

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKANİK ANABİLİM DALI**

**POLİMER KAPLI ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER
AĞIRLIKLİ POLİETİLEN KOMPOZİT LEVHALARIN
BALİSTİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

**Hazırlayan
Erhan ÖZDEMİR**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN
İkinci Danışman
Doç. Dr. Murat AYDIN**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2023
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKANİK ANABİLİM DALI**

**POLİMER KAPLI ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER
AĞIRLIKLİ POLİETİLEN KOMPOZİT LEVHALARIN
BALİSTİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Erhan ÖZDEMİR**

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN
İkinci Danışman
Doç. Dr. Murat AYDIN**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FYL-2022- 11926 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ağustos 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Erhan ÖZDEMİR

“Polimer Kaplı Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen Kompozit Levhaların Balistik Performansının Araştırılması” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Erhan ÖZDEMİR

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN

**Makine Mühendisliği ABD Başkanı**

Prof. Dr. Orhan AKANSU

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her türlü desteği sunan, bilgi birikimini paylaşan, fedakârlıkta bulunan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sırasında gerçekleştirilen balistik testlerin ve sonuçların değerlendirilmesi sürecinde yardımlarını esirgemeyen ve bilgilerini paylaşan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Murat Aydın'a teşekkür borçluyum. Aynı şekilde, poliüre kaplı kompozit malzemelerin temini ve poliüre kaplanması konusunda desteklerini esirgemeyen Ata Teoman Bey'e de teşekkürlerimi sunuyorum.

Eğitim hayatım boyunca beni her alanda destekleyen, bu günlerimin mimarı canım annem Şengül ÖZDEMİR'e, göstermiş olduğu sabır, anlayış ve inanç, bana verdiği destek, iyi ve kötü günümde yanımda olan çok değerli eşim, hayat arkadaşım, Fatmatül Zehra ÖZDEMİR'e ve varlığı ile ailemize güç veren oğlum, Zeynel Efe ÖZDEMİR'e sonsuz teşekkür ederim.

Her koşulda yanımda olan ve desteğini esirgemeyen arkadaşım Ali SANDIKÇIOĞLU'na teşekkür ederim.

Her zaman her konuda yanımda olan, beni destekleyen kıymetli aileme ve dostlarıma teşekkür ederim.

Erhan ÖZDEMİR

Ağustos 2023, KAYSERİ

POLİMER KAPLI ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER AĞIRLIKLİ POLİETİLEN KOMPOZİT LEVHALARIN BALİSTİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Erhan ÖZDEMİR

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2023
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Umut ÇALIŞKAN**

ÖZET

Bu çalışmada, sıcak pres yöntemi ile üretilen ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kompozit levhaların parçacık benzetimli mermi karşısındaki yüksek hızlı darbe davranışı incelenmiştir. Zırh sistemlerinde parçacık kalkanı ve miğfer olarak kullanılan fiber takviyeli kompozit sistemlerin karşı karşıya olduğu tehditlere karşı koruma düzeyi oldukça önem arz etmektedir. Son yıllardaki trend ise termoplastik kompozitler üzerindedir. Bu çalışmada, 45 katman olarak sıcak pres yöntemi ile üretilmiş ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kompozit levhaların poliüre kaplaması etkisi ve balistik davranışları gaz silah sistemi ile farklı hızlarda araştırılmıştır. Test sırasında numunelerin deformasyon geometrileri yüksek hızlı kamera yardımıyla belirlenmiştir. Testler Poliüre kaplamalı Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UYMAPE) kompozit levhalara ve Poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhalara 715 - 1010 m/s arasında olmak üzere 3 farklı hız altında gerçekleştirilmiş. Yapının delinme direnci 715 m/s ve 895 m/s hızlarında aşılamamış olup 995 m/s altında ancak aşılabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen, poliüre kaplama, balistik, parçacık tesiri,

**INVESTIGATION OF THE BALLISTIC PERFORMANCE OF POLYMER
COATED ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE
COMPOSITE SHEETS**

Erhan ÖZDEMİR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, August 2023

Supervisor: Asst. Prof. Umut ÇALIŞKAN

ABSTRACT

In this study, the high-speed impact behavior of ultra-high molecular weight polyethylene composite sheets produced by hot pressing method against a particle simulated projectile was investigated. The level of protection against the threats faced by fiber reinforced composite systems used as spall liner and helmets in armor systems is very important. The trend in recent years is on thermoplastic composites. In this study, the effect of polyurea coating and ballistic behavior of ultra-high molecular weight polyethylene composite sheets produced by hot pressing method as 45 layers were investigated at different speeds with a gas gun system. During the test, the deformation geometries of the specimens were determined with the help of a high-speed camera. The tests were performed on Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UYMAPE) composite sheets with polyurea coating and UYMAPE composite sheets without polyurea coating under 3 different speeds between 715 - 1010 m/s. The perforation resistance of the structure could not be exceeded at 715 m/s and 895 m/s and could only be exceeded under 995 m/s.

Keywords: Ultra-high molecular weight polyethylene, polyurea coating, ballistics, particle impact,

İÇİNDEKİLER

POLİMER KAPLI ULTRA YÜKSEK MOLEKÜLER AĞIRLIKLIL POLİETİLEN KOMPOZİT LEVHALARIN BALİSTİK PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xii
TABLÖLAR LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Kompozit Malzemeler.....	4
1.1.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	5
1.1.2. Kompozit Malzemelerin Yapısı	7
1.1.3. Matris Malzemesine Göre Kompozitler	8
1.1.3.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)	9
1.1.3.3. Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)	10
1.1.4 Üretim yöntemleri.....	10
1.1.4.1 Sıvı Fazda Üretim Teknikleri.....	11

1.1.4.1.2. Yerinde İmalat (İn-situ).....	12
1.1.4.1.3. Püskürtme	13
1.1.4.1.4. Karıştırma Döküm	14
1.1.4.2 Katı Hal Üretim Teknikleri.....	15
1.1.4.2.1. Toz Metalurjisi	15
1.1.4.2.2. Difüzyon Bağı	16
1.1.4.2.3. Elyaf Sarma Yöntemi.....	17
1.1.4.2.4. El Yatırma Yöntemi.....	19
1.1.4.2.5. Püskürtme yöntemi	19
1.1.4.2.6. Vakumlu Torbalama Yöntemi:.....	20
1.1.4.3 Kapalı Kalıplama Yöntemleri.....	21
1.1.4.3.1. Profil Çekme Yöntemi (Pultrüzyon).....	21
1.1.4.3.2. Reçine Transfer Yöntemi (RTM):	22
1.1.4.3.3. Baskı Kalıplama Yöntemi:	23
1.1.4.3.4. Enjeksiyon Yöntemi:.....	23
1.1.4.3.5. Savurma Döküm Yöntemi (Santifrüj):	24
1.1.5. Kompozit Malzeme Kullanım Alanları.....	25
1.1.5.1. Denizcilikte Kompozit Kullanımı	26
1.1.5.2. Rüzgâr Enerjisi Kompozit Kullanımı	26
1.1.5.3. Uzay ve Havacılık Kompozit Kullanımı	26
1.1.5.4.Savunma Sanayii Kompozit Kullanımı.....	26
1.1.5.5.Savunma Sanayii Kompozit Kullanımı.....	27
1.1.5.6.Otomotiv Kompozit Kullanımı	27
1.2. Zırhlara Genel Bakış.....	27
1.2.1. Zırh Tanımı	28
1.2.2. Giyilebilir Zırhlar	29

1.2.3. Araç Zırhları	31
1.2.4. Zırhların Sınıflandırılması.....	32
1.2.5. Zırh Üretim Yöntemleri	32
1.2.6. Zırh Çeşitleri.....	33
1.2.6.1.Parçacık Kalkanı.....	33
1.2.6.2. Ek Izgara ve Ağ Zırhlar	34
1.2.7. Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE).....	34
1.2.8. Zırh Malzemeleri.....	37
1.3. Balistik.....	38
1.3.1. İç Balistik.....	38
1.3.2. Dış Balistik.....	39
1.3.3. Hedef Balistiği	39
1.3.4. Adli Balistik.....	39
1.3.5. Balistik Darbe Mekanığı	40
1.4. Poliüre Kaplama.....	40
1.4.1. Poliürenin Tanımı	42
1.4.2. Poliürenin Özellikleri	44
1.4.3. Poliürenin Fiziksel Özellikleri	45
1.4.4. Poliüre Kaplamanın Kullanım alanları	46
1.4.5. Poliüre Avantajları	46
1.5. Literatür Taraması	52

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1. Materyal	70
2.1.1. Poliüre Kaplama	73

2.2. Yöntem	75
-------------------	----

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Ön Çalışma Yapılan Poliüre Kaplı ve Kaplamasız UYMAPE Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları	79
3.2. Poliüre Kaplamasız UYMAPE Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları.....	81
3.3. Poliüre Kaplı UYMAPE Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları.....	87

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1 TARTIŞMA	96
4.2. SONUÇLAR	97
KAYNAKÇA	98
ÖZGEÇMİŞ.....	108

KISALTMALAR

Al: Alüminyum.

PU: Poliüre.

UYMAPE: Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Farklı Yıllarda Ve Medeniyetlerde Zırhların Geliştirilmesi [20]	29
Tablo 1.2. Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Liflerinin Mekanik Özellikleri [33]	35
Tablo 1.3. Poliürenin Fiziksel Özellikleri [69]	45
Tablo 1.4. Poliüre Uygulamasının Avantajları Ve Dezavantajları [61]	47
Tablo 2.1. Numune Özellikleri.....	71
Tablo 2.2. Tez Çalışmasında Kullanılan Poliürenin Mekanik Özellikleri	72
Tablo 3.1. Tez Çalışmasında Mermi Çıkış Hızı Açısından Sonuçların Karşılaştırılması	93
Tablo 3.2. Tez Çalışmasında Kullanılan Numunelerin Deformasyon Sonuçları.....	94

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1. Vücut Zırhında Ağırlık Azalması	2
Şekil 1.1. Kompozit Malzeme Yapısı [17]	5
Şekil 1.2. Kompozit Malzeme Elemanları	7
Şekil 1.3. Sıvı Metal Emdirme Metodu	11
Şekil 1.4. Basınçlı Döküm İnfiltrasyon Yöntemi	12
Şekil 1.5. İn-Situ (Yerinde Oluşan) Yöntemi	13
Şekil 1.6. Püskürtme Yöntemi	14
Şekil 1.7. Karıştırma Döküm Yöntemi	15
Şekil 1.8. Toz Metalurjisi Yöntemi	16
Şekil 1.9. Difüzyon Bağı Yöntemi	17
Şekil 1.10. Elyaf Sarma Yöntemi	18
Şekil 1.11. El Yatırma Yöntemi [31]	19
Şekil 1.12. Püskürtme Yöntemi	20
Şekil 1.13. Vakumlu Torbalama Yöntemi [44]	21
Şekil 1.14. Profil Çekme Yöntemi (Pultrüzyon)	22
Şekil 1.15. Reçine Transfer Yöntemi (Rtm)	23
Şekil 1.16. Baskı Kalıplama Yöntemi	23
Şekil 1.17. Enjeksiyon Yöntemi	24
Şekil 1.18. Savurma Döküm Yöntemi	25
Şekil 1.19. Ctp Kullanım Alanları	25
Şekil 1.20. Yelek Tipi Ve Süslemeli Zırhlar [22]	30
Şekil 1.21. Roketsan Tarafından M60a3 Tankları İçin Geliştirilen Era Zırh Paketi [38]	31
Şekil 1.22. Poliürenin Sentez Reaksiyonu [90]	44
Şekil 2. 1. UYMAPE ve poliüre kaplı UYMAPE kompozit levha	73
Şekil 2. 2. Balistik test sistemi (gaz silahı)	75
Şekil 2. 3. Gaz silahı sisteminde kullanılan sabot ve mermi	75
Şekil 2. 4. (a) Hız ölçüm sistemi, (b) Bilgisayar kontrollü ateşleme ve basınçlandırma mekanizması	76
Şekil 2. 5. Numune bağlama aparatı	76

Şekil 2. 6. Balistik testlerde kullanılan yüksek hızlı kamera ve mermi çıkış hızı ölçümü	77
Şekil 3. 1. Yapılan Ön Çalışmalarda Elde Edilen Poliüre Kaplı Ve Kaplamasız Uymape Kompozit Levhaların 885 M/S Mermi Hızı Altındaki Yüksek Hızlı Kamera Görüntüleri (V: Mermi Hızı).....	79
Şekil 3. 2. Yapılan Ön Çalışmalarda Elde Edilen Poliüre Kaplı Ve Kaplamasız Uymape Kompozit Levhaların 700 Ve 885 M/S Mermi Hızı Altındaki Deformasyon Görüntüleri	80
Şekil 3. 3. Poliüre Kaplamasız Uymape Kompozit Levhaların Şahit Plaka İle Farklı Mermi Hızları Altındaki Yüksek Hızlı Kamera Görüntüleri	82
Şekil 3. 4. Poliüre Kaplamasız Uymape Kompozit Levhaların Şahit Plaka İle Farklı Mermi Hızları Altındaki Deformasyon Görüntüleri	83
Şekil 3. 5. 715 M/S Mermi Hızı Altında Poliüre Kaplamasız Uymape Kompozit Levhaların X-Ray Tomografi İle Alınmış Kesit Görüntüleri	84
Şekil 3. 6. 875 M/S Mermi Hızı Altında Poliüre Kaplamasız Uymape Kompozit Levhaların X-Ray Tomografi İle Alınmış Kesit Görüntüleri	85
Şekil 3. 7. 010 M/S Mermi Hızı Altında Poliüre Kaplamasız Uymape Kompozit Levhaların X-Ray Tomografi İle Alınmış Kesit Görüntüleri	86
Şekil 3. 8. Poliüre Kaplı Uymape Kompozit Levhaların Şahit Plaka İle Farklı Mermi Hızları Altındaki Yüksek Hızlı Kamera Görüntüleri	87
Şekil 3. 9. Poliüre Kaplı Uymape Kompozit Levhaların Şahit Plaka İle Farklı Mermi Hızları Altındaki Deformasyon Görüntüleri	88
Şekil 3. 10. 715 M/S Mermi Hızı Altında Poliüre Kaplı Uymape Kompozit Levhaların X-Ray Tomografi İle Alınmış Kesit Görüntüleri.....	90
Şekil 3. 11. 895 M/S Mermi Hızı Altında Poliüre Kaplı Uymape Kompozit Levhaların X-Ray Tomografi İle Alınmış Kesit Görüntüleri.....	91
Şekil 3. 12. 995 M/S Mermi Hızı Altında Poliüre Kaplı Uymape Kompozit Levhaların X-Ray Tomografi İle Alınmış Kesit Görüntüleri.....	92

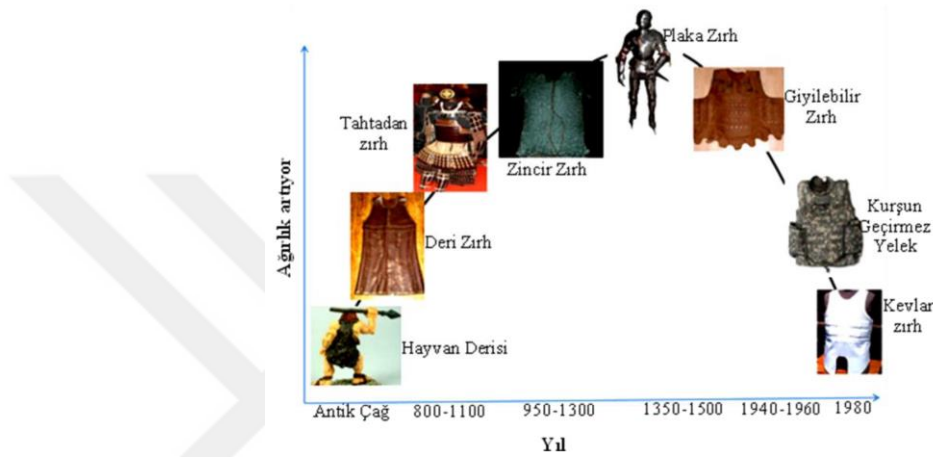
GİRİŞ

Silah sanayiinin gelişmesi ile beraber, savaşların etkileri çok daha yıkıcı olmaya başladı. Silah sanayiinin hızlı gelişmesine karşın balistik koruyucular da aynı hızla gelişmeye devam etti. İnsanlar tarihin ilk çağlarından beri kendini korumak için farklı boyut ve şekillerde zırh materyallerine ihtiyaç duymuşlardır. Bu zırh materyalleri ilk çağlarda demir ve çelik malzemelerin dövülmesi ile üretilen kişisel zırhlardır. İlkçağda savaşlarda insanlar vücutlarını silahın etkisinden korumak için kalın deri ve metal zırhlar giymişlerdi. Modern zamandaki ilk koruma amaçlı giysiler naylondan yapılmıştır. Ancak naylondan yapılan koruyucu giysiler fazlaca ağır ve kullanan kişinin hareketini kısıtlıyordu. 70’li yıllarda çelikten beş kat fazla dayanıma sahip “para-aramid” fiberin bulunmasıyla her yönden mükemmel bir balistik koruyucu malzeme kullanılmaya başlandı. Günümüzde ise para-aramid fiberler Kevlar ve Twaron adıyla üretilmektedir.[1] Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle ortaya çıkan hafif kumaşların yüksek mukavemet ve elastikiyete sahip polimerlerle birleşimi balistik panel ve zırh üretiminin temelini oluşturmaktadır. "Balistik" kelimesi Fransızca "balistique" kelimesinden türetilmiştir ve bir merminin namludan çıkarak hedefe ulaşması, atışın yapıldığı ortamdaki değişkenlere bağlı olarak değişen hareketlerini, hedefe çarptıktan sonraki enerjinin sönmülmesi ve oluşan bozulma/deformasyon davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Balistik koruma ürünleri, kişileri mermi ve parçacıklardan korumak için tasarlanmış koruyucu giysi kategorisidir. Kişisel koruyucu ekipman muharebe dışı, muharebe ve acil durumda hayatta kalma operasyonu sırasında askeri personel için gereklidir.

Başta askeri sektör olmak üzere balistik alanında yapılan yatırımlar, akademik ve askeri araştırmalar disiplinin önemini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, balistik panel ve kişisel koruyucu zırh üretiminde kullanılan kompozit malzemelerin özellikleri, kompozit malzemeler kullanılarak elde edilen koruyucu kombinasyonları ve bu koruyuculara uygulanan balistik testler incelenmiştir. [2]

Zırh teknolojisinde istenen önemli özellikler şunlardır;

- Hafif olması,
- Hareket kabiliyetinin yüksek olması (esnek olması, hareketleri engellememesi),
- Koruma seviyesi yüksek olması beklenmektedir.



Şekil G.1. Vücut zırhında ağırlık azalması

Şekil G.1.'de yıllara göre zırhlarda kullanılan ağırlığın azaldığı görülmektedir. Antik çağda hayvan derisi ile başlayan vücut zırhları günümüzde teknolojinin de gelişmesiyle kompozit zırhlara kadar gelişmiştir. Balistik bilimi üç gruba ayrılır; iç balistik, dış balistik ve terminal balistiğidir. İç ve dış balistikte merminin namlu içinden ve havada hareketi, uç balistikte ise merminin hedefi vurması ve hedefin deformasyonunun tanımda belirtildiği şekilde kontrol edilmesidir. Tüm bu tanımlardan sonra zırh (koruma) tasarımı, karakterizasyonu ve deformasyon bölgelerinin incelenmesi terminal balistiğin konusudur. Zırhlar genel olarak; personel ve cephaneyi farklı boyut ve hızlardaki mermi ve şarapnellerden korumak için üretilmiş teçhizatlardır. Zırh, kullanım alanına göre kişisel zırh, hafif zırh ve ağır zırh[3] olmak üzere üçe ayrılır. Askeri araçlar, taktiksel olarak değiştirilmeleri gerektiğinden ve birçok zırh paneli ağır olduğundan tercih edilmez. Hafif ve verimli zırh üretimi üzerine yapılan araştırmalar, seramik, yüksek mukavemetli kumaşlar, köpükler ve metaller gibi malzemelerin birden fazla katmanda bir arada kullanıldığını ortaya koymuştur [4]. Yüksek mukavemetli kumaşlar, sert cisimlerde enerji absorpsiyonu, ısı iletimi ve çatlak ilerlemesi gibi özelliklerinden dolayı balistik alanında kullanılmaya başlanmıştır [5].

Sağlam ve kütle açısından verimli asker koruma sistemleri geliştirmek, bilim ve teknoloji araştırmalarının ana odak alanlarından biridir. Son yıllarda, yeni malzeme işleme ve üretim teknolojileri, termoplastik bazlı tek yönlü polimer laminatlar kullanan baş ve vücut koruma sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır; en yaygın olanı ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilendir (UHMWPE). Diğer polimerik kompozitlerde bulunmayan benzersiz özelliklere sahiptir ve son zamanlarda büyük ilgi görmüştür[6-7]. Bu malzemelerin örnekleri Dyneema HB80 ve Spectra Shield II SR-3136'dır. Yeni üretim ve yeni malzemenin kombinasyonu gelişmiş savaş kaskının geliştirilmesine yol açtı. Ortalama tarihsel olarak %37 üzerinde bileşen direncinde gelişme oldu. Bu şekilde, bir ince tabakalı polimer kompozitin bir mermi tarafından enine etkisi, onun düzlemden sapmasına neden olur. İyi tasarlanmış bir uygulamada, ortaya çıkan düzlem içi membran gerilimleri, mermi üzerinde geciktirici kuvvetler oluşturur ve sonunda (elastik) lif kırılması meydana gelmeden onu hareketsiz hale getirir [8]. Bununla birlikte, son zamanlarda yapılan birkaç deney, merminin böyle bir hedefle ilk etkileşimini yöneten daha zayıf bir panel yanıt mekanizması tanımlamıştır. Kenardan sabitlenmiş panelin yüksek hızlı çarpması sırasında genellikle aşamalı bir penetrasyon mekanizması gözlemlenir ve özellikle arkadan destekli veya çok kalın panellere sıfır eğrilikte vurulduğunda belirgindir. Bu durumlarda, laminatlar düzlemden sapamaz ve bunun yerine darbe basıncına bağlı bir penetrasyon modu oluşur [9].

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

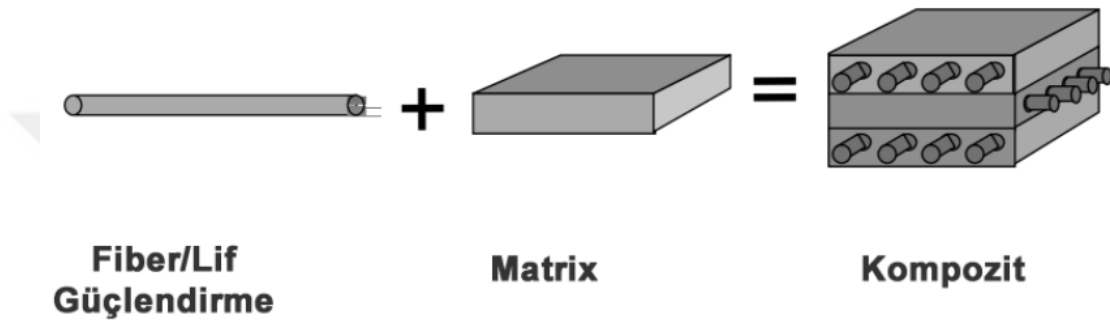
1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, istenilen performansı elde etmek için iki veya daha fazla malzemeyi birbiri içerisinde çözmeden makroskobik boyutta birleştiren yeni bir malzeme türüdür. Kompozit malzemelerin amacı, farklı malzemeler ve farklı kombinasyonlarla istenilen özelliklerin elde edilmesidir. Bu olanakları sunması, kompozit malzemelerin geleneksel malzemelere göre en büyük avantajlarından biridir. Yüksek mukavemet ve yüksek hafiflik oranı gibi avantajlara sahip olan bu malzemeler, özellikle savunma sanayi ve otomotiv alanlarında büyük ilgi görmektedir.

Kompoziti oluşturan bileşenler çoğunlukla özelliklerini korurlar. Kompozit malzemelerde genel olarak aranan koşullar; Yapay değildir, yani belirli bir arayüzle ayrılan farklı kimyasal bileşimlere sahip en az iki malzemeden, farklı malzemelerin üç boyutlu bir kombinasyonundan ve bileşenlerin hiçbirinin sahip olmadığı özelliklerden oluşan doğal bir malzemedir [18]. Bu nedenle, malzeme mikroskobik olarak heterojen bir malzeme gibi, ancak makroskopik olarak homojen bir malzeme gibi davranır.

Kökeni milattan önceye dayanan kompozitler, birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bilinen en eski kompozit malzeme örneği, ahşap parçalarının birleştirilmesiyle yapılan kontrplaktır. Günümüzde konvansiyonel malzemelerin yetersiz kaldığı veya özelliklerinin geliştirilmesi gereken yerlerde özel bir malzeme olarak kullanılmaktadır. İlk fiber takviyeli kompozit, 1935 yılında Owens Corning tarafından üretildi. 1940'lı yıllara gelindiğinde ise II. Dünya Savaşı'nın başlaması kompozit malzemelere olan ilginin artmasına neden olmuştur. Bu yıllarda cam elyaf takviyeli kompozitler yaygınlaşmıştır. 1961 yılında cam elyaf takviyeli kompozitlerden daha iyi mekanik özelliklere sahip karbon fiber takviyeli kompozitlerin patenti alınmıştır. 1971 yılında ise darbe direnci ve ısı dayanımı daha yüksek olan kevlar piyasa sürülmüştür. 1980 yılından

sonra üretim kolaylığı ile kullanım alanı artmıştır. 1930'lu yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde cam elyafının keşfi ile modern kompozit malzemelerin üretimi başlamış ve cam elyaf takviyeli kompozitler dünya pazarında yer edinmiştir. Malzeme bilimi açısından bakıldığında, kompozit malzemeler nispeten yeni yüksek teknoloji malzemeleri olarak kabul edilebilir. Bir kompozit malzemenin en önemli özelliği mikroskobik seviyede homojen olmasıdır. Şekil 1.1. de kompozit malzemeyi oluşturan unsurlar gösterilmektedir.



Şekil 1.1.Kompozit Malzeme Yapısı [17]

1.1.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler başta üreticiler, tasarımcılar ve mühendisler olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın kullanımındaki en etkili faktör, performans faydalarının çok yüksek ve çeşitli olmasıdır. Bu sayede üretilecek yeni bir kompozit malzemedede istenilen özellikleri yakalama imkânı oluşur.

Kompozit malzemelerin avantajlarını aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yüksek mukavemet: Doğada yüksek mukavemeti sağlayan malzemeler arasında en etkin olanlardan birisidir.
- Kolay şekillendirme (Tasarım Esnekliği): Tasarlayan kişinin aklına gelebilecek her türlü karmaşık, basit, büyük, küçük, yapısal, dekoratif ya da fonksiyonel amaçlı olarak tasarlanabilir.
- Korozyona karşı dayanıklılık: Korozyona karşı dirençli olma özelliği, diğer üretim malzemelerinden üstün olan niteliklerinden biridir.

- Yüzey Uygulamaları: Kompozitlerde kullanılan polyester reçine, pigment katkıları ile renklendirilerek, amacına uygun kendinden renkli olarak da üretilebilir.
- Kalıplama Kolaylığı: Tek parça kalıplama imkanı ile çelik gibi geleneksel malzemelerde karşılaşılan birçok parçanın montajını ve ardından montajını ortadan kaldırır.
- Şeffaflık Özelliği: Cam ile aynı ışık geçirgenliğine sahip olabilir. Tam şeffaflığı ve ışık yayılımı nedeniyle, dağınık ışığın önemli olduğu sera ve güneş kolektörlerinin yapımında önemli avantajlar sunar.
- Hafiflik: Kompozit malzemeler, donatısız plastik ve metallere göre birim alan ağırlığı bakımından daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir.
- Isıya ve Ateşe Karşı Direnç: Kompozit ürünleri, termoset plastikler grubundan polyester reçineler ile yapıldığından yumuşamaz ve şekil değiştiremez.
- Boyutsal Stabilitate: Çeşitli mekanik, çevresel baskılar altında termoset kompozit ürünler şekillerini ve işlevlerini korumaktadırlar.
- Elektriksel özellikler (Yüksek Dielektrik Direnimi): Kompozitlerin elektrik yalıtım özellikleri, birçok komponentin üretimi konusunda tercih nedenidir.
- Kompozitler Kesilip Delinebilir: Kompozitler malzemeler kolayca kesilir, delinir ve zımparalanabilir. Bu amaçla kullanılan aletlerin sert çelik veya elmas uçlu olması halinde daha iyi sonuç alınır.
- Yorulma ömrü
- İmalat kolaylığı
- Yüksek rijitlik
- Aşınma direnci

Kompozit malzemelerin avantajlarının çok olmasına karşın dezavantajları da mevcuttur:

- Ham maddenin pahalılığı
- Üretim güçlüğü

- Sınırlı servis (tamir-bakım)

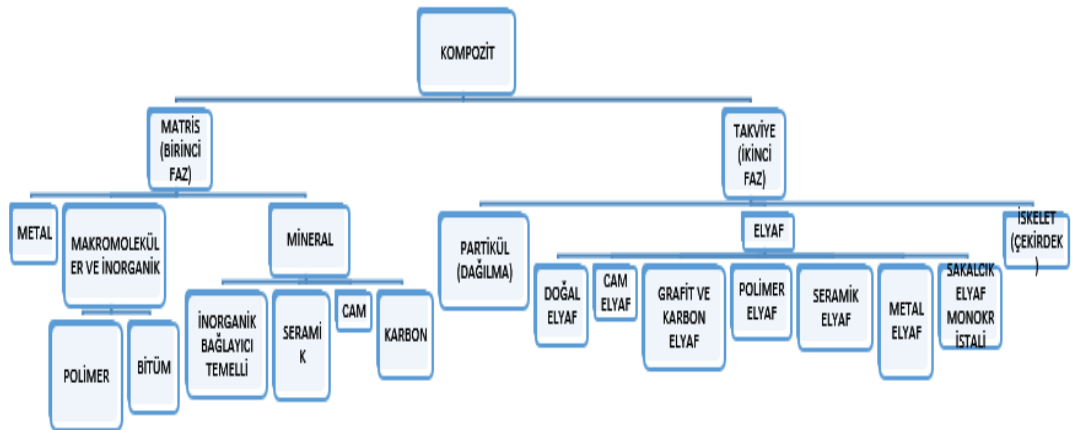
-Yeni gelişen bir teknoloji olmasıyla firmaların ve üreticilerin deneyimsiz olmaları kaynaklı.

1.1.2. Kompozit Malzemelerin Yapısı

Genel olarak malzemeler; metaller, seramikler ve organik malzemeler olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. Bu üç malzeme sınıfının her birinin avantajları ve dezavantajları vardır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bu malzemelerin iki veya daha fazlasının makro düzeyde tek bir malzeme halinde birleştirilmesiyle yapılan yeni malzemeler kompozit malzemelerdir.

Kompozit malzemeler bir matristen (sürekli faz) oluşup takviye (süreksiz faz) ile desteklenen malzemelerdir. Kompozitlerin mukavemetini genellikle sert ve kırılğan takviye malzemelerden alır. Matris malzemesi, kompozite tokluk ve süneklik kazandırır. Malzemeyi bir arada tutma görevi ise matris malzemededir.

Kompozit malzemelerde kullanılan matris ve takviyenin çeşitleri aşağıdaki Şekil 1.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. 2. Kompozit Malzeme Elemanları

Yukarıda bahsedildiği gibi, kompozit malzemeler bir matris ana fazı ve bunun içinde dağılmış takviye elemanlarından oluşur. Kompozit Malzeme Elemanları ve metaller yaygın olarak takviye ve ana malzeme olarak kullanılmaktadır.

Matris yapısal (faz) elemanı (malzeme), uygulanan kuvvetleri ara yüzey bağları yoluyla takviye fazına iletir ve dağıtır. Böylece takviye fazını planlanan şekilde tutarak tahribatı önler. Matris malzemesinin mekanik özellikleri, kompozitteki yük taşıyıcı takviye elemanlarının işlevini yerine getirebilmesi için oldukça önemlidir.

Matris malzemeler iki ana gruba ayrılırlar:

Termoplastik: Isıtıldıklarında yumuşarlar ve ısıtıldıklarında yarı sıvı hale gelirler. Tasarımcılar, ürün performansını iyileştirmek ve maliyetleri azaltmak için termoplastiklere yöneliyor. Kompozit malzemelerde kullanılan termoplastikler Nylon (PA), Polisülfid (PPS), Sıvı kristal polimer (LCP), Polietereterketon (PEEK), Polipropilen (PP), Polietilen (PE), Polieteramid imin (PEI), Floropolimerdir.

Termosetler: Termoplastiklerin aksine, termosetler genellikle düşük erime noktasına sahip katı halindedirler. Bu özelliklerinden dolayı kompozit imalatında kullanılırken bir katalizörün, ısının veya her ikisi ile sertleşirler. Termosetler, sertleşme tamamlandıktan sonra eski hallerine dönemezler. Kompozit endüstrisinde kullanılan termosetler: Doymamış Polyesterler, Epoksiler, Vinilester, Poliüretanlar, Fenolikler, Melamin ve Üreformaldehid, Poliimidler, Silikon Reçineler, Friedel-Crafts Reçineleridir.

Takviye fazı, üretim sırasında matris fazının tane büyüklüğünün kontrolünü sağlar ve iletilen yükü paylaşarak buna karşı koyar. Matris yapı ile takviye elemanı arasında bağlayıcılık görevi yapan ara yüzey bağı ise, genelde kırılma özelliği göstermesine karşın oluşan herhangi bir kuvveti çözülmeye ve kırılma olmadan takviye fazına iletir. Bu bölge malzemenin elastikiyet modülünü etkileyen en önemli bölgedir. Bu yüzden kompozit malzemenin dayanıklılığı ara yüzey bağının istenilen şekilde olmasına bağlıdır [19]. Sonuçta çıkacak olan kompozit parçanın dayanımını arttırmak takviye elemanlarının kullanım amacıdır.

1.1.3. Matris Malzemesine Göre Kompozitler

Matris malzemeler kendi içerisinde üç gruba ayrılır:

- a. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)
- b. Seramik Matrisli Kompozitler (CMK)
- c. Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)

1.1.3.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metaller, tasarım gereksinimlerini karşılamak için özelliklerini artırmak veya azaltmak için güçlendirilir. Örneğin, silikon karbür gibi takviye edici malzemelerle elastik sertlik ve mukavemet geliştirilebilir. Yüksek termal genleşme ve elektriksel iletkenlik azaltılabilir.

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, mevcut malzemelerin çalışma sıcaklıklarından daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilecek daha yüksek özgül dayanım özelliklerine sahip malzemelere olan ihtiyaç nedeniyle 1960'ların başında geliştirilmiştir [27] [28].

Metal matrisli kompozitler, en az biri metal olmak üzere iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik kombinasyonu ile üretilen, istenilen ve istenen özelliklere sahip yeni malzemelerdir.

Metal matrisli kompozitlerin içerisinde metal matris malzemeleri yer alır. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde genellikle matris malzemeleri olarak alüminyum, magnezyum, çinko, bakır, titanyum, nikel ve diğer metaller ve bunların alaşımları kullanılır. Bu metaller ve alaşımları, yüksek süreklilik ve mukavim özellikleri sebebi ile çok tercih edilen matris malzemeleridir. Metal matrisli kompozitler çoğunlukla uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılan yardımcı malzemelerde, teleskopta ve platform taşıyıcılarda kullanılır [27] [28].

Metal matrisli kompozitlerde en çok kullanılan takviye elemanları Al_2O_3 , SiC (Silisyum Karbür), TiC, bor ve karbondur.

Metal Matrisli Kompozitlerin Avantajları

- Düşük yoğunluğa sahip olması,
- Yüksek mukavemet ve esneklik modülü,
- Yüksek tokluk ve darbe dayanımı,
- Sıcaklık değişikliklerine karşı düşük hassasiyet,
- Yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik,

- Tekrar üretilebilir içyapı ve özellikler,
- Yüksek yüzey sertliği ve yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyet.

Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasına göre CMK, bir seramik matris ve bir takviye fazından oluşan iki veya daha fazla bileşenden oluşan bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Polisilanlar, SiC ve Si₃N₄ gibi seramik elyaflar için temel malzeme olarak kullanılır. İleri mühendislik yapı malzemelerinin üretimine uygun kompozit malzemeler; sürekli lifler, kıyılmış lifler, bıyıklar, lameller veya parçacıklarla güçlendirilmiş seramik veya cam matris CMK. Sınırlı yüksek sıcaklık uygulamalarına rağmen, askeri, havacılık ve ticari (örneğin, enerji tasarruflu sistemler ve ulaşım) alanlarda geniş kapsamlı kullanımları vardır [27] [28].

Metallerin metal olmayan elementler ile birleşmesi sonucunda oluşan inorganik bileşiklere seramik denir. Genellikle kil ve kalsoen gibi maddelerin yüksek sıcaklık altında bırakılarak pişirilmesi ile oluşurlar. Başlıcaları silisyum karbür, alüminyum oksit, titanyum nitrür ve titanyum karbürdür. Sandviç yapılardan oluşan zırhlar, savunma alanında kullanılan çeşitli malzemelerin üretimi ve uzay araçları önemli kullanım alanlarıdır.

1.1.3.3. Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)

Polimer bazlı kompozitler, matris olarak polimer reçine ve takviye ortamı olarak lifler ve/veya diğer takviye malzemeleri kullanan kompozit malzemelerdir. Takviye fazı ve matris arasındaki etkileşim, güçlü kimyasal bağlardan zayıf sürtünme kuvvetlerine kadar birçok şekilde olabilir. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde, polimer reçineler matris malzemesi olarak kullanılırken elyaf malzemesi de takviye elemanı olarak kullanılır. Düşük maliyeti ve üretim kolaylığı sebebi ile çok yaygın kullanım alanına sahip kompozit yapılardır. Polimer matrisli kompozitler, kompozit uygulamaları için en yaygın kullanılan kompozit türüdür. Üretim süreci basittir. Yüksek çekme mukavemeti, geçirimsizlik, kırılma ve çatlama direnci, aşınma, delinme ve korozyon direncine sahiptir [27] [28].

1.1.4 Üretim yöntemleri

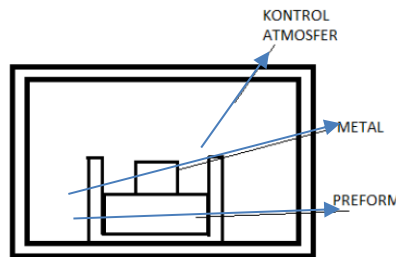
Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemi katı faz ve sıvı faz olarak ikiye ayrılabilir.

