



**ULTRA YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN İLE KARBON FİBER
PREPREGLERDEN HİBRİT ZIRH GELİŞTİRİLMESİ VE BALİSTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Salih ALARÇİN

Danışman

Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

Temmuz 2021

Bu tez çalışması 17.KARİYER.163 numaralı proje ile AKÜ BAP Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**ULTRA YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN İLE KARBON
FİBER PREPREGLERDEN HİBRİT ZIRH GELİŞTİRİLMESİ VE
BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Salih ALARÇİN

Danışman

Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Temmuz 2021

ÖZET

Doktora Tezi

ULTRA YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN İLE KARBON FİBER PREPREGLERDEN HİBRİT ZIRH GELİŞTİRİLMESİ VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Salih ALARÇİN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT

İnsanlar yaratılış olarak her dönemde korunma ihtiyacı hissetmişler, zamanın şartlarına bağlı olarak farklı zırhlar kullanmıştır. Silah ve mühimmatlar geliştikçe onları durdurmak veya etkisini azaltmak için zırh teknolojisi de gelişmiştir. Zırh malzemelerinde balistik korumanın yanında hafifliğin de önemli olması nedeniyle kompozit malzemeler öne çıkmıştır. Bu çalışmada, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMW-PE) ve epoksi reçineli karbon fiber prepreglerden (ERKFP) oluşan farklı konfigürasyonlardaki zırhların balistik (mermi ve şarapnel testi) ve mekanik dayanımları (üç nokta eğme testi) incelenmiştir. Daha sonra da zırhların farklı çevresel şartlarda kullanılabileceği de öngörülerek, +70 °C ve -35 °C’de şartlandırılarak testler yapılmıştır. Oda şartlarında yapılan şarapnel testlerinde 25 kat UHMW-PE zırha ERKFP ekledikçe balistik dayanım artmış, 6 kat ERKFP eklendiğinde bu artış % 22,6’ya kadar yükselmiştir. Sadece UHMW-PE içeren zırha 6 kat ERKFP eklendiğinde eğilme gerilmesi % 307 artmıştır. Daha sonra yapılacak ilave çalışmalarla, zırhların tehdit seviyesine göre balistik dayanım ve ağırlık optimizasyonu yapılarak, seçilen konfigürasyona göre kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

2021, xiii + 122 sayfa

Anahtar Kelimeler: Balistik, Kompozit, Zırh, UHMW-PE, Karbon, Fiber

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DEVELOPMENT OF HYBRID ARMOR FROM ULTRA HIGH DENSITY POLYETHYLENE AND CARBON FIBER PREPREGS AND INVESTIGATION OF THEIR BALLISTIC PROPERTIES

Salih ALARÇIN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Abdurrahman KARABULUT

As a creation, people felt the need for protection in every period and used different armors depending on the conditions of the time. As weapons and ammunition evolved, armor technology has also evolved to stop or reduce their impact. Composite materials came to the forefront in armor materials because of the importance of lightness as well as ballistic protection. In this study, ballistic (bullet and shrapnel test) and mechanical strength (three-point bending test) of armors of different configurations consisting of ultra high molecular weight polyethylene (UHMW-PE) and epoxy resin carbon fiber prepregs (ERKFP) were investigated. Thereafter, as it was estimated that these armors could be used in different environmental conditions, tests were carried out by conditioning them at +70 °C and -35 °C. In shrapnel tests conducted under room conditions, as 25 layers of UHMW-PE armor was added to ERKFP, the ballistic strength enhanced, and when 6 layers of ERKFP were added, this enhancement increased up to 22.6 %. When 6 layers of ERKFP are added to armor containing only UHMW-PE, the bending stress is increased by 307 %. It is envisioned that with further studies to be carried out, the armors can be used according to the selected configuration by optimizing the ballistic strength and weight according to the threat level.

2021, xiii + 122 pages

Keywords: Ballistic, Composite, Armor, UHMW-PE, Carbon, Fiber

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın içeriği, yapılan çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış oldukları büyük katkılardan dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT'a ile Kütahya Dumlupınar Üniversitesi'nden hocalarım Prof. Dr. Mustafa AYDIN ve Prof. Dr. Mustafa TUNCER'e saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca 17.KARİYER.163 numaralı kariyer destek projesi ile tezime destek verdiği için Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT'a ve AKÜ BAP Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunuyorum.

Birlikte olduğumuz günden bu yana, iyi ve kötü günlerde yanımda olan, maddi manevi desteğini esirgemeyen sevgili eşim Hilal ALARÇİN'e ve canım oğlum Metin ALARÇİN'e teşekkür ederim.

Eğitimimin her aşamasında yanımda olan, bilgi birikimiyle, yaptığı fedakarlıklarla bana destek olan ablam Dr. Emine ALARÇİN'e, yetişmemde bugüne gelmemde çok büyük katkıları olan, her zaman yanımda olan annem, babam, halam, amcam, başta olmak üzere bütün aileme ve tanıştığımız günden bu yana desteklerini esirgemeyen eşimin ailesine teşekkür ederim.

Yukarıda saydığım isimlerle birlikte Yakup ALARÇİN ve Enis HANECİ'ye de sadece iyi günlerimde değil, zor günlerimde de yanımda oldukları için teşekkürü bir borç biliyorum ve tezimi onlara ithaf ediyorum.

Salih ALARÇİN
Afyonkarahisar 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	7
2.1. Balistik	7
2.1.1. Balistiğin Tanımı ve Bölümleri	7
2.1.1.1 İç Balistik	7
2.1.1.2 Dış Balistik	7
2.1.1.3 Terminal Balistik	8
2.1.2 Balistik Koruyucu Testler İçin Standartlar	9
2.2 Kompozit Malzeme	10
2.2.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Genel Özellikleri	10
2.2.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj-Dezavantajları ve Kullanım Alanları	14
2.2.3 Kompozitlerin Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması	16
2.2.3.1 Metal Matrisli Kompozitler	16
2.2.3.2 Seramik Matrisli kompozitler	17
2.2.3.3 Polimer Matrisli kompozitler	18
2.3 Balistik Koruyucu Malzemeler	20
2.3.1 Balistik Koruyucu Malzemelerin Tarihi ve Gelişimi	20
2.3.2 Sert ve Yumuşak zırhlar	23
2.3.3 Kullanılan Malzemelere Göre Zırhların Avantaj ve Dezavantajları	24
2.3.4 UHMW-PE Malzeme Üzerine Çalışmalar	26
2.3.5 Karbon Fiber Üzerine Çalışmalar	29
2.3.6 Karbon Fiber ve UHMW-PE Üzerine Çalışmalar	33

