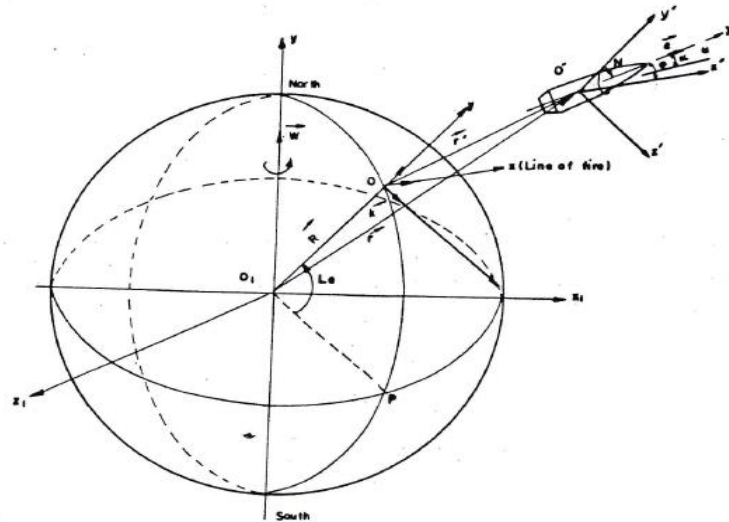
Yer çekimi, merminin düşey yönlü hareketini doğrudan etkiler. Bu kuvvet yatay doğrultuda ateşlenen merminin hareket yolunu parabolik hale getirir. Yer çekiminin bu etkisi, özellikle uzun menzilli atışlarda dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Dolayısıyla uzun menzilli

atışlarda merminin hedefe tam olarak çarpması için yer çekimi kuvvetinin etkisini iyi hesaplamak gerekir.

Hava direnci, merminin hareketine karşı gelen bir kuvvettir ve merminin hızını düşürür. Hava direnci, merminin şekline, ağırlığına, hızına, hava sıcaklığına ve hava yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Merminin namluyu terk ettiği andan itibaren karşılaştığı hava molekülleri, merminin hızını yavaşlatır. Bu durum merminin menzilini ve isabet oranını etkiler. Merminin aerodinamik yapısı, hava direncini en aza indirmek için tasarlanmış olsa da, bu direnç tamamen ortadan kaldırılamaz ve atışın doğruluğu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Rüzgar, merminin yolunu saptırabilir ve hedefe ulaşmasını zorlaştırabilir. Rüzgarın hızı ve yönü, merminin yörüngesini değiştirebilir ve bu sapma, atışın başarısını doğrudan etkileyebilir. Özellikle uzun menzilli atışlarda, rüzgarın etkisi daha belirgin hale gelir.

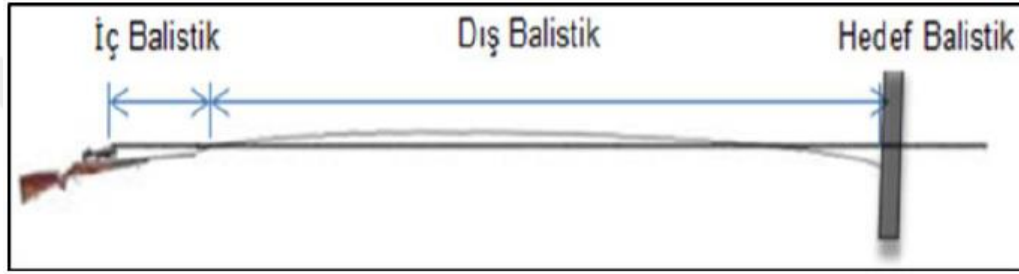
Coriolis etkisi, dünyanın dönme hareketinin merminin yoluna olan etkisidir. Bu etki, özellikle uzun menzilli atışlarda önemli hale gelir ve merminin yörüngesinde sapmalara neden olabilir. Şekil 1.3'te gösterilen Coriolis etkisi, merminin kuzey yarımkürede sağa, güney yarımkürede ise sola sapmasına neden olur. Dış balistik çalışmalarında, Coriolis etkisi gibi faktörler dikkate alınarak merminin hareketi daha doğru bir şekilde analiz edilebilir (Akçay & Erim, 1992).



Şekil 1.3 : Coriolis etkisi (Akçay & Erim, 1992)

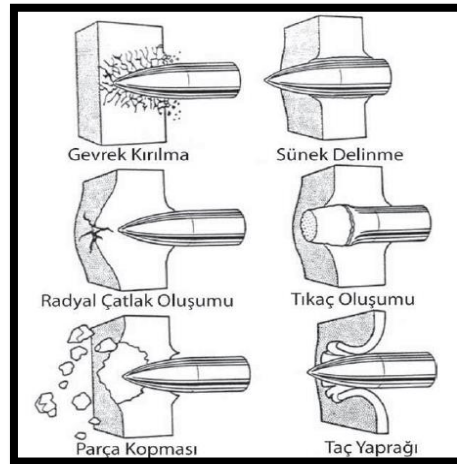
1.1.3. Terminal (Hedef) balistik

Terminal balistik, bir merminin hedefe çarpmasıyla başlayan ve sonrasında hedef üzerinde yarattığı etkileri inceleyen balistik alt dalıdır. Bu alan, merminin hedefte oluşturduğu deformasyonu, enerji transferini ve bunun sonucunda oluşan hasarı analiz eder. Terminal balistik, özellikle ateşli silahların etkisini anlamak ve bu etkileri optimize etmek için kritik bir çalışma alanıdır. İç balistik, dış balistik ve terminal balistik aynı anda Şekil 1.4’te gösterilmiştir (Ercümen, 2024).



Şekil 1.4 : İç balistik, dış balistik ve hedef (terminal) balistik (Ercümen, 2024)

Mermi, hedefle temas ettiğinde hızla yavaşlar ve enerjisini hedefe aktarır. Bu süreçte merminin davranışı, malzemesi, şekli, hızı ve hedefin yapısına bağlı olarak değişir. Şekil 1.5’te görüldüğü üzere, mermi hedefe çarptıktan sonra farklı hasar şekilleri oluşturur. Merminin hedefe çarpma açısı ve hızı, merminin hedefteki penetrasyon derinliğini ve yarattığı tahribatı belirler. Yüksek hızla çarpan bir mermi, hedefte daha yüksek çökme derinliği ve çapı oluştururken, daha yavaş bir mermi hedefte daha düşük bir çökme derinliği oluşturur.



Şekil 1.5 : Hasar şekilleri (Aydın, 2014)

Terminal balistikte, hedefin materyali merminin performansını önemli ölçüde etkiler. Farklı hedef materyalleri, merminin yavaşlama süresi, deformasyonu ve durma noktasını belirler (Deniz, 2009). Örneğin, yumuşak doku üzerinde mermi daha fazla enerji aktarabilirken, sert materyaller merminin hızla yavaşlamasına ve deformasyonuna neden olabilir. Bu nedenle, terminal balistik çalışmaları, merminin farklı hedef materyalleri üzerindeki etkilerini inceleyerek, mühimmat tasarımında önemli veriler sağlar.

Terminal balistiğin en önemli konularından biri, merminin hedefe çarptığında ne kadar kinetik enerji aktardığıdır. Bu enerji transferi, hedefteki hasarın boyutunu ve ciddiyetini belirler. Merminin kinetik enerjisi, hedefe çarpma anında hızla yayılarak, doku veya materyal üzerinde yıkıcı etkiler oluşturur. Enerji ne kadar fazla olursa, hedefteki tahribat da o kadar büyük olur. Bu bağlamda, terminal balistik, yaralanma mekaniklerini anlamak ve bu bilgiyi tıp, adli bilimler ve askeri mühimmat tasarımında kullanmak için hayati öneme sahiptir.

Terminal balistik, askeri, adli ve tıbbi alanlarda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Askeri alanda, mühimmatların düşman hedefler üzerindeki etkisini artırmak ve sivil zayıyatı azaltmak için kullanılır. Ayrıca, tıbbi alanda, travma cerrahisi ve acil tıp uzmanları, yaralanma mekaniklerini ve bu mekaniklerin vücut üzerindeki etkilerini anlamak için terminal balistik bilgilerini kullanır.

1.2 Balistik Zırh Malzemeleri

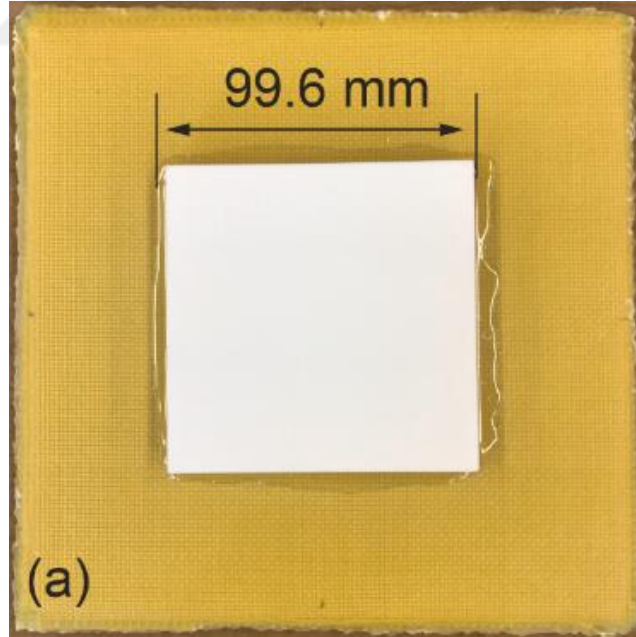
1.2.1 Kevlar

Kevlar, yüksek mukavemetli ve hafif bir aramid fiber olup, balistik zırhlarda yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. DuPont tarafından 1965 yılında geliştirilen Kevlar, özellikle darbe direnci ve esnekliği ile bilinir. Bu özellikleri sayesinde Kevlar, mermilerin ve şarapnel parçalarının etkisini absorbe ederek, balistik koruma sağlamak için ideal bir malzeme haline gelmiştir. Kevlar'ın kimyasal yapısı, uzun zincirli poliamidlerden (aramid) oluşur ve bu yapı, malzemeye olağanüstü bir çekme mukavemeti kazandırır.

Kevlar'ın lifleri, sıkıca örülmüş kristalin bir yapıdan oluşur. Bu örgü yapısı, Kevlar'a esneklik kazandırırken, çelikten beş kat daha güçlü olmasını sağlar. Ayrıca, Kevlar'ın erime sıcaklığı oldukça yüksektir. Bu durum, malzemenin yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olmasını sağlar. Bu özellikler, Kevlar'ın balistikte kullanılmasını uygun kılmıştır (Bozdoğan et al., 2015).

Balistik zırhlarda Kevlar, özellikle vücut zırhları, kasklar ve balistik kalkanlar gibi koruyucu ekipmanlarda yaygın olarak kullanılır. Kevlar'ın yüksek çekme mukavemeti, mermilerin kinetik enerjisini etkili bir şekilde absorbe eder ve mermiyi yavaşlatarak zırhın delinmesini engeller. Kevlar lifleri, merminin enerjisini geniş bir alana yayar ve penetrasyon derinliğini azaltır. Esnekliği sayesinde hareket kabiliyeti için avantaj sunar.

Kevlar, balistik zırhlarda genellikle çok katmanlı bir yapıda kullanılır. Daha yüksek koruma seviyeleri gerektiğinde, Kevlar genellikle seramik veya metal plakalara entegre edilir. Bu tür kompozit zırhlar, hem mermiye karşı dirençli hem de nispeten hafif olmaları nedeniyle tercih edilir. Örnek olarak, Guo ve arkadaşları, Şekil 1.6'da görüldüğü gibi Kevlar kaplamalı balistik zırhların deneysel test ve sonlu elemanlar simülasyonunun birleştirilmiş bir yaklaşımını incelemiştir (Guo et al., 2021). Deneylerde, 7,62 mm APM2 mermileri, tek bir Kevlar kompozit kaplamalı seramik/kompozit zırh sistemine üç farklı hızda (884 m/s, 1070 m/s ve 1164 m/s) çarpmak için kullanılmıştır. Kaplama tabakasının seramik parçalar üzerindeki koruyucu etkisini açıkça gözlemlemiştir.



Şekil 1.6 : Seramik-Kevlar zırh sistemi (Guo et al., 2021)

Kevlar, birçok açıdan avantaj sunan bir malzemedir. Hafifliği, esnekliği ve yüksek çekme mukavemeti, onu balistik zırhlarda ideal bir malzeme yapar. Ayrıca Kevlar, kimyasal maddelere, neme ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Bununla birlikte, Kevlar UV ışınlarına karşı

çok hassastır ve güneş ışığına maruz kaldığında zayıflar. Ayrıca, Kevlar zırhlar, uzun süreli kullanımdan sonra yıpranır ve koruma seviyesini azalır. Bu nedenle, Kevlar malzemeden yapılan balistik zırhların düzenli olarak kontrol edilmesi ve gerektiğinde değiştirilmesi önemlidir.

Kevlar, balistik zırhların yanı sıra, birçok farklı alanda da kullanılır. Otomotiv ve havacılık sektörlerinde Kevlar, hafiflik ve dayanıklılık sağlamak için kompozit malzemelerin bir bileşeni olarak kullanılır. Spor ekipmanları, ipler, kablolar ve koruyucu giysiler gibi çeşitli ürünlerde de Kevlar kullanılmaktadır. Ayrıca, Kevlar'ın yüksek ısıya dayanıklılığı, itfaiyeci giysileri ve sıcak çalışma ortamları için koruyucu giysilerde tercih edilmesini sağlar.

Kevlar, balistik zırhlarda kullanımıyla hayat kurtarıcı bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Dayanıklılığı, hafifliği ve esnekliği ile birçok farklı uygulama alanında kendine yer bulan Kevlar, günümüzde balistik koruma denildiğinde akla gelen ilk malzemelerden biridir.

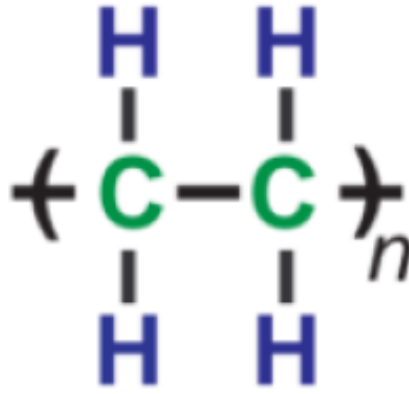
1.2.2 Ultra yüksek moleküler yoğunluklu polietilen (uhmwpe) kumaş

Uhmwpe kumaş, dünya üzerindeki en güçlü ve en hafif liflerden oluşan bir malzemedir (Mishra et al., 2022). Dyneema® ve Spectra® ticari olarak temin edilebilen ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (uhmwpe) kumaş, yüksek özgül mukavemet, yüksek kopma gerilmesi, yüksek elastik dalga hızı, daha iyi enerji emme kabiliyeti gibi benzersiz özelliklere sahiptir (T. S. Reddy et al., 2021). Aramid liflerine oranla %40 daha yüksek çekme mukavemetine sahip olması sebebiyle balistik alanında giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca aramid liflerine oranla daha hafiftir.

Uhmwpe kumaş lifleri, diğer kumaşları oluşturan liflerle kıyaslandığında en düşük yoğunluğa ($0,97 \text{ g/cm}^3$) sahiptir. Erime noktasının 130°C olması dezavantajlarından biridir. Cha ve arkadaşları tarafından yürütülen araştırmada, Spectra 1000 ve Kevlar KM2 lifleri üzerinde yüksek hız etkisine dair incelemeler yapılmıştır (Cha et al., 2020). İncelemelerde çevresel koşullar, sıcaklık etkisi ve basınç gibi parametreler gerçeğe uygun şekilde simüle edilmiştir. Sonuçlar, termal dalgalanmaların uhmwpe kumaşın balistik etkinliğinin azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Buna rağmen, kevlar kumaşına kıyasla daha üstün performans sergilemiştir.

Uhmwpe kumaşlar, yüksek hızlı balistik çalışmalarda koruma sağlayabilmek için genellikle metal veya seramiklerle birlikte kullanılırlar. Mehmet Akif çalışmasında, alümina seramik (Al_2O_3) ön yüzü ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (uhmwpe) destek tabakalı kompozit zırh sisteminin 7,62x51 mm (AP) zırh delici mermiye karşı balistik davranışını incelemiştir (Akdoğan, 2018). Hu ve arkadaşları, ultra yüksek moleküler yoğunluklu polietilen (uhmwpe) levha ile silisyum karbür (SiC) seramiklerinin birleştirilmesiyle oluşan zırh sistemini 7,62x51 mm zırh delici (AP) mermiye karşı test etmişlerdir (D. Hu et al., 2017).

Kumaşı oluşturan lifler, milyonlarca polietilen zincirinden oluşur. Çekme mukavemetinin bu kadar yüksek olması polietilen zincirlerinin kovalent bağlarından kaynaklanır. Uhmwpe liflerine ait bağ yapısı Şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 : Uhmwpe liflerinin bağ yapısı (Ercümen, 2024)

DSM şirketinin ürünü olan Dyneema ve Honeywell şirketinin ürünü olan Spectra’ya ait teknik özellikler Çizelge 1.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 1.1 : Uhmwpe kumaşların teknik özellikleri (Ercümen, 2024)

Kumaş Türü	Yoğunluk (kg/m^3)	Kopma Dayanımı (N/tex)	Başlangıç Modülü (N/tex)	Kopma Uzaması (%)
Dyneema SK60	970	2,8	91	3,5
Dyneema SK65	970	3,1	97	3,6
Dyneema SK75	970	3,5	110	3,8
Spectra 900	970	2,6	75	3,6
Spectra 1000	970	3,2	110	3,3

1.2.3 Seramik

Seramikler, inorganik ve metalik olmayan katı maddelerden oluşan, yüksek sıcaklıkta fırınlanarak sertleştirilen malzemelerdir. Balistik zırhlarda kullanılan seramikler, genellikle mermilerin ve diğer yüksek hızlı darbe unsurlarının enerjisini absorbe etmek ve durdurmak amacıyla tasarlanmıştır. Seramiklerin sertliği, onları balistik tehditlere karşı etkili bir koruma malzemesi haline getirir.

Balistik zırhlarda kullanılan seramikler, farklı bileşimlerde ve özelliklerde olabilir. En yaygın kullanılan balistik seramik türleri şunlardır:

- Alümina (Al_2O_3): Alümina, yaygın ve maliyet açısından uygun bir seramik malzemedir. Yüksek sertliği ve kimyasal dayanıklılığı nedeniyle balistik zırhlarda sıklıkla tercih edilir. Ancak, diğer bazı seramiklere göre biraz daha ağırdır.
- Silisyum Karbür (SiC): Silisyum karbür, alüminadan daha hafif ve serttir. Bu özellikleri sayesinde yüksek kalibreli mermilere karşı daha etkili bir koruma sağlar. Aynı zamanda, alüminaya göre daha pahalı bir malzemedir.
- Bor Karbür (B_4C): Bor karbür, en hafif ve en sert seramiklerden biridir. Yüksek mukavemeti ve düşük yoğunluğu nedeniyle, özellikle askeri zırh sistemlerinde tercih edilir. Bor karbür, yüksek kalibreli mermilere karşı mükemmel koruma sağlar, ancak üretim maliyetleri oldukça yüksektir.

Balistik çalışmalarda sıklıkla kullanılan bu 3 seramik türünün mekanik özellikleri Çizelge 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2 : Balistikte kullanılan seramiklerin mekanik özellikleri (Ongun, 2019)

Özellikler	Al_2O_3	SiC	B_4C
Yoğunluk (kg/m^3)	3900	3100	2500
Sertlik (HV) (GPa)	1600 (15)	2700 (27)	3870 (38)
Elastisite Modülü (GPa)	370	410	460
Eğilme Mukavemeti (MPa)	380	550	750

Seramikler, balistik zırhlarda genellikle kompozit yapıların bir parçası olarak kullanılır. Bir seramik zırh plakası, mermiye ilk temas eden katman olarak görev yapar ve mermi çekirdeğinin sivri ucunu kütleştirir. Seramiğin arkasında genellikle bir aramid fiber veya polietilen tabaka bulunur. Bu katmanlar, seramik tabakasını geçen mermiden arta kalan enerjiyi emerek darbenin şokunu yayar.

Seramik zırhların en büyük avantajı, sertlikleri sayesinde mermileri parçalayabilmeleri ve enerjiyi geniş bir alana yaymalarıdır. Bu özellik, seramik zırhları özellikle yüksek kalibreli mermilere ve zırh delici mühimmatlara karşı etkili hale getirir. Ayrıca, seramikler hafif olmaları sayesinde, zırhın genel ağırlığını azaltır ve kullanıcının hareket kabiliyetini artırır.

Seramik zırhların bazı dezavantajları da vardır. En önemli dezavantajlardan biri, seramiğin kırılgan olmasıdır. Bir darbe aldığı anda seramik plakalar çatlayabilir veya kırılabilir. Bu durum zırhın tekrar kullanılamaz hale gelmesine neden olur. Ayrıca, seramik zırhlar diğer malzemelere göre daha pahalıdır ve üretim süreçleri daha zordur. Bu nedenlerle, seramik zırhlar genellikle daha kritik askeri operasyonlarda veya özel görevlerde kullanılır.

Seramik zırhlar, askeri araçlarda, vücut zırhlarında, balistik kalkanlarda ve havacılık savunma sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Seramikler, balistik zırh teknolojisinin önemli bir bileşeni olarak, yüksek mukavemet ve hafiflik kombinasyonu sunarak, modern zırhlı koruma sistemlerinde kritik bir rol oynar.

1.2.4 Titanyum

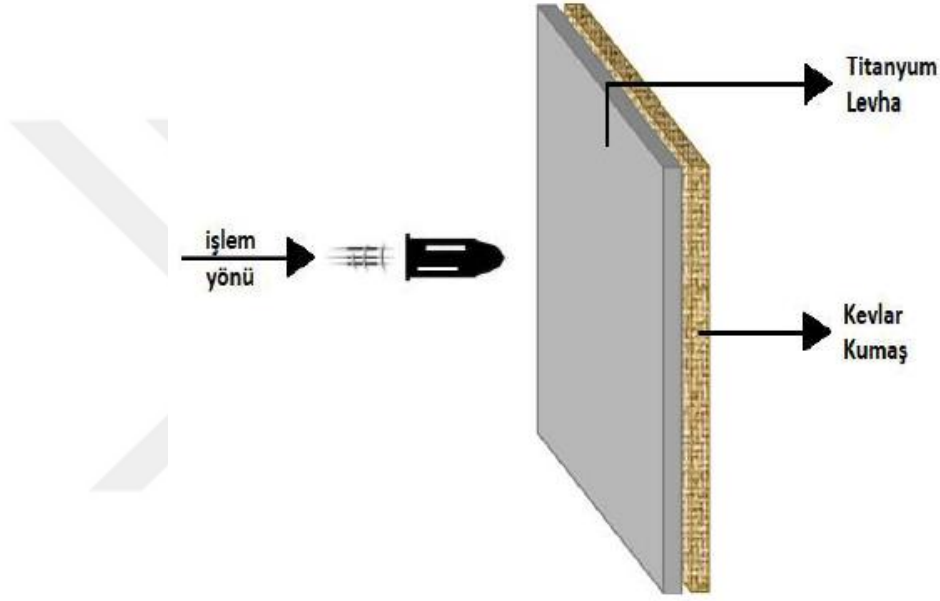
Titanyum, yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğu ve korozyona karşı olağanüstü direnci nedeniyle mühendislik alanlarında çok yönlü bir metal olarak kullanılır. Bu elementin en dikkat çekici özelliklerinden biri, atmosferik koşullarda ve kimyasal ortamlarda yüzeyinde kendiliğinden oluşan kararlı bir titanyum oksit tabakasının (TiO_2) bulunmasıdır. Bu pasif katman, aşındığında kendi kendini anında yenileme yeteneğine sahiptir. Dolayısıyla, titanyum, deniz suyu, hipokloritler, seyreltik asit çözeltileri ve hatta insan organizması gibi elektrokimyasal olarak aktif ortamlarda bile uzun süreler boyunca kendisini koruyabilir. Korozyona karşı direnç, hem ticari saf titanyum hem de titanyum alaşımı sınıflandırmalarında bulunur. Bu durum onu hem endüstriyel hem de biyomedikal kullanımlar için uygun bir malzeme haline getirmektedir (Jáquez-Muñoz et al., 2024).

Titanyumun uygulama alanları oldukça geniştir. Her uygulama alanı, malzemenin farklı ayırt edici özelliklerinden yararlanır. Ticari olan saf titanyum, özellikle ısı eşanjörleri, reaktör kapları ve boru sistemleri gibi kimyasal sektörde asidik veya tuzlu ortamlarda çalışan aparatlarda tercih edilir. Titanyum alaşımları, yüksek mukavemetin gerekli olduğu alanlarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe, uçak gövdeleri, jet motoru parçaları, iniş takımları ve yapısal bağlantı elemanları gibi hem yüksek mukavemet hem de düşük yoğunluk gerektiren bileşenlerde çok önemli bir rol oynar. Biyomedikal alanda, titanyumun kemikle bütünleşme kapasitesi, vücut sıvılarına karşı etkisizliği, kalça protezlerinde, diş implantlarında ve cerrahi aletlerde güvenli bir şekilde uygulanmasına izin verir. Egzoz sistemlerinde, süspansiyon bileşenlerinde ve yarış araçlarının hafif yapı elemanlarında korozyona karşı direnci nedeniyle otomotiv endüstrisinde de tercih edilmektedir. Deniz araçlarında ise pervane şaftlarında ve bağlantı elemanlarında korozyon direnci özelliği nedeniyle tercih edilmektedir (Tshephe et al., 2022).

Balistik uygulamalarda, özellikle yüksek mukavemeti nedeniyle tercih edilir. Düşük yoğunluğu sebebiyle kişisel koruyucu ekipman ve zırhlı araçlarda ağırlık tasarrufu sağlayarak hareketliliği artırır. Ticari saf titanyum, belirli kalınlıklarda düşük kalibreli tabanca mermilerine karşı etkili olabilirken, Ti6Al4V gibi alaşımlı titanyumlar, gelişmiş darbe direnci ve sertlikleri nedeniyle tüfek mermilerine karşı üstün performans sergiler. Bununla birlikte, titanyumun kırılma tokluğunun düşük olmasından ötürü çoklu darbelerle karşı yetersiz kalır. Bu nedenle, aramid kumaş veya ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (uhmwpe) kumaş gibi kombine edilmiş hibrit zırh sistemlerinde tercih edilir. Arka yüz deformasyonunu azaltmak için yüksek hızlı mermi darbelerinde enerjiyi dağıtma kapasitesi, titanyumu etkili bir balistik koruyucu tabaka haline getirir. Günümüzde, gelişmiş balistik koruma sistemlerinde, titanyumun etkinliği üzerine birçok bilimsel çalışma yürütülmektedir.

Titanyum, doğada bulunan hafif ve yüksek mukavemetli bir metaldir. Gri renkte olan bu metal, özellikle yoğunluğu düşük olmasına rağmen yüksek mukavemet ve korozyon direnci gösterir. Titanyumun özellikleri, onu balistik zırhlar için ideal bir malzeme haline getirir. Hafifliği sayesinde taşınması kolaydır. Yüksek mukavemetiyle mermilere ve diğer darbe unsurlarına karşı etkili bir koruma sağlar.

1791’de William Gregor tarafından keşfedilen titanyumun atom numarası 22’dir. Çelikten yaklaşık % 45 daha hafif bir elementtir (M. K. Taş, 2019). Balistik hız limitleri yüksek olan testlerde genellikle titanyum alaşımları, hafiflikleri, yüksek mukavemetleri, korozyon dirençleri ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle fiber destekli kompozit zırhlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.8’deki görselde titanyum plakanın fiber destekli kompozit zırhın önüne yerleştirilmesiyle balistik performans üst seviyelere çıkarılır.



Şekil 1.8 : Fiber destekli titanyum zırh bileşimi (M. K. Taş, 2019)

Günümüzde düşük ağırlık, yüksek mukavemet ve olağanüstü korozyon direnci gibi olağanüstü özellikler, titanyum ve alaşımlarının yüksek kaliteli endüstriyel ve tüketici ürünlerinde uygulamalara girmesinin yolunu açmıştır. Özellikle havacılık sektöründe, denizcilik ve açık deniz endüstrisinde, otomotiv endüstrisinde, enerji ve ulaşım teknolojisinde, mimaride ve sporda titanyum uygulamaları öncü roller oynamıştır. Ancak, darbe yüklemesi altında titanyum yüzey levhasının davranışını göstermek için sınırlı çalışmalar yürütülmüştür (Rahimijonoush & Bayat, 2020). Örneğin, Majzoobi ve diğerleri, alüminyum/cam-epoksi/titanyum fiber destekli laminatların balistik sınırının alüminyum/cam-epoksi/alüminyum ve titanyum/cam-epoksi/alüminyumdan çok daha yüksek olduğunu araştırmıştır (Majzoobi et al., 2018). Li ve arkadaşları, yüksek hızlı darbenin titanyum bazlı fiber metal laminatlar üzerindeki etkisini incelemiştir (X. Li & Xing, 2018). İnceleme, dyneema fiberin karbon fiberden daha büyük balistik sınıra ve enerji emilimine sahip olduğunu göstermiştir.

1.2.5 Çelik

Çelik, demir ve karbonun bir alaşımı olup, yapısal dayanıklılığı ve sertliği nedeniyle birçok endüstriyel ve askeri uygulamada yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Balistik zırhlarda kullanılan çelik, özel olarak tasarlanmış ve ısı işlemine tabi tutulmuş türlerden oluşur. Bu özel çelikler, mermilerin, şarapnellerin ve diğer yüksek hızlı darbelerin etkilerini absorbe ederek, kullanıcıya veya ekipmana koruma sağlar. Çelik, balistik zırhlarda uzun süredir kullanılan en temel malzemelerden biri olmasının yanı sıra, dayanıklılığı ve uygun maliyeti ile dikkat çeker.

Balistik çelikler, genellikle yüksek karbonlu ve alaşımlı çeliklerden yapılır. Karbon miktarının artışı, çeliğin sertliğini ve mukavemetini artırırken, diğer alaşım elementleri (krom, nikel vb.) çeliğin dayanıklılığını ve aşınma direncini iyileştirir. Bu çelikler, yüksek sıcaklıklarda özel ısıtma işlemlerinden geçirilerek, sertleştirilir ve dayanıklılığı artırılır. Bu işlemler, çeliğin kristal yapısını değiştirerek, zırhın darbeye karşı direncini yükseltir ve çeliğin kırılma olmadan sert kalmasını sağlar.

Çelik, balistik zırhlarda genellikle plaka formunda kullanılır. Bu plakalar, askeri araçların dış kaplamasında, kişisel vücut zırhlarında ve çeşitli savunma sistemlerinde yaygın olarak tercih edilir. Çeliğin sertliği ve dayanıklılığı, özellikle yüksek kalibreli mermilere ve patlayıcılardan kaynaklanan şarapnellerin etkilerine karşı etkili bir koruma sağlar. Çelik zırhlar, aynı zamanda geniş bir sıcaklık aralığında performans gösterebilir, bu da onları farklı iklim koşullarında kullanılabilir kılar.

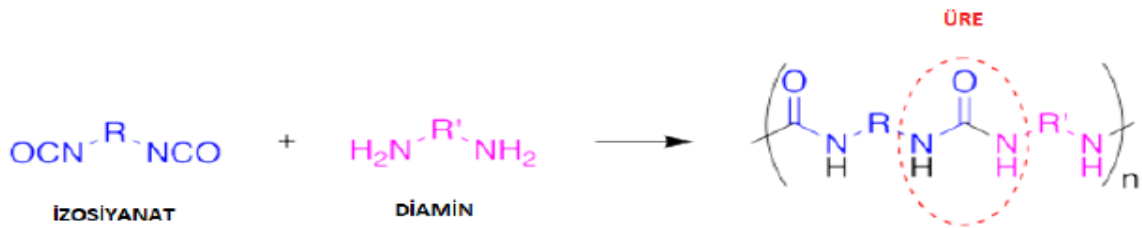
Aşırı sertliği, olağanüstü mukavemeti, inanılmaz tokluğu ve balistik darbelere karşı olağanüstü direnciyle bilinen zırh sınıfı çelik, savunmada önemli bir rol oynar. Bu çeliklerin darbe penetrasyonuna karşı kabiliyetini iyileştirme çabaları 1800'lerin sonlarına dayanmaktadır (Gürol et al., 2025). Özellikle zırh delici (AP) mermilere karşı balistik direnç ve aynı zamanda ağırlığın azaltılması, askeri uygulamalar için hayati bir hedeftir. Alüminyum, titanyum ve magnezyum gibi hafif alaşımlar, çeşitli zırhlı araçlar için zırh malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, hafif alaşımların ve gelişmiş kompozitlerin artan kullanımına rağmen, yüksek mukavemetli çelikler zırh yapıları için hala birincil tercih edilen malzemedir (Acar et al., 2024). Düşük maliyet, kolay üretim ve tedarik, yüksek mukavemet ve sertlik ile süneklik, çeliğin zırh uygulamalarında tercih edilen malzeme olmasının temel nedenleridir. Sonuç olarak, araştırmacılar tarafından çeşitli ultra yüksek mukavemetli çeliklerin

balistik performansları araştırılmıştır.

Borvik ve arkadaşları, 7,62 mm AP mermileri kullanarak yüksek mukavemetli çelikler olan Weldom 500E, Weldom 700E, Hardox 400 ve Domex Protect 500 ve Armox 500T'nin balistik performanslarını araştırmış ve birbiriyle karşılaştırmıştır (Borvik et al., 2009). Balistik koruma seviyesi gerekliliklerinin, araştırılan kalınlıkta sadece Domex ve Armox 500T tarafından karşılandığı, yapısal çeliklerin ise daha kalın olması gerektiğini bulmuşlardır. Başka bir çalışmada, Iqbal ve arkadaşları, Armox 500T çeliği ve zırh delici yangın çıkarıcı mermi (API) malzemesinin değişen gerilim durumu, gerinim hızı ve sıcaklık altındaki yapısal davranışını incelemek için ayrıntılı bir araştırma yürütmüşlerdir (Iqbal et al., 2016). Armox 500T çeliğinin karakterizasyonu, gerilim üç eksenliliğinin yanı sıra gerinim hızındaki artışla birlikte mukavemetinde artış göstermiştir. Diğer yandan, sıcaklık artışı, malzemenin sünekliğinde önemli bir artışa neden olurken, mukavemetini azaltmıştır.

1.2.6 Poliüre

Poliüre, elastomer sınıfına ait bir malzeme olup, Şekil 1.9'da gösterildiği üzere bir diizosiyanat ile bir diamin bileşenlerinin kimyasal reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır. Yüksek elastikiyet, kimyasal direnç, sıvı geçirimsizliği ve kurlenme gibi üstün özelliklere sahiptir (Mercedes et al., 2025). Bu iki bileşenin hacimce 1:1 oranında karıştırılması işlemi, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç koşullarında gerçekleştirilir. Uygulama süreci özel olarak tasarlanmış, yüksek basınç ve sıcaklığa dayanıklı ısıtmalı makineler aracılığıyla yürütülmektedir. Bu sistemlerde, ısıya ve basınca dayanıklı hortumlar ile hortumların ucunda karıştırma ve püskürtme işlevi gören özel tabancalar bulunmaktadır. Reaksiyonun hızlı bir şekilde gerçekleşmesi ve poliürenin kurluşmesini sağlamak amacıyla, tabancaya kadar uzanan hortum boyunca ısıtma düzeneği bulunmaktadır.



Şekil 1.9 : Poliüre kimyasal reaksiyonu (Yıldırım, 2019)

İzosiyanat ve diamin bileşenleri, tabancanın ucuna kadar yaklaşık 80–90 °C sıcaklıkta ve 120 bar basınç altında taşınmaktadır. Burada hacimce eşit oranlarda karıştırılarak yüzeye püskürtülmektedir. Poliüre, mikrofaz ayrışması gösteren ve iki farklı bölgeden oluşan bir morfolojiye sahiptir. Yumuşak alanlar ve bu alanlara düzensiz şekilde dağılmış sert alanlar. Her faz, kendine özgü camsı geçiş sıcaklığına sahip olup, bu durum poliüreye heterojen bir yapı kazandırmaktadır.

1980'li yılların sonlarında ticarileştirilen poliüre kaplamalar, günümüzde su yalıtımı, korozyon önleme, enerji soğurma ve balistik koruma gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle enerji emme kapasitesi ile ilgili olarak, son yıllarda bu malzeme üzerine gerçekleştirilen akademik çalışmaların sayısında belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Örneğin Wang ve arkadaşları, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (uhmwpe) laminatlar gibi koruyucu malzemelerde poliüre kaplamaların arka yüz deformasyonu üzerindeki etkisini sistematik olarak incelemişlerdir (L. Wang et al., 2025). Balistik testlerden sonra yapılan CT taramaları ve sonlu eleman analizleri sonucu, poliüre kaplamaların uygulanmasıyla deformasyonda önemli bir azalma olduğu görülmüştür. Özellikle, poliürenin arka yüzeye ve her iki yüzeye kaplanması, hedef plakanın arka yüz deformasyonunu önemli ölçüde azaltmıştır. Bu da poliürenin, savunma ve inşaat gibi stratejik uygulamalarda ön plana çıkan bir kaplama malzemesi olma potansiyelini ortaya koymaktadır.

Bu malzeme, tüneller, köprüler, çatılar, otoparklar ve depolama tankları gibi çeşitli yapıların yüzey kaplamalarında, epoksi ya da kauçuk bazlı kaplamalara alternatif olarak kullanılmaktadır. Poliüre kaplamalar, aşınma ve darbe direnci yüksek, korozyona dayanıklı, uzun ömürlü çözümler sunmaktadır. Ayrıca yük gemileri ve kamyon kasalarının iç yüzeylerinde de benzer dayanım özelliklerinden faydalanılmaktadır.

Poliüre su yalıtımında da kullanılmaktadır. Yüzme havuzları, yağmur oluğu sistemleri ve su depolarında sızdırmazlık sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Otopark zeminlerinde ise yangına karşı koruma sağlamak, ani frenleme ve aşırı hız nedeniyle oluşabilecek kaymayı azaltmak için tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra, beton yüzeylerdeki çatlakların onarımı ve yüzeylerin korunması amacıyla duvar/çatı kaplamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Savunma sanayinde de önemli bir yer tutan poliüre, askeri araçlarda yangına dayanıklı yapıların oluşturulmasında ve darbe ile balistik koruma sağlayan panellerin üretiminde

kullanılmaktadır. Petrokimya sektöründe ise çelik borular ve depolama tankları gibi ekipmanların, ağır kimyasallar ve korozyon ortamlara karşı korunmasında etkin bir çözüm sunmaktadır. Poliürenin sahip olduğu bu avantajlar, çeşitli sektörlerdeki kullanımını her geçen gün daha da yaygınlaştırmakta ve bu malzemeye yönelik ilgiyi artırmaktadır.

1.2.7 Grafen

Deneysel olarak sentezlenen ilk iki boyutlu malzeme olan grafen, üstün elektronik, termal ve mekanik özellikleri sayesinde malzeme bilimi alanında büyük ilgi görmüştür. Üretim sürecinin görece basit ve maliyet açısından avantajlı olması, grafeni harika bir malzeme olarak daha da cazip kılmaktadır. Köpüklerden esnek elektroniklere ve kompozit malzemelere kadar pek çok alanda uygulama potansiyeli bulunan grafen, yalnızca benzersiz elektronik özellikleriyle değil, aynı zamanda olağanüstü mekanik dayanımıyla da dikkat çekmektedir. Atom kalınlığında olmasına rağmen son derece sağlam bir yapı sunan grafen, yapılan deneysel çalışmalarla çeliğe kıyasla balistik darbelere karşı daha yüksek direnç gösterdiği ve yaprak benzeri kırılma dinamikleri sergilediği ortaya konmuştur (Moura et al., 2024).

Yaklaşık 1 TPa elastisite modülü ve 130 GPa kopma mukavemeti gibi üstün mekanik özelliklere sahip olan grafen, darbe enerjisini hızla dağıtma yeteneği sayesinde darbe koruması için ideal bir adaydır. Grafen dikkate değer bir sertlik ve etkileyici gerinim değerleri sunabilmesine rağmen, yaklaşık 4 MPa/m² düşük bir kırılma tokluğu sergiler. Bu da onu kırılman olarak sınıflandırır. Gerilmeye maruz kaldığında, ani bir kırılma yaşar ve bu da genellikle birden fazla kırık yapıya neden olur. Bu problemlerin üstesinden gelmek için, kaba taneli simülasyonlara dayalı olarak, Zhu ve arkadaşları tarafından desenli grafen nanomeshleri kavramını içeren yenilikçi bir strateji geliştirilmiştir. Özellikle, bu nanomesh yapıları yaklaşık %50 uzamaya maruz kaldığında bile olağanüstü uyumluluk göstermiştir (Zhu et al., 2014). Örneğin, Lee ve arkadaşları (Lee et al., 2014), grafenin balistik direncinin katmanların artmasıyla sürekli olarak artırılabilirliğini ve çok katmanlı grafenin özgül penetrasyon enerjisinin makroskobik çelik saclarındakinden yaklaşık 10 kat daha fazla olduğunu kanıtladılar. Li ve Guo, moleküler dinamik simülasyonları kullanarak, tek katmanlı grafenin balistik darbe altındaki enerji soğurma kapasitesini, deformasyon ve kırılma modlarını incelemiştir (X.-L. Li & Guo, 2023). Araştırma, merminin başlangıç hızı ile artık hızı arasındaki ilişkiyi, sıçrama, doğrusal olmayan nüfuz ve doğrusal nüfuz olmak üzere üç ana bölgeye ayırmıştır. Düşük

hızlarda konik bölgenin deformasyonu baskın faktörken, yüksek hızlarda kinetik enerji artışları belirleyici olmuştur. Ayrıca, aynı darbe hızında mermi çapı arttıkça özgül penetrasyon çapının azaldığı da tespit edilmiştir.

1.2.8 Kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşan, her bir bileşenin tek başına sahip olduğu özellikleri birleştirerek üstün performans sağlayan malzemelerdir. Bu malzemeler, genellikle matris ve takviye malzemesi olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Matris, takviye malzemesini bir arada tutar ve şekil verirken, takviye malzemesi kompozitin mukavemet ve dayanıklılığını artırır. Kompozit malzemeler, balistik zırhlarda, hem hafif hem de yüksek mukavemetli yapıları nedeniyle önemli bir rol oynar (Eryıldız & Akdoğan Eker, 2015).

Kompozit malzemeler, çeşitli kombinasyonlarda üretilebilir ve bu sayede istenilen özellikleri taşıyan zırhlar oluşturulabilir. Balistik zırhlarda en yaygın olarak kullanılan kompozit malzemeler arasında, karbon fiber, aramid fiber (kevlar gibi), cam fiber ve polietilen (dyneema gibi) yer alır. Bu malzemeler, genellikle epoksi, polyester veya termoplastik gibi matrislerle birleştirilir.

Kompozit malzemelerin en belirgin özellikleri arasında yüksek mukavemet/ağırlık oranı, darbe dayanımı ve esneklik yer alır. Bu malzemeler, çelik gibi geleneksel zırh malzemelerine kıyasla çok daha hafif olmasına rağmen, benzer veya daha üstün koruma sağlayabilir. Ayrıca, kompozit malzemeler genellikle esnektir, bu da darbe enerjisinin yayılmasını ve emilmesini kolaylaştırır.

Kompozit malzemeler, balistik zırhlarda çeşitli şekillerde kullanılır. En yaygın kullanım alanları arasında, vücut zırhları, balistik kasklar, zırhlı araçlar ve hava araçları gibi uygulamalar yer alır. Vücut zırhlarında, kompozit malzemeler genellikle katmanlar halinde yerleştirilir. Böylece mermilerin darbe enerjisi absorbe edilerek, zırhın delinmesi önlenir.

Balistik kasklarda, kompozit malzemeler hem hafiflik hem de yüksek koruma sağlar. Özellikle aramid fiber ve karbon fiber gibi malzemeler, kaskların yüksek mukavemetli olmasını sağlarken, kullanıcının başını ağırlaştırmadan uzun süreli koruma sunar. Zırhlı araçlarda ise, kompozit malzemeler çelik veya alüminyum gibi diğer zırh malzemeleriyle birlikte kullanılarak,

araçların hem ağırlığını azaltır hem de darbelere karşı dayanıklılığını artırır.

Kompozit zırhlar, aynı zamanda modülerlik avantajı sunar. Farklı tehdit seviyelerine göre kompozit katmanlar eklenebilir veya çıkarılabilir, bu da zırhın esnek kullanımını sağlar. Ayrıca, kompozit malzemeler genellikle düşük radar izi bırakır, bu da askeri araçların veya personelin radardan gizlenmesine yardımcı olabilir.

Kompozit zırhların bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan biri, üretim maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Kompozit malzemelerin üretimi, çelik gibi geleneksel malzemelere kıyasla daha karmaşıktır. Bu durum maliyetin artmasına neden olur. Ayrıca, kompozit zırhlar belirli koşullar altında (Örneğin, çok yüksek hızda gelen mermiler veya zırh delici mermiler) yeterli koruma sağlayamayabilir. Bu nedenle, kompozit zırhlar genellikle diğer malzemelerle birlikte kullanılır.

Kompozit zırhların bir diğer dezavantajı, çevresel faktörlere karşı hassas olmalarıdır. Özellikle nem, UV ışınları ve kimyasallar gibi faktörler, kompozit malzemelerin performansını olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, kompozit zırhların doğru bir şekilde korunması önem arz etmektedir.

Kompozit malzemelerin balistik zırhlarda kullanımı, gelecekte daha da yaygınlaşması beklenen bir durumdur. Malzeme biliminin gelişmesi ve üretim yöntemlerinin değişmesi ile birlikte, daha hafif ve dayanıklı zırhlar geliştirmek mümkün olacaktır. Özellikle nanoteknoloji ve grafen gibi yeni nesil malzemelerin kompozit zırhlarda kullanılması, zırhların performansını artırabilir ve yeni koruma seviyeleri sunabilir. Necibullah çalışmasında, katkısız ve nano grafen katkılı kevlar kumaşı ile balistik testler gerçekleştirmiştir (Kurban, 2022). Testlerin sonunda nano grafen katkısının, zırh arka yüzeyinde oluşan çökme derinliğini azaltmaya katkıda bulunduğunu tespit etmiştir.

Kompozit malzemelerin kullanım alanları sadece askeri uygulamalarla sınırlı değildir. Polis teşkilatında, güvenlik personeli ve sivil koruma ekipmanlarında da kullanılmaktadır. Ayrıca, uzay araştırmalarında ve havacılıkta da kompozit malzemelerin kullanımı artmaktadır.

1.2.9 Kesme kalınlaştırma sıvısı (STF)

STF, son yıllarda balistik koruma teknolojilerinde çığır açan bir yenilik olarak kabul edilmiştir. Yapısal özellikleri çevresel ve mekanik koşullara bağlı olarak değişebilen bu sıvılar,

yüksek mukavemetli balistik kumaşlarla birleştirilerek koruyucu yapılara dönüşür. Bu tür zırhların temel çalışma prensibi, kayma gerilmesi altında akışkanlığını artırarak çarpma esnasında sertleşmesidir (Tang et al., 2024). Shear thickening fluids (STF), hem geleneksel kompozit zırhlara göre daha hafif hem de kullanıcı açısından daha konforlu bir alternatiftir.

Bir kesme kalınlaştırıcı sıvısının yapısı, parçacık boyutu, şekli ve boyut dağılımı, parçacık yoğunluğu, yük, pürüzlülük ve bazı durumlarda parçacık yüzeyi ile taşıyıcı sıvı arasındaki kimyasal etkileşimin fonksiyonudur. Bunlardan farklı parametreler de kesme kalınlaştırma sıvısının yapısında önemli rol oynar. Özellikle boyut dağılımı, parçacık-parçacık etkileşimi, parçacıkların hacim kesri ve askıda kalan fazın viskozitesidir (Barnes, 1989). Maranzano ve Wagner, geri dönüşümlü kesme kalınlaşmasının başlangıcının parçacık boyutuna, konsantrasyona, polidispersiteye ve kritik bir strete dispersiyonun parçacıklar arası etkileşimine bağlı olduğunu göstermiştir (Maranzano & Wagner, 2013).

Kesme kalınlaşmasının mekanizmasını anlamak için literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bugüne kadar, bu akışkanların davranışını açıklamak için iki farklı mekanizma önerilmiştir. Bunlar, düzen-düzensizlik teorisi ve hidrokümeleme teorisidir. Tüm mekanizmalar yapısal geçişleri içerir. Aşırı veya kesikli kesme kalınlaşma davranışı durumunda, kritik kesme hızındaki akışkan tepkisini incelemek zor olmuştur. Çünkü çoğu reometre uygulanan deformasyon hızını kontrol ederek çalışmaktadır. Son zamanlarda, gerilim kontrollü reometrelerin iyileştirilmesi ve kolloidal dispersiyonların mikroyapısını küçük açılı nötron saçılması ile reo-optik cihazlar gibi ek tekniklerle karakterize edebilme imkânı, kesme kalınlaştırma sıvısının ve buna eşlik eden mikroyapısal değişimlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır (Frith ve diğerleri, 1996). Stokesian dinamikleri teknikleri de süspansiyonlardaki kesme kalınlaşmasının davranışını anlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Brady & Bossis, 1988); Catherall ve diğerleri, 2000).

Reoloji, maddenin deformasyonu ve akışı ile ilgilenen bir bilim dalıdır. Gerilmeler ve deformasyonlar arasındaki ilişkiler, reoloji ile ilişkili olan süreklilik mekaniğinin temel kavramlarıdır. Çünkü reoloji, akış ve deformasyon çalışması anlamına gelmektedir. Temel olarak, reoloji akış davranışı ile ilgili her şeyi içerir. Havacılık, hidrolik, akışkanlar dinamiği ve hatta katı mekaniği. Öte yandan, pratikte reoloji genellikle, başta sıvılar olmak üzere

malzemelerdeki kuvvet ve deformasyon arasındaki kurucu ilişkiler olarak adlandırılan temel ilişkilerin incelenmesiyle sınırlandırılmıştır. Bingham, boya gibi konsantre süspansiyonlarda olağandışı akış davranışları gözlemlemiştir. Bu nedenle, reolog çok basit deformasyonlar kullanarak malzeme davranışına odaklanırken, mekanikçi reolog tarafından geliştirilen bünye ilişkilerini uygulayarak karmaşık deformasyonda gelişen kuvvetleri inceler (Macosko, 1994).

Reoloji terimi profesör Bingham tarafından, bir meslektaşının tavsiyesi üzerine icat edilmiştir. Maddenin deformasyonu ve akışının incelenmesi anlamına gelmektedir. Bu tanım, 1929 yılında Amerikan Reoloji Derneği kurulduğunda kabul edildi. Bu ilk toplantıda asfalt, yağlayıcılar, boyalar, plastikler ve kauçuk gibi çok farklı malzemelerin özellikleri ve davranışları üzerine bildiriler sunulmuştur. Bu da konunun kapsamı ve ilgili olabilecek çok sayıda bilimsel disiplin hakkında bir fikir vermiştir. Günümüzde kapsam daha da genişlemiştir. Biyoreoloji, polimer reolojisi ve süspansiyon reolojisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Reolojinin kimyasal işleme endüstrilerindeki önemi de büyük ölçüde anlaşılmıştır. Biyoteknoloji endüstrilerinde reolojinin daha kapsamlı uygulamaları için şüphesiz fırsatlar mevcuttur. Artık birçok ülkede ulusal reoloji dernekleri bulunmaktadır. Örneğin İngiliz Reoloji Derneği'nin matematik, fizik, mühendislik ve fiziksel kimya gibi çok farklı alanlardan gelen bilim insanlarından oluşan 600'den fazla üyesi bulunmaktadır (Sangroniz et al., 2023).

1.3 Uluslararası Balistik Test Standartları

Balistik koruyucu test standartları, askeri, güvenlik ve sivil kullanım amaçlı zırh malzemelerinin ateşli silahlara ve patlayıcı etkilere karşı dayanıklılığını belirlemek için geliştirilmiş uluslararası ve ulusal protokolleri kapsamaktadır. Bu standartlar, zırh sistemlerinin etkinliğini değerlendirerek, kullanıcıların farklı tehdit seviyelerine karşı korunmasını sağlamaktadır (Popescu et al., 2024).