1.1.4.1 Sıvı Fazda Üretim Teknikleri

Bu Teknik, bir sıvı ve metal matrisi takviye malzemeleriyle birleştirme işlemidir. Sıvı metal matrislerin yüksek kullanılabilirliği nedeniyle, metal matrisli kompozitler genellikle sıvı faz üretim teknikleri kullanılarak üretilir. Erimiş matris malzemeler, yüksek işleme hızları, istenen şekillere yakınlık ve hafif metallerin yüksek kalitede üretimi gibi önemli avantajlar sunar. Sıvı faz üretim teknolojisinde yaygın olarak kullanılan teknikler 4 başlık altında incelenebilir.

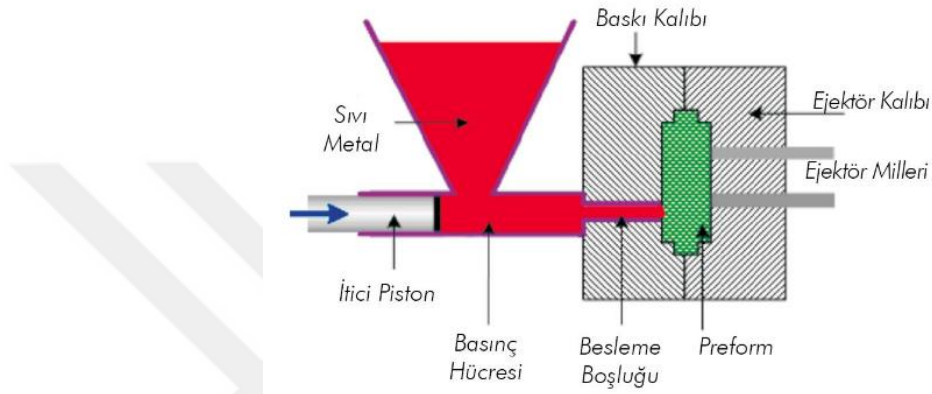
1.1.4.1.1 Sıvı metal emdirme yöntemi (İnfiltrasyon)

Bu yöntem, elyaf takviyeli metal matrisli kompozitler üretmek için kullanılır. Bu yöntemde öncelikle uygun bir bağlayıcı kullanılarak bir ön kalıp (preform) hazırlanır. Bu aşamada kullanılacak elyaf malzemenin yönünü belirlenir. Hazırlanan model kalıba koyulur. Erimiş metal kalıba enjekte edilir. Bu süre zarfında organik bağlar yakılır ve katılaşmaya bırakılır. Sıvı metal emdirme basınç altında yapılır. Bu nedenle matris malzemesi elyaf malzemelerin arasına girer ve oluşan atık gazın dışarı atılması sağlanır. [28] Sıvı metal emdirme yönteminde metalin nüfuziyeti basınçsız veya basınçla yapılabilir. Basınç emdirme yöntemi iki türe ayrılır: basınç ve vakum. Basınçsız yöntem tercih edilirse preform önce kalıba yerleştirilir. Daha sonra sıvı metal ön kalıbın üzerine dökülür ve katılaşmaya bırakılır. Katılaşmış kompozitin yoğunluğunu %100'e çıkarmak için sıcak pres uygulanır. Bu yöntemin tercih edildiği kısımlarda genellikle ıslanma sorunları ile karşılaşılır. Bu nedenle özellikle ıslaklık sorunu olmayan çiftler için uygundur. [27]



Şekil 1.3. Sıvı Metal Emdirme Metodu

Şekil 1.3.'te sıvı metal emdirme metodu gösterimi yapılmıştır. Vakum metal emdirmede, sıvı metal, vakum basıncının etkisiyle üretilen ön kalıplara sızar. Sıvı metal sıcaklığı, emdirme süresi ve uygulanan vakum basıncı üretilecek ürünün önemli parametreleridir. Bu yöntem sayesinde, Al-Mg (Alüminyum-Magnezyum) matrisli kompozitler başarıyla hazırlanabilmektedir [27] [28].

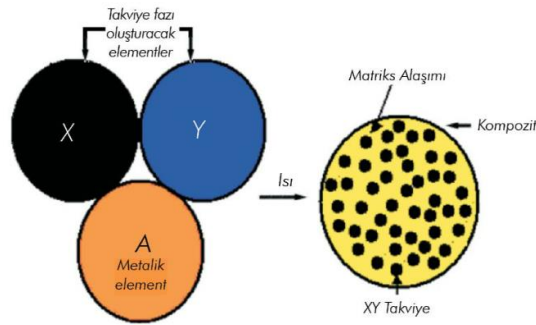


Şekil 1.4. Basınçlı döküm infiltrasyon yöntemi

Şekil 1.4.'te basınçlı döküm infiltrasyonu yöntemi gösterilmiştir. Basınçlı yöntem tercih edildiğinde, sıvı metal basınçlı gaz ile preform veya kalıba iletilir. Preformdaki boşlukları sıvı metal doldurarak nihai ürünün ortaya çıkmasını sağlar. Sıkıştırma basıncını artırmak, gözenekleri en aza indirir ve işlem süresini azaltır. Bu şekilde yaklaşık %50 yoğunlukta silisyum karbür (SiC) kalay ile infiltrasyon elde edilebilir. [27] [28]

1.1.4.1.2. Yerinde İmalat (İn-situ)

Yerinde imalat yöntemiyle üretilen kompozitler, Şekil 1.5.'te gösterildiği gibi, sıvı metaldeki elementlerin veya bileşiklerin ekzotermik reaksiyonu nedeniyle takviye fazının kendiliğinden oluşması prensibine dayanmaktadır. Yerinde imalat yöntemin avantajları, takviye-matris ara yüzünün temizlenmesi, takviye fazının üniform dağılımı, takviye fazının termodinamik kararlılığı, ucuz ve tek adımlı üretimini içerir. Yerinde üretim teknikleri, bir matris malzemesinde güçlendirici parçacıkların üretimini içerir. Erimiş metalde iki veya daha fazla bileşenin reaksiyonu nedeniyle bir matris malzemede takviye edici parçacıklar oluşturarak kompozit malzemeler üretir.



Şekil 1.5. İn-situ (yerinde oluşan) yöntemi

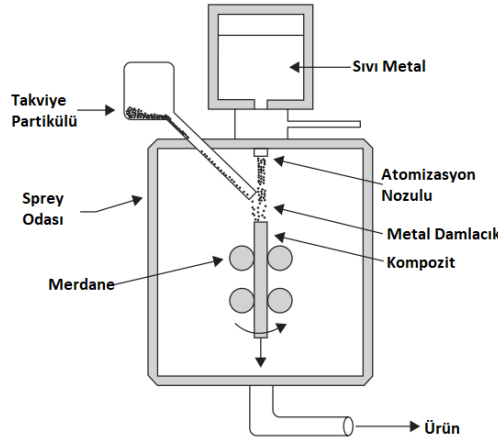
Bu teknikle, matris malzemesi içinde üniform olarak dağılmış ince takviye elemanları elde etmek mümkündür. Ayrıca, matris malzemesi ile takviye edici parçacıklar arasında iyi bir bağ oluşur. Sonuç olarak, daha küçük takviye parçacıklarına sahip kompozitler üretilir [29].

Yöntem, istenen takviye edici parçacıkları oluşturmak için erimiş metale ekzotermik olarak reaksiyona giren bileşiklerin eklenmesine dayanır. Kompozit içindeki takviye edici parçacıkların oranı çok yüksek olabilir. Bu oranı azaltmak için matris malzemesinin oranı artırılır. TiB_2 ve TiC , bu yöntem kullanılarak malzemede takviye edici parçacıklar olarak kullanılır. Bu işlem sırasında yüksek sıcaklıkların korunması, reaksiyon hızını artırır. Bu nedenle, takviye parçacıkları büyük bir boyuta sahiptir. Matris malzemeleri olarak genellikle Ni, Al veya intermetalik bileşikler kullanılır. Yerinde imalat yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [27].

1.1.4.1.3. Püskürtme

Bu yöntemde metaller veya alaşımlar erime noktasına ulaştıktan sonra atık gaz veya su ile küçük parçalara ayrılır. Ayrılan metallerde katılma hızla gerçekleşir. Bu yöntem, takviye elemanı olarak ilave parçacıklar içeren kompozitlerin üretimi için uygundur. Sonuç olarak, dakikada 6 ila 10 kilogram gibi yüksek bir üretim hızına ulaşırken, hızlı katılma oranı ile matris ve takviye edici parçacıklar arasındaki herhangi bir reaksiyonu düşük tutar. Üretim sırasında kompozitin yoğunluğunu arttırmak ve istenilen şekli vermek için merdaneler kullanılmaktadır. Bu yöntem kullanılarak üretilen kompozitlerde, hızlı katılma ve minimum seviyelerde ara yüzey reaksiyonları nedeniyle ince taneli bir

matris malzemesi oluşturulur, bu sayede üretilen kompozitlerin mukavemet değerleri artar.



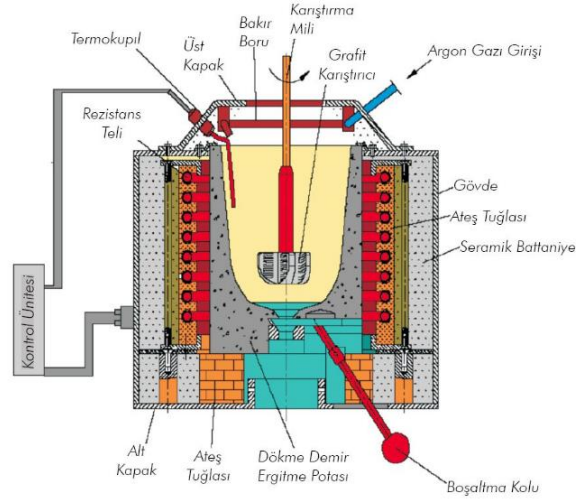
Şekil 1.6. Püskürtme Yöntemi

Üretilen kompozitin istenen kalitesini belirleyen birkaç parametre vardır. Bunlar takviye edici parçacıkların ilave hızı ve sıcaklık değerleri yani erimiş metalin başlangıç sıcaklığıdır. Şekil 1.6.'da püskürtme yöntemi gösterilmiştir.

Bu yöntem, üretimde kullanılan ekipmanın yüksek sermaye maliyeti nedeniyle oldukça pahalıdır. Alüminyum-silikon döküm alaşımları, 2000, 6000, 7000, 8000 serisi püskürtmeli dövme alaşımları ve silisyum karbür içeren birçok alüminyum alaşımlarının mukavemetini arttırmak için kullanılır [27].

1.1.4.1.4. Karıştırma Döküm

Karıştırmalı döküm yönteminde temel alaşım sıvı-katı aralığına girer. Şekil 8'de gösterilen sistemde partikül takviye elemanları bir karıştırıcı yardımıyla sıvı metal esaslı alaşıma karıştırılır. Bu karıştırma, taban ve takviye fazları homojen olana kadar devam eder ve daha sonra karışım kalıplara dökülür. Döküm sırasında takviye fazının yerçekimi nedeniyle çökmesini önlemek için sıvı metallere göre yarı katı metaller tercih edilir. Kalıp içerisinde soğuyan numuneler, soğutma işlemi tamamlandıktan sonra çıkarılarak metal matrisli kompozit üretilmiş olur [30]. Şekil 1.7'de karıştırma döküm yöntemi şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 1.7. Karıştırma Döküm Yöntemi

1.1.4.2 Katı Hal Üretim Teknikleri

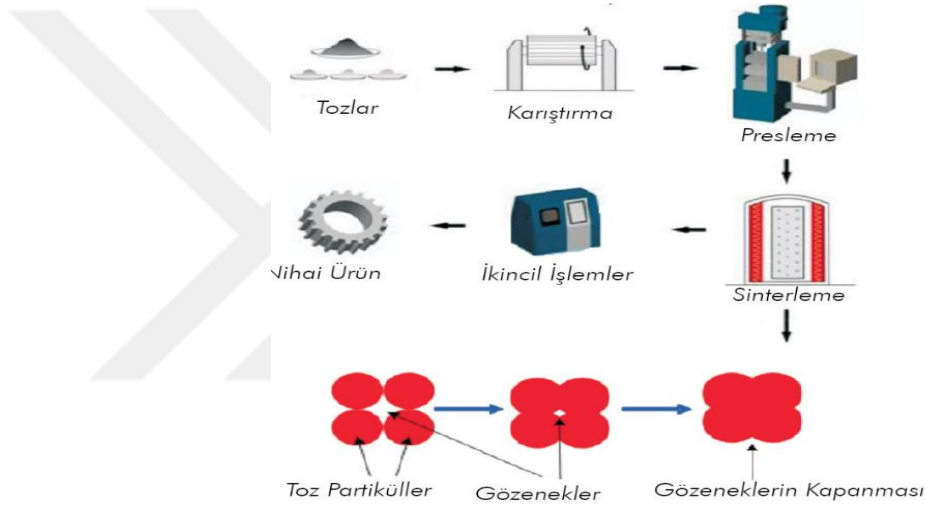
Takviye elemanlarının matris içindeki dağılımının kontrol edilmesi, sıvı fazlı üretim yöntemlerinde ana konulardan biridir. Sıvı faz tekniklerinin yüksek sıcaklıklarda uygulanması da ara yüzey reaksiyonlarına yol açar. Matris ve takviye arasındaki reaksiyon, elde edilen kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Katı hal üretim yöntemleri, sıvı faz üretim yöntemlerine göre daha düşük sıcaklıklara ulaştığı için bu tür problemler ortaya çıkmaz. Toz metalürjisi en yaygın kullanılan katı hal üretim yöntemidir. Diğer bir yöntem difüzyon bağıdır [27].

1.1.4.2.1. Toz Metalürjisi

Toz metalürjisi yönteminde toz sıkıştırıldıktan sonra parça sinterleme işlemi yapıp, kalıptan çıkarılan parçanın mukavemet değeri artırılmış olur. Sinterleme, katı parçacıkları kütle konveksiyonu ile yoğun yapılar oluşturmak üzere birbirine bağlayan, genellikle atomik ölçekte bir ısıtma işlemi veya işlemdir. Tek bileşenli bir sistemde sinterleme sıcaklığı, malzemenin erime sıcaklığının 0,8 katıdır. Çok bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı, bileşimdeki en düşük erime noktasına sahip malzemenin erime sıcaklığının hemen altındadır. Sinterleme sonrasında parçalar isteğe bağlı olarak haddeleme, ekstrüzyon ve yeniden sıkıştırma gibi aşamalardan geçerek kullanıma hazır hale gelir. Toz metalürjisi yöntemleri otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Şekil 1.8 de toz metalürjisi yöntemi işlem basamakları gösterilmiştir.

Toz metalurjisi 4 aşamadan oluşur:

İlk aşama, tozların karıştırılmasıyla başlar. Bu aşamada, sıkıştırmayı kolaylaştırmak için bir yağlayıcı ve metal tozu karıştırılır. Karıştırma aşamasında üretilen karışımın homojen olması toz metalurjisi üretiminde en önemli noktalardan biridir. Metal tozu ve takviye tozu arasındaki boyut farklılıkları topaklaşmaya neden olabilir. Topraklanma homojen dağılımı engeller ve malzemenin mekanik özelliklerinde azalmaya yol açar. Topaklanmayı ve sürtünmeyi azaltmak için bir yağlayıcı kullanmak önemlidir. Ayrıca yağlayıcıların kullanılması, preslenen parçanın kalıptan çıkarılmasını kolaylaştırır.



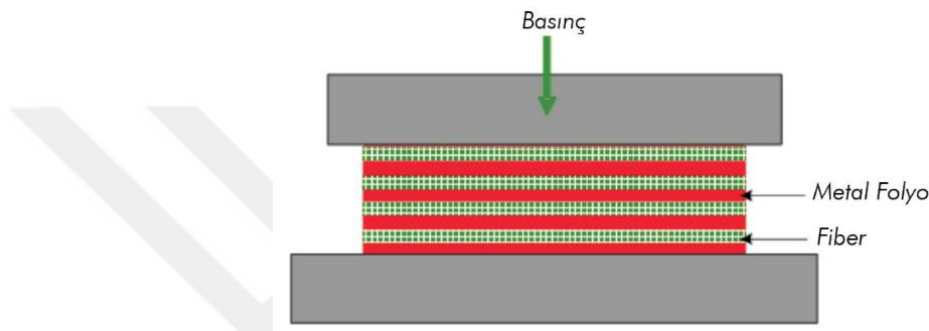
Şekil 1.8. Toz Metalurjisi Yöntemi

İkinci adımda karışım preslenir. Presleme işlemi parçaya özel hazırlanmış çelik kalıplar kullanılarak oda sıcaklığında yapılır. Tozlar preslendiğinde basınç değerine bağlı olarak gözenek sayısı değişebilir. Gözenekliliği azaltmak için presleme basıncını arttırmak gerekir. Yoğunluğun azalması nedeniyle gözenek sayısının artması üretilen parçaların dayanım değerlerini etkiler. Presleme 3 aşamadan oluşur. İlk önce elde edilen karışım kalıplara doldurulur. Karışım daha sonra preslenir. Son aşamada ise parça sıyrıcı yardımıyla kalıptan çıkarılır [27] [40] [42].

1.1.4.2.2. Difüzyon Bağı

Difüzyon bağı yönteminde, kompozit fazlar arasındaki birleştirme işlemi yüksek basınç ve sıcaklıkta gerçekleştirilir. Kompozit malzemeler, tek katmanlı liflerin veya karbon ve alüminyum gibi lif demetlerinin titanyum veya alüminyum gibi matris malzemelerle

yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında katmanlaştırılması ve yapıştırılmasıyla üretilir. Bu yaklaşımda, matris alaşımına ve takviye fazına fiber halinde verimli bir şekilde difüzyon etmesi için kimyasal yüzey işlemleri kullanılır. İstenilen özellikler göz önünde bulundurularak fiber oryantasyonu, açı ve aralık ölçüleri belirlenerek fiber metal tabaka üzerine yerleştirilir. Katmanlı yapı, matris alaşımın erime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve difüzyon bağının oluşmasını sağlamak için preslenir veya haddelenir. Şekil 1.9’da, difüzyon yoluyla bağlanma yöntemini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 1.9. Difüzyon Bağı Yöntemi

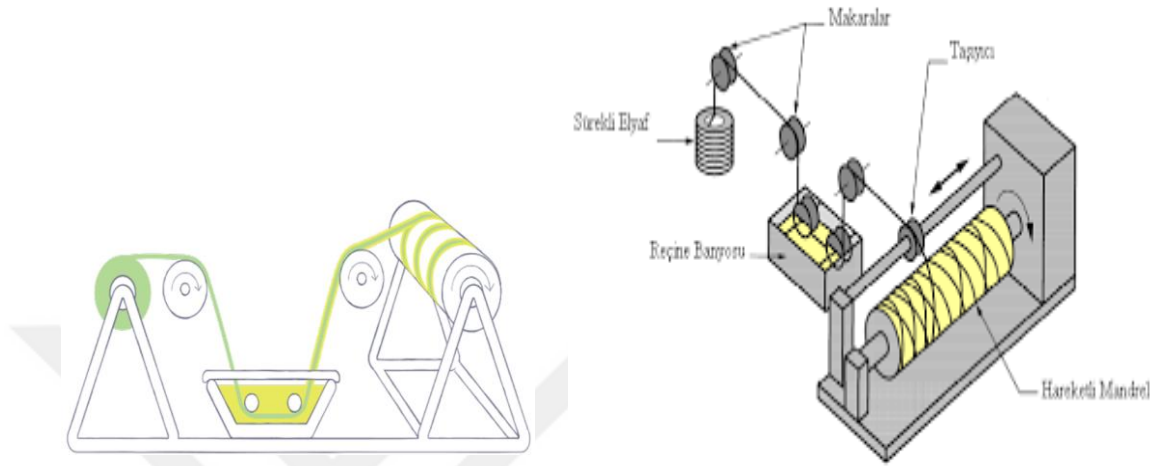
Sıkıştırma ve ısı etkisi altında, metal folyo erir ve lifli malzemeye nüfuz ederek onu ısıtır. Erimiş metal, sıkıştırma sırasında oluşan basınç altında yapı boyunca yayılır. Difüzyon bağlama, sistemde vakum altında sıcak presleme ile oluşturulan sandviç yapının sonucudur. Polimer matrisli kompozitler açık ve kapalı kalıplama olarak 2 farklı yöntemle üretilir. Açık kalıplama yöntemleri:

1.1.4.2.3. Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma yönteminde sürekli lifler reçine ile ıslatılır, bir makaradan çekilir ve dönen bir kalıba (mandrel) sarılır. Sürekli elyafın farklı açılarda kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklere sahip ürünler elde edilebilir. Operatör, istenen sarımı elde etmek için boru çapını, mandrel hızını, basınç oranını, bant genişliğini, fiber açısını vb. gibi birçok değişkeni içerir. Şekil 1.10’da elyaf sarma yöntemi sistemi ve şematik gösterimi gösterilmiştir.

Elyaf sarımında, sürekli elyaf lifleri reçine dolu bir tekneden geçirilerek ıslatılır. Islanan lifler başka bir dönen makara tarafından çekilir ve bir kalıba sarılır. İstenilen mekanik özelliklere sahip bir ürün elde etmek için elyaf liflerinin sargıya olan açısına ve katına

dikkat edilir. Elyaf lifler istenilen özelliklerde sarıldıktan sonra oluşan ürün sertleşir ve dönen kalıp kompozitten ayrılır. Bu yöntem genellikle otomotiv milleri, borular ve silindirik malzemeler için uygundur [31] [42] [45].



Şekil 1.10. Elyaf Sarma Yöntemi

Genel olarak silindirik kaplar, silolar, basınçlı kaplar, güç aktarım milleri ve roket motor gövdeleri bu yöntemle üretilmektedir. Bu şekilde daha kaliteli ve sağlam bir ürün elde edilebilir. Üretim, liflerin bir mandrel üzerine sarılmasıyla gerçekleştiğinden, iç yüzeyi düzgün olan parçalar üretilebilir. Polyester, epoksi ve silikon gibi reçineler kullanılabilir.

Elyaf Sarma Yönteminin Avantajları:

- Malzeme sarılması hızlı ve ekonomik bir yöntemdir,
- Bobine sarılı lifler ikinci bir işlemde geçip kumaş haline getirilmediği için maliyet düşürülebilir.
- Her katmanda farklı yönlerde sarım yapma imkânı olacağı için değişik yüklemeler yapı tarafından karşılanabilir.

Elyaf Sarma Yönteminin Dezavantajları:

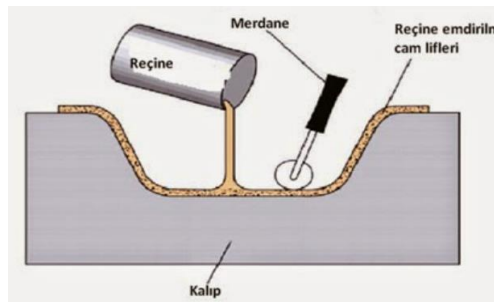
- Uygulama sahası dışbükey şekle sahip parçalar ile sınırlıdır.
- Düzgün bir dış yüzey elde etmek için parçanın pişme sonrası işlenmesi gerekebilir.
- Üretimde genellikle düşük viskoziteye sahip reçineler kullanılır. Bu, mekanik özelliklerin bozulmasına yol açar.

- Büyük parçalar için sarımı için mandreller pahalı olabilir.

1.1.4.2.4. El Yatırma Yöntemi

Bu üretim yönteminde takviye malzemesi kalıba elle serilir. En basit ve en eski yapım yöntemidir. Emek-yoğun bir üretim yöntemi olduğu için kapasite işçilik ve kalıp sayısına bağlıdır. Şekil 1.11’de el yatırma yöntemi gösterilmiştir. Dokuma veya kesilmiş elyaf liflerden yapılmış bir takviye kumaşı, hazırlanmış bir kalıba elle yerleştirilir ve sıvı reçine liflerinin katmanları ile emdirilir. Elyaf liflerin döşenmesinden önce kalıp temizlenir ve jel kot ile kaplanır. Jel kaplama sertleştikten sonra, lifli tabaka yatırılır. Son olarak reçine uygulanır ve kompozit hazır olur. Reçinede meydana gelen kimyasal reaksiyonlar, malzemeyi son derece dayanıklı hale getirir. Bu işlem sırasında reçinenin elyaf kumaşa iyi nüfuz etmesi önemlidir. El yatırma tekniğinde en yaygın olarak kullanılan polyester ve epoksi reçinelerin yanı sıra vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Kompozit malzeme üretiminde %30'a kadar fiber reçine oranı kullanılabilir ve daha yüksek fiber hacim oranı için prepregler kullanılmaktadır.

Bir kalıptan günde büyük parçaların üretiminde kolaylıkla kullanılabilir. Üzerine rulo veya fırça yardımı ile sıvı reçine emdirilir. Bunun sonucu kalıbın şeklini alan kompozit ortaya çıkar. Üretim esnasında sıvı reçinenin takviye malzemesine iyi nüfuz etmesi oldukça önemlidir. Bu üretim yöntemi düşük üretim maliyeti ve montaj kolaylığı sağlarken işgücü ve yetenek isteyen istemesi gibi avantaj ve dezavantaja sahiptir [42] [44].

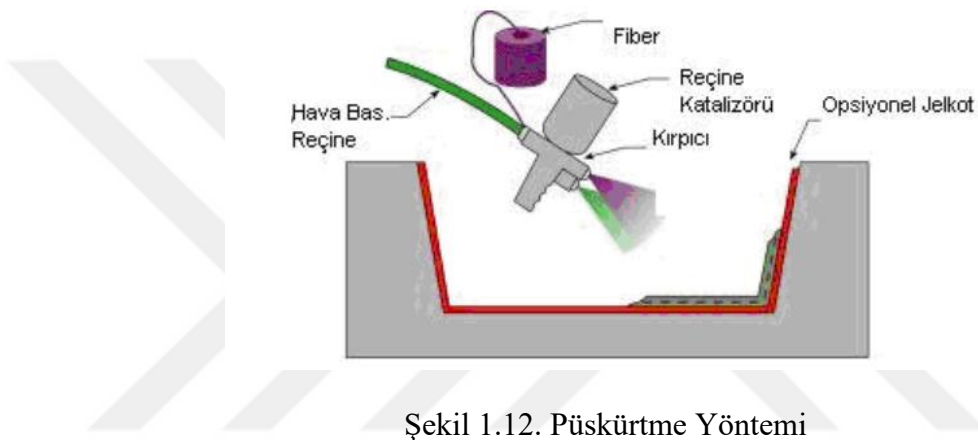


Şekil 1.11. El Yatırma Yöntemi [31]

1.1.4.2.5. Püskürtme yöntemi

Püskürtme yöntemi, bir püskürtme tabancası yardımıyla elle uygulama yöntemidir. Şekil 1.12 de Püskürtme yöntemi gösterilmiştir. Püskürtme, aletli bir elle döşeme şekli olarak

kabul edilebilir. Kesilen lifler sertleştirici içeren reçine ile birlikte özel bir püskürtme tabancası ile kalıp yüzeyine püskürtülür. Elyaf kırpma tabanca üzerinde bulunan otomatik kırpıcı ile yapılmaktadır. Püskürtme işlemi tamamlandıktan sonra rulo ile yüzey düzeltilerek ürün hazırlanır. Birbirinden bağımsız çalışan kırpıcılar yardımıyla kırılan elyaf tanecikleri reçine ile birleştirilerek kalıp üzerine püskürtülür. İstenilen püskürtme kalınlığı elde edildikten sonra kürleme işlemi başlar. Büyük boyutlu parçaların üretimi için uygundur. Aynı zamanda işçilikten de tasarruf sağlar [32] [44] [45].

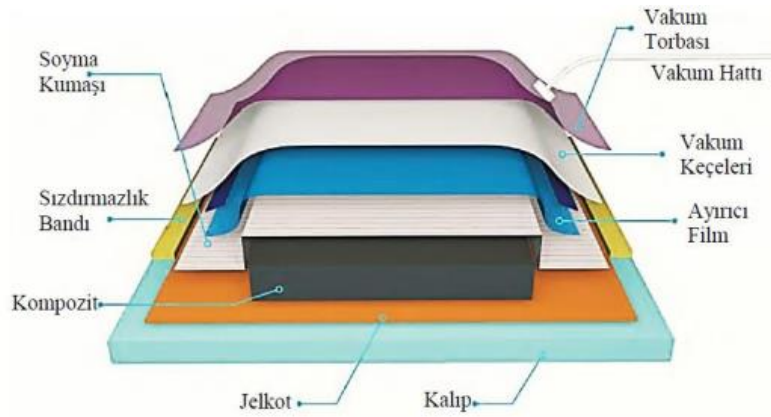


Şekil 1.12. Püskürtme Yöntemi

1.1.4.2.6. Vakumlu torbalama yöntemi:

Vakum torbalama üretim teknolojisi, esas olarak, elyaf kompozit kumaş malzemesinin kalıba elle döküldüğü ve reçinenin elle kalıba dağıtıldığı ve daha sonra kullanıma sunulduğu bir uygulamadır. Şekil 1.13’de vakumlu torbalama yöntemi şematik görüntüsü verilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde vakum torbası yöntemi, klasik olarak uygulanan manuel yatırma yöntemi ve kompozit yapı üretim yöntemindeki eksiklikleri ortadan kaldırarak, daha yüksek mukavemet ve daha hafif kompozit yapıların üretilmesini mümkün kılmaktadır.

Yüksek teknolojlili kompozitlerin uçak ve uzay endüstrilerinde ve istenen son ürünlerin birçok alanında kullanılması, özel kompozit şekillendirme yöntemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu işlemlerin ticari olarak üretilen kompozitler için kullanımı küçük olmasına rağmen, özel veya performans açısından kritik uygulamalarda kullanılırlar [38].



Şekil 1.13. Vakumlu Torbalama Yöntemi [44]

1.1.4.3 Kapalı kalıplama yöntemleri

1.1.4.3.1. Profil çekme yöntemi (Pultrüzyon)

Takviye malzemesinin reçine matrisi ile birleştirilerek sıcak kalıptan çekilmesi ile profil üretim sürecidir. Endüstride yaygın olarak takviye malzemesi cam elyaf kullanılır. Pultrüzyon düşük maliyetli seri üretim için olanak sağlayan, sürekli ve otomatik bir süreçtir.

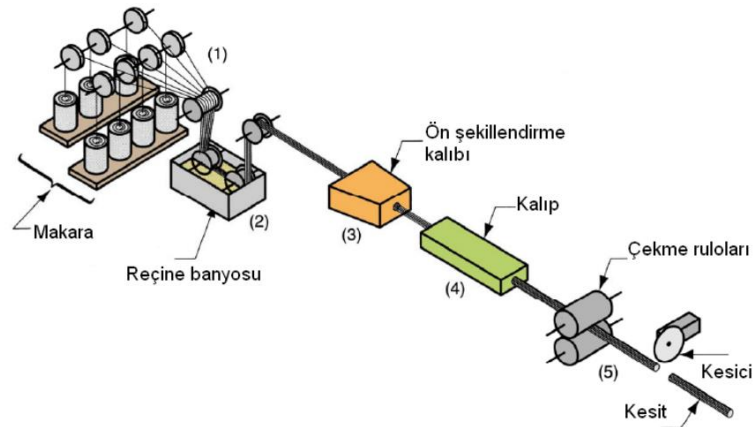
Kalıplar genellikle krom kaplı parlak çelikten yapılır. Malzeme ısıtılmış kalıptan geçerken kısmen veya tamamen kurlenir. Kontur çizimi işlemi ile elde edilen parçalar düzgündür ve ayrı bir işlem gerektirmez. Profil oluşturma, sabit bir enine kesite sahip katı ve içi boş yapılar üretmek için yaygın olarak kullanılır.

Profil Çekme Yönteminin Avantajları

Pultrüzyon (çekme) hızlı üretim sağlayan, düşük maliyetli, sürekli ve otomatik bir süreçtir. Reçine miktarı hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Fiberler iplik formunda kullanıldığı için maliyeti daha düşüktür. Düzgün liflerden oluşan, yüksek fiber hacimsel oranlarına sahip ürünlerin yapısal performansları yüksek olabilir.

Profil Çekme Yönteminin Dezavantajları

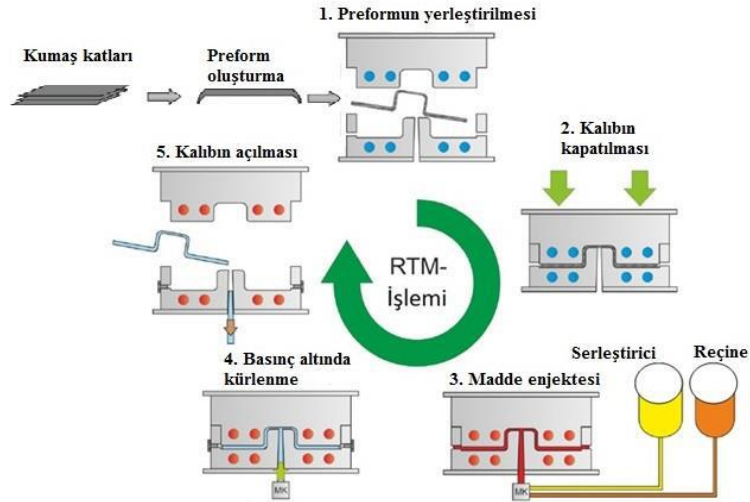
Sadece sabit kesitli parçaların üretimi ile sınırlıdır. Isıtılmış kalıp kullanımı ek maliyeti oluşturan bir faktördür. Şekil 1.14 de profil çekme yöntemi gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.14. Profil çekme yöntemi (Pultruzyon)

1.1.4.3.2. Reçine Transfer Yöntemi (RTM):

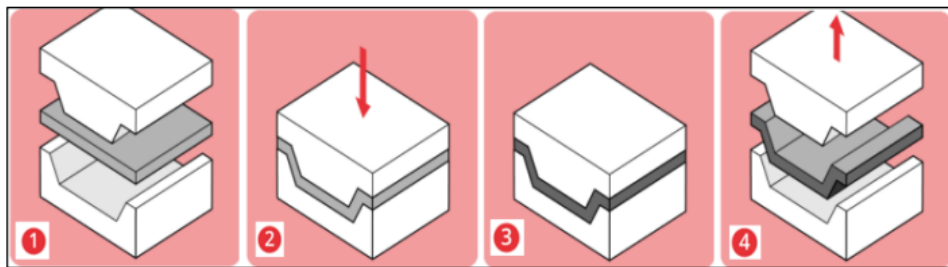
1980 yıllarının ortasından beri kullanılan reçine transfer yöntemi, karmaşık parçalar üretildiği için otomotiv, havacılık, denizcilik alanlarında kullanım alanı bulmuştur. Sıvı kalıplama olarak da adlandırılan bu işlem, erkek ve dişi kalıplar arasına önceden oluşturulmuş veya kesilmiş sertleştiricilerin yerleştirildiği ve kapatıldığı kapalı bir kalıplama işlemidir. Basınçlı reçineler, katalizörler, pigmentler, dolgu maddeleri vb. Karışım kalıba tekli veya çoklu portlardan pompalanır. Basınçlı kalıplama ve enjeksiyon kalıplama yöntemleri, yüksek verimleri nedeniyle daha yaygınken, RTM yöntemi, elyaf oryantasyonunu kontrol etmek ve neredeyse ağ şeklindeki parçaların üretimini sağlamak için ön plana çıkmıştır. Bu yöntemde genellikle sürekli lifler kullanılır. RTM işleminin en dikkate değer özelliği, her iki tarafı da pürüzsüz olan yapısal parçalar üretebilmesidir. Jelkot kalıbın bir veya iki yüzüne uygulanabilir. Şekil 1.15 de reçine transfer işlem absamakları görülmektedir. Korozyon direnci ve/veya dış yüzey görünümü isteniyorsa şeffaf veya yüzey keçeleri kullanılabilir. RTM işleminde en önemli konu olası kuru alanların oluşmasıdır. Bu amaçla, sızdırmazlığı sağlamak için kalıbın etrafına contalar yerleştirilir. Ayrıca bir hava valfi, havanın contaya yakın bileşenlerden kaçmasına izin verir ve reçine israfını azaltır. Düzgün reçine akışı elde etmek ve kuru alanları gidermek için hava kanallarına vakum uygulayarak takviyedeki havayı çıkarın.



Şekil 1.15. Reçine Transfer Yöntemi (RTM)

1.1.4.3.3. Baskı Kalıplama Yöntemi:

Bu yöntem, karmaşık parçaların seri üretimine izin verir. Şekil 1.16 da baskı kalıplama yöntemi gösterilmiştir. Yüksek üretim kapasitesi gereken yerlerde tercih edilir. Baskı kalıplama yönteminde hamur haline getirilen polyester, cam elyafı, dolgu ve katkı malzemelerinin karışımı hazırlanır. Hazırlanan bu karışım daha önceden ısıtılan kalıbın arasına yerleştirilerek basınç ve ısı altında şekillendirilir. Bu yöntem ile üretilen parçalar RTM ve enjeksiyonlu kalıplamaya göre daha ince olmasından dolayı daha verimli kürlenmeye sahiptir. Yöntemin en önemli avantajı doğrusal olmayan kalınlıklar ile flanşların ikinci işleme gerek duyulmadan üretilebilmesidir. [33]

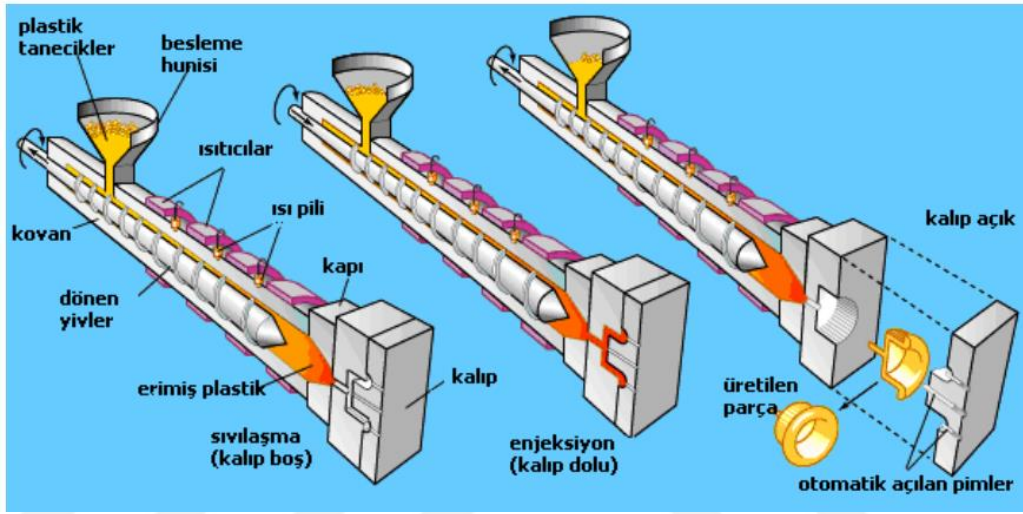


Şekil 1.16. Baskı Kalıplama Yöntemi

1.1.4.3.4. Enjeksiyon Yöntemi:

Yöntem, ısıtılmış polimer yumuşadıkça ve şekillendikçe soğutularak çalışır. Şekil 1.17 de enjeksiyon yöntemi gösterilmiştir. Termoplastik ve termotterlerde başarılı bir

yöntemdir. Genellikle granül ve toz halde bulunan termoplastik reçine basınç ve sıcaklık etkisi ile eritilerek sonsuz mil yardımı bir başlıktan akışa zorlanır. Kalıbın içine enjekte olan yarı akışkan reçinenin çift taraflı kalıbı doldurması sonucu yapılan üretim yöntemidir. Bu yöntem ile boru, çubuk ve plaka gibi malzemeler üretilebilir. Üretilen malzemenin uzunluğu değişkendir. Bu yöntem ile her iki tarafı düzgün parçalar üretilir. [33]



Şekil 1.17. Enjeksiyon Yöntemi

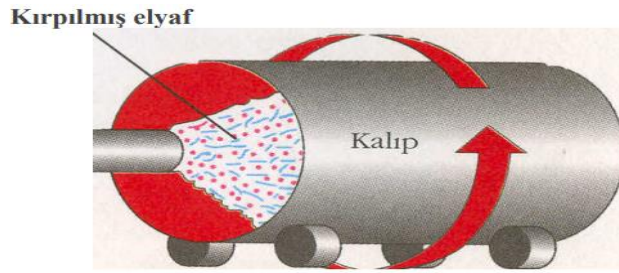
1.1.4.3.5. Savurma Döküm Yöntemi (Santifrüj):

Bu şekillendirme yöntemi, borular, elektrik direkleri, depolar, depolama tankları gibi silindirik yapıların üretiminde kullanılır. İçi boş mandrel (kalıplar) arasına sıkıştırılmış matlar reçine ile birlikte püskürtülür. Yüksek çevresel hızda dönen kalıbın ürettiği merkezkaç kuvveti, reçine ile temas halinde olan takviye malzemesini ıslatır ve laminatı kalıp yüzeyine yapıştırır. Bu işlemde üretilen parçanın kalıbın iç yüzeyine temas eden dış kısmı parçanın düz tarafını temsil eder, genellikle ürünün her iki yüzü de düzgün ürün elde edilir.