2.4 Çevresel Şartlandırma	37
3. MATERYAL – METOD	42
3.1. Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzemeler	42
3.2 Metod	43
3.2.1. Üretim Yöntemi	43
3.2.2 Üretimi Yapılan Zırh Konfigürasyonları	47
3.2.3 Sıcak ve Soğuk Şartlandırma	48
3.2.4 Balistik Testler	51
3.2.4.1 NIJ 0101.04 Vücut Zırhının Balistik Direnci	52
3.2.4.2 Balistik Şarapnel Testi	55
3.2.5 Üç Nokta Eğme Testi	57
4. BULGULAR	61
4.1 Testlere Tabi Tutulacak Numuneler	61
4.2 Balistik Testler	62
4.2.1 Mermi Testi (NIJ0101.04 Seviye III-A)	63
4.2.2 Şarapnel Testi (STANAG 2920)	66
4.2.2.1 Oda Sıcaklığında Yapılan Şarapnel Testi	66
4.2.2.2 Şartlandırılmış Numunelerin Şarapnel Testi	74
4.2.2.3 V50 Testlerinin Kıyaslanması ve İstatistiksel Analiz	83
4.3 Üç Nokta Eğme Testleri	84
4.3.1 Oda Sıcaklığında Yapılan Testler	85
4.3.2 Şartlandırmaya Tabi Tutulan Numunelere Yapılan Testler	88
4.3.2.1 UHMW-PE Numunenin Şartlandırılması	88
4.3.2.2 UHMW-PE ve 6 kat ERKFP Numunenin Şartlandırılması	90
4.3.3 Bütün Numunelerin Ortalama Esneklik Gerilmelerinin Kıyaslanması ve İstatistiksel Analiz	91
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	93
5.1 Balistik Testler	93
5.1.1 Mermi Testleri	93
5.1.2 Şarapnel Testleri	94
5.2 Üç Nokta Eğme Testleri	97
5.3 Zırhların Kullanım Alanları ve Genel Değerlendirmeler	99

6. KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	122



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$^{\circ}\text{C}$	Derece santigrat
d_{alansal}	Alansal yoğunluk
E	Şekil değiştirme
$E_{\text{eğ}}$	Eğilme elastisite modülü
E_k	Kinetik enerji
F	Kuvvet
G	Gram
J	Joule
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Mega Pascal
N	Newton
p	Anlamlılık derecesi
r	Korelasyon katsayısı
S	Saniye
V_s	Merminin son hızı
V_i	Merminin ilk hızı
$\sigma_{\text{eğ}}$	Esneklik gerilmesi

Kısaltmalar

AYGAE	Alansal yoğunluğa göre absorblanan enerji
BFS	Arka yüz imza kriteri
CFRP	Karbon fiber takviyeli polimer
ERKFP	Epoksi reçineli karbon fiber prepreg
FMJ	Tam metal kaplama
MMK	Metal matrisli kompozitler
NIJ	Amerika Ulusal Adalet Enstitüsü
PMK	Polimer matrisli kompozitler
SMK	Seramik matrisli kompozitler
UD	Tek yönlü
UHMW-PE	Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Katmanlı, lamine bir yapıda delaminasyon olayı	8
Şekil 2.2 Kompozit malzemeler	10
Şekil 2.3 Çelik, Alüminyum ve kompozitlerin özelliklerinin karşılaştırılması	11
Şekil 2.4 Kompozit bir malzemenin bileşeni	11
Şekil 2.5 Elyaf ve matrisin kompozitler üzerindeki göreceli önemi.....	12
Şekil 2.6 Farklı fiber mimarileri	14
Şekil 2.7 Kompozit malzemelerin kullanım alanlarına ait örnek fotoğraflar	15
Şekil 2.8 Kompozit malzemelerin matris özelliklerine göre sınıflandırılması	16
Şekil 2.9 Vücut zırhında radikal ağırlık azalması	21
Şekil 2.10 UHMW-PE kumaş şema tipleri	27
Şekil 2.11 Dokuma tiplerine göre V50 değerleri	28
Şekil 2.12 Katmanlama dizisinin panellerin BFS'si üzerindeki etkisi	28
Şekil 2.13 Preslenerek ve preslenmeden üretilen UHMW-PE'nin mermi testi	29
Şekil 2.14 Düz dokuma ve saten dokuma kumaş şematik görünümü	31
Şekil 2.15 Katman sayısı ve dokuma tipine göre balistik limitin değişimi	31
Şekil 2.16 Kompozitlerin Aşınma-Zaman Grafiği	34
Şekil 2.17 V50 balistik limit performansının karşılaştırma	35
Şekil 2.18 Absorbe edilen ve alansal yoğunluğa göre absorbe edilen enerji miktarları	37
Şekil 2.19 UHMW-PE liflerinin sıcaklığa bağlı gerilme-şekil değiştirme grafiği	38
Şekil 2.20 Temsili Araç Sıcaklığı ve Bağlı Nem Verileri	39
Şekil 2.21 Hızlı yaşlandırma çevrimi	40
Şekil 3.1 Kumaşların diziliş şekli	44
Şekil 3.2 Presleme işleminde uygulanan sıcaklık – zaman grafiği	45
Şekil 3.3 Kompozit plakaların üretim akış şeması	46
Şekil 3.4 Üretimi yapılan plakaların teknik resmi	48
Şekil 3.5 Balistik test düzeneği	52
Şekil 3.6 Zırhların vuruş yönleri	54
Şekil 3.7 Kesik burunlu fragmanın teknik resmi	56
Şekil 3.8 3 nokta eğme test düzeneği	57

Şekil 4.1	Numune tipine göre ağırlık ve kalınlıkların dağılımı	61
Şekil 4.2	UHMW-PE kompozitlere ERKFP eklemenin balistik özelliklere katkısı	70
Şekil 4.3	Absorbe edilen kinetik enerji ve alansal yoğunluğa göre absorbe edilen kinetik enerjinin kıyaslanması	72
Şekil 4.4	Sadece UHMW-PE içeren plakaların şartlandırmaya göre özet V50 grafiği	76
Şekil 4.5	UHMW-PE ve 1 kat ERKFP içeren plakaların şartlandırmaya göre özet V50 grafiği	78
Şekil 4.6	25 kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP içeren plakanın şartlandırmaya göre özet V50 değeri	81
Şekil 4.7	UHMW-PE ve 6 kat ERKFP içeren plakaların şartlandırmaya göre özet V50 değeri	83
Şekil 4.8	Şartlandırılmış ve şartlandırılmamış tüm numunelerin özet V50 grafiği ...	83
Şekil 4.9	Artan ERKFP miktarına göre σ_{eg} - ϵ değişimi	86
Şekil 4.10	Artan ERKFP miktarına göre ortalama esneklik gerilmesi	87
Şekil 4.11	Artan ERKFP miktarına göre ortalama esneklik modülü	87
Şekil 4.12	Şartlandırılan 25 kat UHMW-PE'nin σ_{eg} - ϵ grafiği	89
Şekil 4.13	25 kat UHMW-PE'nin sıcaklık değişimine bağlı ortalama esneklik gerilmesi grafiği	89
Şekil 4.14	Şartlandırılan 25 kat UHMW-PE ve 6 ERKFP' nin σ_{eg} - ϵ grafiği	90
Şekil 4.15	25 kat UHMW-PE ve 6 ERKFP'nin sıcaklık değişimine bağlı ortalama esneklik gerilmesi grafiği	91
Şekil 4.16	Şartlandırma yapılan numunelerin ortalama esneklik gerilmelerinin kıyaslanması	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 ABD ordusunun kullandığı balistik kaskların değişimi çizelgesi	2
Çizelge 2.1 Askeri amaçla kullanılan standart örnekleri	9
Çizelge 2.2 Metallerin ve elyaf türlerinin mekanik özellikleri	12
Çizelge 2.3 Fiberlerin Sınıflandırılması	13
Çizelge 2.4 Yaygın olarak kullanılan polimer matrisler	18
Çizelge 2.5 Termoset ve termoplastik özelliklerinin kıyaslanması	19
Çizelge 2.6 Zırh malzemelerinin malzeme özelliklerine göre kıyaslanması	25
Çizelge 2.7 Balistik test sonuçları	41
Çizelge 3.1 Numune tiplerinin temsili kesit görüntüleri	47
Çizelge 3.2 Nüve KD200 fırına ait teknik özellikler	50
Çizelge 3.3 NIJ 0101.04 standardına göre tehdit seviyeleri	54
Çizelge 3.4 9 mm Full metal jacket (FMJ) mermi teknik özellikleri	55
Çizelge 3.5 Fragmentin teknik özellikleri (STANAG 2007)	56
Çizelge 4.1 Numune tipine bağlı ağırlık değerleri ve kalınlık	61
Çizelge 4.2 25 kat UHMW-PE plaka mermi testi-1	63
Çizelge 4.3 UHMW-PE plaka mermi testi-2	63
Çizelge 4.4 UHMW-PE plaka mermi testi-3	63
Çizelge 4.5 UHMW-PE plaka mermi testi-4	64
Çizelge 4.6 UHMW-PE plaka için kinetik enerji ve ortalama kuvvet değerleri	65
Çizelge 4.7 UHMW-PE plakanın V50 testi	68
Çizelge 4.8 25 Kat UHMW-PE plaka ve 1 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi	68
Çizelge 4.9 25 Kat UHMW-PE plaka ve 3 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi	69
Çizelge 4.10 25 Kat UHMW-PE plaka ve 6 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi	69
Çizelge 4.11 Oda sıcaklığında test numunelerinin enerji absorblaması	70
Çizelge 4.12 Zırhların alansal yoğunluklarına göre enerji absorblaması	71
Çizelge 4.13 +70 °C’de şartlandırılmış sadece UHMW-PE içeren plakanın V50 testi ...	75
Çizelge 4.14 -35 °C’de şartlandırılmış sadece UHMW-PE içeren plakanın V50 testi ...	76