Günümüzde balistik koruma sistemlerinin test edilmesi için birçok uluslararası standart kullanılmaktadır. Bunlar arasında en yaygın olanlar Çizelge 1.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 1.3 : Uluslararası Balistik Koruma Standartları (Alarçin, 2021)

STANDART NO	STANDART ADI
TS 11164	Balistik koruyucu vücut zırhı
TS 13349	Askerî zırhlar – V50 balistik hız deneyi
MIL-A-46103 C	Hafif, seramik yüzeyle kompozit zırh prosedürü gereklilikleri
MIL-B-44053 A	Parça tesirinden koruyan vücut zırhı, kara birlikleri yelege
MIL-STD-662 F	Zırh için balistik test
NIJ-STD-0101.04	Kişisel vücut zırhının balistik dayanımı
NIJ-STD-0101.06	Kişisel vücut zırhının balistik dayanımı
NIJ-STD-0108.04	Koruyucu materyallerin balistik dayanımı
STANAG 2920	Kişisel zırh için balistik test yöntemi
UK/SC/4697	Parçacık koruyucu personel zırhlarının balistik testi
UL 752	Balistik Dayanım Malzemeleri
MIL-P-46199	Alüminyum oksit seramik (Kompozit zırhlarda kullanım için)
Pr EN ISO 14876-2	Koruyucu giysi-vücut zırhı-bölüm-2: Mermi dayanımı gereksinimleri ve yöntemleri

NIJ 0101.06 standardı, günümüzde en yaygın kullanılan balistik test standartlarından biridir. ABD Ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ) tarafından geliştirilen bu standart, polis, askeri personel ve özel güvenlik güçleri tarafından kullanılan vücut zırhlarının balistik dayanımını değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Örneğin STANAG ise, NATO üyesi ülkeler tarafından askeri malzemelerin (cam, miğfer vb.) koruyucu özelliklerini test etmek için V50 balistik limit hesaplamalarının kullanımına dayanan bir standarttır. TS11164 ve UL752 standartları, sivil kullanım açısından farklı noktalara odaklanır. Örneğin TS11164, Türkiye’de polis ve askeri kurumlar dışında kullanılır. Tıpkı NIJ standardına benzer koruma seviyeleri ile test imkanı sunar. UL752 ise kurşun geçirmez camlar, güvenlik kabinleri, banko sistemleri gibi 1’den 10’a kadar seviyelendirilmiş farklı mühimmatlara karşı balistik direnci değerlendirmeyi esas alır.

Modern güvenlik ihtiyaçlarına uygun olarak tasarlanan NIJ 0101.06 standardı, farklı mühimmat türlerine karşı koruma sağlamak için çeşitli seviye kategorilerine ayrılmıştır. Çizelge 1.4’te de görüldüğü üzere, NIJ 0101.06 balistik standardına ait tüm koruma seviyeleri için bir zırhın test sonrası arka yüzünde oluşan çökme derinliğinin 44 mm’yi aşması halinde test başarısız sayılır. Özellikle Level III ve IV zırh plakaları, yüksek kalibreli tüfek mühimmatlarına karşı etkili bir koruma sunmaktadır. Bu nedenle, askeri operasyonlar ve kolluk kuvvetlerinin

saha görevleri için temel donanım haline gelmiştir.

NIJ 0101.06 standardının kullanım alanları, yalnızca ateşli silahlara karşı koruma ile sınırlı kalmamaktadır. Yapılan araştırmalar, bu standardın, patlama dalgalarına karşı vücut zırhlarının etkinliğini test etmek için de kullanıldığını göstermektedir. Patlamalardan kaynaklanan travmalara karşı koruma sağlamak amacıyla geliştirilen yeni nesil balistik yelekler, NIJ test prosedürlerine tabi tutulmaktadır. Bu bağlamda, modern zırh sistemleri, yalnızca mermilere karşı değil, aynı zamanda patlama dalgası etkisiyle oluşabilecek iç organ hasarlarını da minimize etmek üzere tasarlanmaktadır.

Balistik koruyucu ekipmanlarda malzeme seçimi, standartların etkinliği açısından büyük önem taşımaktadır. Geleneksel seramik ve çelik bazlı zırhların yanı sıra, günümüzde hafiflik ve esneklik sağlamak amacıyla biyokompozit malzemeler üzerinde çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Son yapılan araştırmalar, kenevir-bazalt-poliüretan kompozitlerinin, NIJ 0101.06 standardına uygun olarak test edildiğinde etkili bir balistik dayanım sunduğunu ortaya koymuştur. Bu tür biyokompozit malzemeler, özellikle askerler ve güvenlik personeli için daha iyi hareket kabiliyeti sağlayarak operasyonel etkinliği artırmaktadır (Gowda & Bhat, 2024). Kote ve çalışma arkadaşları (Kote et al., 2024), bu standardın künt travmalara karşı sağladığı korumayı inceleyerek, zırhın arka yüzeyinde meydana gelen deformasyonun kullanıcı üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir.

Çizelge 1.4 : NIJ STD-0101.06 Balistik Koruma Seviye Tablosu (Sözen, 2019; Tombul, 2024)

Koruma Seviyesi	Test atışı	Mermi kalibresi	Mermi Ağırlığı	Mermi Hızı (m/s)
IIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 gr. 124 gr.	373 m/s (1225 ft/sn)
	2	40 S&W FMJ	11.7 gr. 180 gr.	352 m/sn (1155 ft/sn)
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 gr. 124 gr.	398 m/sn (1305 ft/sn)
	2	.357 Magnum JSP	10.2 gr. 158 gr.	436 m/sn (1430 ft/sn)
IIIA	1	.357 SIG FMJ FN	8.1 gr. 125 gr.	448 m/sn (1470 ft/sn)
	2	44 Magnum SJHP	15.6 gr. 240 gr.	436 m/sn (1430 ft/sn)
III	1	7.62mm NATO FMJ	9.6 gr. 148 gr.	847 m/sn (2780 ft/sn)
IV	1	30 Kalibre M2 AP	10.8 gr. 166 gr.	878 m/sn (2880 ft/sn)

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Modern savunma sanayi araştırmalarının temeli, yalnızca yüksek kinetik enerjili mermilere karşı etkili koruma sağlamakla kalmayıp aynı zamanda operasyonel hareketliliği korumak için yeterli hafifliğe ve esnekliğe sahip yapıların oluşturulmasına dayanmaktadır.

Literatür taramasının amacı, malzeme seçimi, kompozit tasarım, balistik etki ve sayısal modelleme dahil olmak üzere temel eksenler boyunca sınıflandırma yaparak bu önemli alandaki bilgiyi aydınlatmaktır. Zırh teknolojileri, doğal elyaf takviyeli kompozitler gibi çevresel açıdan sürdürülebilir alternatiflerden metal ve seramik bazlı yüksek sertlikte malzemelere kadar geniş bir malzeme yelpazesini kapsar. Bu çeşitlilik, bilimsel literatürün yalnızca malzeme türüne göre değil, aynı zamanda kullanılan deneysel metodolojiler ve simülasyon teknikleri açısından da kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini gerektirir.

Farklı alt başlıklar altında düzenlenen çalışmaların sunumu, bu çok yönlü araştırma alanının mevcut durumunu belirgin bir şekilde aydınlatacak ve tezin orijinal araştırma konusunu çevreleyen bilimsel söylem içindeki belirli bilgi boşluklarını belirlemek için bir temel oluşturacaktır.

2.1 Doğal Elyaf Takviyeli Kompozit Zırh Sistemleri

Braga ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada, doğal curaua elyaf (ananastan elde edilmektedir) ile güçlendirilmiş kompozitlerin 7,62mm mermi etkisi altındaki balistik davranışını incelemişlerdir. Deneyde curaua lifleri, polyester kompozit, polyester reçine ve aramid kumaş tabakaları (Kevlar™) kullanılmıştır. Kompozit malzeme hazırlanırken curaua lifleri 150mm uzunluğunda kesilmiş ve 60°C’de 24 saat süreyle kurutulmuştur. Daha sonra eklemeli tabakalar arasına %1 sertlikteki polyester karışımı uygulanmış ve 3 Mpa basınç altında oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiştir. Son olarak kompozit tabakalar 120×150×10 mm ölçülerinde kesilmiştir. Elde edilen numuneler B290 HPI model atış aleti ile balistik etkiye maruz bırakılmışlardır. Deneylerde kullanılan merminin çapı 7,62mm ve ağırlığı 9,7 g’dır. 5 farklı numuneye 15 metre uzaklıktan 90°’lik açıyla atışlar yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda polyester reçine ile üretilen numune en yüksek enerjiyi absorbe etmiş ancak parçalanmasından dolayı bu tür atışlarda kullanımının elverişsiz olduğu görülmüştür. Hacimce %30 curaua fiber içeren numunenin ise çarpışma sonrası yüksek enerji absorpsiyonuna ve yüksek kohezyona sahip olduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle çevre dostu olan curaua fiberlerin

çok katmanlı zırh sistemlerinde sentetik fiber kumaşların yerini alması olasıdır.

Doğal curaua lifi takviyeli polyester kompozitler, saf polyesterin parçalanma sorununa çözüm sunmuştur. Kevlara benzer balistik performans gösterirken, ucuz ve çevre dostu olmasıyla avantaj oluşturmaktadır. Öte yandan, STF katkılı kumaşlar düşük hızlı darbelerde üstünlük sağlarken, yüksek hızlara çıkıldığında düşük balistik performans göstermiştir. Bunun sebebi, ipliklerin erken hasara uğraması ve arıza mekanizmasının çekmeden kesmeye doğru değişmesidir.

Risby ve arkadaşları (2008) hindistan cevizi kabuğu tozu ve epoksi kompozitten oluşan (COEX) yeni bir zırh malzemesinin balistik performansını araştırmışlardır. Geleneksel zırh malzemelerinin maliyet ve ağırlık kısıtlamalarını ele alarak, doğal elyafların potansiyelini değerlendirmişlerdir. Çalışma, COEX/Twaron kompozit panelin 9 mm'lik mermilere karşı NIJ Seviye IIIA koruma sağladığını, ancak 7.62 mm'lik mermilere karşı delindiğini göstermiştir. Genel olarak, COEX'in şok emme özellikleri ve enerji absorbe etme kabiliyetindeki önemli artış (Twaron kumaşa göre %170'e varan iyileşme) bu malzemenin hafif ve daha ucuz bir zırh bileşeni olarak potansiyelini ortaya koymuştur. Deneyler, malzemenin mermi darbeleri altında kırılma ve çatlama mekanizmalarıyla enerji absorbe ettiğini de göstermiştir.

Oliveira ve arkadaşları (2019) Weibull analizini kullanarak epoksi-fique kumaş kompozitleri ile çok katmanlı zırhın balistik performansı üzerine çalışmışlardır. Ön katmanda seramik karolu çok katmanlı zırh sisteminin (MAS) balistik performansı, hacimce %50'ye kadar tek kumaşla güçlendirilmiş epoksi matris ve arkada ise 5062H34 alüminyum alaşımdan oluşan bir laminat ile değerlendirilmiştir. Merminin neden olduğu çökmeyi, uluslararası standartlara göre değerlendirmek için hedefin arkasında bir kil bloğu kullanılmıştır. Test edilen malzemeler arasında, hacimce %40 kumaş kompozitin kevların yerini almak için daha iyi bir alternatif olduğu bulunmuştur. Epoksi-fique kumaş kompozitin daha düşük maliyeti, aramid kumaşın yerine geçmesini sağlayan ek bir avantajdır.

Ali ve arkadaşları (2019) dokuma bambu-dokuma E-cam-doymamış polyester hibrit kompozitlerin balistik etki özellikleri üzerine çalışmışlardır. Plaka boyutları 300×300 mm olan iki farklı kompozit malzeme üretilmiştir. Bunlardan ilki 4 kat dokuma bambu ile 18 kat dokuma E-cam'dan (WB/EG) oluşmaktadır. İkincisi ise 9 kat E-cam, 4 kat dokuma bambu ve 9 kat dokuma E-cam (EG/WB/EG) şeklindedir. Balistik testler her iki numune üzerinde başarıyla

uygulanmıştır. ML-STD-6682 askeri standardına göre, WB/EG numunesi 482m/s hıza sahip mermiye dayanabilmiştir. Bu değer NIJ-III standardını geçmek için gereken minimum hızdan daha fazladır. EG/WB/EG numunesi ise 414m/s hızla NIJ-II standardına ulaşmıştır. Bu sonuçlar, E-camın balistik etkiyi bambu kadar absorbe edemediğini açıkça göstermiştir.

Braga ve arkadaşları (2018) çok katmanlı zırh sistemlerinde (MAS) epoksi-rami ve epoksi aramid kompozitler arasında balistik karşılaştırma üzerinde çalışmışlardır. Bir çok katmanlı zırh sistemi (MAS) genellikle ön yüzde seramik, ara katmanda fiber/kumaş kompozit ve arka yüzde sünek bir metal tabakadan oluşmaktadır. Bu çalışmada, biri ham rami elyafı, diğeri aramid kumaş tabakaları ile takviye edilmiş epoksi kompoziti MAS ara tabakası olarak kullanılmıştır. Amaç, daha ekonomik ve/veya çevre dostu malzemelerle benzer balistik performans elde etmektir. Sonuçlar, her iki kompozitin de daha önce araştırılan rami kumaş kevlar ile karşılaştırılabilir balistik performans gereksinimleri karşıladığını göstermiştir. Ayrıca rami elyaf kompozit ile oluşturulan zırh sistemi, hepsi arasında en ucuzu olarak bulunmuştur.

Sanborn ve arkadaşları (2019) çapraz lamine kerestelerin (CLT) balistik performansı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma, ABD Ordusu Mühendis Araştırma ve Geliştirme Merkezi'nde CLT'nin 2 türü üzerinde gerçekleştirilen 152 adet balistik deneyden oluşmuştur. Bu malzemelerden ilki Ladin-Çam-Gökmar (SPF-S), ikincisi ise Güney Sarı Çam'dır (SYP). Farklı kalınlıklara sahip iki türün performansını anlamak ve karakterize etmek için veriler oluşturulmuştur. Genel olarak çökme derinliği açısından SYP numuneleri, SPF-S numunelerinden daha iyi performans göstermiştir. Bu sonuçta SYP'nin SPF-S'e göre yüksek yoğunluk ve sertlik değeri etkili olmuştur.

Literatürde yer alan birçok çalışma doğada, balistik açıdan üstün özelliklere sahip oldukça fazla sayıda malzeme bulunduğunu göstermektedir. Ancak çalışmaların geneline bakıldığında, bu malzemelerin genellikle yumuşak zırh sistemlerinde kullanılabilir olduğunu göstermiş ve düşük kalibreli mermilere karşı başarı sağladığı tespit edilmiştir.

2.2 Yüksek Performanslı Metalik ve Metal Matrisli Zırh Yapıları

Flores-Johnson ve arkadaşları (2011), 7,62 mm APM2 mermilerine maruz bırakılan çok katmanlı metalik plakaların balistik performansını araştırmışlardır. Araştırmaları, monolitik, çift katlı veya üç katlı çelik veya alüminyumdan ya da bu malzemelerin kombinasyonundan oluşan 3 katmanlı plakaların, hız aralığı 775 ile 950 m/s aralığında değişen 7,62 mm kalibreli APM2

mermilerinin balistik performansının sayısal modellemesi üzerine dayanmaktadır. Sayısal modellemeler, LS-DYNA açık sonlu eleman kodu kullanılarak geliştirilmiştir. Deney sonucunda monolitik plakaların, aynı malzemeden yapılmış çok katmanlı plakalara göre daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Ayrıca ince alüminyum ön plakalı ve kalın arka çelik plakalı hedeflerin, aynı alan yoğunluğuna sahip çok katmanlı plakalara göre daha fazla direnç gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, daha iyi balistik performans ve ağırlık tasarrufu için farklı metalik malzemeler kullanan çok katmanlı hedeflerin araştırılması gerektiğini göstermiştir.

Eser çalışmasında (Sözen, 2019), atık polipropilen ve dokuma cam lifi ile desteklenen OSB panellerin balistik performansını araştırmıştır. Deneylerde 30, 40 ve 50 adet dokuma cam lifi, OSB panel ve 3 farklı kalınlıkta (0,8 mm, 1,2 mm, 1,5 mm) metal kullanılarak 15 farklı hedef numunesi hazırlanmıştır. Dokuma cam lifi (500 gr/m²) rulo şeklinde Omnis Kompozit San. Tic. Ltd. Şti.'den, OSB'ler SFC Entegre Orman Ürünleri Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den, atık polipropilen ise BGS Beypazarı Gıda Petrol San. ve Tic. Ltd. Şti.'den granül halinde temin edilmiştir. Bu numuneler NIJ IIA balistik standardına göre test edilmiştir. Deneyler sonucunda, 1,5 mm kalınlığındaki metal plaka, 50 adet dokuma cam lifi ve OSB içeren hedef numune en iyi balistik performansı sergilemiştir. Ayrıca metal plakanın ön yüzeye yakın konumlandırılmasının ise merminin ilk enerjisini absorbe etmede önemli rol oynadığı keşfedilmiştir.

Yahaya ve arkadaşları (2015), alüminyum petek sandviç panellerin köpük mermilerin çarpmasına karşı direncini deneysel olarak araştırmışlardır. Farklı petek göbek konfigürasyonlarına sahip paneller, hava sandviç paneller ve eşdeğer kütleli monolitik plakalar kullanmışlardır. Sandviç panellerin arka yüz sapması, eşdeğer kütleyle sahip monolitik levhalar ve hava sandviç panelleriyle de karşılaştırılmıştır. Hava sandviç paneli, petek sandviç panellerin çekirdek kalınlığına yakın bir mesafede sadece iki paralel levhadan (çekirdeksiz) oluşan bir yapıya sahiptir. Köpük mermi darbesinin enerjisini emmede sandviç panellerin kullanılmasının avantajları ve sınırlamaları tartışılmıştır. Çarpma sonrası arka yüzdeki esneme ve kalıcı deformasyonları incelemiş, farklı yapıların performanslarını karşılaştırmışlardır. Petek sandviç panellerin belirli bir darbe aralığında diğerlerine göre daha iyi performans gösterdiğini ancak bu aralık dışında avantajlarının azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Yaptıkları çalışma, bu bulguların potansiyel koruyucu yapıların tasarımı için önemini vurgulamaktadır.

Durmuş ve arkadaşları (2011), soğuk haddelenmiş metal sac malzemelerin balistik darbe performansları üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. 1 mm ve 2 mm kalınlığında düşük karbonlu soğuk haddelenmiş H320LA (DIN EN 10268-99) çelik sac levhalar, 9 mm (FMJ) kalibreli NATO mermisine karşı test edilmiştir. Mermi hızı öncesi ve sonrası delinme, ön yüz deformasyon çapı, penetrasyon (çökme) derinliği ve penetrasyon delik çapı gibi parametreler üzerinde incelemeler yapılmıştır. Sonuç olarak, en yüksek balistik limit 2 mm kalınlığındaki levhada (332 m/s), en düşük balistik limit ise 1 mm kalınlığındaki levhada (97 m/s) tespit edilmiştir.

Hakan çalışmasında (Atapek, 2011), metalurjik esaslar doğrultusunda bor katkılı bir zırh çeliği geliştirmiş ve balistik performansını incelemiştir. Mevcut zırh çeliklerinin sahip olduğu mekanik ve balistik özelliklere göre daha yüksek performanslı alaşım tasarımı için farklı ısıl işlemler uygulamıştır. Alaşımın, bu ısıl işlem koşullarına göre V50 balistik limiti ve yüksek çarpma hızlarındaki performansını araştırmıştır. Geliştirilen alaşımın dökümü Anadolu Döküm Sanayi A.Ş. tarafından gerçekleştirilmiş ve 12,7×300×1000 mm ebatlarında 5 adet olarak hazırlanmıştır. MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 standartlarına göre yapılan atışlarda 7,62 AP M2 mermisi kullanılmıştır. MIL-A-12560'a göre V50 balistik limit hızları 775, 745 ve 780 m/s olarak bulunmuştur. MIL-A-46100'e göre ise V50 limit hız değeri 756 m/s olarak ölçülürken, standart değer 746 m/s'dir. Sonuç olarak, geliştirilen zırh çeliklerinin daha yüksek V50 balistik hız limitlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Singh ve arkadaşları (2019) yüksek nitrojenli çelik ve haddelenmiş homojen zırh çeliğinin 7,62 mm top ve 12,7 mm zırh delici mermilere karşı balistik performansı üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. 7,62 mm top ve 12,7 mm zırh delici mermilerin çarpma hızları sırasıyla 850 ± 10 m/s ve 840 ± 10 m/s'dir. Farklı kalınlık hedefleri üzerinde yapılan balistik testlerde merminin durdurulduğu kritik kalınlık bulunmuş ve balistik performans karşılaştırması için kullanılmıştır. Yüksek nitrojenli çelik (HNS) plakaları, hem 7,62 mm top hem de 12,7 mm zırh delici mermilere karşı haddelenmiş homojen zırh çeliği (RHA) plakalara göre daha yüksek darbe direnci göstermiştir.

Ertan (Kösedağ, 2020) çalışmasında, polimer/metal matrisli kompozitlerden oluşan sandviç yapıların balistik davranışını incelemiştir. Bu doğrultuda metal matrisli kompozit takviye elemanı türü ve oranını belirlemek için çeşitli oranlarda B₄C ve SiC takviyeli Al6061

matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ve düşük hızda darbe testlerine tabi tutularak sonuçları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sandviç yapıda kullanılacak metal matrisli kompozit malzemenin hacimce %20 SiC takviyeli Al6061 matrisli kompozit malzeme olmasına karar verilmiştir. Toz metalurjisi yöntemi ve sıcak pres cihazı kullanılarak üretilen metal matrisli kompozitlerde kullanılan Al6061 tozlarının boyutları yaklaşık 30-40 mikron olup, Nanografi® firmasından temin edilmiştir. Polimer matrisli kompozit malzeme olarak, aramid fiber (Plain-300g/m²) takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeler prepreg halinde Kompozitsan® firmasından temin edilmişlerdir. Bu iki malzeme farklı birleşim şekillerinde biraraya getirilerek 5 farklı hedef malzeme üretilmiştir. Bunlardan birinci tipteki numune S-1 kodlu yapı, her biri 0,25 mm kalınlığındaki 20 katman aramid prepreg ve 13 mm lik MMK den meydana gelmektedir. İkinci tip numune S-2 numaralı numunedir bu numune S-1 ile aynı yapıda olmakla birlikte hedefe ters yerleştirilmiştir. Yani mermi ilk olarak MMK ile karşılaşmaktadır. Üçüncü tip S-3 numunesi MMK ortada kalacak şekilde ön ve arka yüzeyi 10 ar katman prepreg ile kaplanmış toplamda 18 mm kalınlığındaki numunedir. Son olarak dördüncü ve beşinci tipteki numuneler diğer numuneler ile eş geometride olacak şekilde sırası ile saf PMK ve saf MMK'dan meydana gelmektedir. Yani bu numunelerde farklı katmanlar bulunmamaktadır, kıyaslama numuneleri olarak kullanılmışlardır. Balistik deneyler, MIL-DTL-46593 ve STANAG 2920 standartlarına uygun olarak ve 500 m/s hıza sahip FSP (Fragment simulating projectile) mermilerle gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en az penetrasyona uğrayan numunenin yalnızca metal matrisli kompozitlerin kullanıldığı numuneler olduğu görülmüştür. En çok hasara uğrayan numune ise yalnızca polimer matrisli kompozitlerin kullanıldığı numunelerdir. Ayrıca ön yüzde metal matrisli kompozitlerin kullanıldığı sandviç numunelere ait penetrasyon derinliği, ön yüzde polimer matrisli kompozitlerin kullanıldığı sandviç numunelere oranla daha düşük çıkmıştır. Böylece mermi geliş doğrultusunda sertlik değeri yüksek malzemelerin kullanımının avantaj sağlayacağı ispatlanmıştır.

Rahimijonoush ve Bayat (2020), deneysel olarak 3 tip titanyum sandviç panelden oluşan 12 adet test düzeneğinde balistik araştırmalar yapmışlardır. Testler, 100m/s ile 190m/s arasında değişen hızlarda bir nitrojen gazı tabancası ve 24g ağırlığında yarım küre şeklindeki çelik mermilerle gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar kullanılarak uygun bir sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Balistik sınır hızı, enerji absorpsiyonu ve önden arkaya yüzey tabakalarının kalınlık oranının etkisi simülasyonla incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, 1

mm'den ön yüzey tabakasına kadar artan kalınlığın balistik sınırı %23,4 artırdığını ve arka yüz tabakasına kadar 1 mm artmasının balistik sınırı %30,7'ye kadar yükselttiğini göstermiştir.

Fras ve arkadaşları (2019) ultra yüksek mukavemetli zırh çeliğinin dinamik delinmesini araştırmıştır. Mars® 300 adlı bu çelikten elde edilen 3 mm kalınlığındaki hedefler ve aynı malzemeden yapılmış kör, konik ve yarım küre başlıklı 8 mm çapındaki mermilerle yapılan deneysel ve hesaplamalı çalışmalar sunulmuştur. Tek aşamalı bir gaz tabancası kullanılarak 380 m/s'ye varan mermi hızlarında darbe deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu hızlarda zırh çeliği hedeflerinin delinmesi için yaklaşık 240 m/s'lik bir minimum darbe hızı gerektiği belirlenmiştir. Çalışma, darbe mühendisliği alanındaki mekanizmaları ve modelleri ayrıntılı olarak ele alırken, plastisite ve kırılma modellerini doğrulamak için sonlu elemanlar yazılımı Ls-Dyna ile sayısal simülasyonları da içermektedir. Genel olarak, simülasyon sonuçları, delinme modu ve mermi çıkış hızları dahil olmak üzere deneysel gözlemlerle uyumlu bulunmuştur.

Alavi Nia ve arkadaşları, alüminyum bal peteği (Al5052-H39) numunelerinin balistik performansı üzerine bir deneysel çalışma yapmışlardır (Alavi Nia et al., 2008). Kalınlıkları 9,52 ile 25,4 mm arasında değişen 150×150 mm ölçülerinde hedeflere 8,7 mm çapında çelik silindirik küt burunlu mermiler etki ettirilmiştir. Mermilerin hedefe ilk teması sonrasında hücre duvarlarında yırtılma ve katlanma, çarpışma bölgesinde ise yoğunlaşma görülmüştür. Hücre duvarlarının katlanmasının enerjinin dağıtılmasında büyük bir rolü bulunduğu ve merminin başlangıç kinetik enerjisinin yaklaşık %70'i kadar olduğu tespit edilmiştir. Deneyler, panelin ön tarafındaki perforasyon nedeniyle hasarlı bölgenin boyutunun merminin çapına neredeyse eşit olduğunu ancak panelin arka tarafında hasar bölgesinin çapının yaklaşık 1,5-3 katı olduğunu göstermiştir.

Karakoç ve arkadaşları (2018) toz metalurjisi ile üretilen bor karbür takviyeli Al6061 alüminyum alaşımının mekanik ve balistik performansları üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada, bor karbür (B₄C) tozları ile güçlendirilmiş Al6061 alaşımının yoğunluğu, sertliği, darbe tokluğu, enine kopma mukavemeti, çekme mukavemeti ve balistik direnci incelenmiştir. Ağırlıkça %5, %10, %15, %20 B₄C ile güçlendirilmiş Al6061 bazlı metal matris kompozitlerin üretiminde toz metalurjisi ve sıcak ekstrüzyon teknikleri kullanılmıştır. Tüm numuneler tip III için 7,62×51mm M80 mermi ile balistik teste tabi tutulmuştur. Hem sıcak preslenmiş hem de sıcak haddelenmiş

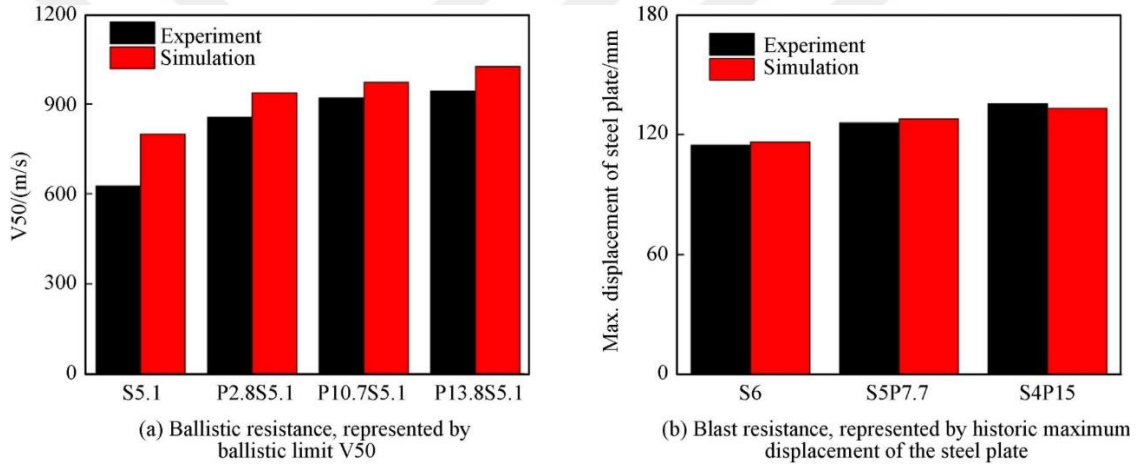
numuneler için B₄C parçacık takviyesinin hacim oranı arttıkça sertlik, enine kopma mukavemeti ve gerilme mukavemeti iyileşmiş ve darbe tokluğu azalmıştır. En yüksek eğilme mukavemeti, sıcak preslenmiş numunelerde, maksimum gerilme mukavemeti ise sıcak haddelenmiş numunelerde görülmüştür. İki katmanlı sıcak haddelenmiş numuneler, en düşük çökme derinliği ile darbe enerjisini başarıyla emmiştir.

Bhav Singh ve arkadaşları (2012), ısıtıl işlemin Ti-6Al-4V'nin 7,62 mm deforme olabilen mermiye karşı balistik darbe davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneylerde 15 mm kalınlığa sahip Ti-6Al-4V alaşımları kullanılmıştır. Bu alaşımlar farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlemler görerek 12,7 ve 10 mm kalınlığa kadar işlenmiştir. 15, 12,7 ve 10 mm kalınlığındaki plakalar 300×300 mm ebatlarında 7,62 mm kalibreli mermilere karşı test edilmişlerdir. Mermi, 830±10 m/s çarpma hızıyla 10 m mesafeden ateşlenmiştir. 1000°C sıcaklıkta işlem gören hedef plakada herhangi bir deformasyon olmayıp sadece radyal çatlaklar gözlenmiştir. 950°C ve 900°C sıcaklık şartlarında işlem gören hedef numunelerde ise deformasyon ve çatlak gözlenmemiştir. Dolayısıyla 950°C ve 900°C sıcaklık koşullarındaki plakaların, daha yüksek çekme mukavemetine ve iyi sünekliliğe sahip olduğu, merminin kinetik enerjisini daha etkin bir şekilde absorbe edebildiği görülmüştür.

Özşahin ve Tolun (2009), ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (uhmwpe) plakalar kullanılarak desteklenmiş AA7075 T651 levhaların balistik dayanımları üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, 4 mm kalınlığındaki AA7075 T651 levhaların belirli mermi hızlarında hasara uğradıkları bilgisiyle yola çıkılarak, 3 farklı katman sıralaması kullanılarak balistik dayanıma etkileri incelenmiştir. İlk grupta ön yüzde 8 mm kalınlığa sahip polietilen ve arka yüzde 4 mm kalınlığında AA7075 T651 levha, ikinci grupta 2 mm kalınlığında 2 adet AA7075 T651 levha arasında 8 mm kalınlığında polietilen tabaka, üçüncü grupta ise ön yüzde 4 mm kalınlığında AA7075 T651 levha ve arka yüzde 8 mm kalınlığında polietilen tabaka kullanılmıştır. 250×250 mm ölçülerindeki numuneler, 5 metre uzaklıktan 9 mm çapında (FMJ) Parabellum mermilere karşı test edilmiştir. Testler sonucunda, arka yüzde polietilen tabaka kullanılan numunelerin balistik dayanımlarının, diğer iki gruptaki numunelere göre daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür.

Chu ve arkadaşları (2021), poliüre kaplı çelik levhanın kapsamlı balistik ve patlama direncini analiz etmişlerdir. Modellemede kullanılan plakaların geometrik boyutları 200×200

mm olarak seçilmiştir. Çelik levha ve poliüre kaplamanın FSP ve balistik darbe konumu, nominal kenar uzunluğu 0,3 mm olacak şekilde birbirine geçirilmiştir. FSP çarpmasından uzak kalan bölgeler, 3 mm'lik bir yan kenar uzunluğu ile birbirine geçirilmiştir. Bu elemanların çarpma yönü boyunca kalınlığı, çelik levha ve poliüre kaplamanın kalınlık yönünde en az 6 katmanlı elemanlara sahip olmasını sağlamak için 1 mm'den az olacak şekilde ayarlanmıştır. Önü farklı kalınlıkta poliüre katmanlarla kaplanmış 5,1 mm kalınlığındaki çelik plakaların balistik direnci, deneylere atıfta bulunarak modeli doğrulamak için değerlendirilmiştir. Hesaplama modelinin ve deneylerin sonucunda, Şekil 2.1'de gösterildiği üzere artan kaplama kalınlığı içinde yapısal balistik direncin yükseldiği açık bir şekilde saptanmıştır.

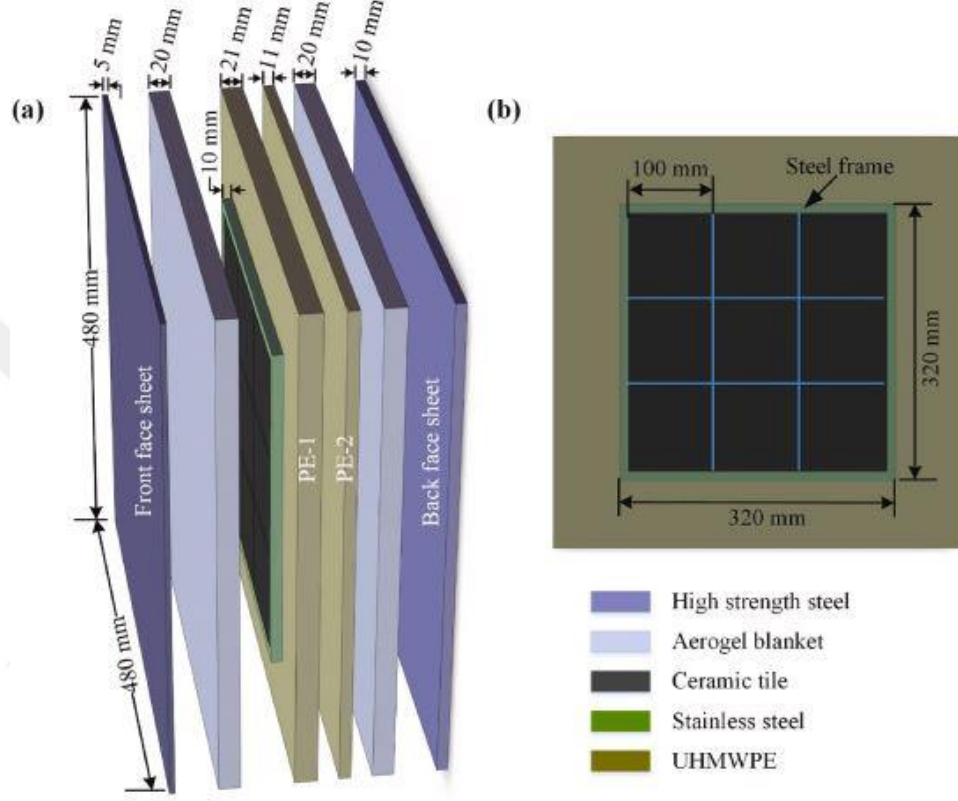


Şekil 2.1 : Deney ve simülasyondan elde edilen plakaların balistik ve patlamaya dayanıklılığı (Chu et al., 2021)

Kölük Taş (2019), titanyum levha ve aramid kumaşla oluşturulan hedeflerin balistik performansı üzerine deneysel bir araştırma gerçekleştirmiştir. Kullanılan titanyum levha ASTM B265, aramid kumaş ise CT709 (200 g/m²) plain olarak seçilmiştir. Hedef numune boyutları 330×330 mm olarak belirlenmiş ve 9 mm (FMJ) çaplı mermilere maruz bırakılmıştır. NIJ-STD-0101.06 standardı IIA seviyesine göre yapılan değerlendirmelerde 20 tabaka aramid elyaf ile oluşturulan hedeflerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. 5 tabaka aramid kumaş ve 1 tabaka titanyum ile oluşturulan hedeflerde ise balistik sonuçlar başarısız olmuştur. Ancak 10 tabaka aramid ve 1 tabaka titanyum ile hazırlanan numuneler başarılı sonuçlar vermiştir.

Hu ve arkadaşları (2021), düz burunlu merminin metal/uhmwpe/SiC çok katmanlı kompozit zırha karşı balistik etkisini incelemişlerdir. Kompozit zırh, sünek bir metal ön kısımdan, ardından ara katman olarak bir seramik/uhmwpe laminat kompozitten ve sünek bir

metal arka katmandan oluşmuştur. Bu çalışmada incelenen çok katmanlı kompozit zırh, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi iki metalik yüz levhası, aerojel yalıtım katmanı ve çok katmanlı çekirdekten oluşmuştur.



Şekil 2.2 : Çok katmanlı kompozit zırh bileşim şeması (P. Hu et al., 2021)

Çok katmanlı çekirdeğin bileşenleri arasında seramik katman ve uhmwpe katmanı bulunur. Uhmwpe laminat yaklaşık 150°C’lik düşük bir erime sıcaklığına sahiptir. Bu nedenle mekanik özellikleri ortam sıcaklığına duyarlıdır. Optimum ısı yalıtımı elde etmek için, metalik yüzey levhaları ve çok katmanlı çekirdek arasına 2 adet aerojel yalıtım katmanı yerleştirilmiştir. Çok katmanlı çekirdeğin ön katmanı olarak, mermiyi aşındırmak ve deforme etmek için seramik katman kullanılmıştır. Seramik karonun hasarlı genişlemesini önlemek ve balistik performansı iyileştirmek için seramik tabakası birbirine eklenmiş 9 karo ile birleştirilmiştir. Seramik karoların düzlem içi hareketini önlemek için yanal sınırlama olarak çelik bir çerçeve kullanılmıştır. Her bir seramik karonun boyutu 100×100×10 mm’dir. Seramik katmanın destek plakası olarak farklı kalınlıkta 2 adet uhmwpe katmanı kullanılmıştır. PE-1 ve PE-2 olarak adlandırılan bu katmanların kalınlıkları sırasıyla 21 mm ve 11 mm’dir. Seramik tabaka dışındaki

kompozit zırhın diğer bileşenleri 480×480 mm’lik aynı düzlem içi boyutlara sahiptir. Ön yüz tabakasının ve arka yüz tabakasının kalınlıkları sırasıyla 5 mm ve 10 mm’dir. Aerojel yalıtım tabakasının kalınlığı ise 20 mm’dir.

Yüzey levhalarının temel malzemesi yüksek mukavemetli çeliktir ve aerojel yalıtım tabakası ise cam elyaf ile güçlendirilmiş SiO₂ aerojellerinden oluşmuştur. Seramik karolar silisyum karbürden (SiC) yapılmış ve Northern Sanshan Industrial Ceramics şirketinden (Çin) temin edilmiştir. Dyneema® HB26, çapraz katlı bir dizilimde tek yönlü katlardan oluşan uhmwpe katmanı olarak seçilmiştir. Bu yığınlar, 16,5 Mpa basınç altında 125°C sıcaklıkta 30 dakika sıcak presleme ile [0/90]_n katman diziliminde istiflenmiştir.

Deneylerde, 12,8±0,05 mm çapında, 40 mm yüksekliğinde ve 40 g kütleli düz burunlu silindirik mermi kullanılmıştır. MIL-STD-662 F askeri standardına göre kompozit zırhın balistik limiti (V₅₀) 1647,3 m/s olarak hesaplanmıştır. Atış sonrasında kalın olan uhmwpe tabakasında, çekme ve kesme kırılmasının bir kombinasyonu sergilenirken, ince tabakada büyük şişkin bir deformasyon gözlemlenmiştir. Seramik tabakanın ön yüze yerleştirilmesi, merminin artık hızının azaltılması ve kompozit zırhın enerji absorpsiyonunun iyileştirilmesi için faydalı olduğu görülmüştür. Uhmwpe tabakaların ön yüzeyinde kesme başarısızlıkları görülürken, arka yüzde çekme kırılmasının baskın olduğu görülmüştür.

2.3 Seramik ve Fonksiyonel Dereceli Kompozit Zırhlar

Rathod ve arkadaşları (2020), seramik-metal kompozit yapıların balistik performansının sayısal analizini incelemişlerdir. Analiz için farklı seramikler içeren 2 adet kompozit kullanılmıştır. Bunlar alüminyum destekli alümina karbür ve bor karbür karolardır. Her iki kompozitte de, dairesel seramik plakaların çapları 101 mm ve kalınlıkları 25 mm’dir. Bunlar, destek kalınlığı 64mm ve dış çapı 152 mm olan arkalıklı alüminyum plakaların merkezinde oluşturulmuştur. 76,2 mm uzunluk ve 7,62 mm çaplı silindirik bir tungsten mermi kompozit plakaların merkezine 1550 m/s hızla çarptırılmış ve Ls-Dyna metoduyla değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler, literatürde bulunan deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Kompozitin balistik performansını incelemek için, penetrasyon derinliği, balistik limit ve hedef alan yoğunluğu gibi farklı parametreler dikkate alınmıştır. Sonuçlara göre, B₄C/Al kompozitin penetrasyon derinliği açısından Al₂O₃/Al’den daha iyi balistik performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Halil (2017), toz metalurjisi yöntemi ile AA6061 matrisli B₄C parçacık takviyeli kompozit malzemelerin balistik performansı üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. Kompozit malzemelerin üretiminde matris olarak %99 saflıkta AA6061 alaşım tozu, takviye elemanı olarak da yine %99 saflıkta B₄C seramik tozu kullanılmıştır. AA6061 tozları ile ağırlıkça %5-10-15-20-30 oranlarında B₄C tozları içeren karışım çapı 62 mm olan kalıplarda preslenerek kompozit plakalar hazırlanmıştır. Balistik deneyler, Emniyet Genel Müdürlüğü Kriminal Dairesi Başkanlığı Bomba İmha ve İncelemeler Şube Müdürlüğü Gölbaşı Açık Hava Atış Poligonunda gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında 9×11 mm (MP5 tüfeği) ve 7,62×51 mm (G3 tüfeği) kalibreli 2 farklı mermi tipi kullanılmıştır. Hazırlanan hedef numuneler ve bu hedeflere etki ettirilen mermilerin kullanıldığı silahlar Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Hedef numune kombinasyonları ve kullanılan silah tipleri (Karakoç, 2017)

Grup Numarası	Numune Kodu	Deney Numuneleri	Üretim Yolu	Hedef Kalınlığı	Atış Testi
1.grup	N1	AA6061	Haddeleme	12,7 mm	MP5
	N2	%5 B4C	Haddeleme	12,7 mm	MP5
	N3	%10 B4C	Haddeleme	12,7 mm	MP5
	N4	%15 B4C	Haddeleme	12,7 mm	MP5
	N5	%20 B4C	Haddeleme	12,7 mm	MP5
2.grup	N6	AA6061	Haddeleme	12,7 mm	G3
	N7	%5 B4C	Haddeleme	12,7 mm	G3
	N8	%10 B4C	Haddeleme	12,7 mm	G3
	N9	%15 B4C	Haddeleme	12,7 mm	G3
3.grup	N10	AA6061	Ekstrüzyon	25,4 mm	G3
	N11	%5 B4C	Ekstrüzyon	25,4 mm	G3
	N12	%10 B4C	Ekstrüzyon	25,4 mm	G3
	N13	%15 B4C	Ekstrüzyon	25,4 mm	G3
	N14	%20 B4C	Ekstrüzyon	25,4 mm	G3
Tabakalı kompozit malzemeler					
		1.tabaka	2.tabaka	Üretim Yolu	
4.grup	N15	AA6061	%5 B4C	Ekstrüzyon	50,8 mm G3
	N16	%10 B4C	AA6061	Haddeleme	25,4 mm G3
	N17	%20 B4C	AA6061	Haddeleme	25,4 mm G3
	N18	%10 B4C	%5 B4C	Haddeleme	25,4 mm G3
	N19	%15 B4C	%5 B4C	Haddeleme	25,4 mm G3

Yapılan deneyler sonucunda N1, N2, N3 numaralı hedefler başarılı sonuçlar verirken, N4 ve N5 numaralı hedefler başarısız olmuştur. N6, N7, N8, N9, N10, N11, N12, N13 ve N14 hedefleri de 7,62 mm kalibreli mermi karşısında başarısız sonuçlar vermiştir. N15 numaralı hedefte ise merminin 1. tabakada kaldığı belirlenmiştir. Aynı şekilde N16, N17 ve N18 numaralı hedeflerde de delinme gözlenmemiş olup, testten başarıyla geçmişlerdir. N19 numaralı hedefin arka yüzeyinde ise çatlak oluştuğu gözlenmiş ve başarısız olmuştur. Ayrıca 7,62 mm kalibreli

mermi, en yüksek penetrasyon derinliğini N19 numaralı hedefte, en düşük penetrasyon derinliğini ise N18 numaralı hedefte oluşturmuştur.

Mehmet Akif (2018), alumina seramik ön yüzü polietilen destekli zırh malzemesinin balistik davranışının deneysel ve sayısal analizi üzerine çalışmıştır. Alümina (Al_2O_3) seramik ön yüzü ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (uhmwpe) destek tabakalı kompozit zırh sisteminin 7,62×51 mm FMJ M80 ve zırh delici (AP) mermisine karşı balistik performansını incelemiştir. Deneyler Nurol Teknoloji A.Ş. laboratuvarlarında, NIJ seviye III ve STANAG 4569 seviye III standartlarında gerçekleştirilmiştir. Seramik ve polietilen birbirine epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmış ve çarpma sırasında seramik parçalarının dağılmasını önlemek amacıyla ön yüze tek kat koruyucu cam fiber kumaş yerleştirilmiştir. Alümina seramikler Çin'in Xiamen Innovacera Advanced Materials şirketinden temin edilmiştir ve 50×50×10 mm boyutlara, 95-97 gram ağırlığa sahiptir. Polietilen tabaka ise Nurol Teknoloji A.Ş. firmasının kullandığı askeri ürünlerden temin edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, kompozit zırh sisteminin arka yüzeyinde oluşan penetrasyon derinliği 18-20 mm aralığında kalmıştır. Dolayısıyla alumina seramiklerle oluşturulan zırh sistemlerinin metallere oranla daha hafif ve silisyum karbür, bor karbür gibi seramiklerden daha az maliyetli olması, tercih edilmesini kolaylaştırmıştır.

Ongun, boşluklu altıgen geometriye sahip alumina (Al_2O_3) seramik ve karbon lifle sarılmış alumina seramiklerin balistik davranışlarının birbiri üzerindeki etkileşimi üzerinde çalışmıştır (Ongun, 2019). Altıgen şeklindeki alumina seramikler yanyana dizilerek arka tabakada Hardox çelik zırh plaka yerleştirilmiş ve 7,62 mm kalibreli mermilerle atışlar gerçekleştirilmiştir. Aralarında 0,75 mm boşluk bulunan kompozit sargısız seramiklerle yapılan deney sonucunda, atış yapılan hedef seramiğinin çevresinde bulunan 6 adet seramikte de hasar olduğu gözlenmiştir. Aralarında 1 mm boşluklu olanlarda ortalama 4,83 adet ve 1,5 mm için 3,67 adet olarak tespit edilmiştir. Çevresi 1 mm ve 1,5 mm karbon lifleri ile sarılı seramiklerde neredeyse hiç hasar oluşmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen deneysel çalışmalar Ansys Explicit/Dynamic paket programı aracılığıyla oluşturulan sayısal modellemeler ile karşılaştırılmış ve birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

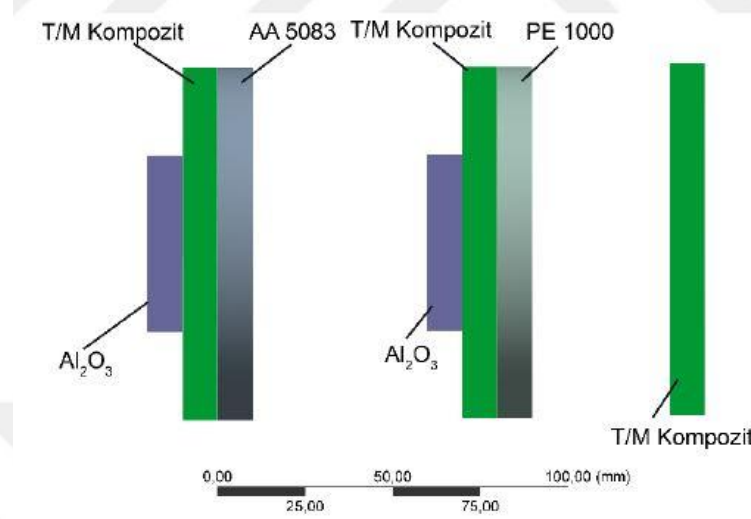
Abu Talib ve arkadaşları (2012), Kevlar-29, Al_2O_3 toz ve epoksi karışımından oluşan hedeflerin yüksek hız etkisi altındaki balistik darbe performansı üzerinde çalışmışlardır. Bu

kapsamda Kevlar-29 tabakaları, Al_2O_3 tozlarının epoksi ile karıştırılması sonucunda oluşan karışım ile kaplanmıştır. Mekanik özellikleri doğrulamak ve yüksek hızlı darbe testlerinde hedef olarak kullanmak için farklı sayıda katmanlar ve matris malzemeleri kullanılarak ölçüleri 100×100 mm olacak şekilde kompozit plaka numuneleri hazırlanmıştır. Hedef numunelere etkiyen merminin çarpışma olayı, saniyede 200.000 kare hızında kaydeden yüksek hızlı kameralar tarafından ölçülmüştür. Kamera, hedefin delinmesinden önce ve sonraki mermi hızlarını kaydetmiştir. Atışlarda 8 mm çapında, 5,2 gram ağırlığında ve 400 m/s hıza çıkabilen çelik mermiler kullanılmıştır. Sonuç olarak, dokuma fiber kevlerden yapılan kompozit malzeme çarpmaya karşı daha fazla direnç sağlarken, çapraz katlı laminat kompozitlerin daha az dirence sahip olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar, yapılan teorik modellerle desteklenmiştir.

Arslan ve Gunes (2018), Al/B₄C FGM yüz plakalı petek yapılı sandviç yapıların yüksek hızlı darbe yükleri altında deneysel hasar değerlendirmesi üzerine çalışmışlardır. Deneysel çalışmalar, tek kademeli gaz tabancası kullanılarak yüksek hızlı darbe yükleri altında alüminyum petek çekirdek ve Al6061/B₄C FGM yüz plakalarından oluşan sandviç yapılar üzerinde gerçekleştirilmiştir. FGM yüz plakaları, saf metal alt katman (Al6061) ve seramik açısından zengin üst katman (%75B₄C-%25Al6061) ile 5 ardışık katmandan oluşturulmuştur. Plaka boyutları $56 \times 56 \times 8$ mm olarak tasarlanmıştır. Tüm darbe testleri, AISI4340 çelikten yapılmış ve ortalama hızı 605 ± 5 m/s olan mermilerle aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre FGM ön yüz plakalı numuneler, Al6061 yüz plakalı numuneden daha iyi darbe performansı sergilemiştir. Al6061 yüz plakalı numunede sünek bir perforasyon, ilk dalga yansımından dolayı önden bir parçalanma, FGM yüz plakalı numunelerde ise arka yüzde sadece şişkinlik meydana gelmiştir. Sonuç olarak FGM yüz plakalı numuneler, Al6061 yüz plakalı numunelerden daha iyi darbe performansı göstermiştir.

Ayvaz (2016) Al_2O_3 seramik ön plaka, PE 1000 ve AA 5083 arka plakalar ile desteklenen, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al5Cu-B₄C, Al5Mg-B₄C ve Al_{2,5}Cu_{2,5}Mg-B₄C kompozit zırh plakalarının balistik dayanımları üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Hedef plakalarda kullanılan B₄C'ün ağırlıkça oranı, mekanik ve metalografik ön çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Al5Cu, Al5Mg ve Al_{2,5}Cu_{2,5}Mg matris alaşımlarına sahip ve ağırlıkça %5, 10, 20 ve 30 oranlarında B₄C takviyeli kompozit hedef plakalar, katı, sıvı ve ön sinterleme sonrası sıvı faz sinterleme işlemleri ile üretilmişlerdir. Üretilen bu plakalar Şekil 2.3'te gösterildiği gibi Al₂O₃-T/M Kompozit-AA 5083, Al₂O₃-T/M Kompozit-PE 1000 kompozisyonlarında

katmanlanarak balistik testlere tabi tutulmuşlardır.