İçi boş bir kalıp içerisine kırılmış elyaf ve reçine gönderilir. İçi boş kalıba yaklaşık 900 ile 2400 rpm çevresel hız kazandırılır. Çevresel hız ile merkezci kuvvet oluşması sağlanır. Oluşan merkezci kuvvet elyaf parçalarını reçine ile ıslatarak kalıp yüzeyine yapıştırır. Kalıbın iç kısmına temas eden yüz parçanın düzgün yüzüdür. Genellikle parçanın her iki yüzü de düzgündür [31] [33]. Şekil 1.18 de savurma döküm yöntemi gösterilmiştir.

Avantajları: Düzgün dış yüzeylerin elde edilmesinde bir sorun yaşanmaması sayılabilir.

Dezavantajları: Büyük boyutlu kalıpları döndürmede sıkıntı yaşanmasıdır.

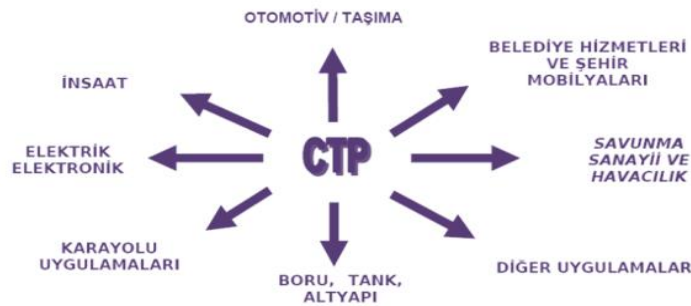


Şekil 1.18. Savurma Döküm Yöntemi

1.1.5. Kompozit Malzeme Kullanım Alanları

Ülkemizde 1960'lı yıllardan itibaren çatı membranları ve küçük deniz araçlarının yapımında cam elyafı kullanılmaktadır. Ayrıca seri üretimi yapılmış ilk yerli araba olan ANADOLU'nun gövdesi de bu malzemeden üretilmiştir.

Cam elyafla takviye edilmiş sentetik reçine matrisli malzemeler için dilimizde “Cam Takviyeli Plastik (CTP)” olarak adlandırılmaktadır. Hammadde, kalıp ve imalatçıların yerli olmasından dolayı CTP'nin kullanımı giderek artış göstermiştir. Üretilen malzeme niteliğine uygun cam elyafı ve reçine bir araya getirilerek uygun üretim metodu ve kalıp kullanılmak suretiyle kolayca şekillendirilebildiği için Şekil 1.19'da gösterildiği gibi birçok alanda kullanılmaktadır.



Şekil 1.19. CTP Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler, düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet gibi özelliklerin bir arada olması sebebiyle pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.1.5.1. Denizcilikte Kompozit Kullanımı

1940'lı yıllarda ilk kompozit tekneler üretilmeye başlandı. Günümüzde 50 metre altı motor yatların ve yelkenli teknelerin yaklaşık %90'ının gövdeleri kompozit malzemeden üretilmektedir. Üretimler genel olarak vakum infüzyon yöntemi ile yapılmaktadır.

1.1.5.2. Rüzgâr Enerjisi Kompozit Kullanımı

1970'lerde başlayan kompozit rüzgâr türbin kanadı üretimi her geçen yıl artmaktadır. 2005'te 9,4 milyar \$ olan pazarın 2020'lerde 935 milyar \$'a ulaşması beklenmektedir. Üretimler genellikle vakum infüzyon yöntemi ile yapılmaktadır.

1.1.5.3. Uçay ve Havacılık Kompozit Kullanımı

1970'lerde üretilen Concorde uçaklarında %8 oranında kompozit malzeme kullanılmıştır. Günümüz uçaklarından Boeing 787 ve Airbus A350'ni %50'si kompozit malzemeden üretilmiştir. Uçay araçlarında ve roketlerde kompozit malzemelerin kullanılması ile menziller önemli oranlarda artmıştır. Ayrıca helikopterler, savaş uçakları ve İHA'larda da kompozit malzemeler yoğun olarak kullanılmaktadır. Kompozit kullanım alanlarına baktığımızda ilk sırada havacılık sanayinde çok geniş uygulama alanları bulunduğunu görmekteyiz. Kompozit malzemelerin hafifliklerine karşın üstün mekanik özelliklerinden dolayı, uçak ve helikopterlerin iç tasarımının yanı sıra yapısal malzemelerin üretiminde de kullanılmaktadır.

Kompresör Kanatları, İç Donanım, Gövde: B/Al, SiC/Al, Gr/Al

- Türbin Kanatları: Wolfram ve Tantal takviyeli malzemeler.
- Helikopter Parçaları: B/Al, SiC/Al, Gr/Al, Gr/Mg, Al₂O₃/Mg, Al₂O₃Al

1.1.5.4. Savunma Sanayii Kompozit Kullanımı

Kompozit teknolojisi dünya çapında geliştikçe, teknolojinin savunma sanayisindeki uygulaması da gelişmektedir. Kompozit malzemeler, çeşitli kombinasyonlarla kendilerini oluşturan bileşenlere göre daha dayanıklı ve daha hafif olabildikleri için bu alanda önemli

bir yer tutmaktadır. Bu durumdan faydalanılarak savunma sanayinin olmazsa olmazı zırhlara uygulanıp kompozit zırhlar geliştirilmiştir. Kompozit malzemeler, savunma sanayinin ihtiyaçlarını karşılayan zırh koruma, miğfer, bölme, duvar gibi birçok balistik dayanıklı üründe kullanılmaktadır. Özellikle aramid ve S₂ cam gibi takviye malzemeleri yüksek darbe dayanımlarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.1.5.5.Savunma Sanayii Kompozit Kullanımı

Kompozit malzemeler birçok inşaat uygulamasında hem yapısal (kolon güçlendirme) hem de estetik (prefabrikasyon) amaçlarla tercih edilmektedir. Birçok ülkede özellikle yaya köprüleri, kompozit malzemelerden üretilen çekme profillerden inşa edilmektedir. Borularda kullanılan çeşitli çaplardaki borular, rögarlar, rögar kapakları, sınır elemanları, ızgaralar ve erişilebilir yüzeyler gibi birçok alt yapı/üstyapı ürünü kompozit malzemeden imal edilmektedir.

1.1.5.6.Otomotiv Kompozit Kullanımı

Ticari araç gövdeleri ilk 1950'ler de üretildi. Günümüzde başta F1 araçları olmak üzere üst sınıf birçok araçta kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Otobüs, tır, kamyon ve tarım araçları gibi ağır vasıtaların birçok parçası kompozit malzemelerden yapılmaktadır. Araçların daha hafif olması yakıt tüketimini düşürür ve araç menzilini ve yük taşıma kapasitesini de arttırmaktadır.

1.2. Zırhlara Genel Bakış

Temel olarak, bir zırhlı araç bir savaş sistemidir. Balistik koruma, hareket ve atış kabiliyeti sahiptir. Bu özellikler birleşerek mühendislik harikalarına dönüşüyor. Tasarım hususlarında amaç; operasyon sırasında mürettebat ve dâhili bileşenler için mümkün olan yüksek seviyede koruma sağlamaktır.

Zırh malzemesinin metrekaresi ve genişliğine bağlı olarak geriye doğru iz düşümünün kütle ağırlığı ile olası tehdide karşı dayanıklılığı ve malzemenin direnç parametreleri ortaya çıkartmaktadır. Haddelenmiş zırh çeliği en yaygın olanıdır. Brinnel 380 metodu ile üretilir. RHA yani 'Yuvarlanmış Homojen Zırh' olarak da bilinir. Mühimmatın gücü delebildiği zırh çeliğinin kalınlığı ile ölçülür.

Tarihin geçmiş sahnelerinde Kadeş Savaşı'nda Hititler demir arabalar kullandı, ilerleyen zamanlarda karbon ve demir karışımı ile elde edilen çelik Sanayi Devrimi'nin simgesi haline geldi. Bu gelişme ile ahşap kullanılarak yapılan muharebe gemileri metal malzeme ile yapılmaya başlandı. Otomobilin icadı ile kara sistemlerinin gelişmesine yol açtı. İlk zırhlı araçlarda karbon içeren çeliğin birleştirilmesi kaynaklı problemlerden dolayı perçinleme işlemi kullanıldı. Zamanla yüksek balistik koruma sağlayan tel kaynak işlemleri geliştirildi. Balistik koruma konusunda bir dev olan Tiger ve Panther tel kaynaklama yöntemi ile üretilmiştir.

Soğuk Savaş sırasında balistik koruma rekabeti yoğunlaştıkça, farklı yaklaşımlar incelenmeye ve uygulanmaya başlandı. Kurşun geçirmez alüminyumun kara araçlarında uçaklar için kullanılması da böyle bir çalışmadır. Ağırlığı ve düşük korozyon oranı uzun zamandır alüminyumun tercih edilme sebepleri olmuştur. Diğer bir uygulama ise 1954 yılında T95 prototipinde kompozit zırh kullanılmasıydı. Önde 25 mm, arkada 100 mm cam ve 50 mm çelik bulunan bu araç, 65 derece eğimli sandviç zırhı ile çukurlu mühimmatlara karşı büyük bir başarı sağladı. Ancak proje, yetersiz kaynak nedeniyle seri üretime geçemedi.

1966'da hizmete giren T-64 kullanıma alınan kompozit lamine zırhlı ilk tank olmuştur. Bu araçta kullanılan zırhta iki çelik arası eriyik cam bulunmaktadır. T-72 ve sonraki tanklarda, çelik levhalar arasına çerçeveli fiberglas yerleştirilmiştir. Bu gelişmelerle birlikte geleneksel çelik kullanımı tamamen terk edilmiştir. Kompozit lamine zırhlar güdümlü tanksavar füzelerinin artan performansına karşın en etkili tepkidir. [38].

1.2.1. Zırh Tanımı

İnsanoğlu, tarih boyunca dışarıdan gelebilecek zararlara karşı kendini koruma içgüdüleriyle hareket etmiştir. Bu içgüdü nedeniyle zırh bir ihtiyaç haline geldi ve çeşitli zırhlar üretilmiştir.

Kullanım alanlarına göre zırhlar; Kişisel Zırhlar (kurşun geçirmez yelekler, kasklar vb.) , Hafif Zırhlar (Savaş uçakları ve helikopterlerde kullanılan zırhlar) ve Ağır zırhlar (tanklarda kullanılır) olmak üzere üç ana başlıkta incelenmektedir [36].

İlk dönemlerde zırhlar, çeşitli hayvan derileri ve metal malzemelerden yapılmış kalkanlarla sınırlıydı. Daha sonraları, gelişen savaş teknolojilerine karşı yetersiz

kalmaları ve dayanımlarının artırılması ihtiyacı neticesinde, zırh çalışmalarında yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu malzemelere yönelim ağırlık kazanmıştır [37]. Zırh, gövdeyi ve ona bağlı uzuvları korumak için kullanılan ve eski çağlardan beri kullanıldığı bilinen taşınabilir bir koruyucu ekipman parçasıdır. Vücudu özellikle kritik bölgelerdeki zararlı etkilerden, savaş alanında düşman tehditlerinden ve silahlarından koruyan en önemli savunma araçlarından biridir. Ayrıca Cooper G. ve Gotts P. [20], koruyucu zırhlar için enerjiden korunma sağlayan herhangi bir malzeme tanımını kullanmışlardır. Bahsi geçen bu enerji delici/delici olmayan, patlamalı mermi dalgaları, darbeleri veya şarapneller gibi hasar verici unsurların neden olduğu etkiler olarak tanımlanabilir [20,21,22]. Tablo 1.1’de dönem bazlı zırh malzemelerinin değişimi gösterilmektedir.

Tablo 1.1. Farklı yıllarda ve medeniyetlerde zırhların geliştirilmesi [20]

Dönem	Zırh Malzemeleri ve Tasarımları
16. yy	Manganez alaşımlı oluklu veya kanallı zırh
17.yy	Yeni geliştirilen silahlardan korunmak için metal zırhın kalınlığı arttırıldı
I.Dünya Savaşı	Metal kasklar, ağır metal göğüs plakası, zırhlı yelek
II.Dünya Savaşı	Çelik levhalar, cam elyafı, polyester ve naylondan oluşan katmanlı zırhlar
1960’lar ve Sonraları	Seramik zırh, fiberglas laminatlar, alüminyum oksidin ilk zırha dönüşmesi, bor karbür, poliamidler

1.2.2. Giyilebilir Zırhlar

Tarihte zırhlar ile alakalı ilk örnekler milattan önce 2050’lerde gözlemlendi. O zamanlarda zırhlar, özellikle deri ve döneme adını vermiş bronz kullanılarak yapılmıştır. Demirin yaygınlaşmasıyla beraber zincir şeklinde parçalar ile örülmüş zırhlar üretilmeye

başlanmış ve yelek biçimi verilen bu giysiler, metal ince plakalar ile desteklenerek koruyucu özellikleri arttırılmaya çalışılmıştır [21,22]. Zırh, eski Türk toplumunda da önemliydi ve Osmanlı Devletinde farklı bir şekilde üretildi. Özellikle üst düzey devlet adamlarının ve askerlerin zırhları farklı türde metal ve minerallerden yapılmaktadır [21,22].



Şekil 1.20. Yelek tipi ve süslemeli zırhlar [22]

Özenle işlenmiş bezeme ve işlemelerle bezeli zırhlar ve yapımı eski çağlarda bir sanat dalı olarak kabul edilmiş, bezemeli zırhlar gösterişli görüntüsüyle devlet adamlarının şan ve şöhretini temsil ediyordu. Tarihte neredeyse bütün toplumlarda zengin kişilerce giyilmiş, kahramanlık ve cesaretin timsali olmuştur (Şekil 1.20.) [22]. Zırh, zorlu üretim süreci, uzun üretim döngüsü, pahalı hammaddeler ve az sayıda üretici nedeniyle tarihsel olarak askeri teçhizatın lüks bir parçası olarak görülmüştür. İnce demir telin ilmek şeklinde bükülmesiyle yapılan zırhın, ağırlığı hareket kabiliyetini sınırladığı için yeterince esnek olmadığı gözlemlendi. Bu nedenle eski çağlardan beri alternatif ve gelişmiş tasarımlarla daha hafif ve daha koruyucu zırhlar üretme çabaları sarf edilmektedir [21, 22].

Modern askeri operasyonlar, teknoloji tabanlı taktikler ve mevcut insan taşınabilir bireysel silahlar ve mühimmat, hasara dayanıklı, esnek, hafif ve yüksek enerjiyi emebilen gelişmiş vücut zırhı sistemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Koruyucu giysilerin yeni gereksinimlerini karşılamak için, son yirmi yılda literatürde vücut koruyucu

malzemelerin yeni konseptleri ve tasarımları üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır [23,24,25]. Yapılan tüm zırhların temel amacı mermilerin vücuda girmesini engelleyerek kullanıcının hareket kabiliyetini kısıtlamadan sınırsız koruma sağlamaktır. Günümüzde yangın ve patlama tehlikelerine karşı koruma sağlamaktadır. Ceket ve yelek gibi giyilebilir koruyucu zırhlar sıklıkla bu amaçla kullanılmaktadır. Yelek tarzı giysilerin vücudun göğüs ve kalça bölgelerini kapatan bölmelerine çeşitli metal alaşımlarından veya yüksek ağırlıklı polimerlerden yapılmış küçük plakalar yerleştirilir. Zırhın esnekliğini sağlamak için yerleştirilen plakalar birbirine bağlı değildir. Amacı, plakalar yerleştirerek zırhın koruyucu özelliklerini arttırmaktır [13].

1.2.3. Araç Zırhları

Zırhın tarihsel gelişimine bakıldığında, genellikle giyilebilir teknoloji ile yapılan zırh, zırhlı araçların gelişmesiyle birlikte araçlarda giderek daha fazla kullanılmaya başlanmakta ve yapılan araştırmalar, giderek daha fazla zırhlı araç teknolojisinin kullanıldığını göstermektedir. 20. yüzyılda zırhlı araçların geliştirilmesi, aracın silahlandırılması fikriyle başlamış ve ardından yapılan araştırma ve saha çalışmaları, zırhlı araçların geliştirilmesine önemli katkılar sağlamıştır. Araç zırhının ilk kullanımı, Almanların tanklarını hafif silahlardan korumak için emaye kaplamasıyla II. Dünya Savaşı sırasında geldi. Dünya Savaşı seramik zırh kullandı ve Kore Savaşı çelik ve silikat zırh kullandı [13,15,16].



Şekil 1.21. Roketsan tarafından M60A3 tankları için geliştirilen ERA zırh paketi [38]

Zırhlı araç sistemlerinde zırh olarak alüminyum, çelik, seramik, cam, fiberglas, plastik, AlMg-Mn ve titanyum gibi malzemeler kullanılmaktadır[27, 28]. Zırhlı bir araç tasarımına istenilen düzeyde koruma sağlamak için eklenen malzemelerden hacim ve ağırlık parametreleri araç performansını önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle koruma amacıyla eklenen ek malzemelerin (örneğin levha/panel) hafif olması ve aracın hareket kabiliyetini kısıtlamadan balistik koruma düzeyini artırmaya yardımcı olması beklenmektedir. Nihai tasarımın düşük ağırlığa ve yakıt verimliliğine sahip olması da çok önemlidir. Alüminyum alaşımları ve titanyum gibi hafif metaller beklenen enerji korumasını ve ağırlık tasarrufunu sağladıklarından dolayı zırhlı araçların imalatında kullanıldığı literatürde belirtilmektedir. Bu metallerin üzerleri çeşitli kompozitler, seramikler ya da çelik levhalar ile desteklenerek zırh koruma etkinliği artırılmaktadır [29, 30-33]. Şekil 1.21’de tankar için geliştirilen ERA zırh paketi tan üzerinde gösterilmiştir.

1.2.4. Zırhların Sınıflandırılması

Zırhı genel olarak iki türe ayırabiliriz: sert zırh ve yumuşak zırh. Sert zırh, metal plakalar, seramikler, güçlendirilmiş plastikler ve kompozitler gibi sert malzemelerden oluşan sert bir yapıdır. En büyük dezavantajı ağırlıkları ve esnek olmamalarıdır [34]. Yumuşak zırh, polimer bazlı malzemeler ve polimer liflerden yapılmış kumaşlardır. Yumuşak zırh, esnekliği, hafifliği ve rahatlığı nedeniyle kişisel korunma için tercih edilen bir seçimdir. Balistik koruma için kumaşların seramik, metal gibi sert malzemelere göre üstün olmasının nedeni ağırlık tasarrufunun yanı sıra kullanıcının hareket özgürlüğünü kısıtlamadan koruma sağlamasıdır. Aramid/para-aramid ve yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kumaşlar en çok tercih edilen balistik kumaşlardır [27,34,35].

1.2.5. Zırh Üretim Yöntemleri

Zırh üretimlerinde yöntem olarak genellikle dış kısma sert, iç kısma daha yumuşak malzeme kullanılır. Bunun sebebi; ilk katmanın sert olması neticesinde ilk yüzeyin sertliği alması, ikinci yani yumuşak yüzeyin ise enerjiyi emmesi amaçlanmaktadır [37].

Zırh Üretim Yöntemleri genel olarak 4 başlık altında toplanmaktadır. Bunlar;

1.1.13.1.Monoblock Zırh: Malzemeleri tek parça halinde çıkarma yöntemi. Gövde ve taret tek parçadır. Bu durum olası operasyonlarda zırhın bütünlüğünü tehlikeye atabilir ve zırh çatlayabilir.

1.1.13.2.Çok Parçalı Zırh: Kaynaklanmış kalın bir zırh blokları tabakasıdır. Birden fazla katmandan oluştuğu için, her cephe katmanının hasar oranı azaltılır. Bu da yüksek balistik koruma sağlar.

1.1.13.3 Aralıklı çok parçalı zırh: Kaynaklanmış boşluklu zırh parçalarından oluşur. Vurulan mermi ilk bloğa girdikten sonra enerjisinin bir kısmı kalan boşluk tarafından emilir ve enerjisi başka bir bloğa aktarılmaz. Bu yöntem her iki yöntemde de daha yüksek balistik koruma sağlar. Bu yaklaşımın en iyi örneği Sovyet T-72'dir. Bu tankların zırhı 130 mm olmasına rağmen 600 mm'lik bir bloğun direncine eşdeğerdir.

1.1.13.4.Eğimli Aralıklı Çok Bloklı Zırh: Blokların içi boş bir şekilde belirli bir açıyla kaynatılmasıyla elde edilen bir zırh üretim yöntemidir. Mühimmat, diğer yöntemlere göre uzun bir yol kat etmek zorundadır. Eğimi nedeniyle mühimmat sekebilir veya ucu kopabilir. Bu üretim yöntemlerinden herhangi biri, bir dizi farklı parametre oranlanarak seçilir. Bir ülkenin endüstrisi, yetişmiş personel kapasitesi, tehdit algısı, operasyonel ihtiyaçları ve ekonomik koşulları nasıl üretildiğini ortaya çıkaracaktır. Kolay bir üretim yöntemini tercih etmek ve araçlara alternatif zırh yerleştirmek de bir entegrasyon yaklaşımıdır. [38].

1.2.6. Zırh Çeşitleri

Günümüzde zırh teknolojilere yönelik çalışmalar hızla devam etmektedir. Kolay şekil alabilme, seri üretime uygunluk, makinelerin çalışması sırasında üzerinde oluşabilecek gerilmelere dayanabilme ve kolay deforme olmaması gibi özellikler malzemelerin zırh teknolojilerinde kullanılmasında belirleyici rol oynamaktadır.

Üretim tecrübesi, kaliteli işçilik, imalat tekniği ve mühendislik bilgisi gibi faktörler de zırhların etkinliğinin artırılmasında önemli unsurlardandır. Bununla birlikte, günümüzde genel olarak zırh çeşitleri 4 grupta incelenmektedir [37]. Bunlar;

1.2.6.1.Parçacık Kalkanı

Araçların iç kısmına yerleştirilen zırh herhangi bir delinme sonucunda personele ve iç parçalara zarar vermemesi için şarapneli durdurur. İç kısma yerleştirilen zırhların hafif olma zorunluluğu nedeniyle kompozit tercih edilir. Herhangi bir delinme olduğunda iç bölgeye (malzeme ve personele) zarar verebilecek şarapnel etkisini önler/azaltır. İncelik ve hafiflik zorunluluğu nedeniyle genellikle kompozit malzemelere dayanmaktadır [38].

1.2.6.2.Ek Izgara ve Ağ Zırhlar

Mühimmatın ana gövdeye ulaşmadan patlamasını sağlarlar. Ucuz, hafif ve zarar gördüğünde kolayca değiştirilme özelliklerine sahiptir. Çukur mühimmatından sonra geliştirilen ek kafes zırh, mühimmatın ana gövdeye ulaşmadan patlamasına izin verdi. Hafif, ucuz ve hasar gördüğünde hızla değiştirilebilen bu zırhlar, mühimmatlara karşı en iyi çözümlerden biridir [38].

1.2.7. Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE)

UHMWPE polimerleri kullanılarak elyaf üretimi ilk olarak 1930'larda başladı. Eriyik lif çekme yöntemi ile elde edilen lifler çok yüksek kopma mukavemetine (25 kg/mm²) sahiptir [32]. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), mükemmel mekanik özelliklere ve çok düşük yoğunluğa sahip bir mühendislik termoplastiktir. UHMWPE'nin en dikkat çekici özelliklerini yüksek kimyasal direnç, çok düşük yoğunluk, yüksek nem direnci, çok yüksek çekme/aşınma direnci ve düşük dielektrik sabiti olarak sıralayabiliriz [33,34]. UHMWPE, tekstil, madencilik, kimya, paketleme, makine, inşaat, elektrik, medikal, spor ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok harika özelliğinin yanı sıra, bazı dezavantajları da vardır. Örneğin, yüzey sertliği, mukavemeti ve sertliği düşüktür, sürünme direnci zayıftır ve akışkanlığı zayıftır, bu nedenle işlenmesi zordur [34]. Aramid liflerine benzer şekilde UHMWPE lifleri de düşük bir basma dayanımına sahiptir. Hatta lifler birbirlerine Van der Waals bağları ile bağlandıklarından enine dayanımları Aramid liflerinden bile daha düşüktür [33,34,35]. UHMWPE, yüksek darbe direnci, kimyasal direnci ve çok düşük yoğunluğu nedeniyle giyilebilir zırh üretiminde ilk tercihtir. Maliyet açısından aramid elyaflara göre daha pahalı olmalarına rağmen, düşük yoğunlukları ve yüksek mukavemetleri nedeniyle tercih edilmektedirler. Dyneema ve Spectra gibi en bilinen UHMWPE liflerini olarak listeleyebiliriz [33,34,35]. Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE, UHMW) termoplastik polietilendir (PE).

HMWPE ayrıca yüksek modüllü polietilen olarak da bilinir. HMWPE, şu anda üretilen herhangi bir termoplastik arasında en yüksek darbe dayanımına sahip çok sert bir malzemedir. HMWPE kokusuz, tatsız ve toksik değildir. Son zamanlarda, UHMWPE, balistik koruma uygulamaları için yeni bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, UHMWPE elyafları, mermilerin veya patlayıcı patlamaların etkisine karşı hayatta kalma teknolojisi alanında kabul görüyor. UHMWPE kompozitleri, personel koruması (yelekler ve kasklar) için zırh malzemelerinin üretilmesinde ve askeri ve sivil zırhlı araçlarda kullanılmıştır. UHMWPE'nin dokuma yapısı, enerji emme kapasitesinden daha ağır basan gevşek bağlı liflere sahiptir. Bu nedenle, malzeme balistik performans uygulaması için en uygun olanıdır. Bu kapsamda poliüre kaplı UHWPE levhaların balistik dayanımı önemli bir yere sahiptir. Bu projede kaplama tekniği için metal malzemeler yerine fiber takviyeli kompozit malzemeler üzerine olacaktır. Tablo 1.2. 'de UYMAPE malzemenin mekanik özellikleri gösterimildir.

Tablo 1.2. Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen liflerinin mekanik özellikleri [33]

LİF TÜRÜ	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Çekme Modülü (Gpa)
DYNEEMA SK60	0.97	2620	87
SPECTRA 900	0.97	2080-2400	86-103
SPECTRA 1000	0.97	2740-3000	128-171

UYMAPE kompozit plakalar, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek sertlik ve iyi darbe dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler sayesinde UYMAPE kompozit plakalar, genellikle balistik koruma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Örneğin, zırhlı araçlarda, uçaklarda ve helikopterlerde kullanılan zırh panelleri, vücut zırhları ve diğer balistik koruma uygulamalarında kullanılabilirler. UYMAPE kompozit plakalar genellikle kalıpla şekillendirme, sargılı sarım veya vakum infüzyon gibi imalat yöntemleriyle üretilir. İmalat sürecinde, UYMAPE elyaflar önceden belirlenen şekil ve boyutlarda kesilir ve ardından polimer matris malzemesiyle birleştirilir. Bu süreçte, UYMAPE elyafların doğru yönde ve şekilde yerleştirilmesi, plakanın mukavemetini ve

performansını etkileyebilir. UYMAPE kompozit plakaların avantajları arasında yüksek mukavemet ve hafiflik bulunurken, dezavantajı ise yüksek maliyetidir. Ayrıca, UYMAPE kompozit plakaların kimyasal mukavemeti sınırlı olabilir ve aşınmaya karşı daha az dirençli olabilirler.

UYMAPE kompozitlerin poliüre kaplaması, UYMAPE kompozit plakaların yüzeyine poliüretan malzemenin uygulanması anlamına gelir. Poliüretan (PU), sentetik bir polimer malzemesidir ve genellikle yüksek dayanıklılık ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır. Poliüretanlar, sertleştiriciler, reçineler ve dolgu malzemeleri gibi çeşitli bileşenlerin karışımından oluşan termoset bir malzemedir. UYMAPE kompozit plakaların poliüre kaplaması, plakanın yüzeyine ekstra bir koruyucu tabaka ekler. Bu tabaka, UYMAPE kompozit plakaların darbe dayanımını artırır ve yüzeylerini çizilmelere, çatlaklara, kimyasallara ve UV ışınlarına karşı korur. Ayrıca, poliüre kaplama UYMAPE kompozit plakaların yüzeyinde daha iyi bir tutunma sağlayabilir ve onları kaygan veya yağlı yüzeylerde bile tutarlı bir şekilde tutar. Poliüretan kaplamalar genellikle spreyci veya rulo ile uygulanır. Uygulama sırasında, kaplama malzemesi ince bir tabaka halinde UYMAPE kompozit plakanın yüzeyine uygulanır ve daha sonra kurumaya bırakılır. Kuruduktan sonra, kaplama malzemesi sert, dayanıklı ve elastik bir tabaka oluşturur.

Poliüre kaplamalar, sert, dayanıklı ve aşınmaya dayanıklı yüzeylerin gerektiği birçok uygulamada kullanılır. Bu nedenle, UYMAPE kompozit plakaların poliüre kaplaması, özellikle askeri ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilir. Balistik dayanıma sahip poliüre kaplamalar, genellikle savunma ve güvenlik sektörlerinde kullanılan zırh ve koruma sistemlerinde kullanılır. Bu kaplamalar, aşınmaya, darbelere, çizilmelere ve kimyasallara karşı dayanıklıdır ve aynı zamanda yüksek enerjili darbelere karşı yüksek direnç gösterirler. Aşağıdaki alanlarda kullanımları söz konusu olabilir:

- Zırh plakaları: Zırh plakaları, savaş sahalarında askerlerin vücutlarını mermi ve şarapnel gibi yüksek hızlı projeksiyonlara karşı koruyan yüksek dayanıklı malzemelerdir. Bu plakaların yüzeylerine uygulanan poliüre kaplamalar, zırh plakalarının darbelere ve aşınmaya karşı daha fazla koruma sağlar.
- Araç zırhları: Askeri araçlar, saldırılara karşı korunmak için sık sık zırh plakaları ile donatılır. Bu araçların zırh plakalarının yüzeyleri, balistik dayanımı yüksek

poliüre kaplamalarla kaplanır. Bu kaplamalar, araçların darbelere, çizilmelere ve aşınmaya karşı korunmasına yardımcı olur.

- Helikopter ve uçak zırhları: Askeri helikopterler ve uçaklar, balistik dayanıma sahip poliüre kaplamalarla kaplanır. Bu kaplamalar, yüksek hızlı projeksiyonlara karşı koruma sağlar ve aynı zamanda yüzeylerini aşınma ve çizilmelere karşı korur.
- Korunmalı kıyafetler: Askeri personel, polis güçleri ve diğer güvenlik görevlileri, korunmalı kıyafetler giyerler. Bu kıyafetlerin yüzeyleri, balistik dayanıma sahip poliüre kaplamalarla kaplanarak, daha fazla koruma sağlanır.
- Balistik duvarlar: Güvenlik odaları ve diğer savunma sistemleri, balistik duvarlarla donatılmıştır. Bu duvarların yüzeyleri, balistik dayanımı yüksek poliüre kaplamalarla kaplanır. Bu kaplamalar, duvarların darbelere ve aşınmaya karşı korunmasına yardımcı olur.
- Poliüre kaplamalar, bu gibi uygulamalarda yüksek dayanıklılık, darbe direnci ve aşınma direnci sağlayarak, koruma sistemlerinin etkinliğini ve dayanıklılığını artırır.

1.2.8. Zırh Malzemeleri

Zırh çeliği: Zırhlı muharebe araçlarında farklı özelliklere sahip mermilerin (yüksek patlayıcı parçalanma özellikli harp başlıkları, kinetik enerjili zırh delici mermiler vb.) Zırh çeliği temel olarak düşük karbonlu alaşım çeliğine aittir; ana alaşım elementleri Cr, Ni, Mo ve Mn'dir. MIL-A-12560 en popüler zırh çeliği kalitesidir; "Haddelenmiş Homojen Zırh Çeliği (RHA)" olarak adlandırılır. MIL-A-46100 kaliteleri, MIL-A-12560'tan [39,40] daha zordur. Eski adı MIL-A-1256 olan yeni tanımı ile MIL-A-46177 standardına ve Brinell 380 yöntemine göre üretilen 230 mm kalınlığında haddelenmiş çeliğin (yoğunluk 7,8 t/m³) dayanıklılığı NATO tarafından referans kabul edilmektedir. Brinell 500 ve Brinell 600 yöntemleri daha yüksek mukavemet için tercih edilen yöntemlerdir. Kara araçlarının zırhlarında genellikle dışı sert içi yumuşak çelik uygulamasıdır. Böylece birinci yüzey direnç alırken, ikinci yüzey enerjiyi soğurur. Açığa çıkan enerji daha az hasar verir.

Alüminyum: Genellikle 7020 ve AZ5G balistik koruma için kullanılan alüminyum türüdür. Magnezyum eklenir. Çeliğe kıyasla çok hafiftir ve birleştirme işlemi hızlıdır. Alüminyum kullanılan araçlarda iskelet yapıya gerek yoktur. Bu avantaj aracın daha hafif olmasında önemli bir etkidir. Alüminyumdan üretilen araçlar ek zırhla donatıldı.

Titanyum: Tüm zırhlı araçlar yerine kısmi kullanımı tercih edin. Çelikten daha hafiftir ve yüksek sertliğe sahiptir. TA6V adı verilen titanyum çelik zırhtan 1,5 kat daha dayanıklı olmasına rağmen çok daha pahalıdır.

Çürümüş Uranyum: Zırh yapmak için 238 izotopunun kullanıldığı uranyumun zenginleştirilmesi sürecinden arta kalan malzemedir. Yoğunluğu 18,5 ton/m³'tür. Yanması ve radyasyon yayması nedeniyle kullanımı tercih edilmez.

Kompozit: Cam ilk olarak kompozit sandviç zırha uygulandı; çukurlu cepanelerin delinmesi sırasında enerji yansıtan eriyiğin bütünlüğü kırıldı. Dağıtılmış eriyik katılaştı ve mukavemette 2,5 kat artışa neden oldu. Cam dışındaki malzemeleri kullanın; yaygın olarak kullanılanlar PTFE, poliüretan, naylon, kauçuk, Al₂O₃, TiB₂, SiC, B₄C'dir [38].

1.3. Balistik

Balistik kelimesi Roma İmparatorluğuna uzanan köke sahiptir. Latince'de "Balista" denilen ve Roma ordusunun kuşatmalarda gülle ve büyük okları, kale surlarına atmak için kullandığı mancınık sisteminden almaktadır. Mancınık kullanan bir kişinin hedefi vurmak için ateş edebilmesi için silahını bazı hesaplarla ayarlaması gerekir Bu durum balistiğin ilk modern uygulamalarının oluşmasına yol açmıştır. Balistik biliminin güncel tanımı fişegin ateşlenmesi ile oluşan yanma odasında ve namluda basınç ile ısı değişimlerini, merminin çekirdeğinin namlu içinde yaptığı ivmeli hareketi, mermi çekirdeğinin namludan çıktıktan sonra havadaki hareketini ve merminin çekirdeğinin hedef üzerinden oluşturduğu etkileri inceleyen Bilim Dalı olarak yapılmaktadır. Balistik, geniş kapsamı nedeniyle dört alt disipline ayrılmıştır [41] [42].

1.3.1. İç Balistik

İç balistik, tetiğe basıldıktan sonra merminin tabancadan ateşlendiği andan merminin namludan çıkışına kadar olan olayları kontrol eder. İtici basınç kuvveti, mühimmatların hızlanması, mermi çekirdeğinin namludan çıkış hızı ve namlu geri tepmesi ile çalışılır. İlk ateşlemeye kadar geçen süre, ilk basınç-zaman eğrisi ve sıcaklık da iç balistik

konularıdır. Bu olaylar, barut ateşleme süreci, barutun haznede ateşlenmesi, merminin ilk hareketi ve ateşleme döngüsü sırasındaki namlu dinamiği ile alakalıdır. İdeal gaz ve diğer gaz kanunları, hareket denklemleri, termofizik ve termokimya, termodinamik ve akışkanlar mekaniği iç balistiğin fiziksel temelini oluşturur. İç balistik çalışmaları, ateşli silah tasarımcısı ve kullanıcısı için oldukça önemlidir. [43]

1.3.2. Dış Balistik

Merminin namlu ağzından çıkıp hedefe çarpmasına kadar geçen zamanda ki olayları dış balistik inceler. Aslında balistiğin bu alanı, serbest uçuşta ortaya çıkan yerçekimi, atalet ve aerodinamik kuvvetlerinin etkisi altındaki sınırlandırılmamış mermi hareketi ile alakalıdır. Dış balistik için başlangıç şartları iç balistik tarafından belirlenir. Bu bölümde mermi dinamiği ve kararlılığı, öngörülen uçuş süresi ve uçuş yolu, mermi hızı, mermi açısı ve çarpma yeri olmak üzere balistiğin bazı parametreleri incelenir. Dış balistikte atışlar iki koşulda incelenir. Bunlar atmosferik koşullar ve vakumlu ortam şartlarıdır.