Çizelge 4.15	+70 °C’ de şartlandırılmış 25 kat UHMW-PE plaka ve 1 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi	78
Çizelge 4.16	-35 °C’ de şartlandırılmış 25 Kat UHMW-PE plaka ve 1 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi	78
Çizelge 4.17	+70 °C’ de şartlandırılmış 25 Kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi	80
Çizelge 4.18	-35 °C’ de şartlandırılmış 25 Kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi	80
Çizelge 4.19	+70 °C’ de şartlandırılmış 25 Kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi	82
Çizelge 4.20	-35 °C’ de şartlandırılmış 25 Kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi	82
Çizelge 4.21	Artan ERKFP Miktarı ve artan sıcaklıkların V50 hızına etkisi	84
Çizelge 4.22	Artan ERKFP miktarı ve artan sıcaklıkların ortalama esneklik gerilmesine etkisi	92

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 1.1 Metal zırh örnekleri	1
Resim 1.2 Balistik hibrit kask üretiminin adımlarını gösteren fotoğraf	3
Resim 2.1 Bir yeleğe ait sert ve yumuşak zırhların görüntüsü	24
Resim 3.1 UHMW-PE kumaşlara ait fotoğraflar	42
Resim 3.2 ERKFP kumaşlara ait fotoğraflar	42
Resim 3.3 Kompozit kumaş kesimi	43
Resim 3.4 600 Tonluk hidrolik prese ait fotoğraf	44
Resim 3.5 Şerit testere ile zırhların kenar temizliği	46
Resim 3.6 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP içeren hibrit numuneye ait fotoğraflar	48
Resim 3.7 Şartlandırmanın yapılacağı fırına ait fotoğraf	49
Resim 3.8 Derin dondurucuya ait fotoğraf	51
Resim 3.9 Arka kısım malzemesi ve yerleştirilmesi	53
Resim 3.10 Arka kısım dolgu malzemesinde meydana gelen deformasyon	53
Resim 3.11 Kovan, çekirdek ve barutun mermiden ayrılması	56
Resim 3.12 Barutların hazırlanması	57
Resim 3.13 Shimadzu AGS-J 10 kN test cihazı	59
Resim 3.14 Bilgisayar kontrollü 5 eksenli su jeti tezgahı	60
Resim 3.15 Üç nokta eğme testi numuneleri	60
Resim 4.1 UHMW-PE ve ERKFP içeren hibrit numuneye ait fotoğraflar	62
Resim 4.2 Test malzemesinin sabitlenmesi	66
Resim 4.3 Zırhların atış sonrası görüntüleri	67
Resim 4.4 Delinmeyen zırhların zırhların V50 testi sonrası görüntüleri	73
Resim 4.5 V50 testinde delinen numunelerin arka kısım deformasyonları	74
Resim 4.6 Şartlandırılmış 25 kat UHMW-PE zırhın balistik test sonrası görüntüleri	75
Resim 4.7 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP zırhın balistik test sonrası görüntüleri	77

Resim 4.8	25 kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP zırhın balistik test sonrası görüntüleri	79
Resim 4.9	25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP zırhın balistik test sonrası görüntüleri	81
Resim 4.10	UHMW-PE ve ERKFP içeren numunenin üç nokta eğme testi	85
Resim 4.11	Numunelerin test sonrası görüntüleri	86
Resim 4.12	Şartlandırılan 25 kat UHMW-PE numunenin test sonrası görüntüleri	88
Resim 4.13	Şartlandırılan 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP numunenin test sonrası görüntüleri	90
Resim 5.1	Vuruş yönü belirtilen zırh plakası örneği	95
Resim 5.2	Kompozit başlık örnekleri	100
Resim 5.3	Balistik kompozit yelek	101
Resim 5.4	Helikopter taban zırhı	102

1. GİRİŞ

İnsanlar tarihin her döneminde yaratılış olarak korunma ihtiyacı hissetmişlerdir. Bunun için de değişen zamana bağlı olarak farklı zırh malzemeleri kullanmışlardır. İlk zırh örnekleri hayvan derisi ve tahtadan zırhlar olup, daha sonraları çelik ve bakırdan yapılan zırhlar kullanılmaya başlandı. Daha sonra teknoloji ilerledikçe seramik ve kompozit malzemelerden zırhlar yapılmıştır.

Örnekleri Resim 1.1’de verilen metallere yapılan zırhlar esnek olmayışları ve ağırlıklarından dolayı manevra kabiliyetini azalttıklarından kullanışlı değillerdi. Bu nedenle hareket özelliklerini artıran ve uzun kullanıma imkan veren malzemelerden zırh arayışı artmıştır.



(a)



(b)

Resim 1.1 Metal zırh örnekleri (a; İnt.Kyn 1, b; İnt. Kyn2).

Tekstil olarak ilk zırhlar 1860’lı yıllarda Kore’de pamuktan icat edildi. Sonrasında 1970’lerin ortalarında, Dupont Corporation kumaşa dokunan katmanlı, ticari adı Kevlar olan sentetik elyaf piyasaya sürdü (Agrawal 2011, Roenbeck vd. 2019). Bu katmanlı elyaf çelik bir malzemeden yaklaşık 5 kat daha sağlam, olup balistik açıdan da çok iyi olduğundan bu alanda önemli bir dönüm noktası olmuştur. Bu malzeme, Teijin firması tarafından ise Twaron adıyla da üretilmektedir.

Balistik malzemeler alanında diğer bir önemli gelişme de, DSM firması tarafından, 1990'lı yıllarda, yoğunluğu sudan daha düşük olan, çelikten yaklaşık 10 kat daha mukavemetli olan, jel eğirme yöntemi ile imal edilen ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMW-PE) liflerin geliştirilmesi oldu (Henderson 2008). Bu malzemenin en önemli özelliklerinden biri de yüksek hızlı parçalara karşı mükemmel bir malzeme olmasıydı (Crouch 2019). Bu malzeme DSM firması tarafından Dynema, Allied Signal firması tarafından Spektra adıyla üretilmektedir.