Şekil 2.3 : Hedef numune birleşim kompozisyonları (Ayvaz, 2016)

Deneylerde 7,62×51 mm, CuZn30 gömleğe ve çelik çekirdeğe sahip zırh delici mermiler ve NIJ standartları kullanılmıştır. Mermilerin namludan ortalama çıkış hızları 878±9,1 m/s olarak ölçülmüştür. Deneyler sonucunda, ağırlıkça B₄C ve Cu oranının artmasıyla mermi çıkış hızının düştüğü görülmüştür. Al₂O₃ seramik ön katman sayesinde, merminin ilk çarpma hızının büyük oranda düştüğü ve arta kalan enerjinin arka yüzeyde sönmüldüğü tespit edilmiştir. AA 5083 destekleyici kullanılan numunelerin arka yüzeyinde çatlak şeklinde, PE 1000 kullanılan numunelerde ise çökme-şişme-delinme şeklinde hasar oluşumu gözlenmiştir. Ancak AA 5083 plakaların, önlerindeki kompozit numunelerin çekme dayanımını artırdıklarından dolayı, PE 1000 arka plakaya oranla balistik dayanımı daha çok artırdıkları görülmüştür. Ayrıca Al₂O₃-T/M kompozit-AA 5083 katmanlı kompozit hedef numunelerinde yapılan tüm atışlar için balistik başarı sağlanmıştır.

Aydın ve Apalak (2016), Al/SiC fonksiyonel dereceli sandviç plakaların, balistik etki altındaki deneysel hasarını analiz etmişlerdir. Deneyler, üst ve alt metal katmanlar arasında seramik ve metal bileşenlerden oluşan hedef numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 4 farklı plaka numunesi hazırlanmıştır. İlk kategori yalnızca Al6061 içerir. Diğerleri 11 ardışık katmandan oluşan, FGSP olarak adlandırılan metal-seramik kompozisyonlarıdır. Her grubun ilk ve son katmanı saf Al6061'dir. Ara katmanlar ise Al-SiC bileşiminden oluşur. Test numuneleri, çapları 90 mm ve kalınlıkları 16 mm olacak şekilde üretilmiştir. Oluşturulan FGSP'lerin balistik

performansını araştırmak için ağırlığı $8\pm0,075$ gram ve hızı 370 ± 10 m/s olan 9 mm Parabellum mermiler kullanılmıştır. Sonuç olarak ön alüminyum tabaka, merminin çarpması sırasında kırılğan seramik tabakanın kırılmasını engellemiştir. Seramik bakımından zengin katmanlar, çoğunlukla merminin kinetik enerjisini azaltmış ve arka numune yüzeyine doğru metal bakımından zengin katmanlar, merminin kalan darbe enerjisini dağıtmıştır. Ayrıca metal yönünden zengin olan numunelerde penetrasyon derinliği, seramik yönünden zengin numunelere oranla daha düşük çıkmıştır.

Gülsever (2018) çalışmasında, hekzagonal geometriye sahip B_4C zırh plakaların balistik kullanıma uygunluğunu incelemiştir. Zırh plakalarının üretiminde, kovalent bağı seramiklerin yüksek yoğunluğa sinterlenmesinde başarısını kanıtlamış olan spark plazma sistemi kullanılmıştır. Yüksek sertlik ve düşük yoğunluk özelliklerine sahip olan B_4C seramiklerinin, kırılma tokluğu ve balistik özelliklerini artırabilmek için yapıya birtakım katkılar ilave edilmiştir. Bu katkılar karbon karası, karbon nanotüp (CNT), alüminyum (Al), silisyum (Si), titanyum (Ti) ve titanyum oksit (TiO_2)'tir. Hedef seramik kompozit numunelerin köşegen uzunluğu 62 mm, kenar uzunluğu 31,5 mm ve kalınlığı 10 mm olarak tasarlanmıştır. Balistik deneyler, Roketsan A.Ş. Balistik Koruma Merkezi test laboratuvarlarında NIJ 0101.06 seviye IV standardına göre gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mermiler 868 ± 15 m/s çarpma hızına ve 7,62 mm kalibreye sahiptir. Penetrasyon derinliğinin ölçülebilmesi için hedefin arka yüzeyine sünekliliği yüksek olan 5083 alüminyum alaşımı yerleştirilmiştir. Balistik testler sonucunda C-karası ilaveli hedefin penetrasyon derinliği 6,86 mm, aynı orandaki CNT ilave edilen hedefinki 9,5 mm, alüminyum ilaveli hedefte 3,1 mm, silisyum ilaveli hedefte 8,52 mm, titanyum ilaveli hedeflerde ise 0,8 mm olarak ölçülmüştür.

Celal (2009), seramik kompozit zırh sistemlerinin balistik özelliklerinin belirlenmesi üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu kapsamda incelenen zırh sistemi, seramik ön yüz ve arka destek plakadan oluşan katmanlı bir yapıda oluşturulmuştur. Seramik malzeme olarak alumina, bor karbür ve silisyum karbür kullanılmıştır. Arka yüzeyde ise polimer esaslı kompozit malzeme ve yüksek mukavemetli haddelenmiş alaşımlı RHA çeliği kullanılmıştır. Polimer esaslı kompozit malzemenin yapısını ise E tipi cam elyaf ve düz dokuma aramid kumaş oluşturmaktadır. Hazırlanan hedef numuneler 200×200 mm ve 300×300 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Deneylerde NIJ standardı Level III sınıfı NATO 7,62 mm FMJ (bakır ceket kaplı kurşun çekirdek) ve Level IV sınıfı 7,62 mm M2 AP (zırh delici) mermiler kullanılmıştır. Atışlar

sonucunda, aramid kompozit hedeflerin hacim/kütle yönünden balistik koruyuculuğunun E-cam kompozit hedeflere göre 2 kattan daha fazla olduğu bulunmuştur. Ayrıca, alumina seramiğin kırılma tokluğunun ve darbe hasarı yapısının, bor karbürden daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

2.4 Yüksek Performanslı Sentetik Elyaf ve Hibrid Polimer Zırhlar

Salih çalışmasında (2021), ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen ($245 \pm 15 \text{ g/m}^2$) ile epoksi reçine emdirilmiş karbon fiber (200 g/m^2 twill) prepreglerden oluşturulmuş kompozit zırhların balistik performanslarını incelemiştir. 25 kat uhmwpe ve 1-3-6 kat karbon fiber kullanılarak $400 \times 400 \text{ mm}$ boyutlarında 4 farklı konfigürasyonda üretimi yapılan numuneler Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : Hedef numune konfigürasyonları (Alarçin, 2021)

Numune Tipi	Ağırlık (g)	Kalınlık (mm)
25 kat uhmwpe	960 ± 5	$6 \pm 0,05$
25 kat uhmwpe+1 kat ERKFP	1020 ± 5	$6,1 \pm 0,05$
25 kat uhmwpe+3 kat ERKFP	1130 ± 10	$6,3 \pm 0,05$
25 kat uhmwpe+6 kat ERKFP	1320 ± 10	$6,5 \pm 0,05$

Testler, NIJ 0101.04 seviye III-A ve STANAG 2920 standartları kullanılarak değerlendirilmiştir. Atışlarda $436 \pm 9,1 \text{ m/s}$ hıza sahip 9 mm FMJ mermiler kullanılmıştır. Test sonucunda sadece 25 kat uhmwpe plakanın penetrasyon derinliği 27 mm olarak ölçülerek başarılı sonuç verdiği görülmüştür. Dolayısıyla diğer numune grupları parçacık testlerine tabi tutulmuştur. Testler ilk olarak oda sıcaklığında yapılmış ve sonrasında sıcak-soğuk şartlandırmaya maruz bırakılmıştır. Oda sıcaklığında yapılan testlerde, karbon fiber katman sayısı arttıkça V50 değerinin yükseldiği gözlenmiştir.

Chen ve arkadaşları (2013) tekstil tabanlı vücut zırhının balistik performansı için analitik bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde, iplik doğrusal yoğunluğu, kumaş iplik yoğunluğu gibi içsel, mermi çapı ve ağırlığı gibi dışsal parametlerin etkisine bağlı kalınmıştır. Ayrıca model ile deneysel metot arasındaki benzerlik incelenmiştir. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlara göre balistik etki öndeki tabakada kesme, arkadaki tabakalar için öncelikle gerilme hasarı oluşturmuştur.

Berk, Ramazan ve Ahmet Kaan (2017), aramid/epoksi ve karbon-aramid/epoksi hibrit kompozitlerin balistik performansını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Bu kompozitler, vakum destekli reçine infüzyon kalıplama tekniği ile üretilmiştir. Balistik testlerde 7,62×51 mm M61 tipi zırh delici (AP) mermiler kullanılmıştır. Bir lazer hız ölçüm sistemi ile ölçülen 6 farklı darbe hızı seçilmiştir. Artık hızlar, test edilen numunelerin arka yüzeyinden hız ölçüm tuzakları ile ölçülmüştür. Sayısal çalışma için ön işlemci olarak Ansys yazılımı, çözücü olarak Ls-Dyna yazılımı kullanılmıştır. 3 farklı sayısal model oluşturulmuştur. Sonuç olarak, deneysel ve sayısal yöntemler dikkate alındığında, gerilim altında düşük gerinim kırılması nedeniyle aramid/epoksi kompozitin karbon-aramid/epoksi kompozite göre daha fazla enerji soğurduğu görülmüştür.

Hilal Kemal (2018), yumuşak vücut zırhlarında kullanılan Twaron® CT709 kumaşın (200 g/m²) balistik dayanımının viskoelastik özellik gösteren poliborosiloksan (PBDMS) polimeri emdirilmesi sonrasındaki davranışını incelemiştir. Çalışmada kullanılan poliborosiloksan (PBDMS), 2 farklı viskozite değerine sahip polidimetilsiloksan (PDMS) kullanılarak üretilmiştir. Farklı oranlarda PBDMS emdirilen kumaşlar balistik atışlara tabi tutulmuştur. PBDMS polimerinin emdirilmesi işleminin kumaşın balistik dayanımını artırıcı etkisi bulunduğu görülmüştür. Balistik deneylerde kullanılan hedefler 300×300 mm boyutlarındadır. Deneyler, NIJ IIIA standardına uygun olarak ve 9 mm çap, 8 gr ağırlığında FMJ mermiler kullanılarak Nurol Teknoloji A.Ş. laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Balistik deneyler sonucunda, 12 kat kuru kumaş ve 13 kat ağırlıkça %14,73 oranında PBDMS emdirilmiş numunelerin eşdeğer katman sayısına sahip zırh sisteminden %15,2 daha hafif olduğu, 25 kat kuru kumaştan %7,1 daha ağır olmasına rağmen %14,5 oranında daha yüksek balistik dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir.

Sefa Emin (2012), balistik zırhlarda kullanılan kompozit malzemeler üzerine deneysel bir araştırma yapmıştır. İlk olarak kevlar 49 kumaşı, karbon fiber takviyeli alüminyum bal peteği (Al5052) ve kontrplak (Plywood) malzemesini farklı kombinasyonlarda biraraya getirmiş ve 200×200×4 mm boyutlarında hazırlanan hedef numuneleri balistik etkiye maruz bırakmıştır. Hazırlanan 6 farklı kombinasyon içerisinde balistik dayanımı en iyi sağlayan dizilim baz alınarak ikinci etap çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kevlar 49 kumaşı, karbon fiber kumaş, polipropilen bal peteği ve çelik elek teli kullanılmıştır. Karbon fiber kumaş ile çelik elek teli epoksi reçine yardımıyla, polipropilen bal peteği ise epoksi ile doldurularak kullanılmıştır. Bu

malzemeler ile ikinci kademe deneylerinde kullanılan hedef numune kombinasyonları Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 : İkinci kademe deneylerinde kullanılan numune kombinasyonları (Özgültekin, 2012)

Numune	Katman Sıralaması
1	Polipropilen bal peteği-Kevlar
2	Çelik tel-Kevlar
3	Karbon fiber-Kevlar
4	Kevlar-Karbon fiber
5	Karbon fiber-Kevlar-Çelik tel
6	Çelik tel-Kevlar-Karbon fiber
7	Karbon fiber-Polipropilen bal peteği-Çelik tel
8	Karbon fiber-Polipropilen bal peteği(x2)-Çelik tel
9	Kevlar-Polipropilen bal peteği-Çelik tel
10	Karbon fiber-Kevlar-Polipropilen bal peteği-Çelik tel
11	Çelik tel-Karbon fiber-Çelik tel
12	Çelik tel-Kevlar-Çelik tel

Atışlarda Safir T14 Classic uzun namlulu tüfek ile 36 kalibre ve 700 m/s çıkış hızına sahip mermiler kullanılmıştır. Yapılan atışlar sonucunda kevlar tabakasının ön yüzeyde kullanıldığı numunelerde, kevlar kumaşının yumuşak yapısından dolayı merminin ilk çarpma hızını karşılayamadığı ve başarısız olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla ön yüzde plywood gibi sertlik oranı yüksek ve arka yüzeyde kevlar kumaşının kullanıldığı numunelerin balistik başarısı daha yüksek çıkmıştır.

Bajya ve arkadaşları, (2021) yaptıkları çalışma ile dokuma kumaşlar ve tek yönlü (UD) laminatlar olmak üzere farklı yapılardan oluşan yumuşak zırh panellerin (SAP) balistik koruma performansını ve arıza modlarını sunmaktadır. Para-aramid kumaşlardan ve UD laminatlardan oluşan yumuşak zırh paneller (SAP) ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (uhmwpe) UD laminatlar geliştirilmiş ve ortalama 430m/s hıza sahip 9mm çapında kurşun çekirdekli mermilere karşı balistik darbeye maruz bırakılmıştır. SAP'ların balistik performansı, arka yüz imza (BFS), perforasyon oranı (PR) ve mermi genişlemesi açısından değerlendirilmiştir. UD

laminat tabanlı SAP'lar, para-aramid dokuma kumaş temelinde emsallerinden daha iyi performans göstermiştir. UD laminat tabanlı uhmwpe'ler, para-aramid benzerlerini geride bırakmıştır. Mikroskopik görüntüler ve taramalı elektron mikrografları, uhmwpe UD laminatlarından oluşan SAP'ın ilk birkaç katmanında kapsamlı termal bozulma ve erime göstermiştir. Buna karşılık para-aramid paneller, UD varyantlarındaki lif kırılması, fibrilasyon ile birlikte kemik açma ve delaminasyon nedeniyle başarısız olmuştur. Bu yüzden ideal SAP tasarımının, ön katmanlarda ısıya dayanıklı bir malzeme ve sonraki katmanlarda yüksek modüllü balistik malzemeler içermesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Ayten ve arkadaşları (2020) aramid kumaşa silika bazlı çapraz bağlı aerojellerin balistik verimi üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. IIIA seviye balistik testleri, aerjel içeren aramid kumaşlara ve farklı sayıda katmana sahip saf aramid kumaşlara uygulanmıştır. 24, 30 ve 36 kat aramid kumaş Magnum 44 mermi ile test edilmiştir. Tüm numuneler mermiyi durdurmuş ancak sırasıyla 57,32, 43,58 ve 40,38 mm çökme miktarı oluşmuştur. Bu nedenle, 36 kat aramid kumaşın Magnum 44 mermisine karşı en iyi balistik sonucu verdiği görülmüştür. Aerjel içeren tüm balistik test numuneleri, delinmiş kumaş sayısını %72 oranında azaltmıştır. Bu da çapraz bağlı aerjelin enerji emici uygulamalar için büyük bir potansiyele sahip olduğunu kanıtlamıştır.

Zhikharev ve arkadaşları (2019) çalışmalarında, balistik etkiye ve eş zamanlı düzlem içi tek eksenli gerilim ön yüklemesine maruz kalan GFRP plakalarının deneysel ve sayısal sonuçlarını incelemişlerdir. Deneylere göre, başlangıç gerilme ön yüklemesi ne kadar yüksek olursa kompozitin enerji absorpsiyonunun o kadar yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Çekme ön yüklemesinin çökme miktarını düşürdüğü gözlenmiştir. Ancak başlangıç ön yükleme seviyesinin materyalin nihai gerilme dayanımının %50'sini geçmesi durumunda, kompozit elemanın darbe hasarı gerilmesini azalttığı görülmüştür.

Okhawilai ve arkadaşları (2018) elyaf takviyeli polibenzoksazin/poliüretan kompozitlerin balistik performansının ölçülmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada cam ve aramid elyaf takviyeli polibenzoksazin/poliüretan kompozitler kullanılmıştır. Kullanılan hedefler E ve S cam elyaf takviyeli polibenzoksazinden üretilmiş ve aramid elyaf takviyeli 80:20 oranında polibenzoksazin/poliüretan ile desteklenmiştir. 7,62×51 mm ölçülerindeki 847±9,1 m/s hıza sahip balistik mermi çarpmasına maruz bırakılmışlardır. Test sonuçlarında numunelerde delinme olmamıştır. Aynı sayıda katmanla karşılaştırıldığında, S-cam kompozitin son

katmanındaki deformasyon, E-cam kompozitten önemli ölçüde daha düşük çıkmıştır. Ayrıca aramid kompozit ile desteklenen S-cam kompozitin öngörülen balistik limit hızı, III. seviyede 930 m/s'ye kadar yükselmiştir.

Kumar ve arkadaşları (2020) araştırmalarında, bir sandviç epoksi kompozit ve bir seramik destek malzemesi kullanarak kurşun geçirmez zırh geliştirmişlerdir. Bu çalışmada kevlar elyaflar kullanılmıştır. Tabancadan ateşlenen mermi, kurşun geçirmez zırha çarptığında, çok güçlü takviye liflerinden oluşan bir ağa yakalanmıştır. Kurşunun deformasyonuna neden olan yeleğe iletilen darbe enerjisi bu lifler tarafından emilmiş ve dağıtılmıştır.

Carrillo ve arkadaşları (2012), aramid dokuma kumaş ve polipropilen matrizen yapılan termoplastik kompozit laminatların balistik performansını araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarda, çok katmanlı aramid kumaş/polipropilen matris kompozit laminatlar üretilerek darbe dirençleri incelenmiş ve polipropilen (PP) matrisi bulunmayan çok katmanlı aramid kumaş sistemleriyle karşılaştırılmıştır. Kullanılan aramid, düz dokuma kevlar 129'dur. Laminat numuneler için kullanılan PP'ler ise 0,032 mm kalınlığında ve 910 kg/m³ filmlerdir. Tüm numuneler NATO STANAG 2920 standardına göre test edilmiştir. Testlerde 6,7 mm çapında ve 1,11 gram kütleli küresel çelik mermiler kullanılmıştır. Çarpışma hızı 274,5 m/s'dir. Deneylere göre 3 katmanlı kompozit hedefler için, merminin tüm testler için tamamen durduğu, 2 katmanlı hedefler için sadece 2 tanesinde durduğu gözlenmiştir. Benzer alan yoğunluğuna sahip aramid kumaş hedeflerine kıyasla, termoplastik bir polipropilen matrisi eklenmesinin, hedeflerin balistik performansını artırdığı bulunmuştur. Ayrıca, hedeflerin balistik performansının artmasının, PP matrisinin, aramid fiber sistemlerinde gözlenmeyen ikincil ipliklerin daha büyük deformasyonu, kumaş/matris bağlantısının ayrılması, matris çatlaması ve delaminasyon dahil olmak üzere farklı enerji soğurma mekanizmalarını mümkün kılmasından kaynaklandığı da bulunmuştur.

Enver Bülent (2012), farklı kumaş ve farklı yöntemlerle üretilmiş CTP kompozitlerin balistik dayanımları üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Takviye malzemesi olarak METYX-Telateks Tekstil Ürünleri ve Ticaret Anonim Şirketi'nden temin edilen 0°/90° yönlü-iki eksenli-cam elyaf dokuma kumaşlar, 0°/90° yönlü-iki eksenli-cam elyaf dikişli kumaşlar, 45°/90°/-45° yönlü-üç eksenli-cam elyaf dikişli kumaşlar ve 0°/45°/-45°/90° yönlü-dört eksenli-cam elyaf dikişli kumaşlar kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak ise Poliya Polyester Sanayi

ve Ticaret Limited Şirketi'nden temin edilen Polipol 3401-CTP tipi polyester ve Butanox M-60 sertleştirici kullanılmıştır. Reaksiyon hızlandırıcı olarak da AKPA Kimya Ambalaj Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi'nden temin edilen Akcobalt %6 kullanılmıştır. Hedef numuneler, 303×238×10 mm boyutlarında kapalı kalıpta soğuk pres ve el yatırması yöntemleriyle üretilmiştir. Üretilen numuneler 9mm kalibreli (MKE) Parabellum mermisi ile balistik etkiye maruz bırakılmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, kapalı kalıpta soğuk pres yöntemiyle, 0°/90° yönlü-iki eksenli-cam elyaf dokuma kumaşla üretilen kompozit numuneler en iyi balistik sonuçları vermiştir.

Saleem ve arkadaşları (2021), kevlar ve uhmwpe çok katmanlı zırhların balistik darbeye karşı davranışlarını incelemişlerdir. Uhmwpe dokuma kumaş, Çin'in Yixing Huaheng High-Performance Fiber Textile şirketinden satın alınmıştır. Kevlar dokuma kumaş (Twaron) ise Japonya'nın Teijin şirketinden temin edilmiştir. Her iki malzemeye ait genel özellikler Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4 : Aramid ve uhmwpe fiberin genel özellikleri (Saleem et al., 2021)

Özellik	Aramid (Twaron)	Uhmwpe
Yoğunluk (g/cm ³)	1,45	0,97-0,98
Çekme dayanımı (cN/tex)	200	285,6-408
Çekme modülü (cN/tex)	8300	9282-14280
Kopma uzaması (%)	2,5	3,5-3,7
Sıcaklık aralığı (°C)	204	80
Ayrışma sıcaklığı (°C)	400	145-160
300 °C, 100h kuvvet dayanımı (%)	60-65	68-70
Nem emilimi (%)	4,5	0,6
Aşınma direnci	genel	iyi
Çözücü direnci	iyi	iyi
Asit direnci	kötü	iyi
Alkali direnci	iyi	iyi
UV direnci	kötü	iyi

Silika karbürün (SiC) seramik plakası, Çin'in Xiamen Innovacera Advanced Materials şirketinden temin edilmiştir. 5074 alüminyum alaşımlı levhalar, yapısal alüminyum levhalar

ticari piyasadan tedarik edilmiş ve epoksi reçine (Sikafloor 156) Türkiye'nin Sika firmasından satın alınmıştır. Sikafloor 156, düşük viskoziteli ve solventsiz iki parçalı bir epoksi reçinedir. Temin edilen ürünlerle 300×300 mm boyutlarında iki farklı hedef numunesi hazırlanmıştır. Ön katmanda seramik, orta katmanda kompozit ve arka katman alüminyum alaşımdan oluşmaktadır. Birinci numune, 1 adet SiC katmanından, 10 adet uhmwpe takviyeli epoksi katmanından ve son olarak 1 adet 5074 Al alaşımından oluşmuştur. İkinci numune, 1 adet SiC katmanından, 10 adet Kevlar takviyeli epoksi katmanından ve son olarak 1 adet 5074 Al alaşımından oluşmuştur. Hazırlanan numunelere ait bilgiler Çizelge 2.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 : Hazırlanan numunelere ait özellikler (Saleem et al., 2021)

Örnekler	Kullanılan materyal	Tabakalar	Kalınlık	Toplam kalınlık	Toplam ağırlık
Örnek 1	SiC	1 tabaka	0,3 cm	1,4 cm	1,8 kg
	UPE/EPX	10 tabaka	0,08*10 cm		
	5074-Al alaşım	1 tabaka	0,2 cm		
Örnek 2	SiC	1 tabaka	0,3 cm	1,1 cm	1,65 kg
	KEV/EPX	10 tabaka	0,045*10 cm		
	5074-Al alloy	1 tabaka	0,2 cm		

NIJ 0101.06 seviye IIA standardına göre, 9 mm FMJ mermili bir Daewoo tabanca kullanılarak 5 metreden atışlar yapılmıştır. 8 gram kütleli merminin hızı 307 m/s'dir. Alınan sonuçlara göre, penetrasyon derinliği uhmwpe/epoksi ve kevlar/epoksi için sırasıyla 13-13,5 mm ve 17,5-19 mm aralığındadır. Bulgular, SiC/uhmwpe+EPX/Al alaşımının ve SiC/KEV+EPX/Al alaşımının 9 mm FMJ mermisini nispeten küçük deformasyonla durdurabileceğini ortaya koymuştur. Uhmwpe tabakalı kompozitin, kevlar tabakalı kompozitten daha iyi sonuç verdiği ortaya çıkmıştır.

2.5 Akıllı Akışkan ve Polimer Kaplama Teknolojilerinin Balistik Performansı

Lu ve arkadaşları (2019) kesme kalınlaştırma sıvısı (STF) emdirilmiş kumaşların balistik performansı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Tek katlı, 10 katlı saf ve STF emdirilmiş aramid kumaş paneller, yüksek darbe hızında test edilmiştir. 450-510 m/s hızındaki çarpmada, STF varlığının enerji absorpsiyonunu artırmadığı görülmüştür. Sonuçlar, panelde ne kadar çok

katman varsa, STF'nin o kadar az etkili olduğunu göstermiştir. Tek katlı ve 10 katlı STF emdirilmiş kumaş panellerin enerji emilimi, emsallerine göre %44,8 ve %64,1 daha düşük bulunmuştur. Dolayısıyla STF emdirilmiş aramid kumaş panellerin, düşük çarpma hızına karşı gelişmiş koruyucu performans sağlayacağı anlaşılmıştır.

Bajya ve arkadaşları (2020), kesme kalınlaştırıcı sıvısı (STF) ile güçlendirilmiş yumuşak gövde zırhının ağırlığını ve balistik performansını optimize etmek için bir deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneyler için 200 g/m^2 alan yoğunluğuna sahip kare düz dokuma Kevlar 363 2S kumaş, molekül ağırlığı 200 (PEG 200) olan polietilen glikol ve etanol temin edilmiştir. 100 nm ve 500 nm boyutlarında silica parçacıkları ile PEG 200 kullanılarak STF-100 ve STF-500 elde edilmiştir. $250 \times 250 \text{ mm}$ boyutlarındaki kevlar kumaşı elde edilen STF'ler tarafından emprenye edilmiştir. Bu şekilde farklı konfigürasyonlara sahip yumuşak zırh paneller, $430 \pm 15 \text{ m/s}$ vuruş hızı ile $9 \times 19 \text{ mm}$ kurşun çekirdekli mermiye (ağırlık 7,45 g) karşı test edilmiştir. STF-500 kullanılarak hazırlanan kumaşlar, STF-100 kullanılarak hazırlanan kumaşlara göre daha yüksek darbe enerjisi emilimi ve penetrasyon direnci göstermiştir.

Zhang ve arkadaşları (2019) parçacık etkisine maruz bırakılmış poliüre kaplı çelik levhaların balistik direnci üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. Deneylerde, çelik plakaların ön, arka ve her iki tarafına düşük veya yüksek sertlikte poliüre kaplanmıştır. Kaplanmış plakalarda poliüre ve çeliğin kalınlıkları aynı tutulmuştur. Balistik performansları değerlendirmek için farklı konfigürasyonların balistik limitleri ölçülmüş ve spesifik enerji absorpsiyonları hesaplanmıştır. Farklı kaplama tipleri ve konumlarına sahip çelik levha ve poliürenin arıza mekanizmaları tartışılmıştır. Sonuçlar, poliüre kaplamanın hedef plakanın balistik sınırını iyileştirebileceğini ve ön tarafta yüksek sertlikte poliüre plakanın en iyi balistik direnç sergilediğini göstermiştir. Farklı poliüre türleri için, ön kaplamalı çelik levha, arka kaplamalı levhadan daha iyi performans göstermiştir.

Sen ve arkadaşları (2019) kesme kalınlaştırma sıvısı (STF) ve kevlerden oluşan kompozit levhaların balistik performansı üzerine bir nümerik araştırma yapmışlardır. Bu doğrultuda kevlar-STF-kevlar sandviç kompozit ve STF emdirilmiş kevlerden yapılmış 2 kevlar-STF hedef hazırlanmıştır. Hedeflerin balistik sonuçları, bağlı Euler-Lagrangian (CEL) yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. CEL yaklaşımında, kevlar ipliği Lagrangian membran elemanı kullanılarak modellenmiştir. Sonuçta, STF-kevlar kompozitin balistik performansı, çok katmanlı saf kevlar

hedefine kıyasla daha güçlü çıkmıştır. STF'nin viskoz dağılımında enerjinin yaklaşık %75'inin tüketildiği görülmüştür.

Hamza (2021), karbon nanotüp bağlanmış ve kesme gerilimi altında kalınlaşan sıvı (STF) emdirilmiş hibrit tabakalı kompozitlerin balistik özelliklerini araştırmıştır. Araştırma kapsamında kevlar kumaş, karbon kumaş ve hibrit (Kevlar/karbon) kumaş kullanılmıştır. Kumaşların teknik özellikleri Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6 : Deneylerde kullanılan kumaşlar ve teknik özellikleri (H. Taş, 2021)

	Kevlar kumaş	Karbon kumaş	Hibrit kumaş
Dokuma tipi	Twill 2x2	Twill 2x2	Twill 2x2
Yoğunluk	300 g/m ²	420 g/m ²	210 g/m ²
İplik sayısı	4,75 cm ⁻¹	2,81 cm ⁻¹	6,5 cm ⁻¹
Fiber tipi	Kevlar 49	Grafil 34-700 12K	Pyrofil TR30S 3K/Kevlar49

Balistik deneyler NIJ 0101.06 standardına göre ve numune ile namlu arasındaki mesafe 5 metre olacak şekilde yapılmıştır. Tüm deney numuneleri 400×500 mm boyutlarında 16 tabaka olarak hazırlanmış ve mermi hızları kronograf yardımıyla ölçülmüştür. Merminin numune üzerinde bıraktığı penetrasyonun ölçülmesi amacıyla numune arka yüzeyinde yağ esaslı kurumayan kil kullanılmıştır. Kuru ve STF emdirilmiş kevlar fiber takviyeli kompozit numuneler vakum infüzyon yöntemiyle hazırlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, kevlar kumaşlara STF emdirilmesiyle oluşturulan numunelerin altlık malzeme üzerinde bıraktığı penetrasyon derinliği azalmış, çapı ise artmıştır. Kuru kevlar kumaşta iz derinliği ortalama 35,49 mm iken, STF emdirilmiş kumaşta ise bu değer ortalama 21,33 mm olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla STF emdirilmiş kumaşlara ait balistik dayanım, kuru kumaşlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Aynı şekilde kuru hibrit ve karbon kumaşlara kıyasla, STF emdirilmiş hibrit ve karbon kumaşların balistik dirençleri daha yüksek çıkmıştır.

Stergiou ve arkadaşları (2020) poliüre kaplamalı ince alüminyum plakaların balistik performansı üzerine bir sayısal çalışma yapmışlardır. Katmanlı model, 4 mm'den fazla poliüre kalınlığı için artırılmış balistik performans sağlamıştır. Model, ele alınan hedef plakasını etkileyen sert bir küresel mermiden oluşmuş ve sonlu eleman (FE) yöntemiyle araştırılmıştır. Polimer kaplama kalınlığının artmasıyla birlikte balistik performansta doğrusal bir artış

gözlenmiştir. Balistik sınır, monolitik metal plaka ile karşılaştırıldığında, polimer kaplama kalınlığının mm başına yaklaşık %5 artmıştır.

Sazhenkov ve arkadaşları (2020) yüksek hızlı darbe altında poliüre kaplı cam elyaf takviyeli laminatlar üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma, pnömatis bir tabanca kullanılarak özel olarak geliştirilmiş bir balistik deneysel test cihazı üzerinde yapılmıştır. 200×300×8 mm boyutlarında 11 adet kompozit hedef hazırlanmıştır. 23,8 mm çapında ve 54,7 g ağırlığında çelik bir mermi 150 m/s'ye kadar çarpma hızıyla hedeflere dikey olarak etki ettirilmiştir. Hedefin ön ve arka yüzlerinde 1,2 mm koruyucu kaplamaya sahip hedefler için ve ayrıca koruyucu kaplaması olmayan numuneler için balistik sınırın karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılmıştır. Çarpma süreci, saniyede 25.000 kare ile önden ve üstten görüntüleri almak için yüksek hızlı kamera ile kaydedilmiştir. Deneyler sonucunda ön yüzeydeki 1,2 mm kalınlığındaki kaplamanın balistik sınırı %20 artırdığı görülmüştür.

Haris ve arkadaşları (2018) yaptıkları çalışmada, poliüre ve kesme kalınlaştırma sıvısından (STF) yapılan potansiyel olarak yeni kişisel koruyucu ekipman (PPE) süspansiyon pedlerinin şok dalgası azaltma kapasitesini araştırmışlardır. 2 mm'den 18 mm'ye kadar değişen farklı Twaron kumaş kalınlıkları için, 20 mm kalınlığında esnek olmayan poliüretan köpükten yapılmış geleneksel köpük pedin 4 mm kalınlığında poliüre ped ile değiştirilmesi, normalleştirilmiş tepe basıncı ve itmeyi sırasıyla yaklaşık %74 ve %49 azalttığı görülmüştür. Diğer pedler (20 mm kalınlığında STF ped ve STF infüzyonlu köpük ped), en yüksek basınç açısından geleneksel köpük pedden daha iyi, ancak itme açısından daha kötü performans göstermiştir. Bu yüzden poliüre, kumaş balistik yelekler, bomba kıyafetleri ve muharebe kaskları gibi şok dalgasını hafifletme özelliği gerektiren kişisel koruyucu ekipmanlarda kullanılma potansiyeline sahiptir.

Dyatkin ve arkadaşı (2018) öne bakan floropolimer kaplı zırh kompozitlerinin balistik performansı üzerine çalışmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, sert çelik yüzeyler üzerine politetrafloroetilen (PTFE) kaplamaların zırh kompozitlerinin penetrasyon direncini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Tasarıma bağlı olarak, floropolimer kaplamalar, benzer ön yüz konfigürasyonlarında daha önce test edilen polimerlere göre kaplanmış sert çeliğe göre daha büyük V-50 artışları sağlayabilmiştir. PTFE kaplamalar en fazla faydayı sert ve tok yüzeylere sağlamıştır. Ayrıca katmanlı PTFE laminatlar, karşılaştırılabilir kalınlıkta monolitik PTFE

katmanlara göre daha yüksek kütle verimliliği sağlamıştır.

Youssef ve arkadaşları (2020) yaptıkları çalışma ile yeni poliüre köpükler üretmiş ve doğrusal viskoelastik modellemeye dayalı poliüre köpüklerin zamana bağlı tepkisini deneysel olarak doğrulamak için düşük enerjili dinamik etkilere maruz bırakmışlardır. Tam donanımlı bir düşme ağırlığı test makinesinde, 227 kg/m^3 ve 355 kg/m^3 olmak üzere iki farklı yoğunluğa sahip poliüre köpükler üzerine yaklaşık 7J'lük düşme ağırlığı testi yürütülmüştür. Çarpma olayıyla eş zamanlı olarak, numunelerin deformasyonunu ve tepkisini yakalamak için yüksek hızlı fotoğraflama tekniği kullanılmıştır. Poliüre köpüklerin, karşılaştırmalı köpükten daha etkili bir şekilde etkiyi azalttığı kanıtlanmıştır.

Sun ve arkadaşları (2020) mermi etkisine maruz kalan poliüre kaplı ASTM1045 çelik levhanın anti-penetrasyon performansı üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. Bu araştırma için iki çeşit modifiye poliüre malzemesi (AMMT-053 ve AMMT-055) seçilmiştir. Poliüre kaplama kalınlığının, poliüre kaplama konumunun ve cam elyafın etkilerini keşfetmek için bir tüfek ve 5,8 mm çaplı mermi ile balistik etkiye maruz bırakılmıştır. Sonuç, poliüre kaplama konumunun etkilerinin iki poliüre arasında farklı olduğunu göstermiştir. AMMT-053 poliüre malzeme için, ön yüzde olmak arka yüzde olmaktan daha iyi sonuç vermiştir. Ancak AMMT-055 poliüre için, fark çok ince olmasına rağmen arka yüzde olmak daha iyi sonuç vermiştir. Genel olarak AMMT-055 poliüre, AMMT-053'ten daha iyi anti-penetrasyon özelliği göstermiştir.

Wang ve arkadaşları (2020) kesme kalınlaştırma sıvısı (STF) ve poliüretan ile oluşturulan aramid kumaşın balistik performansını incelemişlerdir. Bu çalışmada yapışkan poliüretan (PU) kullanılmıştır. STF, STF-PU kompoziti ve PU ile emprenye edilmiş aramid kumaşlar, sırasıyla çekmeye karşı dayanıklılık, kumaşın esnekliği ve yüksek hızlı darbe testi açısından karşılaştırılmışlardır. Yüksek hızlı darbe testinde, STF-PU/aramid, STF/aramid ve PU/aramid kompozite göre daha yüksek balistik sonuçlar vermiştir.

Chatterjee ve arkadaşları (2021), balistik darbe direncinin artırılması için dilatant sıvı (DF) gövdeli kevlar ve cam hibrit sandviç kompozit paneller (SCP) üretmişlerdir. Ağırlıkça %65'lik silika bazlı bir DF gerekli miktarda etanol ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Daha sonra polietilen glikol (PEG) ilave edilerek 30 dk karıştırılmıştır. Fazla etanol, 80°C ısıda bekletilerek buharlaştırılmıştır. Hedef numuneler kevlar elyaf (Kevlar-362S), cam elyaf ve DF'den

hazırlanan kompozitlerden oluşturulmuştur. Kompozitler 100×100 mm boyutlarında ve elle yatırma yöntemi ile üretilmişlerdir. Referans numuneler ise sadece kevlar ve cam elyaftan hazırlanmıştır. Balistik testler için, kurşun çekirdek taşıyan ortalama ağırlığı 11,73 g (15,6 g kabuk ile birlikte toplam kütlesi) ve ortalama hızı 175 m/s olan 0,38 kalibrelik mermiler kullanılmıştır. SCP'ler içinde kullanıldığında balistik etkinin enerjisinin dağılmasını daha da artıran sentezlenmiş DF'ler tarafından süreksiz bir kesme kalınlaşması davranışı ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, DF ilaveli SCP'lerin üzerindeki etki enerjisinin %94,5'ini dağıtabildiği saptanmıştır. DF ilavesiz SCP'lerde ise enerjinin sadece %49,06'sının dağıtılabildiği görülmüştür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, ultra yüksek moleküler yoğunluklu polietilen (uhmwpe) kumaş tabanlı zırhların balistik davranışları, deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda zırh malzemesi olarak, titanyum (Ti6Al4V) plaka, poliüre tabaka, alüminyum bal peteği levha ve tüm deney numunelerinde bulunan uhmwpe kumaş kullanılmıştır. Çarpışma testlerinde kullanılan mühimmat türü ise 7,62x51 mm FMJ M80, 7,62x51 mm AP (zırh delici) ve 5,56x45 mm kalibreli SS109 mermidir. Sayısal analizler, bilgisayar tabanlı sonlu eleman modeli yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman modellemesi ile elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmalar ile kıyaslanmıştır.

3.1. Deneysel Testlerde Kullanılan Malzemeler

Deneysel testlerde hedef numunelerde kullanılmak üzere 4 farklı malzeme temin edilmiştir.

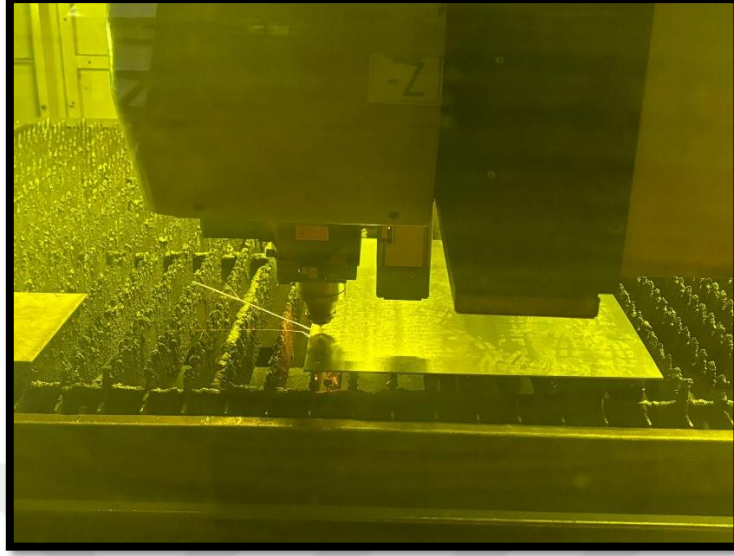
3.1.1. Titanyum plaka

Çalışma kapsamında 3 mm kalınlığa sahip Titanyum GR5 ASTM B265 (Ti6Al4V) levha temin edilmiştir. Marmara Titanyum Metal San. Tic. Ltd. Şti. firmasından gönderilen titanyum levhaya ait teknik özellikler Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 : Titanyum levhaya ait teknik özellikler

Çekme Özellikleri			Kimyasal Bileşim Oranları (%)					
Uzama Oranı (%)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Titanyum	Demir	Karbon	Azot	Hidrojen	Oksijen
11	925	1010	0.795	0.173	0.011	0.007	0.001	0.013

500x1000 mm ölçülerinde temin edilen Titanyum GR5 ASTM B265 (Ti6Al4V) levha, lazer CNC tezgahında atışların yapılacağı uygun boyutlar olan 150x150 mm olarak kesilmiştir. 1 tabaka 150x150 mm titanyum plakanın ağırlığı 327 gramdır. Lazer tezgahında kesimi yapılan levha Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Yoğunluğu 4,54 g/cm³ olan ve Marmara Titanyum Metal San. Tic. Ltd. Şti. tarafından (M. K. Taş, 2019) temin edilen titanyum plaka Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Titanyum levha lazer kesimi

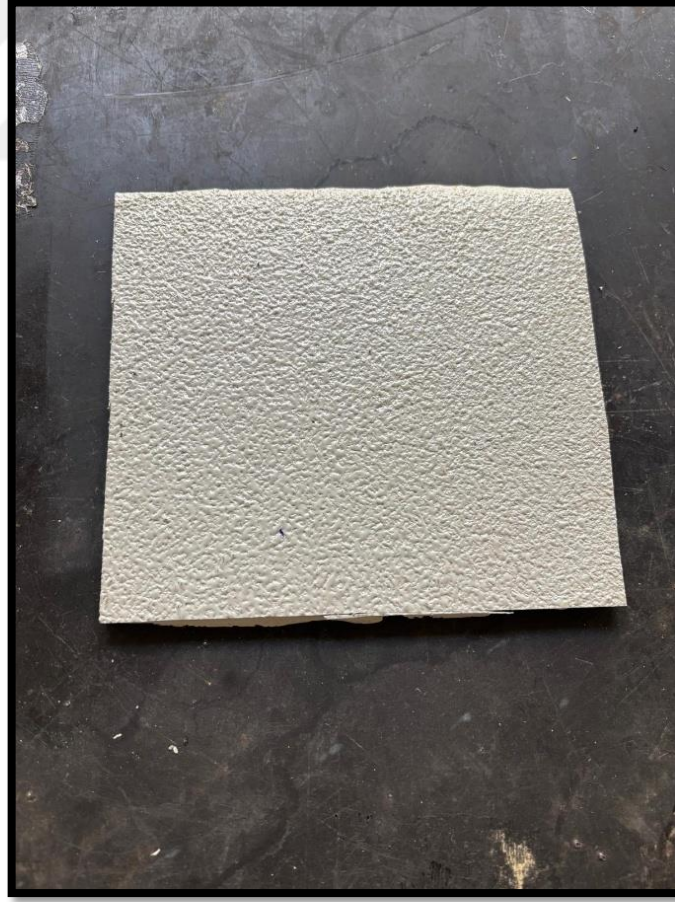


Şekil 3.2 : Titanyum plaka (Ti6Al4V)

3.1.2. Poliüre tabaka

Literatürde yapılan balistik çalışmalar, poliüre destekli laminatların penetrasyon direncinin arttığını göstermiştir (L. Wang et al., 2025). Bu sebeple, 2 farklı tipte poliüre

malzemesi temin edilmiştir. Bunlardan ilki, Mapei firmasının ticari ürünü olan Purtop 1000'dir. İki bileşenli, saf poliüre esaslı bu kaplama, yüksek reaktivite ve hızlı kürlenme özelliği sayesinde uygulandığı yüzeylerde ek yeri bırakmadan homojen bir film oluşturabilmektedir. Kimyasal dayanımı yüksek olan Purtop 1000, aynı zamanda aşınma, darbe ve su geçirimsizlik açısından üstün performans sergilemektedir. Uygulama kalınlığı kontrol edilebilir nitelikte olup, tipik olarak 1,5–2,5 mm aralığında değişmektedir. Elastikiyet modülü, uzama oranı ve aderans özellikleri bakımından yapısal kompozit sistemlerde koruyucu ve enerjiyi sönümleyici bir ara tabaka olarak kullanılmaya elverişlidir. Bu bağlamda, çalışmada yer alan çok katmanlı kompozit yapıların arayüzeyinde Purtop 1000 kullanılarak, darbe enerjisinin yayılması ve arka yüzey deformasyonunun azaltılması hedeflenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere 5 mm kalınlığında temin edilen Purtop 1000 poliüre Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Mapei firmasından temin edilen Purtop 1000 poliüreye ait teknik özellikler Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Purtop 1000 poliüre tabaka

Çizelge 3.2 : Purtop 1000 poliüreeye ait teknik özellikler

Özellik	Değer / Açıklama
A/B Karışım Oranı (hacimce)	100 : 100
Yoğunluk (A / B) (g/cm ³)	1,08 ± 0,03 / 1,11 ± 0,03
Viskozite (Brookfield @23 °C, mPa·s)	530 ± 100 / 975 ± 175
Jel (gel) Zamanı (@23 °C)	≈ 6 saniye
Tensil Mukavemet (ISO 37, 2 mm)	> 20 N/mm ²
Kopma Uzaması (ISO 37)	> 300%
Yırtılma Mukavemeti (ISO 34-1)	> 80 N/mm
Shore Sertlik	Shore A 90 / Shore D 45
Cam Geçiş Sıcaklığı (Tg)	-46 °C
Su Buharı Geçirgenliği	sD ≈ 2,9 m (Sınıf I)
Kapiler Su Emilimi (EN 1062-3)	w ≈ 0,01 kg/m ² ·h ^{0,5} (< 0,1 limit)
CO ₂ Geçirgenliği (EN 1062-6)	sD ≈ 285 m (> 50 m)
Çekme Dayanımı (adhesion)	3,6 N/mm ² (>0,8 N/mm ²)
Aşınma Kaybı (Taber @1000 döngü)	< 200 mg (< 3000 mg)
Kimyasal Direnç	Parlama yok; alkalilere ve zayıf asitlere dayanıklı
Kapsam (Yayılım)	2,2 kg/m ² → 2 mm kalınlık
Uygulama Sıcaklığı	+5 °C – +40 °C (ortam); bileşen sıcaklığı +65 °C – +85 °C; 160–200 bar
Depolama Ömrü	12 ay (15–25 °C kuru ortamda)

Deneylerde kullanılacak ikinci poliüre türü ise İzoneks İnşaat Mühendislik Turizm ve Otomotiv San. Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edilen Line-x XS-100 poliüredir. Söz konusu

ürün 2 bileşenli ve püskürtme yöntemiyle uygulanmaktadır. Uygulama alanları ise tekne güverteleri, golf arabaları, kamyonet kasa astarları, römork zeminleri vs. olarak çeşitlendirilebilir. Deneylerimizde test edilmek üzere 5 mm kalınlığında bir miktar numune üretilerek balistik testlerdeki performansı araştırılacaktır. Ebatları 150x150 mm olan 1 tabaka poliürenin ağırlığı 150 gramdır. belirlenmiştir. Line-x XS-100 poliüreye ait teknik özellikler Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. Üretimi yapılan poliüre tabaka Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 : Line-x XS-100 poliüreye ait teknik özellikler

Teknik Özellikler	Değer	Test Standardı
Çekme dayanımı (N/mm ²)	14,80	ASTM D412
Yırtılma dayanımı (N/mm)	51,66	ASTM D624
Uzama kapasitesi (%)	91	ASTM D412
Yoğunluk (g/cm ³)	1,1983	-

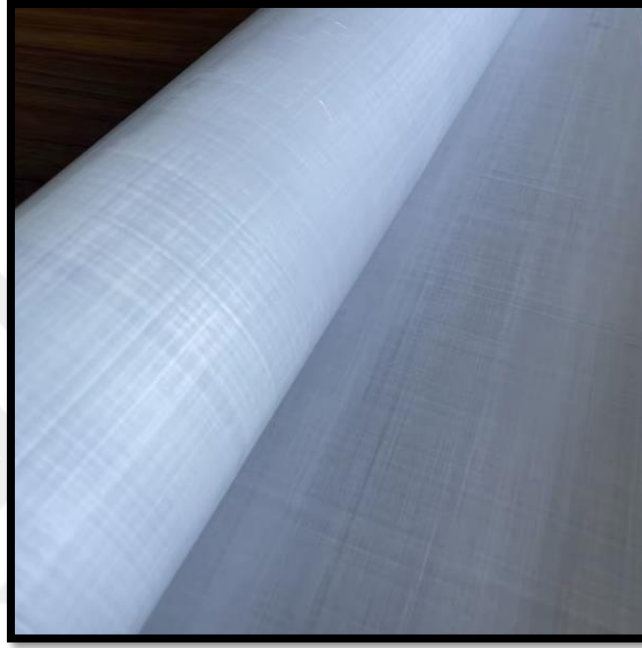


Şekil 3.4 : Line-x XS-100 poliüre tabaka

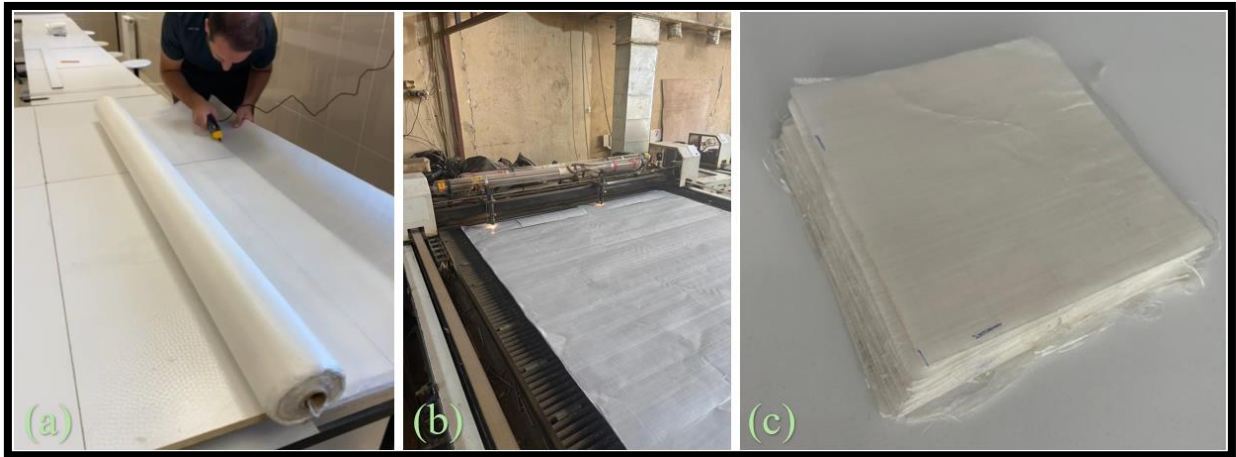
3.1.3. Ultra yüksek moleküler yoğunluklu polietilen (uhmwpe) kumaş

Deneyde kullanılacak diğer bir malzeme ise ultra yüksek moleküler yoğunluklu polietilen (uhmwpe) fiber kumaştır. Bu ürün, belirli bir teknoloji kullanılarak özel matris malzemeleriyle lamine edilmiş, 90 derecelik bir açıyla üst üste binen iki tek yönlü düzenlenmiş fiber ağdan oluşmaktadır. Kumaşın yoğunluğu 160 ± 8 g/m² olup, Jinhu Jeely Sport Products Company firmasından Şekil 3.5'te görüldüğü üzere rulo halinde temin edilmiştir. 1 tabaka kalınlığı 0,22

mm'dir. Dış görünüşü beyaz tekstil elyafı şeklindedir. Deneysel çalışma için 150x150 mm ebatlarında (P. R. S. Reddy et al., 2015) yaklaşık 1000 adet kesim gerçekleştirilmiştir. Kesimler hem el makasıyla hem de soğutmalı lazer cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.6'da kesim yöntemleri ve kesim sonrası istenilen boyutlarda elde edilen uhmwpe kumaş gösterilmiştir.