1.3.3. Hedef Balistiği

Hedef balistiği, tüfek saçmaları, şarapnel ve mermi çekirdeğinin katı ve akışkan zeminler üzerinde oluşturduğu deformasyon ve tahribatların neden olduğu faktörleri, mermi çekirdeği ve hedef açısından inceleyen bilim dalıdır. Merminin vurduğu hedef canlı bir organizma ise yara balistikleri üzerinde durulur. Mermi hedefe ulaştığında oluşan olayların tüm yönlerini irdeler. Bunlar, merminin hedefe nüfuzu esnasında gerçekleşen mekanik olayları, merminin kinetik enerjisini, aktardığı parçacıkların davranışını, merminin ve hedefin çarpışmadan sonraki hasar mekanizmalarını, enerjinin korunumuna bağlı olarak mermideki enerji kaybını, merminin hedef üzerindeki termodinamik etkilerini ve merminin öldürücü ya da yaralayıcı etkisini kapsar. Mermi ile hedefin etkileşimi sonucunda oluşan şartlar; merminin hedefe çarpma hızına, çarpma açısına, malzemesine, uç geometrisine ve ağırlığına, hedef malzemenin mekanik özelliklerine, kalınlığına ve eğriliğine bağlıdır[43].

1.3.4. Adli Balistik

Adli balistik, gerçekleşen bir olayda ateşli silah veya ateşsiz silahların kullanılması durumunda olay yerinden elde edilecek bütün balistik bulguları, Adli Balistik Biliminin

temel kural ve metotları kullanılarak incelendiği ve bulguların delil kimliği kazandığı bilim dalıdır [44].

1.3.5. Balistik Darbe Mekanikliği

Balistik etki uzun yıllardır önemli bir araştırma konusu olmuştur ve balistik penetrasyon sırasında meydana gelen olayları fiziksel olarak anlamak ve matematiksel olarak açıklamak için büyük çaba sarf edilmiştir. Balistik etki çalışmasında temas mekanikliği, katılarda dalga yayılımı, malzemelerin plastik deformasyonu, kırılma mekanikliği ve termodinamik gibi konular işlenir. Balistik etki olgusu son derece karmaşıktır çünkü malzemeler balistik etki altında büyük gerinim değişimi, gerinim sertleşmesi, termal yumuşama ve kırılma gibi doğrusal olmayan dinamik davranışlar sergiler ve yüksek gerilim ve gerinim oranı, yüksek basınç gibi birçok değişkeni içerir [45]. Ancak araştırmacılar bu konuda çeşitli yöntem ve modeller geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu modellerde, balistik etki çalışmasında fiziksel denklemleri tanımlamak için enerji tasarrufu önemlidir.

Aslında, balistik çarpma olayları, enerji dönüşümünün sonucudur. Belli bir hızı nedeniyle kinetik enerjiye sahip olan mermi hedefi vurduktan sonra merminin kinetik enerjisinin büyük bir kısmı hedefin iç ve kinetik enerjisini artırmak için kullanılır. Merminin kalan enerjisi, plakadan sarf malzemesine aktararak kaybolur. Yani merminin kinetik enerjisinin büyük bir kısmı deformasyon enerjisi şeklinde hedefe aktarılır. Bu bağlamda, yüksek hızlı darbe mekanikliğinin çoğu, darbe yükü altında hedefin enerji yayma davranışına odaklanır. Balistik etki, hedef yüzey normali ile mermi hız vektörü arasındaki açıya göre sınıflandırılabilir.

Balistik Katsayısı (BC), bir cismin uzayda ve zamanda hareket ederken nasıl hareket ettiğini belirlemek için kullanılan ve hareket denklemlerinde tanımlanan fiziksel bir terimdir. Balistik katsayı yer çekimini etkilemez [46]. Balistikçiler ayrıca kurşun geçirmez yelekleri veya yumuşak vücut zırhı olarak bilinen ceketleri de sıklıkla test eder ve değerlendirir. Bir merminin etkisiyle uğraşırken dikkat edilmesi gereken iki durum vardır. Bunlardan biri momentum diğeri kinetik enerjidir.

1.4. Poliüre Kaplama

Son yıllarda, birçok araştırmacı, diğer benzer kaplama malzemelerine göre çok daha yüksek miktarda enerji absorbe etme kabiliyeti nedeniyle poliürenin koruyucu bir kaplama malzemesi olarak kullanımını araştırmıştır. Araştırmacılar, yapıların ve sistemlerin aşırı darbeleri yüklerle karşı direncini artırmak için poliüre uygulamasına dikkat çekiyor. Kompozit malzemeler, deniz ve savunma yapılarında geniş bir uygulama alanına sahiptir. Hizmet sırasında ve düzenli savaş tatbikatları sırasında bu yapılara sayısız patlama saldırısının ortaya çıkmasıyla birlikte, patlama tepkisi ve direncinin doğru anlaşılması, bunları geliştirmek için yeni malzemeler ve yöntemler tasarlamak ve geliştirmek için kritik öneme sahiptir.

Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE, UHMW), bir tür termoplastik polietilendir. HMWPE ayrıca yüksek modüllü polietilen olarak da bilinir. HMWPE şu anda üretilen bütün termoplastiklerin en yüksek darbe dayanımına sahip, sağlam bir malzemedir. HMWPE kokusuz, tatsız ve toksik değildir. Son zamanlarda, UHMWPE, balistik koruma uygulamaları için yeni bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, UHMWPE elyafları, mermilerin veya patlayıcı patlamaların etkisine karşı hayatta kalma teknolojisi alanında kabul görmektedir. UHMWPE kompozitleri, personel koruması (yelekler ve kasklar) için zırh malzemelerinin üretilmesinde ve askeri ve sivil zırhlı araçlarda kullanılmıştır. UHMWPE'nin dokuma yapısı, enerji emme kapasitesinden daha ağır basan gevşek bağlı liflere sahiptir. Bu nedenle, malzeme balistik performans uygulaması için en uygun olanıdır. Bu kapsamda poliüre kaplı UHMWPE levhaların balistik dayanımı önemli bir yere sahiptir. Zırh malzemelerinde balistik dayanımın belirlenmesinde malzeme konfigürasyonu büyük öneme sahiptir. Proje kapsamında önerilen hibrit kompozit yapıların balistik dayanımını arttırmak için polimer kaplama yapılacaktır. Bu sayede daha hafif, daya dayanıklı, daha düşük alan yoğunluğuna sahip yapı belirlenecektir. Proje kapsamında önerilen hibrit kompozit yapıların balistik dayanımını arttırmak için polimer kaplama yapılacaktır. Bu sayede daha hafif, daya dayanıklı, daha düşük alan yoğunluğuna sahip yapı belirlenecektir.

Uygulanan çekme kuvvetle beraber yüksek oranlarda uzamalar gösterebilen, kuvvet etkisi bittiğinde tekrar orijinal durumuna geri dönebilen, çapraz bağlara sahip yapılara elastomer adı verilir. Elastomerler kendi uzunluklarının en az 2 katı kadar uzayabilirler ve bu özelliklerini sahip oldukları polimer zincirlerinin arasındaki düşük yoğunluklu ve düzensiz çapraz bağlardan almaktadırlar. Elastomerik kaplamalar, özellikle patlama

azaltma ve balistik koruma olmak üzere stratejik uygulamalar için mükemmel bir takviye malzemesi olarak savunulmuştur [48,49]. Poliüre, iki bileşenin (izosiyanat ve poliamin) reaksiyonuyla oluşan bir elastomerdır. Bu iki abileşenin 1:1 oranda birleştirilmesi yüksek sıcaklık ve yüksek basınç koşullarında gerçekleşir [50-55]. Poliüre uygulaması için yüksek basınçlı ısıtma sistemi bulunan makineler kullanılmaktadır. Makinenin içerisinde yüksek basınca ve yüksek sıcaklığa dayanıklı hortum, hortumun ucunda ise püskürtme tabancası bulunmakta olup, poliüre bileşenleri püskürtme tabancasında karıştırılarak püskürtülür. Ayrıca, reaksiyon kısa sürede gerçekleştiğinden ve poliüre sertleşebildiğinden, püskürtme tabancasına giden hortuma ısıtma takılmalıdır. Poliüreyi oluşturan izosiyanat ve diamin bileşeni tabancanın ucuna kadar 80-90 °C' de ve ortama 120 bar basınçta gelmektedir. Burada birbirine 1:1 oranında (hacimce) karıştırılıp püskürtülerek uygulanmaktadır [58].

Polyurea yapısında sert bölge ve yumuşak bölge olmak üzere 2 farklı yapı barındırır. Yumuşak alanlar, her biri kendi karakteristik cam geçiş sıcaklığını sergileyen ve heterojen bir yapıyla sonuçlanan sert alanlar içinde rastgele dağılır. Seksenlerin sonlarında ticarileşen ve nispeten yeni kabul edilen poliüre kaplamalar, su yalıtımı, korozyon koruması, enerji emilimi, balistik koruma gibi birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda enerji absorblama özelliği ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [50,51,56].

1.4.1. Poliürenin Tanımı

Poliüre neredeyse 70 yıldır tanınmasına rağmen hala modern bir malzeme olarak kabul edilmektedir. 1948'de Polymer Science dergisinde poliüre tanıtıldı. Dergide Poliüre içeriği de dahil olmak üzere farklı polimer malzemelerin erime sıcaklıkları tablosu yayınlandı. 1980'lerde reaksiyon enjeksiyon kalıplama tekniğinin icadı, otomotiv endüstrisi için farklı parçaların üretilmesini kolaylaştırdı ve üretilen ilk bileşenler, Pontiac Fiero'da tampon kaplaması oldu. Bu teknolojinin ilerlemesi, esnek, çözücü içermeyen ve kolayca uygulanabilen koruyucu kaplama gerekliliğinden ilham almıştır. 1989 yılında çatı su yalıtımı sağlamak için ilk ticari poliüre kaplama kullanılmıştır.[36]

Poliüre, çapraz bağlı bir amorf izosiyanat monomer veya prepolimer ve poliamin iyileştiricidir. Poliüre, izosiyanatın poliaminlerle reaksiyonuyla üretilir. Çoğu zaman, bu sürecin iki aşaması vardır. İlk aşama tipik olarak üreticinin fabrikasında gerçekleşir ve

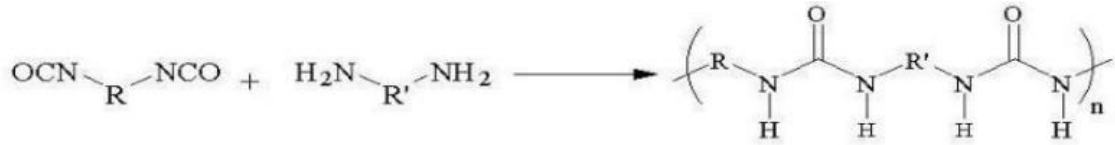
prepolimerin reaktif izosiyanat grupları ile işlenmesinden oluşur. İkinci aşama, üretim yerindedir ve poliaminlerin, yardımcı maddelerin ve prepolimer ile etkileşime giren dolgu maddelerinin bir reaksiyonundan oluşur. [37]

Poliüre, bir diaminin bir diizosiyanat ile reaksiyonundan elde edilen sentetik bir polimerdir, polimerizasyon reaksiyonu poliüretaninkine çok benzer, ancak poliüre söz konusu olduğunda, ortaya çıkan bağlantı bir "üre"dir, bu nedenle buna poliüre denir. Bu bağlantı sayesinde, moleküler yapıyı neme karşı duyarsız hale getirerek poliüreyi (eğer safsa) en iyi su geçirmez membran haline getirilir. Poliüre hızlı kurlenme süresi ve yüksek mukavemeti ile bilinir, bu da onu inşaat su yalıtımı, kamyon kasaları için kaplamalar, endüstriyel zemin kaplamaları ve tank astarları gibi çeşitli endüstriyel ve ticari uygulamalarda kullanışlı kılar. Ayrıca dolgu macunu ve izolasyon malzemesi olarak da kullanılabilir [57].

Poliüre olarak sınıflandırılabilmesi için bileşiğin en az %80 poliamin içermesi gerekir. İki temel poliüre türü vardır: aromatik ve alifatik. Poliüreler tipik olarak %100 katı, düşük gaz çıkışı, neme karşı düşük büzülme direncine sahiptir ve birçok alt tabakaya (beton, plastik ve çelik) iyi yapışır. Kurlenmiş sistemler için cam geçiş sıcaklığı -60 F ile 480 F arasında değişebilir. Poliüre, termal şok ve patlama etkilerine karşı son derece dayanıklıdır. Alev yüzeyden kaldırıldığında da kendi kendine söner. EP JS, 20.34 MPa (2950 psi) gerilme mukavemetine, %350 uzama, 11.16 MPa (1620 psi) modülüne ve 87.5 kN/m (500 lb/inç) yırtılma mukavemetine sahiptir.

Poliüre, endüstriyel ve ticari ortamlarda yüzeyleri su hasarından korumak için sıklıkla kullanılan bir su yalıtım malzemesidir. Sıvı bir kaplama olarak uygulanır ve daha sonra hızla sertleşerek dayanıklı, su geçirmez bir bariyer oluşturur. Poliüre, suya, kimyasallara, aşınmaya ve darbeye karşı mükemmel direnciyle bilinir ve bu da onu zorlu koşullara maruz kalan yüzeylerin su yalıtımı için ideal bir seçenek haline getirir [57].

Poliüre bir izosiyanat (-NCO) bileşeninin ve bir poliaminin (iki veya daha fazla birincil amino grubuna -NH₂ sahip) 1'e 1 reaksiyonundan türetilmiştir [56]. Genel reaksiyon için formül şekil 1.22.'de sunulmuştur.



Şekil 1.22. Poliürenin sentez reaksiyonu [90]

İzosiyanatlarla reaksiyonda karmaşık olan fonksiyonel grupların sınıfı, poliüre ve poliüretan için farklıdır. Poliüretan için -OH ve poliüre için -NH₂'dir. Aminler için daha hızlı olan reaksiyon prosedürü, reaksiyon mekanizmasından büyük ölçüde etkilenir. Aromatik aminler, alifatik -OH grubundan yaklaşık üç kat daha duyarlıdır. Daha da önemlisi, amin grupları izosiyanatla suya kıyasla çok daha hızlı reaksiyona girerek poliüre kaplamaları işleme sırasında neme dayanıklı hale getirir.

Polyurea, viskoelastisitesi nedeniyle oldukça elastiktir. Bu özelliğinin yanı sıra yüksek mukavemeti ve su geçirmezliği nedeniyle boru kaplamalarında, özellikle boru kaplamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca son zamanlarda yapılan literatür çalışmalarında poliürenin oldukça yüksek darbe direncine sahip olduğu ve zırh yapılarında destek tabakası olarak kullanılabileceği vurgulanmaktadır [58,60]. Poliüre sprej kaplamalar sıfırın altındaki sıcaklıklarda bile hızla kürlenir (aminlerin ve izosiyanatların yüksek reaktivitesine rağmen) ve yüksek sertlik, esneklik, yırtılma mukavemeti, gerilme mukavemeti, Kimyasal ve su direnci gibi mükemmel fiziksel özellikler sergiler. Reaksiyonun çok kısa sürede hızlı bir şekilde ilerlemesi, reaksiyonun ortam koşullarından ve nemden büyük ölçüde bağımsız olarak ve farklı koşullar altında poliüre uygulamasından bağımsız olarak gerçekleştirilmesine olanak sağlar [55].

1.4.2. Poliürenin Özellikleri

Poliüre genel anlamda elastik polimerler sınıfına ait olup kaplama, su yalıtımı, korozyona karşı koruma, enerji Emilimi ve balistik koruma gibi birçok farklı uygulamada kullanılmaktadır. Sprej kaplama endüstrisinin ilerlemesiyle, bir yapının mekanik mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmak için yapısal bileşenlere poliüre sprej kaplama uygulanabilmektedir [58]. Polyurea sadece kaplama malzemesi olarak değil, boyalarda bağlayıcı (reçine) olarak da kullanılmaktadır [56]. Amin ve bir izosiyanat grubunun polimerizasyonu sonucu oluşan poliüre, kullanılan izosinayat ve aminlerin kimyasal

yapılarının farklı fonksiyonel gruplar eklenerek değiştirilebilmesiyle çeşitli kimyasal ve fiziksel özellikler kazandırılarak sentezlenebilmektedir [50-54].

1.4.3. Poliürenin Fiziksel Özellikleri

Polyurea, diğer polimer esaslı zırhlara göre daha düşük fiziksel dayanım değerlerine sahiptir. Bununla birlikte, yüksek uzamanın patlama ve balistik gibi yüksek itici yüklere karşı korumada en önemli faktörlerden biri olduğu düşünüldüğünde, poliüre balistik uygulamalarda açıkça iyi performans gösterebilir [50,51]. Tablo 1.3’de Poliürenin fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 1.3. Poliürenin fiziksel özellikleri [69]

Özellik	Değer
%Uzama	4252
Kopma Mukavemeti (Mpa)	21
Çekme Mukavemeti (Mpa)	31
Sertlik (Shore A) ¹	92-95

1 Shore sertlik değeri, plastik malzemelerin sertliğini ölçmek için kullanılır, Shore-A yöntemi kullanılarak; genellikle elastomer, vinil, kauçuk, lastik, deri, pvc, silikon kauçuk, teflon, neopren gibi yumuşak malzemelerin sertliği ölçülmektedir [56].

Çoğu durumda, poliüre %100 veya daha fazla uzama sergiler. Ayrıca kolay uygulanabilmesi en önemli avantajlarından biridir. Poliüre yaklaşık 5-15 saniye gibi kısa bir sürede kürleşir ve sertleşip kürlenebilir, ayrıca yüzeye iyi yapışma özelliğine sahiptir. Reaksiyonun bu kadar hızlı gerçekleşmesi, kaplamanın ortam nemi ve sıcaklığından etkilenmemesini sağlar. Bu nedenle poliüre kaplamalar hemen hemen her yüzeye her koşulda uygulanabilir [59,60]. Poliüre yapı elemanlarının yüzeyine püskürtülerek, fırçalanarak veya yapıştırılarak kolayca uygulanabilir. Ayrıca poliüre endüstride tüneller, köprüler, çatılar, otoparklar, depolama tankları, yük gemileri, kamyon kasaları gibi birçok

farklı yüzeyi beton duvar, metal veya ahşap gibi birçok katmana kaplamak için kullanılmaktadır. [50,51]

1.4.4. Poliüre Kaplamanın Kullanım alanları

Polyurea kaplamalar ticari olarak on yılı aşkın bir süredir kullanılmaktadır. Mükemmel fiziksel özellikleri (yüksek dayanıklılık, kimyasal ve biyolojik maddelere karşı yüksek direnç) nedeniyle inşaat sektöründen yeni mühendislik projelerinin gerçekleştirilmesine kadar birçok farklı alanda kullanılmaktadır. En yaygın kullanım alanları aşağıda sıralanmıştır;

- Tüneller, köprüler, çatılar, otoparklar, depolama tankları gibi çeşitli yapı uygulamalarında, sert ve aşınmaya ve korozyona dayanıklı, uzun ömürlü ve darbelere dayanıklı (epoksi / kauçuk değiştirme) püskürtmeli kaplama uygulamalarında, yük gemilerinde,
- Havuzlar, yağmur suları olukları, su depolarında sızdırmazlık amaçlı,
- Otoparkların zeminlerinin yangından korunmasında, ani frenlere ve aşırı hıza karşı zemin kayganlığının giderilmesinde,
- Eski ve yeni beton yapıların, duvarların, çatıların üzerlerindeki çatlakların kapatılması ve onarımı amaçlı,
- Askeri araçlarda yangına dayanıklı yapıların oluşturulmasında, darbe ve balistik koruyucu panellerin oluşturulmasında,
- Petrokimya endüstrisinde kullanılan çelik boruların ve tankların ağır kimyasallara, korozyon ortamlara karşı korumak için kullanılmaktadır [56].

Diğer yapı malzemeleri gibi poliürenin de avantajları/dezavantajları vardır. Bu avantaj ve dezavantajların sunduğu avantajlar nedeniyle inşaat sektöründe popülerlik kazanmaktadır. İki bileşenli poliüre kaplama sisteminin avantajları ve dezavantajları çizelge 4’de verilmiştir [56].

1.4.5. Poliüre Avantajları

- Hızlı kürlenme süresi: Poliüre saniyeler içinde sertleşir, bu da yüzeylerin hızlı bir şekilde korunabileceği ve tekrar kullanılabilmesi anlamına gelir.
- Yüksek mukavemet: Poliüre, yüksek mukavemeti ve dayanıklılığı ile bilinir, bu da onu yoğun trafiğe veya diğer zorlu koşullara maruz kalan yüzeylerin su yalıtımı için ideal bir seçenek haline getirir.
- Kimyasal dayanıklılık: Poliüre, çok çeşitli kimyasallara karşı yüksek dirençlidir, bu da onu endüstriyel ortamlarda yüzeylerin su yalıtımı için uygun bir seçenek haline getirir.
- Esneklik: Poliüre çok çeşitli yüzeylere uygulanabilir ve hem pürüzsüz hem de düzensiz yüzeylerde için uygundur.
- Çok yönlülük: Poliüre su yalıtımı, kaplama, yalıtım ve onarım için kullanılabilir.
- Uzama: Poliüre, alt tabaka ile birlikte hareket etmesine ve çatlamayı önleyen yüksek uzama özelliklerine sahiptir.
- Sıcaklık dayanımı: Poliüre, yüksek ve düşük sıcaklıklara dayanabilir ve geniş bir sıcaklık aralığında esnekliğini koruyabilir [57]. Tablo 1.4.'de poliüre kaplamanın avantajları ve dezavantajları gösterilmiştir.

Tablo 1.4. Poliüre uygulamasının avantajları ve dezavantajları [61]

Avantajları	Dezavantajları
Suya ve neme karşı dayanıklılık	Uygulama yüksek fiyatlı bir ekipman (yüksek sıcaklık ve basınç üreten bir makine seti) kullanılması gerektirir.
UV radyasyonu gibi agresif atmosferik faktörlere karşı yüksek direnç	Uygulama için yüzey ıslak olmamalıdır.
Mekanik hasarlara karşı yüksek direnç	Püskürtme sırasında atmosferik koşullar belirtilen şartlara uygun olmalıdır.
Mükemmel mekanik ve dayanıklılık parametreleri	
Malzemenin çok yüksek esnekliği	

Tamamen sızdırmaz kaplama Her yüzeye uygulama kolaylığı Her türlü malzemeye çok iyi yapışma Çok yüksek kimyasal ve biyolojik direnç	Kaplamanın kalitesi büyük ölçüde yüzeyin hazırlanmasına ve personel eğitimine bağlıdır.
---	--

1.4.6. Poliüre Kaplama

Poliüretan ve poliüre bazlı çift komponentli kaplama malzemeleri, kimyasal ve fiziksel özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu kaplamalar yüksek dayanıklılık sağlar ve çizilmelere, darbelere ve aşınmaya karşı dirençlidir. Ayrıca, poliüretan kaplamalar kimyasal dirence sahiptir. Bu nedenle, zemin kaplamaları, oto boyaları, endüstriyel kaplamalar ve mobilya cilaları gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılırlar. İki bileşenli poliüretan veya poliüre sistemleri, poliöl/poliamin bileşeninin izosiyanat bazlı prepolimerlerle reaksiyonu sonucunda poliüretan veya poliüre polimer ağlarının oluşmasını sağlar. Poliüretan teknolojisinde ana ayırt edici özellik, genellikle hidroksil sonlu (-OH) reçineler yerine amin sonlu (-NH₂) reçinelerin kullanılmasıdır. Amin sonlu reçinelerin izosiyanat bileşeniyle reaksiyonu, bir üre bağlantısının oluşmasına yol açar. Bu bağlantılar, poliüretan veya poliüre polimerlerin oluşumunu sağlayarak kaplama malzemelerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirler. Poliüreler, poliamin karışımlarının izosiyanat bazlı prepolimerlerle reaksiyonu sonucu elastomerik yapılar olarak tanımlanır. Poliüretanlardan farklı olarak, poliüre bileşenlerinin (amin ve izosiyanat) reaksiyon hızı daha yüksektir. Bu nedenle, poliüre formülasyonları poliüretanların aksine katalizör gerektirmez ve düşük sıcaklıklarda bile hızla kürlenirler. Bu özellik, poliüre kaplamaların hızlı uygulama ve kısa sürede kullanıma hazır hale gelmesini sağlar. Poliüreler, esneklik, darbe dayanımı ve kimyasal direnç gibi önemli özelliklere sahip elastomerik malzemeler olarak kullanılır.

Poliürelerin jelleşme süreleri ve bileşenlerinin doğru tasarımıyla ilgili bilgiler içermektedir. Poliürelerin jelleşme süreleri saniyelerle ölçülürken, amin ve izosiyanat bileşenlerinin doğru bir şekilde tasarlanmasıyla jelleşme süresi ve kap ömrü uzatılabilir.

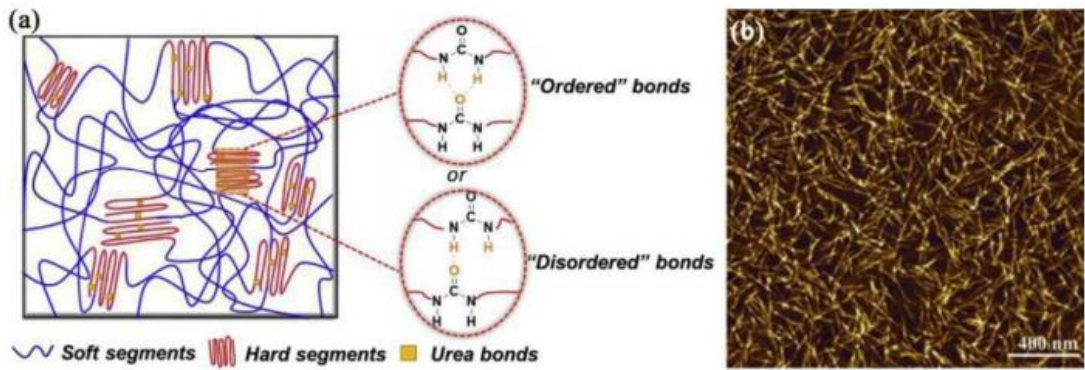
Poliürelerin mikroyapısı incelendiğinde, sert ve yumuşak segmentler olmak üzere iki faza sahip oldukları görülür. Sert segmenti üre bağları oluştururken, yumuşak segmenti polieteramin zincirleri oluşturur. Poliüre kaplama malzemeleri için genel olarak beklenen performans kriterleri arasında şunlar yer almaktadır: yüksek uzama ve gerilme mukavemeti, düşük sıcaklıkta iyi esneklik, aşınma ve kimyasal direnç, ve zorlu hava koşullarına dayanıklılık. Poliüre kaplama malzemeleri, yüksek uzama ve gerilme mukavemeti sağlayarak mekanik streslere karşı dayanıklı olmalıdır. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda bile esnekliklerini koruyarak çatlama veya kırılma riskini azaltmalıdır. Aşınma ve kimyasal dirençleri yüksek olmalıdır, böylece malzeme uzun süreli kullanımda dayanıklı kalabilir. Son olarak, poliüre kaplama malzemeleri zorlu hava koşullarına, özellikle ultraviyole (UV) ışınlarına ve nem gibi etmenlere karşı dirençli olmalıdır. Bu performans kriterleri, poliüre kaplama malzemelerinin genel performansının yüksek kalitede olmasını sağlamayı amaçlar.

Poliüre kaplamalar, özellikle kimyasallara karşı gösterdikleri direnç sayesinde uygulandıkları yüzeyleri korozyondan koruma özelliği taşırlar. Kimyasal dayanım genellikle poliürelerde mineral asitlerde düşük-orta, organik asitlerde orta, alkalilerde orta-yüksek, klorlu solventlerde düşük-orta, oksijenli solventlerde düşük-orta, hidrokarbon çözücüler için düşük-orta, tuzlar için ise yüksek seviyededir. Poliüre elastomer sistemlerin amorfudur, bu yüzden cam geçiş sıcaklığı (T_g) değerine sahip değildir. İki farklı T_g değeri, polimerin yapısındaki yumuşak segmentin erime noktasıyla sert segmentin erime noktasına denk gelir. Poliüre elastomer sistemler genellikle dinamik mekanik analiz testlerinde -50°C 'de bir T_g gösterirken yaklaşık 260°C 'de yüksek bir T_g değerine sahiptir. Bu iki T_g arasındaki bölge, poliürenin çalışma aralığı olarak belirlenir. 1. T_g 'nin altında kısmi sertleşme gözlenirken 2. T_g 'nin üzerinde bozunma beklenir.

Poliüre, izosiyanat prepolimerleri (bileşen A) ve poliaminler (bileşen B) arasındaki hızlı reaksiyonla sentezlenen bir blok kopolimerdir. Bu kopolimerin formülasyonu, bileşen A olarak izosiyanat ön polimerini ve bileşen B olarak uzun polieter aminler ve katkı maddelerinin homojen bir karışımını içerir.

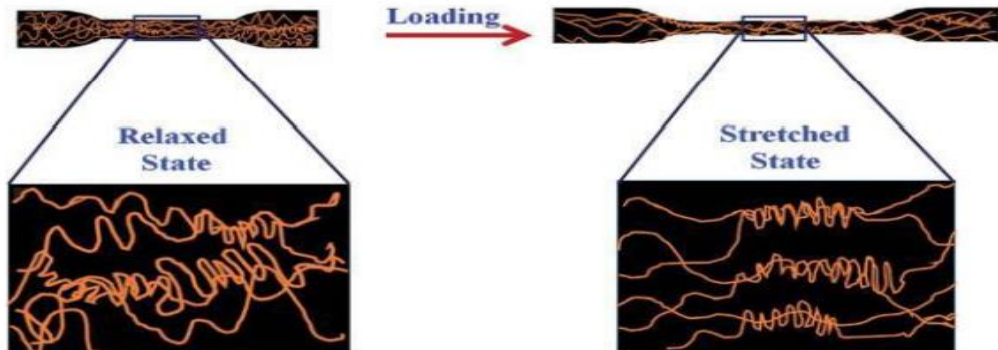
Poliürenin polimer mikro yapısında, Şekil 1.23.'de gösterildiği gibi yumuşak ve sert segmentlerin varlığı nedeniyle benzersiz bir mikrofaz ayrımı gözlemlenebilir. Bu

mikrofazla ayrılmış yapı göz önüne alındığında, poliüre bir nano-kompozit olarak kabul edilebilir, çünkü sert segmentler bir yumuşak segment matrisinde dağıtılmış takviyeler gibi işlev görür. Bu özel mikro yapının varlığı, stabilite, yüksek mukavemet gibi mükemmel makroskopik özelliklere yol açar.



Şekil 1.23. Polimer mikro yapısı

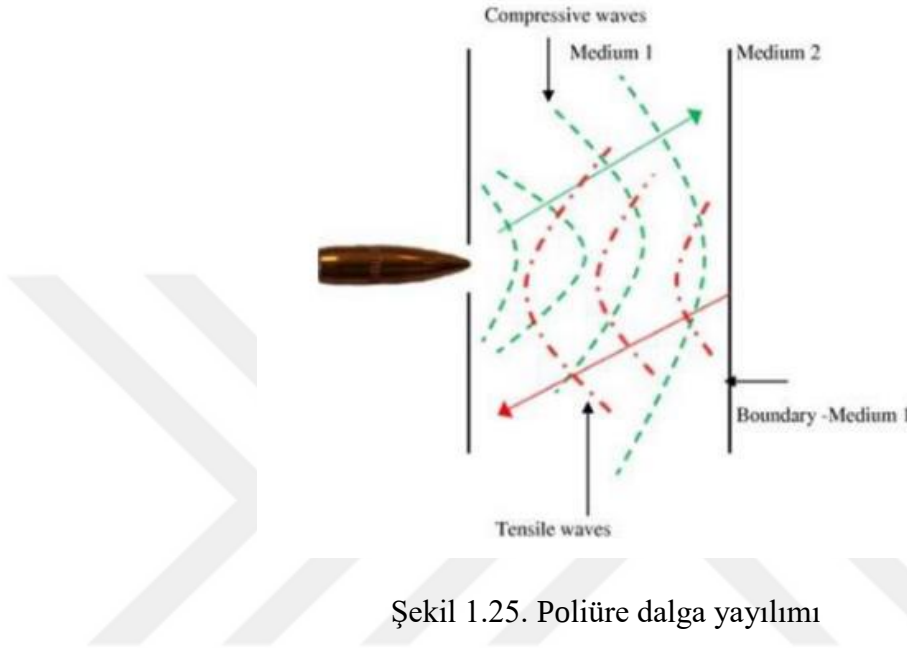
Poliüre'nin yapısındaki polimer bağlarının mükemmel özelliği, merminin kinetik enerjisini dağıtmasına ve kendi yapısında tutmasına olanak sağlar. Poliüre'nin şok dalgası zayıflatma kabiliyetinin temel olarak sert segmentler tarafından kontrol edildiği düşünülmektedir. Şok dalgası tarafından uyarılan sert segmentler sıkıştırılarak düzenlenir ve gelen dalgı, zayıflayarak tüm alana yayılır. Bu sayede, poliüre yapısı kinetik enerjiyi etkin bir şekilde emer ve yayılımını sağlar (Şekil 1.24.).



Şekil 1.24. Poliüre yükleme durumu

Hızlandırılmış hareket karşısında, polimerin viskoelastik faz geçişine uğradığı ve dolayısıyla yüksek enerji absorpsiyonu ile durdurma etkisi gözlemlenebilir. Şok dalgaları

homojen malzemelerde tek dalga gibi davranır. Polyurea'da çift dalga yapısı elde edilir. Yayılan (serbest bırakılan) dalga hızının şok dalgası hızından daha büyük olması etkili yakalama ve nötralizasyon ve şok azaltma sağlar. (Şekil 1.25.).



Şekil 1.25. Poliüre dalga yayılımı

Poliüre bağı, mermi yüksek ivmelerde hareket ederken oldukça elastik polimer bağının tepki vermesiyle mermiyi durdurur. Özetle, yukarıda bahsedildiği gibi, polimer zincirlerindeki sert segmentlerin yeniden düzenlenmesi, kristalleşmesi ve nötralizasyonu, şok dalgaları altında en önemli enerji dağıtım mekanizmalarıdır. Ayrıca poliürenin düşük-yüksek gerinim hızlarında hareketi de viskoelastik davranışa neden olur, bu nedenle enerji dağıtım mekanizmasında rol oynadığı görülebilir. [96]

Poliürenin gerinim hızı hassasiyeti (bağımlılığı), patlama ve darbe direncinde kullanımını kolaylaştırır. Poliüre gerinim duyarlılığı, yani yüksek gerinim hızlarında deformasyon davranışı, elastikten camsı davranışa geçişi oluşturur. Poliüre' bu davranışı, belirli koşullar altında yüksek enerji dağılımı elde etmesini de sağlar. Başka bir deyişle, gerinim duyarlılığı, düşük gerinim hızlarında elastikiyet ve yüksek gerinim hızlarında camsı durum sergileyen elastik ve camsı durumlar arasındaki malzemenin davranışındaki değişikliklerle yakından ilgilidir. [97,98]

Balistik penetrasyon, yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve yüksek gerinim oranına sahip özel bir darbe işlemidir. Polyurea'nın uygulandığı alt tabakanın balistik limitini arttırdığı

gözlemlenmiş ve balistik korumada en önemli mekanizmanın malzemenin darbe kaynaklı elastik davranışından camsı davranışa geçmesi olduğu görülmüştür. [98].

1.5. Literatür Taraması

Son yıllarda araştırmacılar, yapıların ve sistemlerin aşırı darbeleri yüklere karşı direncini artırmak için poliüre uygulamasına dikkatlerini çektiler. Yeterli yüzey hazırlığı ile poliüre, çoğu yapısal malzemeye (beton, çelik ve alüminyum gibi) iyi yapışır ve böylece kompozit davranışı oluşturur. İletilen yükün niteliğine bağlı olarak, bir yapının dış yüzü olarak veya basınç veya çekme özelliklerinden yararlanılarak ara katman malzemesi olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, poliüre kaplı plakalar üzerindeki önceki araştırmaların çoğu, yalnızca bir patlama gibi bir olaydan kaynaklanan dağıtılmış dinamik yüklere odaklanmıştı. Bir balistik çarpma olayından kaynaklanabilecek lokalize yükler altındaki davranışını araştırmak için çok sınırlı dikkat gösterilmiştir.

Birçok araştırmacı, diğer benzer kaplama malzemelerine kıyasla oldukça yüksek miktarda enerji absorbe etme kabiliyeti nedeniyle poliürenin koruyucu bir kaplama malzemesi olarak kullanımını araştırmıştır. Son yıllarda araştırmacılar, yapıların ve sistemlerin aşırı darbeleri yüklere karşı direncini artırmak için poliüre uygulamasına dikkatlerini çektiler. Kompozit malzemelerin deniz ve savunma yapılarında yaygın uygulamaları vardır. Hizmet sırasında ve düzenli savaş tatbikatları sırasında bu yapılara sayısız patlama saldırısının ortaya çıkmasıyla birlikte, patlama tepkisi ve direncinin doğru anlaşılması, bunları geliştirmek için yeni malzemeler ve yöntemler tasarlamak ve geliştirmek için esastır. Monolitik plakaların ve geleneksel sandviç yapıların patlama yüklemesine tepkisi incelenmiştir. Geçici yüklere maruz kalan homojen malzemeler üzerine de çalışmalar mevcuttur. Ancak, kompozit ve katmanlı yapıların patlama altındaki gerçek zamanlı tepkisine ilişkin deneysel gözlemler sınırlıdır. Son zamanlarda araştırmacılar, patlama direncini artırmak için binalar ve yapılar üzerinde polimer bazlı kaplamalar önerdiler.