Çizelge 1.1 ABD ordusunun kullandığı balistik kaskların değişimi çizelgesi (Walsh vd. 2006).

	1. Dünya Savaşı	2. Dünya Savaşı/ Kore/ Vietnam	Kara birlikleri için personel zırh sistemi	Modüler entegre iletişim kasklı başlık	Yeni materyaller
Fotoğraf					
Materyal	Hadde çeliği	Hadfield çeliği	Kevlar 29/ PVB fenolik	Kevlar 29/ PVB fenolik Twaron/ PVB fenolik	Termoplastik aramid Spectra/ Dynema hibrid
Alansal yoğunluk	psf kg/m ²	2,3-2,4 11,224-11,712	2,3-2,4 11,224-11,712	2,0-2,1 9,76-10,248	1,5-1,8 7,32-8,784
Tehdit	Şarapnel	Fragment	Fragment 9 mm mermi	Fragment 9 mm mermi	Fragment 9 mm mermi

Malzeme ve silah teknolojisi ilerledikçe, silahların tahrip gücü arttıkça insanların korunma gereksiniminden dolayı zırh teknolojisi de ilerlemiştir. Çizelge 1.1'de ABD ordusunun balistik kasklarının gelişimi gösterilmiştir. 1. ve 2. Dünya Savaşında, Kore ve Vietnam'da çelik zırhlar kullanılırken, sonrasında kevlar ve diğer yeni materyallerle

Üretilen zırhlar kullanıldığı grlmektedir. Ayrıca zaman ilerledikçe zırhların ağırlıkları azalırken koruyuculuğunun da arttığı grlmektedir (Walsh vd. 2006).

Son zamanlarda, birçok malzeme gibi zırh konusunda da geleneksel malzemelerin yerini kompozit malzemeler almıştır. Seramikler, metaller ve organik malzemeler olarak üç kısma ayrılan malzemelerin üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır (Ahmed vd. 2020, Mazumdar 2001). Kompozit malzemeler ise, bileşenlerinden daha iyi özellikler sergileyen, birbirlerinin zayıf yönlerini gideren iki veya daha fazla malzemenin birleşimidir.

Hibrit kompozitler farklı liflerin çeşitli yöntemlerle bir araya getirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Bu malzemelerde, kompozitlerde elde edilemeyen yüksek sertlik, mukavemet, darbeye karşı dayanım, yorulma direnci ve hafıflık gibi birçok özellik elde edilebilir (Safri vd. 2018).



Resim 1.2. Balistik hibrit kask üretiminin adımlarını gösteren fotoğraf (Fejdys vd. 2015).

Hibrit kompozitlerin savunma sanayiinde de birçok kullanım alanı vardır. Resim 1.2’de aramid ve UHMW-PE kompozitten yapılan hibrit bir kask üretiminin aşamaları gösterilmiştir. Fejdys vd. (2015) yapmış oldukları hibrit kompozit tasarımıyla, homojen malzemedен yapılmış başlığa kıyasla daha düşük maliyetli, parçacık tesirine karşı daha yüksek balistik korumalı yenilikçi bir çözüm sunmuşlardır.

UHMW-PE, hafiflik, yüksek özgül mukavemet, kırılmaya karşı yüksek gerilme ve daha iyi enerji soğurma kapasitesi gibi çok önemli özelliklere sahiptir (Van der Werff ve Heisserer 2016). Bu iyi özelliklerinin yanında UHMW-PE'nin düşük sertlik, düşük erime noktası, zayıf ısıl direnci, zayıf kesme ve sıkıştırma özellikleri gibi bazı özellikleri yapısal kompozit uygulamalarda kullanımını zorlaştırmaktadır (Kurtz 2009, Peijs vd. 1994, Marrisen 2011, Lu vd. 2006).

Karbon fiberler, yüksek mukavemet, yüksek modül, basınç dayanımı, kesme modülü, yorgunluk ömrü, korozyon direnci ve düşük yoğunluk özellikleri ile ön plana çıkmaktadır (Mlnus ve Kumar 2005, Scoutis 2005). Ancak, karbon fiberlerin basınç gerilimi düşük olduğundan tek başına balistik kullanım için yetersizdir (Agrawal 2011).

UHMW-PE kompozitler ile karbon fiberler bir araya getirilmesiyle birbirlerinin eksik yönleri tamamlayabilir ve dengeli bir yapı oluşturulabilir. Bu sayede, iyi bir gerilme mukavemeti, basınç dayanımı ve darbe mukavemeti dengesine sahip yeni bir hibrit kompozit oluşabilir (Li vd. 1999, Cao vd. 2019).

Zırh malzemelerinde aranan en önemli özellikler sırasıyla, istenen tehdit seviyesinde koruma sağlaması, hafif olması ve düşük maliyetli olmalıdır. Balistik koruyucu ürünler tasarlanırken ilk önce tehdit seviyesi belirlenmeli, daha sonra tehlide uygun zırh tasarımı yapılmalıdır.

Tehdit seviyesinin belirlenmesi balistik bilimi çalışmaları kapsamındadır. Balistik, mermilerin namlu içindeki, namlu ile hedef arasındaki ve hedef üzerindeki etkisini inceleyen bilimdir. Mermilerin itme kuvveti, uçuşu ve çarpma etkisini ayrıntılı olarak inceler. 19. yy boyunca silah alanında ortaya çıkan teknik ilerlemeler sonucunda gelişen modern balistik bilimi üç dala ayrılır (Aydın ve Soydemir 2018). Mermi veya füzenin; silah içerisinde ve tesir sahasındaki hareketini inceleyen iç balistik, uçuş sırasındaki hareketini araştıran dış balistik, hedefteki etkileri inceleyen hedef balistiğidir. Bu projede, hedef balistiğine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Kişisel koruyucu zırhlar için iki ana unsur dikkate alınarak balistik performans ölçülür. Bunlardan birincisi parça tesirine karşı koruma, diğeri ise mermi tesirine karşı korumadır.

Mermiye karşı korumada NIJ (Amerikan Adalet Enstitüsü) standartları referans olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda zırhın arkasına yerleştirilen ve insan tenini simule eden bir dolgu maddesi kullanılmaktadır. Daha sonra atışlar yapılmaktadır. Zırhın başarı kriteri olarak ilk önce herhangi bir delinme olmaması istenmektedir. Delinme gerçekleşmemişse, zırhın arkasında yer alan dolgu malzemesinde oluşan çöküntü miktarının 44 mm'nin altında olması istenmektedir. Söz konusu standarda göre farklı tehdit seviyeleri tanımlanmıştır.

Bu çalışmada mermi testlerinde numunelere NIJ STD 0101.04 standardına göre III-A (MP5 makinalı tabanca namlusu 9 mm tam metal kaplama (FMJ) mermiler ile) atışlar yapılmıştır.

Balistik dayanımın diğeri bir kriteri ise parçacık dayanımıdır. Bu dayanım için ise NATO standardı olan STANAG 2920 kullanılmaktadır. Atışlarda geometrisi ve ağırlığı belli standart şarapnel kullanılmaktadır. STANAG 2920'de farklı şarapneller tanımlanmıştır. Bu çalışmada 5,385 mm çapında ve 1,102 g (17 grain) ağırlığında olan A3 şarapneli kullanılmıştır. Bu standarda göre, belirli bir sayıda atış yapıldıktan sonra, V50 değeri 3 delen ve 3 delmeyen atışın (hızların en yüksekği ile en düşükği arasındaki fark en fazla 40 m/s olmalıdır) aritmetik ortalaması alınarak bulunur. V50 hızı bir numunenin, söz konusu şarapnel ile atış yapıldığında yüzde 50 (elli) delinebileceği hızı ifade eder (STANAG 2007).