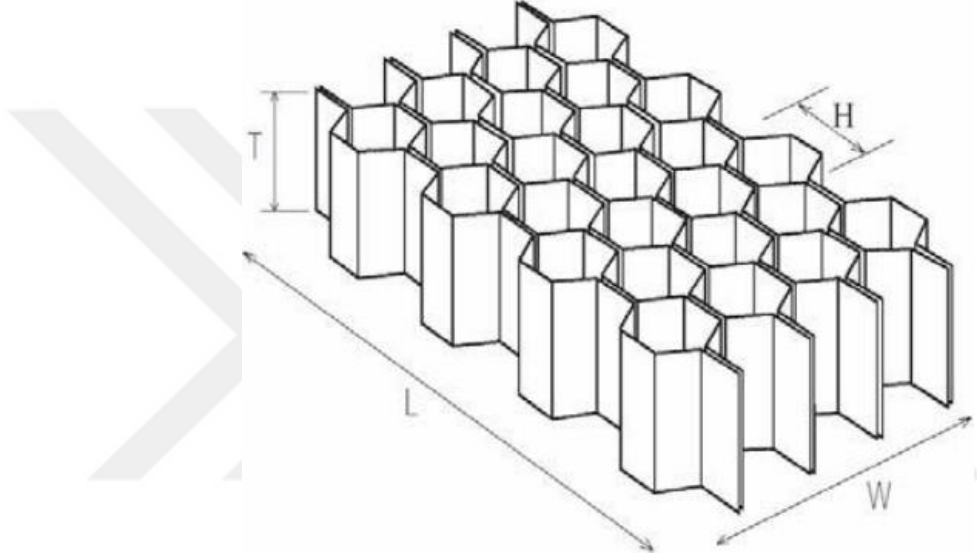
Şekil 3.5 : rulo uhmwpe kumaş



Şekil 3.6 : uhmwpe kumaş (a) elle kesim, (b) soğutmalı lazer ile kesim, (c) elde edilen kumaşlar

3.1.4. Alüminyum bal peteği plaka

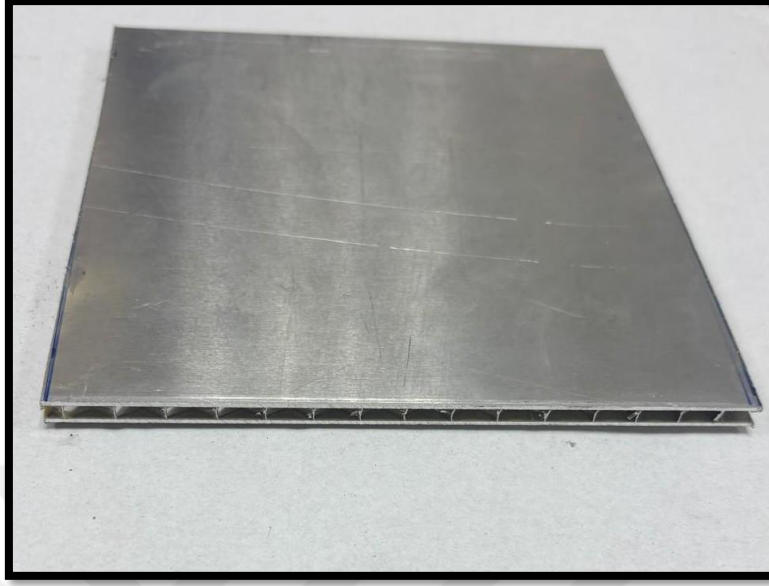
Deneyisel çalışmalarda çekirdek ve kaplaması alüminyumdan oluşan 6,3 mm kalınlıklı alüminyum bal peteği kullanılmıştır. Balistik çalışmalarda kendine kullanım alanı bulan (G. Sun et al., 2018) alüminyum bal peteği malzemesinin teknik çizimi Şekil 3.7’de gösterilmiştir. 150x150 mm olarak kesilen bal peteği tabakaları 137 gram ağırlığa sahiptir. Bal peteğine ait fiziksel özellikler Çizelge 3.4’te, bal peteği plakası örneği ise Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.7 : Bal peteği teknik çizim (Koç, 2018)

Çizelge 3.4 : Bal peteği plaka fiziksel özellikleri

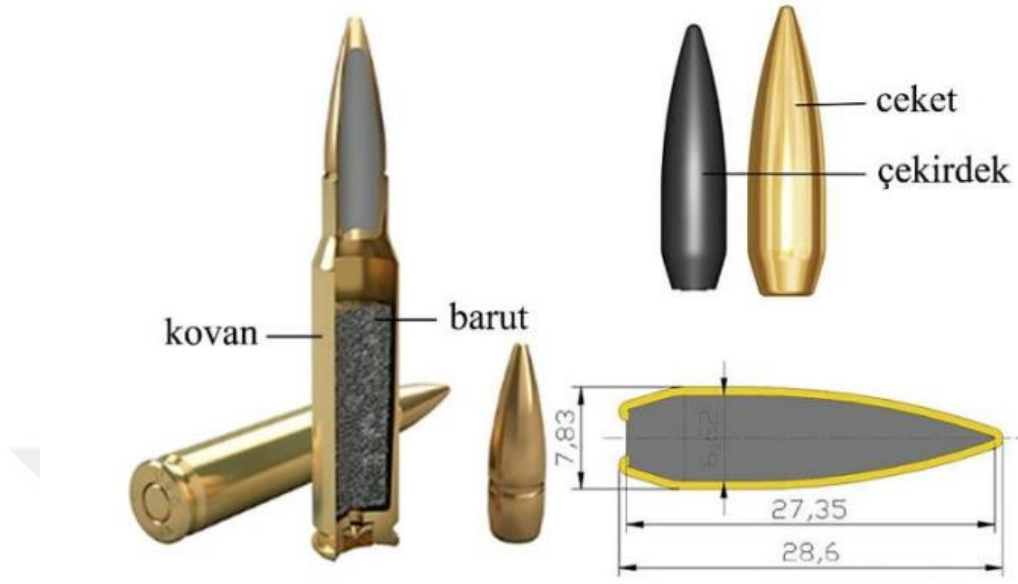
Çekirdek yüksekliği (T)	Çekirdek genişliği (H)	Üst levha kalınlığı	Alt levha kalınlığı	Toplam kalınlık
6,0 mm	10,39 mm	1,0 mm	1,0 mm	6,3 mm



Şekil 3.8 : Bal peteği görseli

3.1.5. 7.62x51 mm M80 tipi FMJ mermi

Balistik deneylerde 7.62x51 mm FMJ (Full Metal Jacket) M80 tipi ve 7.62x51 mm AP (zırh delici) mermi kullanılacaktır. 7.62x51 mm NATO M80 mermisi, yaygın olarak kullanılan tam metal ceketli (FMJ) bir mühimmat tipidir ve özellikle askeri uygulamalarda tercih edilmektedir. Merminin balistik özellikleri, yüksek kinetik enerjisi ve penetrasyon kapasitesi nedeniyle balistik koruma testlerinde önemli bir referans noktasıdır. Bu çalışma, M80 mühimmatının balistik performansı ve çeşitli zırh sistemleriyle olan etkileşimini ele alarak mühimmatın etkinliğini ve savunma sistemlerinin zayıf noktalarını ortaya koymaktadır. 7.62x51 mm kalibreli mermi görüntüsü Şekil 3.9’da ve mermiye ait teknik özellikler Çizelge 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.9 : Balistik deneylerde kullanılan 7,62x51mm FMJ mermi ve boyutları (Özer et al., 2024)

Çizelge 3.5 : 7.62x51 mm FMJ mermi teknik özellikleri (Özer et al., 2024)

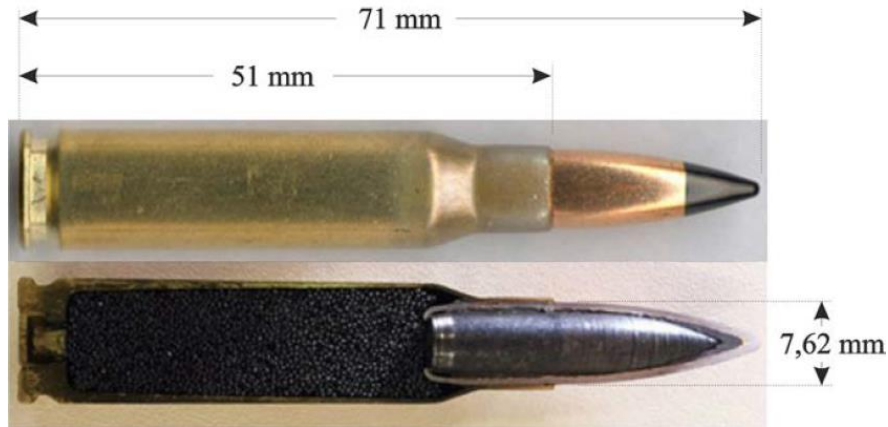
Özellik	Değer
Kalibre	7,62x51 mm NATO
Mermi Tipi	Full Metal Jacket (FMJ)
Çekirdek Malzemesi	Kurşun çekirdek, bakır kaplamalı
Ağırlık	147 grain (~9.6 gram)
Namlu Çıkış Hızı	~847 m/s (2,780 ft/s)
Namlu Çıkış Enerjisi	~3,500 Joule (J)
Balistik Katsayı (G1)	0.398
Maksimum Etkili Menzil	~800 metre
Mermi Çekirdek Çapı	7,83 mm
Mermi Çekirdek Ağırlığı	9,60 g
Mermi Kovan Ağırlığı	11,84 g
Mermi Uzunluğu	28,6 mm
Barut Miktarı	2,768±0,005 g

3.1.6. 7.62x51 mm AP (armor piercing) zırh delici mermi

Balistik deneylerde kullanılan diğer mermi ise MKE tarafından üretilen 7.62x51 mm kalibreye sahip AP zırh delici modeldir. 7,62x51 mm AP (Armor Piercing) mermisi, zırh delici kapasiteye sahip bir mühimmat türüdür ve genellikle zırhlı hedeflere karşı etkili olabilmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu merminin tasarımında, özellikle hedefin zırhını aşabilecek sert metal çekirdekler kullanılmaktadır. 7,62x51 mm kalibresi, NATO tarafından standartlaştırılmış olup, birçok askeri operasyon ve savunma senaryosunda yaygın olarak tercih edilmektedir. AP mermilerinin zırh delme yetenekleri, genellikle çelik çekirdekleri sayesinde artırılmakta olup, yüksek hızda çarpma etkisi yaratacak şekilde optimize edilmiştir. Bu özellikler, merminin zırhı delip hedefin iç kısmına ulaşmasını sağlar, böylece yüksek enerji transferi ve etkili hasar yaratılır. 7,62x51 mm AP mermisinin teknik özellikleri Çizelge 3.6’da, mermiye ait görsel ise Şekil 3.10’da gösterilmektedir.

Çizelge 3.6 : 7.62x51 mm AP mermi teknik özellikleri

Teknik Özellik	Değer
Mermi çekirdek malzemesi	Çelik
Çekirdek ağırlığı	9,5 gram
Mermi hızı	850 m/s
Mermi uzunluğu	71,1 mm
Mermi çapı	7,62 mm
Çarpma enerjisi	3,2 kJ
Zırh delme kapasitesi	10-12 mm çelik zırh



Şekil 3.10 : 7,62x51mm AP (zırh delici) mermi ve boyutları

3.1.7. 5,56x45 mm kalibre SS109 mermi

Balistik testlerde kullanılan üçüncü ve son mermi türü 5,56x45 mm SS109 tipi mermidir. 5,56x45 mm SS109 mermisi, NATO tarafından standart piyade tüfeği mühimmatı olarak kabul edilen ve özellikle M16A2 ile türevi silahlarda yaygın şekilde kullanılan bir çekirdek tipidir. ABD tarafından geliştirilen M193 mühimmatının taktik etkinliğini artırma amacıyla Belçika kökenli FN Herstal tarafından tasarlanmış olan SS109, 1980’li yılların başında STANAG 4172 kapsamında NATO standardı haline getirilmiştir.

SS109 mühimmatı, 4 gram ağırlığında, çelik uçlu kurşun çekirdeğe sahiptir. Bu hibrit çekirdek yapısı, zırh delici etkisini artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Mühimmatın menzili, etkili olarak 600 metreye kadar uzanmakta olup, bu menzilde bile delici etkisini koruyabilmektedir. Çekirdeğin ön kısmında bulunan çelik nüve, sert hedefler karşısında penetrasyon yeteneğini artırırken, geri kalan kurşun yapısı yumuşak dokularda enerji transferini arttırır. Bu yapı, merminin hem personel hem de hafif zırhlı hedeflere karşı kullanılabilirliğini artırmaktadır.

Teknik özellikleri Çizelge 3.7’de verilen 5,56x45 mm kalibreli merminin namlu çıkış hızı kullanılan tüfeğin namlu uzunluğu ile doğru orantılıdır. Yüksek hız, merminin hedef üzerinde daha etkili yaralanmalara yol açmasını sağlar. Ancak, 5,56 mm çapının doğası gereği, daha büyük kalibreli mühimmatlara kıyasla hedef üzerindeki hidrodinamik şok etkisi sınırlıdır. Bu durum, SS109’un kritik organlara doğrudan temas etmediği sürece öldürücülüğünün göreceli olarak düşük kalmasına neden olur. Buna karşın, yüksek isabet kabiliyeti ve düşük geri tepme özellikleri sayesinde, modern çatışma sahasında etkili bir üstünlük sağlar.

Çizelge 3.7 : 5,56x45 mm mermi teknik özellikleri

Teknik Özellik	Değer
Fişek boyu	57,4 mm
Fişek ağırlığı	12,2 g
Hız	914,4±12,2 m/s
Ortalama namlu basıncı	1030 bar
Ortalama kovan ağız basıncı	4450 bar
Kovan malzemesi	Pirinç (CuZn28 veya CuZn30)
Çekirdek malzemesi	Kurşun
Mermi ağırlığı	4 g

SS109'un tasarımı, aynı zamanda uluslararası insancıl hukuk ve Cenevre Sözleşmeleri bağlamında tartışmalara konu olmuştur. Merminin çelik uçlu yapısı bazı yorumlara göre yaralanma biçimlerini artırabilirken, NATO mühimmat sınıflandırmaları çerçevesinde bu mühimmatın yasal kullanımı açık şekilde tanımlanmıştır. Nitekim, SS109 mermisi halihazırda birçok NATO üyesi ülkenin envanterinde aktif olarak kullanılmaktadır.

Sonuç olarak, Şekil 3.11'de gösterilen 5,56x45 mm SS109 mühimmatı, düşük ağırlık, yüksek hız, yüksek penetrasyon kabiliyeti ve NATO standardına uyumluluğu gibi avantajlarıyla temel mühimmat tiplerinden biri olarak yerini almıştır. Dolayısıyla deneysel çalışmalarda bu mermi tipi de kullanılmıştır.



Şekil 3.11 : 5,56x45 mm SS109 mermi

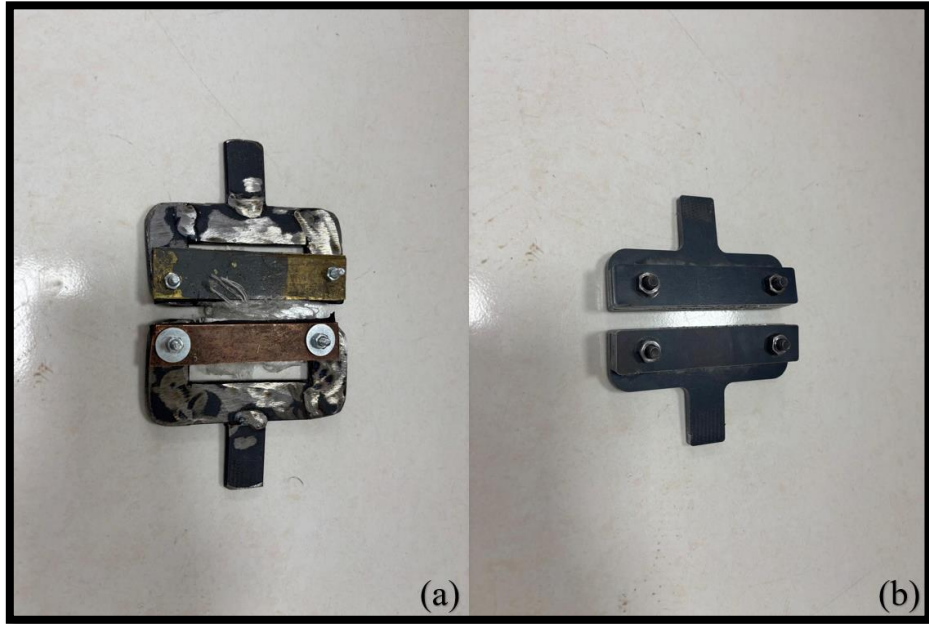
3.2 Uhmwpe Kumaşın EN ISO 13934-1 Çekme Testi Standardına Göre Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde, EN ISO 13934-1 standardına (Susilo et al., 2020) uygun olarak test edilen ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (uhmwpe) kumaşın elastisite modülü ve Poisson oranı parametreleri belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan 160 g/m² yoğunluğa ve 0,22 mm kalınlığa sahip uhmwpe kumaşı, standart test protokolleri çerçevesinde çekme testine tabi tutulmuş ve mekanik özellikleri hesaplanmıştır.

3.2.1 Numune hazırlama ve test metodu

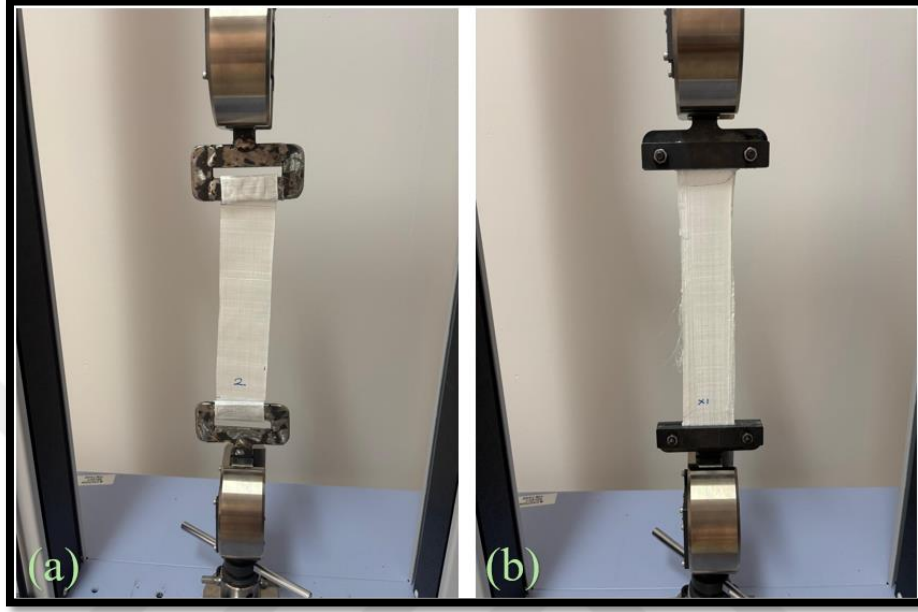
Standartta belirtilen 50x200 mm boyutlarında hazırlanan kumaş numunesinin Shimadzu test cihazında çekilmesi planlanmıştır. Ancak mevcut tutucu mekanizması, kumaş numunesini güvenilir bir şekilde kavramak için yetersiz kalmıştır. Bu sorunu gidermek amacıyla, numuneyi tam olarak kavrayacak aparat geliştirilmesi gerekmiştir.

Bu doğrultuda, Şekil 3.12 (a)'da gösterilen ilk aparat tasarlanmıştır. Bu tasarımda, beş adet çelik lama parçasının basit yöntemlerle birbirine kaynaklanmasıyla oluşturulan bir gövde ve üzerine açılan cıvata delikleri bulunmaktadır. Bu tasarımı yapmanın amacı, kumaş numunesinin bu bölgeye birkaç tur sarılarak sabitlenmesidir. Ancak, aparat yüzeyinin aşırı pürüzsüz olması ve numune sarım işleminin zorluğu nedeniyle bu ilk tasarım amaca hizmet edememiştir. Bu sebeple, ikinci bir aparat geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu yeni aparatın önceki tasarımdan temel farkları, numune sarım bölgelerine karşılık gelen yüzeylerin sürtünmeyi artırmak amacıyla pürüzlendirilmesi ve numunenin sarıldığı parçanın modüler yapıda tasarlanmasıdır. Bu tasarım, kumaş numunesinin sarım ve yerleştirme işlemlerini önemli ölçüde kolaylaştırmıştır. Solidworks programı üzerinde modellenen ve üretimi Mehteroğlu Makine Sanayi Ltd. Şti. tarafından gerçekleştirilen bu ikinci tasarım ise Şekil 3.12 (b)'de görülmektedir.



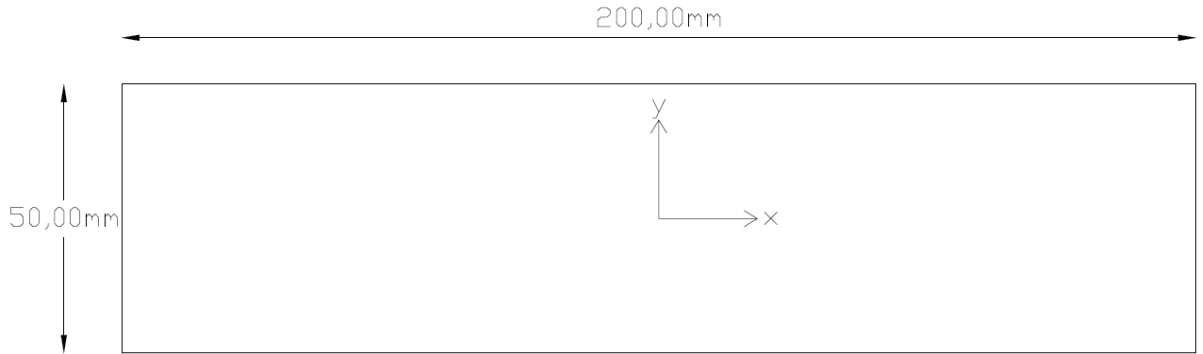
Şekil 3.12 : Kavrama aparatı (a) Elde kaynak ile hazırlanan, (b) Cnc lazer ile hazırlanan

Elde kaynak ile hazırlanan ve cnc lazer ile hazırlanan kumaş kavrama aparatlarının her ikisi ile Şekil 3.13'te görüldüğü gibi cihaza kumaş yerleştirilip çekme testine tabi tutulmuştur.

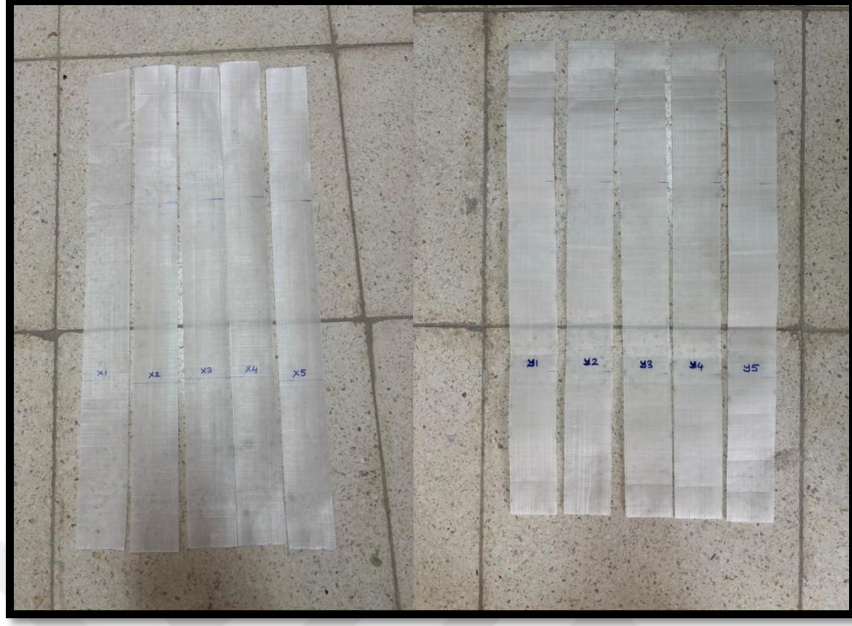


Şekil 3.13 : Kavrama aparatının çekme cihazına yerleşimi (a) Elde kaynak ile hazırlanan, (b) cnc lazer ile hazırlanan

EN ISO 13934-1 test standardı doğrultusunda, uhmwpe kumaşın ortotropik özellikler göstermesi dolayısıyla x ve y yönlerinde 5'er adet çekme testi numunesi hazırlanmıştır. Çekme testi numunelerine ait ölçüler Şekil 3.14'te gösterilmektedir. Hazırlanan numuneler Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : uhmwpe kumaş çekme numunesi ölçüleri



Şekil 3.15 : x ve y yönlü uhmwpe kumaşı çekme numuneleri

3.2.2 Test cihazı ve parametreleri

Standarda uygun olarak hazırlanan x ve y yönlerindeki çekme numuneleri Shimadzu marka test cihazı ile 20 mm/dk hızla test edilmiştir. Her çekme testi, çekme numunesi kopmaya uğrayıncaya kadar devam ettirilmiştir. Elde edilen kuvvet-uzama değerleri Trapezium-x adlı yazılım programıyla bilgisayara kaydedilmiştir.

Test sonrası elde edilen kuvvet-uzama grafiğinin elastik bölgesine ait eğim değeri ile kumaşa ait elastisite modülü hesaplanmıştır. Malzemenin elastik deformasyon sırasında uygulanan gerilime karşı verdiği tepkiyi ölçer ve şu formülle hesaplanır:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Burada:

- E: Elastisite modülü (MPa)
- σ : Çekme gerilmesi (MPa)
- ε : Boyuna gerinim (oransal uzama)

olarak ifade edilmiştir.

Poisson oranı (ν), malzeme eksenel yönde gerildiğinde enine büzülmenin boyuna uzamaya oranı olarak tanımlanır. Deney sırasında enine ve boyuna deformasyonlar ölçülerek Poisson oranı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\nu = - \frac{\epsilon_{enine}}{\epsilon_{boyuna}} \quad (3.2)$$

Burada:

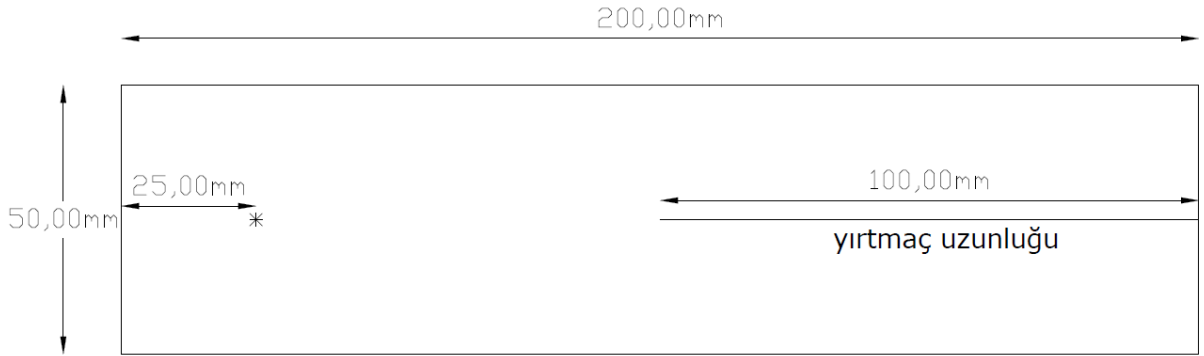
- ν : Poisson oranı
- ϵ_{enine} : Enine gerinim
- ϵ_{boyuna} : Boyuna gerinim

3.3 Uhmwpe Kumaşın EN ISO 13937-2 Yırtılma Testi Standardına Göre Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

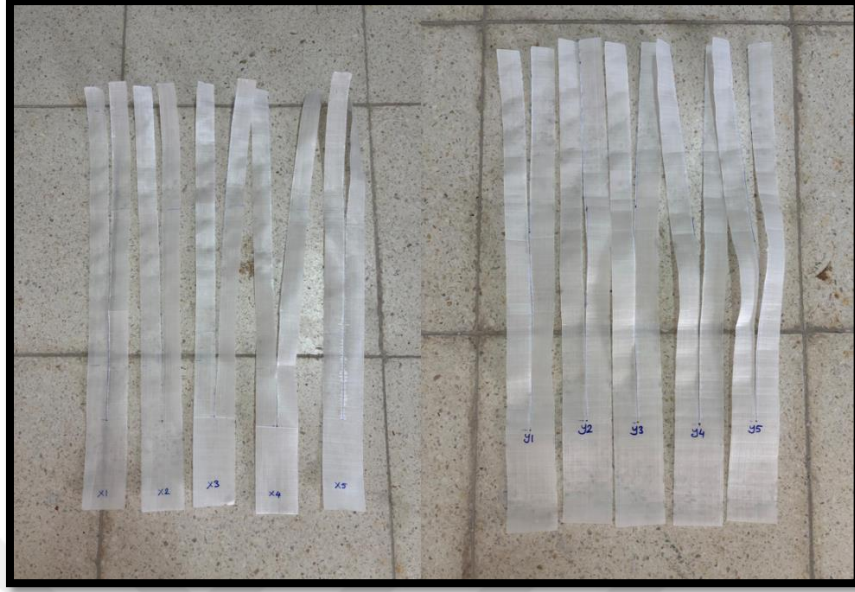
Bu bölümde, uhmwpe kumaşa ait yırtılma dayanımı ve kayma modülü gibi mekanik özellikler belirlenmiştir.

3.3.1. Numune hazırlama ve test metodu

EN ISO 13937-2 yırtılma test metodu standartları doğrultusunda x ve y yönlerinde 5'er adet yırtılma testi numunesi hazırlanmıştır. Test numunesine ait ölçüler Şekil 3.16'da, hazırlanan numuneler ise Şekil 3.17'de gösterilmektedir.



Şekil 3.16 : Uhmwpe kumaş yırtılma numunesi ölçüleri



Şekil 3.17 : x ve y yönlü uhmwpe kumaşı yırtılma numuneleri

3.3.2. Test cihazı ve parametreleri

Standarda uygun olarak hazırlanan x ve y yönlerindeki yırtılma numuneleri Shimadzu marka test cihazı ile 100 mm/dk hızla test edilmiştir. Her test, yırtılma numunesinin diğer ucunda kenardan 25 mm uzaklıkta bulunan işaretli noktaya ulaşınca kadar devam ettirilmiştir. Elde edilen kuvvet-uzama değerleri Trapezium-x adlı yazılım programıyla bilgisayara kaydedilmiştir. Kuvvet-uzama grafikleri yardımıyla uhmwpe kumaşa ait x ve y yönlerindeki yırtılma kuvveti değerleri hesaplanmıştır.

Kayma modülü (G), malzemenin kesme gerilmelerine karşı direncini ifade eder ve Young's modulus ile Poisson oranı kullanılarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.4)$$

Burada:

- G: Kayma modülü
- E: Elastisite modülü
- ν : Poisson oranı

Bu formül, elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri kullanılarak uhmwpe kumaşın kayma direncini hesaplamak için kullanılmıştır.

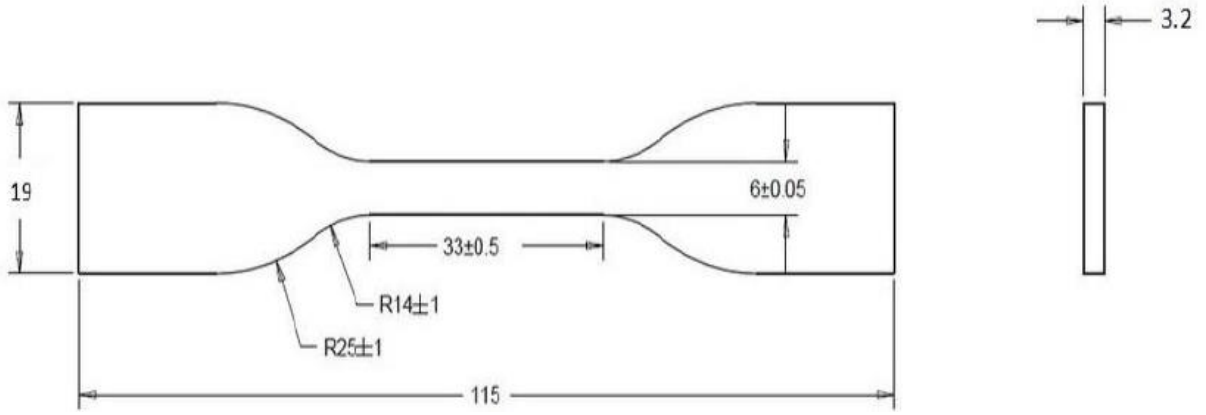
Yapılan tüm çekme ve yırtılma testleri sonucunda uhmwpe kumaşa ait elde edilen mekanik özellikler, Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8 : uhmwpe kumaşa ait mekanik özellikler

Özellik	Değer	Birim
Elastisite Modülü, E_x	153.000	MPa
Elastisite Modülü, E_y	11.300	MPa
Elastisite Modülü, E_z	11.300	MPa
Kayma Modülü, G_{xy}	6000	MPa
Kayma Modülü, G_{xz}	6000	MPa
Kayma Modülü, G_{yz}	3600	MPa
Poisson Oranı, ν_{xy}	0,3	-
Poisson Oranı, ν_{xz}	0,3	-
Poisson Oranı, ν_{yz}	0,4	-

3.4 Poliüre Tabakanın Çekme Testi ile Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bir sonraki deneysel aşamada poliüre tabakanın mekanik davranışı incelenmiştir. ASTM D638 standardı, plastik ve elastomer malzemeler için çekme testi numunesinin boyutlarını belirler. Poliüre, elastomerik veya plastik özellikler gösterdiği için bu standart uygundur. Line-x XS-100 poliüre tabakasının mekanik özellikleri ASTM D638 Type IV standardına uygun olarak yapılan çekme testi ile belirlenmiştir. Yapılan çekme deneyleri sonucunda poliüre tabakaya ait Young’s modulus (E), Poisson’s ratio (ν) ve kayma modülü (G) değerleri elde edilmiştir. Poliüre tabakadan elde edilen çekme numunelerine ait ölçülerin yer aldığı teknik çizim Şekil 3.18’de verilmiştir.



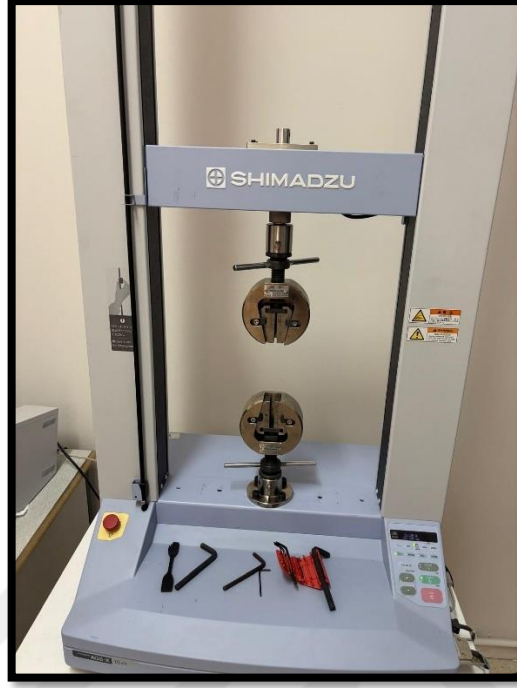
Şekil 3.18 : ASTM D638 Tip IV çekme testi numune ölçüleri (mm) (Sharma et al., 2019)

Çekme testi ölçülerine uygun olarak üretilen poliüre çekme numuneleri Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Şekil 3.19 : ASTM D638 Tip IV çekme numuneleri

Çekme deneyleri için İnönü Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Shimadzu marka çekme test cihazı Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 : Çekme test makinesi

Çekme test cihazına yerleştirilen çekme numuneleri, standarda uygun bir şekilde 5 mm/dk hızla çekilmiş ve kopmanın gerçekleşmesi ile test sonlandırılmıştır. Numuneler izotropik oldukları için herhangi bir yönde 3 adet numune test edilmiştir. Numunelerin cihazdaki yerleşimi ve kopma sonrası görüntüleri Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21 : Çekme numunesi yerleşimi ve kopma sonrası görünümü

Hacimsel elastisite modülü, hidrostatik basınç altındaki malzemenin sıkışmaya karşı direncini ölçer ve eşitlik 3.5 ile hesaplanır.

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3.5)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.6)$$

Burada;

- K : Bulk modülü (MPa)
- G : Kayma modülü (MPa)

olarak tanımlanır.

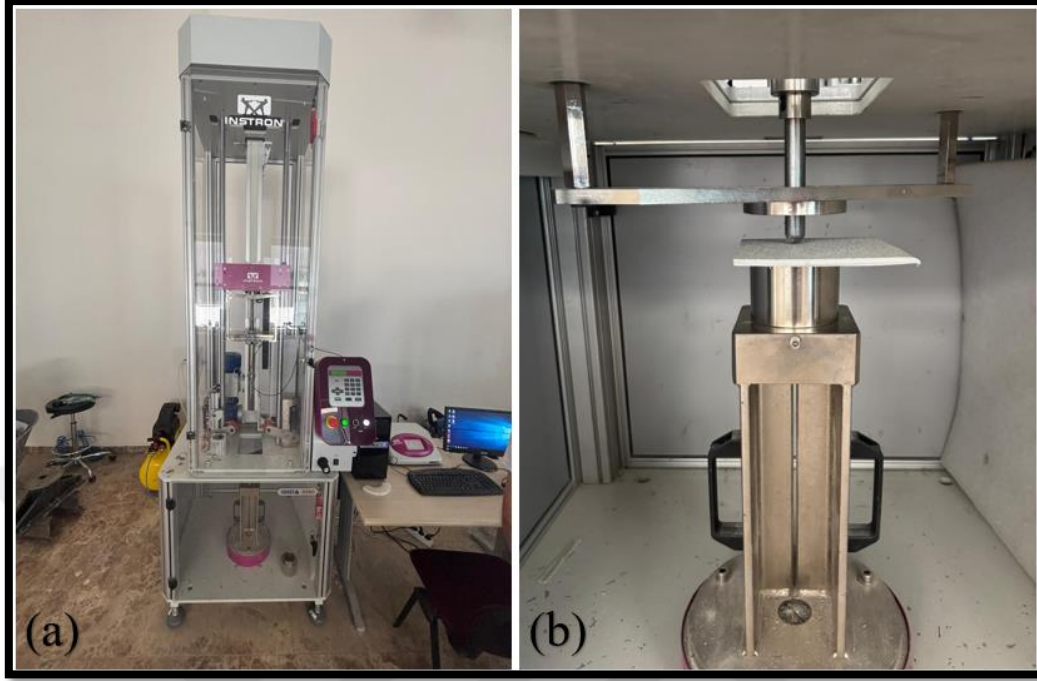
Line-x xs-100 poliürenin çekme deneyleri sonucunda elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9 : Line-x xs-100 poliüreeye ait mekanik özellikler

Özellik	Değer	Birim
Elastisite Modülü, E	136,84	MPa
Poisson Oranı, ν	0,49	-
Bulk Modülü, K	$2,2807 \times 10^9$	Pa
Kayma Modülü, G	$4,5919 \times 10^7$	Pa

3.5 Deney Malzemelerinin Darbe Testlerinin Yapılması

Darbe testi, Instron Ceast 9350 model cihazla gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, 70 kg (154 lbs) maksimum düşen kütleyle, 222 kN (50.000 lbs) maksimum tüp kapasitesi ve yük uygulama kapasitesine sahiptir. Testte, 20 mm çapında bir yarım küresel vurucu uç kullanılarak darbe uygulanmıştır. Test cihazı ve deney malzemelerinin cihaza yerleşimi Şekil 3.22’de gösterilmiştir. Darbe testlerinde 2 farklı tipte poliüre, titanyum plaka ve bal peteği plakaları kullanılmıştır. 90x90 mm ebatlarında hazırlanan malzemeler 75, 100, 125 ve 150 j olmak üzere 4 farklı yükte testlere tabi tutulmuştur.



Şekil 3.22 : Darbe testleri (a) Test cihazı, (b) Numunenin cihaza yerleşimi

3.6 Balistik Testler

Dünya genelinde balistik koruyucuların test edilmesine yönelik çeşitli standartlar mevcuttur. Bu alanda en yaygın kullanılan standartlar, ABD Ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ) ile Birleşik Krallık İçişleri Bakanlığı Bilimsel Geliştirme Birimi (HOSDB) tarafından belirlenen standartlardır. Bunların yanı sıra, NATO ve Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından da çeşitli askeri amaçlı balistik değerlendirme kriterleri geliştirilmiştir. Çizelge 3.10’da, balistik koruyucu malzemelerin değerlendirilmesinde kullanılan standartlara ilişkin bilgiler sunulmaktadır.

Çizelge 3.10 : Balistik Test Standartları (Bozdoğan et al., 2015)

Standart No	Standart Adı
TS 11164	Balistik koruyucu vücut zırhı
TS 13349	Askerî zırhlar - V50 balistik hız deneyi
MIL-A-46103 C	Light Weight, Ceramic Faced Composite Armor Procedure Requirements

Çizelge 3.10 (devam) : Balistik Test Standartları (Bozdoğan et al., 2015)

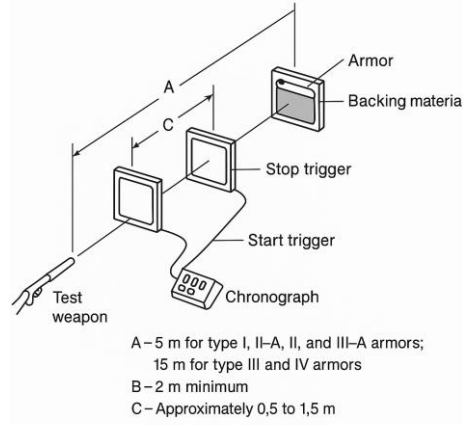
MIL-B-44053 A	Fragmentation Protective Body Armor, Vest Ground Troops
MIL-STD-662 F	Balistic Test For Armor
NIJ-STD-0101.04	Balistic Resistance Of Personel Body Armor
NIJ-STD-0101.06	Balistic Resistance Of Personel Body Armor
NIJ-STD-0108.04	Balistic Resistance Of Protective Materials
STANAG 2920	Balistic Test Method For Personel Armor
UK/SC/4697	The Balistic Testing Of Fragment Protective Personnel Armors
PPAA STD-1989-05	Personel Protective Armor Assosiation Testing Standarts For Balistic Resistance Of Presonel Body Armors
UL 752	Balistic Resistance Equipment
MIL-B-44194 A	Body Armor Fragmentation Protective Undergarment C.V. Crevmens
MIL-P-46199	Aluminium Oxide Ceramic (For Use In Armor Composite)
Pr EN ISO 14876-2	Protective Clothing-Body Armor-Part-2: Bullet Resistance Requirements And Methods

Balistik değerlendirmeler belirli kriterler dikkate alınarak yapılır. Bu araştırmanın parametreleri dahilinde yürütülen ampirik araştırmada, üretilen zırhların balistik etkinliğini değerlendirmek için Ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ) kriterleri kullanılmıştır. NIJ0101.06 standardında (Garcia-Avila et al., 2015) kullanılan merminin kalibresi, tipi, kütlesi ve hızı dikkate alınarak çeşitli koruma dereceleri tanımlanmıştır. NIJ kriterleri Çizelge 3.11’de sunulmuştur (Kurban, 2022). Bu kriterlere göre penetrasyon derinliği, hedef deformasyonu, enerji Emilimi ve yapısal bütünlük gibi parametreler incelenmiştir. Elde edilen veriler sayesinde balistik zırh tasarımı için birçok malzeme türü ve katman sıralaması araştırılmıştır. Bu araştırmada, değişen sayıda katmana ve sıralarına sahip alternatif hedef konfigürasyonları modellenmiştir. Amaç, NIJ 0101.06 standardına göre öngörülen Seviye III korumasını sağlayabilecek en uygun yapısal konfigürasyonu belirlemektir.

Çizelge 3.11 : NIJ koruma standartları (Kurban, 2022)

Koruma Seviyesi	Mermi Tipi	Atış Hızı (m/s)	Çekirdek Ağırlığı (g)
Seviye-IIA	9 mm FMJ	373±9,1	8
(5m mesafeden)	40 S&W FMJ	352±9,1	11,7
Seviye-II	357 Mag. JSP	436±9,1	10,2
(5m mesafeden)	9 mm FMJ	398±9,1	8,0
Seviye-IIIA	0,44 Mag. JSP	436±9,1	15,6
(5m mesafeden)	9 mm FMJ RN	448±9,1	8,1
Seviye-III	7,62 mm NATO FMJ	838±9,1	9,6
(15m mesafeden)			
Seviye-IV	30 kalibre M2 AP	878±9,1	10,8
(15m mesafeden)			

Balistik testler, NIJ 0101.06 standardında tanımlanan düzenek ve mesafe kriterlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinde, Şekil 3.23'te görüldüğü üzere ateşli silah sisteminden çıkan merminin uçuş hattı üzerine yerleştirilen iki optik sensör (start ve stop trigger) aracılığıyla mermi hızını ölçen bir kronograf cihazı entegre edilmiştir. Bu sistem, mermi ilk sensörden geçtiğinde zaman ölçümünü başlatmakta, ikinci sensörü geçtiğinde ise durdurarak uçuş süresine göre anlık hız verisi sağlamaktadır. Hedef sistem, balistik numunenin arkasında Şekil 3.24'te gösterilen NIJ standardına uygun kil bazlı destekleyici materyal (backing material) ile donatılmıştır ve bu yapı, arka yüzey deformasyonunun ölçülmesine olanak tanımaktadır. Type III ve IV seviyesindeki zırhlar için atış mesafesi 15 metre olarak belirlenmiş, optik sensörler arası mesafe (C) yaklaşık 0,5–1,5 metre, kronograf düzeneği ile silahtan çıkan mermi arasındaki minimum mesafe (B) ise 2 metre olacak şekilde yapılandırılmıştır. Açık poligon ortamında kurulan bu sistem sayesinde her bir merminin çıkış hızı kaydedilmiş, hedef üzerindeki etkisi standartlara göre değerlendirilmiştir. Kurulan test düzeneği hem penetrasyon analizi hem de arka yüzey deformasyonunun belirlenmesine uygun olarak tasarlanmış, tüm ölçümler güvenilir ve tekrarlanabilir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.23 : NIJ 0101.06 standardına göre test düzeneği (Erdoğan T., 2011)



Şekil 3.24 : Kil bazlı destekleyici macun

Bu çalışmada, geliştirilen kompozit yapıların balistik dayanımlarının belirlenmesi amacıyla yapılan testlerde, titanyum, poliüre, alüminyum bal peteği ve uhmwpe kumaştan oluşan çok katmanlı yapılar değerlendirilmiştir. Balistik testler, Malatya Polis Özel Harekat Müdürlüğü'ne ait açık atış poligonlarında, açık hava koşullarında gerçekleştirilmiştir. Testlerde, NIJ 0101.06 standardına uygun olarak, 7.62×51 mm kalibrede FMJ (Full Metal Jacket) ve AP (Armor Piercing) mühimmatlar kullanılmıştır. Bu mühimmat türleri, sırasıyla NIJ Level III ve Level IV tehdit seviyelerini temsil etmektedir. Her mermi kalibresi için 1 adet atış yapılmış olup, atışlar 15 metreden ve hedef yüzeyin normali ile 90° açı oluşturacak şekilde uygulanmıştır. Testler sırasında mühimmatların hedefe olan mesafesi ve atış açısı sabit

tutulmuş, dış etkenlerin test sonuçlarını etkilememesi adına çevresel koşullar (rüzgar, sıcaklık, nem) gözlemlenerek kayıt altına alınmıştır. Atışlar sonrası meydana gelen penetrasyon durumu, arka yüzey deformasyonu ve malzeme hasarları görsel ve fiziksel olarak değerlendirilmiştir. Arka yüzey deformasyonlarının değerlendirilmesinde NIJ 0101.06 standardına göre belirlenen maksimum 44 mm sınır dikkate alınmış, penetrasyon oluşup oluşmadığı, malzemenin katmanlar arası bütünlüğü ve darbe sonrası yapısal değişimleri analiz edilmiştir. Balistik testler için oluşturulan hedef konfigürasyonları Çizelge 3.12’de gösterilmiştir.

Hedef konfigürasyonları oluşturulurken sadece 1 nolu hedef, referans olması açısından 100 tabaka uhmwpe kumaştan meydana gelmiştir. Kullanılan mermi kalibrelerinin yüksek olması sebebiyle literatürde belirtildiği üzere diğer tüm tabakaların ön yüzünde mermi çekirdeğinin ucunu deforme etmek amacıyla (Akdoğan, 2018) sertliği yüksek olan titanyum plaka kullanılmıştır. Tabaka sıralaması çarpışma ön yüzünden başlayarak hazırlanmıştır. Çizelge 3.12’de tabaka isimlendirmesi için kullanılan ‘pe’ uhmwpe kumaşı, ‘ti’ titanyum levhayı, ‘pu’ poliüre tabakayı ve ‘bp’ ise alüminyum bal peteği levhayı temsil etmektedir.

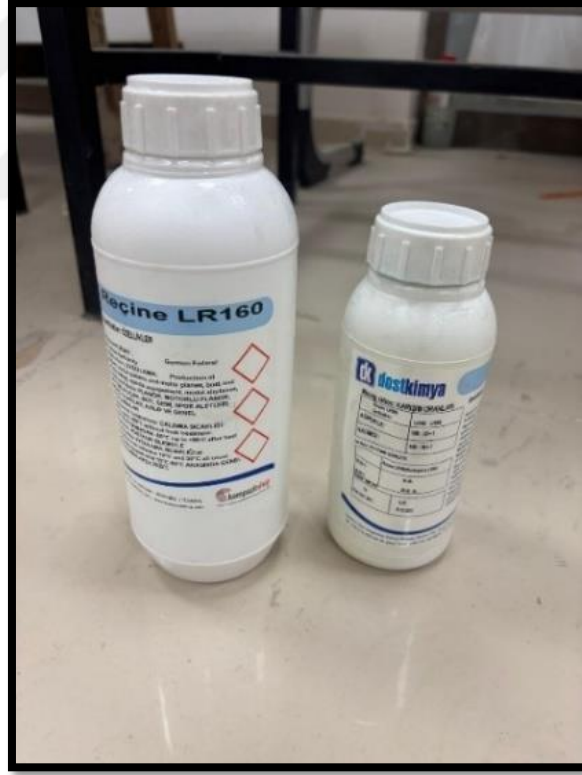
Çizelge 3.12 : Balistik testlerde kullanılan hedef kombinasyonları ve özellikleri

Hedef No	Tabaka Sıralaması	Ağırlık (g)	Kalınlık (mm)
1	100pe	400,5	22,0
2	ti+pu+60pe	792,5	21,2
3	ti+60pe+pu	793,0	21,2
4	ti+pu+100pe+pu	1032,5	35,0
5	ti+pu+100pe+ti	1205,5	33,0
6	ti+pu+100pe+pu (reçineli)	1165,0	36,0
7	ti+100pe+ti	1054,0	28,0
8	ti+bp+100pe+bp	1001,0	37,6
9	ti+bp+pu+100pe+pu+bp	1246,0	47,6
10	ti+pu+bp+pu+100pe+pu+bp+pu+ti	1814,5	60,6

Tüm hedef kombinasyonları 150x150 mm kare kesitli olarak üretilmiştir. Hedef kombinasyonları oluşturulurken tabakalar arasına 6 nolu numune hariç hiçbir matris malzemesi kullanılmamıştır. 6 nolu numunede ise 4 nolu numune ile kıyaslama yapabilmek için çift bileşenli MGS laminasyon epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Şekil 3.25’te gösterilen MGS

LR160/LH160 epoksi infüzyon reçine sistemi, Hexion firması tarafından geliştirilmiş, performansı uzun yıllar boyunca endüstriyel uygulamalarla kanıtlanmış ve German Federal Aviation Authority (LBA) tarafından sertifikalandırılmış bir ileri kompozit malzeme sistemidir. Bu reçine sistemi, özellikle sivil havacılık sektöründe kompozit parça üretiminde yaygın olarak kullanılmakta olup, aynı zamanda otomotiv, denizcilik (marin), uzay, rüzgâr türbini kanatları ve savunma sanayi gibi yüksek performans gerektiren alanlarda da tercih edilmektedir.

LR160/LH160 sistemi, düşük viskozite özelliği sayesinde özellikle büyük olmayan vakum infüzyon uygulamaları için uygundur. Oda sıcaklığında kürlenebilen bu sistem, uygulama sonrası gerçekleştirilecek post-kür işlemiyle birlikte, sivil havacılık standartlarına uygun mekanik ve termal özelliklere sahip nihai kompozit yapılar elde edilmesine olanak tanır. MGS laminasyon epoksi yapıştırıcıya ait teknik bilgiler Çizelge 3.13'te verilmiştir.