Patlamalar hem sivil hem de askeri teçhizat için önemli bir tehdit olarak kabul edilmektedir. Hem patlama dalgaları hem de parçalar oluşturarak koruyucu yapılarda ciddi hasara neden olabilir. Karmaşık kombine yükleme, balistik ve patlama hasarı mekanizmalarından bu yana mükemmel kapsamlı balistik ve patlama direncine sahip koruyucu yapılar tasarlamak için birçok zorluk getirir [91]. Son zamanlarda, patlama ve

balistik darbe etkisini azaltmak için metal-elastomer kombinasyonları yoluyla hafif koruyucu yapının geliştirilmesi büyük ilgi gördü. Polimer elastomerler düşük yoğunluğa, olağanüstü mekanik tokluğa, aşınma direncine ve korozyon direncine sahiptir. Kaplama ve astar olarak yaygın olarak kullanılırlar. Son birkaç yılda, poliüre, mükemmel dinamik hassasiyetten kaynaklanan darbe korumasındaki uygulamasına çok dikkat edildi [92-95]. Kapsamlı balistik ve patlama direncini geliştirmek için karmaşık dinamik yükleme altında poliüre kaplı metal plakanın darbe direncini analiz etmek ve tasarlamak, poliüreyi patlayıcı korumaya uygulamak için esastır.

Chong Ji ve diğerleri Kombine patlatma ve parça yüklemesi altında poliüre kaplı çelik levhaların hasar tepkisini inceledi. Çalışmalarında çelik levha yapılar, kullanımları sırasında harici patlama/darbe yüklemesine maruz kalma potansiyel risklerine sahiptir. Püskürtme poliüre, mevcut çelik levha elemanların darbe direncini arttırmanın basit bir yolunu sağlar. Bununla birlikte, mevcut araştırmalar esas olarak tek yük ve poliürenin çoklu yükler altında darbe direncinin olmaması üzerine odaklanmaktadır. Bu nedenle, poliüre kaplı çelik (PCS) plakaların birleşik parçalar ve patlatma yüklemesi altındaki hasar tepkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Aynı anda parça ve patlama dalgası üretmek için tungsten alaşım bilyeli silindirik RDX şarjları benimsendi ve saha patlama testleri, farklı konfigürasyonlara sahip üç tip PCS plakası üzerinde gerçekleştirildi. PCS plakalarının makro deformasyon ve arıza parametreleri elde edildi ve analiz edildi ve beş arıza modunun özellikleri tanımlandı. Bazı ilginç deneysel olgular elde edildi: Poliüre malzemesi ön tarafa veya arka tarafa püskürtülse de PCS plakalarının direnç kapasitesi, Poliüre malzeme kaplama kalınlıklarının artmasıyla monoton bir artış göstermedi, ancak optimum bir kalınlık artış oldu. Boşaltma ve sıkıştırma ve çekme dalgalarının üst üste binmesi nedeniyle, her iki taraftan püskürtülen PCS plakasındaki çelik plakanın hasar derecesi, tek katmanlı PCS plakasından daha yüksekti ve iki tek taraflı püskürtme yöntemi, her iki taraflı püskürtme yönteminden daha üstündü. Akabinde, PCS plakalarının birleşik parçalar ve patlama yüklemesi altındaki dinamik tepki sürecini ortaya çıkarmak için karşılık gelen sayısal modeller oluşturulmuş ve hesaplama sonuçları, 3D taramanın test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, PCS plakalarının başarısızlık mekanizması, enerji soğurma ve stres dalgası yayılımı ilkesiyle analiz edildi. [58]

M. Staniszewski ve arkadaşları çalışmalarında Düşük hızlı darbe yüklemesine uygulama ile UHMWPE kompozit laminatlar için çok ölçekli bir modelleme yaklaşımı üzerinde çalıştılar. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) kompozitler, çok çeşitli koruyucu zırh sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemlerin tasarımı büyük ölçüde maliyetli ve zaman alıcı olabilen deneysel çalışmalarla gerçekleştirilir. Katmanlı kompozit mimarilerin tasarımından yararlanarak gelişmiş performans sağlayan modelleme araçları istenmektedir. Bu çabada, düşük hızlı darbe (LVI) yüklemesine maruz kalan UHMWPE kompozit laminatların kat düzeyinde malzeme doğrusal olmama durumunu ve gerinim kaynaklı fiber yeniden yönelimini yakalamak için laminat mekaniğini kullanan çok ölçekli, Sonlu eleman tabanlı temsili hacim elemanı (RVE) yaklaşımı sunuyoruz. Gerinim hızının, UHMWPE kompozitlerinin kat düzeyinde malzeme tepkisi ve tahmin edilen LVI tepkisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kalın kesitli UHMWPE kompozit malzemelerin darbe performansını karakterize etmek için bir LVI metodolojisi geliştirildi ve Honeywell® SpectraShield® II SR-3136 ve DSM Dyneema® HB210 için malzeme ve delaminasyon özelliklerini kalibre etmek üzere RVE sonlu elemanlar modeliyle uygulandı. Çok ölçekli RVE yaklaşımı, üç darbe enerjisinde bu malzemelerin laminatları için en yüksek arka yüz deformasyonunu ve delaminasyon derecesini doğru bir şekilde yakalar. LVI metodolojisi, çeşitli UHMWPE kompozit malzemelerinin, laminat mimarilerinin ve işleme koşullarının darbe performansını değerlendirmek ve sıralamak için bir araç sağlar. Çok ölçekli RVE yaklaşımıyla birleştirilmiş LVI metodolojisi, malzemelere ve işleme koşullarına bağlı kat düzeyinde davranış ve delaminasyon özellikleri üretir ve sonuçta UHMWPE kompozit yapılar için laminat mimarilerinin tasarımını keşfetme yeteneğine sahip bir modelleme aracı oluşturur.[59]

Damith Mohotti ve diğerleri UHMWPE dokuma kumaşların darbe tepkisi üzerine: Deneyler ve Simülasyonlar üzerinde çalıştı. UHMWPE dokuma kumaşların darbe davranışı üzerine kapsamlı bir çalışma, dört bölümden oluşan bu belgede sunulmaktadır: kumaş parametrelerinin geometrik ölçümü, bileşen ipliklerin çekme testi, kumaşların darbe testi ve darbe yüküne maruz kalan kumaşların sayısal modellemesi. İki kumaş malzemesi, yani Spectra 1000 liflerinden yapılmış bir düz dokuma kumaş ve Dyneema SK75 liflerinden yapılmış 4 takımlı saten dokuma kumaş incelenmiştir. İlk olarak, kumaşların iplik kesitleri ve örgü profilleri gibi geometrik özellikleri mikroskopik

analizlerle karakterize edilmiştir. Daha sonra tekli ipliklerin farklı gerinim hızlarında çekme özellikleri ölçüldü ve sonuçlar UHMWPE ipliklerinin çok düşük yükleme hızlarında gerinim hızına karşı oldukça hassas olduğunu gösterdi. Boyuna modülün yanı sıra çekme mukavemeti de gözle görülür bir artış gösterirken, gerinim oranının artmasıyla kırılma gerinmesi ve tokluk azaldı. Bununla birlikte, bu özellikler, 0,33 ila 400 s⁻¹ gerinim hızı aralığında neredeyse sabit kaldı. Ayrıca tek katlı ve çok katlı kumaş hedefler üzerinde farklı darbe hızlarında mermi darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Enerji emme özellikleri, delme mekanizması ve iplik çekme davranışı analiz edildi. Son olarak, kumaşların sonlu eleman modelleri, ölçülen geometrik parametrelere ve oluşturan ipliklerin çekme özelliklerine dayalı olarak geliştirilmiştir. Modeller, incelenen kumaşların darbe tepkisini doğru bir şekilde simüle edebildi. Bu araştırmadan elde edilen bilgiler, UHMWPE kumaşların zırh ve diğer koruyucu uygulamalarda etkin kullanımını kolaylaştıracaktır. [60]

Chang-Ye Ni, Tian Jian Lu ve diğerleri UHMWPE lamine plakaların ve UHMWPE'nin balistik performansı kapsüllenmiş alüminyum yapılar: Sayısal simülasyon çalıştı. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) lamine plakaların ve UHMWPE kapsüllü alüminyum yapıların balistik performansı sayısal olarak karakterize edildi. Her hedef türü için tam bir üç boyutlu sürekli model oluşturuldu ve UHMWPE, bir kompozit malzeme modeliyle bir alt laminat yaklaşımı kullanılarak simüle edildi. Simülasyon sonuçları hem nihai deformasyon morfolojisi hem de balistik veriler üzerinde iyi bir uyumla mevcut deneysel ölçümlerle karşılaştırıldı. Lamine levhanın altında yatan penetrasyon mekanizmaları daha sonra araştırılmış ve ara yüz kuvvetinin etkisi ölçülmüştür. UHMWPE kapsüllenmiş alüminyum yapıların balistik gelişimi, esas olarak yan sargı laminatlarının gerilmesine bağlandı. Bununla birlikte, kapsüllenmiş yapının ilk çarpma hızı veya yanal boyutları arttıkça, kapsüllemenin faydası azaldı. Bu bulgular, üstün balistik dirence sahip hafif tasarımlı UHMWPE kompozit yapılar için yararlıdır. [61]

Damith Mohotti ve arkadaşları Yüksek hızlı mermi etkisine maruz kalan poliüre kaplı kompozit alüminyum levhalar üzerine çalıştı. Poliüre kaplı AA5083-H116 alüminyum alaşımlı levhalardan yüksek hızlı mermi penetrasyonu incelenmiştir. Farklı poliüre kalınlıklarının tam metal kılıflı (FMJ) mermilerin artık hızı üzerindeki etkisi incelenmiş ve sunulmuştur. Çelik uçlu 5.56 kalibrelik (5.56 45 mm) mermiler, kaplanmış alüminyum

levhalara 10,0 m mesafeden 945 m/s sabit hızla ateşlendi. Farklı toplam kalınlıklara sahip yedi plaka düzeni konfigürasyonu kullanılmıştır. Her konfigürasyon, 5 mm ve 8 mm taban plakaları (AA5083-H116) ile 6 mm ve 12 mm poliüre katmanlarının kombinasyonlarından oluşuyordu. Hedeflerin merminin uçuş yönüne dik olarak yerleştirildiği yakın mesafeden ateş etmek için 5.56 kalibrelik bir top kullanıldı. Giriş ve çıkış hızları, iki lazer hız ekranı kullanılarak ölçüldü. Artık hızın azaltılması, hasar mekanizması, plakaların kinetik enerji emilimi ve farklı katman konfigürasyonlarının kalıntı hız üzerindeki etkisi açısından poliüre kaplamanın etkinliği sunulmakta ve tartışılmaktadır. Poliüre kaplamaların farklı kalınlıklarını karşılaştırarak, enerjiyi emmede ve ardından mermilerin artık hızının azaltılmasında iyi bir yetenek gösterdi. Ayrıca, poliüre kaplamanın uçuşan parçacıklara ve parçalara karşı koruyucu bir kalkan görevi görme yeteneği de kanıtlanmıştır. [62]

Damith Mohotti ve arkadaşları çalışmalarında Düşük hızlı darbeye maruz kalan poliüre kaplı kompozit alüminyum levhaların plastik deformasyonu konusunu irdeledi. Doğal afetler, araçların çarpışması, patlama ve balistik darbeler gibi tehditler nedeniyle yapısal hasar olasılığının artması nedeniyle yapılar için koruyucu önlemlere olan talep artmaktadır. Bir elastomerin alüminyum, çelik ve beton gibi diğer ana malzemelerle birlikte kompozit malzeme olarak uygulanması, bu tür tehditleri azaltmak için alınacak önlemlerden biri olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, bu alanda, özellikle poliürenin (elastomer) düşük hızlı darbelere karşı bir kompozit malzeme olarak uygulanabilirliği konusunda çok sınırlı çalışma yapılmıştır. Bu araştırmanın odak noktası, sert küt burunlu mermi etkisine maruz kalan poliüre kaplı kompozit alüminyum levhaların davranışını araştırmaktır. 6 mm ve 12 mm kalınlığında poliüre kaplamalı AA5083-H116 alüminyum alaşımlı levhalar incelenmiştir. 5 ila 15 m/s hız aralığında hareket eden yüksek mukavemetli çelikten küt, silindirik bir mermi 300 mm x 300 mm kare plakaların merkezine çarptı. Darbe enerjisinin bir kısmını emmek ve plakaların darbe tarafına uygulama yoluyla bir enerji sönmleme malzemesi olarak plakalara koruma sağlamak için bir poliüre kaplama kullanılmıştır. Ayrıca test programında aynı kalınlıkta kaplanmamış alüminyum levhalar kullanılmıştır. 5 kg'lık bir mermiyi ateşlemek için bir gaz tabancası mekanizması kullanıldı ve darbe sırasında plakanın düzlem dışı deformasyon geçişini kaydetmek için lazer yer değiştirme izleme ekipmanı kullanıldı. Tüm test kurulumu, gelişmiş sonlu elemanlar (FE) kodu LS-DYNA kullanılarak sayısal

olarak modellenmiştir. Modeller deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Plakalar için hem deneysel hem de sayısal çalışmalardan elde edilen deformasyon süresi geçmişleri, poliürenin düşük hızlı darbeden kaynaklanan hasarı etkili bir şekilde azaltma yeteneğini karşılaştırmak için kullanıldı. Poliüre kaplı plakalar, kaplanmamış plakalara kıyasla düzlem dışı deformasyonda önemli bir azalma göstermiştir. Bu bulgular, poliürenin düşük hızlı darbe hasarına karşı verimli bir enerji soğurucu/sönümleyici malzeme olarak kullanılabileceğini göstermektedir. [63]

Shi-Ping Wang ve arkadaşları Poliüre çekirdekli Weldox 460 E çelik sandviç plakaların nüfuz etme önleme performansına ilişkin sayısal simülasyon çalıştı. Poliüre güçlü bir enerji emme kapasitesine sahiptir ve bu nedenle yapısal koruma için mükemmel bir malzeme olarak kabul edilir. Bu nedenle, poliüre çekirdekli sandviç levhaların sızma önleme performansı üzerine yapılan araştırmalar, koruma mekanizmasını anlamak ve uygulama alanını genişletmek için büyük önem taşımaktadır. Bu yazıda, poliüre çekirdekli sandviç plakaların nüfuz etme önleme performansı AUTODYN-2D eksen simetrik algoritması kullanılarak incelenmiştir. İlk olarak, sayısal algoritmanın ve poliüre malzeme modelinin doğruluğu deneysel verilere karşı doğrulanır. Temel olarak, farklı koşullar altında poliüre çekirdekli sandviç plakaların nüfuz etme önleme performansını incelemek için dört farklı ara katman kalınlığı (8 mm ila 20 mm) ve yedi farklı ilk darbe hızı (300 m/s ila 1100 m/s) seçilmiştir. Bu arada, kauçuk çekirdekli sandviç plakalar kullanılarak karşılaştırmalı sayısal durumlar da yapılmıştır. Sonuçlar, poliürenin penetrasyon sırasında bariz bir kendi kendine kapanma davranışı sergilediğini göstermektedir. Bu balistik direnci artırır. Kauçuk çekirdekli sandviç panel ile karşılaştırıldığında, poliüre çekirdekli sandviç panelin birim alan yoğunluğu başına hız düşüşü ve enerji emme oranı her zaman daha fazladır. Sonuç olarak, poliüre ara katman, sandviç levhanın nüfuz etme önleme performansını önemli ölçüde geliştirebilir. [64]

Detao Wan ve arkadaşları UHMWPE/LLDPE termoplastik kompozit laminatlar için düşük hızlı darbe davranışı ve parametrik etki analizi simülasyonu çalıştı. Düşük hızlı darbe testleri, çapraz katlı ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) elyaf takviyeli lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) termoplastik kompozit laminatların darbe davranışını araştırmak için bölünmüş Hopkinson basınç çubuğu (SHPB) kullanılarak gerçekleştirilir. Üç boyutlu sonlu elemanlar (FE) modeli ise LS-DYNA açık dinamik sonlu elemanlar programı kullanılarak oluşturulmuş ve deneysel sonuçlarla

karşılaştırılarak doğrulanmıştır. FE modellerine dayanarak, darbe enerjisinin, kat açısının ve ara yüzey kuvvetinin kompozit laminatların düşük hızlı darbe performansı üzerindeki etkileri tartışılmaktadır. Analiz, darbe enerjisinin esas olarak laminatların plastik deformasyonu ve delaminasyon hasarı ile dağıldığını ortaya koymaktadır. Çapraz katlı laminatlar için, darbe enerjisi yaklaşık 10.36 J olduğunda, en iyi enerji soğurma özelliğini sergiler. $45^\circ/-45^\circ$ alt laminatların tanıtımı, malzeme sertliğini iyileştirmiş ve darbe enerjisi emilimini azaltmıştır. Eklenen $45^\circ/-45^\circ$ alt laminatların sayısı, enerji emilimiyle ters orantılıdır ve darbe tepkilerinin $45^\circ/-45^\circ$ alt laminatların konumu ile çok az ilişkisi vardır. Daha sonra, ara yüzey mukavemetinin parametrik analizi, UHMWPE/LLDPE laminatların en iyi darbe direncini elde etmek için optimum ara yüzey özelliklerinin gerekli olduğunu ortaya çıkarmıştır. [65]

Konstantinos P. Baxevanakis ve arkadaşları bu çalışmada Poliüre elastomerin, avantajlı darbe azaltma özellikleri sergilediği ve dolayısıyla çeşitli bileşenlerin ve yapıların dinamik performansını artırabildiği üzerine çalıştı. Bu çalışma, bir sonlu eleman yöntemi çerçevesinde uygulanan iki parçalı poliüre için fiziksel olarak doğrulanmış, özel bir malzeme modeli kullanarak, bir ön poliüre tabakasıyla kaplanmış ince metalik plakaların dinamik tepki mekanizmalarını tanımlar. Polimer kaplamalı bir hedefin balistik performansındaki doğrusal bir artış, sayısal bir çalışmada ilk kez yakalanan deneysel çalışma ile tutarlıdır. İnce yekpare plaka üzerinde 4 mm'den daha yüksek ön katman kalınlıkları için poliüre kalınlığındaki milimetrelilik artış başına $7,4 \text{ m s}^{-1}$ 'lik bir balistik sınır iyileştirmesi rapor edilmiştir. Buna karşılık, 4 mm'den daha ince poliüre kaplama uygulaması, hedefin balistik performansının düşmesine neden oldu. Bu sonuçlar, darbe hızına, polimer kalınlığına ve ara yüz etkileşimlerine güçlü bir şekilde bağlı olan poliüre tabakasının eklenmesiyle ince plakaların enerji emme kapasitesindeki önemli değişikliklere atfedilir. [66]

Carlos Santiuste ve arkadaşları İstifleme dizisinin UHMWPE yumuşak zırlı panellerin darbe davranışı üzerindeki etkisi üzerinde çalıştılar. Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilenin (UHMWPE) yüksek hızlı darbe altındaki mekanik davranışı, yumuşak zırlı yeleklerin tasarımı için kritik öneme sahiptir. Farklı mekanik özelliklere sahip çeşitli UHMWPE türleri mevcuttur. Bununla birlikte, balistik sınırı en üst düzeye çıkarmak için farklı UHMWPE malzemelerini birleştiren istifleme dizisinin etkisini analiz etmek için literatürde doğrulanmış bir metodoloji yayınlanmamıştır. Bu çalışmada, balistik limitin

istifleme dizisi ile değişimini tahmin etmek ve dolayısıyla optimum kombinasyonu bulmak için birleşik bir deneysel-sayısal metodoloji önerilmiştir. İlk olarak, FEM modeli, tek katmanlı numuneler üzerinde yüksek hızlı darbe testleri kullanılarak yerleştirilir. Ardından, FEM modeli, 6 istifleme dizisi üzerindeki darbe testlerinin karşılaştırılmasıyla doğrulanır. Doğrulandıktan sonra FEM modeli, en iyi konfigürasyonu bulmak için benzer alan yoğunluklarına sahip 17 istifleme dizisini analiz etmek için kullanılır. Optimum istifleme sıralamasında, bu çalışmada incelenen koşullar için arka yüzde en yüksek nihai gerinime sahip malzeme, ön yüzde en düşük nihai gerinime sahip malzeme ve ortada ara malzeme kullanılmıştır. Bu kombinasyon, nihai maliyeti azaltarak en iyi malzemenin balistik sınırını iyileştirebilir. Elde edilen sonuçlar, kompozit tasarım mühendisleri tarafından UHMWPE korumalarının balistik performansını iyileştirmek için kullanılabilir. [67]

Peng Zhang, Yuxin Xu ve arkadaşları Parça etkisine maruz kalan poliüre kaplı çelik levhaların balistik direncinin deneysel olarak incelenmesi konusunda çalıştılar. Kübik parçalara maruz kalan poliüre kaplı düşük karbonlu alaşımlı çelik levhaların balistik direncini araştırmak için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Testlerde, çelik levhaların ön, arka ve her iki tarafına düşük veya yüksek sertlikte poliüre kaplanmıştır. Kaplanmış levhalardaki poliüre ve çeliğin kalınlıkları aynıydı. Balistik performansları değerlendirmek için farklı konfigürasyonların balistik limitleri ölçüldü ve spesifik enerji emilimi hesaplandı. Farklı kaplama türleri ve pozisyonları ile çelik levha ve poliürenin bozulma mekanizmaları tartışılmıştır. Sonuçlar, poliüre kaplamanın hedef plakanın balistik sınırını iyileştirebileceğini ve ön tarafında yüksek sertlikte poliüre bulunan plakanın en iyi balistik direnci sergilediğini gösterdi. Farklı poliüre türleri için ön kaplamalı çelik levha, arka kaplamalı levhaya göre daha iyi performans göstermiştir. Ön tarafa püskürtüldüğünde, yüksek sertlikte poliüre içeren çelik levha, düşük sertlikte kaplamaya sahip levhaya göre daha iyi performans gösterdi. Bu çalışma, mühendislik uygulamalarında poliüre kaplı çelik levhaların tasarımı için rehberlik sağlamaktadır. [68]

O. Rijensky ve D. Rittel Poliüre kaplı alüminyum levhaların sayısal olarak incelenmesi hidrodinamik şoklar konusunda çalıştılar. Hidrodinamik bir şok dalgası ile yüklenen poliüre (Pu) kaplı alüminyum plakaların sayısal bir incelemesini sunuyoruz. Bu sayısal araştırma, poliüre kaplı alüminyum levhaların mekanik davranışını inceleyen önceki iki deney setinin devamı niteliğindedir. Sayısal araştırmaların amacı, poliüre kaplama

kullanan tasarımcılar için, yalnızca deneysel yollarla ulaşılamayan, kaplanmış tarafın şok yoğunluğu açısından önemi ve uygunluğuna ilişkin ek bilgiler eklemektir. Görünen o ki, yalnızca kaplanmış tarafın dikkate alınması eksik bir resim sağlarken, Pu-alüminyum ara yüzünün doğası, kaplanmış plakanın genel performansı üzerinde etkili bir etkiye sahiptir. Yapı (alüminyum) ve kaplama (poliüre) arasındaki ara yüzün önemini kavramak, Sonlu eleman simülasyonları aracılığıyla iki uç durumu inceliyoruz: Katmanların hiç eklenmediği ve ayırma seçeneği olmadan iki katmanın tamamen yapıştırıldığı katman. Bu ara yüzey koşulları, suya göre alüminyum levhanın her iki tarafında Pu kaplama durumu için incelenmiştir. Bu makale, bileşik plakanın hidrodinamik şok dalgalarına karşı optimal beka kabiliyetini elde etmek için alüminyum plaka ile Pu arasındaki ara yüzün önemini vurgulamaktadır. [69]

Chong Ji ve arkadaşları Patlama şok dalgaları ve parçacıkların birleşik etkisine maruz kalan poliüre kaplı yakıt deposu üzerinde deneysel ve sayısal simülasyon çalışması yapmışlardır. Pek çok mekanik ekipman türünün temel yakıt bileşenleri olan yakıt tankları, patlamalar ve parçalardan kaynaklananlar gibi güçlü dinamik yüklere karşı oldukça savunmasızdır. Bu yazıda, yakıt depolarının hasar direncini artırmak için iki tip poliüre malzeme (AMMT-53 ve AMMT-55) tasarlanmıştır. İlk olarak iki poliüre malzemenin mekanik parametreleri ve performans farklılıkları elde edilmiştir. Bu temelde, farklı kalınlıklarda poliüre ile kaplanmış yakıt tankları üzerinde, patlama dalgaları ve parçacıkların bir kombinasyonuna tabi tutulan bir dizi deney çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, bu iki tip poliüre malzemenin farklı koruyucu yeteneklere sahip olduğunu gösterdi. AMMT-53 poliüre, perforasyon oranını etkili bir şekilde azaltabilir, ancak sıvı sızıntısını önleyemezken, AMMT-55 poliüre, perforasyon oranını önemli ölçüde azaltamaz, ancak kendi kendini iyileştirme özelliği, sıvı sızıntısını etkili bir şekilde önleyebilir. Şok dalgasının ve yakıt deposuna etki eden parçaların tüm süreci sayısal simülasyonlarla ortaya çıkarıldı. Parçalanma hızının değişimi, sıvıdaki şok dalgasının kuvveti ve poliüre tabakasının enerji değişimi, kaplanmış poliüre tabakalarının yakıt deposu üzerinde iyi koruyucu etkilere sahip olduğunu kanıtladı. [70]

Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen fiber kompozit ve alüminyum levhalara dayanan yeni bir fiber metal laminatın darbe davranışı, kapsamlı bir sonlu eleman modelleme prosedürü kullanılarak incelenmiştir. Sürekli hasar mekanikğine dayalı, kullanıcı tanımlı bir malzeme alt programı geliştirildi. Katmanlar arası hasarı simüle

etmek için kohezyonlu bölge modeli uygulanır. Yüksek hızlı darbe simülasyonları, deneylerde gözlemlenene benzer deformasyon ve başarısızlık modları gösterdi ve küresel ve konik mermilere karşı artık hız için iyi bir yaklaşım sağladı. Sonuçlar, yerleştirme sırasının, küresel mermiye maruz kalan hedefin balistik davranışı üzerinde etkili olduğunu göstermektedir; ancak, konik bir mermi kullanılırsa çok az etkisi vardır. [71]

H. Hou ve diğerleri poliüre kaplı kompozit çelik (PCCS) plakaların hava püskürtme direnci üzerindeki yapısal konfigürasyonun etkisi deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Aynı toplam alan yoğunluğuna sahip dört tip PCCS plakası, farklı hava patlamalarına maruz bırakıldı. Hasar modları ve enerji dağıtma mekanizmaları (EDM'ler), stres dalgası yayılımı perspektifinden tanımlandı. Farklı PCCS plakalarında enerji kaybının nicel bir analizi yapıldı. Sonuçlar, PCCS plakalarının hasar modlarının, çelik ve poliüre katmanları arasındaki empedans uyumsuzluğundan dolayı yapısal konfigürasyondaki değişikliklerle önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Poliüre katmanlarının EDM'leri, patlama yoğunluğundaki değişikliklerle değişti. Sırasıyla, arkadan püskürtmeli, darbeli taraftan püskürtmeli ve sandviç olan PCCS plakaları için yaprak açma/dökülme, merkezi tıkama ve gerdirmeye deformasyonu poliüre katmanlarının ana EDM'leriydi. Arkadan püskürtmeli ve sandviç olan PCCS plakaları, monolitik çelik benzerlerine göre üstün hava patlaması direncine sahipken, darbe tarafı ve her iki taraftan püskürtmeli PCCS plakaları, monolitik çelik benzerlerine göre daha düşük hava patlaması direncine sahipti. Çelik katman, yapısal konfigürasyon ve patlama yoğunluğundan bağımsız olarak bir PCCS plakasında kinetik enerjinin dağıtılmasında kilit bir rol oynadı. Poliüre tabakasının enerji dağıtma kapasitesi, nispeten düşük yoğunluklu hava patlamaları altında daha yeterli bir şekilde kullanılabilir. [72]

R. Harikumar ve A. Devaraju 1,8 mm'den 2,6 mm'ye kadar farklı kalınlıklarda PU numuneler hazırlamışlardır. PU kaplı Alüminyum ve yumuşak çelik kompozitler püskürtme tekniği prosesi ile üretilmiştir. Bu numunelerin mekanik özellikleri sertlik, geri tepme esnekliği, çekme ve düşük hızlı darbe testleri gibi çeşitli mekanik testler yapılarak incelenmiştir. PU kalınlığı arttıkça, mekanik özellikler giderek arttı. PU kaplı Hafif Çelik, PU kaplı Alüminyum sandviç kompozitlerden daha iyi mekanik özellikler sergiler. Poliüre (PU), membranlarda, astarlarda ve kalafatta kullanılan bir izosiyanat ile bir amin bileşeninin hızlı reaksiyonundan oluşan bir kopolimerdir. PU numuneler 1,8 mm'den 2,6 mm'ye kadar farklı kalınlıklarda hazırlanır. PU kaplı Alüminyum ve Mild Steel

kompozitler, püskürtme tekniği prosesi ile imal edilmiştir. Bu numunelerin mekanik özellikleri sertlik, geri tepme esnekliği, çekme ve düşük hızlı darbe testleri gibi çeşitli mekanik testler yapılarak incelenmiştir. PU kalınlığı arttıkça mekanik özellikler de kademeli olarak arttı. [73]

Sert beton hedeflere saldırmak için iki aşamalı cephanelerin (öncül biçimli bir şarj (SC) ve onu takip eden kinetik enerji mermisi) geliştirilmesinin yanı sıra hem sivil hem de askeri alanlarda ultra yüksek performanslı betonun (UHPC) artan uygulamaları ile koruyucu yapılar, SC şekillendirilmiş jetin UHPC hedefi üzerindeki çarpma performansına ilişkin karşılaştırmalı bir çalışma şu anda deneysel ve sayısal olarak yapılmaktadır. İlk olarak, UHPC, 45# çelik ve UHPC/45# çelik kompozit hedefler üzerinde bir dizi jet delme/delme testi gerçekleştirilir. Penetrasyon derinliğini ve sondaj deliği (krater ve tünel) çapını değerlendirerek, hedef malzeme ve konfigürasyonun yanı sıra SC'nin uzaklık mesafesinin jetin darbe performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak tartışılır. Ardından, sonlu eleman kodu LS-DYNA'da uygulanan 2B çok malzemeli Arbitrary Lagrange-Euler (ALE) algoritması, Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI) yöntemi ve erozyon algoritması benimsenerek, mevcut testte jetin oluşum ve çarpma performansı iyi çoğaltılmıştır. Son olarak, doğrulanmış sayısal algoritmalara, temel modellere ve karşılık gelen parametrelere dayalı olarak, hedef malzemenin (UHPC, NSC ve 45# çelik), uzaklık mesafesinin, hedef konfigürasyonunun (istiflenmiş ve aralıklı) ve ağırlık verimliliğinin jetin çarpma performansı üzerindeki etkileri daha fazla tartışılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, jetin balistik performansını değerlendirmek ve koruyucu yapıları tasarlamak için yararlı referanslar sağlayabilir. [75]

Y. Sun ve diğerleri [76] yüksek hızlı mermiye maruz kalan poliüre/ASTM1405-çelik kompozit levhanın anti-penetrasyon performansı analiz edilmiştir. İki çeşit modifiye poliüre malzeme (AMMT-053 ve AMMT-055) seçilmiş ve hız ölçüm hedef sistemi ve yüksek hızlı kamera içeren balistik darbe test sistemi tasarlanmıştır. Bu deney, poliüre kaplama kalınlığı, poliüre kaplama konumu ve cam elyaf kumaşın poliüre/ASTM1405-çelik kompozit levhanın anti-penetrasyon performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için bir tüfek ve 5.8 mm mermi ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç, poliüre kaplama pozisyonunun etkilerinin iki poliüre tipi arasında farklı olduğunu ve cam elyaf pozisyonunun etkilerinin de iki tip poliüre arasında farklı olduğunu gösterdi. AMMT-053 poliüre malzeme için, arka yüzde olmaktansa ön yüzde olmak daha iyiydi; AMMT-055

poliüre için ise, fark çok ince olmasına rağmen arka yüzeyde olmak daha iyiydi. Ek olarak, poliürenin etkinliği ile poliüre kaplamanın kalınlığı arasındaki ilişkiyi açıklamak için formüller verilmişti. Genel olarak, AMMT-055, AMMT-053'ten daha iyi bir anti-penetrasyon performansına sahipti. Ayrıca, kendi kendini iyileştirme, çatlak, yerel şişkinlik, parçalanma ve yerel parçalanma olmak üzere beş tipik hasar modu tanımlanmış ve SHPB testi sonuçları ile başarısızlık mekanizması analiz edilmiştir. Ek olarak, poliüre/çelik kompozit levhanın anti-penetrasyon performansında bağlanma mukavemeti önemli bir rol oynamıştır[76].

D. Chu ve diğerleri karmaşık dinamik yükleme altında poliüre kaplı çelik levhanın darbe direnci analiz edilmekte ve yeni kurulan hesaplamalı değerlendirme modeli kullanılarak kapsamlı balistik ve patlama direncini geliştirmek için tasarlanmıştır. İlk olarak, kaplamanın darbe direnci üzerindeki kalınlık ve yerleştirme etkilerine göre, olağanüstü kapsamlı balistik ve patlama direncine sahip olduğu kanıtlanmış çelik çekirdekli sandviç plakalar tasarlanmıştır. Ayrıca, farklı patlama senaryolarında uygulanan koruyucu yapıların tasarımına rehberlik etmesi için farklı poliüre kaplı çelik levhalar için balistik ve patlama direnci dağılım şeması verilmiştir. Ayrıca, birleştirilmiş parçalar ve patlama yüklemesi ile iki senaryo altında tasarlanan plakaların dinamik tepkisi incelenmiştir. Sonuçlar, birleşik yüklemenin sinerjik etkisinin poliüre kaplı çelik levhanın hem balistik hem de patlama direncini azalttığını göstermektedir. Ayrıca, parçaların ve patlamanın etkili dizisi, yapısal koruyucu performansı büyük ölçüde etkiler. Yapısal büyük deformasyona veya hasara neden olan ilk yüklemenin baskın olduğu bulunmuştur [77].