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için ASTM D790-03 standardına göre üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Bu testler ile geliştirilen zırh konfigürasyonlarının eğilmeye karşı dayanımları belirlenerek, birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Zırhlar çok farklı bölgelerde kullanılacak olduğundan, farklı sıcaklıklarda da balistik özelliklerini korumalıdır. Bu husus da dikkate alınarak, geliştirilen malzemeler sıcak ve soğuk şartlandırmalara tabi tutularak da testler yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmada, farklı 4 adet zırh konfigürasyonu (25 kat UHMW-PE, 25 kat UHMW-PE ve 1 kat epoksi reçineli karbon fiber prepreg (ERKFP) , 25 kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP, 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP) üretimi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 25 kat UHMW-PE mermi testlerine tabi tutulmuş, NIJ 0101.04 III-A seviyesinde koruma sağladığı görülmüştür. Daha sonra yapılan tüm konfigürasyonlar V50 testine tabi tutulmuş, UHMW-PE kompozite, ERKFP ekledikçe V50 değeri yükselmiş, parçacık tesirine karşı balistik performans artmıştır. Daha sonra sıcak ve soğuk şartlandırma yapılmış, malzemelerin istenen seviyede balistik özelliklerini devam ettirdikleri görülmüştür.

Balistik testlerden sonra üç nokta eğme testleri yapılmış, oda sıcaklığında yapılan testlerde, UHMW-PE kompozitlere ERKFP ilavesi çok önemli katkılar sağlamış, 6 kat ERKFP eklendiğinde esneklik gerilmesi % 307 artmıştır. Ancak, sadece 25 kat UHMW-PE içeren numunenin sıcak şartlandırmadan sonra yapılan eğme testinde, malzeme çok erken deformasyona uğramıştır.

Bu çalışmada imal edilen UHMW-PE ve ERKFP hibrit zırhlardan istenen tehdit seviyesine göre seçim yapılarak veya ihtiyaç olması halinde yapılacak ilave çalışmalarla kompozit katmanlarının sayıları değiştirilerek, balistik son kullanım için uygun bir çözüm olarak kullanılabilecektir.

Literatürde, UHMW-PE ve ERKFP hibrit kompozitlerin balistik özellikleri ve sıcaklık değişimine karşı davranışlarının belirlenmesi açısından çok çalışma bulunmadığından yapılan çalışma önemlidir ve yapılacak yeni çalışmalara da ilham kaynağı olacağı görülmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Balistik

2.1.1. Balistiğin Tanımı ve Bölümleri

Balistik, mermi ve füzelerin ateşlenmesinden başlayarak, hedefte yaptığı etkilere kadar tüm hareketlerini inceleyen bilim dalıdır. Bu alanda ilk çalışmalar, mermi çekirdeği ve kovanının bunları atan silahla ilişkilerinin incelenmesi ile başlamıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde 1900'lerin başlarında balistik bilimi, mermi çekirdekleri ve kovanlarının hangi silahtan atılmış olabileceğini ortaya çıkaracak duruma gelmiştir (Üner ve Çakır 2007).

Balistik genel olarak iç balistik, dış balistik ve terminal balistik olarak 3 bölümde incelenir (Aydın ve Soydemir 2018).

2.1.1.1 İç balistik

Namlu içinde, merminin namludan çıkıncaya kadar olan hareketlerini inceler. Bu hareketler, barutun yanması, merminin hareketi, termodinamik, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi konuları ile ilgilidir (Akçay vd. 2018).

2.1.1.2 Dış Balistik

Merminin namluyu terk etmesinden başlayarak hedefe uçuşuna kadar olan bütün hareketlerini inceler (Humphrey ve Kumaratilake vd. 2016). Dış balistiğin esası, maddi bir nesnenin uzaydaki başlangıç konumu ile hedefin konumu göz önüne alınarak, hareket yörüngesini dinamik denklemler ile tespit etmektir (Stepanov ve Vavilov 1997).

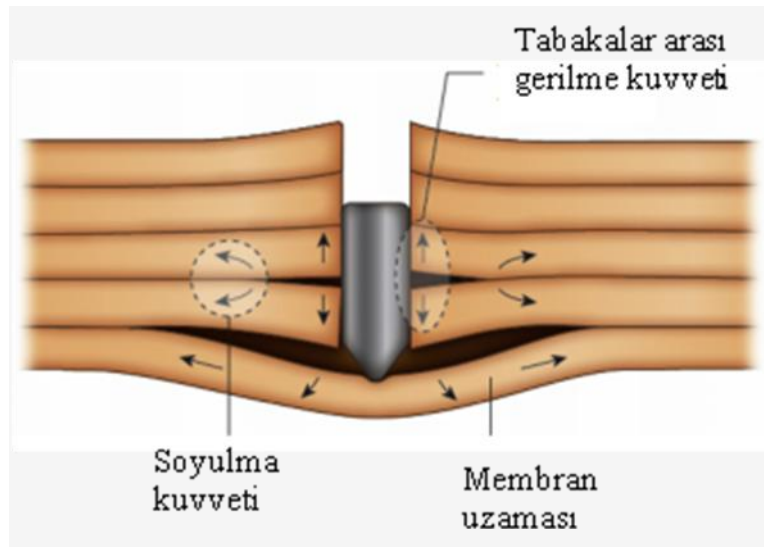
Bu kısımda birçok faktörün dikkate alınması gerekir. Dış balistik hesaplamada sürüklenme kuvveti için basınç, sürtünme ve taban sürüklemelerinden meydana gelen kuvvetler dikkate alınmalıdır. Ayrıca hesaplamalar ses altı, transonik ve ses üstü akış için ayrı ayrı yapılmalı, şok dalgalarının yarattığı sürüklenme etkileri de göz önüne alınmalıdır. Hava sıcaklığı, yoğunluğu ve rüzgârın yükseklik - zaman değişimi hesaba

katılmalıdır. Dünyanın dönüşünden kaynaklanan Coriolis kuvveti için de atış yapılan noktanın enlemi bilinmelidir (Akçay vd. 2018).

2.1.1.3 Terminal Balistik

Mermi çekirdeğinin, hedefe isabet etmesinden başlayarak duruncaya kadar olan hareketlerini incelemektedir. Terminal balistiğin bir bölümünde ise insan ve hayvanlarda meydana gelen yaralanmaların incelendiği "yaralanma balistiği" bölümü yer alır (Bozdoğan vd. 2015).

Terminal balistik, kinetik enerji mermilerinden, kimyasal enerji mermilerinden veya patlayıcılardan tüm hedeflere (binalar, tanklar, helikopterler ve kara birlikleri vb.) yönelik bütün etkileri kapsar. Hedef malzemesi ve mermilere göre çok farklı sonuçlar ortaya çıkabilir. Örnek olarak; katmanlı lamine bir malzemedeki mermi isabeti sonucu delaminasyon ile ilgili terminal balistik incelemesi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Delaminasyonda arka elemanların düzlem dışı plastik deformasyonunu içeren membran uzaması ve katmanlar arası kayma durumunu içeren tabakalar arası gerilme kuvvetinden oluşan iki ana enerji soğurma işlemi vardır (Crouch 2017).



Şekil 2.1 Katmanlı, lamine bir yapıda delaminasyon olayı (Crouch 2017).