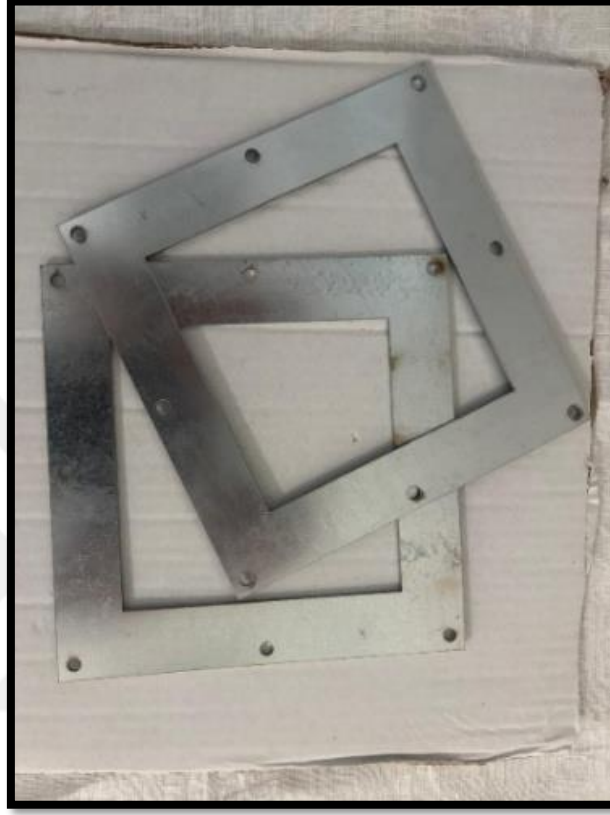
Şekil 3.25 : MGS laminasyon epoksi seti

Çizelge 3.13 : MGS laminasyon epoksi setine ait teknik özellikler

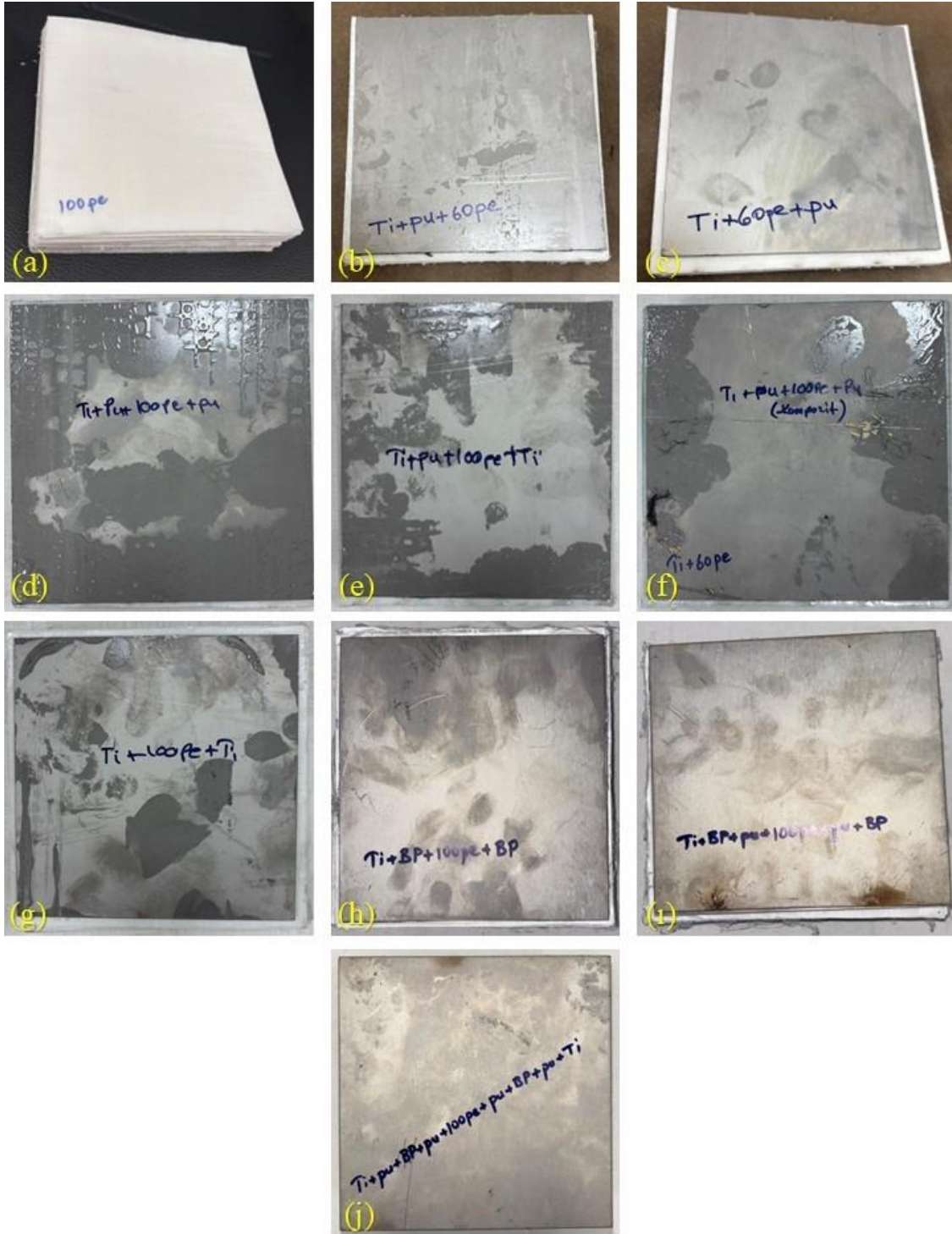
Kategori	Özellik	Değer
Genel Özellikler	Sertifika	German Federal Aviation
Genel Özellikler	Uygulama Alanı	Planör, motorlu planör, motorlu uçak, bot, gemi, spor aletleri, model uçaklar, kalıp ve genel uygulamalar
Genel Özellikler	Çalışma Sıcaklığı (Isıl işlem yok)	-60 °C / +50 °C
Genel Özellikler	Çalışma Sıcaklığı (Isıl işlemli)	-60 °C / +80 °C
Genel Özellikler	Proses Sıcaklığı	+10 °C / +50 °C
Genel Özellikler	Çalışma Süresi	45 dakika
Genel Özellikler	Depolama Süresi	Açılmamış ambalajda 24 ay
L160 Reçine Teknik Özellikleri	Yoğunluk (g/cm ³)	1.13 – 1.17
L160 Reçine Teknik Özellikleri	Viskozite (mPas)	700 – 900
H160 Sertleştirici Teknik Özellikleri	Yoğunluk (g/cm ³)	0.96 – 1.00
H160 Sertleştirici Teknik Özellikleri	Yoğunluk (g/cm ³)	0.94 – 0.97
H160 Sertleştirici Teknik Özellikleri	Yoğunluk (g/cm ³)	0.93 – 0.97
H160 Sertleştirici Teknik Özellikleri	Viskozite (mPas)	10 – 50
H160 Sertleştirici Teknik Özellikleri	Viskozite (mPas)	10 – 60
H160 Sertleştirici Teknik Özellikleri	Viskozite (mPas)	80 – 100
Karışım Oranları	Karışım Oranları	Ağırlıkça: 100:25/28/36 ±2 Hacimce: 100:30/34/43 ±2

150x150 mm ebatlarında hazırlanan hedef konfigürasyonlarını birbirine tutturmak ve kenarlarından sabitleyebilmek adına Şekil 3.26'da görüldüğü üzere bir metal çerçeve ve cıvata sistemi geliştirilmiş olup, imalatı Öz Kalite Mak. Yedek Parça İml. İnş. Had. Nak. Gıda İth. Ltd. Şti. tarafından gerçekleştirilmiştir. 3 mm kalınlığındaki sacdan imal edilen çerçeve 2 parçadan oluşmaktadır. Hedef numunenin önüne ve arkasına yerleştirilen çerçeve köşelerinden cıvata ile sıkılarak atış sırasında kenar yüzeylerden sabit kalabilmesi sağlanmıştır.

10 farklı konfigürasyonda üretilen hedef numuneler Şekil 3.27’de gösterilmektedir. Tüm hedef numuneler dağılmaması için streç film ile kaplanmıştır.



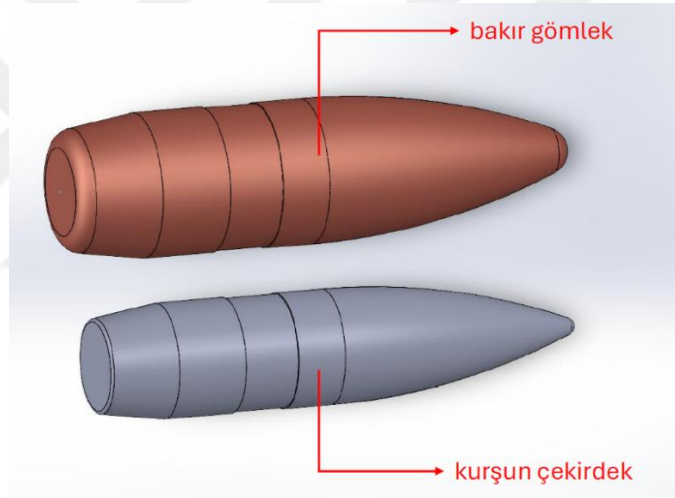
Şekil 3.26 : Çerçeve sistemi



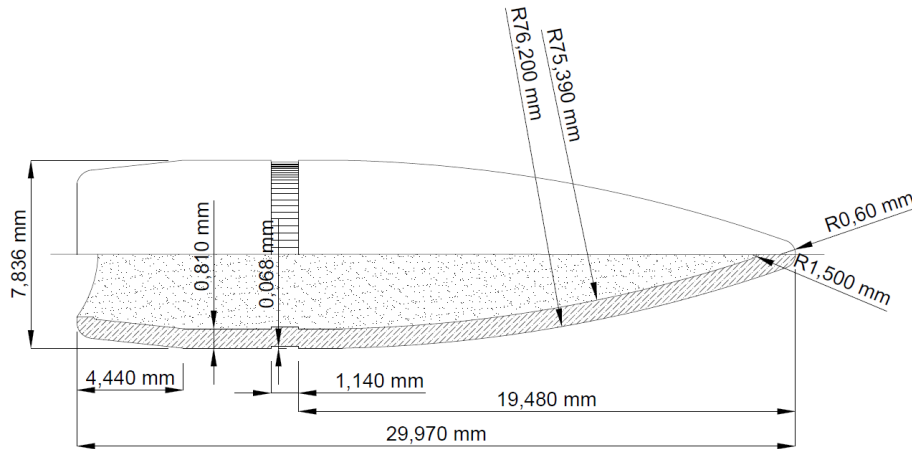
Şekil 3.27 : Hedef numuneler (a)100pe, (b)ti+pu+60pe, (c)ti+60pe+pu, (d)ti+pu+100pe+pu, (e)ti+pu+100pe+ti, (f)ti+pu+100pe+pu(reçineli), (g)ti+100pe+ti, (h)ti+bp+100pe+bp, (i)ti+bp+pu+100pe+bp, (j)ti+pu+bp+pu+100pe+pu+bp+pu+ti

3.7 Sonlu Eleman Modelli Analizler

Sonlu elemanlar analizi (FEA), kumaşların geometrik ve malzeme parametrelerinde değişiklik yapmamızı sağlar. Böylelikle simülasyon sonuçları, deneysel sonuçları doğrulamak için kullanılabilir. Deneysel test sonuçlarının doğrulanması adına bazı hedef numunelerin sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizlere başlamadan önce, ilk olarak 7,62x51 mm kalibreli FMJ merminin Solidworks yardımıyla 3 boyutlu modeli hazırlanmıştır. İlk olarak Şekil 3.28’de görüldüğü üzere kurşun çekirdek modellenmiş, sonrasında çekirdeğin üzerini örten bakır gömlek hazırlanmıştır. Son olarak Solidworks programı içerisinde bulunan montajlama yöntemiyle iki model tek parça haline getirilmiştir. Tüm çizimler yapılırken kullanılan ölçüler, Şekil 3.29’daki teknik resimden faydalanılarak girilmiştir.

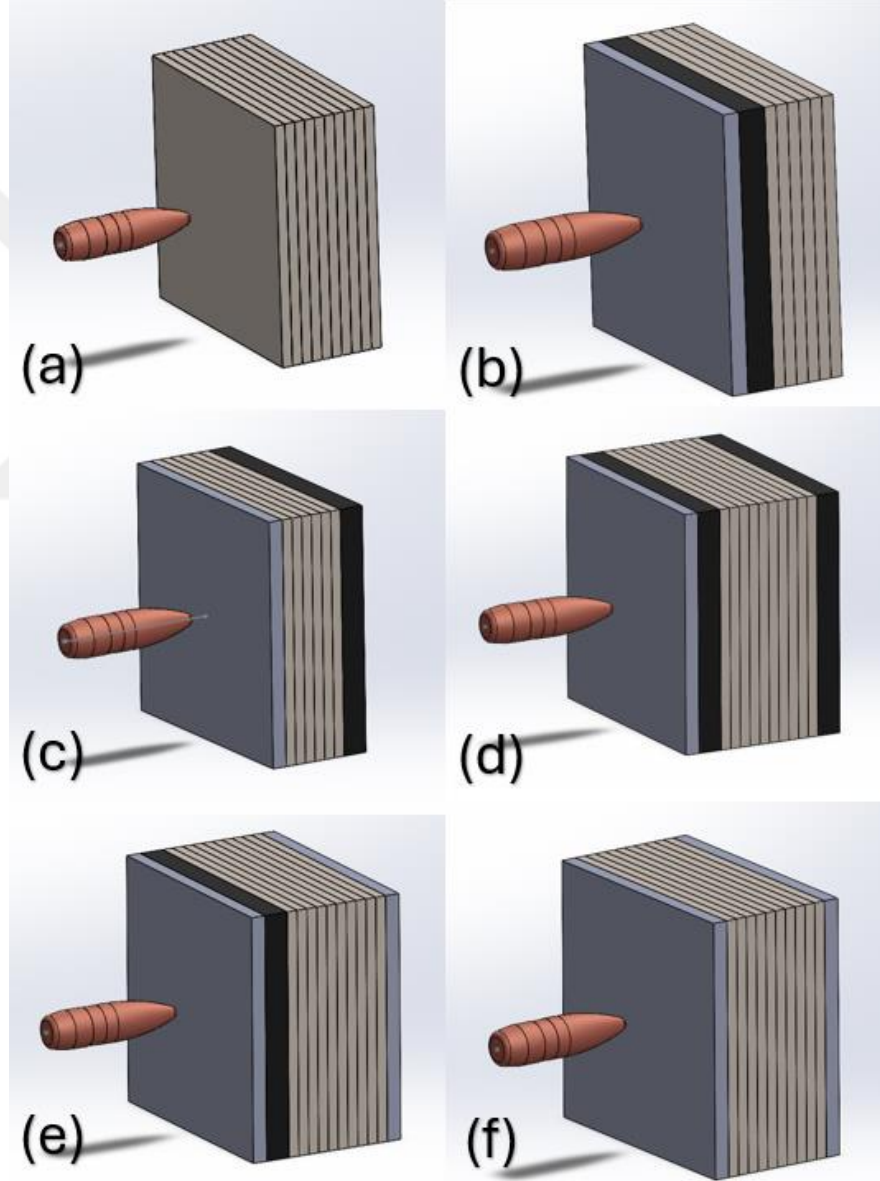


Şekil 3.28 : 7,62x51 mm FMJ mermi 3 boyutlu modeli



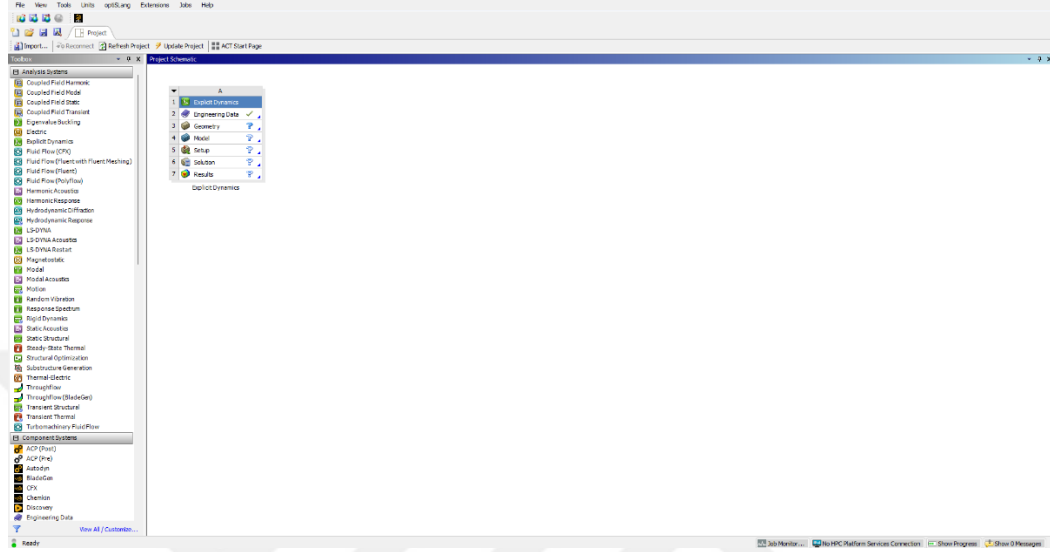
Şekil 3.29 : 7,62x51 mm FMJ mermi teknik resim

Sayısal testlerde ikinci aşama olarak merminin çarpacağı hedef numunelerin 3 boyutlu modellemeleri hazırlanmıştır. Analiz süresinin uzamaması için hedef modeller 50x50 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Sonrasında Solidworks programı içerisinde yer alan montaj bölümü sayesinde, tüm hedef modelleri mermi modeli ile birleştirilmiştir. Deneysel testler ile kıyaslama yapabilmek adına Şekil 3.30'da gösterildiği gibi 1, 2, 3, 4, 5 ve 7 nolu hedef numunelerin modelleri hazırlanmıştır.



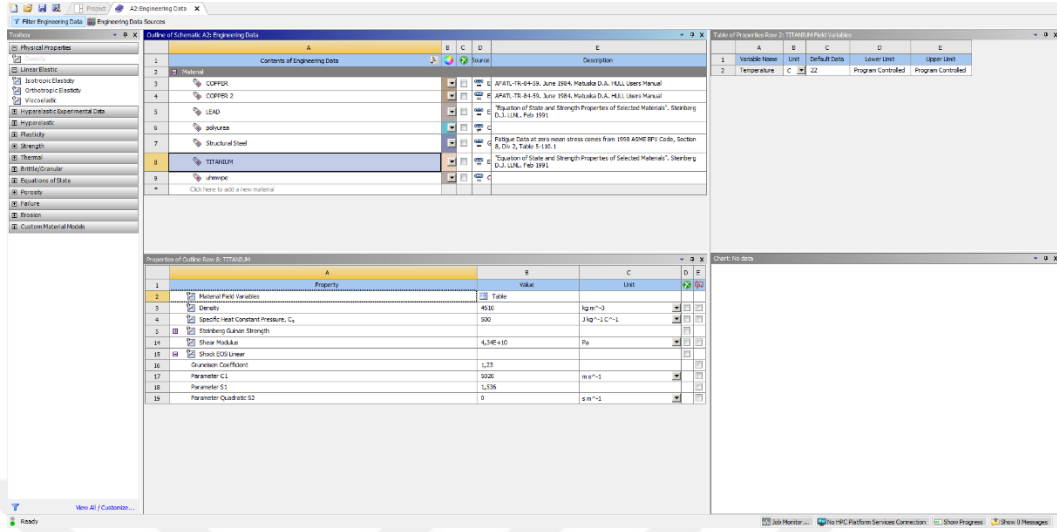
Şekil 3.30 : Hedef numunelere ait solidworks modelleri (a)100pe, (b)ti+pu+60pe, (c)ti+60pe+pu, (d)ti+pu+100pe+pu, (e)ti+pu+100pe+ti, (f)ti+100pe+ti

Sayısal analizleri gerçekleştirebilmek için Şekil 3.31’de gösterildiği üzere Ansys Workbench programına ait Explicit Dynamics modülü kullanılmıştır.



Şekil 3.31 : Ansys Workbench programı arayüzü

Solidworks programı aracılığıyla hazırlanan 3 boyutlu modeller Ansys Workbench programının Explicit Dynamic modülüne aktarılarak analize hazır hale getirilmiştir. Daha sonra hedef numunelerde bulunan malzeme tipleri olan uhmwpe kumaş, titanyum ve poliüre atamaları gerçekleştirilmiştir. Titanyum malzemesi, Şekil 3.32’de görüldüğü üzere Ansys Workbench’e ait Explicit Dynamics modülünde yer alan ‘Engineering Data’ sekmesindeki malzeme kütüphanesinden seçilmiştir. Program içerisinde yer alan titanyum plakaya ait malzeme modeli ve değerleri Çizelge 3.14’te gösterilmiştir. Poliüre ve uhmwpe kumaş ise standart çekme ve kayma deneylerinden elde edilen veriler ışığında yeni malzeme tanımlaması ile atanmıştır.



Şekil 3.32 : Engineering Data arayüzü

Çizelge 3.14 : Ti6Al4V malzeme modeline ait özellikler

Özellik	Değer	Birim
Özgül ısı sabit basınç (C)	525	J/kg.C
Başlangıç akma gerilmesi (Y)	1,33E+09	Pa
Maksimum akma gerilmesi (Y _{max})	2,12E+09	Pa
Sertleşme sabiti (B)	12	
Sertleşme üssü (n)	0,1	
Erime sıcaklığı	1836,9	°C
Kayma modülü	4,19E+10	Pa
Gruneisen katsayısı	1,23	
Parametre (C1)	5130	m/s
Parametre (S1)	1,028	
Parametre (S2)	0	s/m

7,62x51 mm FMJ mermiye ait kurşun dolgu malzeme modeli ve bu modele ait değerler Çizelge 3.15'te, bakır ceket malzeme modeli ve değerleri ise Çizelge 3.16'da gösterilmektedir.

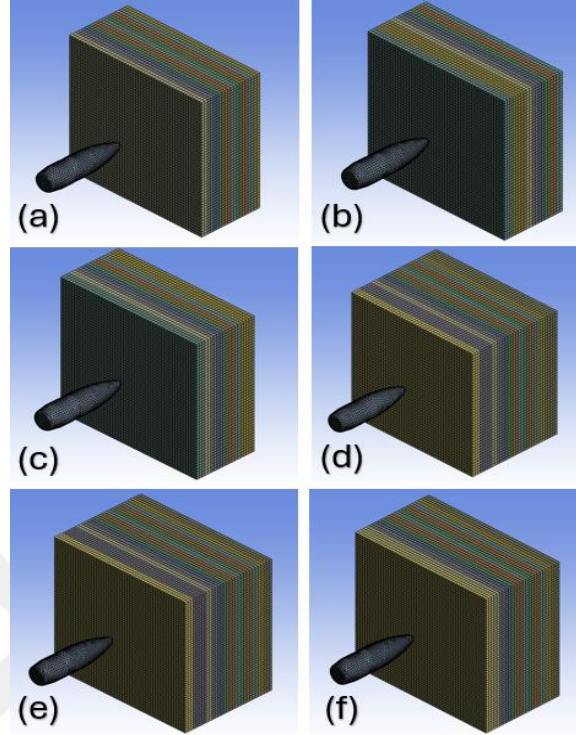
Çizelge 3.15 : Kurşun dolgu malzeme modeline ait özellikler

Özellik	Değer	Birim
Özgül ısı sabit basınç (C)	124	J/kg.C
Başlangıç akma gerilmesi (Y)	8E+06	Pa
Maksimum akma gerilmesi (Y _{max})	1E+08	Pa
Sertleşme sabiti (B)	110	
Sertleşme üssü (n)	0,52	
Erime sıcaklığı	486,85	°C
Kayma modülü	8,6E+09	Pa
Gruneisen katsayısı	2,74	
Parametre (C1)	2006	m/s
Parametre (S1)	1,429	
Parametre (S2)	0	s/m

Çizelge 3.16 : Bakır ceket malzeme modeline ait özellikler

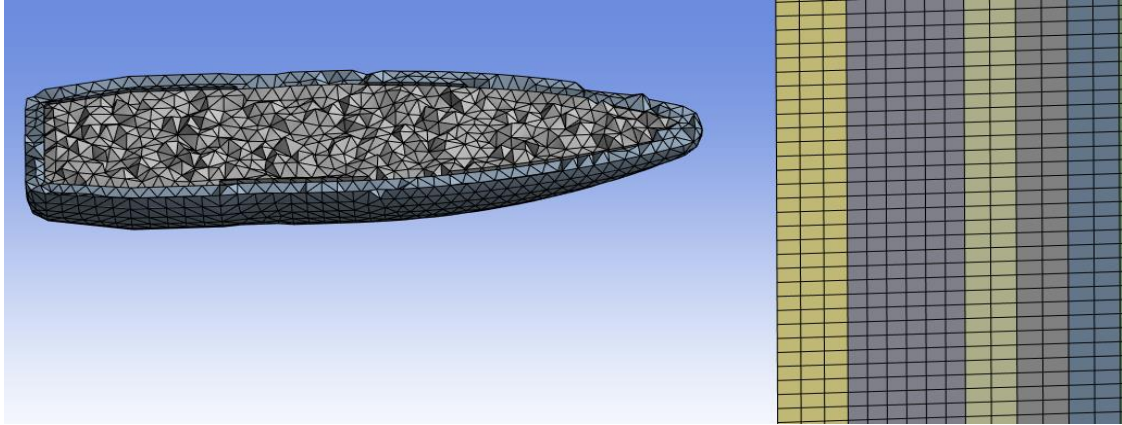
Özellik	Değer	Birim
Özgül ısı sabit basınç (C)	1E-12	J/kg.C
Kayma modülü	4,64E+10	Pa
Gruneisen katsayısı	2	
Parametre (C1)	3958	m/s
Parametre (S1)	1,497	
Parametre (S2)	0	s/m

Workbench programına aktarılan 6 adet modelin sonlu elemanlara bölünmesi işlemi ‘mesh’ sekmesi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Düğüm noktası (node) sayısının düşürülmesi ve analiz süresinin kısaltılması adına 50x50mm olarak modellenen hedef numunelerin mesh boyutları 1 mm olarak belirlenmiştir. Mesh işlemi tamamlanan 6 adet hedef modeli Şekil 3.33’te gösterilmiştir.



Şekil 3.33 : Hedef numunelere ait mesh işlemi (a)100pe, (b)ti+pu+60pe, (c)ti+60pe+pu, (d)ti+pu+100pe+pu, (e)ti+pu+100pe+ti, (f)ti+100pe+ti

Analizin sağlıklı yürütülmesi açısından katı modeller sonlu elemanlara bölünürken Şekil.3.34'te görüldüğü gibi mermi çekirdeği için 'tetrahedral', hedef modeller için 'hex dominant' mesh modeli kullanılmıştır (Garcia-Avila et al., 2015).



Şekil 3.34 : Mermi ve hedef malzeme mesh tipi

Mermi modellerine deneysel çalışmalarla benzer şekilde hız değerleri girilerek çarpışma gerçekleşmesi sağlanmıştır. Ayrıca 'fixed support' yöntemiyle tüm hedef malzemeler 4 kenarı

ankastre mesnet olarak sabitlenmiştir. Analizin doğru şekilde yürütülmesi için ‘Analysis Settings’ bölümüne ait değerler Çizelge 3.17’de gösterildiği şekilde girilmiştir.

Çizelge 3.17 : Analiz parametreleri

Parametre	Değer
Bitiş zamanı	0,0002 s
Maksimum döngü sayısı	1e+07
Maksimum enerji hatası	1,e+006
Minimum zaman adımı	1,e-020 s
Zaman adımı güvenlik faktörü	0,9

3.8 FEM Analizlerinde Johnson-Cook Kırılma Modeli

Mermi ve Ti6Al4V plakanın yapısal tepkisini incelemek için Johnson-Cook (JC) kırılma modeli kullanılmıştır. Johnson-Cook kırılma modeli, metal malzemelerin yüksek hızlı deformasyon, darbe ve balistik yüklemeler altında nasıl kırıldığını tahmin etmek için kullanılan yarı-ampirik bir hasar modelidir (Guo et al., 2021). Özellikle metal şekillendirme, balistik çarpışmalar ve çarpma simülasyonları gibi uygulamalarda sonlu elemanlar analizlerinde (FEM) yaygın olarak kullanılır.

Johnson-Cook kırılma modeli, kırılma modeli aşağıdaki denklemle tanımlar;

$$\sigma_y = [A + B(\epsilon_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{t-t_0}{t_m-t_0} \right)^m \right] \quad (3.1)$$

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_p^f} \quad (3.2)$$

Burada;

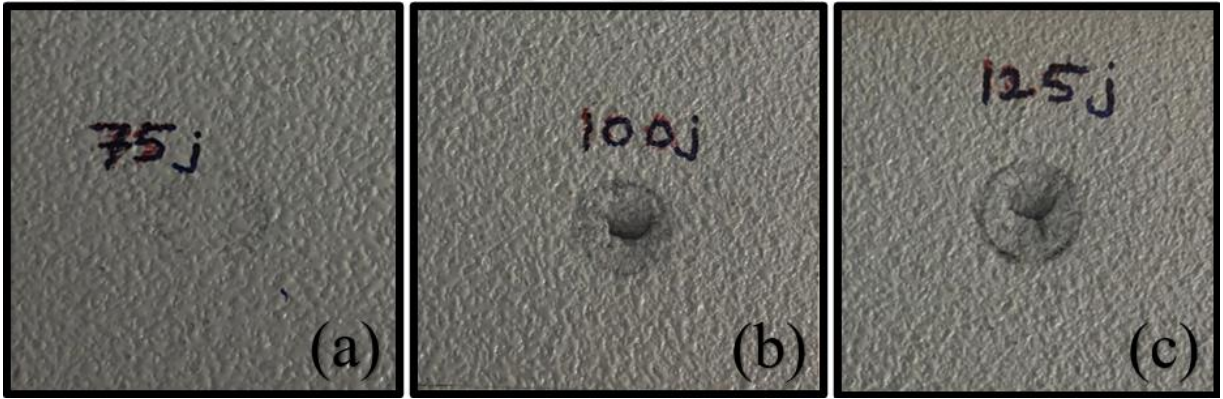
$$\epsilon_p^f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma} \right) \right] \left[1 + D_4 l^4 n \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{t-t_0}{t_m-t_0} \right) \right] \quad (3.3)$$

Denklem 3.1’de ifade edilen A statik akma dayanımını, B gerinim sertleşme katsayısını, C gerinim oranı katsayısını, $\dot{\epsilon}_0$ referans gerinim oranını, t_0 referans sıcaklığı, m termal yumuşama üssü, n gerilme sertleştirme üssü ve t_m erime sıcaklığını temsil etmektedir. Denklem 3.3’de ifade edilen D_1, D_2, D_3, D_4 ve D_5 ise hasar sabitleridir (Liu et al., 2015) (Khan et al., 2020).

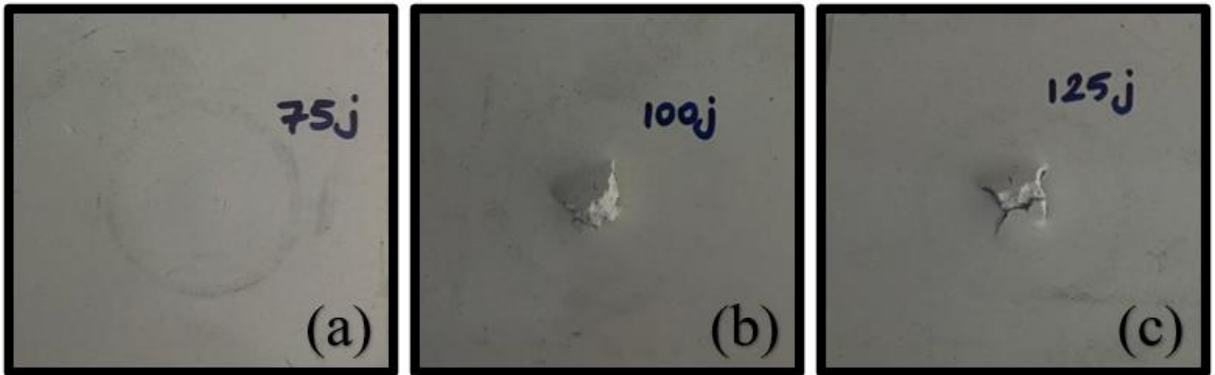
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Darbe Test Sonuçları

Mapei firmasının ticari ürünü olan Purtop 1000 poliüre tabaka 5 mm sabit kalınlığa sahip olup, bu ürün için 3 farklı enerjide darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Darbe testi sonrası Purtop 1000 poliüreye ait ön yüzde meydana gelen hasar Şekil 4.1’de, arka yüzde meydana gelen hasar ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir. 75 j ile yapılan testlerde tabakada sadece elastik bölge sınırında çöküntü oluşmuştur. 100 j ve 125 j ile yapılan testlerde ise poliüre tabakada delinme gerçekleşerek kalıcı hasar gözlemlenmiştir.



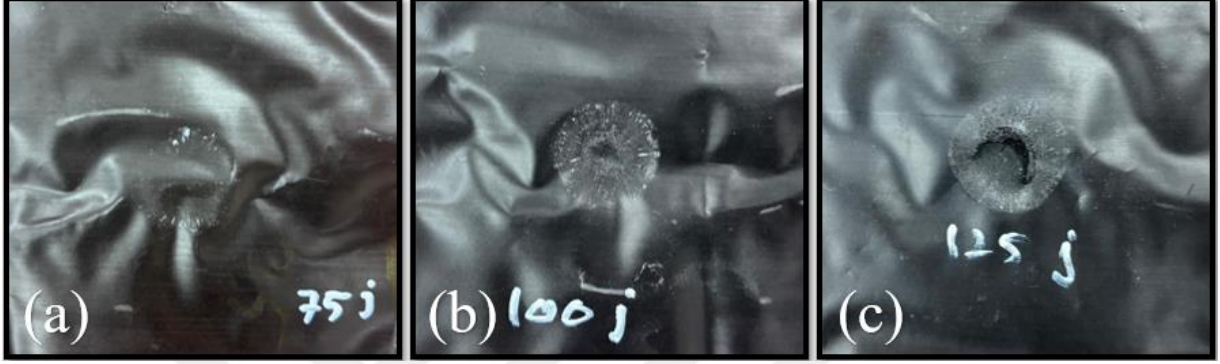
Şekil 4.1 : Purtop 1000 poliüre tabaka darbe testi ön yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 125j



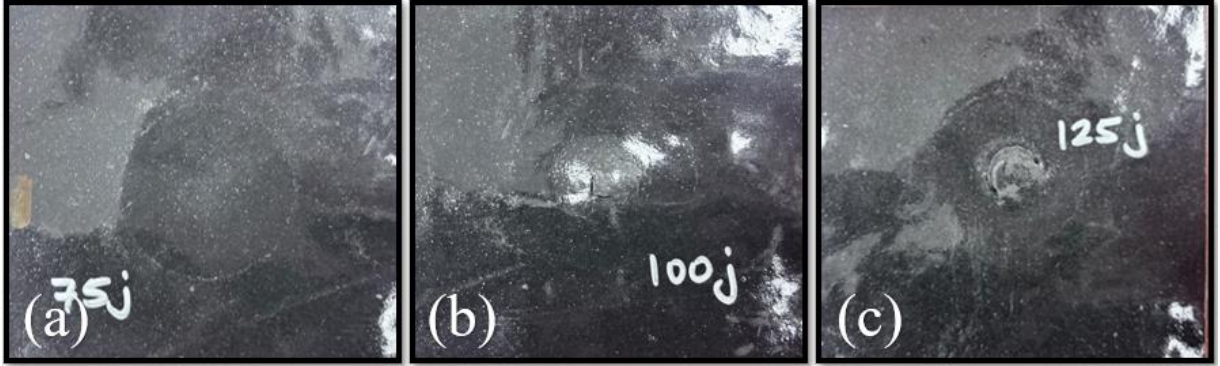
Şekil 4.2 : Purtop 1000 poliüre tabaka darbe testi arka yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 125j

5 mm kalınlığa sahip Line-x XS-100 poliüre tabakası 90x90 mm boyutlarında kesilerek darbe testine tabi tutulmuştur. Her numune 75 j, 100 j ve 125 j olmak üzere 3 farklı enerji ile test edilmiştir. Darbe testi sonrasında Line-x XS-100 poliüre tabakanın ön yüzünde oluşan hasar durumu Şekil 4.3’te, arka yüzünde oluşan hasar durumu ise Şekil 4.4’te gösterilmiştir. Tıpkı

Purtop 1000 poliüre tabakada olduğu gibi 75 j enerji testinde numunede herhangi bir plastik deformasyon görülmemiştir. 100 j enerji testinde ise numune arka yüzünde kılcal çatlak oluşmuş ancak Purtop 1000 poliüre tabakaya göre daha az plastik deformasyon gözlenmiştir. 125 j enerji testinde ise numune tamamen delinmiştir.

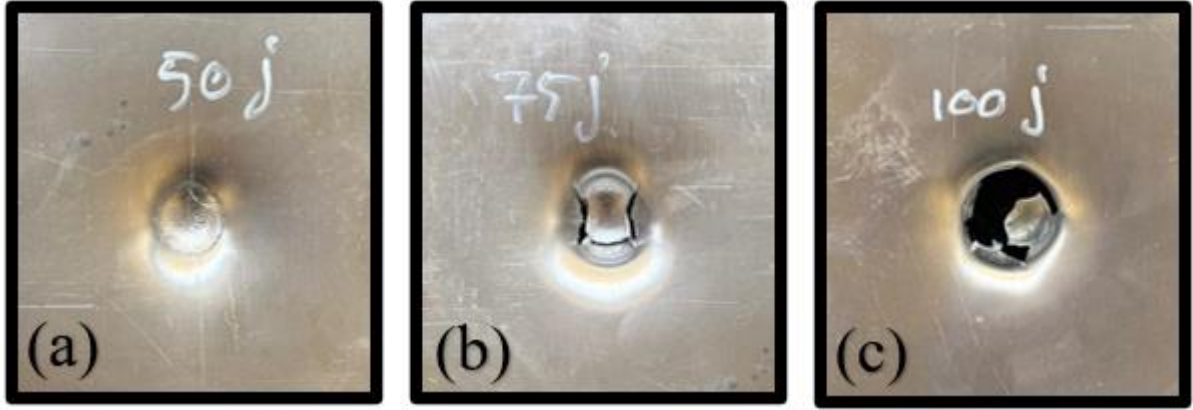


Şekil 4.3 : Line-x XS-100 poliüre tabaka darbe testi ön yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 125j

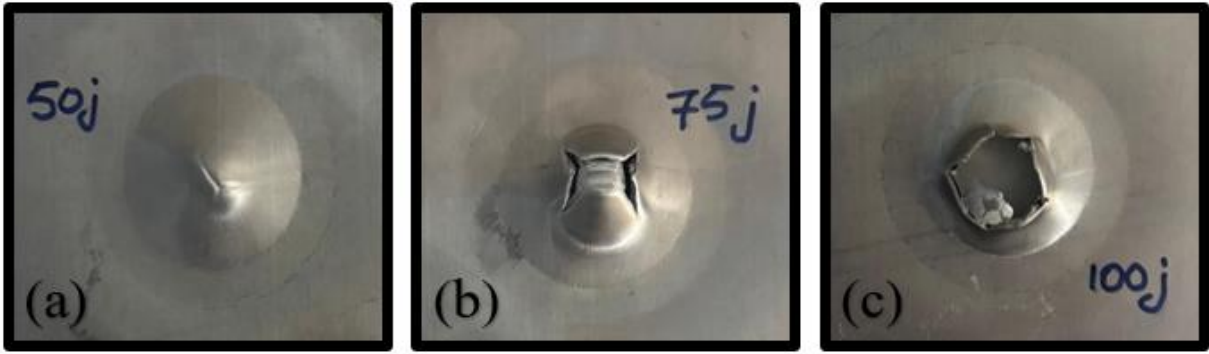


Şekil 4.4 : Line-x XS-100 poliüre tabaka darbe testi arka yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 125j

6,3 mm kalınlığa sahip alüminyum bal peteği plakası ile 3 farklı enerjiye sahip darbe testleri gerçekleştirilmiştir. 50 j, 75 j ve 100 j olarak farklı enerji seviyelerinde gerçekleştirilen darbe testleri sonrası alüminyum bal peteği levhanın ön yüzünde oluşan hasar durumu Şekil 4.5'te, arka yüzünde oluşan hasar durumu ise Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Tüm enerji seviyelerinde yapılan testler sonucunda tüm numunelerde plastik deformasyonlar oluşmuştur. Özellikle 50 j seviyesinde ön yüzde sadece çöküntü oluşurken, arka yüzde kılcal çatlaklar oluşmuştur. 75 j seviyesine gelindiğinde ise hem ön yüzde hem de arka yüzde belirgin şekilde çatlaklar gözlenmiştir. Son olarak 100 j seviyesinde yapılan testlere ait numunelerde tam delinme görülmüştür.

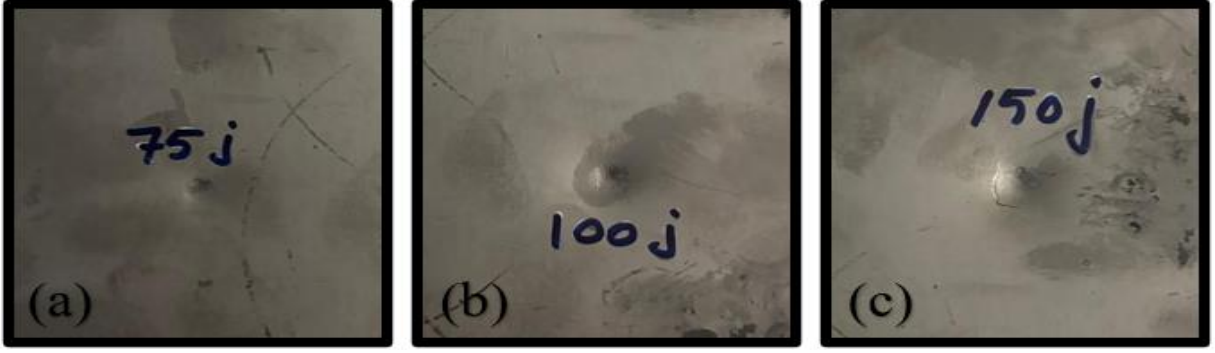


Şekil 4.5 : Alüminyum bal peteği darbe testi ön yüz hasarı (a) 50j, (b) 75j, (c) 100j

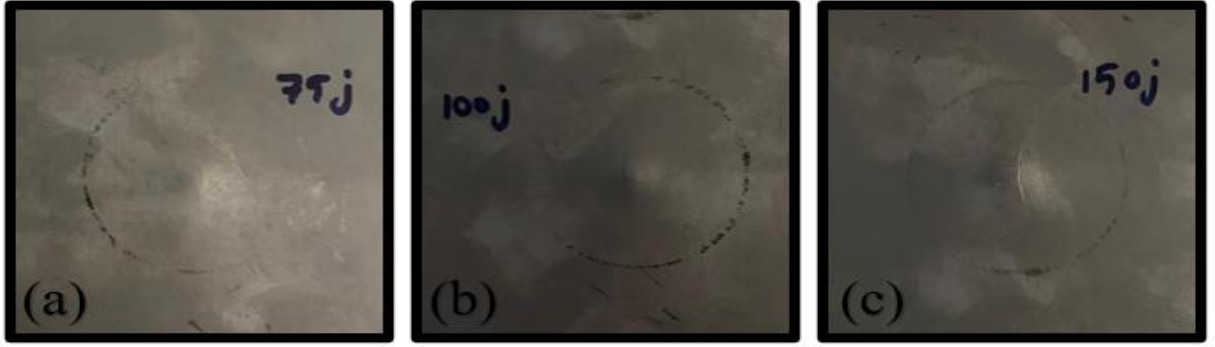


Şekil 4.6 : Alüminyum bal peteği darbe testi arka yüz hasarı (a) 50j, (b) 75j, (c) 100j

3 mm kalınlığa sahip titanyum GR5 ASTM B265 (Ti6Al4V) levha darbe testine tabi tutulmuştur. 75 j, 100 j ve 150 j olmak üzere 3 farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilen darbe testleri sonucunda titanyum levhaya ait ön yüzde oluşan hasar durumu Şekil 4.7’de, arka yüzde oluşan hasar durumu ise Şekil 4.8’de gösterilmiştir. 75 j enerji seviyesinde yapılan deneylerde levha ön ve arka yüzünde hiçbir çatlak gözlenmemiş olup, hasar elastik deformasyon bölgesinde kalmıştır. 100 j seviyesine çıkıldığında ise levha ön yüzünde sadece çökme oluşurken, arka yüzünde ise çok ince kılcal çatlak gözlenmiştir. 150 j seviyesinde ise levha ön yüzünde hem çökme hem de kılcal çatlak görülmüştür. Numune arka yüzünde ise belirgin çatlaklar gözlenmiştir.

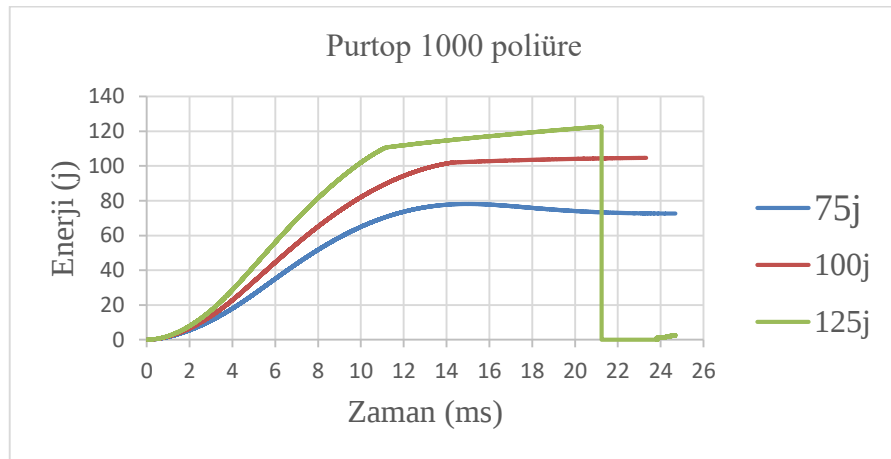


Şekil 4.7 : Titanyum levha darbe testi ön yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 150j

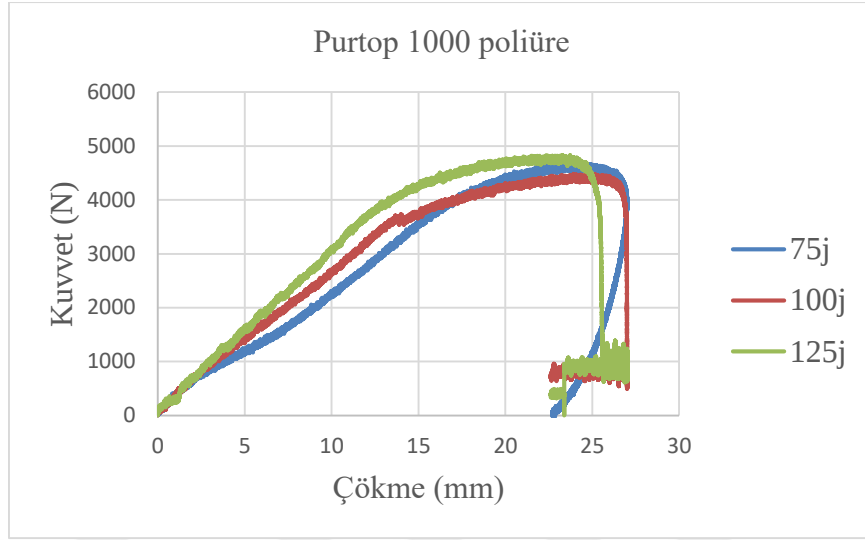


Şekil 4.8 : Titanyum levha darbe testi arka yüz hasarı (a) 75j, (b) 100j, (c) 150j

Purtop 1000 poliüre tabakaya ait 75j, 100j ve 125j olan 3 farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilen darbe testi enerji-zaman ve kuvvet-çökme grafikleri Şekil 4.9-4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.9 : Purtop 1000 poliüre tabaka enerji-zaman grafiği

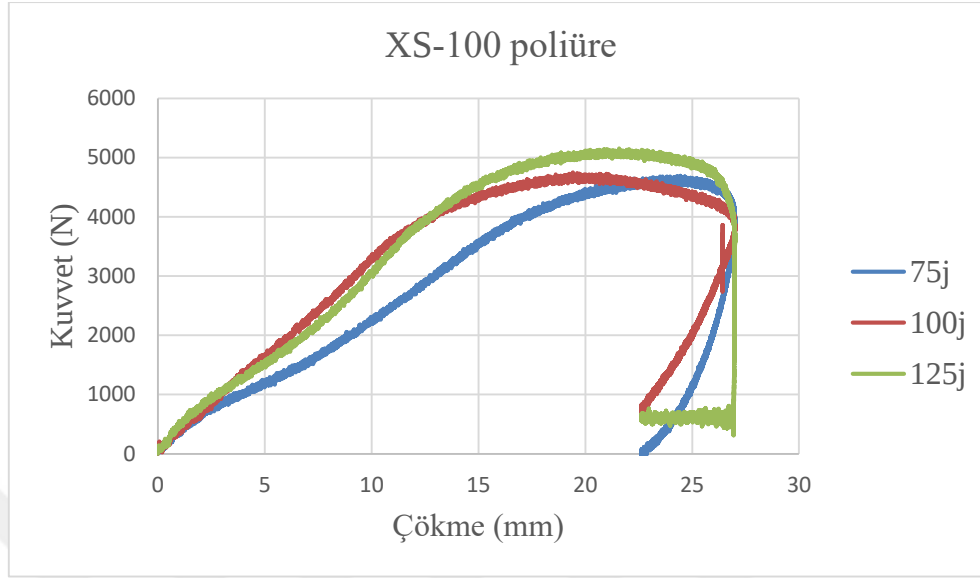


Şekil 4.10 : Purtop 1000 poliüre tabaka kuvvet-çökme grafiği

Line-x XS-100 poliüre tabakaya ait 75j, 100j ve 125j olan 3 farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilen darbe testi enerji-zaman ve kuvvet-çökme grafikleri Şekil 4.11-4.12'de verilmiştir.

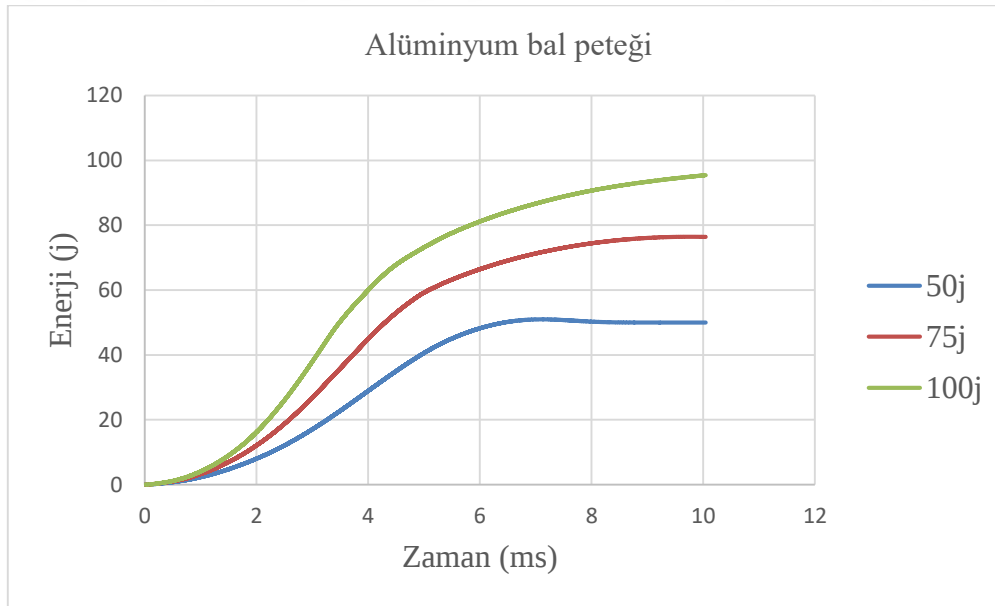


Şekil 4.11 : Line-x XS-100 poliüre tabaka enerji-zaman grafiği

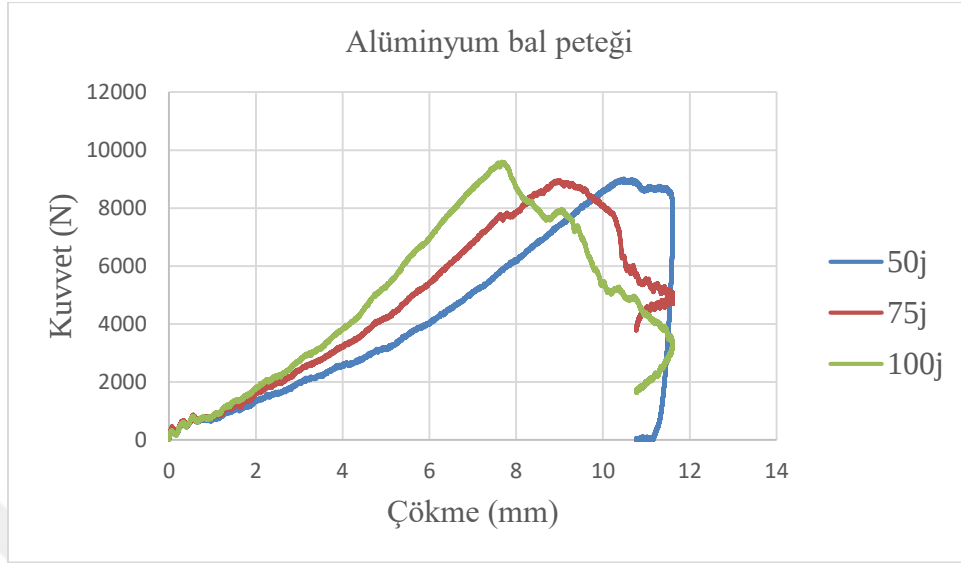


Şekil 4.12 : Line-x XS-100 poliüre tabaka kuvvet-çökme grafiği

Alüminyum bal peteği tabakaya ait 50j, 75j ve 100j olan 3 farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilen darbe testi enerji-zaman ve kuvvet-çökme grafikleri Şekil 4.13-4.14'te verilmiştir.