Mert Onur YAVAŞ, Ahmet AVCI, Mehmet ŞİMŞİR ve Ahmet AKDEMİR çalışmalarında Kevlar 49/ UHMWPE HB26 Hibrit Tabaka-Kompozitin Balistik Performansını çalışmışlardır. Kat sayısının Kevlar49/ UHMW-PEHB26 (ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen) katmanlı hibrit kompozitin balistik performansı üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Kompozit numunelerin balistik performansı, çeşitli kompozit numunelerde travma derinliği, enerji emme kapasitesi ve delinmeye neden olan mekanizmalar açısından açıklanmaktadır. Balistik testler NIJ 0101.04 Level-III standartlarına göre yapılmaktadır. Sonuçlar, Tip V-kompozit dışında üretilen kompozit numunelerin NIJ 0101.04 standardına göre Seviye IIIA koruması sağladığını göstermiştir. Kevlar49/ UHMW-PEHB26 katmanlı hibrit kompozit için kritik kat sayısı, her bir kumaş için 8 kattan oluşan 16 kat olarak elde edilmiştir. Kompozit numunelerdeki toplam kat

sayısı azaldıkça travma derinliği artar. Katmanlı-kompozitin enerji soğurma kapasitesi, toplam kat sayısı azaldıkça azalır. Enerji soğurma mekanizmaları, ipliklerin gerilmesi ve kırılması, katların ve tabakaların delaminasyon ve katlar arasındaki sürtünme enerjisi ve ipliklerin hareketliliği nedeniyle katların gerinim enerjisi ile açıklanmaktadır. [78]

Yüksek performanslı ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) yumuşak balistik alt laminatlar ([0=90]_n, SBSL), tabanca mermilerini yenebilen yumuşak bir vücut zırhı paketi (SBAP) oluşturmak için istiflenir. Farklı boyuttaki tek katmanlı [0/90] SBSL üzerindeki enine etki, kabuk elemanlarla modellenmiş ve LS-DYNA kompozit malzeme modeli MAT54 kullanılarak çözülmüştür. Sonlu elemanlar (FE) modeli, enine etki için 1D ve 2D teoriler kullanılarak doğrulanır. Doğrulanmış FE modelleri daha sonra bir [0/90] SK76/PU SBSL'nin sabit ve değişken hız etkisi altında delme davranışını incelemek için kullanılır. Sonuçlar, enine deformasyon konisinin taban şeklinin bir baklava şekline sahip olduğunu göstermektedir; boyunca koni dalga hızı birincil malzeme yönü 2D membran teorisi ile iyi bir uyum içindedir, altında SBSL'nin delinmeyeceği bir minimum delme hızı vardır, pik delme kuvveti SBSL'nin boyutuyla birlikte azalır ve delme işi artan hız ile azalır. [0/90] SK76/PU SBSL'nin ayrıntılı delme mekaniği ilk kez sunulmaktadır. [79]

[0/90] istifleme dizisindeki ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) liflerinden yapılan yumuşak balistik alt laminat (SBSL), çok katmanlı bir softballistik zırh paketinin (SBAP, diğer adıyla Yumuşak Zırh) yapı taşıdır. Literatürde ilk kez tek katmanlı bir SBSL'nin ve birkaç çok katmanlı SBAP'nin (2, 3, 4, 8, 16, 24, 32 katman) delme dinamiklerinin sistematik bir çalışması sunulmaktadır. Tek bir katman üzerindeki enine etkinin önceden doğrulanmış bir sonlu eleman modeli, tek tek katmanlar arasındaki sürtünme ile çok katmanlı SBAP'lerin delme mekaniğini incelemek için kullanılır. Balistik sınır hızının klasik tanımının ardından, bağımsız tek katmanlı SBSL ve çok katmanlı SBAP'ler için bir minimum delme hızı belirlenmiştir. Çok katmanlı SBAP'ler için tam delikler, tek tek katmanların kalınlık boyunca aşamalı olarak delinmesi olarak tanımlanmıştır. Çok katmanlı SBAPS'in minimum delme hızları doğrusaldır sekiz (8) katmanlı hedef ve daha kalın alan yoğunluğu ile. SBAP'lerin büyük deformasyon davranışı ve delme mekaniği ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. [80]

Seramiğin enerji soğurucu olarak kullanımı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir ve seramik karoların balistik performansında bazı iyileştirmeler, farklı malzeme sınıflarıyla (örn. E-cam/epoksi, karbon-fiber/epoksi, vb. kaplanarak yapılmıştır.). Enerji soğurucu uygulamalar için seramik kullanılması sistemin ağırlığının önemli ölçüde azalmasına yol açar. Bu nedenle, aynı veya daha az alan yoğunluğuyla daha fazla enerji emilimine yol açan sistemdeki seramik konfigürasyonda yapılan herhangi bir değişiklik önemlidir. Öte yandan, poliürenin birçok uygulamada mükemmel bir enerji yayan madde olduğu kanıtlanmıştır. Bundan ilham alarak, seramiklerin poliüre ve diğer malzemelerle kaplanmasının, ortaya çıkan seramik bazlı kompozitlerin enerji emilimi ve balistik performansı üzerindeki etkisini inceliyoruz. Bu çalışmada poliürenin seramik karoların balistik etkinliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, poliüre-seramik kompozitler üzerinde bir dizi penetrasyon testi gerçekleştirdik. Deneylerimizde, seramik-poliüre kompoziti çarpmak ve delmek için yüksek hızlı bir mermi itilir. Merminin hızı ve kütlesi, penetrasyondan önce ve sonra ölçülür. Merminin kinetik enerjisindeki değişiklik değerlendirilir ve farklı poliüre-seramik konfigürasyonları için karşılaştırılır (örneğin, ön yüzdeki poliüre, arka yüzdeki poliüre, iki seramik karo arasındaki poliüre, vb.). Deneysel sonuçlar, poliürenin E-cam/epoksi ve karbon-fiber/epoksi gibi diğer kısıtlayıcı malzemeler kadar etkili olmadığını göstermektedir. [81]

Kompozit yapılar geliştikçe, patlama veya darbe yüküne maruz kalan çok katmanlı kompozit yapıların koruyucu performansını iyileştirmek için poliüre kaplama uygulanmıştır. Poliüre kaplı Karbon Elyaf Takviyeli Plastik (CFRP) kompozitlerin balistik direncini araştırmak için silindirik mermili 14,5 mm balistik tabanca kullanılarak darbe deneyleri yapılmıştır. Poliüre kaplama konumu ve kaplama kalınlığının etkisi analiz edilmiş ve tartışılmıştır. Poliüre kaplı CFRP kompozit levhalar için merminin çarpma hızı 600 m/s ile 1406 m/s arasında seçilmiştir. Balistik davranışı değerlendirmek için enerji soğurma oranları hesaplanmıştır. CFRP plakaların hasar bölgeleri ultrasonik C-tarama görüntüleri ile belirlendi. CFRP laminatların ve poliürenin başarısızlık mekanizması, bir optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edildi. Sonuçlar, ilk çarpma hızının artmasıyla mermilerin deformasyonunun arttığını göstermiştir. RPU2 konfigürasyonunun enerji emme oranı ve hasar seviyesi, saf CFRP plakalardan daha iyiydi. Optik mikroskop ve SEM görüntüleri, poliürenin ön yüzünde basma-kesme kırılması, çekme-kesme kırılması, yapraklanma hatası, poliürenin arka

tarafında parçalanma ve zımbalama delinmesi arıza modları olduğunu göstermiştir. Genel olarak, poliüre kaplama, CFRP kompozitlerin arka tarafına poliüre püskürtülürken kompozit plakaların balistik performansını önemli ölçüde artırabilir. [82]

Yuexin Jiang, Boyi Zhang, Jianshu Wei ve Wei Wang çalışmalarında Poliüre kaplı çelik plakaların silindirik bir çekicin düşük hızlı darbesine tepkisi üzerine deneysel ve sayısal çalışmalarını bildiride sundular. Düşük karbonlu çelik levhalar yapılmış ve darbe dayanımlarını arttırmak için poliüre tabakaları ile kaplanmıştır. Poliüre-çelik kompozit plakalar, bir test teçhizatı ile sınırlandırıldı ve bir ağırlık düşürme makinesi kullanılarak küt bir silindir çekiçe darbeye maruz bırakıldı. Çarpma işlemlerinin sayısal simülasyonları, sonlu eleman kodu LS-DYNA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal simülasyon yöntemi, sonuçlarını deneylerle karşılaştırarak doğrulandı. Deneysel sonuçlar, poliüre kaplamaların çelik plakaların nihai enerji emme kapasitesini etkili bir şekilde geliştirebileceğini göstermiştir. Aynı kalınlıkta poliüre tabakaları ile kaplandığında kompozit levhaların nihai enerji soğurma kapasitesinin azalan sırası şuydu: üst tarafı kaplı levhalar, çift tarafı kaplı levhalar ve alt tarafı kaplı levhalar. Kompozit plakaların enerji soğurma etkinliğini ölçmek için Ed parametresi önerildi ve üst tarafı 4 mm poliüre ile kaplanmış kompozit plakanın tüm plakalar arasında en yüksek Ed değerine sahip olduğu bulundu. [83]

Boris Dyatkin ve Raymond M. Gamache Sertleştirilmiş çelik yüzeylere uygulanan öne bakan florlu polimer kaplamaların penetrasyon direncinde bir artış rapor ettiler. Çalışma, yekpare ve laminat konfigürasyonları içeriyordu ve bunların seçilen alt tabakaların balistik penetrasyon direncini geliştirme yeteneklerini inceledi. Politetrafloroetilen (PTFE) kaplamalar, V-50 performansını önemli ölçüde iyileştirdi ve daha kalın kaplama katmanları için benzer polimer kaplı zırh kompozitlerinden daha iyi performans gösterdi. Çelik alt tabakaların kalınlığı ve sertliği, polimer tabaka kalınlığı ve kümülatif laminat sayısı toplu olarak kütle verimliliğini etkiledi. PTFE, daha önce test edilen poliüre ve diğer elastomerlerin aksine darbe kaynaklı bir faz geçişine uğramayan kristal bir malzeme olduğundan, yüksek performansı, bu malzemenin darbe sırasında akışa direndiğini ve ardından alt tabakaya uygulanan gerilimi azalttığını gösterir. Flor polimer, balistik zırh sistemlerini geliştirmek için hafif ve basit bir çözüm sunar. [84]

N.A. Sazhenkov ve arkadaşları Polimer-matriks kompozit malzemelerin darbe hasarına karşı direncini artırmak için gelecek vaat eden yöntemlerden biri de koruyucu kaplamaların kullandılar. Bu çalışmada, poliüre kaplamanın dokuma cam elyaf takviyeli laminatın darbe performansı parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma, pnömatik tabanca kullanan özel olarak geliştirilmiş bir balistik deney test teçhizatında gerçekleştirildi. 200 mm x 300 mm x 8 mm boyutlarındaki 11 adet polimer kompozit hedef, 23,8 mm çapında ve 54,7 g ağırlığındaki çelik mermi ile 150 m/s çarpma hızı aralığında dikey olarak vurulmuştur. Hedefin ön ve arka yüzlerinde 1,2 mm koruyucu kaplama bulunan hedefler ile koruyucu kaplaması olmayan numuneler için balistik sınırının karşılaştırmalı bir değerlendirmesi yapılmıştır. Darbe süreci, önden ve üstten görüntüleri saniyede 25.000 kare hızında filme almak için iki yüksek hızlı kamera kullanılarak yakalandı. Ön ve arka yüzeylerde kaplanmamış ve poliüre kaplı cam elyaf levhaların balistik limiti ile ilgili deneysel veriler elde edilmiştir. Alın yüzeyindeki 1,2 mm kalınlığındaki kaplamanın balistik limiti %20 arttırdığı gösterilmiştir. CTP taban plakası ve kaplamanın hasarının niteliği analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, poliüre kaplı laminatların balistik etkilerinin sayısal modellerinin doğrulanması için kullanılabilir. [85]

Srinivasan Arjun Tekalur, Arun Shukla ve Kunigal Shivakumar Kompozit malzemeler, patlama ve balistik darbeleri içeren uygulamalarda kullanılmış ve patlama enerjisini emmede etkili malzemeler olarak kabul edildiğini belirtti. Kompozitlere poliürenin bir darbe azaltma malzemesi olarak uygulanması nispeten yeni bir fikirdir. Bu çalışmada, poliüre (PU) ve E-cam vinil ester (EVE) kompozitten oluşan katmanlı ve sandviç kompozit malzemeler, bir şok tüpü kullanılarak etkili patlama direnci için deneysel olarak değerlendirilmiştir. İki kenar boyunca basit bir şekilde desteklenen ve diğer ikisi boyunca serbest olan düz dokuma kompozit ve katmanlı kompozitin dikdörtgen plakaları, kontrollü püskürtmeye tabi tutuldu. Plakanın serbest ucu, patlama nedeniyle dinamik bükülme sırasında yüksek hızlı bir kamera kullanılarak gerçek zamanlı olarak gözlemlendi. Sonuçlar, darbe yüzüne poliüre tabakasının eklenmesinin patlama direncini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, poliürenin iki kompozit kaplama arasına sıkıştırılmasıyla hazırlanan sandviç malzemeler, katmanlı ve kompozit plakalara kıyasla en iyi patlama direncine sahiptir. [86]

Scott W. Case ve arkadaşları Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) kompozitlerin yüksek gerinim oranlı fiber yönü çekme tepkisi, darbe hasarının meydana gelebileceği uygulamalarda ilgi çekici olduğunu belirtti. Bu tepki gerinim hızına göre önemli ölçüde değişir. Bununla birlikte, bu kompozitlerin fiziksel olarak test edilmesi, 10^{-1} /s'nin üzerindeki gerinim hızlarında zordur. Bu kompozitlerin çekme davranışını tahmin etmek için kompozit çekme mukavemetinin bir Monte Carlo simülasyonu oluşturulmuştur. Elyaf kırılmalarının çevresinde yükün yeniden dağılımı, gerinim hızına bağlı olan elyaf ve matris özelliklerine göre değişir. Elyaf kuvvetlerinin dağılımı, 10^{-4} /s ile 10^{-1} /s arasında değişen gerinim hızlarında tekli elyaf testlerinden elde edilir ve zaman-Sıcaklık Süper pozisyon Prensibi (tTSP) kullanılarak 10^{-4} / s ila 10^{-6} /s gerinim oranlarına kaydırıldı. Diğer lif özellikleri aynı testlerden elde edilir, ancak deterministik olduğu varsayılır. Matris özelliklerinin de deterministik olduğu varsayılır ve düzgün matris malzeme numunelerinin mekanik testinden elde edilir. Simülasyon sonuçları, 10^{-1} /s'ye kadar gerinim hızlarında tek yönlü laminat için deneysel verilerle karşılaştırılır. 10^{-1} /s'nin üzerinde simülasyon sonuçları, tTSP kullanılarak kaydırılan deneysel verilerle karşılaştırılır. Benzer şekilde, UHMWPE kompozitlerinin kalınlık boyunca kayma tepkisi, darbe hasarının hesaplamalı modellemesini desteklemek için ilgi çekicidir. Bu çalışmada, kesme özelliklerini belirlemek için UHMWPE kompozitlerinin zımba kesme testi yapılmıştır. Biri arka düzlem eğriliğine izin veren ve diğeri önleyen iki test fikstürü, zımba kesme yükü altındaki gerilme durumunu ve kompozitin sonuçtaki kesme mukavemetini araştırmak için sonlu eleman modellemesi ile birlikte kullanılır. [87]

Nayan Pundhır, Himanshu Pathak ve Sunny Zafar mevcut çalışmalarında, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilenin (UHMWPE) doğrusal olmayan sonlu eleman analizleriyle ilgili olduğunu belirtti. UHMWPE, ANSYS-Workbench kullanılarak hafif vücut zırhının balistik tasarım incelemesi için sunulmuştur. UHMWPE'nin balistik performansı Kevlar/epoksi kompozit ve alümina ile karşılaştırılmıştır. Çalışma, UHMWPE, Kevlar/epoksi ve alümina levhanın balistik limiti, eğikliğın anlamı (30° , 45° ve 60° 'ta), mermi şekli (eliptik, konik ve küresel şekil) açısından sunulmaktadır. İki katmanlı bir kompozit için malzeme yerleştirme sıralaması ve tek katmanlı UHMWPE'nin balistik performansı, çok katmanlı plaka ile karşılaştırılmıştır. Parametrik çalışmalar, tek ve çok katmanlı UHMWPE için artık hız, balistik plakanın darbe hızına aktarılan enerjinin oranı ve delme oranı şeklinde sunulmuştur. UHMWPE'nin sayısal analizlerinin sonuçları

Kevlar/epoksi kompozit ile karşılaştırılmıştır. UHMWPE laminat kompozitten yapılan zırh sisteminin, %17,3 daha yüksek balistik limit ile Kevlar/epoksi konfigürasyonuna kıyasla %40,6 ağırlık azalması sağladığı tespit edilmiştir. [88]

L.J. Deka, S.D. Bartus ve U.K. Vaidya Lamine elyaf takviyeli kompozitlere yüksek hızlı enine darbe, askeri ve yapısal uygulamalarda ilgi çekici olduğunu belirtti. Çarpışma sırasında hedeflerin deneysel çalışmaya dayalı hasar değerlendirmesi aşırı derecede pahalı olabilir. Bununla birlikte, sayısal simülasyon alanındaki son gelişmeler, balistik koruma için katmanlı malzemelerin performans özelliklerini tahmin etmenin bir yolunu sunmaktadır. Bununla birlikte, güçlendirilmiş termoplastik kompozit malzemelerin balistik tepkisi hakkında sınırlı bilgi bulunmaktadır. Bu çalışmanın genel amacı hem deneysel hem de modelleme bakış açısıyla, yüksek hızlı darbe altında değişen kalınlıklardaki düz örgü lamine kompozitlerin davranışını araştırmaktır. Bu sorunu analiz etmek için, farklı kalınlıklardaki düz dokuma E-cam/polipropilen lamine kompozitler üzerinde 0,50 kalibrelik silindirik şekilli düz uçlu mermilerle bir dizi balistik darbe testi yapılmıştır. Panellere çarpmak için sabot sıyrıcı mekanizmalı bir gaz tabancası kullanılır. Delme mekanizmasını, balistik sınırı ve hasar değerlendirmesini analiz etmek için, açık bir üç boyutlu sonlu eleman kodu LS-DYNA kullanılmaktadır. Uygun malzeme modellerinin ve temas tanımının seçilmesi, sayısal simülasyonun doğruluğu için ana kriterlerden biridir. Yüksek hızlı darbe sırasında, kompozit laminatlar ilerleyici hasar arızasına maruz kalır ve bu nedenle, Hashin kriterlerine dayalı ilerleyici bir arıza modeli olan Malzeme Modeli 161, laminatların arızasını tahmin etmek için atanmıştır. Mermi, Malzeme Modeli 3 (MAT_PLASTIC_KINEMATIC) kullanılarak modellenmiştir. Laminatlar ve mermi, tek entegrasyon noktalı tuğla elemanlar kullanılarak birbirine geçirilir. Çarpma hızı 187 ile 332 ms⁻¹ arasında değişiyordu. Darbe sırasında balistik limit, delaminasyon ve enerji emilimini tahmin etme açısından sayısal ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir korelasyon çizilmiştir. [89]

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

Bu bölümde, poliüre kaplı ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kompozit plakalarının balistik testleri incelenmiştir. Araştırmada, poliüre kaplı kompozit plakaların yüksek hızlı darbe davranışını anlamak için tek kademeli bir gaz silahı kullanılmıştır. Ayrıca, kompozit plakaların balistik davranışını incelemek için yüksek hızlı kamera ve CT X-ray tarama kullanılarak deformasyon davranışları belirlenmiştir. Bu testler, poliüre kaplı kompozit plakaların balistik dayanıklılığını değerlendirmek ve potansiyel uygulamalarda kullanımlarını iyileştirmek için önemli bilgiler sağlamaktadır.

2.1. Materyal

Son yıllarda, polimer kaplı kompozit teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde hafif balistik koruma sistemleri geliştirilmiştir. Bu teknolojiler, kişisel vücut zırhlarının hafifletilmesini, zırhlı araçların performansının artırılmasını, balistik zırhların travma derinliğinin azaltılmasını ve enerji emme yeteneklerinin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda, farklı tipte, boyutta ve geometride polimer kaplı tekstil ürünleri kullanılmaktadır. Bu gelişmeler, kullanıcıların savunma güvenliği ve hareketliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bugüne kadar yapılan araştırmaların çoğu, UYMAPE liflerinin balistik darbelere karşı direncini artırmaya yönelik olmuştur. Ancak, polimer kompozitlerdeki ilerlemeler, koruyucu zırh malzemeleri üzerinde yapılan araştırmalara yeni bir perspektif getirmiştir.

Bu tez çalışması, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen kompozit levhaların balistik darbe davranışına poliüre kaplamasının etkisini araştırmaktadır. UYMAPE kompozit plakalar, UYMAPE elyafların polimer matris malzemeleri ile birleştirilerek oluşturulan kompozit malzemelerdir. UYMAPE elyaflar, savunma ve güvenlik sektörlerinde sıklıkla kullanılan yüksek performanslı elyaflar olup yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk gibi

özelliklere sahiptirler. Polimer matris malzemeleri ise genellikle epoksi, polyester veya vinil ester polimerleri gibi malzemelerdir. Bu çalışmada, UYMAPE kompozit levhaların balistik darbe davranışı üzerinde poliüre kaplamanın etkisi incelenmektedir. Poliüre kaplamanın, balistik performansı nasıl etkilediği ve UYMAPE kompozit levhaların darbe dayanıklılığını nasıl iyileştirebileceği araştırılmaktadır.

Poliüre genel anlamda elastik polimerler sınıfına ait olup balistik koruma uygulamalarında da kullanılmaktadır. Sprey kaplama endüstrisinin ilerlemesiyle, bir yapının mekanik mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmak için yapısal bileşenlere poliüre spreycaplama uygulanabilmektedir. Özel bir şirket tarafından numunelere poliüre kaplaması yapılmıştır.

Tez çalışmasında 12 mm kalınlığında UYMAPE kompozit levha kullanılmıştır. 45 katman sayısına sahip 12 mm kalınlıklarında UYMAPE kompozit levha 11 kg/m^2 alansal yoğunluklara sahiptir. Poliüre kaplama kalınlığı her malzeme için 5 mm olarak kullanılmıştır. Poliüre kaplı numunenin alansal yoğunluğu ise 14.7 kg/m^2 'dır. UYMAPE kompozit levha sıcak pres yöntemi ile üretilmiş olup 10x10 cm boyutlarında kesilmiştir. Tercih edilen malzemeler mevcut sistemlerde isterlere uygun olarak tercih edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan poliüre malzemesi özel bir şirket tarafından yüksek basınç altında çalışması için üretilmiştir. Tablo 2.1. de tez çalışması kapsamında kullanılan numunenin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Numune özellikleri

Katman Sayısı	Numune Boyutları	Kalınlık	Kaplama Kalınlığı	Alansan-Yoğunluk Kaplamasız	Alansal Yoğunluk-Poliüre kaplı
45 Katman	100x100 mm	12 mm	5 mm	11 kg	14.7 kg

2.1.1. Poliüre Kaplama

Tez çalışmasında kullanılan Poliürenin mekanik özellikleri Tablo 2.2. de gösterilmiştir.

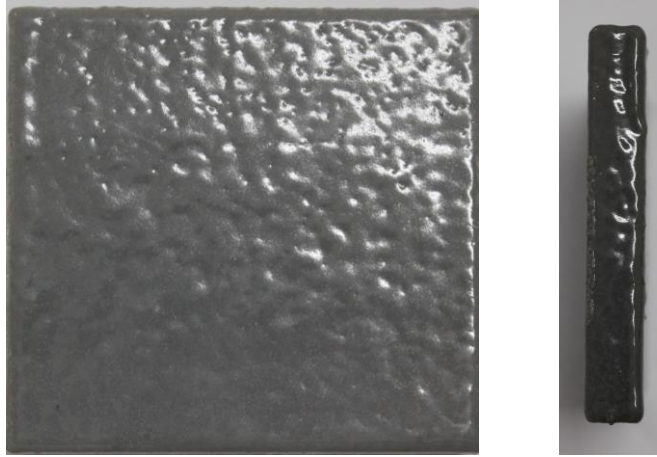
Tablo 2.2. Tez çalışmasında kullanılan poliürenin mekanik özellikleri

	Birimi	Değer	Metod
Jelleşme zamanı	s	3-5	İç metod
Dokunma zamanı	s	13-15	İç metod
Sertlik	Shore A	90-100	DIN 53505
Pantolon Yırtılma mukavemeti	N/mm	30-55	ASTM D 624
Açı yırtılma	N/mm	87-97	ASTM D624
Uzama	%	500-600	ASTM D 412
Kopma mukavemeti	N/m ²	15-20	ASTM D 412

Şekil 2.1.'de UYMAPE ve poliüre kaplı UYMAPE kompozit levhaya ait görseller yer almaktadır. Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kompozit levhalar sıcak pres yöntemi ile üretilmiş olup 10x10 cm boyutlarında kesilmiştir ve 45 katmandan oluşmaktadır. Tercih edilen malzemeler mevcut sistemlerde istelere uygun olarak tercih edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan poliüre malzemesi özel bir şirket tarafından yüksek basınç altında çalışması için üretilmiştir.

Poliüre kaplı UYMAPE numuneler de özel bir şirket tarafından poliüre kaplaması yapılmıştır. Numuneler 12 mm kalınlığına sahiptir. Poliüre kaplamasız UYMAPE numunelerin alansal yoğunluğu 11 kg/m² ve kaplamalı UYMAPE numunelerin alansal yoğunluğu 14.7 kg/m² 'dir. Sıcak preste basılan kompozitler özel bir firmada üretilmiştir. Poliüre kaplaması özel bir şirkette kaplatılmıştır.





Şekil 2. 1. UYMAPE ve poliüre kaplı UYMAPE kompozit levha

2.2. Yöntem

Poliüre kaplı UYMAPE kompozit plakalarının yüksek hızlı darbe testleri, Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde bulunan tek kademeli bir gaz silah sistemi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2.). Balistik testlerde, MIL-DTL-46593B 0.3 kalibreli parçacık benzetimli mermi (Fragment Simulated Projectile) kullanılmıştır. Gaz silah sistemi diyafram ve sabot sistemi ile çalışmaktadır. 0.3 kalibrelik parçacık benzetimli merminin geometrik boyutları Şekil 2.3. 'da verilmiştir. Testlerde kullanılan mermiler 4340H çelikten üretilmiştir ve MIL-DTL-46593B uyarınca 30 ± 2 Rockwell C sertlik değerindedir.

Gazlı silah sistemi, lançer, namlu, genişleme tankı, hız ölçüm sistemi ve hedef tankı olmak üzere beş bölümden oluşmaktadır. Sistem, merminin arka yüzeyi ve iki basınç haznesi arasında yer alan iki diyafram kullanılarak çalışır. Helyum gazı, gazlı silah sisteminde kullanılan gaz türüdür.

Tez çalışması kapsamında kullanılan gazlı silah sisteminin namlusu 1.8 m uzunluğunda ve çapı 12.7 mm olup çalışma basıncı en fazla 690 bar'dır. Sistem farklı malzeme özelliklerinde ve çentik derinliğindeki diyaframlar kullanılarak mermi hızı 500 m/s ile 1200 m/s aralığında değişmektedir. Gazlı silah sisteminde, mermi namlu içerisine polimer malzemeden üretilmiş bir sabot içerisinde yerleştirilir. Sabotlar, gazlı silah sisteminde merminin namlu içerisinde yüksek hızlı hareketi sırasında ki yapısal bütünlüğü sağlayarak merminin hedefe düz bir şekilde gitmesini yardımcı olan elemanlardır (Şekil

2.3.). Gazlı silah sistemi, mermi hızının ayarlanması için farklı basınç değerlerinde deformasyona uğrayan, farklı malzemelerden ve çentik derinliklerine sahip diyaframlar kullanır. Bu diyaframalar, istenilen hız değerine göre seçilerek lançer sisteminin basınç haznelerinin önüne yerleştirilir.

Daha sonra, iki basınç haznesinden oluşan lançer sistemi kapatılır. İlk hazne, seçilen diyaframın deformasyona uğradığı basınçtan daha düşük bir basınç değerine sahip helyum gazı ile basınçlandırılır. Ardından, ikinci hazne de aynı basınç değerindeki gazla doldurulur. Bu şekilde, mermi hızının istenen değere ayarlanması sağlanır.

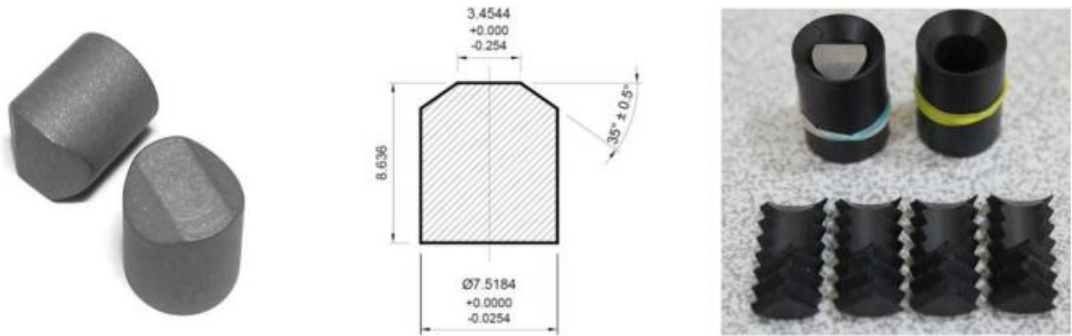
Son aşamada ilk haznedeki basınç iki katına çıkarılır ve ikinci haznedeki gaz ani bir şekilde boşaltılır. Bu durum, diyaframın çentik derinliğine bağlı olarak deformasyona uğramasına neden olur ve yüksek basınçlı gaz, son haznedeki mermiyi harekete geçirir. Ardından, mermi sabot ile birlikte namlu içinde ilerler ve genişleme tankına gelir. Genişleme tankında, ani kesit genişlemesi nedeniyle oluşan basınç farkıyla mermi ve sabot birbirinden ayrılır. Sabot genişleme tankında kalırken, mermi hedefe doğru yoluna devam eder. Mermi, genişleme tankını geçtikten sonra hız ölçüm sistemine girer ve burada mermi hızı ölçümü gerçekleştirilir. (Şekil 2.4.) sistemin bir parçası olarak kullanılan hız ölçüm sistemi, iki lazer ışık perdesi ve fotosellerden oluşur.





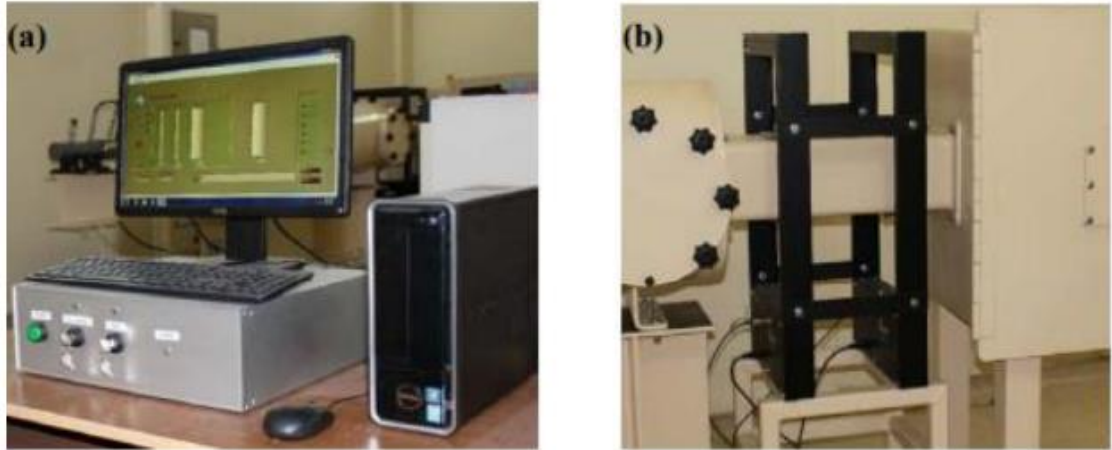
Şekil 2. 2. Balistik test sistemi (gaz silahı)

Genişleme tankından çıkan mermi, iki ışık perdesi arasındaki sabit mesafeden geçtiği sırada fotoseller kapanır. Bu durum, cihazın merminin sabit mesafeyi aldığı süreyi, fotosellerin kapanma süresi farkından hesaplamasını sağlar. Böylece, hız ölçüm sistemi, mesafe ve süre ölçümleriyle mermi hızını hesaplar. Ardından, mermi hedef tankına ulaşır ve hedefe darbe yapar.



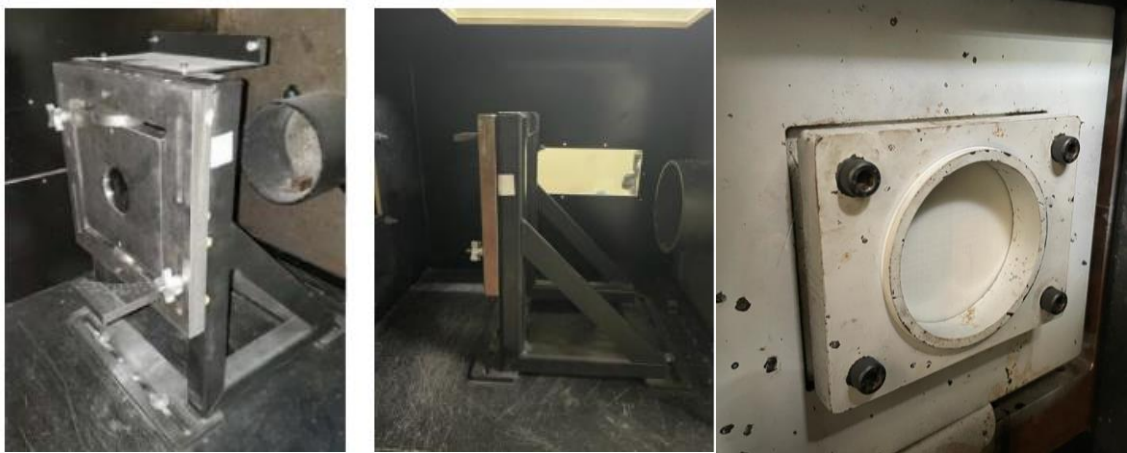
Şekil 2. 3. Gaz silahı sisteminde kullanılan sabot ve mermi.

Gaz silah sisteminin basınçlandırma ve ateşleme mekanizması, tedarikçi firma tarafından geliştirilen bir yazılım kullanılarak bilgisayar kontrollü bir ünite (Şekil 2.6.) tarafından yapılmaktadır.



Şekil 2. 4. (a) Hız ölçüm sistemi, (b) Bilgisayar kontrollü ateşleme ve basınçlandırma mekanizması

Atış testlerinde kullanılan düzenekteki diğer bir parça ise numunelerin monte edildiği Bağlama Aparatıdır. Bu nedenle, poliüre kaplı kompozit numunelere, balistik test sistemine sabitleyebilmek için Şekil 2.5.'de gösterilen bağlama aparatı kullanılmıştır. Balistik testler sonrası mermilerin çıkış hızlarının ölçülmesi için Photron marka yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. 1.000.000 fps özelliğine sahip yüksek hızlı kamera yazılımı yardımı ile görüntü işleme tekniği ve testler sırasında referans noktalar kullanılarak mermi çıkış hızları hesaplanmıştır.



Şekil 2. 5. Numune bağlama aparatı

Yüksek hızlı kamera, yerleşimi yüksek frekanslı led ışıklar ve hız ölçüm referans noktaları Şekil 2.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 2. 6. Balistik testlerde kullanılan yüksek hızlı kamera ve mermi çıkış hızı ölçümü

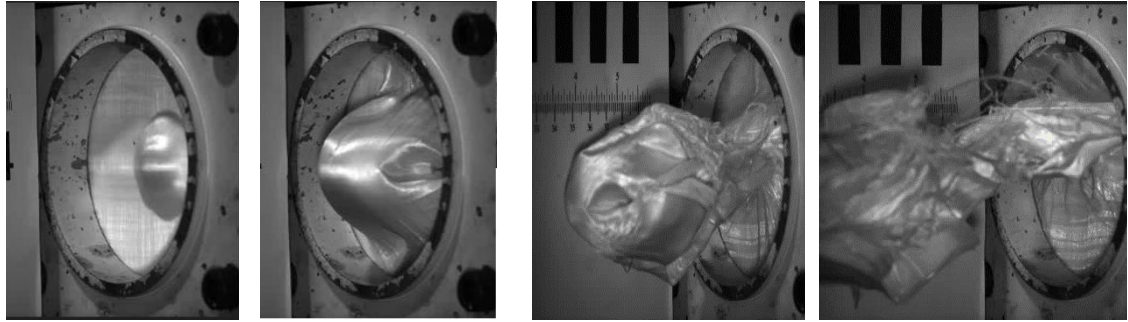
3. BÖLÜM

BULGULAR

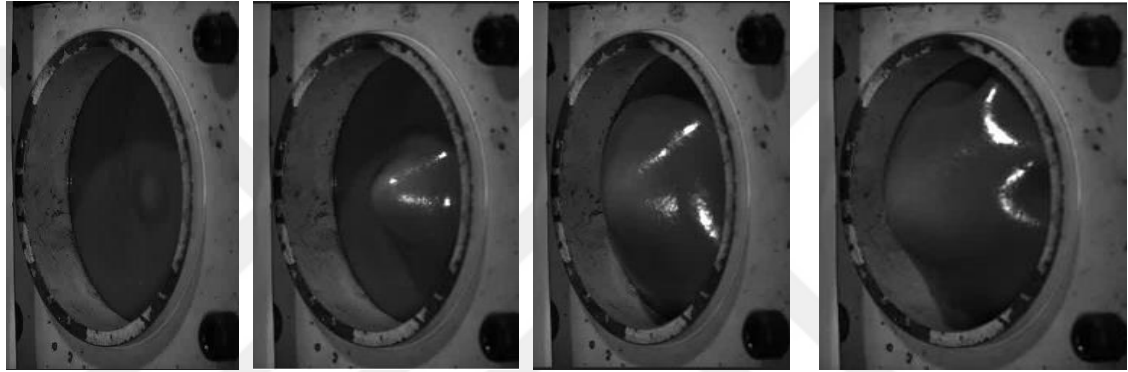
Bu tez çalışmasında Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UYMAPE) kompozit levhaların balistik davranışına poliüre kaplama etkisi araştırılmıştır. Balistik testler 550-1010 m/s arasında farklı hızlarda gerçekleştirilmiştir. Atışlarda parçacık benzetimli mermi kullanılmıştır. Gaz sıkıştırma prensibine dayanan sistemde 75-125 bar aralığında basınçlandırma kullanılmıştır. Endüstriyel uygulamalara göre seçilmiş poliüre kaplı UYMAPE ve poliüre kaplı olmayan UYMAPE kompozit levhalar şahit plakalar ile kullanılmıştır. Balistik testlerde aparata yerleştirilen numunenin aparattan kurtulması durumu sınır şartının yetersiz kalması sebebiyle yaşandı. Buna önlem olarak literatürde örnekleri görünen şahit numuneler kullanıldı. Şahit numune kullanılmadan 885 m/s hız altında yapılan 4 test atışı ön çalışma olarak adlandırılmıştır. Şahit numunelerle 3 farklı hızda Poliüre kaplı UYMAPE ve poliüre kaplı olmayan UYMAPE kompozit levhalara balistik testler yapılmıştır. 5 mm kalınlığında poliüre kaplamasının farklı mermi hızları karşısındaki davranışı bilgisayarlı tomografi kullanılarak kesit kesit incelenmiştir. Balistik testler sırasında yüksek hızlı kamera ile mermi giriş ve çıkışları görüntülenmiş olup, mermi çıkış hızları görüntü işleme yardımı ile tespit edilmiştir.

Testler sonrası numunelerin fotoğrafları alınarak deformasyon geometrileri incelenmiştir. Balistik testler belirlenen ağırlık oranlarında numunelerin kısmi penetrasyon ve perforasyon durumlarına göre yapılmıştır. Hız belirleme çalışmaları açısından ön denemeler yapılmış ve stabil hızlarda testler en az iki kere tekrarlanmıştır. Yüksek hızlı kamera görüntüleri yaklaşık 60 bin fps kullanılarak alınmıştır. Bilgisayarlı tomografi kullanılarak alınan kesit ve iç yapı görüntülerinde deformasyon ve delaminasyon ölçümleri alınmıştır.

3.1. Ön Çalışma Yapılan Poliüre Kaplı ve Kaplamasız UYMAPE Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları



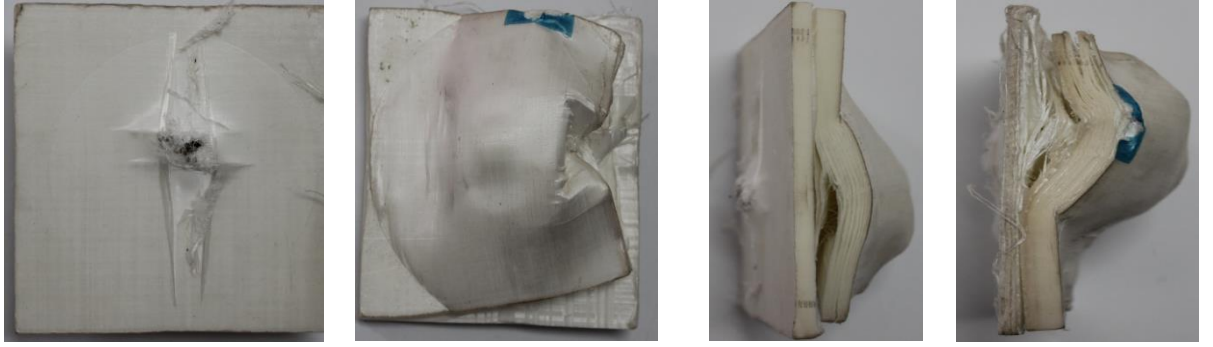
UYMAPE-V= 885±15 m/s



Poliüre kaplı-UYMAPE- v= 885±15 m/s

Şekil 3. 1. Yapılan ön çalışmalarda elde edilen poliüre kaplı ve kaplamasız UYMAPE kompozit levhaların 885 m/s mermi hızı altındaki yüksek hızlı kamera görüntüleri (v: mermi hızı)

Yapılan ön çalışmada 885 m/s altında UYMAPE kompozit levhaların poliüre kaplaması olmadan ve poliüre kaplamalı balistik testleri yapıldı. Yapılan çalışmada aparata yerleştirilen 100x100 mm numunelerin mermi ile birlikte çok yüksek dayanımı olduğu ve sınır şartı yetersiz olduğundan bulunduğu bölgeden kurtulup fırladığı gözlemlendi. Buna çözüm olarak literatür araştırmalarında gördüğümüz şahit plakalar bu tür çalışmalarda kullanılmaktadır. Kullanılan şahit plakalar 1 mm kalınlığında 20x24 mm ebatında alüminyum plakadır. Şahit numunenin amacı iyi bir sınır şartı sağlamasıdır. Ayrıca deformasyon geometrisinde ne kadar açıldığını görmemiz için yardımcı olmaktadır. Şekil 3.1.'de yapılan ön çalışmanın yüksek hızlı kamera görüntüleri yer almaktadır.