2.1.2 Balistik Koruyucu Testler İçin Standartlar

Kişisel koruyucu zırhların balistik özelliklerini belirlemek ve tehditlerin seviyelerini açıklamak maksadıyla dünyada birçok standart geliştirilmiştir. Bu standartlar, testlerin yapılacağı ortam şartları, atış yapılacak namluları, kullanılacak mermi veya parçacıkları, atış sayıları ve atış mesafeleri gibi birçok hususu ayrıntılı olarak açıklamaktadır. Bu standartlardan bazıları Çizelge 2.1 de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Askeri amaçla kullanılan standart örnekleri (Bozdoğan vd. 2015).

STANDART NO	STANDART ADI
TS 11164	Balistik koruyucu vücut zırhı
TS 13349	Askerî zırhlar – V50 balistik hız deneyi
MIL-A-46103 C	Light weight, ceramic faced composite armor procedure requirements (Hafif, seramik yüzeyli kompozit zırh prosedürü gereklilikleri)
MIL-B-44053 A	Fragmentation protective body armor, vest ground troops (Parça tesirinden koruyan vücut zırhı, kara birlikleri yeleği)
MIL-STD-662 F	Ballistic test for armor (Zırh için balistik test)
NIJ-STD-0101.04	Ballistic resistance of personel body armor (Kişisel vücut zırhının balistik dayanımı)
NIJ-STD-0101.06	Ballistic resistance of personel body armor (Kişisel vücut zırhının balistik dayanımı)
NIJ-STD-0108.04	Ballistic resistance of protective materials (Koruyucu materyallerin balistik dayanımı)
STANAG 2920	Ballistic test method for personel armor (Kişisel zırh için balistik test yöntemi)
UK/SC/4697	The ballistic testing of fragment protective personnel armors (Parçacık koruyucu personel zırhlarının balistik testi)
UL 752	Ballistic Resistance Equipment (Balistik Dayanım Malzemeleri)
MIL-P-46199	Aluminium oxide ceramic (For use in armor composite) (Alüminyum oksit seramik (Kompozit zırhlarda kullanım için))
Pr EN ISO 14876-2	Protective clothing-body armor-part-2: Bullet resistance requirements and methods (Koruyucu giysi-vücut zırhı-bölüm-2: Mermi dayanımı gereksinimleri ve yöntemleri)

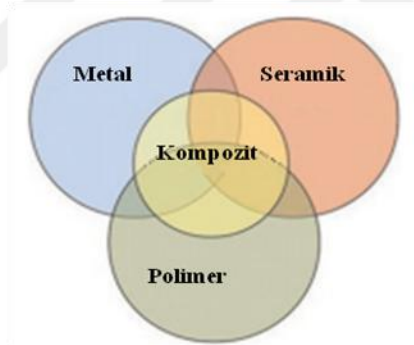
Bu çalışma kapsamında NIJ-STD-0101.04 ve STANAG 2920 standartlarında testler yapılacaktır.

2.2 Kompozit Malzeme

2.2.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Genel Özellikleri

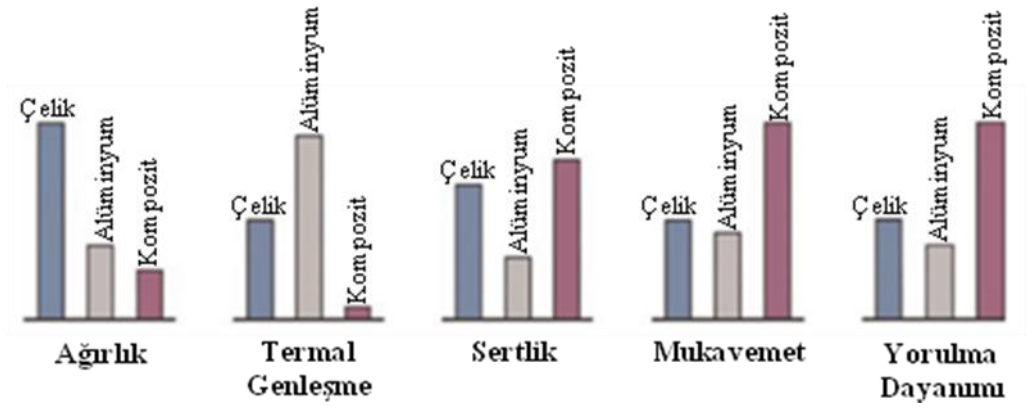
Malzemeler genel itibarıyla seramikler, metaller ve organik malzemeler olarak üç ana kısma ayrılır. Bu sınıflamada her malzemenin üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır (Ahmed vd. 2020, Mazumdar 2001).

Kompozit malzemeler ise kendini oluşturan malzemelerde daha iyi özellikler sergileyen iki veya daha fazla malzemenin birleşimidir. Kompozit malzemenin oluşumu ile ilgili şema Şekil 2.2’de gösterilmiştir (Fazeli vd. 2019).



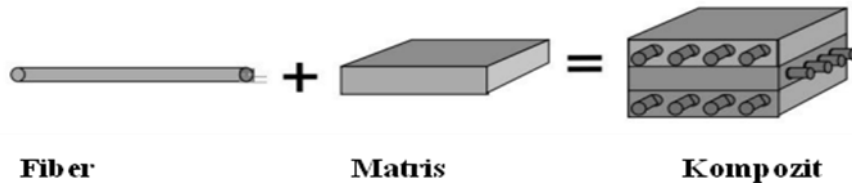
Şekil 2.2 Kompozit malzemeler (Fazeli vd. 2019).

Alüminyum, çelik ile kompozitlerin ortak fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Performans özelliklerine göre kompozitler birçok malzemenin yerine kullanılabilecek alternatif olabilirler. Mekanik özellikleri birbirine çok yakın olan kompozitler incelendiğinde çelikten % 60 - % 80, alüminyumdan ise % 20 - % 50 daha hafif oldukları görülecektir (Mazumdar 2001).



Şekil 2.3 Çelik, Alüminyum ve kompozitlerin özelliklerinin karşılaştırılması (Chawla 2012).

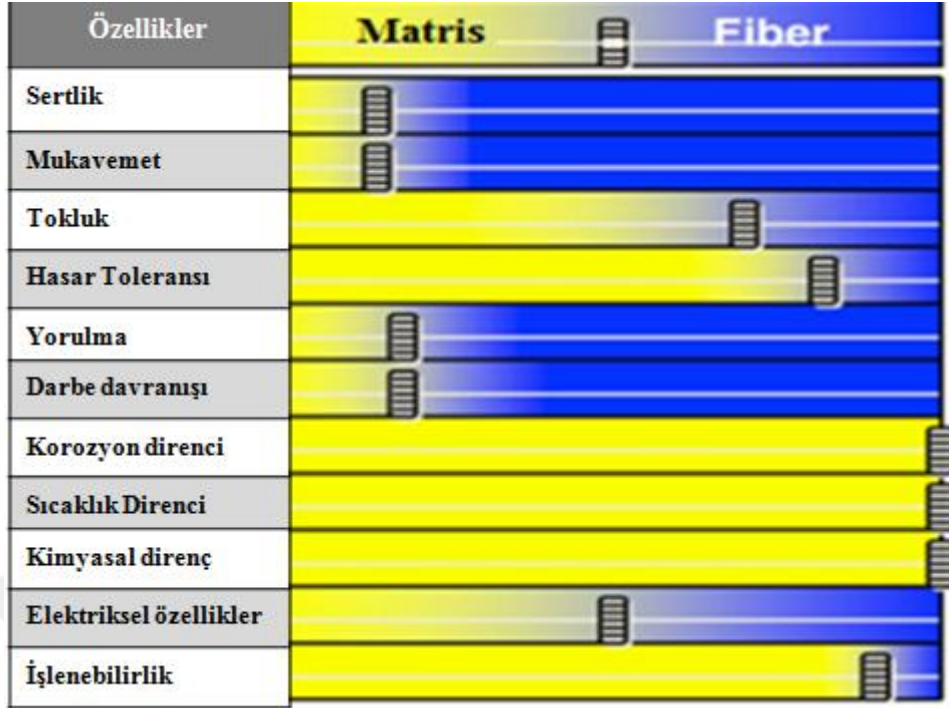
Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanlarından oluşur. Matrisler, kompozitin sürekli fazıdır ve malzemeye şekil verir. Bu kapsamda, kolayca şekillendirilebilen ve sonra şeklini kaybetmeyen matris malzemeler daha kullanışlıdır. Takviye elemanı ise kompozite mukavemet, sertlik ve diğer mekanik performans özelliklerinden sorumludur. Bir kompozitin bileşeni Şekil 2.4’te verilmiştir (Strong 2008).