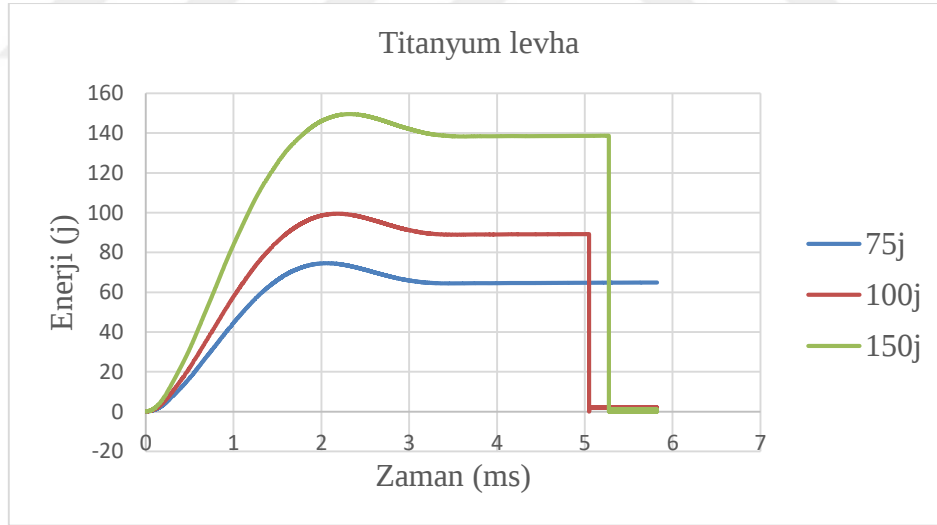


Şekil 4.13 : Alüminyum bal peteği enerji-zaman grafiği

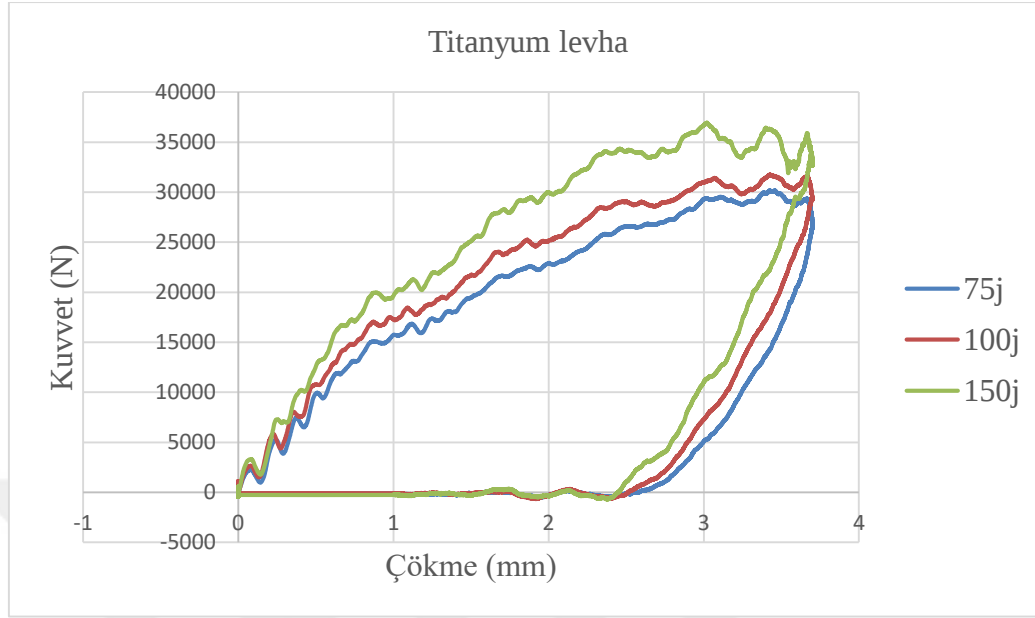


Şekil 4.14 : Alüminyum bal peteği kuvvet-çökme grafiği

Titanyum levhaya ait 75j, 100j ve 150j olan 3 farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilen darbe testi enerji-zaman ve kuvvet-çökme grafikleri Şekil 4.15-4.16'da verilmiştir.



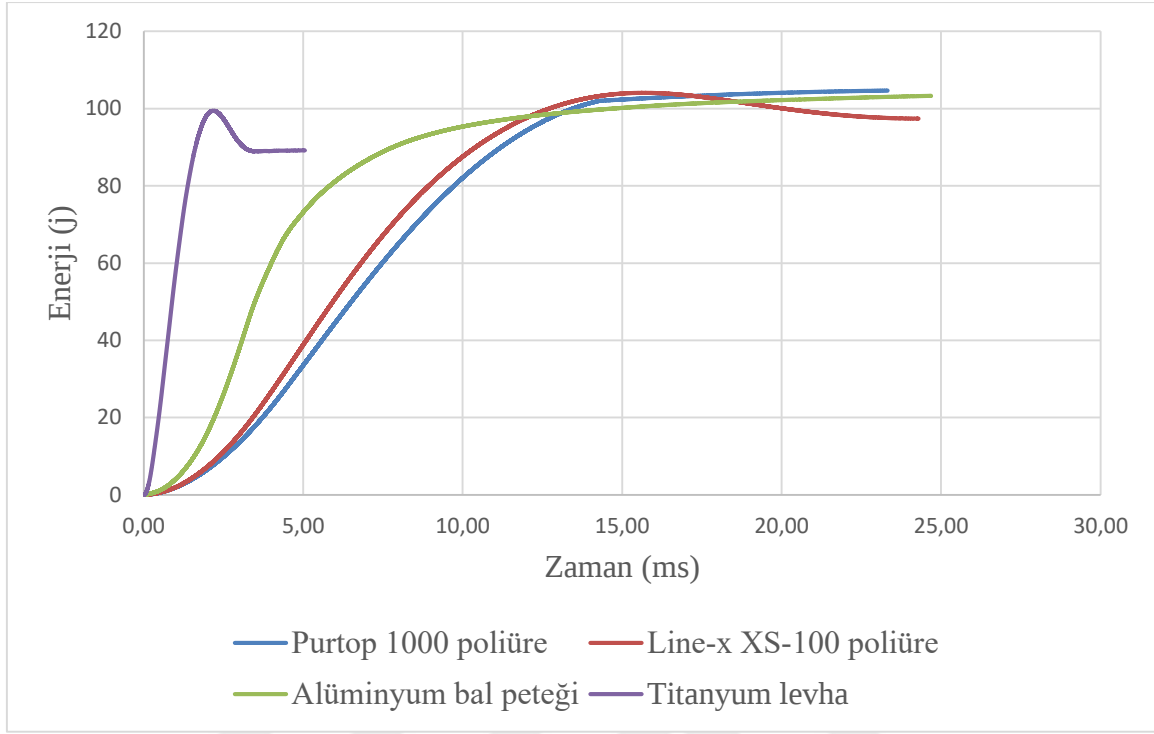
Şekil 4.15 : Titanyum levha enerji-zaman grafiği



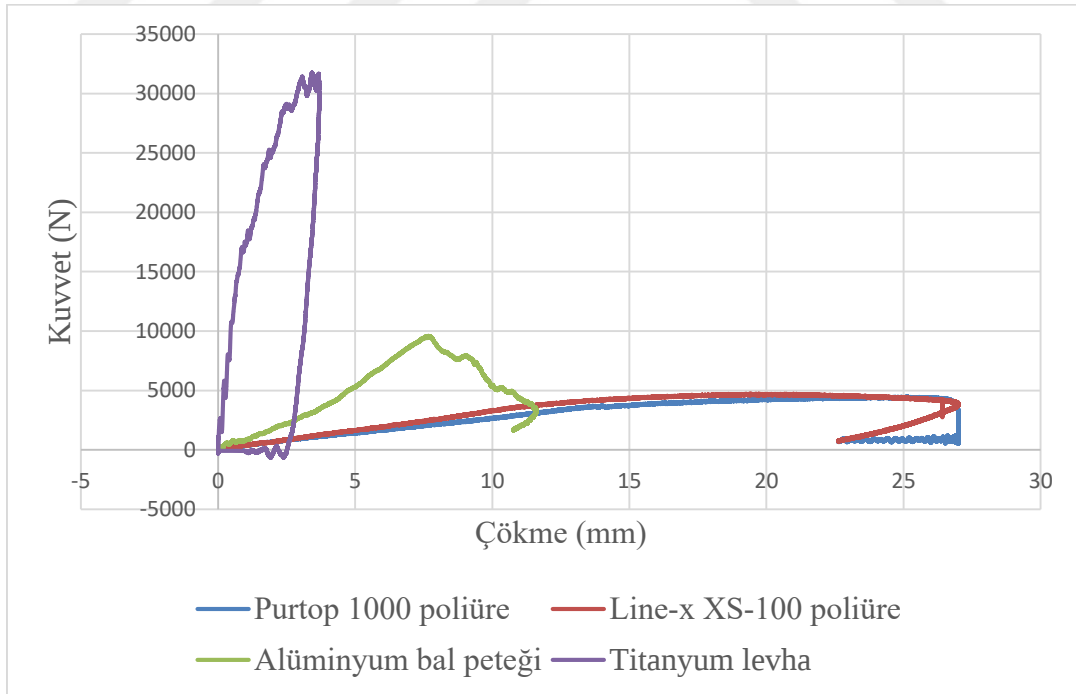
Şekil 4.16 : Titanyum levha kuvvet-çökme grafiği

Purtop 1000 poliüre, Line-x XS-100 poliüre, alüminyum bal peteği ve titanyum levhaya ait 100j enerji altında gerçekleşen enerji-zaman grafiği Şekil 4.17’de, kuvvet-çökme grafiği ise Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Şekil 4.17’de görüldüğü gibi aynı enerji seviyesinde gerçekleştirilen testlerde en yüksek enerji emme kapasitesi Line-x XS-100 poliürede, en düşük enerji emme kapasitesi ise titanyum levhadadır. İkinci en yüksek enerji kapasitesine sahip malzeme Purtop 1000 poliüredir. Bal peteği ise üçüncü sırada yer almaktadır. Bal peteği ile titanyum levhanın enerji yutma miktarları neredeyse birbirine eşittir.

Şekil 4.18’de görüldüğü üzere aynı çöküntü değerinde en yüksek kuvvet kapasitesi titanyum levhaya aittir. İkinci en yüksek kuvvet kapasitesine ise alüminyum bal peteği sahiptir. Purtop 1000 poliüre ile Line-x XS-100 poliüre birbirine çok yakın sonuçlar gösterse de, Line-x XS-100 poliüre küçük bir farkla daha yüksek kuvvet kapasitesine sahiptir.



Şekil 4.17 : 100j altındaki enerji-zaman grafiği



Şekil 4.18 : 100j altındaki kuvvet-çökme grafiği

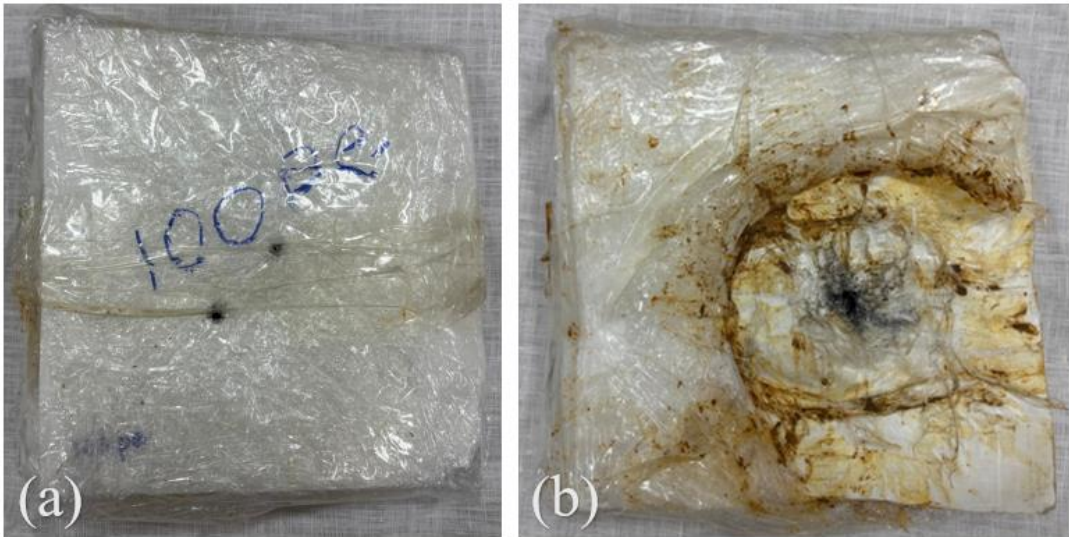
4.2 Balistik Test Sonuçları

İlk olarak 100 adet uhmwpe kumaştan oluşan hedef numune 7,62x51 mm kalibreli FMJ M80 tipi mermi ile test edilmiştir. Merminin hedefe çarpma hızı 896 m/s'dir. Hedef numune görüntüsü ve hedefin macun ile birlikte test alanına yerleşimi Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 : uhmwpe kumaş (a) 100 tabaka hedef, (b) hedef ve macun yerleşimi

Yapılan test sonrasında 100 tabaka uhmwpe kumaştan oluşan hedef numune tamamen delinmiştir. Test sonrası numune ön yüzünde ve arka yüzünde oluşan hasar durumu Şekil 4.20'de gösterilmiştir.

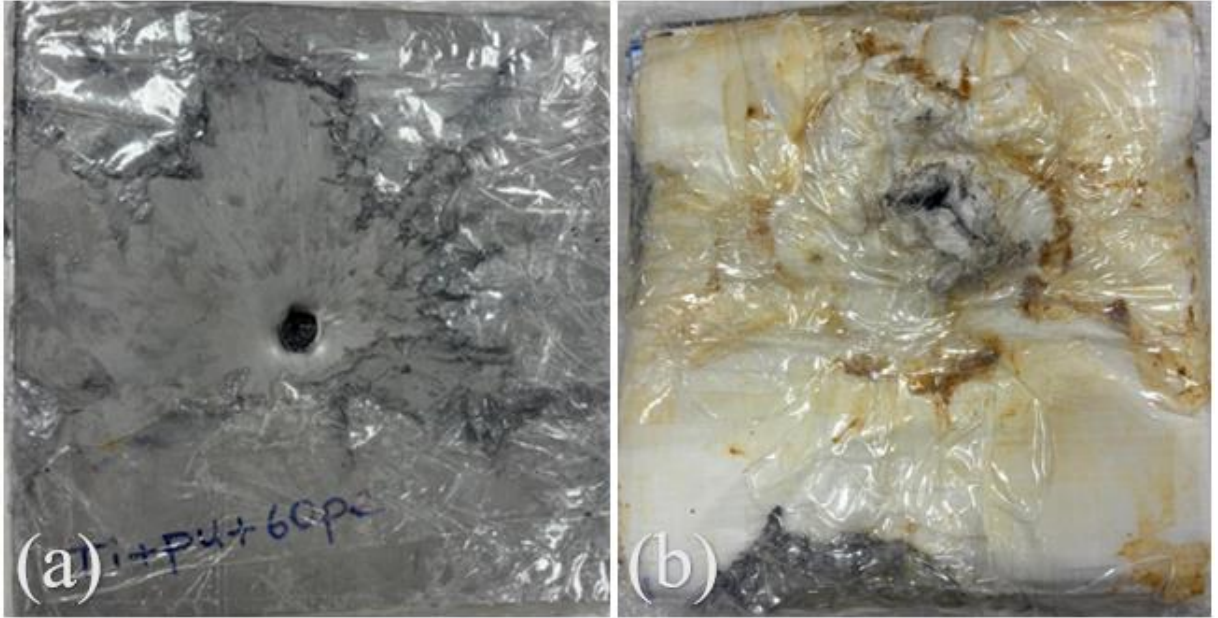


Şekil 4.20 : 100pe hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz

2 nolu hedef numune ön çarpma yüzeyinde 1 tabaka titanyum, arkasında 1 tabaka Line-x XS-100 poliüre tabaka ve 60 tabaka uhmwpe kumaş biraraya getirilerek hazırlanmıştır. Bu hedef numuneye ait görsel Şekil 4.21’de gösterilmiştir. ti+pu+60pe hedefi 7,62x51 mm kalibreli FMJ (Full Metal Jacket) mermi ile test edilmiştir. Atışlar, Avusturya’da üretilen Styer SSG 08 isimli uzun namlulu tüfek ile yapılmıştır. Merminin hedefe çarpma hızı 893 m/s’dir. Test sonucunda hedef numune mermi çekirdeğini durduramamış ve başarısız olmuştur. Tamamen delinen hedefe ait ön yüz ve arka yüzde oluşan hasar durumu Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

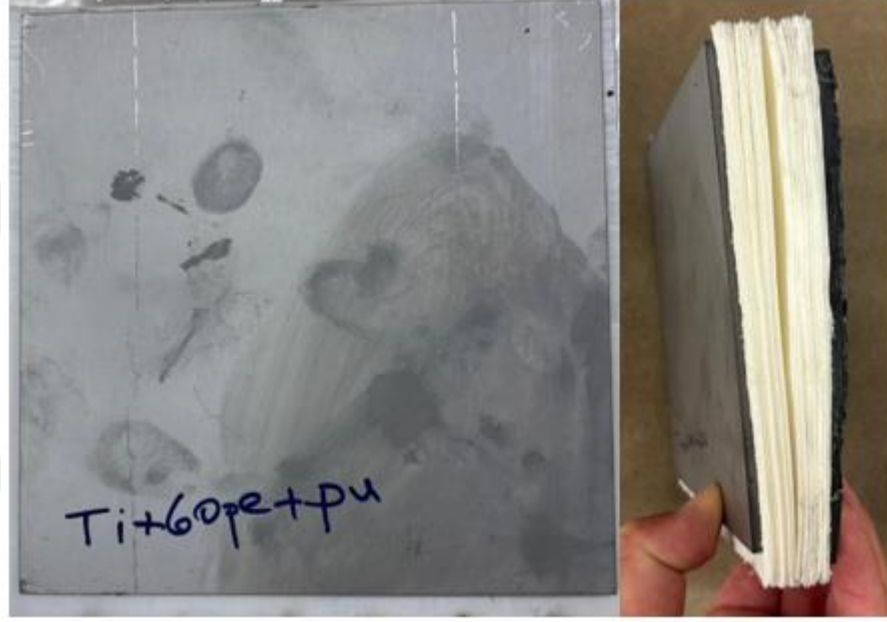


Şekil 4.21 : ti+pu+60pe hedef numune

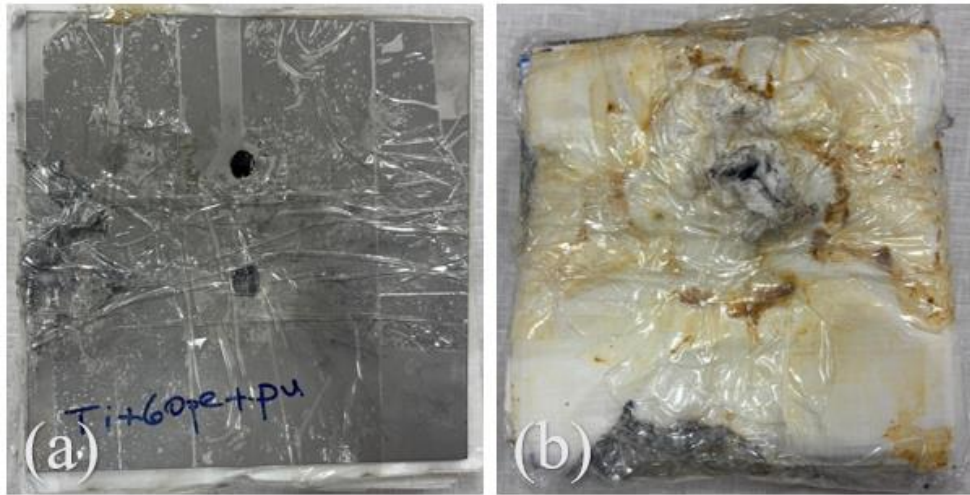


Şekil 4.22 : ti+pu+60pe hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz

3 nolu ti+60pe+pu sıralamasına sahip hedef numunenin ön çarpma yüzünde 1 tabaka titanyum levha, arkasında 60 tabaka uhmwpe fiber kumaş ve en arkada ise 1 tabaka Line-x XS-100 poliüre tabaka vardır. Hedef numuneye ait görseller Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Merminin hedefe çarpma hızı 873 m/s'dir. Bu numune ile yapılan atışlarda da hedef tamamen delinmiş ve sonuç başarısız olmuştur. Numuneye ait ön yüz ve arka yüzde oluşan hasar durumu Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23 : ti+60pe+pu hedef numune

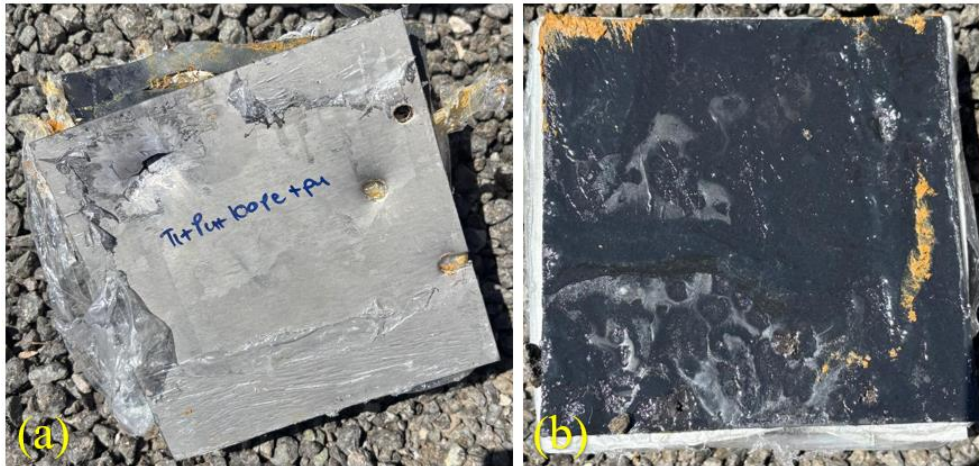


Şekil 4.24 : ti+60pe+pu hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz

4 nolu hedef numune ti+pu+100pe+pu katman sıralamasına sahip olup sırasıyla 1 tabaka titanyum, 1 tabaka poliüre, 100 tabaka uhmwpe fiber kumaş ve 1 tabaka poliüreden oluşmaktadır. Numuneye ait görsel Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Bu numune üzerinde 7,62x51 mm FMJ ve 5,56x45 mm SS109 kalibreli mermiler ile gerçekleştirilen testlerin tamamında arka yüzde delinme olmamış ve çöküntü miktarı 44 mm sınırını aşmamıştır. 7,62x51 mm kalibreli merminin çarpma hızı 838 m/s, 5,56x45 mm kalibreli merminin çarpma hızı ise 709 m/s'dir. Bu mermilerin atımında ise sırasıyla MKE yapımı MPT-76 ve SIG Sauer SIG516 kullanılmıştır. Numunenin ön ve arka yüzünde oluşan hasar durumu Şekil 4.26'da gösterilmiştir.



Şekil 4.25 : ti+pu+100pe+pu hedef numune



Şekil 4.26 : ti+pu+100pe+pu hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz

Bu numune için, 7,62x51 mm FMJ mermi ile 2 atış, 5,56x45 mm SS109 mermi ile 1 adet atış gerçekleştirilmiştir. 7,62x51 mm FMJ mermi ile yapılan atışlar sonucu arka yüze yerleştirilen macunda sırasıyla 37 ve 30 mm çöküntü oluşmuştur. 5,56x45 mm SS109 mermi ile yapılan atış sonucunda da arka yüzde 22 mm çöküntü meydana gelmiştir. Ayrıca tüm atışlardan sonra yapılan incelemeler sonucunda arka yüzde bulunan poliüre tabaka darbe sonrası eski haline dönmüştür. Yani poliüre tabakanın deformasyon hareketi elastik sınırlar içerisinde kalmıştır. Atışlar sonrası arka yüzde oluşan çöküntü miktarlarına ait görseller Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27 : ti+pu+100pe+pu arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (1.atış), (b) 7,62x51 mm (2.atış), (c) 5,56x45 mm

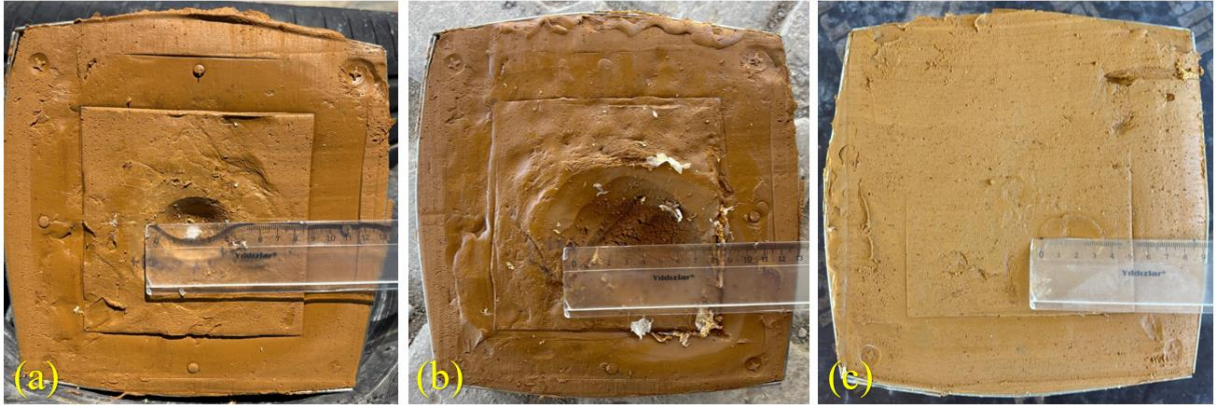
5,6,7,8 ve 9 nolu hedef numuneler üzerinde 2 farklı 7,62x51 mm FMJ mermi ile atış yapılmıştır. Bunlardan ilki kısa namlulu silah ile 800-850 m/s arasında gerçekleştirilen atıştır. İkincisi ise aynı merminin uzun namlulu silah ile 850-900 m/s arasında gerçekleştirilen atışıdır.

5 nolu hedef numune üzerinde 7,62x51 mm FMJ ve 5,56x45 mm SS109 mermilerle toplam 3 atış gerçekleştirilmiştir. Hedef numuneye ait ön ve arka yüzde oluşan hasar durumu Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



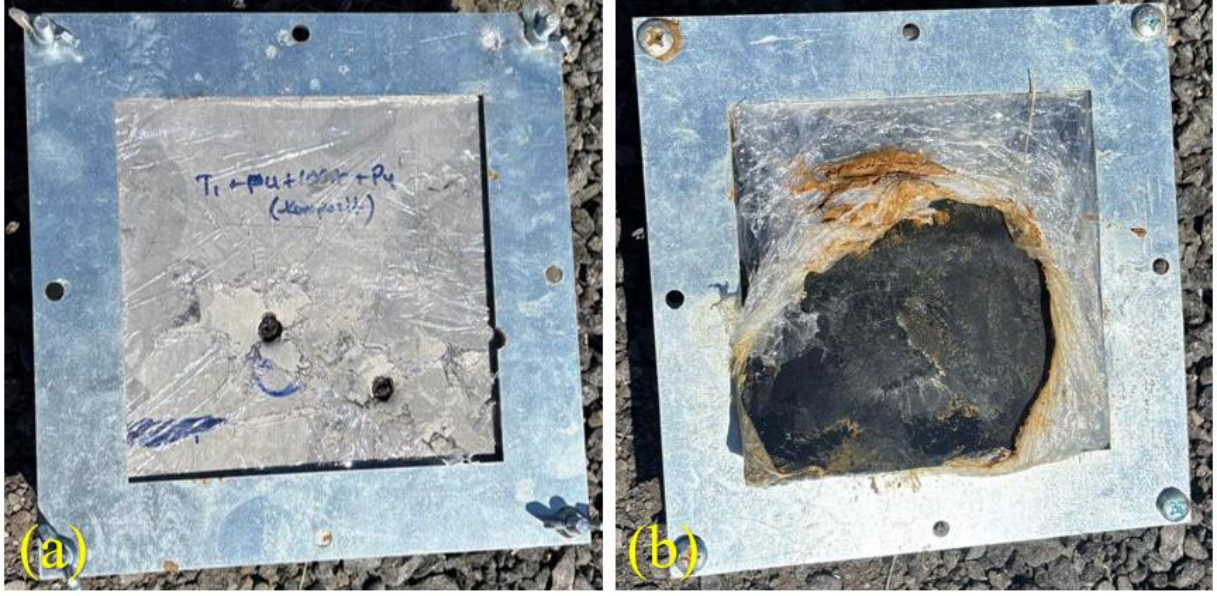
Şekil 4.28 : ti+pu+100pe+ti hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz

Atış sonrası numune arka yüzeyinde bulunan macun üzerinde gerçekleşen çöküntü durumu Şekil 4.29’da gösterilmiştir.

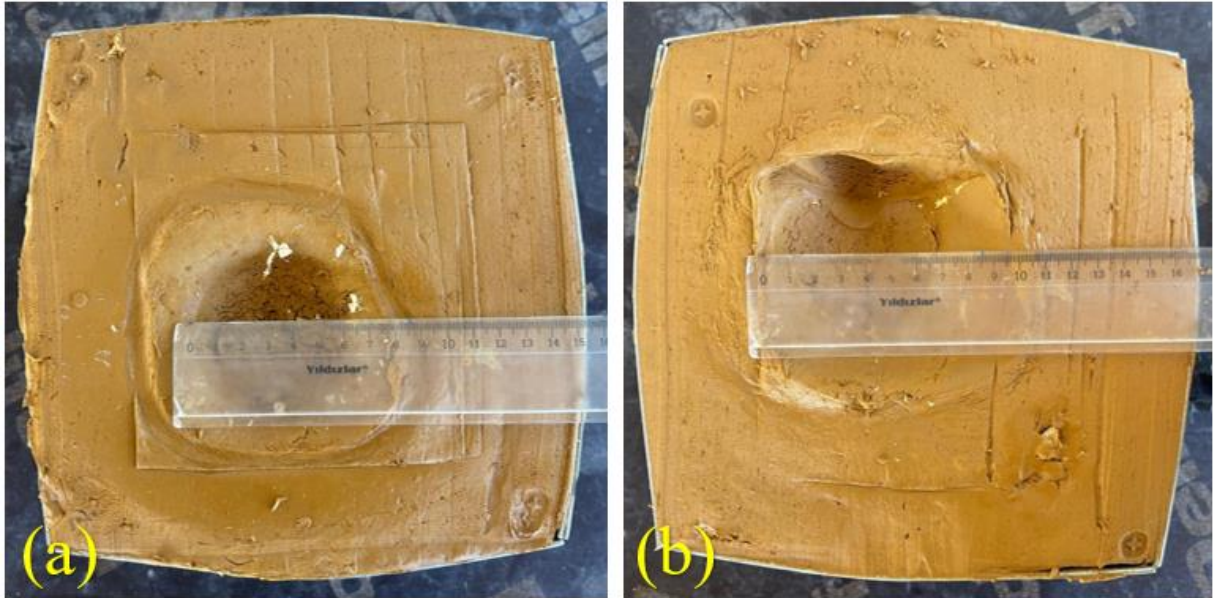


Şekil 4.29 : ti+pu+100pe+ti arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (kısa namlulu), (b) 7,62x51 mm (uzun namlulu), (c) 5,56x45 mm

6 nolu hedef numune için 2 adet 7,62x51 mm FMJ mermi ile atış yapılmıştır. Numuneye ait ön ve arka yüzde oluşan hasar durumları Şekil 4.30’da, macunda oluşan çöküntü görüntüsü ise Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



Şekil 4.30 : ti+pu+100pe+pu (reçineli) hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz



Şekil 4.31 : ti+pu+100pe+pu (reçineli) arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (kısa namlulu), (b) 7,62x51 mm (uzun namlulu)

7 nolu hedef numune için 2 adet 7,62x51 mm FMJ mermi kullanılmıştır. Bu mermilerden ilki kısa namlulu tüfek (MPT-76), ikincisi ise uzun namlulu tüfek (Styer SSG 08) ile ateşlenmiştir. Çarpma sonrası hedef numune ön yüz ve arka yüzünde oluşan hasar durumu Şekil 4.32’de, macun yüzeyinde oluşan çökme miktarı ise Şekil 4.33’te gösterilmiştir. Atış sonrası hedef yan yüzeyi incelendiğinde, Şekil 4.34’te görüldüğü gibi mermi ucunun kütleştiği

görülmektedir (Akdoğan, 2018). Kütleşen mermi çekirdeği enerjisinin büyük bölümünü titanyum plakadan geçerken kaybetmiştir. Uhmwpe tabakaları arasında hareketine devam eden çekirdek, geçtiği uhmwpe tabakalarında çöküntü meydana getirmiş ve uhmwpe tabakaları arasında delaminasyon oluşturmuştur (L. Wang et al., 2025).



Şekil 4.32 : ti+100pe+ti hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz



Şekil 4.33 : ti+100pe+ti arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (kısa namlulu), (b) 7,62x51 mm (uzun namlulu)



Şekil 4.34 : uhmwpe tabakalar arası delaminasyon

8 nolu hedef numune için de 7 nolu numune ile aynı atış standartları gerçekleştirilmiştir. Atışlar sonrası numune ön yüzünde ve arka yüzünde oluşan hasar durumu Şekil 4.35'te, macun yüzeyinde oluşan çöküntü miktarları ise Şekil 4.36'da gösterilmektedir. Her iki numunede de atış sonrası arka yüzde çekme hasarı olduğu ve radyal çatlaklar meydana geldiği gözlenmiştir (Y. Lu et al., 2020).



Şekil 4.35 : ti+bp+100pe+bp hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz

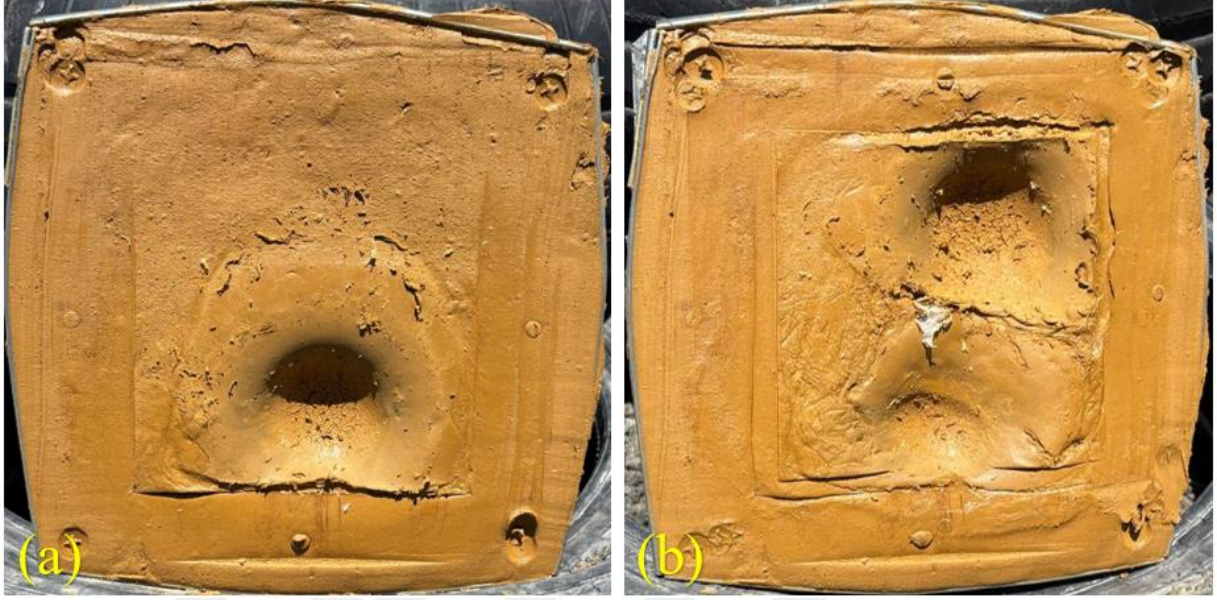


Şekil 4.36 : ti+bp+100pe+bp arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (kısa namlulu), (b) 7,62x51 mm (uzun namlulu)

9 nolu hedef numune için de 8 nolu numune ile aynı atış standartları gerçekleştirilmiştir. Atışlar sonrası numune ön yüzünde ve arka yüzünde oluşan hasar durumu Şekil 4.37’de, macun yüzeyinde oluşan çöküntü miktarları ise Şekil 4.38’de gösterilmektedir.



Şekil 4.37 : ti+bp+pu+100pe+pu+bp hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz

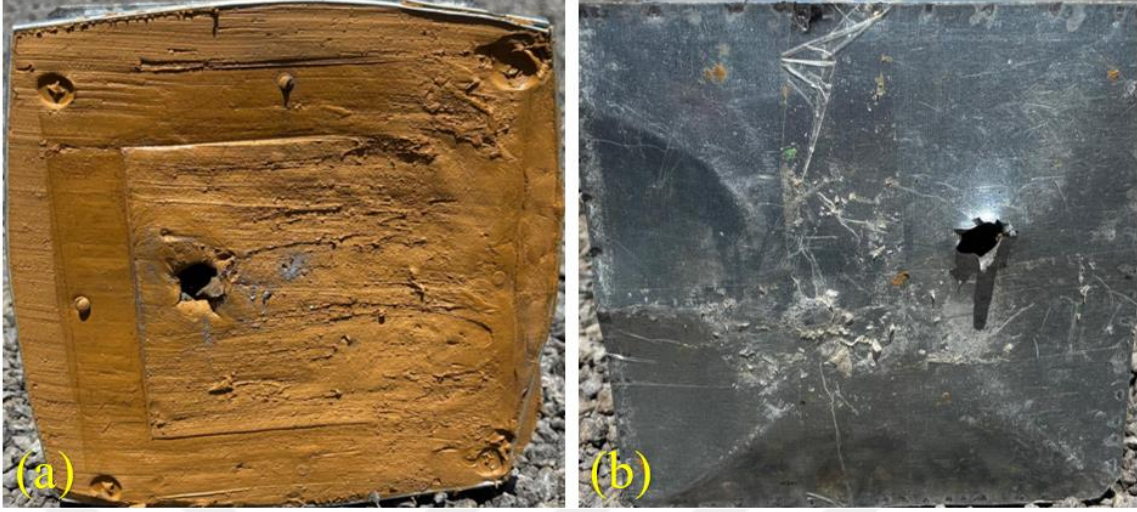


Şekil 4.38 : ti+bp+pu+100pe+pu+bp arka yüz çöküntü miktarları (a) 7,62x51 mm (kısa namlulu), (b) 7,62x51 mm (uzun namlulu)

10 nolu hedef numune sadece 7,62x51 AP (zırh delici) mermiye karşı test edilmiştir. Toplamda 3 adet atış yapılmıştır. Atışların tamamında numune arka yüzünde delinme gerçekleşmiş ve mermi macun tabakasını delip geçmiştir. Atışlar sonrası numune ön yüzünde ve arka yüzünde oluşan hasar durumu Şekil 4.39’da, macun tabakasında oluşan delinme durumu ise Şekil 4.40’ta gösterilmektedir.



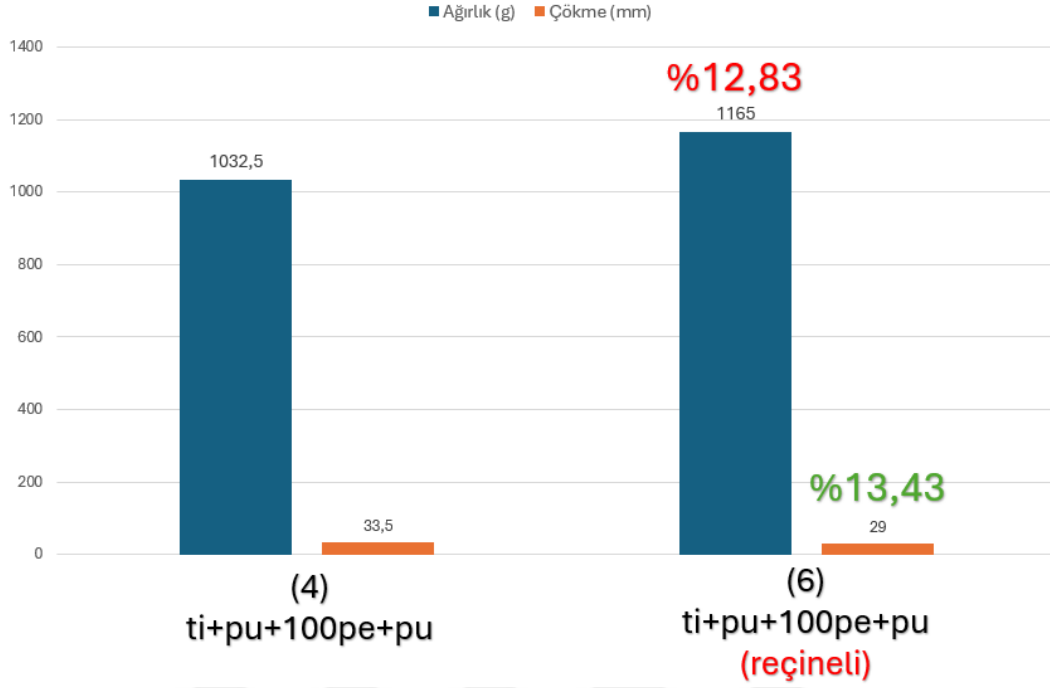
Şekil 4.39 : ti+pu+bp+pu+100pe+pu+bp+pu+ti hedef numune hasar durumu (a) ön yüz, (b) arka yüz



Şekil 4.40 : ti+pu+bp+pu+100pe+pu+bp+pu+ti macun delinme durumu (a) macun ön yüz, (b) macun arka yüz

Toplamda 10 farklı hedef numune üzerinde 3 farklı kalibre ile balistik testler gerçekleştirilmiştir. 1,2 ve 3 nolu hedef numunelerde yapılan testlere ait sonuçlar başarısız olmuş ve tam delinme gerçekleşmiştir. 4,5,6,7,8 ve 9 nolu hedef numuneler üzerinde gerçekleştirilen balistik testlerin tamamında arka yüz deformasyon miktarı sınır değerin (44 mm) altında çıkmıştır. Bu numuneler seviye III için başarılı sonuç vermiştir. 10 nolu hedef numune üzerinde seviye IV için gerçekleştirilen balistik testlerde sonuçlar başarısız çıkmıştır. Yapılan tüm testlerin ardından macunda oluşan arka yüz deformasyonu ve çökme çapları ile tüm atışlara ait hız ve sıcaklık değerleri ölçülerek kaydedilmiştir. Atış sonrası elde edilen tüm bilgiler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Şekil 4.41’de görüldüğü gibi 4 ve 6 nolu hedef numuneler, tamamen aynı tabaka tipleri ve sıralamalarına sahiptir. İkisi arasındaki tek fark reçineli ve reçinesiz olmalarıdır. İkisinin de kısa namlulu tüfek ile gerçekleştirilen 7,62x51 mm FMJ mermi atışları sonrası arka yüzde oluşan çökme miktarlarına bakıldığında, reçineli versiyonun reçinesize göre 4,5 mm daha düşük deformasyona uğradığı görülmektedir. Dolayısıyla sadece reçine emdirilerek reçinesiz numunenin çökme değeri %13,43 oranında azaltılmıştır. Ancak reçine emdirmek suretiyle 6 nolu hedef numunenin ağırlık artışı %12,83 seviyesinde tespit edilmiştir. Ayrıca 4 ve 6 nolu numunelerde en arka tabakada poliürenin bulunması, arka yüzde oluşan çökme sonrasında mermi çekirdeğinin geri tepmesi sonucu poliüre tabakanın eski düzlemsel haline dönmesine neden olmuştur.



Şekil 4.41 : 4 ve 6 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Çizelge 4.1 : Balistik testlere ait ölçümler

Hedef No	Hedef isimlendirme	Mermi Tipi	Atış Sayısı	Hız (m/s)	Sıcaklık (°C)	Çökme Derinliği (mm)	Çökme Çapı (mm)
1	100pe	7,62x51 FMJ	1.atış	896,9	29	Delindi	-
			2.atış	891,7	29	Delindi	-
			3.atış	-	-	-	-
2	ti+pu+60pe	7,62x51 FMJ	1.atış	893,8	29	Delindi	-
			2.atış	-	-	-	-
			3.atış	-	-	-	-
3	ti+60pe+pu	7,62x51 FMJ	1.atış	873,7	29	Delindi	-
			2.atış	-	-	-	-
			3.atış	-	-	-	-
4	ti+pu+100pe+pu	7,62x51 FMJ	1.atış	838,6	32	37	75
			2.atış	832,4	32	30	90
			3.atış	-	-	-	-
		5,56x45	1.atış	709,5	32	22	59
		SS109	2.atış	-	-	-	-

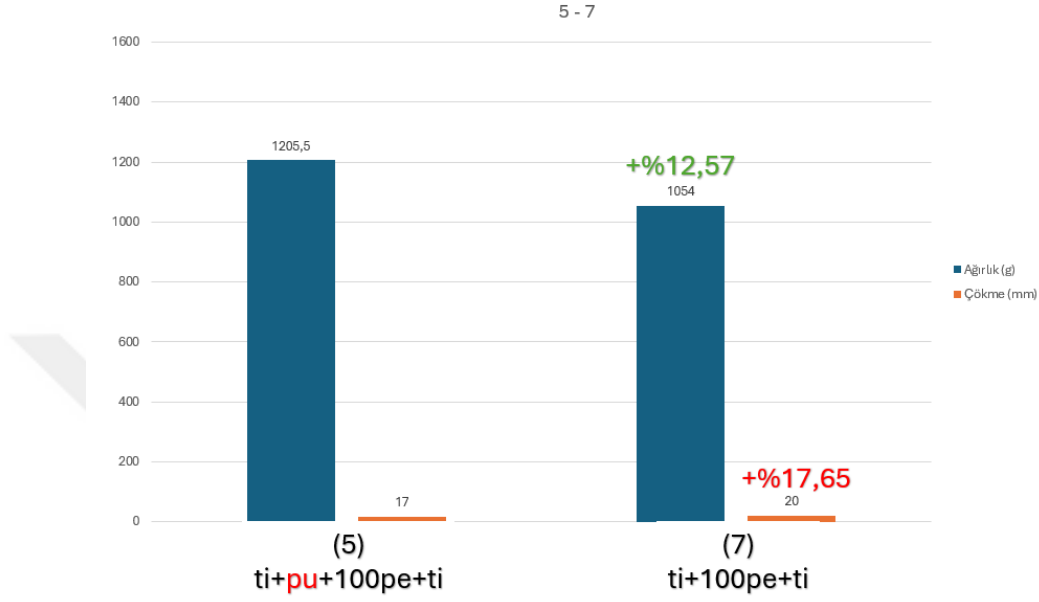
Çizelge 4.1 (devam) : Balistik testlere ait ölçümler

		3.atış	-	-	-	-	
5	ti+pu+100pe+ti	7,62x51	1.atış	818,2	23,2	17	28
		FMJ	2.atış	863,0	23,5	24	68
			3.atış	-	-	-	-
		5,56x45	1.atış	704,9	23,5	3	34
		SS109	2.atış	-	-	-	-
			3.atış	-	-	-	-
6	ti+pu+100pe+pu (reçineli)	7,62x51	1.atış	797,5	25,3	29	66
		FMJ	2.atış	857,2	25,3	31	94
			3.atış	-	-	-	-
7	ti+100pe+ti	7,62x51	1.atış	806,1	25,0	20	45
		FMJ	2.atış	854,7	25,0	31	76
			3.atış	-	-	-	-
8	ti+bp+100pe+bp	7,62x51	1.atış	803,9	25,7	27	56
		FMJ	2.atış	869,8	25,7	38	72
			3.atış	-	-	-	-
9	ti+bp+pu+100pe+pu+bp	7,62x51	1.atış	811,3	25,8	25	54
		FMJ	2.atış	860,6	25,8	27	59
			3.atış	-	-	-	-
10	ti+pu+bp+pu+100pe+pu+bp+pu+ti	7,62x51	1.atış	862,7	25,8	Delindi	-
		AP	2.atış	816,4	25,8	Delindi	-
			3.atış	818,2	25,8	Delindi	-

Nugroho ve arkadaşları, ön yüzü seramik karolardan, ara yüzü hibrit ve hibrit olmayan panellerden ve arka yüzü alüminyum alaşım plakadan (5052-H34) oluşan 5 farklı zırh sisteminin NIJ 0101.06 standardı Level III'e göre balistik davranışını deneysel olarak incelediler (Nugroho et al., 2025). Deney sonuçlarına göre hibrit ara katmanlara sahip hedef numuneleri mermiyi tamamen durdurmuş ve arka yüz deformasyonları 21,90 ve 22,00 mm çıkmıştır. Bu değer deneysel çalışmalarımızda test edilen 5 numaralı hedefin ortalama arka yüz deformasyonu olan 20,5 mm'ye çok yakındır. Yoğunlaştırılmış ahşap ve aramid kumaşın bir arada kullanıldığı hibrit ara katmana sahip numunelerden elde edilen bu değerlerin deneysel çalışmalarımıza yakın sonuçlar vermesi, çalışmanın önemini ortaya koymaktadır.

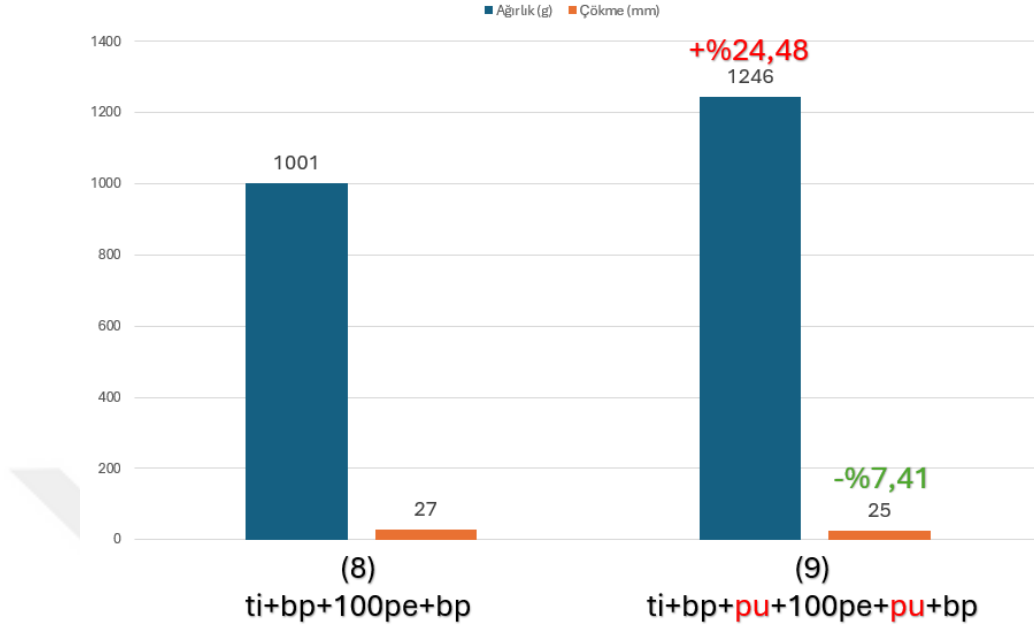
Şekil 4.42'de görüldüğü üzere 5 nolu numunede 7 nolu numuneden farklı olarak 1 tabaka poliüre yer almaktadır. 5 nolu hedeften sadece 1 tabaka poliüre çıkararak ağırlık

yönünden %12,57 oranında bir azalma sağlanırken çökme derinliği açısından ise %17,65 bir artış görülmektedir.