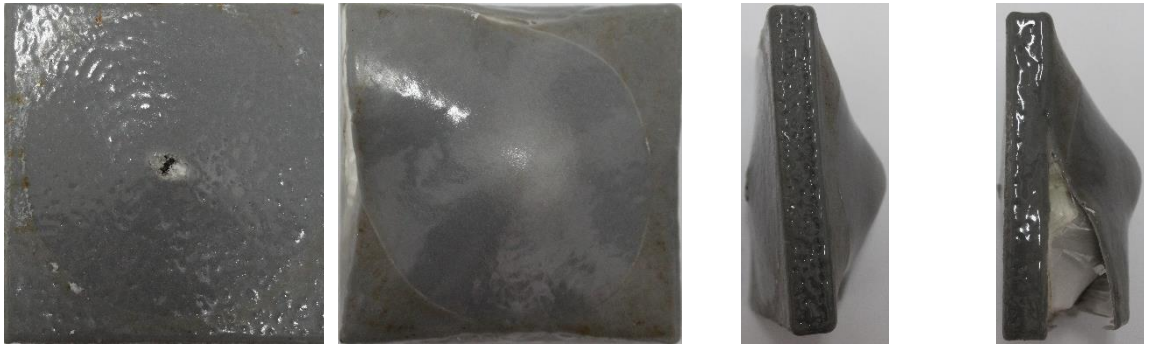
UYMAPE-V= 700±15 m/s



UYMAPE-V= 885±15 m/s



Poliüre kaplı UYMAPE-V=700±15 m/s



Poliüre kaplı UYMAPE-v=885±15 m/s

Şekil 3. 2. Yapılan ön çalışmalarda elde edilen poliüre kaplı ve kaplamasız UYMAPE kompozit levhaların 700 ve 885 m/s mermi hızı altındaki deformasyon görüntüleri

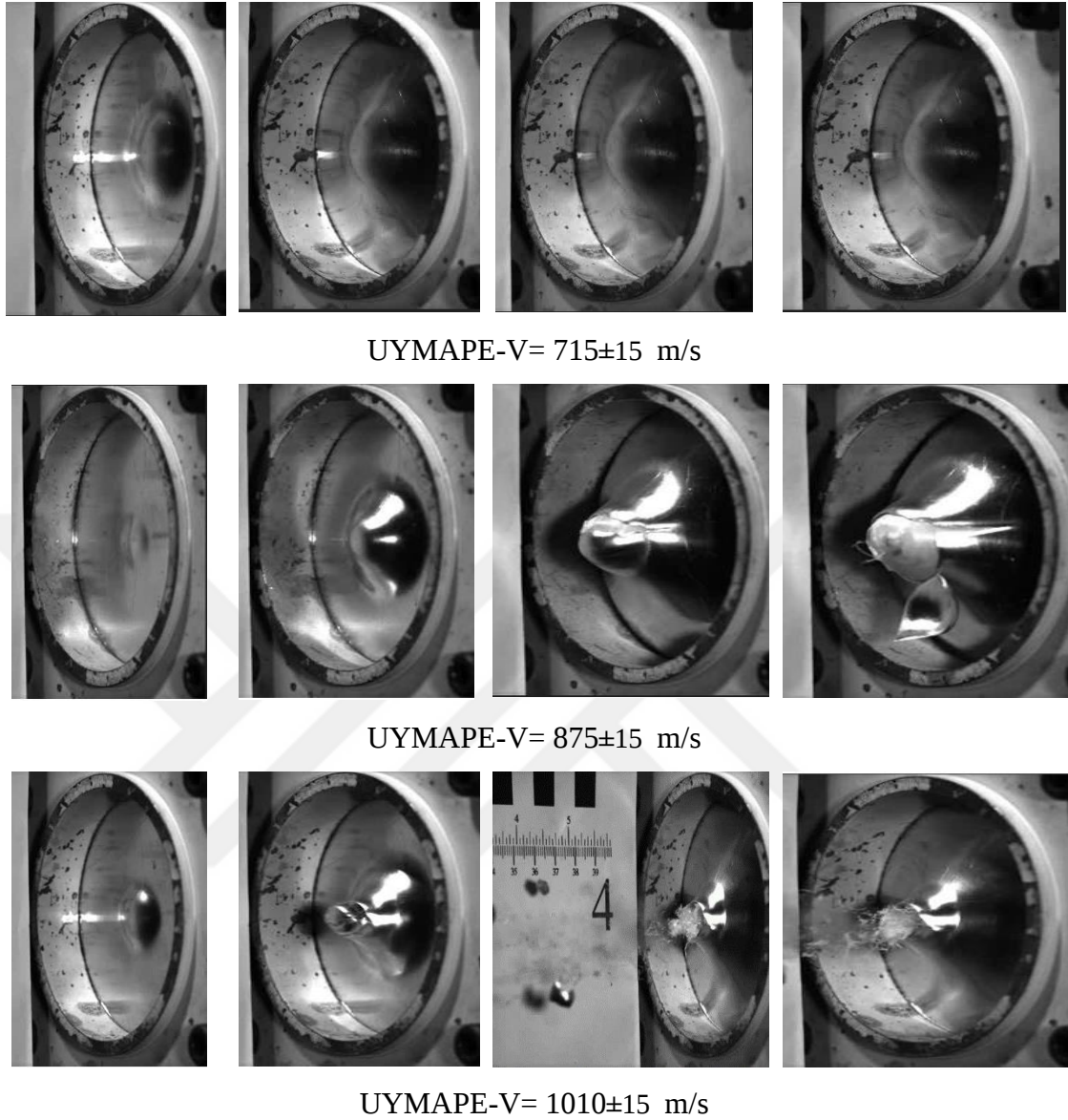
700 m/s ve 885 m/s hızlarında poliüre kaplamalı ve kaplamasız UYMAPE kompozit levhalara ön çalışma olarak toplam 4 atış yapılmış olup deformasyon görüntüleri Şekil 3.2.'de görülmektedir

3.2. Poliüre Kaplamasız UYMAPE Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları

UYMAPE kompozit levhaların poliüre kaplaması olmadan balistik testlerinde 3 farklı mermi hızı kullanılmıştır. Bu hızlar 715, 875 ve 1010 m/s olarak kısmi penetrasyona ve tam perforasyona neden olmuştur. Şekil 3.3.'de poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit plakların yüksek hızlı kamera ile balistik testler sırasında alınmış görüntüleri verilmiştir. 715, 875 ve 1010 m/s mermi hızı altında mermi çıkış yönünden görüntüleme yapılmıştır. 715 ve 875 m/s mermi hızlarında numunelerde perforasyon olmamış kısmi penetrasyon meydana gelmiştir. 1010 m/s mermi hızında ise perforasyon meydana gelmiş olup yüksek hızlı kamera yazılımı ile yapılan görüntü işleme sonucunda mermi çıkış hızı 680 m/s olarak ölçülmüştür.

Mermi çıkışından alınan görüntülerde numunenin mermi ile deforme olduğu ve bu bölgelerde de delaminasyona sebebiyet verdiği görülmektedir. Şekil 3.4.'de aynı numunelerin balistik test sonrası mermi çıkış yönünden deformasyon görüntüleri verilmiştir. Delaminasyon alanlarının oluşumu için numuneler çıkış tarafından görüntülenerek incelenmiştir. Mermi hız artışı ile deformasyon geometrileri farklılık arz etmektedir ve delaminasyon alanları artmıştır. Ancak bu görüntüler mermi etkisinin araştırılması için yeterli bilgiyi vermemektedir.

Şekil 3.5.'de poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhaların 715 m/s mermi hızı altındaki bilgisayarlı tomografi tarama ve kesit görüntüleri verilmiştir. Taramalar tüm numune üzerinden yapılmış olup bilgisayar destekli bir yazılım ile istenilen kesit anında görüntü üzerinden ölçüm yapılabilir. Farklı numunelerde farklı teknikler izlenmiştir. İlgili numunede ise mermi konumu üzerinde 3 eksen üzerinden görüntüler alınmıştır. Mermi numuneyi tam delmek üzere iken durmuştur ve kısmi penetrasyona sebebiyet vermiştir. Numunenin mermi yönündeki deformasyonu delaminasyon olarak değerlendirilmiş ve 100 mm'lik numune toplamda bir uçtan bir uca 39.75 mm'lik bir deformasyon göstermiştir. Numunenin 31.52 mm sıfırından açıldığı görülmektedir.



Şekil 3. 3. Poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhaların şahit plaka ile farklı mermi hızları altındaki yüksek hızlı kamera görüntüleri

Merminin konumu ve gittiği görüntülerde açıktır. Mermi ilerlemesi sırasında katmanlar ayrılarak delaminasyon 3 ekseninde de meydana gelmiştir. Mermi girdikten bir sonra numune 8.23 mm arkaya doğru açıldığı görülmektedir.

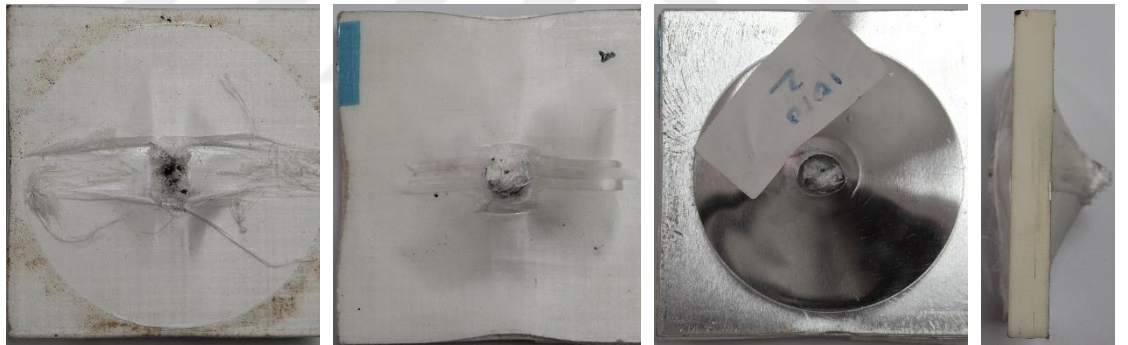
İki farklı ekseninde de yakın değerler okunması eksenlere göre simetrisinin olmamasından kaynaklanmaktadır. Merminin diğer eksenlerde ters dönmesi belirsizliğine karşın diğer kesitlerden görüntüler eklendi. Numune 715 m/s hızında delinmek üzere olduğu görülmektedir.



UYMAPE-V= 715±15 m/s



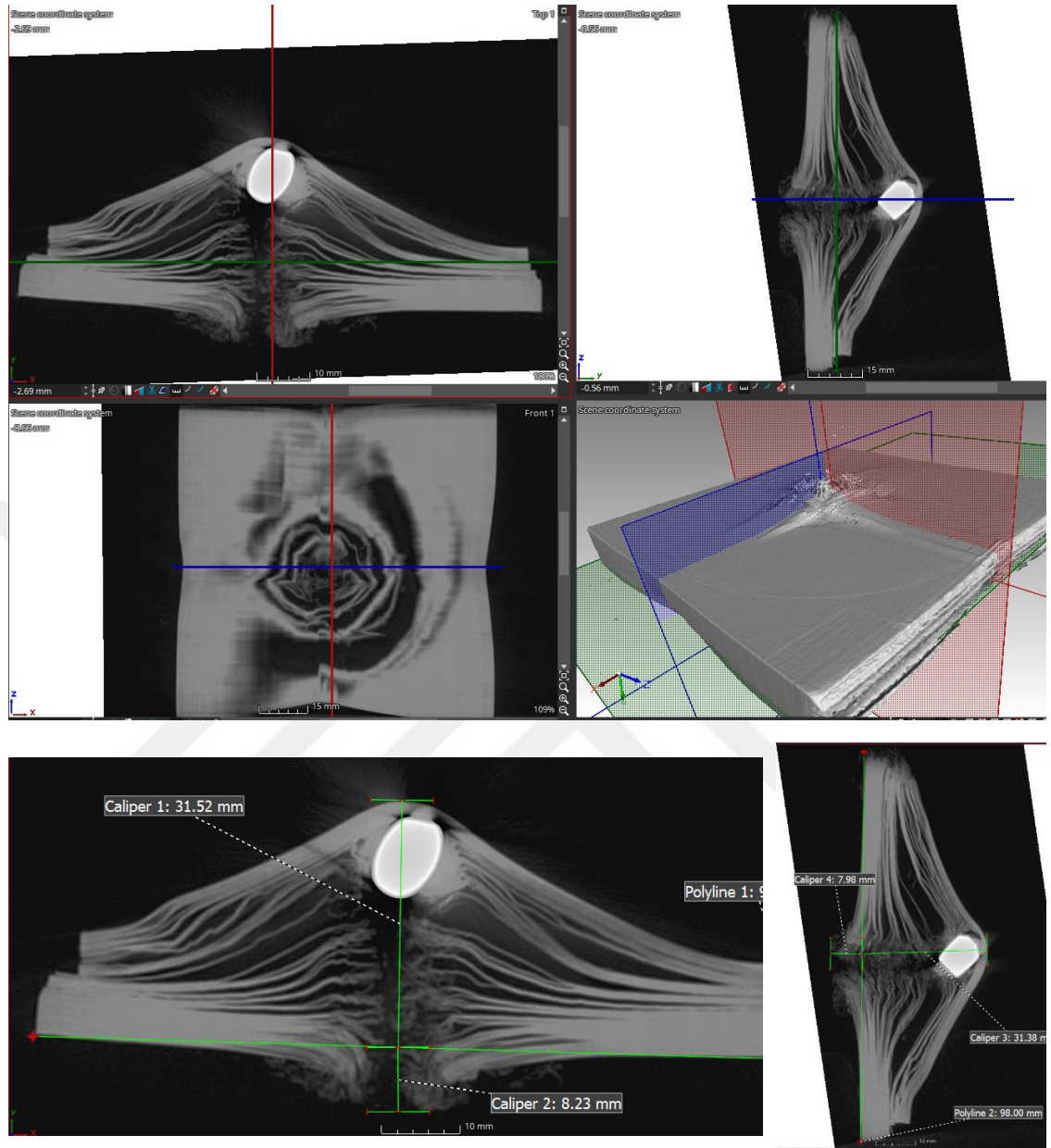
UYMAPE-V= 875±15 m/s



UYMAPE-V= 1010±15 m/s

Şekil 3. 4. Poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhaların şahit plaka ile farklı mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri

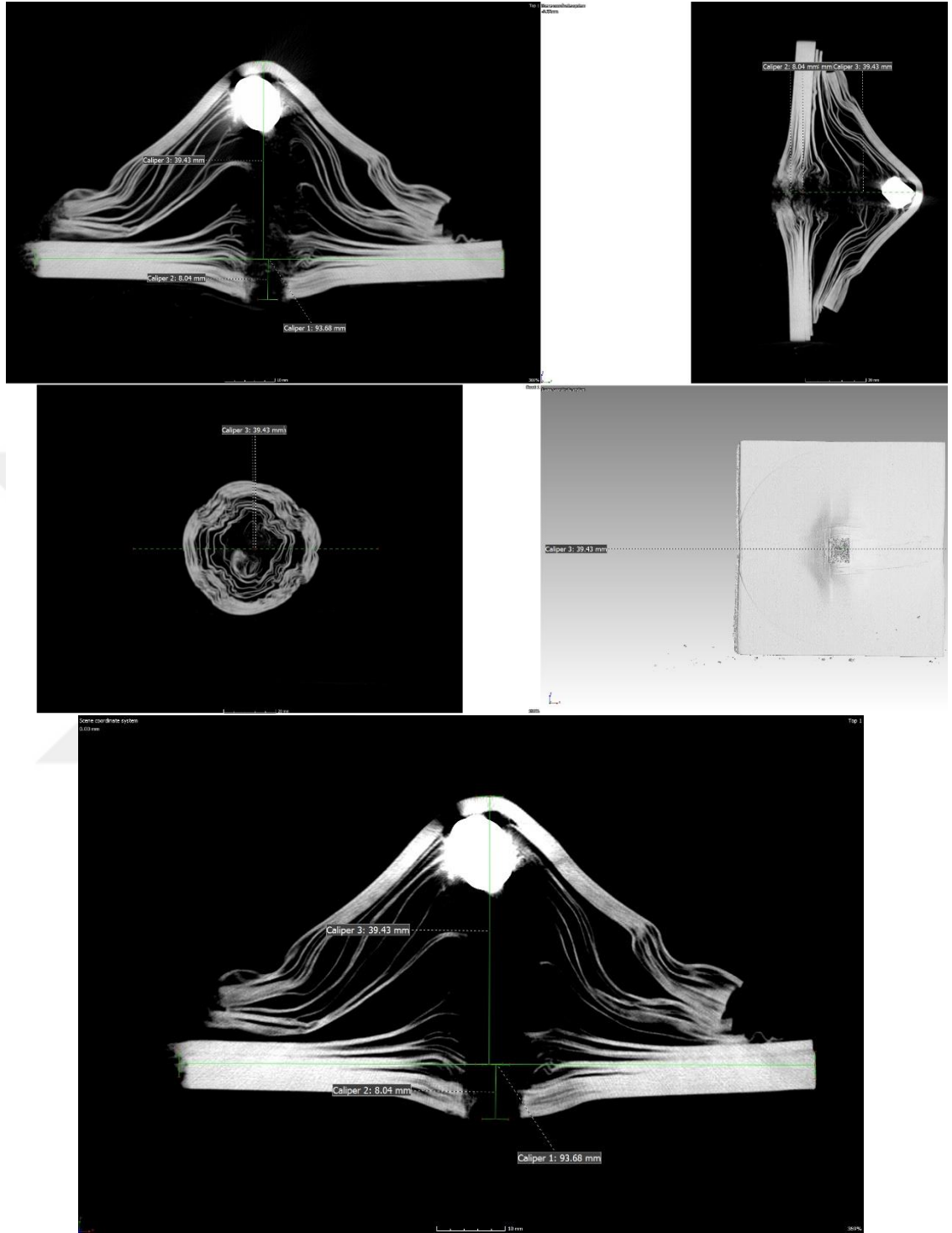
Tabaka ayrılmalarının özellikle son katmanlara doğru arttığı görülmektedir. Bu durum numunenin perfore olamadığı için mermi enerjisinin tabakalar arası ayrılmayla absorbe edildiği için oluşmaktadır. 715 m/s mermi hızı altında numunede delinme olmadığı, kısmi penetrasyon olduğu ve perforasyon olmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.6.'da poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhaların 875 m/s mermi hızı altındaki bilgisayarlı tomografi tarama ve kesit görüntüleri verilmiştir. Malzemede delinme olmadığı şahit numunede deforme olduğu görülmektedir. 875 m/s mermi hızı altında numunede delinme



Şekil 3. 5. 715±15 m/s mermi hızı altında poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhaların X-ray tomografi ile alınmış kesit görüntüleri

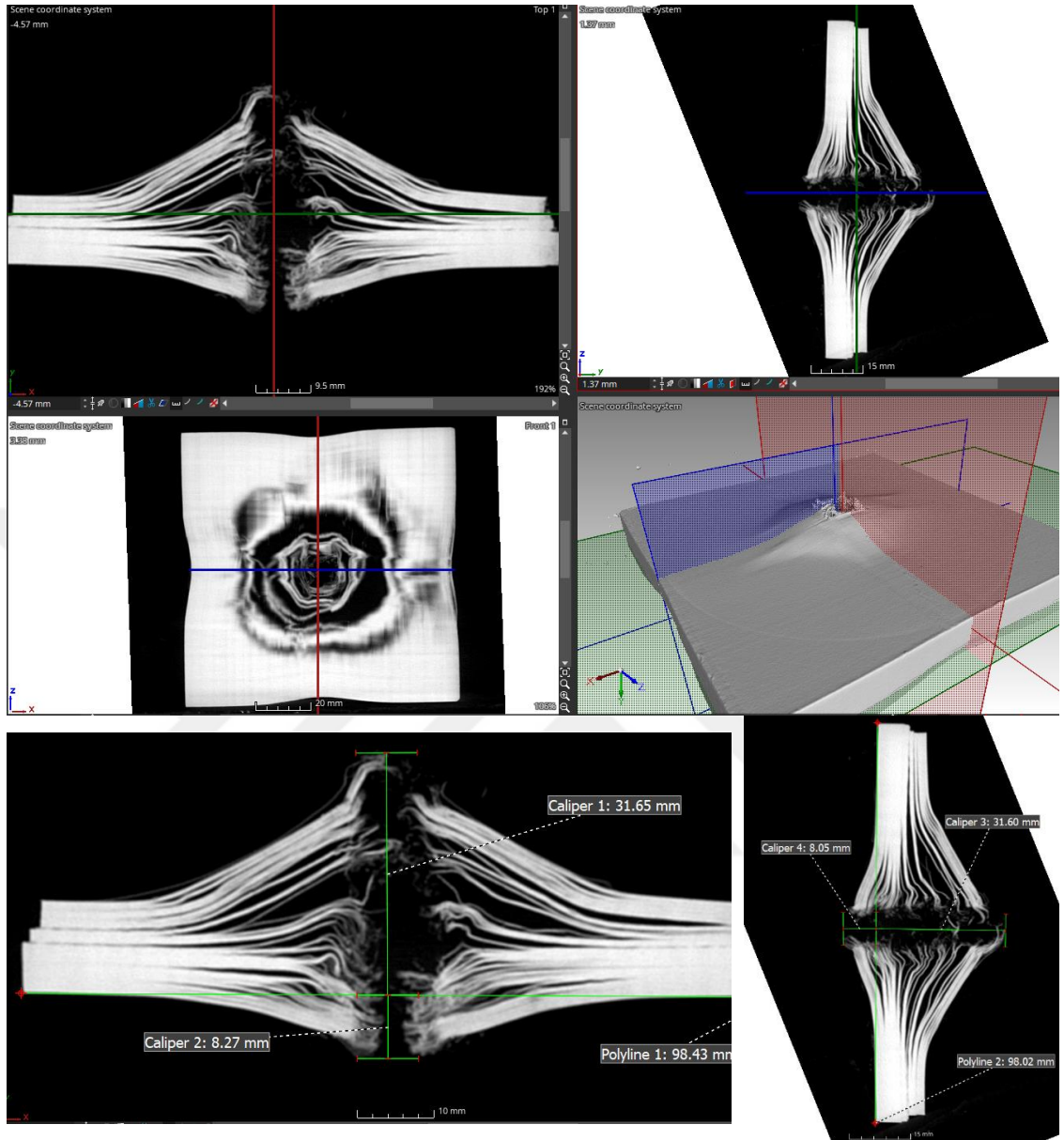
olmadığı, kısmi penetrasyon olduğu ve perforasyon olmadığı gözlemlenmiştir. Farklı numunelerde farklı teknikler izlenmiştir.

İlgili numunede ise mermi konumu üzerinde 3 eksen üzerinden görüntüler alınmıştır. Mermi numuneyi tam delmek üzere iken durmuştur ve kısmi penetrasyona sebebiyet vermiştir. Numunenin mermi yönündeki deformasyonu delaminasyon olarak değerlendirilmiş ve 10 mm'lik numune toplamda bir uçtan bir uca 47.47 mm'lik bir deformasyon göstermiştir. Merminin konumu ve gittiği görüntülerde açıktır. Mermi



Şekil 3. 6. 875±15 m/s mermi hızı altında poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhaların X-ray tomografi ile alınmış kesit görüntüleri

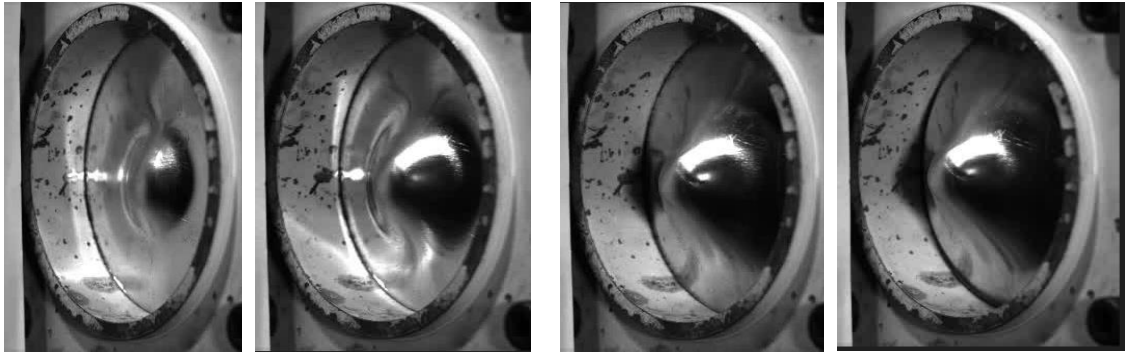
ilerlemesi sırasında katmanlar ayrılarak delaminasyon 3 ekseninde de meydana gelmiştir. Mermi girdikten bir sonra numune 8 mm arkaya doğru açıldığı görülmektedir. Numune sıfırdan 39.43 mm açıldığı görülmektedir. Diğer kesit görüntülerinden de benzer sonuçlar çıkmakta olup ölçüm değerleri doğrulanmaktadır.



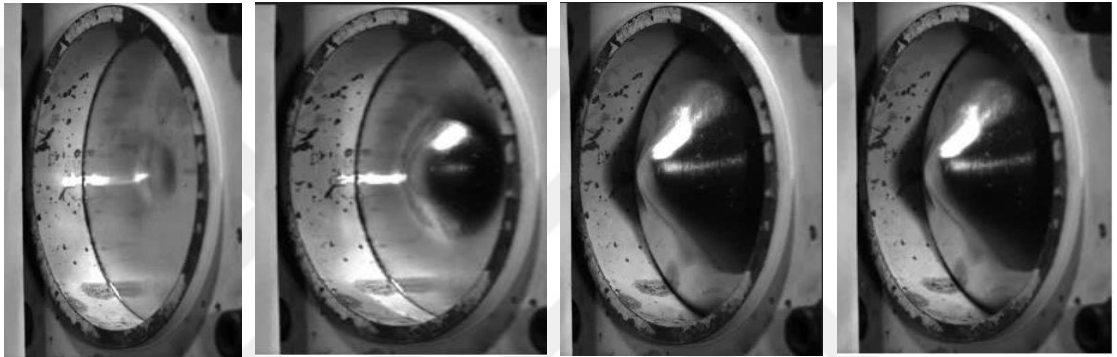
Şekil 3. 7. 1010±15 m/s mermi hızı altında poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhaların X-ray tomografi ile alınmış kesit görüntüleri

Şekil 3.7.'de poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhaların 1010 m/s mermi hızı altındaki X-Ray tarama ve kesit görüntüleri verilmiştir. Mermi yönündeki delaminasyon ve deformasyon miktarı 39.92 mm olarak ölçülmüştür. Numunenin sıfırından 31.65 mm açılması ve 8.27 mm geriye doğru açıldığı görülmektedir. Mermi hızı arttıkça deformasyon azalmıştır. Delaminasyon alanlarında ise anlamlı bir azalma vardır. Mermi numune içerisinde yön değiştirmemiş ve giriş eksenini boyunca numune perfore olmuştur. 1010 m/s mermi hızı altında numunede delinme olduğu, kısmi penetrasyon olduğu ve tam perforasyon olduğu gözlemlenmiştir.

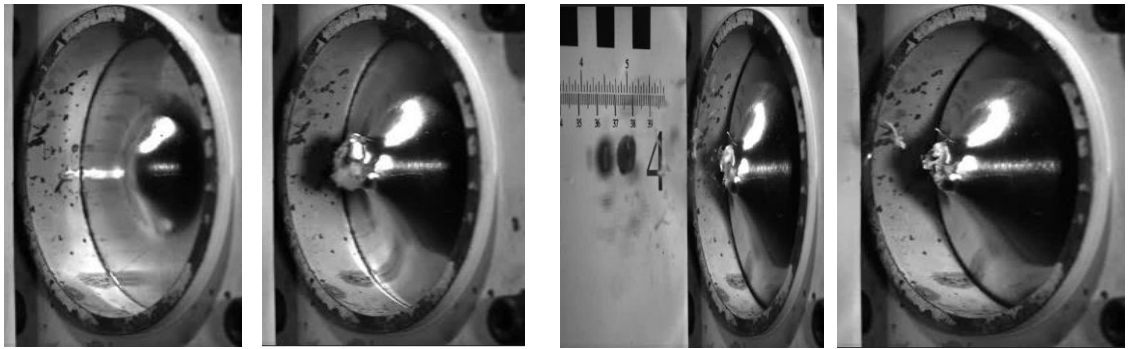
3.3. Poliüre Kaplı UYMAPE Kompozit Plakaların Balistik Test Sonuçları



UYMAPE-V= 715±15 m/s



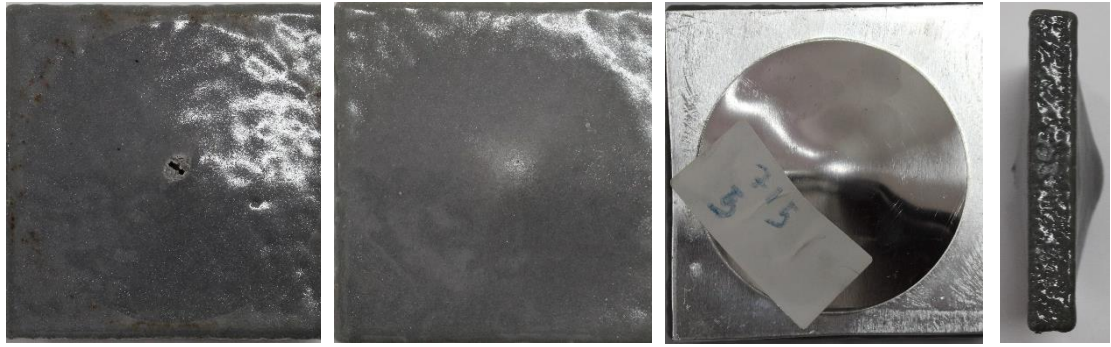
UYMAPE-V= 895±15 m/s



UYMAPE-V= 995±15 m/s

Şekil 3. 8. Poliüre kaplı UYMAPE kompozit levhaların şahit plaka ile farklı mermi hızları altındaki yüksek hızlı kamera görüntüleri

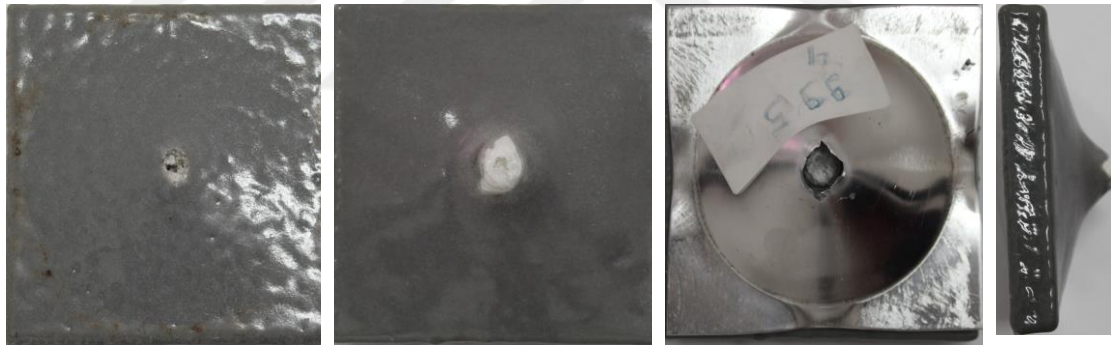
Şekil 3.8.'de poliüre kaplı UYMAPE kompozit numunelerin balistik testler sırasındaki yüksek hızlı kamera görüntüleri verilmiştir. 715, 895 ve 995 m/s mermi hızlarında 3 farklı atış yapılmıştır. Yapılan ön testlerde mermi giriş yönünde deformasyon değişimi oldukça az görülmüş ve mermi çıkış yönünde yüksek hızlı kamera ile çekimler yapılmıştır. 715,



UYMAPE-V= 715 m/s



UYMAPE-V= 895 m/s



UYMAPE-V= 995±15 m/s

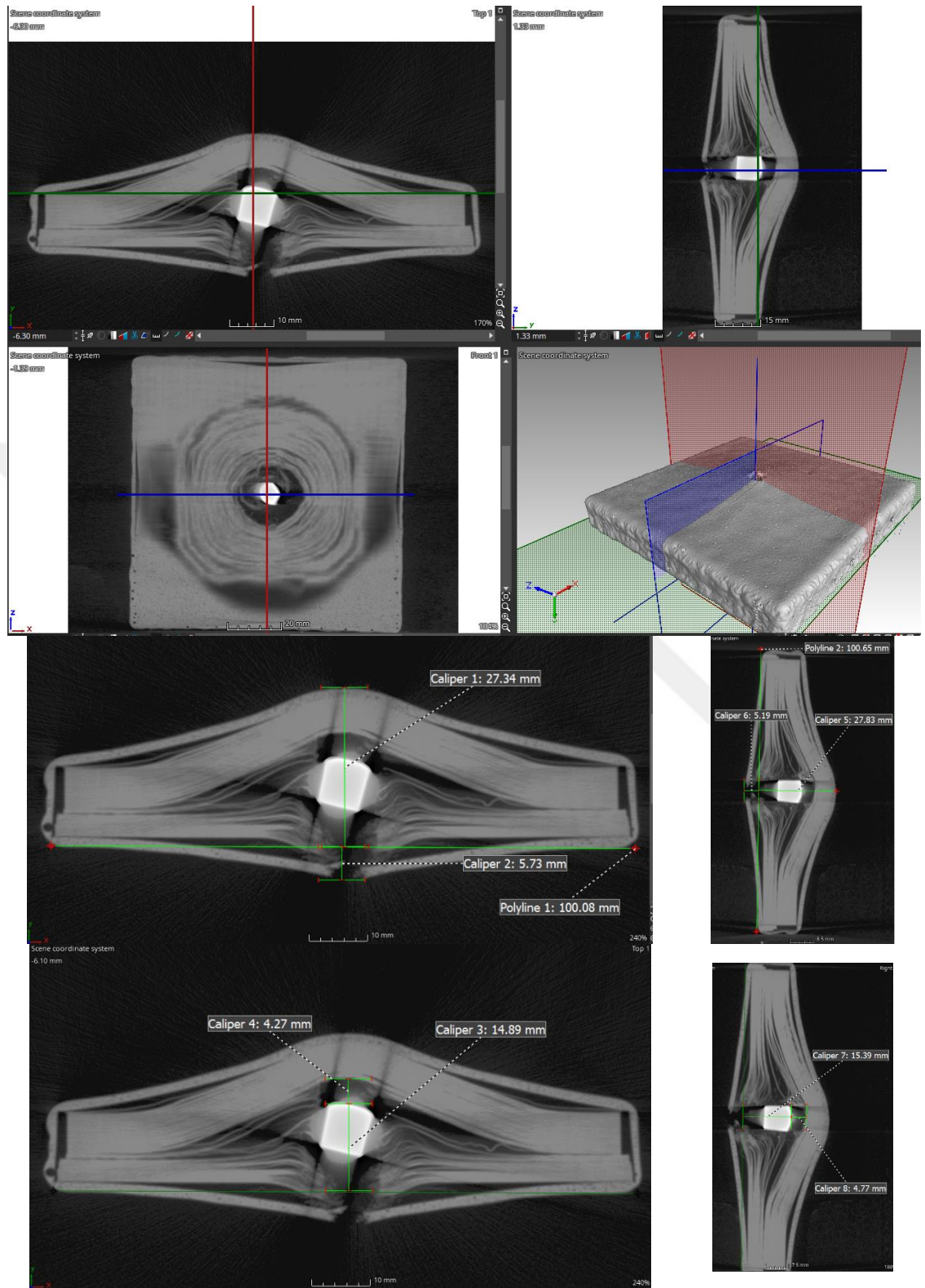
Şekil 3. 9. Poliüre kaplı UYMAPE kompozit levhaların şahit plaka ile farklı mermi hızları altındaki deformasyon görüntüleri

895 hızlarında delinme olmamıştır ve 995 m/s mermi hızında delinme olmuştur. Bu sonuçlar açısından poliüre kaplamanın numunenin perforasyon kabiliyetine anlamlı bir etkisi olmuştur ve deformasyon geometrisinin korunması açısından oldukça kabiliyetlidir. Şok gerilme dalgaları absorbe etme kabiliyeti mermi ilerlemesinde alınan görüntüler ile açıktır. Kompozit malzemenin perfore olma kabiliyeti ve mermi enerjisini sönmleme kabiliyeti mermi hızı arttıkça ters orantılı olarak değişmektedir. Şekil 3.9.'da poliüre kaplı UYMAPE numunelerin balistik testler sonucu deformasyon geometrileri

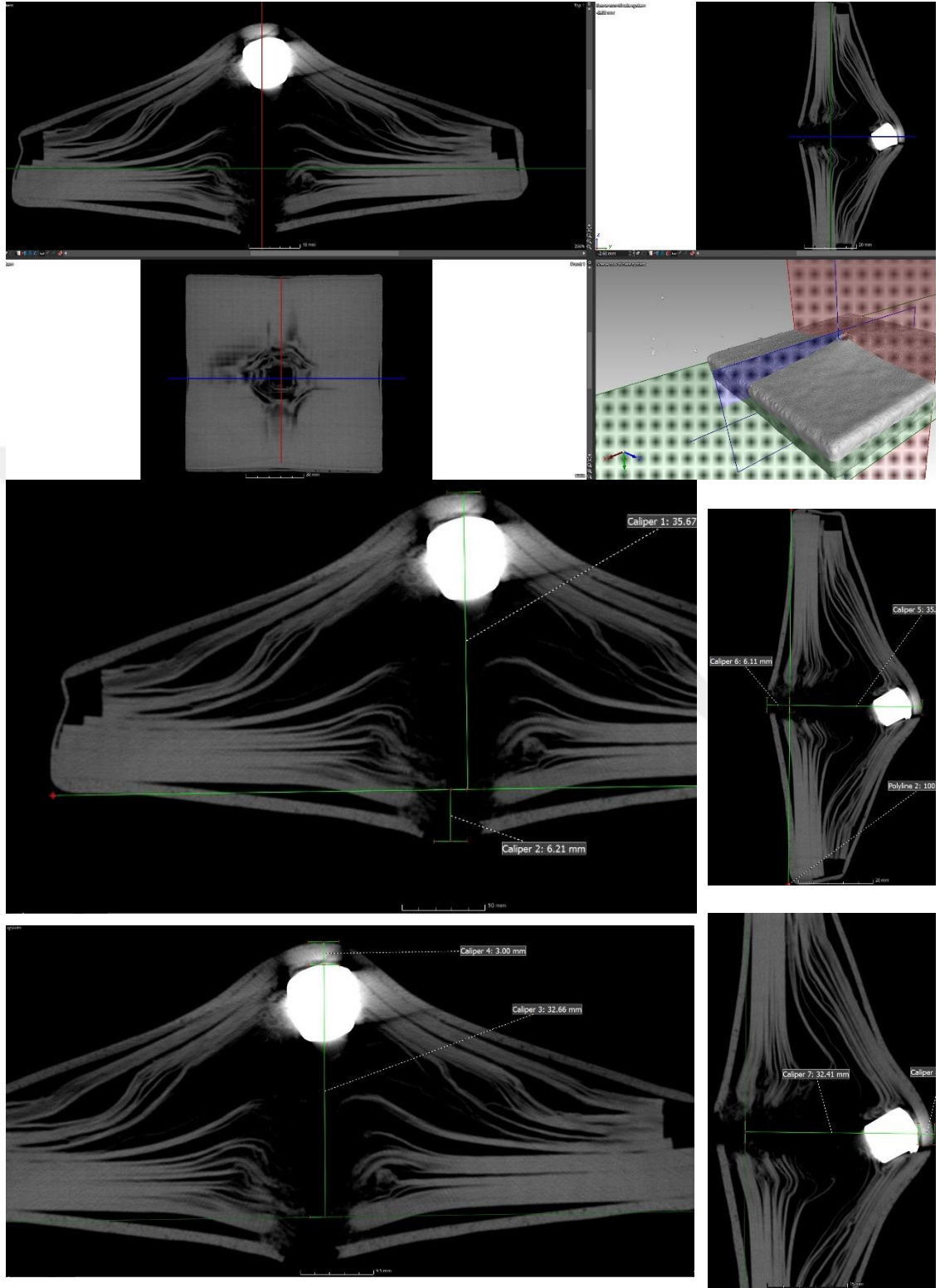
verilmiştir. Mermi giriş geometrilerinde kalıcı deformasyon miktarları oldukça sınırlıdır. Herhangi bir çatlak oluşumu veya yırtılma söz konusu değildir.