Şekil 2.4 Kompozit bir malzemenin bileşeni (Strong 2008).

Schlarb (2006)’a göre elyaf ve matrisin kompozitlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki göreceli önemi Şekil 2.5’te gösterilmektedir (Friedrich ve Almajid 2013).

Bir kompozit malzemenin özellikleri, bileşenlerin özelliklerine, geometrisine ve fazların dağılımına bağlıdır. En önemli parametrelerden biri, malzemede takviyenin hacim veya ağırlık oranıdır. Takviyenin dağılımı, malzeme sisteminin homojenliğini belirler (Daniel vd. 1994). Takviye malzemesine göre, kompozit malzemeler elyaf takviyeli kompozit malzemeler, parçacık takviyeli kompozit malzemeler ve katman bıyık takviyeli kompozit malzemeler olarak ayrılabilir (Matthews ve Rawlings 1999).



Şekil 2.5 Elyaf ve matrisin kompozitler üzerindeki göreceli önemi (Schlarb 2006).

Bazı elyaf türlerinin metal malzemelere göre mekanik özelliklerinin kıyaslanması Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Metallerin ve elyaf türlerinin mekanik özellikleri (Kayrak, 1999).

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı (μ)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Özgün sertlik (E/ρ)
Metaller					
Çelik	7,8	200	0,32	1724	1,0
Alüminyum	2,7	69	0,33	483	1,0
Titanyum	4,5	91	0,36	758	0,95
Elyafılar					
E-Camı	2,58	69	0,22	3450	1,05
S-Camı	2,46	86,8	0,23	4585	1,4
Karbon (AS4)	1,80	235	0,20	3599	5,1
Karbon (P100S)	2,15	724	0,20	2199	13,2
Karbon (IM8)	1,8	310	0,20	5171	6,7
Boron	2,6	385	0,21	3799	5,8
Kevlar 49	1,44	124	0,34	3620	3,6

Çeşitli türler arasında, elyaf takviyeli malzemeler en yaygın kullanılanlardır ve üretilen en büyük miktarı oluştururlar. Bu malzemelerin olağanüstü özellikleri; düşük özgül ağırlık, büyük özgül mukavemet ve yüksek özgül modüldür (Yang vd 2019).

Elyaf takviyeli polimer-matris kompozitler, özellikle kara, deniz, hava araçları ve spor malzemeleri gibi birçok alanda geleneksel malzemenin yerini alarak, çeşitli yapısal bileşenlere kapsamlı bir şekilde uygulanmıştır (Dos Santos Alves vd. 2005).

Çizelge 2.3 Fiberlerin Sınıflandırılması (Priyanka vd. 2017, Majeed vd. 2013).

Fiberler				
Doğal Fiberler			Sentetik Fiberler	
Hayvansal	Selüloz	Mineral	Organik	İnorganik
	Jüt,			
	Keten,			
	Kenevir,		Aramid,	Glass,
İpek,	Kenaf,	Asbest grup	Polietilen,	Carbon,
Yün,	Pamuk,		Aromatik	Boron,
Saç	Odun,		polyester	Aramid
	Sap,			
	Bambu			

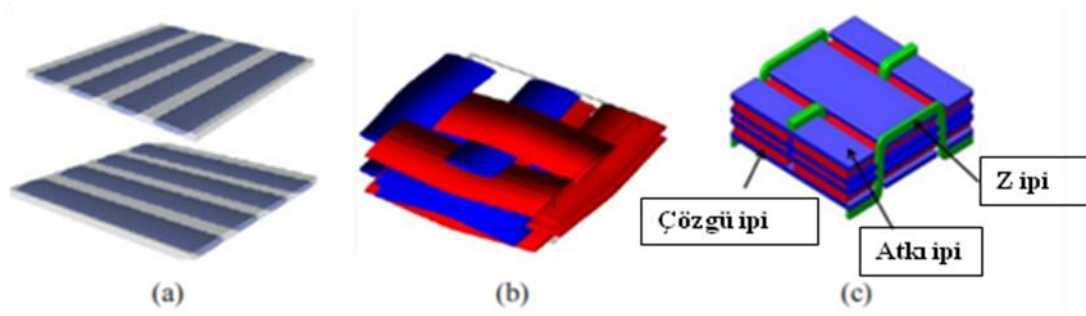
Elyaf takviyeli tekstil kompozitleri Çizelge 2.3'te gösterildiği gibi sınıflandırılabilir. Yaygın elyaf bazlı takviye malzemeleri cam elyaflar, karbon elyaflar, aramid elyaflar, ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMW-PE) elyaflar ve bazalt elyaflardır. Karbon lifler, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek modül, yüksek sıcaklık direnci ve iyi kimyasal stabilite özelliklerine sahiptir ve havacılık alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam elyaflar iyi yalıtım, ısı direnci, iyi korozyon direnci ve yüksek mekanik dayanıma sahiptir, denizle ilgili alanlarda, yeraltı yapılarında, köprüler ve otoyolların inşaatında kullanılır (Yang vd. 2019).

UHMW-PE elyafları hafif ve güçlü olmalarından dolayı, mermilerin veya patlayıcıların etkisine karşı hayatta kalma teknolojisi alanında hızla kabul görmektedir. UHMW-PE

kompozitler, personel koruması için zırh malzemeleri (yelek ve kasklar), askeri ve sivil zırhlı araçların üretiminde kullanılmıştır (Dos Santos Alves vd. 2005, Prevorsek vd. 1994, Deng vd. 1996, Gellert vd. 1998, Priyanka vd. 2017).

Kevlar elyaflar, yüksek mukavemet, çekme, darbe dayanımı ve şok yükleme direnci, ısı direnci, ısı kararlılık, düşük yoğunluk, düşük ısıl iletkenlik, düşük dielektrik sabiti ve daha büyük boyutsal tutarlılığı nedeniyle tercih edilmektedir. Uygun bir karakterizasyon ile malzeme özellikleri geliştirilerek savunma sanayiinde, endüstriyel alanlarda, denizcilik ve havacılık gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir (Priyanka vd. 2017, Prasad ve Talupula 2018).

Fiberleri birleştirmek için birçok farklı yöntem vardır. Şekil 2.6'da, kompozit laminatlarda kullanılan farklı fiber mimarilerinin örnek şemaları gösterilmektedir. Genel olarak, tek yönlü prepreg ve 2D düz dokuma kumaş, kompozit laminatlarda kullanılan fiber mimarileridir (Andrew vd. 2019, Smith vd. 1958).