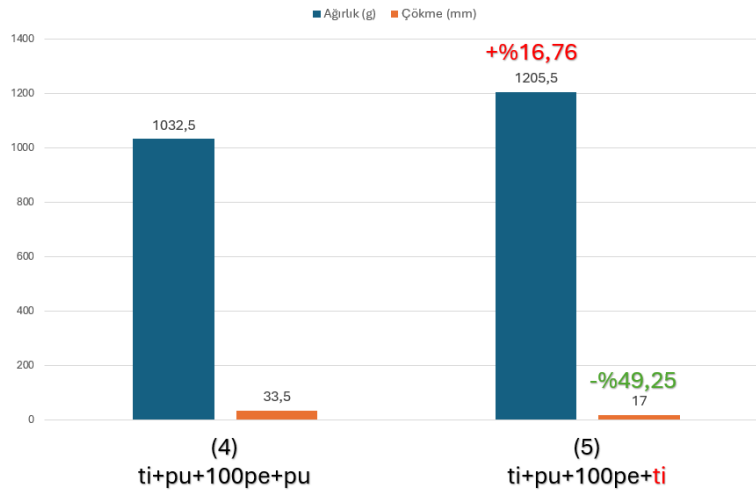
Şekil 4.42 : 5 ve 7 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.43'te görüldüğü gibi, 9 nolu numunede 8 nolu numuneye göre farklı olarak ekstra 2 tabaka poliüre bulunmaktadır. Kısa namlulu tüfek ile yapılan atışlardan sonra arka yüzde oluşan çökme miktarları dikkate alındığında, 9 nolu numuneye 2 tabaka poliüre eklendiği için doğal olarak çökme derinliğinde %7,41'lik azalma olmuştur. Uzun namlulu tüfek atışları kıyaslandığında ise çökme derinliğinde %28,95 oranında bir azalma gerçekleşmiştir. Özellikle bu iki hedef arasında poliüre tabakanın farkı önemli ölçüde ortaya çıkmıştır. 9 nolu numunenin 8 nolu numuneye oranla ağırlık artışı ise %24,48 oranındadır. Bu ağırlık artışına bakılınca ortaya çıkan balistik performans düşük çıkmıştır.



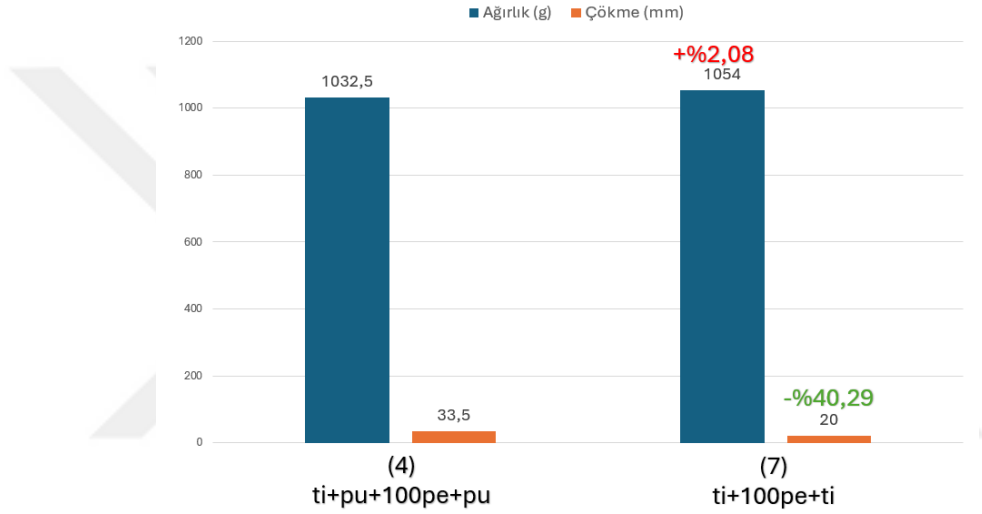
Şekil 4.43 : 8 ve 9 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.44'te gösterildiği gibi, 4 nolu hedefin en arkasında bulunan poliüre tabaka, 5 nolu hedefte titanyum olarak değiştirilmiştir. Bu değişiklik ile birlikte kısa namlulu tüfek atışları sonucunda arka yüzde oluşan çekme değeri 5 nolu hedefte %49,25 oranında daha düşük çıkmıştır. Böylece en arkada bulunan titanyum plakanın poliüreye oranla daha üstün performans sergilediği görülmüştür. Diğer taraftan 5 nolu hedefin 4 nolu hedefe göre ağırlık artışı sadece %16,76'dır. Bu durum dikkate alındığında titanyum plakanın ağırlık/deformasyon özellikleri poliüreye oranla çok yüksek çıkmaktadır.



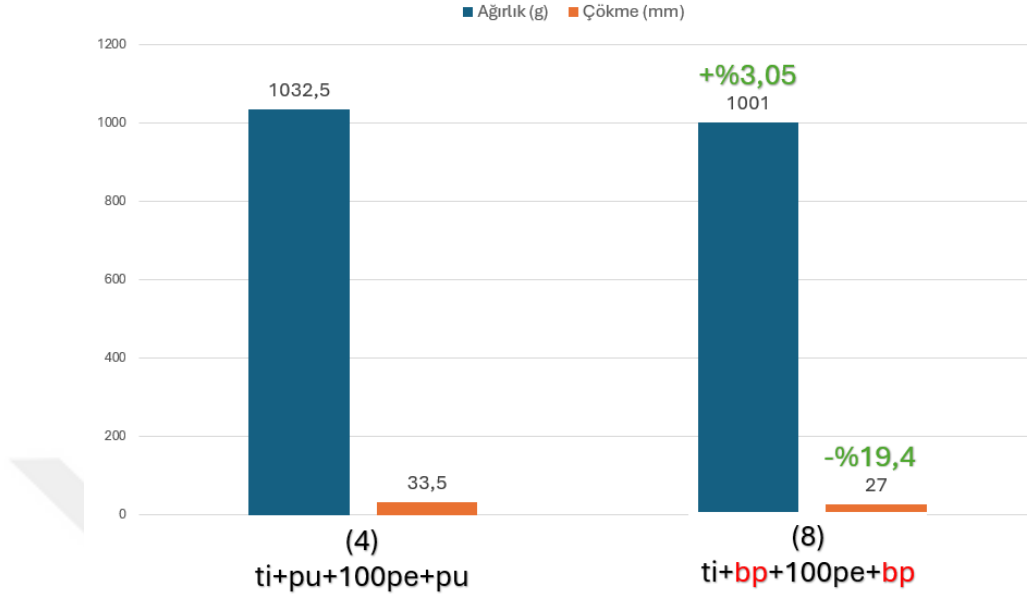
Şekil 4.44 : 4 ve 5 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.45'te gösterildiği gibi, 4 nolu hedefte 7 nolu hedefe göre 1 tabaka titanyum çıkarılıp, yerine 2 tabaka poliüre eklenmiştir. Kısa namlulu tüfek atışları kıyaslandığında 7 numaralı hedefin arka yüz deformasyon miktarı 4 numaraya göre %40,29 oranında düşmüştür. Ağırlığı ise 4 numaraya göre sadece %2,08 oranında artmıştır. Ayrıca 7 numaralı hedefin arka yüz deformasyon çapı 4 numaraya göre %62,67 oranında daralmıştır. Bu oranlara bakıldığında titanyum plakanın poliüreye oranla balistik performansının çok üst seviyede olduğu görülmektedir.



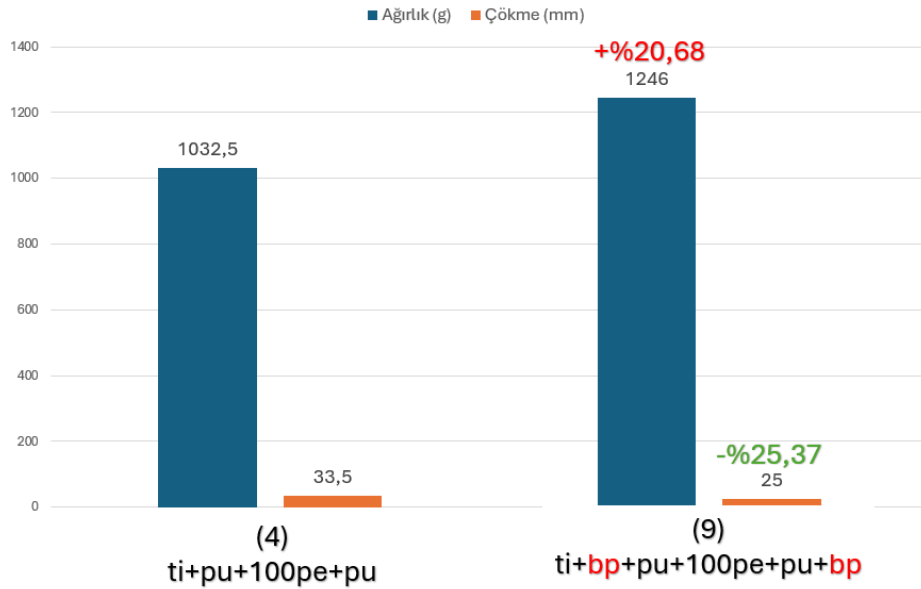
Şekil 4.45 : 4 ve 7 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.46'da gösterildiği gibi, 4 nolu hedefte bulunan 2 tabaka poliüre yerine 8 nolu hedefte alüminyum bal peteği yer almaktadır. Kısa namlulu tüfek atışlarında, 8 nolu hedefe ait arka yüz çökme derinliği 4 nolu hedefe oranla % 19,4 azalmıştır. Aynı şekilde çökme çapı da %25,3 azalmıştır. Aynı şekilde 8 nolu hedefin ağırlığı, 4 nolu hedefe oranla % 3,05 daha düşüktür. Tüm bu parametreler göz önüne alındığında, 8 nolu hedef 4 nolu hedefe göre çok daha üstün balistik performans göstermiştir. Alüminyum bal peteği tabakalarının poliüre tabakalara göre üstün özellikleri görülmüştür.



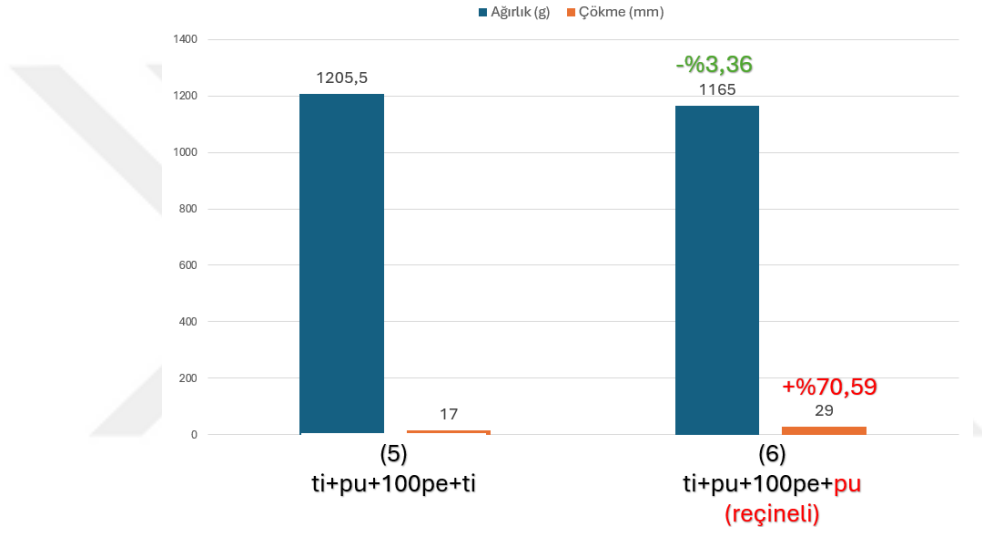
Şekil 4.46 : 4 ve 8 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.47’de görüldüğü üzere, 9 nolu hedefe, 4 nolu hedeften farklı olarak fazladan 2 tabaka alüminyum bal peteği levha eklenmiştir. 9 numaralı hedefteki çökme derinliği % 25,37 azalmıştır. Bununla birlikte, 9 numaralı hedefin ağırlığı %20,68 daha fazladır. Alüminyum bal peteği ve poliüre entegrasyonu, uhmwpe kumaş katmanları ile tamamlanan deformasyonu etkili bir şekilde azaltmıştır. Sonuç olarak, 9 nolu hedef gelişmiş koruma sunmaktadır.



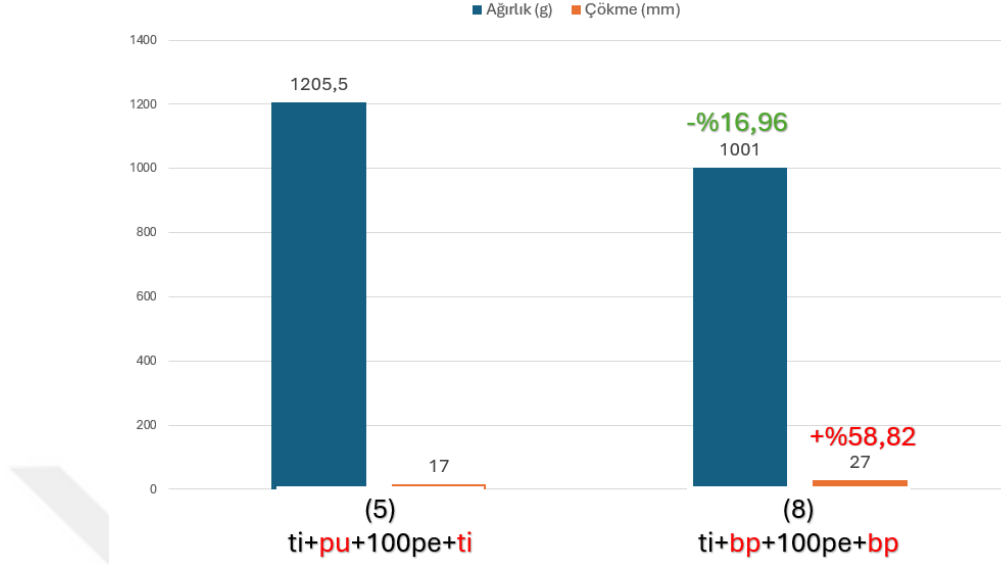
Şekil 4.47 : 4 ve 9 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.48’de görüldüğü üzere, 5 nolu hedefin en arka tabakasında bulunan titanyum levhanın yerine 6 nolu hedefte poliüre gelmiştir. Ayrıca 6 nolu hedefin 5 nolu hedeften diğer bir farkı ise reçine emdirilmiş olmasıdır. Kısa namlulu (düşük hız) tüfek ile yapılan atışlar sonucunda, arka yüz deformasyonu 6 nolu numunede daha yüksek çıkmıştır. 5 nolu numuneye oranla çökme derinliği artışı %70,59 olmuştur. 5 nolu numuneye oranla 6 nolu numunenin ağırlığı %3,36 daha düşüktür. Dolayısıyla 5 nolu numunenin ağırlığının yüksek olmasının yanında balistik performansı kayda değer çıkmıştır.



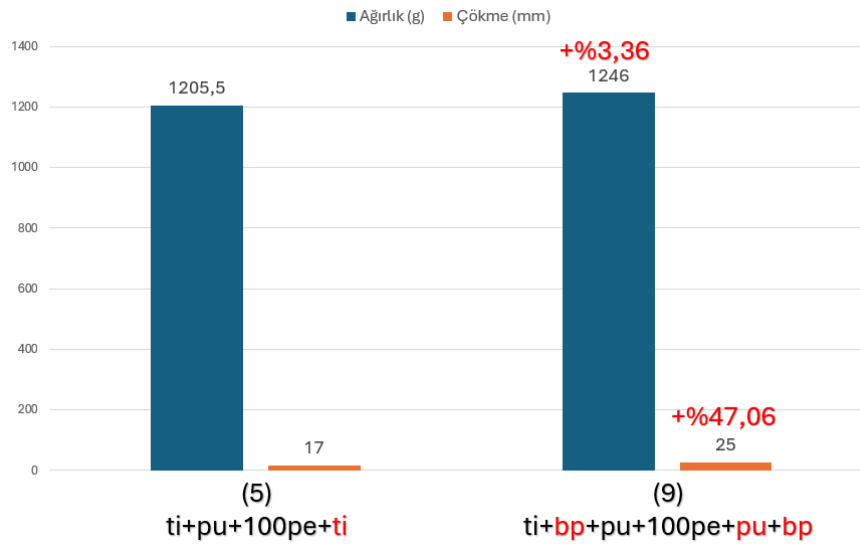
Şekil 4.48 : 5 ve 6 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.49’da görüldüğü üzere, 8 nolu hedefte 5 nolu hedefin 2. tabakası olan poliüre ile son tabakası olan titanyum levha yerine alüminyum bal peteği kullanılmıştır. Bu değişiklikler ile 8 nolu numunede 5 nolu numuneye göre ağırlık %16,96 oranında azalmıştır. Ancak bu ağırlık düşüşünün aksine, çökme derinliğinde %58,82 oranında bir artış yaşanmıştır. Çökme çapında oluşan %24,44’lük artış oranı da dikkate alındığında 8 nolu hedefin 5 nolu hedefe göre balistik performansının büyük ölçüde zayıf bulunduğu görülmektedir.



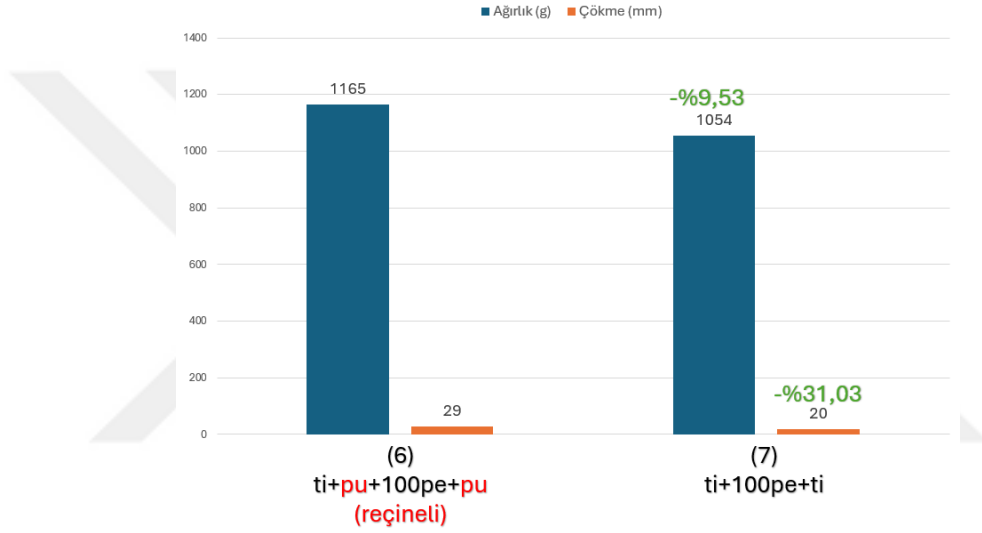
Şekil 4.49 : 5 ve 8 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.50’de görüldüğü üzere, 5 nolu hedefin en arka plakası olan titanyum levha çıkarılıp, yerine alüminyum bal peteği konularak ve ara tabakaya da 1 adet bal peteği ve 1 adet poliüre konularak 9 nolu hedef elde edilmiştir. Bu değişiklikler 9 nolu hedef için sadece %3,36 ağırlık artışına neden olmuştur. Ancak balistik testler sonrası macun yüzeyinde yapılan ölçümler neticesinde, arka yüz çökme mesafesinin %47,06 oranında arttığı tespit edilmiştir. Zırh kalınlığının da 14,6 mm arttığını düşünürsek 5 nolu hedefin 9 numaraya göre çok daha üstün performans sergilediği anlaşılmaktadır.



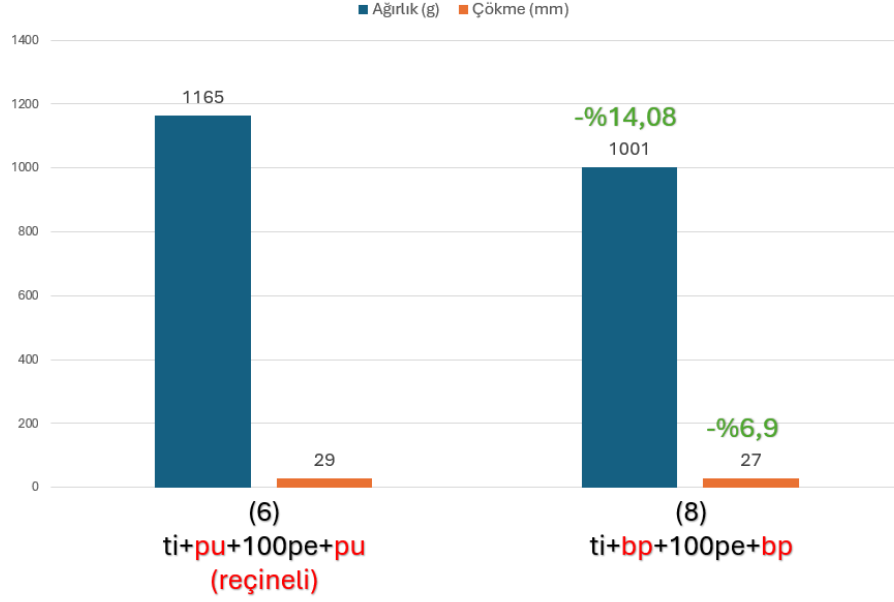
Şekil 4.50 : 5 ve 9 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.51’de görüldüğü üzere, 6 nolu hedefte bulunan 2 tabaka poliüre yerine en arkaya 1 tabaka titanyum eklenmesiyle birlikte 7 nolu hedef oluşturulmuştur. 7 nolu hedefte, reçine emdirilmiş olan 6 nolu hedefe göre %9,53 oranında bir ağırlık düşüşü meydana gelmiştir. Sadece bu kadarlık bir ağırlık düşmesiyle balistik testler sonrası arka yüzde oluşan çökme miktarında %31,03 oranında bir düşüş yaşanmıştır. Ayrıca merminin çarpma etkisiyle macunda meydana gelen çökme çapında ise %57,58 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. O halde, 7 nolu hedefin 6 nolu hedefe göre üstün balistik performansa sahip olduğunu söylemek gerekir.



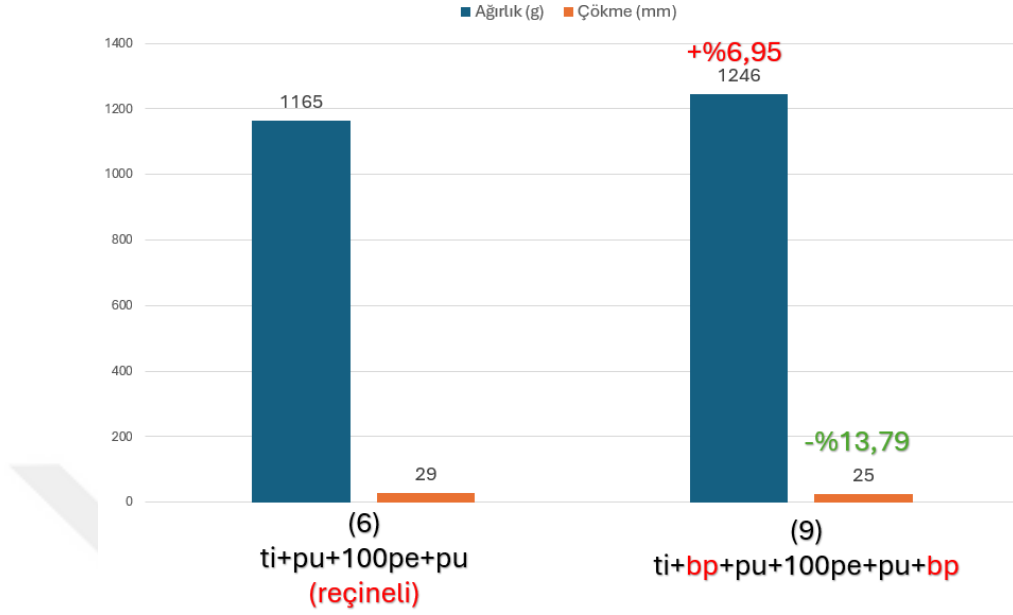
Şekil 4.51 : 6 ve 7 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.52’de görüldüğü üzere, 6 nolu hedefte bulunan 2 adet poliüre tabakası yerine, 8 nolu hedefte 2 adet alüminyum bal peteği konulmuştur. Bal peteği konulması ile birlikte ağırlık açısından %14,08 oranında düşme yaşanmıştır. Her iki hedef üzerinde gerçekleştirilen balistik testler sonrasında, arka yüzeyde oluşan çökme derinliği bakımından 8 nolu hedefte, 6 nolu hedefe göre %6,90 oranında düşüş görülmüştür. Aynı şekilde çökme çapında da %15,15 oranında daralma bulunmaktadır. Böylece 8 nolu hedef için balistik performans değerlerinin 6 nolu hedeften üstün çıktığını söylemek mümkündür.



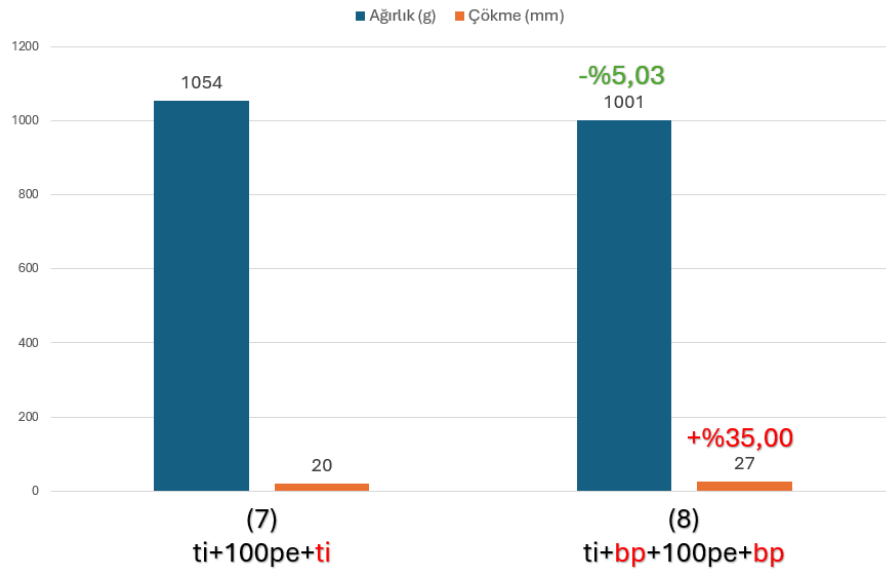
Şekil 4.52 : 6 ve 8 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.53'te görüldüğü üzere, 6 ve 9 nolu hedefler kıyaslandığında, 6 nolu hedefte bulunan tabakalara ek olarak 2 adet alüminyum bal peteği tabakası konularak 9 nolu hedef elde edilmiştir. Eklenen bu tabakalar %6,95 oranında bir ağırlık artışına neden olmuştur. Ancak bu ağırlık artışı ile birlikte balistik testler sonrası 9 nolu hedefin arka yüzünde oluşan çökme derinliği %13,79 oranında azalmıştır. Ayrıca çökme çapında da %18,18 oranında bir daralma gerçekleşmiştir. Ağırlık artış oranına bakılırsa balistik performansın artış oranı daha dikkate değer çıkmıştır.



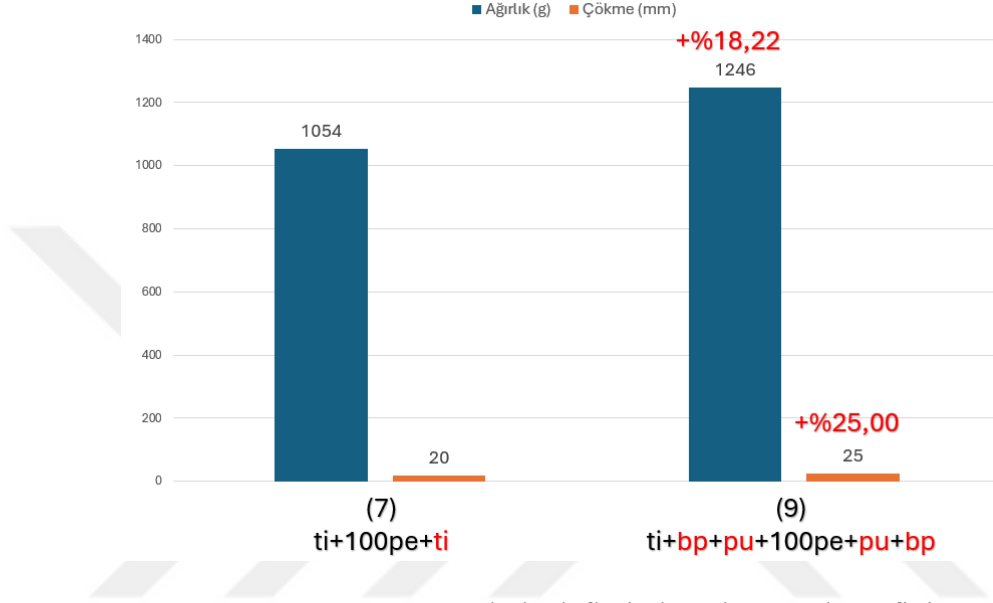
Şekil 4.53 : 6 ve 9 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.54'te görüldüğü üzere, 7 ve 8 nolu hedeflere bakıldığında, 7 nolu hedeften 1 adet titanyum plaka çıkarılıp, yerine 2 tabaka alüminyum bal peteği malzemesi konularak 8 nolu hedef elde edilmiştir. Bu değişiklik, 7 nolu hedefin ağırlığını %5,03 oranında azaltarak 8 nolu hedefin elde edilmesini sağlamıştır. Ancak bu ağırlığın düşmesi, arka yüz derinliğinin %35 artmasına neden olmuştur. Aynı şekilde arka yüz çökme çapı da tam olarak %100 artmıştır. Dolayısıyla bu karşılaştırmada, titanyum plakanın bariz üstünlüğü göze çarpmaktadır.



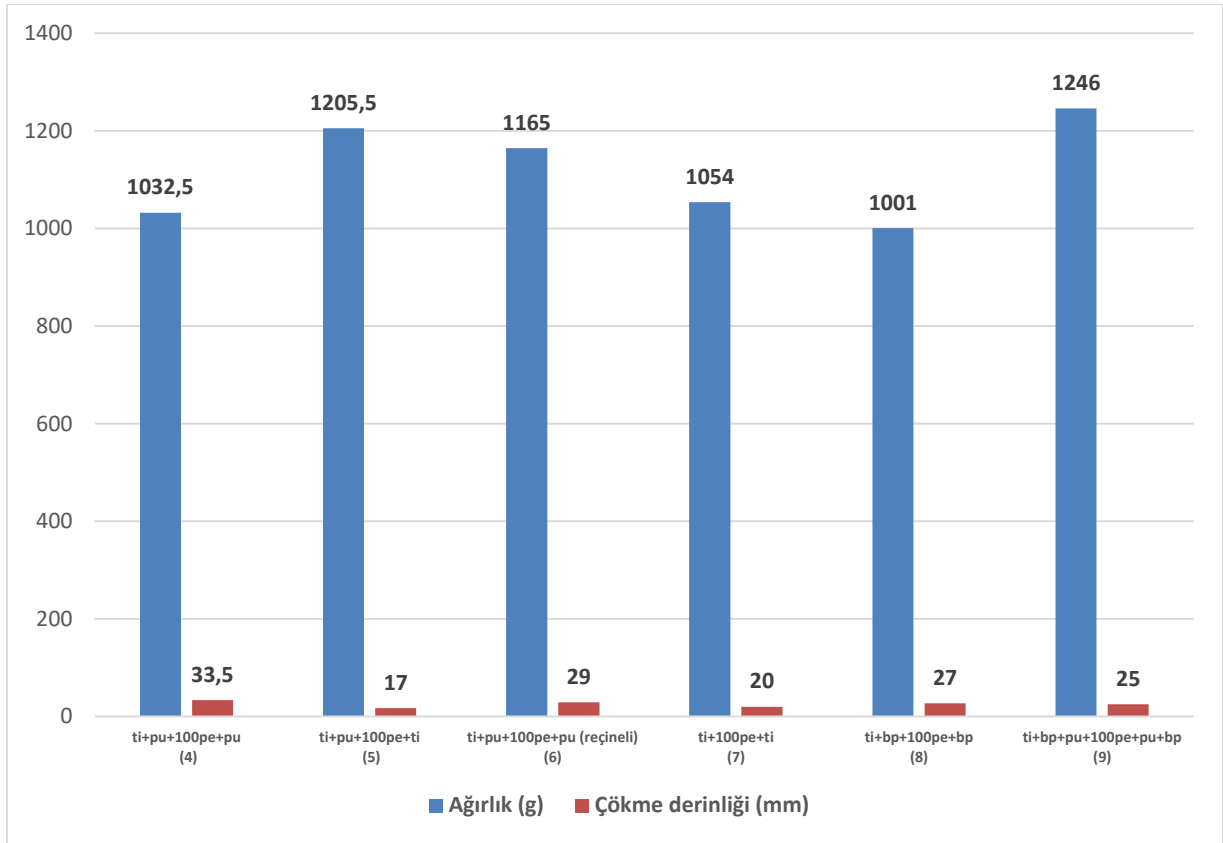
Şekil 4.54 : 7 ve 8 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

Şekil 4.55'te görüldüğü üzere, 7 nolu hedef ile 9 nolu hedef kıyaslandığında, 9 nolu hedefin ağırlık artışı, 7 nolu hedefe göre %18,22 oranında olmuştur. Ancak artan ağırlığa rağmen çöküntü miktarı da tam olarak %25,0 artmıştır. Bu durumda 9 nolu numunenin balistik performansının 7 nolu numuneden çok daha düşük olduğu açıktır.

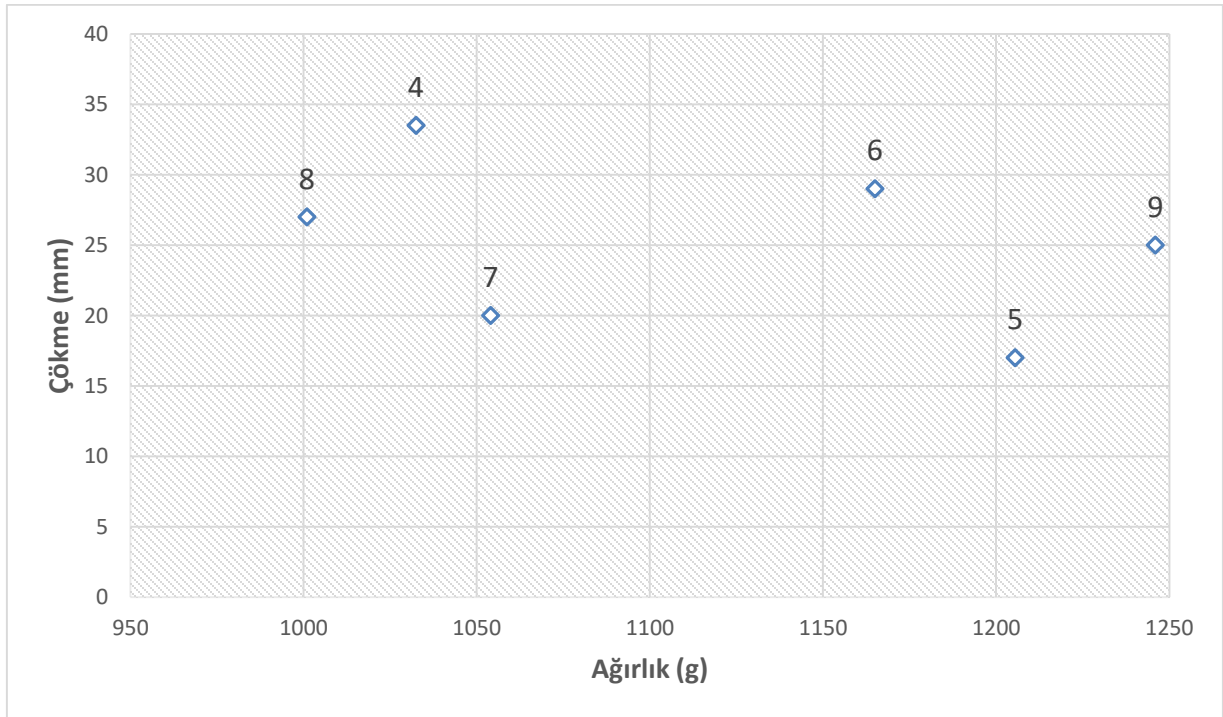


Şekil 4.55 : 7 ve 9 nolu hedeflerin karşılaştırmalı grafiği

NIJ 0101.06 balistik standardına ait seviye III şartlarını sağlayan hedef numunelere ait çökme derinliği-ağırlık grafiği Şekil 4.56'da gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında, en düşük ağırlığa sahip hedef numunenin 8 numara olduğu görülmektedir. Ancak aynı hedef numunenin çökme derinliği ise baştan dördüncü sıradadır. En düşük çökme derinliği oluşan hedef numune ise 7 numaradır. Ancak 7 nolu hedefin ağırlığı ise tüm hedefler arasında baştan üçüncü sıradadır. Tüm bu veriler üzerinden en başarılı ve en başarısız hedefleri belirleyebilmek adına x ekseninde ağırlık, y ekseninde ise çökme mesafelerinin olduğu grafik Şekil 4.57'de gösterilmiştir. Bu grafikte, ağırlık ve çökme değerlerinin kesiştiği noktalar göz önüne alındığında orijine en yakın nokta, balistik açıdan en yüksek performansı verir. Orijine en uzak nokta ise en başarısız hedef olarak ortaya çıkar.



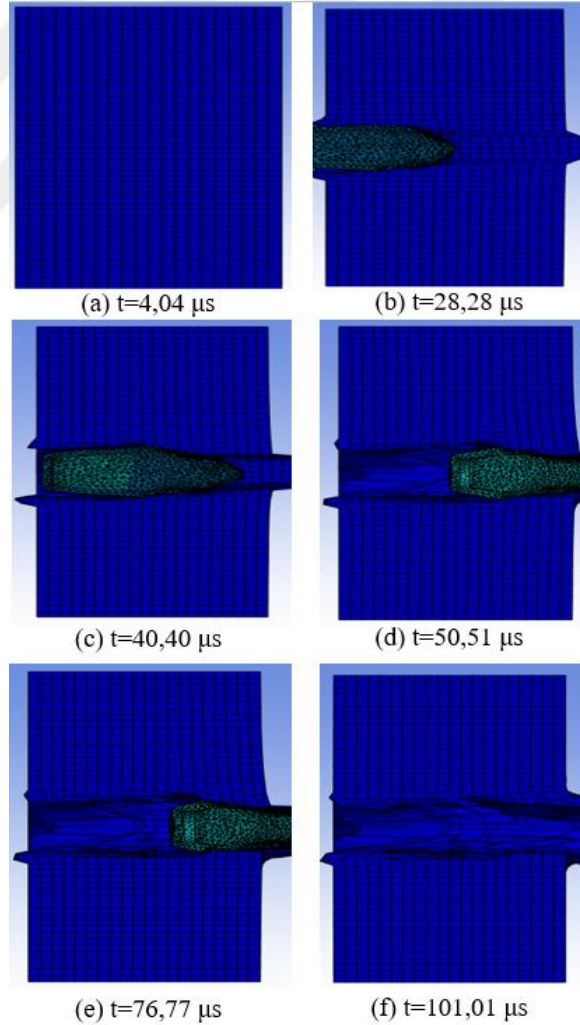
Şekil 4.56 : Hedeflere ait çökme derinliği-ağırlık sütun grafiği



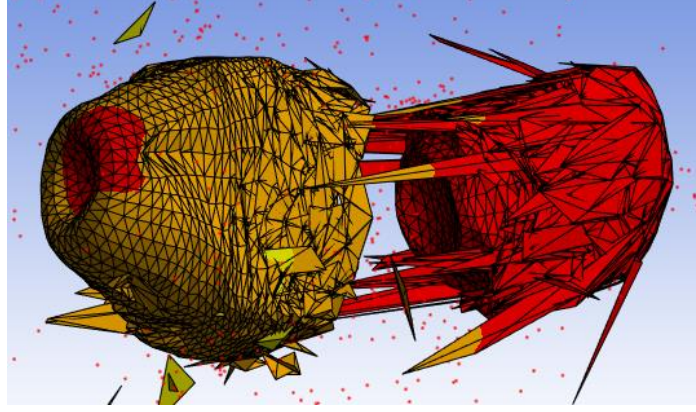
Şekil 4.57 : Hedeflere ait çökme derinliği-ağırlık dağılım grafiği

4.3 Sayısal Test Sonuçları

Sayısal analizler, toplamda 6 farklı hedef numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm analizler, deneysel testlerde yapılan atışlara benzer şekilde mermi hızları girilerek yürütülmüştür. İlk olarak 100 tabaka uhmwpe kumaşın üst üste getirilmesiyle oluşturulan numune analiz edilmiştir. Analiz sonucunda hedef numunesinin mermiyi durdurmada başarısız olduğu ve çarpma sonrasında hem merminin hem de hedefin plastik deformasyona uğradığı görülmüştür. Şekil 4.58’de 1 nolu hedef numune kesitinin zamana bağlı deformasyon durumu gösterilmiştir. 100pe hedef numunesinin analiz sonucuna göre arka yüzde deneysel çalışmalara benzer şekilde delinme çevresindeki uhmwpe liflerinin saçak şeklinde uzadığı görülmüştür. Mermi çekirdeğinin hareketini tamamlamasıyla birlikte Şekil 4.59’da görüldüğü üzere uç geometrisinde mantarlaşıma oluşmuştur (Mutu & Özer, 2022).

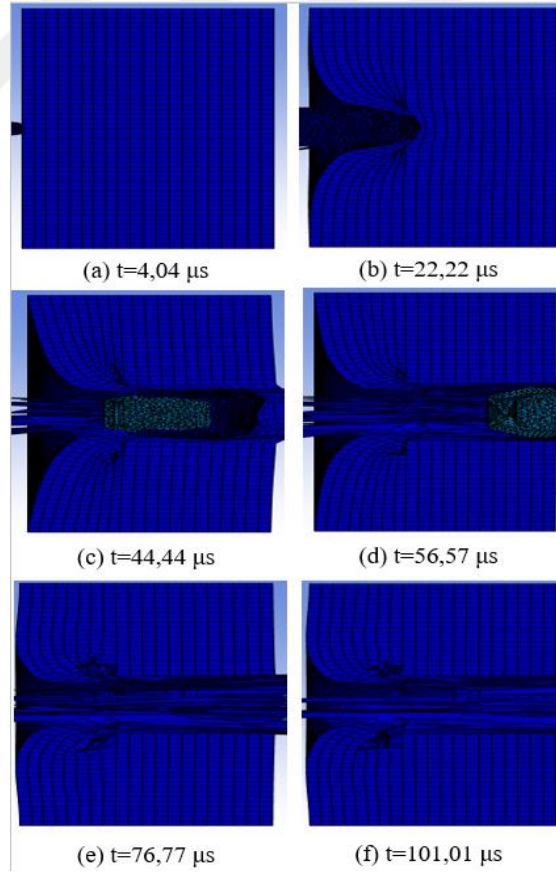


Şekil 4.58 : 100pe zamana bağlı deformasyon durumu



Şekil 4.59 : Mermi uç geometrisinde mantarlaşma

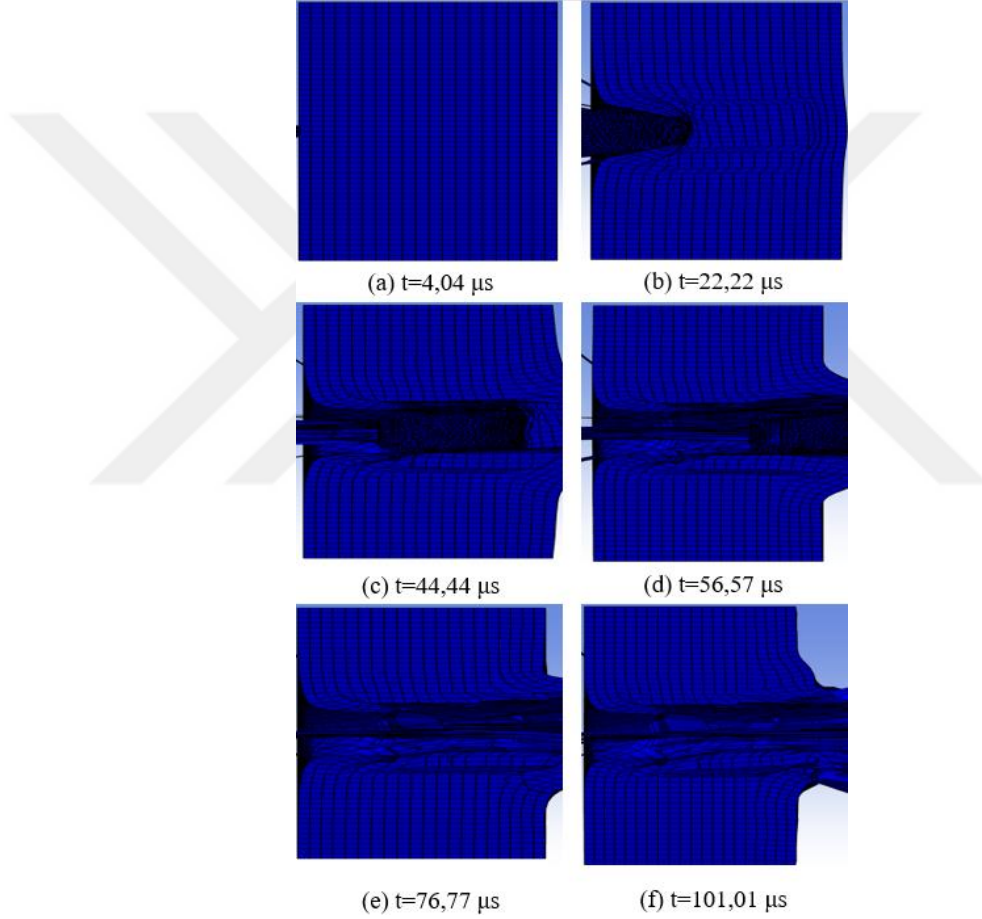
2 nolu numuneye (ti+pu+60pe) ait katı model analizleri sonucunda, merminin bu hedefi de delerek geçtiği gözlenmiştir. Hedef numuneye ait zamana bağlı hasar durumu Şekil 4.60'ta gösterilmiştir. Dolayısıyla deneysel çalışmalarda olduğu gibi 2 nolu hedefe ait sayısal analiz sonuçları da NIJ 0101.06 standardına ait koruma seviyesini sağlayamamıştır.



Şekil 4.60 : ti+pu+60pe zamana bağlı deformasyon durumu

3 nolu numuneye ($t_i+60p_e+p_u$) ait katı model analizleri sonucunda, merminin bu hedefi deldiği gözlenmiş olup, NIJ 0101.06 standardına ait koruma seviyesini sağlayamadığı anlaşılmıştır. Deneysel çalışmalarla tutarlılık gösteren hedef numuneye ait zamana bağlı hasar durumu Şekil 4.61’de gösterilmiştir.

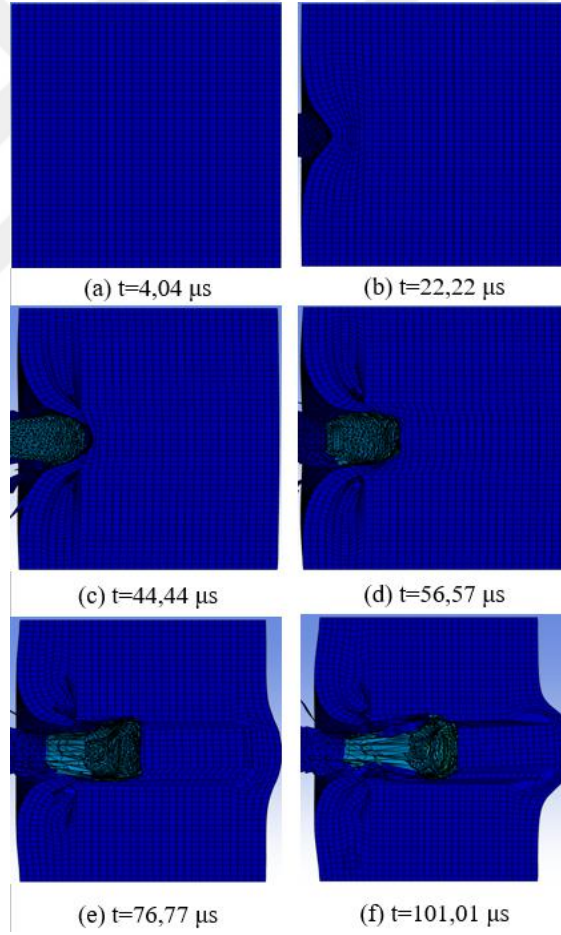
1, 2 ve 3 nolu hedeflere ait analizlerin sonuçlanmasıyla birlikte, tüm hedeflerin uhmwpe katmanlarında fiber kırılması ve bölgesel çıkıntılar gözlenmiştir (Xu et al., 2022).



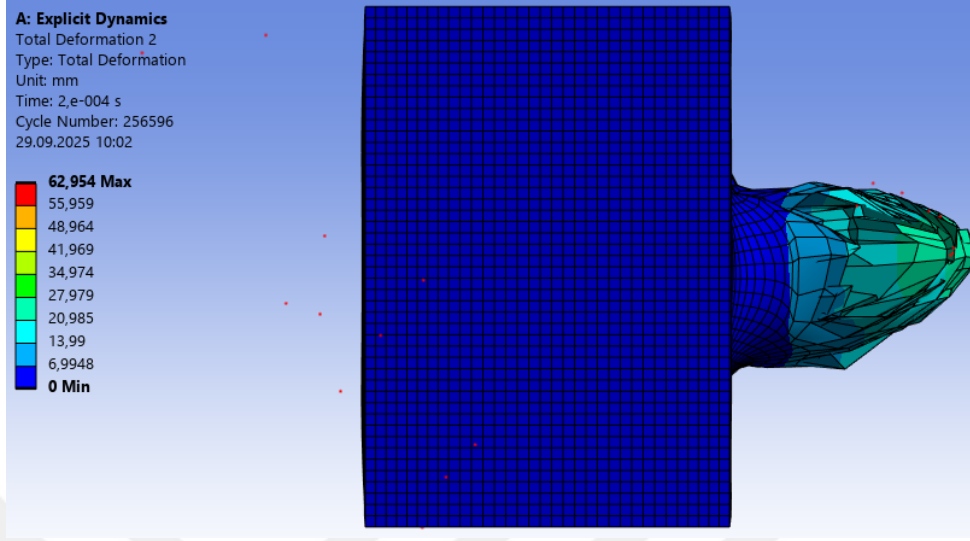
Şekil 4.61 : $t_i+60p_e+p_u$ zamana bağlı deformasyon durumu

4 nolu numuneye ($t_i+p_u+100p_e+p_u$) ait sayısal analiz sonucunda, 7,62x51 mm FMJ mermi çekirdeğinin hedef içerisinde saplanıp kaldığı tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlarla benzerlik gösteren bu analize ait zamana bağlı hasar durumu Şekil 4.62’de gösterilmiştir. Ayrıca analiz sonrasında numune arka yüzünde oluşan maksimum çökme derinliği mesafesi Şekil 4.63’te görüldüğü üzere 62,954 mm olmuştur.

4 nolu numunede en arkaya yerleştirilen poliüre tabakasının delinmeye karşı direnci artırdığı görölmektedir. Çalışmada geliştirilen sonlu elemanlar modeli (FEA), poliürea için viskoelastik-plastik bir yapısal model ve uhmwpe için katman ayrılmasını dikkate alan bir kompozit kumaş levha modeli kullanmıştır. Bu modelin sonuçları, deney bulgularıyla yüksek derecede uyum göstermiş ve modelin güvenilirliğini doğrulamıştır (L. Wang et al., 2025). Arka yüzey kaplamasında hasar mekanizması 3 aşamada gerçekleşir. Bunlar, uhmwpe laminatlarında kesme kırılması, hem uhmwpe hem de poliürenin gerilme deformasyonu ve uhmwpe'de katmanlar arası ayrılma ile poliürenin çarpma bölgesindeki çevresel deformasyonudur. Ön yüzey kaplamasında süreç, poliürenin hızlı kesme kırılması, uhmwpe laminatında kesme kırılması ve uhmwpe'nin gerilme deformasyonu ile katmanlar arası ayrılma şeklinde ilerler.