Poliürenin güzel bir özelliğini sergileyen bu numunede, tekrarlı atışlarda oluşabilecek hasarları azaltması beklenmektedir. Şekil 3.10.'da ise ilgili testlerden 715 m/s mermi hızına sahip numunenin bilgisayarlı tomografi, X-Ray tarama görüntüleri verilmiştir. Kesit görüntülerinde poliüre kaplama katmanı oldukça açıktır. 715 m/s hızında delinme olmadığı, kısmi penetrasyon olduğu ve perforasyon olmadığı görülmektedir. Mermi numune içine girdikten belirli mesafe sonra enerjisinin sönmüldüğü ve mermi saplanmadan 4.27 mm geri sekerek boşluk oluşturduğu görülmektedir. Bu geri sekme merminin içinde ilerleyemediğini göstermektedir. Poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhada aynı hızda mermi delmek üzere durmuşken kaplamalı testte merminin geri sekerek boşluk oluşturduğu görülmektedir. Bu olay poliüre kaplamasının durdurma gücünü yani gerilme dalgasını absorbe etmesini ve merminin enerjisini düşürdüğünü göstermektedir. Mermi numunenin sıfırdan 27.34 mm açıldığı ve 8 mm arkaya doğru açıldığı görülmektedir. Toplamda uçtan uca 33 mm açıldığı görülmektedir. Poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levhada geri açılma 8.23 mm iken poliüre kaplamalı UYMAPE kompozit levhada 5.73 mm'ye düşmüştür. Kaplama olarak 2 mm poliüre kullanılmasına rağmen geri açılmanın 5.73 mm'e düşmesi gözlemlenmiştir. Poliüre kaplamanın kalınlığı düşüldüğünde 3.73 mm geri açılma olduğu ve sıfırdan 25.34 mm açıldığı hesaplanabilir. Poliüre kaplamasız malzemeye oranla bu fark deformasyon açısından yaklaşık 1 cm avantaj sağlamaktadır. Merminin numune içerisinde 14.89 mm ilerlediği görülmektedir. Diğer eksen görüntülerinde de bu değerler yaklaşık olarak aynı olması ölçümleri doğrular niteliktedir. Mermi çıkışına doğru fiberlerin katman katman ayrıldığı görülmektedir. Bu sayede mermi enerjisi sönmülmektedir. Sınır şartından dolayı kaplamasız numunelerde meydana gelen delaminasyonların poliüre ile önlediği görülmektedir.

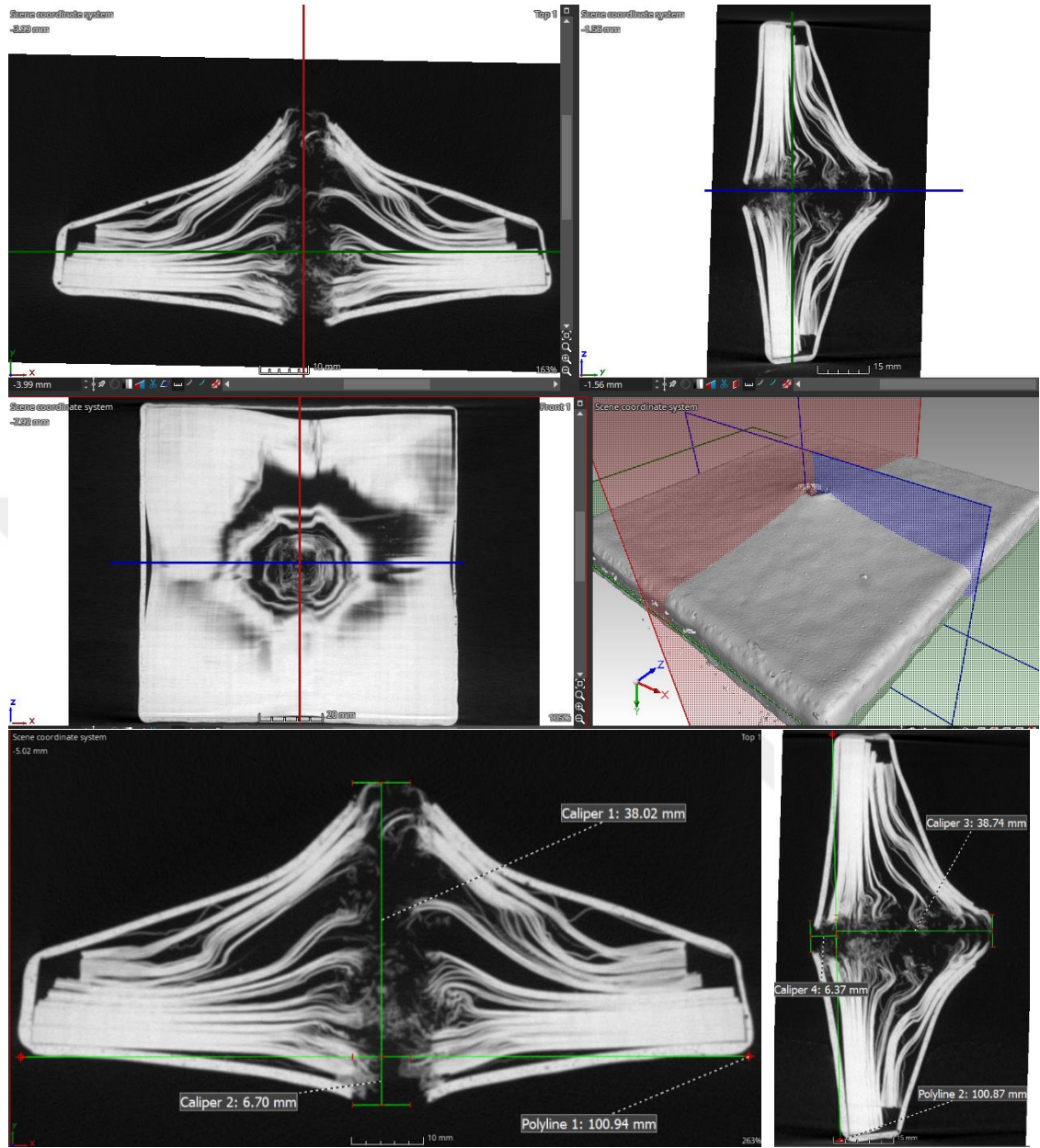
Şekil 3.11.'de ise ilgili testlerden 895 m/s mermi hızına sahip numunenin bilgisayarlı tomografi, X-Ray tarama görüntüleri verilmiştir. Kesit görüntülerinde poliüre kaplama katmanı oldukça açıktır. 895 m/s'de mermi numuneyi tam delmek üzere iken durmuştur ve kısmi penetrasyona sebebiyet vermiştir. Poliürenin merminin gerilme dalgasını absorbe ederek delinmeden durdurduğu görülmektedir. Mermi giriş ve çıkış kesitleri daha detaylı incelendiğinde hasar gören fiberlerin mermi yolunu kapatacak şekilde



Şekil 3. 10. 715±15 m/s mermi hızı altında poliüre kaplı UYMAPE kompozit levhaların X-ray tomografi ile alınmış kesit görüntüleri



Şekil 3. 11. 895±15 m/s mermi hızı altında poliüre kaplı UYMAPE kompozit levhaların X-ray tomografi ile alınmış kesit görüntüleri



Şekil 3. 12. 995±15 m/s mermi hızı altında poliüre kaplı UYMAPE kompozit levhaların X-ray tomografi ile alınmış kesit görüntüleri

konumlandığı görülmektedir. Numune delinmesine 3 mm kala mermi durduğu gözükmemektedir. Numunenin mermi yönündeki deformasyonu delaminasyon olarak değerlendirilmiş ve 100 mm'lik numune toplamda bir uçtan bir uca 41.88 mm'lik bir deformasyon göstermiştir. Numunenin 35.67 mm sıfırından açıldığı görülmektedir. Merminin konumu ve gittiği görüntülerde açıktır. Mermi ilerlemesi sırasında katmanlar ayrılarak delaminasyon 3 ekseninde de meydana gelmiştir. Mermi girdikten bir sonra numune 6.21 mm arkaya doğru açıldığı görülmektedir. 715 m/s de testi yapılan poliüre kaplamalı UYMAPE kompozit levhaya göre daha fazla açıldığı görülmektedir.

Şekil 3.12.'de poliüre kaplı UYMAPE kompozit levhaların 995 m/s mermi hızı altındaki X-Ray tarama ve kesit görüntüleri verilmiştir. Mermi yönündeki delaminasyon ve deformasyon miktarı 44.72 mm olarak ölçülmüştür. Numunenin sıfırından 38 mm açılması ve 6.7 mm geriye doğru açıldığı görülmektedir. Mermi hızı arttıkça deformasyon azalmıştır. Delaminasyon alanlarında ise anlamlı bir azalma vardır. Mermi numune içerisinde yön değiştirmemiş ve giriş eksenini boyunca numune perfore olmuştur. 1010 m/s mermi hızı altında numunede delinme olduğu, kısmi penetrasyon olduğu ve tam perforasyon olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 3.1.'de çalışmada kullanılan mermi giriş

Tablo 3.1. Tez çalışmasında mermi çıkış hızı açısından sonuçların karşılaştırılması

48 Katman (Poliüre Kaplamasız UYMAPE)		48 Katman (Poliüre Kaplamalı UYMAPE)	
<i>Mermi Hızı</i>	<i>Çıkış Hızı</i>	<i>Mermi Hızı</i>	<i>Çıkış Hızı</i>
715±15 m/s		715±15 m/s	
875±15 m/s		895±15 m/s	
1010±15 m/s	680 m/s	995±15 m/s	300 m/s

hızları ve delinme olan numunelerde çıkış hızlarını gösteren tablo gösterilmiştir. Delinme 1010 m/s hızında poliüre kaplamasız UYMAPE'de ve 995 m/s hızında poliüre kaplı UYMAPE kompozit levhada meydana gelmiştir.

Tablo 3. 2 Tez çalışmasında kullanılan numunelerin deformasyon sonuçları

Hız	Poliüre Kaplamasız UYMAPE			Poliüre Kaplamalı UYMAPE		
	Arkaya Doğru Açılma (mm)	Sıfırdan (İleri Doğru Açılma) (mm)	Uçtan Uça Açılma (mm)	Arkaya Doğru Açılma (mm)	Sıfırdan (İleri Doğru Açılma) (mm)	Uçtan Uça Açılma (mm)
715-715 m/s	8,23	31,52	39,75	8,23	27,34	33
875-895 m/s	8	39,43	47,47	6,21	35,67	41,88
1010 – 995 m/s	8,27	31,65	39,92	6,7	38	44,72

Tablo 3.2’de farklı atışlar sonrası numunelerde meydana gelen açılmaların deformasyon sonuçları gösterilmiştir.

Poliüre kaplamalı UYMAPE numunelerin poliüre kaplamasız olana göre uçtan uça açılması aynı hızlarda azaldığı ve bunda poliüre kapla etkisinin olduğu görülmüştür.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1.Tartışma

Polimer kaplı ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kompozit levhaların balistik performansının araştırılması başlıklı tez çalışmasında tek kademeli gaz silah sistemi kullanılarak parçacık simüle mermiler ile balistik testler gerçekleştirilmiştir. Farklı gaz basınçlarda farklı hızlarda yapılan testlerde temel motivasyon numunelerin perforasyon direncinin tespit edilmesi üzerinedir. Çalışmalarda kullanılan poliüre özel bir firma tarafından geliştirilmiş balistik amaçlı yüksek şok dalgalarına karşı yüksek dayanım gösteren polimerik bir malzemedir. Yüksek basınç ve şok dalgaları yayılım halinde malzeme ile temas ettiği için poliüre kaplamasının etkisi anlamlı bir şekilde görülmektedir. Ancak bu tez çalışmasında noktasal temas ile poliüre kaplamasının etkisi araştırılmıştır. Çalışmada endüstriyel zırhlamalarda kullanılan ve parçacık kalkanı uygulamalarında kullanılan Poliüre kaplı UYMAPE kompozit levha ve poliüre kaplamasız UYMAPE kompozit levha kullanılmıştır. Numunelere 715 m/s, 895 m/s ve 995 m/s hızlarında mermiler kullanılmıştır. Poliüre kalınlığı toplamda 5 mm olarak uygulanmıştır. Balistik testler için tercih edilen mermi hızları 700-1010 m/s arasında değişiklik gösterirken mermi giriş hızları lazer sistemi ile tespit edilmiştir. Mermi çıkış hızları ise yüksek hızlı kamera kullanılarak görüntü işleme yöntemi ile tespit edilmiştir. Balistik testler sonrası yüksek hızlı kamera ile mermi giriş ve çıkış yönünde çekimler yapılmıştır ve mermi ilerleyişi görüntülenmiştir. Delaminasyon alanlarının tespiti ve kesit deformasyonlarını incelemek için numunelere bilgisayarlı tomografi yapılmış olup ölçümler yapılarak sonuçlar irdelenmiştir. Bu sayede poliüre kaplamasının farklı mermi hızlarında ve farklı kalınlıklardaki etkileri detaylıca araştırılmıştır. Bu kapsamda tercih edilen uygulamalardaki kullanımların balistik performansa etkiler ortaya konulmuştur.

4.2. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kompozit levhaların balistik davranışına poliüre kaplama etkisi araştırılmıştır. Gaz sıkıştırma prensibine dayanan sistemde 75-125 bar aralığında basınçlandırma kullanılmıştır.

45 katman, 100 mm kalınlığa sahip ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kompozit levhaların poliüre kaplaması olmadan balistik testlerinde 3 farklı mermi hızı kullanılmıştır. Bu hızlar 715, 875 ve 1010 m/s olarak kısmi penetrasyona ve tam perforasyona neden olmuştur. 715 m/s mermi hızında numunelerde perforasyon olmamış kısmi penetrasyon meydana gelmiştir. 875 ve 1010 m/s mermi hızında ise tam perforasyon meydana gelmiş olup yüksek hızlı kamera yazılımı ile yapılan görüntü işleme sonucunda mermi çıkış hızı 680 m/s olarak ölçülmüştür.

Mermi çıkışından alınan görüntülerde numunenin mermi ile deforme olduğu ve bu bölgelerde de delaminasyona sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır. Mermi hız artışı ile delaminasyon alanları artmıştır. 715 m/s mermi hızı için X-Ray tarama görüntülerinde Mermi numuneyi tam delmek üzere iken durmuştur ve kısmi penetrasyona sebebiyet vermiştir ve toplamda 39.75 mm'lik bir deformasyon göstermiştir. 875 m/s mermi hızına sahip numunenin bilgisayarlı tomografi ile yapılan ölçümlerde 47.47 mm mermi yönünde deformasyon ve delaminasyon ölçülmüştür.

Poliüre kaplı ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kompozit levhaların 715, 895 ve 995 m/s mermi hızı olmak üzere üç farklı mermi hızında balistik test gerçekleştirilmiştir. 715 ve 895 m/s mermi hızına sahip numunede çıkış olmazken 995 m/s mermi giriş hızına sahip numunede mermi çıkış hızı 300 m/s olarak ölçülmüştür. 715 m/s mermi hızı altında mermi eksenini boyunca deformasyon ve delaminasyon miktarı 33 mm olarak ölçülmüştür. 895 m/s mermi hızı altında ise 41.88 mm olarak ölçülmüştür. Kaplamasız numunede 1010 m/s altında çıkış hızı 680 m/s olarak ölçülmüştü. Bu açıdan sonuçlar irdelendiğinde çıkış hızının poliüre kaplaması ile oldukça düşürüldüğü görülmüştür

Yapılan testler sonucunda, numunelerin mermi enerjisini absorbe etmede başarılı olması, fiber dayanımı ve katmanlar arasının ayrılmalara oluşumu olarak gözlemlenmiştir. Poliüre kaplaması ile numunelerin mermi karşısında delaminasyon yetenekleri azalmıştır.

Bu açıdan perforasyon direnci artmıştır. Gelen ani şok dalgalarının sönümlenmesi açısından oldukça başarılıdır.



KAYNAKÇA

1. Bulut, H., (2003). Balistik Koruyucu Teçhizatın İmalatında Kompozit Malzeme Kullanımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul, 151 s.
2. Sözen, E., Gündüz, G., İmren, E., (2016) Balistik panel ve koruyucu zırh üretiminde kullanılan lif ve Kompozit malzemeler. **Bartın Orman Fakültesi Dergisi, Cilt (Sayı): 18(2):194-204**
3. Yuman N. Pekbey Y. Aslantaş K. (2014) “ Zırh Tasarımında Kullanılan Kompozit Malzemelerin Deformasyon Karakteristiğinin Araştırılması” Cilt:10, No:4, 2013 (1-21)
4. Kılıç, N. (2014). Development of Multi-Layer Ballistic Armor Panel with Simulationand Ballistic Tests , 18(2):194-194
5. Cavallaro, P.V. (2011). Soft Body Armor: An Overview of Materials, Manufacturing, Testing, and Ballistic Impact Dynamics, Naval Undersea Warfare Center Division Newport.
6. Levi-Sasson, A., Meshi, I., Mustacchi, S., et al. (2014). “Experimental determination of linear and nonlinear mechanical properties of laminated soft composite material system”, Compos B, 57, 96–104.
7. Lässig, T., Nguyen, L., May, M., Riedel, W., Heisserer, U., van der Werff, H., et al., (2015) .“A nonlinear orthotropic hydrocode model for ultra-high molecular weight polyethylene in impact simulations”, Int J Impact Eng, 75, 110–22.
8. Phoenix, S.L., Porwal, P.K.,(2003). “A new membranemodelfortheballistic impact response and V50 performance of multi-ply fibrous systems”, Int J Solid Struc.;40, 6723–65.
9. O’Masta, M.R., Compton, B.G., Gamble, E.A., Zok, F.W., Deshpande, V.S. and Wadley H.N.G.,(2015). “Ballistic impact response of an UHMWPE fiber reinforced laminate encasing of an aluminum-alumina hybrid panel”, International Journal of Impact Engineering, 86, 131–144.
10. Karthikeyan, K, Russell, B.P., (2014).“Polyethylene ballistic laminates: failure mechanics and interface effect”, Mater Des,63, 115–25, 2014.

11. Chu, D., et al. "Analysis and design for the comprehensive ballistic and blast resistance of polyurea-coated steel plate", Defence Technology, Article in Press, Defence Technology, 19(111).
12. Sun, Y., et al. "Experimental investigation on anti-penetration performance of polyurea-coated ASTM1045 steel plate subjected to projectile impact", Defence Technology, 17, 1496-1513, 2021.
13. Harikumar, R., & Devaraju, A. (2020). Exploration Of Mechanical Properties Of Polyurea Coated Mild Steel Plate And Aluminium Plate Sandwich Composites. Materials Today: Proceedings, 22, 1144-1148.
14. Xue L, Mock Jr W, Belytschko T.(2011). " Penetration of Dh-36 steel plates with and without polyurea coating." Mech Mater ;42(11):981.
15. Sayed T, Mock Jr W, Mota A. (2009). "Computational assessment of ballistic impact on a high strength structural steel/polyurea composite plate". Comput Mech;43(4):525–34.
16. Roland CM, Fragiadakis D, Gamache RM. Elastomer (2010). – "steel laminate armor. Compos Struct" 92(5):1059–64.
17. Teknoloji Tasarım "Kompozit Nedir?". Erişim Tarihi: 24.08.2023. <https://teknoloji-tasarim.com/kompozit-nedir/>.
18. Kaya, A. İ. (2015). Atık Kâğıtlardan Geri Kazanılmış Liflerden Kompozit Malzeme Üretim Olanaklarının Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta.
19. Tsai, S. W., & Hahn, H. T. (2018). Introduction To Composite Materials. Routledge.
20. Yadav, R., Naebe, M., Wanga X., Kandasubramanian B., (2016). "Body Armour Materials: From Steel To Contemporary Biomimetic System", The Royal Society Of Chemistry, 6: 115145–115174.
21. Paça, Ş., (2011). "Termoplastik Polyester Elastomerlerin Sentezi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
22. Feaga, M. K., (2007). "The Effect Of Projectile Strike Velocity On The Performance Of Polyurea Coated RHA Plates Under Ballistic Impact", Msc Thesis, Lehigh University, Pennsylvania

23. Somarathna, H. M. C. C., Raman, S. N., Mutalib, A. A., & Badri, K. H., (2015). "Elastomeric Polymers For Blast And Ballistic Retrofitting Of Structures", Jurnal Teknologi, 76(1): 1-13.
24. Paça, Ş., (2011). "Termoplastik Polyester Elastomerlerin Sentezi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
25. He, Y., Xie, D., & Zhang, X., (2014). "The Structure, Microphase-Separated Morphology, and Property Of Polyurethanes and Polyureas", Journal Of Materials Science, 49(21): 7339-7352.
26. Youssef, G.,(2010). A Dissertation Submitted In Partial Satisfaction Of The Requirements For The Degree Doctor Of Philosophy In Mechanical Engineering, Doctoral Thesis, University Of California, Los Angeles
27. Szafran, J., & Matusiak, A. (2016). Polyurea Coating Systems: Definition, Research, Applications, Parameters, 2(3).
28. Yıldırım, M.(2019). Poliüre Kaplı Metal Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi Ve Zırh Malzemesi Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans tezi), İstanbul
29. Tecnopol, "Polyurea description" Erişim Tarihi: 24.08.2023, <https://www.tecnopolgroup.com/news-and-updates/what-is-polyurea-description-types-application-and-advantages>
30. Metal Dünyası, " Metal Matriks Kompozitlerin Üretim Yöntemleri" Erişim Tarihi:24.08.2023, <https://metaldunyasi.com.tr/tr/arsiv/2011/11/metal-matriks-kompozitlerin-uretim-yontemleri.html>.
31. Handbuch Faserverbundkunststoffe, AVK (2013) – "Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.)" doi:[10.1007/978-3-658-02755-1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-02755-1)
32. KalaycıI, E., Avinç, O. O., And Yavaş, A., (2016). "Yüksek Performanslı Polietilen (hppe) Lifleri", Marmara Fen Bilimleri Dergisi, 1: 13-34.
33. Özer, S., (2004). "Balistik Koruma Amacıyla Kullanılan Malzemeler ve Bu Malzemelerin Balistik Deformasyonuna Etki Eden Faktörler", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
34. Cao, S., Liu, H., Ge, S., & Wu, G., (2011). "Mechanical And Tribological Behaviors Of UHMWPE Composites Filled With Basalt Fibers", Journal Of Reinforced Plastics And Composites, 30(4): 347-355.

35. Marissen, R., (2011). ‘‘Design With Ultra Strong Polyethylene Fibers, Materials Sciences and Applications, 2(05): 319-330.
36. T. Arunkumar, G. Anand, P. Venkatachalam, M. Anish, J. Jayaprabakar, and J. B. Sajin, (2020) ‘‘Effect of plural spray coating process parameters on the bonding strength of polyurea with steel and aluminum for liquid storage applications,’’ J. Test. Eval., vol. 49, no. 5, DOI: 10.1520/JTE20200061.
37. Bahei-El-Din, Y. A., Dvorak, G. J., & Fredricksen, O. J. (2006). A BlastTolerant Sandwich Plate Design With A Polyurea İnterlayer. International Journal Of Solids And Structures, 43(25-26), 7644-7658.
38. MMO. ‘‘Vakum Torbalama Yöntemi ile Kompozit Malzemeden Yapı Üretimi Örnek Bir Havacılık Uygulaması’’ , Erişim Tarihi: 20.08.2023. , https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/gonderi_dosya_ekleri/c6a7e655d7e5840_ek_0.pdf
39. ‘‘AM Rolled Armour Plate International Specification’’ (2001) , SSAB Öxelund,
40. Ş. Karagöz ‘‘Zırh Çelikleri’’ Zırh Teknolojileri Semineri’’, (2005), s.169-184
41. Aydın, Murat., 2014. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Davranışı. Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi, Kayseri, 3-5 s.
42. Hakan, Mevlüt., (2017). Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakaların Farklı Mermi Çarpma Açılarında Balistik Limitlerinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 72-77s
43. Carlucci, D. E. (2007). Ballistics: Theory And Design Of Guns And Ammunition. CRC Press
44. Aydın, Murat., (2014). Fonksiyonel Kademelendirilmiş Sandviç Plakaların Balistik Davranışı. Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi, Kayseri, 3-5 s.
45. Rao, C. L., Narayanamurthy, V., & Simha, K. R. Y. (2016). Applied İmpact Mechanics. John Wiley & Sons
46. Bitlisli, Baybora, (2019). Zırhlı Araçlarda Kullanılan Kompozit Zırh Malzemelerinin Balistik Performanslarının İncelenmesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, 10-11s
47. Hakan, Mevlüt., 2017. Fonksiyonel Kademelendirilmiş Plakaların Farklı Mermi Çarpma Açılarında Balistik Limitlerinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 72-77s

48. Yadav, R., Naebe, M., Wanga X., Kandasubramanian B., (2016). ‘‘Body Armour Materials: From Steel To Contemporary Biomimetic System’’, The Royal Society Of Chemistry, 6: 115145–115174.
49. Paça, Ş., (2011). ‘‘Termoplastik Polyester Elastomerlerin Sentezi ve Karakterizasyonu’’, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
50. Feaga, M. K., (2007). ‘‘The Effect Of Projectile Strike Velocity On The Performance Of Polyurea Coated RHA Plates Under Ballistic Impact’’, Msc Thesis, Lehigh University, Pennsylvania
51. Somarathna, H. M. C. C., Raman, S. N., Mutalib, A. A., & Badri, K. H., (2015). ‘‘Elastomeric Polymers For Blast And Ballistic Retrofitting Of Structures’’, Jurnal Teknologi, 76(1): 1-13.
52. Paça, Ş., (2011). ‘‘Termoplastik Polyester Elastomerlerin Sentezi ve Karakterizasyonu’’, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
53. He, Y., Xie, D., & Zhang, X., (2014). ‘‘The Structure, Microphase-Separated Morphology, and Property Of Polyurethanes and Polyureas’’, Journal Of Materials Science, 49(21): 7339-7352.
54. Youssef, G. H. (2011). Dynamic Properties Of Polyurea. University Of California, Los Angeles
55. Szafran, J., & Matusiak, A. (2016). Polyurea Coating Systems: Definition, Research, Applications, Parameters, 2(3).
56. Yıldırım, M.(2019). Poliüre Kaplı Metal Levhaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi Ve Zırh Malzemesi Olarak Kullanımının Değerlendirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul
57. Teknopol, ‘‘Polyurea description’’. 20.08.2023.
<https://www.teknopolgroup.com/news-and-updates/what-is-polyurea-description-types-application-and-advantages>
58. Gang, W.; Xin, W.; Chong, J.; Zhenru, G.; Tao, J.; Changxiao, Z.; Yujun, L. AntiBlast Properties Of 6063-T5 Aluminum Alloy Circular Tubes Coated With Polyurea Elastomer: Experiments And Numerical Simulations. Thin-Walled Struct. 2021, 164, 107842.

59. Jeffrey M. Staniszewski, Steven E. Boyd, Travis A. Bogetti, International Journal of Impact Engineering 159 (2022), A multi-scale modeling approach for UHMWPE composite laminates with application to low-velocity impact loading
60. Hongxu Wang, Dakshitha Weerasinghe, Damith Mohotti, Paul J. Hazell, V.P.W. Shim, Krishna Shankar , Evgeny V. Morozov , International Journal of Mechanical Sciences 204 (2021) ,On the impact response of UHMWPE woven fabrics: Experiments and simulations
61. Rui Zhang, Lu-Sheng Qiang, Bin Han, Zhen-Yu Zhao, Qian-Cheng Zhang, Chang-Ye Ni, Tian Jian Lu, Composite Structures 252 (2020), Ballistic performance of UHMWPE laminated plates and UHMWPE encapsulated aluminum structures: Numerical simulation
62. Mohotti, D., Ngo, T., Mendis, P., & Raman, S. N. (2013). Polyurea Coated Composite Aluminium Plates Subjected To High Velocity Projectile Impact. Materials & Design (1980-2015), 52, 1-16
63. Mohotti, D., Ngo, T., Raman, S. N., Ali, M., & Mendis, P. (2014). Plastic Deformation Of Polyurea Coated Composite Aluminium Plates Subjected To Low Velocity Impact. Materials & Design (1980-2015), 56, 696-713.
64. Bayraktar, Ö. (2016). “Ön Gerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı ve Kompozit Malzeme Üretimi” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü S 18-24.
65. Li Liu, Dean Hu, Detao Wan, Xingdi Hu, Xu Han, Composite Structures 258 (2021), Low velocity impact behavior and simulation of parametric effect analysis for UHMWPE/LLDPE thermoplastic composite laminates, doi:[10.1016/j.compstruct.2020.113180](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113180)
66. Theodosios Stergiou, Konstantinos P. Baxevanakis, Anish Roy, Nickolay A. Sazhenkov ,Mikhail Sh. Nikhamkin, Vadim V. Silberschmidt, Composite Structures 267 (2021), “Impact of polyurea-coated metallic targets: Computational framework” doi:[10.1016/j.compstruct.2021.113893](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113893)

67. Jairo Peinado, Liu Jiao-Wang, 'Alvaro Olmedo, Carlos Santiuste, Composite Structures 286 (2022), "Influence of stacking sequence on the impact behaviour of UHMWPE soft armor panels" doi:[10.1016/j.compstruct.2022.115365](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115365)
68. 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, 106342
69. O. Rijensky, D. Rittel, Thin-Walled Structures 166 (2021), "Numerical investigation of polyurea coated aluminum plates under hydrodynamic shocks" doi:[10.1016/j.tws.2021.108074](https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108074)
70. Gang, W.; Xin, W.; Chong, J.; Zhenru, G.; Tao, J.; Changxiao, Z.; Yujun, L. AntiBlast Properties Of 6063-T5 Aluminum Alloy Circular Tubes Coated With Polyurea Elastomer: Experiments And Numerical Simulations. Thin-Walled Struct. 2021, 164, 107842.
71. Mahnaz Zakeri, Hassan Mansoori, Mehrnaz Sadeghian, Mario Guagliano, Thin-Walled Structures 172 (2022), Impact response of fiber metal laminates based on aluminum and UHMWPE composite: Numerical simulation. doi:[10.1016/j.tws.2021.108796](https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108796)
72. Hailiang Hou, Changhai Chen, Yuansheng Cheng, Pan Zhang, Xuebing Tian, Ting Liu, Junze Wang , Materials and Design 182 (2019), Effect of structural configuration on air blast resistance of polyurea-coated composite steel plates: Experimental studies . doi:[10.1016/j.ijimpeng.2019.103357](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103357)
73. Harikumar, R., & Devaraju, A. (2020). Exploration Of Mechanical Properties Of Polyurea Coated Mild Steel Plate And Aluminium Plate Sandwich Composites. Materials Today: Proceedings, 22, 1144-1148.
74. Iftikar A. Saleem, Payman S. Ahmed, Mayyadah S. Abed, Materials Today: Proceedings 56 (2022), "Experimental and numerical investigation of Kevlar and UHMWPE multi-layered armors against ballistic impact" doi:[10.1016/j.matpr.2021.08.345](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.345)
75. Hao Wu, Feng Hu, Qin Fang, Defence Technology 15 (2019), A comparative study for the impact performance of shaped charge JET on UHPC targets

- Yu-xiang Sun, Xin Wang, Chong Ji, Chang-xiao Zhao, Pei-li Liu, Lei Meng, doi:[10.1016/j.ijimpeng.2009.08.008](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.08.008)
76. Kun Zhang, Tao Jiang, Defence Technology 17 (2021), Experimental investigation on anti-penetration performance of polyurea-coated ASTM1045 steel plate subjected to projectile impact
 77. Dongyang Chu, Yigang Wang, Shanglin Yang, Zhijie Li, Zhuo Zhuang, Zhanli Liu, Defence Technology 19(2023), Analysis and design for the comprehensive ballistic and blast resistance of polyurea-coated steel plate
 78. YAVAŞ M., AVCI A, ŞİMŞİR M, AKDEMİR A, 'International Journal of Engineering Research and Development, Vol.7, No.4, 2015, 1st ‘‘International Defense Industry Symposium Special Issue, Ballistic Performance of Kevlar49/UHMW-PEHB26 Hybrid Layered-Composite’’
 79. Bazle Z (Gama) Haque, Molla A Ali and John W Gillespie Jr, Journal of Thermoplastic Composite Materials (2017), Modeling transverse impact on UHMWPE soft ballistic sub-laminate. doi:[10.1177/0892705716637114](https://doi.org/10.1177/0892705716637114)
 80. Bazle Z (Gama) Haque and John W Gillespie Jr, Journal of Thermoplastic Composite Materials 1–29 (2021), Perforation mechanics of UHMWPE soft ballistic sublamine and soft ballistic armor pack: A finite element study. doi:[10.1177/08927057211042058](https://doi.org/10.1177/08927057211042058)
 81. Ahsan Samiee, Jon Isaacs and Sia Nemat-Nasser(2010), Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Center of Excellence for Advanced Materials (CEAM), University of California San Diego, Ballistic performance of polyurea-coated armor grade ceramic tiles. doi:[10.1117/12.847836](https://doi.org/10.1117/12.847836)
 82. Liu, Q., Guo, B., Chen, P., Su, J., Arab, A., Ding, G., ... & Guo, F. (2021). Investigating Ballistic Resistance Of CFRP/Polyurea Composite Plates Subjected To Ballistic Impact. Thin-Walled Structures, 166, 108111.
 83. Jiang, Y., Zhang, B., Wei, J., & Wang, W. (2019). Study On The Impact Resistance Of Polyurea-Steel Composite Plates To Low Velocity Impact. International Journal Of Impact Engineering, 133, 103357.

84. Boris Dyatkin, Raymond M. Gamache, International Journal of Impact Engineering 114 (2018), Ballistic performance of front-facing fluoropolymer-coated armor composites
85. N.A. Sazhenkov, S.V. Semenov, L.V. Voronov, A.D. Kurakin, Mikhail Sh. Nikhamkin, T. Stergiou, K.P. Baxevanakis, A. Roy, Vadim V. Silberschmidt, Procedia Structural Integrity 28 (2020), Polyurea-coated glass-fibre-reinforced laminate under high-speed impact: experimental study
86. Srinivasan Arjun Tekalur, Arun Shukla, Kunigal Shivakumar, Composite Structures 84 (2008), Blast resistance of polyurea based layered composite materials
87. Scott W. Case, Chair, Romesh C. Batra, Michael W. Hyer, Sunghwan Jung, Robert L. West (2013), “Modeling the High Strain Rate Tensile Response and Shear Failure of Thermoplastic Composites”
88. Nayan Pundhir, Himanshu Pathak And Sunny Zafar (2021), “Ballistic impact performance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composite armour”
89. L.J. Deka, S.D. Bartus and U.K. Vaidya (2006), Department of Materials Science & Engineering University of Alabama at Birmingham, 9th International LS-DYNA Users Conference, “Damage Evolution and Energy Absorption of FRP Plates Subjected to Ballistic Impact Using a Numerical Model”.
90. Youssef, G., (2010). A Dissertation Submitted In Partial Satisfaction Of The Requirements For The Degree Doctor Of Philosophy In Mechanical Engineering, Doctoral Thesis, University Of California, Los Angeles
91. Iqbal N, Tripathi M, (2016) et al. “Polyurea coatings for enhanced blast-mitigation”: a review. RSC Adv ;6(111):109706e17.
92. Bogoslovov RB, Roland CM (2007), et al. “Impact-induced glass transition in elastomeric coatings”. Appl Phys Lett;90(22):221910.
93. Amini MR, (2010) “Isaacs J, et al. Investigation of effect of polyurea on response of steel plates to impulsive loads in direct pressure-pulse experiments”. Mech Mater ;42(6):628e39.
94. Tekalur SA, Shukla A, et al. (2008) “ Blast resistance of polyurea based layered composite materials”. 84(3):271-281

95. Li, T.; Zhang, C.; Xie, Z.; Xu, J.; Guo, B.-H. A Multi-Scale Investigation On Effects Of Hydrogen Bonding On Micro-Structure And Macro-Properties In A Polyurea. *Polymer* 2018, 145, 261–271.
96. Mohotti, D., Ngo, T., Mendis, P., & Raman, S. N. (2013). Polyurea Coated Composite Aluminium Plates Subjected To High Velocity Projectile Impact. *Materials & Design* (1980-2015), 52, 1-16.
97. Gang, W.; Xin, W.; Chong, J.; Zhenru, G.; Tao, J.; Changxiao, Z.; Yujun, L. AntiBlast Properties Of 6063-T5 Aluminum Alloy Circular Tubes Coated With Polyurea Elastomer: Experiments And Numerical Simulations. *Thin-Walled Struct.* 2021, 164, 107842.
98. Zhang, R., Huang, W., Lyu, P., Yan, S., Wang, X., & Ju, J. (2022). Polyurea For Blast And Impact Protection: A Review. *Polymers*, 14(13), 2670.
99. MIL-DTL-46593B (MR) W/AMENDMENT 1, 11 August 2008. Projectile, Calibers .22, .30, .50, And 20 Mm Fragment-Simulating

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Erhan Özdemir
Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği A.B.D. (3,88)	2023
Yüksek Lisans	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği (4,0) - Tezsiz	2021
Lisans	Atatürk Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği (2,94)	2019
Lisans	Atatürk Üniversitesi, Makine Mühendisliği (3,38)	2018
Lise	88. Yıl Cumhuriyet Anadolu Lisesi, Trabzon	2013

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2022-Halen	Vestel Beyaz Eşya A.Ş.	1 Yıl
2020-2022	RoyalCert Belgelendirme ve Gözetim A.Ş.	2 Yıl

YABANCI DİL

İngilizce