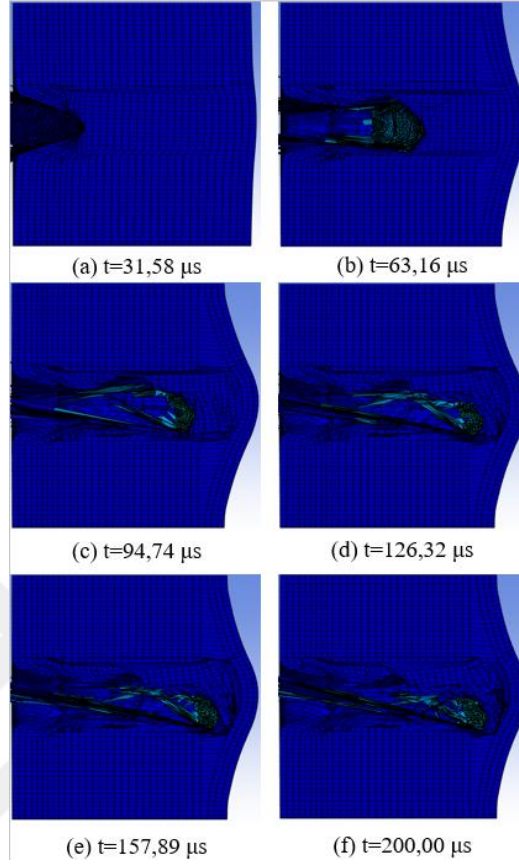


şekil 4.62 : $t_i + p_u + 100p_e + p_u$ zamana bağlı deformasyon durumu

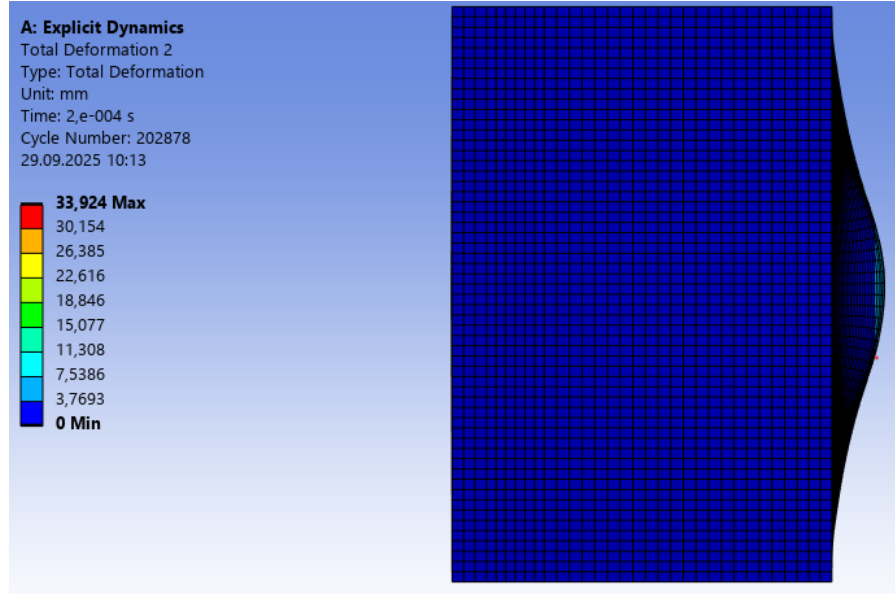


Şekil 4.63 : ti+pu+100pe+pu maksimum deformasyon

5 nolu numuneye (ti+pu+100pe+ti) ait sayısal analiz sonuçları incelendiğinde, mermi çekirdeğinin hedef içerisinde kaldığı görülmektedir. Hedef numunede oluşan hasar durumunun zamana bağlı değişimi Şekil 4.64'te gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.65'te gösterildiği gibi, hedef arka yüzünde 33,924 mm çökme derinliği mesafesi oluşmuştur. Bu hedef numuneye ait arka yüz çökme derinliği mesafesinin 44 mm'den düşük olması sebebiyle NIJ 0101.06 standardına göre başarılı sonuç verdiği görülmektedir.



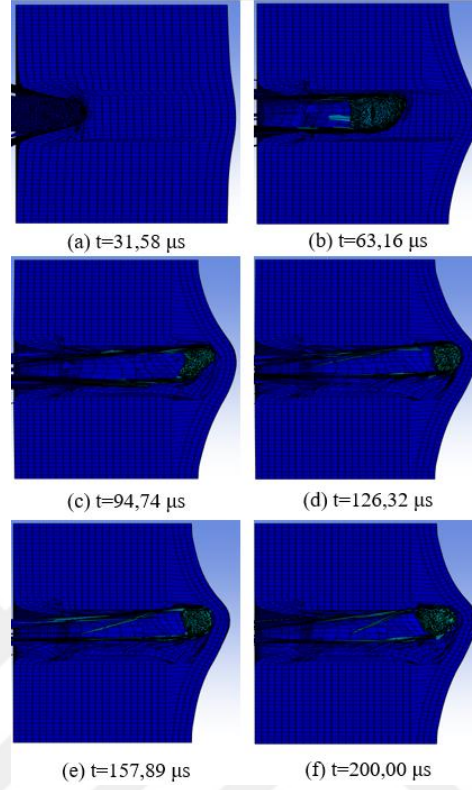
Şekil 4.64 : $t_i + p_u + 100p_e + t_i$ zamana bağlı deformasyon durumu



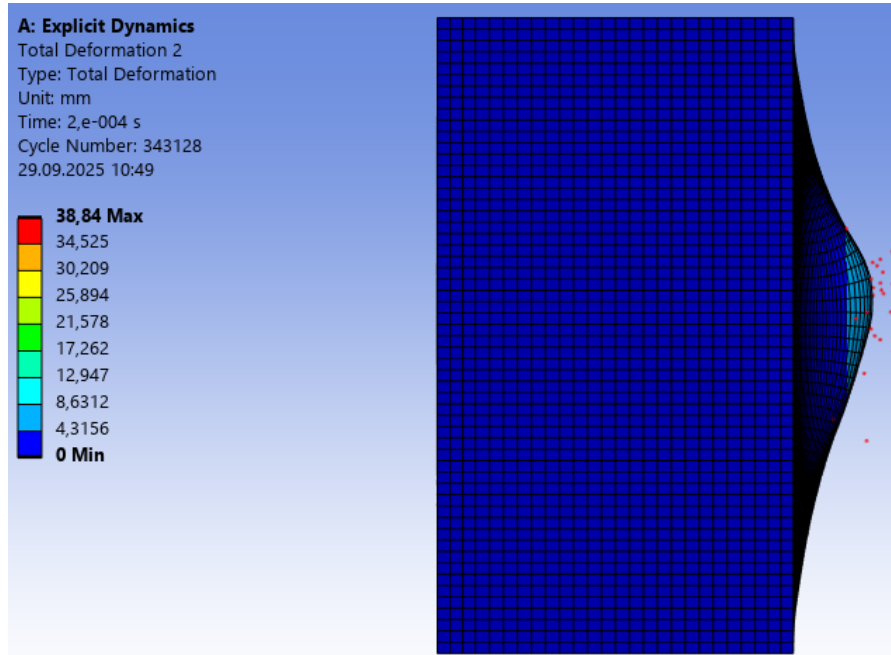
Şekil 4.65 : $t_i + p_u + 100p_e + t_i$ maksimum deformasyon

Matias Garcia ve arkadaşları çalışmalarında, ön yüzde kompozit metal köpük, arka yüzde alüminyum plaka (Al 7075-T6) olacak şekilde bir hedef malzemesi modellemişlerdir (Garcia-Avila et al., 2015). 300x300 mm ebatlarında hazırlanan hedef malzemesi 7,62x51 mm FMJ M80 mermi etkisine maruz bırakılmıştır. Ortalama 837 m/s hızla çarpmaya uğrayan hedefte delinme oluşmamış ve arka yüzünde 15,17 mm çökme meydana gelmiştir. 5 nolu numune için gerçekleştirdiğimiz sonlu eleman analizinde hedef arka yüzünde meydana gelen çökme derinliği mesafesi 33,92 mm olarak görülmektedir. Literatürde kullanılan hedef malzemenin yoğunluğu 5,50 g/cm³'dir. Sayısal testlerimizde kullanılan malzemeye ait yoğunluk ise 5,36 g/cm³'dir. Yoğunluk olarak benzerlik gösteren bu iki hedef malzemesi arasında ortaya çıkan arka yüz deformasyonunun 2 ana sebebi olduğu düşünülmektedir. Bunlardan birincisi, sayısal analizlerde kullanılan hedef numunelerin ebat farklılıkları, ikincisi ise literatürde kullanılan hedef malzeme arkasına yerleştirilen 1 MPa basınca sahip olan kil tabakasıdır.

7 nolu hedef numuneye (ti+100pe+ti) ait analiz sonuçlarına bakıldığında, mermi çekirdeğinin hedef içerisinde saplanıp kaldığı görülmektedir. Bu doğrultuda zamana bağlı oluşan hasar durumu Şekil 4.66'da gösterilmektedir. Ayrıca bu numunenin analiz sonucu arka yüzde oluşan çökme derinliği mesafesi 38,84 mm'dir. Arka yüzde oluşan maksimum deformasyon Şekil 4.67'de gösterilmiştir. 7 nolu hedef numuneye ait arka yüz deformasyon miktarının NIJ 0101.06 standardına göre Level III şartlarını sağladığı anlaşılmıştır.



Şekil 4.66 : $t_i+100p_e+t_i$ zamana bağlı deformasyon durumu

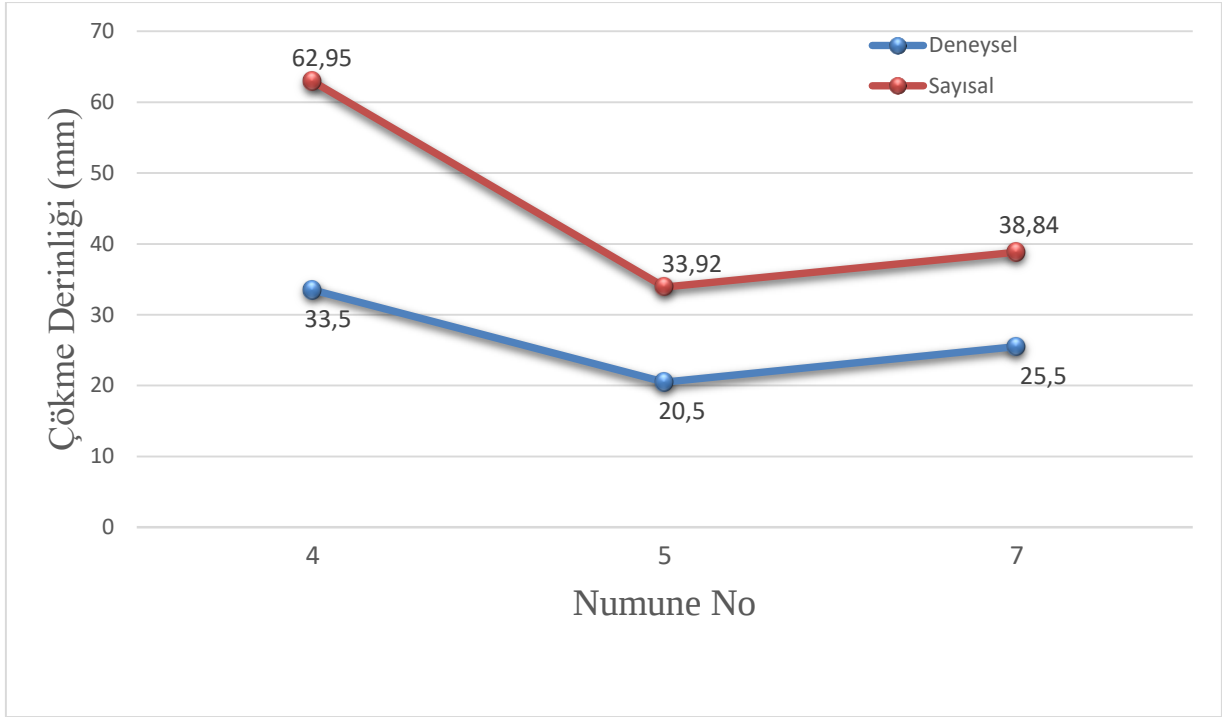


Şekil 4.67 : $t_i+100p_e+t_i$ maksimum deformasyon

Toplamda 6 adet hedef numune üzerinde gerçekleştirilen sayısal analizler sonucunda ortaya çıkan sonuçlar, deneysel test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.2’de gösterilen sayısal ve deneysel test verileri birbirlerine yakın benzerlik göstermektedir. Delinmenin yaşanmadığı 4, 5 ve 7 numaralı hedef numunelerin arka yüz deformasyon miktarlarına ait deneysel ve balistik test sonuçlarının birbirine olan oranı çizelgenin en sağ sütununda yer almaktadır. Bu oranlar incelendiğinde birbirine yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. D/S (Deneysel test deformasyon miktarının sayısal test deformasyon miktarına oranı) oranının 0,53 ila 0,66 arasında değişkenlik göstermesi, sayısal analizlerin deneysel testlerle uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca deneysel ve sayısal test sonucu zırh arka yüzünde oluşan çökme miktarlarının birbirleri ile son derece uyumlu ölçümler verdiği Şekil 4.68’de görülmektedir.

Çizelge 4.2 : Deneysel ve sayısal test sonuçları

Numune No	İsimlendirme	Deneysel Test		Sayısal Test		D/S
		Delinme durumu	Ortalama Çökme derinliği (mm)	Delinme durumu	Ortalama Çökme derinliği (mm)	
1	100pe	Var	-	Var	-	-
2	ti+pu+60pe	Var	-	Var	-	-
3	ti+60pe+pu	Var	-	Var	-	-
4	ti+pu+100pe+pu	Yok	33,5	Yok	62,95	0,53
5	ti+pu+100pe+ti	Yok	20,5	Yok	33,92	0,60
7	ti+100pe+ti	Yok	25,5	Yok	38,84	0,66



Şekil 4.68 : Deneyisel ve sayısal test sonucu zırh arka yüzünde oluşan çökme miktarları grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımı, alüminyum bal peteği, poliüre kaplama ve uhmwpe kumaş tabakalarından oluşan çok katmanlı kompozit zırh sistemlerinin balistik performansları hem sonlu elemanlar yöntemiyle hem de deneysel olarak araştırılmıştır. 7,62x51 mm kalibreli FMJ M80 tipi mühimmat etkisi altında gerçekleştirilen simülasyonlarda, malzeme sıralamasının arka yüz deformasyonu ve delinme davranışı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Yürütülen deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda;

- 100 tabaka uhmwpe kumaşın biraraya getirilmesi ile oluşturulan hedef numune (100pe) üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve sayısal testler sonucunda delinme gerçekleşmiştir.
- Ön yüzde 1 tabaka Ti6Al4V plaka, hemen arkasında 1 tabaka poliüre ve arka yüzde 60 tabaka uhmwpe kumaştan oluşan hedef numune (ti+pu+60pe) üzerinde deneysel ve sayısal testler gerçekleştirilmiştir. 7,62x51 mm FMJ mermiler ile yapılan deneysel ve sayısal testler sonucunda hedef numune delinmiştir.
- Ön yüzde 1 tabaka Ti6Al4V plaka, hemen arkasında 60 tabaka uhmwpe ve en arkada 1 tabaka poliüreden oluşan hedef numune (ti+60pe+pu) üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve sayısal testler sonucunda, hedefin çarpışma sonrası delindiği görülmüş olup, NIJ 0101.06 Level III şartlarını sağlayamadığı anlaşılmıştır.
- Ön yüzde 1 tabaka Ti6Al4V plaka, hemen arkasında 1 tabaka poliüre, onun arkasında 100 tabaka uhmwpe kumaş ve en arkada ise yine 1 tabaka poliüre oluşturulan hedef numune (ti+pu+100pe+pu) için deneysel testlerde mermi hedef içerisinde kalmış olup, maksimum deformasyon ortalama 33,5 mm olarak gerçekleşmiştir. Aynı malzeme için yapılan sayısal analizler sonucunda maksimum arka yüz deformasyonunun 62,95 mm çıktığı görülmüştür. Deneysel test sonucunda oluşan deformasyon miktarını, sayısal test sonucuna oranlarsak bu değer 0,53 olarak bulunur. İki değer arasındaki farkın deneysel çalışmalarda hedef numune arkasına sabitlenen cam macunun çarpışma esnasında göstermiş olduğu dirençten kaynaklandığı ve bu sebeple deneysel test sonucunun daha düşük çıktığı kabul edilmiştir. Bu sonuç sayısal modelde sınır şartlarının daha iyi modellenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.
- Ön yüzde 1 tabaka Ti6Al4V plaka, hemen arkasında 1 tabaka poliüre, onun arkasında 100 tabaka uhmwpe kumaş ve en arkada ise 1 tabaka Ti6Al4V plaka ile oluşturulan

hedef numuneye (ti+pu+100pe+ti) ait gerçekleştirilen deneysel ve sayısal test sonuçlarına bakılınca her iki durumda da hedef numunelerin mermiyi durdurmada başarılı oldukları tespit edilmiştir. Deneysel testlerde ortaya çıkan maksimum arka yüz deformasyonu 20,5 mm iken, sayısal test sonuçlarına göre bu değer 33,92 mm olarak görülmüştür. Deneysel test sonucunda oluşan deformasyon miktarını, sayısal test sonucuna oranlarsak bu değer 0,60 olarak bulunur. Yine deneysel testlerde destek malzemesi olarak kullanılan cam macununun, deformasyon miktarını düşürdüğü bu örnekte de görülmüştür.

- Ön yüzde 1 tabaka Ti6Al4V plaka, hemen arkasında 1 tabaka poliüre, onun arkasında 100 tabaka uhmwpe kumaş ve en arkada ise 1 tabaka Ti6Al4V plaka ile oluşturulan hedef numuneye reçine emdirilerek oluşturulan hedef numuneye (ti+pu+100pe+pu-reçineli) ait yapılan deneysel testler sonucunda merminin hedef içerisinde saplanıp kaldığı tespit edilmiştir. Arka yüzde oluşan maksimum deformasyon miktarı ise ortalama 30 mm olarak gerçekleşmiştir. Bu değer NIJ 0101.06 standardına göre 44 mm'den düşük çıkarak Level III şartlarını sağlamış ve başarılı sonuç vermiştir. Ancak uhmwpe tabakaların kaplamalı olmasından dolayı içine reçine emilmediği gözlemlenmiştir. Bu da reçinenin etkisinin tam olarak ortaya çıkmasını engellemiştir.
- Ön yüzde 1 tabaka Ti6Al4V plaka, onun arkasında 100 tabaka uhmwpe kumaş ve en arkada ise 1 tabaka Ti6Al4V plaka ile oluşturulan hedef numune (ti+100pe+ti) üzerinde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda, hedefin mermiyi durdurmada başarılı olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmalar sonucunda numune arka yüzünde oluşan maksimum çökme derinliğinin ortalama 25,5 mm çıktığı tespit edilmiştir. Sayısal analizler sonucunda arka yüzde çıkan maksimum deformasyon miktarı ise 38,84 mm çıkmıştır. Bu sonuçların da NIJ 0101.06 standardına göre Level III şartlarını sağladığı tespit edilmiştir. Deneysel test sonucunda oluşan deformasyon miktarını, sayısal test sonucuna oranlarsak bu değer 0,66 olarak bulunur.
- Ön yüzde 1 tabaka Ti6Al4V plaka, hemen arkasında 1 tabaka alüminyum bal peteği, onun arkasında 100 tabaka uhmwpe kumaş ve en arkada ise yine 1 tabaka alüminyum bal peteği kullanılarak hazırlanan hedef numuneye (ti+bp+100pe+bp) ait deneysel test sonuçları incelendiğinde, hedefin mermi çekirdeğini durdurmada başarılı olduğu görülmüştür. Numuneye ait arka yüz maksimum deformasyon miktarı ise 32,5 mm

olarak tespit edilmiş olup, Level III şartını sağlamıştır.

- Ön yüzde 1 tabaka Ti6Al4V plaka, arkasında 1 tabaka alüminyum bal peteği, onun arkasında 1 tabaka poliüre, devamında 100 tabaka uhmwpe kumaş, sonrasında 1 tabaka poliüre ve son olarak en arkada da 1 tabaka alüminyum bal peteği kullanılarak hazırlanan hedef numune (ti+bp+pu+100pe+pu+bp) üzerinde deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Çıkan sonuçlara göre malzemenin mermi çekirdeğini durdurmada başarılı sonuç verdiği ve Level III şartını sağladığı tespit edilmiştir. Numune arka yüzünde oluşan maksimum çökme derinliği ise ortalama 26 mm çıkmıştır.
- Son balistik test için NIJ 0101.06 standardına göre Level IV şartlarını sağlayabilecek bir hedef tasarlanmak istenmiştir. Bu doğrultuda, ön yüzde 1 tabaka Ti6Al4V plaka, hemen arkasında 1 tabaka poliüre, onun arkasında 1 tabaka alüminyum bal peteği, onun arkasında 1 tabaka poliüre, sonrasında 100 tabaka uhmwpe kumaş, sonrasında 1 tabaka poliüre, onun arkasında 1 tabaka alüminyum bal peteği, onun arkasında yine 1 tabaka poliüre ve son olarak en arkada ise 1 tabaka Ti6Al4V plaka kullanılarak hazırlanan hedef numune (ti+pu+bp+pu+100pe+pu+bp+pu+ti) üzerinde deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Bu numunede diğerlerinden farklı olarak 7,62x51 mm kalibreli AP (Zırh delici) mermi kullanılmıştır. Toplamda 3 adet atış gerçekleştirilmiş ve tüm atışların sonucunda, mermi çekirdeği hedefi delip geçmiştir. Dolayısıyla üretimi yapılan bu hedefin (ti+pu+bp+pu+100pe+pu+bp+pu+ti) NIJ 0101.06 Level IV şartlarını sağlayamadığı anlaşılmıştır.

10 farklı hedef numune üzerinde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda, 1, 2 ve 3 numaralı hedeflerin hiçbir şekilde NIJ 0101.06 Level III şartını sağlayamadığı görülmüştür. 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 numaralı hedefler üzerinde yapılan deneysel testler neticesinde merminin hedef içerisinde kaldığı ve numunenin NIJ 0101.06 Level III şartını sağladığı tespit edilmiştir. 10 numaralı hedef için ise NIJ 0101.06 Level IV şartına göre deneysel testler yürütülmüş olup, sonuçlara göre hedefin bu şartı sağlayamadığı belirlenmiştir. Ayrıca 1, 2, 3, 4, 5 ve 7 numaralı hedefler üzerinde yapılan sayısal testler, deneysel testlerle benzerlik göstermiştir. 1, 2 ve 3 numaralı hedeflerde delinme gerçekleşirken, 4, 5 ve 7 numaralı hedefler ise mermiyi durdurmaya başarmıştır. Bu numunelerin arka yüz deformasyon miktarları göz önüne alındığında, deneysel test sonuçları ile sayısal test sonuçları arasındaki artış ve azalışlarda %91 oranında bir benzerlik bulunduğu tespit edilmiştir. Çökme miktarlarındaki

farklılığın ise sınır şartlarının birebir aynı olmamasından kaynaklandığı görülmüştür. Bu oranların birbirine yakın çıkması sayısal testler ile deneylerin tutarlılığını ortaya koymaktadır.

Gelecek çalışmalarda, malzeme sayısı ve kombinasyonları değiştirilerek farklı mühimmat türlerinin etkileri incelenebilir. Ayrıca, zırh sistemlerinin farklı çevresel koşullar (yüksek/düşük sıcaklık, nem, ultraviyole maruziyeti vb.) altındaki davranışları değerlendirilmeli ve zamanla yaşlanma etkileri de göz önüne alınmalıdır. Sayısal analizlerde kullanılan sonlu eleman modellerinin doğruluğu, farklı geometriye sahip ağ yapıları, daha farklı katman malzemeleri ve konfigürasyonları, gerçeğe yakın sınır şartları ile iyileştirilebilir. Son olarak, ağırlık-performans dengesi gözetilerek, hafif ama yüksek dayanımlı hibrit çözümlerin geliştirilmesi, taşınabilir zırh sistemleri için önemli bir potansiyel sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abu Talib, A. R., Abbud, L. H., Ali, A., & Mustapha, F. (2012).** Ballistic impact performance of Kevlar-29 and Al₂O₃ powder/epoxy targets under high velocity impact. *Materials and Design*, 35, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.045>
- Acar, D., Canpolat, B. H., & Cora, Ö. N. (2024).** Ballistic performances of Ramor 500, Armox Advance and Hardox 450 steels under monolithic, double-layered, and perforated conditions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 51(March), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2024.101653>
- Akçay, M., & Erim, M. Z. (1992).** A Study on External Ballistic Charecteristics of a Projectile. *Bulletin of the Technical University of Istanbul*. 45. 515.
- Akdoğan, M. A. (2018).** Alümina Seramik Ön Yüzlü Polietilen Destekli Zırh Malzemesinin Balistik Davranışının Deneysel ve Sayısal Analizi (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Alarçin, S. (2021).** Ultra Yüksek Yoğunluklu Polietilen ile Karbon Fiber Prepreglerden Hibrit Zırh Geliştirilmesi ve Balistik Özelliklerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Alavi Nia, A., Razavi, S. B., & Majzoobi, G. H. (2008).** Ballistic limit determination of aluminum honeycombs-Experimental study. *Materials Science and Engineering A*, 488(1–2), 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.044>
- Ali, A., Adawiyah, R., Rassiah, K., Ng, W. K., Arifin, F., Othman, F., Hazin, M. S., Faidzi, M. K., Abdullah, M. F., & Megat Ahmad, M. M. H. (2019).** Ballistic impact properties of woven bamboo- woven E-glass- unsaturated polyester hybrid composites. *Defence Technology*, 15(3), 282–294. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.09.001>
- Arslan, K., & Gunes, R. (2018).** Experimental damage evaluation of honeycomb sandwich structures with Al/B₄C FGM face plates under high velocity impact loads. *Composite Structures*, 202 (December 2017), 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.087>
- ASTM International. (2022).** *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* (ASTM D638-22). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0638-22>
- Atapek, H. (2011).** Bor Katkılı Bir Zırh Çeliğinin Fiziksel Metalurjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi ve Balistik Performansının Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Aydin, M., & Apalak, M. K. (2016).** Experimental damage analysis of Al/SiC functionally graded sandwich plates under ballistic impact. *Materials Science and Engineering A*, 671, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.06.048>

- Aydın, M. (2014).** Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Davranışı (Doktora Tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Ayten, A. İ., Taşdelen, M. A., & Ekici, B. (2020).** An experimental investigation on ballistic efficiency of silica-based crosslinked aerogels in aramid fabric. *Ceramics International*, 46(17), 26724–26730. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.07.147>
- Ayvaz, M. (2016).** T/M Yöntemi ile Üretilen Katman İçeren, Çok Katmanlı Kompozit Zırh Plakalarının Balistik Dayanımının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Bajya, M., Majumdar, A., Butola, B. S., Arora, S., & Bhattacharjee, D. (2021).** Ballistic performance and failure modes of woven and unidirectional fabric based soft armour panels. *Composite Structures*, 255(April 2020), 112941. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112941>
- Bajya, M., Majumdar, A., Butola, B. S., Verma, S. K., & Bhattacharjee, D. (2020).** Design strategy for optimising weight and ballistic performance of soft body armour reinforced with shear thickening fluid. *Composites Part B: Engineering*, 183(December 2019), 107721. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107721>
- Barnes, H. A. (1989).** Shear-Thickening ("Dilatancy") in Suspensions of Nonaggregating Solid Particles Dispersed in Newtonian Liquids. *J. Rheol.*, 33, 329–366. <https://doi.org/10.1122/1.550017>
- Berk, B., Karakuzu, R., & Toksoy, A. K. (2017).** An experimental and numerical investigation on ballistic performance of advanced composites. *Journal of Composite Materials*, 51(25), 3467–3480. <https://doi.org/10.1177/0021998317691810>
- Bhav Singh, B., Sukumar, G., Bhattacharjee, A., Siva Kumar, K., Balakrishna Bhat, T., & Gogia, A. K. (2012).** Effect of heat treatment on ballistic impact behavior of Ti-6Al-4V against 7.62mm deformable projectile. *Materials and Design*, 36, 640–649. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.030>
- Bhav Singh, B., Sukumar, G., Sivakumar, K., Madhu, V., & Arockia Kumar, R. (2019).** A comparative study on the ballistic performance of high nitrogen steel and rolled homogeneous armour steel against 7.62mm ball and 12.7mm armour piercing projectiles. *Materials Today: Proceedings*, 41, 1188–1194. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.345>
- Børvik, T., Dey, S., & Clausen, A. H. (2009).** Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 36(7), 948–964. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003>
- Bozdoğan, F., Üngün, S., Temel, E., & Süpüren Mengüç, G. (2015).** Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri. *Tekstil ve Mühendis*, 22(98), 84–103. <https://doi.org/10.7216/130075992015229808>

- Brady, J. F., & Bossis, G. (1988).** Stokesian dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 20(1), 111–157. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.20.010188.000551>.
- Braga, F. D. O., Milanezi, T. L., Monteiro, S. N., Louro, L. H. L., Gomes, A. V., & Lima, É. P. (2018).** Ballistic comparison between epoxy-ramie and epoxy-aramid composites in Multilayered Armor Systems. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(4), 541–549. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.018>
- Braga, F. de O., Bolzan, L. T., Lima, É. P., & Monteiro, S. N. (2017).** Performance of natural curaua fiber-reinforced polyester composites under 7.62 mm bullet impact as a stand-alone ballistic armor. *Journal of Materials Research and Technology*, 6(4), 323–328. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.08.003>
- Burcu Apak Gülsever. (2018).** Balistik Kullanıma Uygun Bor Karbür Seramik Kompozitlerinin Spark Plazma Sinterleme Yöntemi İle Üretimi ve Karakterizasyonu (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Carrillo, J. G., Gamboa, R. A., Flores-Johnson, E. A., & Gonzalez-Chi, P. I. (2012).** Ballistic performance of thermoplastic composite laminates made from aramid woven fabric and polypropylene matrix. *Polymer Testing*, 31(4), 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.02.010>
- Catherall, A. A., Melrose, J. R., & Ball, R. C. (2000).** Shear thickening and order-disorder effects in concentrated colloids at high shear rates. *J. Rheol.*, 44, 1–25. <https://doi.org/10.1122/1.551072>
- Cha, J. H., Kim, Y. H., Sathish Kumar, S. K., Choi, C., & Kim, C. G. (2020).** Ultra-high-molecular-weight polyethylene as a hypervelocity impact shielding material for space structures. *Acta Astronautica*, 168(December 2019), 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.12.008>
- Chatterjee, V. A., Verma, S. K., Bhattacharjee, D., Biswas, I., & Neogi, S. (2021).** Manufacturing of dilatant fluid embodied Kevlar-Glass-hybrid-3D-fabric sandwich composite panels for the enhancement of ballistic impact resistance. *Chemical Engineering Journal*, 406(August 2020), 127102. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127102>
- Cheeseman, B. A., & Bogetti, T. A. (2003).** Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. 61, 161–173. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00029-1)
- Chen, X., Zhu, F., & Wells, G. (2013).** An analytical model for ballistic impact on textile based body armour. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1508–1514. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.08.005>
- Chu, D., Wang, Y., Yang, S., Li, Z., Zhuang, Z., & Liu, Z. (2021).** Analysis and design for the comprehensive ballistic and blast resistance of polyurea-coated steel plate. *Defence Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.11.010>

- Çolpankan, O. (2013).** Development Of Liquid Body Armor Systems (Yüksek Lisans Tezi). İzmir Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İzmir.
- Decker, M. J., Halbach, C. J., Nam, C. H., Wagner, N. J., & Wetzel, E. D. (2007).** Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics. *Composites Science and Technology*, 67(3–4), 565–578. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.007>
- Deniz, H. (2009).** Çift Fazlı Bir Çeliğin 7,62 mm’lik Zırh Delici Mermi Karşısında Balistik Davranışının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Durmuş, A., Güden, M., Gülçimen, B., Ülkü, S., & Musa, E. (2011).** Experimental investigations on the ballistic impact performances of cold rolled sheet metals. *Materials and Design*, 32(3), 1356–1366. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.016>
- Dyatkin, B., & Gamache, R. M. (2018).** Ballistic performance of front-facing fluoropolymer-coated armor composites. *International Journal of Impact Engineering*, 114(April 2017), 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.12.005>
- Ercümen, K. M. (2024).** Tek Fazlı ve Çok Fazlı Akıllı Akışkan Emprenye Edilmiş Aramid, Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen ve Hibrit Kompozit Yapıların Balistik Performansının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Erdoğan T. (2011).** Development Of Liquid Armor Materials And Rheological Behavior of Shear Thickening Fluids (STFs) (Yüksek Lisans Tezi). İzmir Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İzmir.
- Eryıldız, E., & Akdoğan Eker, A. (2015).** Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 7(4), 8–12. <https://doi.org/10.29137/umagd.379785>
- Evcı, C. (2009).** Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Felix, C. B. C., Medeiros, K. A. R., & Barbosa, C. R. H. (2023).** Modeling of Ammunition Dynamic Pressure Measurement Chain in Ballistic Tests. 23(8081).
- Flores-Johnson, E. A., Saleh, M., & Edwards, L. (2011).** Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 38(12), 1022–1032. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.08.005>
- Fras, T., Roth, C. C., & Mohr, D. (2019).** Dynamic perforation of ultra-hard high-strength armor steel: Impact experiments and modeling. *International Journal of Impact Engineering*, 131(November 2018), 256–271. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.05.008>

- Frith, W. J., d'Haene, P., Buscall, R., & Mewis, J. (1996).** Shear thickening in model suspensions of sterically stabilized particles. *J. Rheol.*, 40, 531–548. <https://doi.org/10.1122/1.550791>
- Garcia-Avila, M., Portanova, M., & Rabiei, A. (2015).** Ballistic performance of composite metal foams. *Composite Structures*, 125, 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.01.031>
- Gowda, D., & Bhat, R. S. (2024).** Bio-inspired helicoidal hemp/basalt/polyurethane rubber bio-composites: Experimental, numerical and analytical ballistic impact study with residual velocity prediction using artificial neural network. *Industrial Crops and Products*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119600>
- Guo, G., Alam, S., & Peel, L. D. (2021).** An investigation of the effect of a Kevlar-29 composite cover layer on the penetration behavior of a ceramic armor system against 7.62 mm APM2 projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 157(February), 104000. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104000>
- Gürol, U., Çelik, C., Çoban, O., Göçmen, M., & Koçak, M. (2025).** Mechanical and ballistic performance of high-hardness armor steels welded with ASS-LHF sandwich joint design. 42(November 2024). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.111209>
- Haris, A., Lee, H. P., & Tan, V. B. C. (2018).** An experimental study on shock wave mitigation capability of polyurea and shear thickening fluid based suspension pads. *Defence Technology*, 14(1), 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.004>
- Hu, D., Zhang, Y., Shen, Z., & Cai, Q. (2017).** Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems. *Ceramics International*, 43(13), 10368–10376. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.05.071>
- Hu, P., Cheng, Y., Zhang, P., Liu, J., Yang, H., & Chen, J. (2021).** A metal/UHMWPE/SiC multi-layered composite armor against ballistic impact of flat-nosed projectile. *Ceramics International*, 47(16), 22497–22513. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.259>
- Humphrey, C., & Kumaratilake, J. (2016).** Ballistics and anatomical modelling – A review. *Legal Medicine*, 23, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2016.09.002>
- International Organization for Standardization. (2000).** *Textiles—Tear properties of fabrics—Part 2: Determination of tear force of trouser-shaped test specimens (Single tear method)* (ISO Standard No. 13937-2:2000).
- International Organization for Standardization. (2013).** *Textiles—Tensile properties of fabrics—Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method* (ISO Standard No. 13934-1:2013). Retrieved from <https://www.iso.org/standard/60666.html>

- Iqbal, M. A., Senthil, K., Sharma, P., & Gupta, N. K. (2016).** An investigation of the constitutive behavior of Armox 500T steel and armor piercing incendiary projectile material. *International Journal of Impact Engineering*, 96, 146–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.05.017>
- Jáquez-Muñoz, J. M., Gaona-Tiburcio, C., Mendez-Ramirez, C. T., Carrera-Ramirez, M. G., Baltazar-Zamora, M. A., Santiago-Hurtado, G., Lara-Banda, M., Estupiñan-Lopez, F., Nieves-Mendoza, D., & Almeraya-Calderon, F. (2024).** Corrosion of Anodized Titanium Alloys. 14(809).
- Karakoç, H. (2017).** TM Yöntemi ile B4C Takviyeli AA6061 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Mekanik Özelliklerinin ve Balistik Performansının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Karakoç, H., Karabulut, Ş., & Çıtak, R. (2018).** Study on mechanical and ballistic performances of boron carbide reinforced Al 6061 aluminum alloy produced by powder metallurgy. *Composites Part B: Engineering*, 148(April), 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.043>
- Khan, M. K., Iqbal, M. A., Bratov, V., Morozov, N. F., & Gupta, N. K. (2020).** An investigation of the ballistic performance of independent ceramic target. *Thin-Walled Structures*, 154(May), 106784. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106784>
- Koç, E. (2018).** Betonarme Kirişlerin Cam Takviyeli Polimer Kaplı Alüminyum Bal Peteği (Honeycomb) Kompozitlerle Güçlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Kong, L. Q., Wang, J. X., Song, H. P., Tang, K., Chen, R. M., Li, Y. B., & Gong, H. X. (2024).** Effect of modified method based on recoil motion on interior ballistic performance of ultralight high-low pressure artillery. *Case Studies in Thermal Engineering*, 53.
- Kösedağ, E. (2020).** Polimer - Metal Matrisli Kompozitlerden Oluşturulmuş Sandviç Yapıların Balistik Davranışları (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Kote, V. B., Frazer, L. L., Hostetler, Z. S., Jones, D. A., Davis, M., Op't Eynde, J., Kait, J., Pang, D., Bass, D., Koser, J., Shah, A., Yoganandan, N., Stemper, B., Bentley, T., & Nicolella, D. P. (2024).** Investigating the Impact of Blunt Force Trauma: A Probabilistic Study of Behind Armor Blunt Trauma Risk. *Annals of Biomedical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10439-024-03564-3>
- Kurban, N. (2022).** Nano Grafen Katkılı Kevlar ve Jüt Elyaf Kompozitlerin Darbe ve Balistik Davranışının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Lawton, B. (2004).** Weapons Technology. In *Various and Ingenious Machines. Volume Two: Manufacturing and Weapons Technology* (Vol. 2).

- Lee, J.-H., Loya, P. E., Lou, J., & Thomas, E. L. (2014).** Dynamic mechanical behavior of multilayer graphene via supersonic projectile penetration. 346(6213). <https://doi.org/10.1126/science.1258544>
- Li, X.-L., & Guo, J.-G. (2023).** Theoretical investigation on energy absorption of single-layer graphene under ballistic impact. *Thin-Walled Structures*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111069>
- Li, X., & Xing, M. (2018).** A reinvestigation of a superhard phase Cm-carbon. *Computational Materials Science*, 143, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.10.049>
- Liu, W., Chen, Z., Chen, Z., Cheng, X., Wang, Y., Chen, X., Liu, J., Li, B., & Wang, S. (2015).** Influence of different back laminate layers on ballistic performance of ceramic composite armor. *Materials and Design*, 87, 421–427. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.024>
- Lu, Y., Zhang, Q., Xue, Y., Liu, W., & Long, R. (2020).** High-Velocity Impact Performance of Aluminum and B4C/UHMW-PE Composite Plate for Multi-Wall Shielding. *Applied Sciences*, 10, 721.
- Lu, Z., Yuan, Z., Chen, X., & Qiu, J. (2019).** Evaluation of ballistic performance of STF impregnated fabrics under high velocity impact. *Composite Structures*, 227(July), 111208. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111208>
- Macosko, C. W. (1994).** *Rheology Principles, Measurements, and Applications*. New York: Wiley–VCH.
- Majzoobi, G. H., Morshedi, H., & Farhadi, K. (2018).** The effect of aluminum and titanium sequence on ballistic limit of bi-metal 2/1 FMLs. *Thin-Walled Structures*, 122(October 2016), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.10.006>
- Maranzano, B. J., & Wagner, N. J. (2013).** The effect of particle size on reversible shear thickening of concentrated colloidal dispersions. (Original Publication Year 2001). <https://doi.org/10.1063/1.1373687>
- Mercedes, L., Viella, A., Bernat-Maso, E., & Gil, L. (2025).** Durability and impact performance of concrete beam coated with polyurea. *Structures*, 79(April), 109401. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109401>
- Mishra, V. D., Mishra, A., Singh, A., Verma, L., & Rajesh, G. (2022).** Ballistic impact performance of UHMWP fabric impregnated with shear thickening fluid nanocomposite. *Composite Structures*, 281(June), 114991. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114991>
- Mohotti, D., Ngo, T., Raman, S. N., & Mendis, P. (2015).** Analytical and numerical investigation of polyurea layered aluminium plates subjected to high velocity projectile

- impact. *Journal of Materials & Design*, 82, 1–17.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.036>
- Moura, A., Ipaves, B., Galvao, D. S., & da Silva Autreto, P. A. (2024).** Ballistic properties of highly stretchable graphene kirigami pyramid. *Computational Materials Science*, 232(November 2023), 112558. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2023.112558>
- Mutu, H. B., & Özer, A. (2022).** Alümina, Grafen/Epoksi ve UHMWPE' den Oluşan Çok Katmanlı Balistik Zırhın Performansının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle İncelenmesi. *Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research*, 11, 180–193. <http://dergipark.gov.tr/gbad>
- Nikhil Kumar, K., Bharat Kumar, C. H., Hemanth Kumar, K., & Noolvi, B. (2020).** Investigation of composite sandwich plates for ballistic armor application. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1738–1742. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.651>
- Nugroho, A., Triastuti, Hidayat, I., Sufiandi, S., & Syahril, A. Z. (2025).** Veneer-aramid Composites Performances in Multilayer Armor Systems against Level III Ballistic Threat. *Evergreen*, 12(1), 125–134. <https://doi.org/10.5109/7342444>
- Okhawilai, M., Hiziroglu, S., & Rimdusit, S. (2018).** Measurement of ballistic impact performance of fiber reinforced polybenzoxazine/polyurethane composites. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 130, 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.006>
- Oliveira, M. S., Filho, F. D. C. G., Pereira, A. C., Nunes, L. F., Luz, F. S. Da, Braga, F. D. O., Colorado, H. A., & Monteiro, S. N. (2019).** Ballistic performance and statistical evaluation of multilayered armor with epoxy-fique fabric composites using the Weibull analysis. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 5899–5908. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.064>
- Ongun, A. (2019).** Ön Yüzündeki Her Seramiği Karbon-Fiber Kompozitle Sarılmış Çelik Zırhların Balistik Davranışlarının İncelenmesi (Doktora Tezi). Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Özer, M., Ferikel, K., Yılmazçoban, İ. K., Demircioğlu, T. K., Balıkoğlu, F., & Çivi, C. (2024).** Armox 500T Zırh Çeliği İçeren Hibrit Zırh Plakalarının 7.62 mm Tam Metal Kaplama Mermi Karşısındaki Balistik Davranışının Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(3), 1176–1191. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1444509>
- Özgültekin, S. E. (2012).** Balistik Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzeme Kombinasyonlarının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Özşahin, E., & Tolun, S. (2009).** Polietilen destekli AA 7075 T651 levhalarda katman sıralamasının balistik dayanıma etkisi. *İtüdergisi*, 212, 72–80.

- Öztemür, A. (2024).** Zırh Delici Hafif Silah Mühimmatına Dayanıklı Kompozit Zırh Geliştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Popescu, C., Sandu, S., Deleanu, L., Şeiciu, L., & Călinescu, D. (2024).** Experimental study of twaron T730 for two threats. *XXX*, 2024. <https://doi.org/10.2478/kbo-2024-0093>
- Rahimijonoush, A., & Bayat, M. (2020).** Experimental and numerical studies on the ballistic impact response of titanium sandwich panels with different facesheets thickness ratios. *Thin-Walled Structures*, 157(July 2019), 107079. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107079>
- Rathod, S., Tiwari, G., & Chougale, D. (2020).** Ballistic performance of ceramic–metal composite structures. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.759>
- Reddy, P. R. S., Reddy, T. S., Madhu, V., Gogia, A. K., & Rao, K. V. (2015).** Behavior of E-glass composite laminates under ballistic impact. *Materials and Design*, 84, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.094>
- Reddy, T. S., Reddy, P. R. S., & Madhu, V. (2021).** Dynamic Behaviour of Carbon/Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Hybrid Composite Laminates Under Ballistic Impact. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 7(3), 403–413. <https://doi.org/10.1007/s40870-020-00275-3>
- Risby, M. S., Wong, S. V., Hamouda, A. M. S., Khairul, A. R., & Elsadig, M. (2008).** Ballistic performance of coconut shell powder/twaron fabric against non-armour piercing projectiles. *Defence Science Journal*, 58(2), 248–263. <https://doi.org/10.14429/dsj.58.1645>
- Saleem, I. A., Ahmed, P. S., & Abed, M. S. (2021).** Experimental and numerical investigation of Kevlar and UHMWPE multi-layered armors against ballistic impact. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 0–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.345>
- Sanborn, K., Gentry, T. R., Koch, Z., Valkenburg, A., Conley, C., & Stewart, L. K. (2019).** Ballistic performance of Cross-laminated Timber (CLT). *International Journal of Impact Engineering*, 128(May 2018), 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.11.007>
- Sangroniz, L., Fernandez, M., & Santamaria, A. (2023).** Polymers and rheology : A tale of give and take. *Polymer*, 271(October 2022). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.125811>
- Sazhenkov, N. A., Semenov, S. V., Voronov, L. V., Kurakin, A. D., Nikhamkin, M. S., Baxevanakis, K., Roy, A., Stergiou, T., & Silberschmidt, V. V. (2020).** Polyurea-coated glass-fibre-reinforced laminate under high-speed impact: experimental study. *Procedia Structural Integrity*, 28, 1572–1578. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.129>

- Sen, S., Jamal M, N. Bin, Shaw, A., & Deb, A. (2019).** Numerical investigation of ballistic performance of shear thickening fluid (STF)-Kevlar composite. *International Journal of Mechanical Sciences*, 164(September), 105174. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105174>
- Şenyılmaz, H. K. (2018).** Dilatant Malzemelerin Balistik Özelliklerinin Deneysel Araştırması (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sharma, M., Sharma, V., & Kala, P. (2019).** Optimization of process variables to improve the mechanical properties of FDM structures. *Journal of Physics: Conference Series*, 1240(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1240/1/012061>
- Sözen, E. (2019).** Atık Polipropilen ve Dokuma Cam Lifi İle Desteklenen OSB Panellerin Balistik, Hızlandırılmış UV Yaşlandırma ve Isı İletkenliği Özelliklerinin Belirlenmesi (Doktora Tezi). Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bartın.
- Srivastava, A., Majumdar, A., & Butola, B. S. (2011).** Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid. *Materials Science & Engineering A*, 529, 224–229. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.021>
- Stepanov, E., & Vavilov, S. A. (1997).** The Main Problem of External Ballistics. 33(5), 95–101.
- Stergiou, T., Baxevanakis, K. P., Roy, A., Sazhenkov, N., Nikhamkin, M. A., & Silberschmidt, V. V. (2020).** Ballistic performance of polyurea-coated thin aluminium plates: numerical study. *Procedia Structural Integrity*, 28(2019), 1258–1266. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.107>
- Sun, G., Chen, D., Wang, H., Hazell, P. J., & Li, Q. (2018).** High-velocity impact behaviour of aluminium honeycomb sandwich panels with different structural configurations. *International Journal of Impact Engineering*, 122(February), 119–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.08.007>
- Sun, Y. xiang, Wang, X., Ji, C., Zhao, C. xiao, Liu, P. li, Meng, L., Zhang, K., & Jiang, T. (2020).** Experimental investigation on anti-penetration performance of polyurea-coated ASTM1045 steel plate subjected to projectile impact. *Defence Technology*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.08.005>
- Susilo, M., Arrohman, S., Ariawan, D., Diharjo, K., & Suharty, N. S. (2020).** Tensile and tear properties of curly coconut fiber and natural rubber composite. *AIP Conference Proceedings*, 2262(1). <https://doi.org/10.1063/5.0021605/813513>
- Tan, V. B. C., Tay, T. E., & Teo, W. K. (2005).** Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions. 42, 1561–1576. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.08.013>
- Tang, E., Hou, J., Wang, R., Han, Y., Chen, C., Chang, M., Guo, K., & He, L. (2024).** Energy absorption characteristics of STF impregnated Kevlar fabric coating GFRP

composite structure by projectile high-velocity impact. *Polymer Testing*, 140(September), 108596. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108596>

- Taş, H. (2021).** Çok Duvarlı Karbon Nanotüp Bağlanmış ve Kesme Gerilimi Altında Kalınlaşan Sıvı Emdirilmiş Kumaşların ve Bunlar ile Üretilen Hibrit Tabakalı Kompozitlerin Mekanik ve Balistik Özelliklerinin Araştırılması (Doktora Tezi). Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa .
- Taş, M. K. (2019).** Tabakalı Kompozit Malzemelerin Balistik Zırh Özelliklerinin Geliştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Tombul, M. (2024).** Zırh Üretiminde Kullanılan Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Mekanik Verimliliğinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Amasya.
- Tshephe, T. S., Akinwamide, S. O., Olevsky, E., & Olubambi, P. A. (2022).** Additive manufacturing of titanium-based alloys- A review of methods, properties, challenges, and prospects. *Heliyon*, 8(February). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09041>
- Wang, L., Kong, J., Chu, D., Wang, Y., Wang, T., & Liu, Z. (2025).** Enhancing ballistic performance: Effect of polyurea coating on backface deformation of UHMWPE laminates. *Composite Structures*, 355(November 2024), 118846. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2025.118846>
- Wang, X., Zhang, J., Bao, L., Yang, W., Zhou, F., & Liu, W. (2020).** Enhancement of the ballistic performance of aramid fabric with polyurethane and shear thickening fluid. *Materials and Design*, 196, 109015. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109015>
- Xu, Y. J., Zhang, H., & Huang, G. Y. (2022).** Ballistic performance of B4C/STF/Twaron composite fabric. *Composite Structures*, 279(September 2021). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114754>
- Yahaya, M. A., Ruan, D., Lu, G., & Dargusch, M. S. (2015).** Response of aluminium honeycomb sandwich panels subjected to foam projectile impact - An experimental study. *International Journal of Impact Engineering*, 75, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.07.019>
- Yalçın, E. B. (2012).** Farklı Kumaş ve Farklı Yöntemlerle Üretilmiş CTP Kompozitlerin Balistik Davranışlarının İncelenmesi (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yıldırım, M. (2019).** Poliüre Kaplı Metal Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi Ve Zırh Malzemesi Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Youssef, G., Reed, N., Huynh, N. U., Rosenow, B., & Manlulu, K. (2020).** Experimentally-validated predictions of impact response of polyurea foams using viscoelasticity based on

- bulk properties. *Mechanics of Materials*, 148(April), 103432.
<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103432>
- Zhang, P., Wang, Z., Zhao, P., Zhang, L., Jin, X. C., & Xu, Y. (2019).** Experimental investigation on ballistic resistance of polyurea coated steel plates subjected to fragment impact. *Thin-Walled Structures*, 144(July), 106342.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106342>
- Zhikharev, M. V., Sapozhnikov, S. B., Kudryavtsev, O. A., & Zhikharev, V. M. (2019).** Effect of tensile preloading on the ballistic properties of GFRP. *Composites Part B: Engineering*, 168(February), 524–531.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.026>
- Zhu, S., Huang, Y., & Li, T. (2014).** Extremely compliant and highly stretchable patterned graphene. *Applied Physics Letters*, 104(17). <https://doi.org/10.1063/1.4874337>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ömer Faruk ÇİÇEK

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Ankara Gazi Üniversitesi, Mühendislik/Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2019, Malatya İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Doktora** : 2025, Malatya İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2013 – 2014
Kontrol Mühendisi
Güven Yapı Denetim Ltd. Şti.
- 2017 – 2024
Proje ve Kontrol Mühendisi
Malatya Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Hizmetleri Dairesi Başkanlığı, Ulaşım Planlama Şube Müdürlüğü
- 2024 – 2024
Genel Sekreter Danışmanlığı
Malatya Büyükşehir Belediyesi Genel Sekreterliği
- 2024 – Devam ediyor
Proje ve Kontrol Mühendisi
Malatya Büyükşehir Belediyesi, Fen İşleri Dairesi Başkanlığı, Etüt Proje ve Kesin Hesap Şube Müdürlüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- **Çiçek, Ö.F., Ayaz, Y., & Karakoç, M.B., (2025).** Investigation of hydrostatic pressure resistance in composite pipes reinforced with glass and aramid fibers. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*.