Şekil 2.6 Farklı fiber mimarileri (a) UD, (b) 2D and (c) 3D (Andrew vd. 2019, Smith vd. 1958).

2.2.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj-Dezavantajları ve Kullanım Alanları

Kompozitlerin avantajları (Balasubramanian 2013);

- Yüksek özgül mukavemet ve sertlik,
- İyi yorulma ve korozyon direnci,
- Yüksek sünme direnci,
- Düşük yoğunluk ve ısı iletkenliği,
- Karmaşık şekillerin kolayca imal edilebilmesi,

- Çok çeşitli takviyeler, matrisler ve işleme yöntemleri arasından en uygun konfigürasyon seçilerek istenilen özelliklerde kompozitler imal edilebilmesidir.

Kompozitlerin dezavantajları (Thori vd.2013);

- Bir metal yapıya göre daha karmaşık mekanik karakterizasyona sahip olması,
- Onarım sürecinin metallere göre karmaşık olması,
- Metallere göre yüksek mukavemet ve kırılma tokluğu kombinasyon kalitesine sahip olmaması,
- Yüksek üretim maliyetidir.

Kompozit malzemelerin uygulamaları çoktur ve genişlemeye devam etmektedir. Havacılık, otomotiv, denizcilik, enerji, altyapı, zırh, biyomedikal, eğlence (spor) uygulamalarında, inşaat amaçlı güçlendirme malzemeleri ve hasarlı altyapıların korunmasında gibi birçok yapısal parçalarda kompozit malzemeler kullanılmıştır (Daniel vd. 1994, Rana ve Fanguero 2016, Biswal ve Swain 2020). Kompozit malzemelerin kullanıldığı yerlerin bazı örnekleri Şekil 2.7’de verilmiştir (Gu vd. 2018).



Şekil 2.7 Kompozit malzemelerin kullanım alanlarına ait örnek fotoğraflar (Gu vd. 2018).

2.2.3 Kompozitlerin Matris Malzemesine Göre Sınıflandırılması



Şekil 2.8 Kompozit malzemelerin matris özelliklerine göre sınıflandırılması (Diaz 2019).

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması çok farklı şekillerde yapılabilir. Bunlardan biri kullanılan matris fazına göre sınıflandırmadır. Kompozitlerde bağlayıcı olarak seramik, metal ve polimer matrisler kullanılır (Gay 2014). Şekil 2.8, belirtilen bu üç ana kompozit grubunun, en yaygın takviye mimarilerini (partikül veya fiber takviyeleri) ve sıklıkla kullanılan malzemeleri göstermektedir.

2.2.3.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitlerin (MMK) matris malzemeleri metalik olan kompozitlerdir. Çoğunlukla alüminyum (Al), magnezyum (Mg), bakır (Cu) ve titanyum (Ti) matris elemanı olarak kullanılır (Rajak vd. 2019). Takviye malzemesi olarak ise; SiC, B₄C, TiC, Si₃N₄, AlN, Al₂O₃, Y₂O₃, ZrO₂, TiB₂ vb. malzemeler kullanılır (Sharma vd. 2020).

MMK'ler, monolitik metallere göre daha yüksek özgül modül, daha yüksek özgül mukavemet, yüksek sıcaklıklarda daha iyi özellikler ve daha düşük termal genleşme katsayısı gibi birçok avantajından dolayı yanma odası nozulu (rokette, uzay mekiğinde), muhafazalar, borular, kablolar, ısı eşanjörleri, yapısal elemanlar vb. gibi geniş bir

uygulama yelpazesi için düşünülmektedir (Rohatgi 1991, Kelly 2006, Kumar vd. 2020, Chandramohan ve Marimuthu 2011).

Alüminyum metal matrisli kompozitler, mukavemet / ağırlık oranı, korozyon ve tribolojik davranışı iyileştirmenin ön planda olduğu havacılık, otomobil, savunma sektörleri için en popüler olanlardan biridir (Joseph vd. 2019, Mavhungu vd. 2017, Idusuyi ve Olayinka 2019, Selvakumar ve Narayanasamy 2016).

Metal matrisli kompozitlerin en büyük dezavantajları, imalatının ve takviye malzemelerinin nispeten yüksek maliyetli olmalarıdır. Yüksek sertlik ve aşındırıcı yapılar nedeniyle, MMK'lerin işleme sürecinde yüksek takım aşınması oranı vardır. Bu nedenle MMK için genellikle alışılmadık işleme teknikleri (takım ile malzeme arasında temas olmayan) kullanılır (Li ve Laghari 2019).

2.2.3.2 Seramik matrisli kompozitler

İlk insan yapımı malzeme olan seramikler yüksek sertlik ve mukavemete, kimyasal inertliğe, düşük ısı iletkenliğe, iyi oksidasyon ve korozyon direncine sahiptir (Rayat vd. 2017, Bhosale vd. 2014, Bhargava 2012). Seramik matrisli kompozitler (SMK) matrisleri seramik olan malzemelerdir ve seramik matrisin yapısına göre; oksit (ör. Al_2O_3 , SiO_2 veya $2 Al_2O_3SiO_2$) veya oksit olmayan (ör. SiC , C , BN , ZrB_2 veya HfB_2) kompozitler olarak sınıflandırılırlar. Oksit içermeyen SMK'lar, yüksek sıcaklıktaki mekanik sağlamlıkları nedeniyle şu anda en çok kullanılan SMK'lardır (Diaz vd. 2019).

SMK'lar, termal şok, aşınma direnci, yüksek sıcaklığa dayanma kapasitesi dahil olmak üzere yararlı fiziksel ve mekaniksel özelliklerin bir kombinasyonunu sergilerler, ancak kırılma davranışları nedeniyle uygulamaları sınırlıdır (Rayat vd. 2017, Donald ve McMillan 1976). SMK'ların çoğu için işlenmesi çok özel yapıları, yüksek sertlik, gevrek veya yarı kırılma davranış, heterojen (lifler, matris ve gözeneklilikler) yapı vb. nedeniyle zordur (Diaz vd. 2019).

SMK genellikle otomotiv gaz türbinleri, havacılık, kesici takım uçları, karbon frenler, roket ve hipersonik araç bileşenleri (özellikle nozullarda, ön kenarlarda ve motor bileşenlerinde) gibi birçok uygulamada kullanılırlar (Kaya 1999, Binner vd. 2020).

2.2.3.3 Polimer matrisli kompozitler

En yaygın kullanılan matris malzemeleri polimerlerdir. Bunun en önemli nedenlerinden biri polimer matrisli kompozitlerin işlenmesi için gerekli ekipmanların daha basit olmasıdır (Chandramohan ve Marimuthu 2011).

Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler (PMK) malzemeler zırhlar, askeri araçlar, kişisel koruma, helikopterler, devriye botları, taşınabilir barınaklar (komuta barınakları olarak), uydu koruma sistemleri ve diğer hafif zırh uygulamalarında da kullanılmaktadır (Jacobs ve Van Dingenen 2001, Grujicic vd. 2006). PMK takviye malzemesi olarak; genellikle karbon, cam, Kevlar ve metal elyaf kullanılır (Rajak vd. 2019, Ray 2006, Xu vd. 2001, Davim ve Reis 2003, Mukherjee vd. 2006).

Termoplastik ve termoset olmak üzere iki ana matris türü vardır. Uygulama alanı, matris seçim kriterleri için belirleyici faktörlerdir. Termoset polimerler, mekanik özellikler, termal stabilite, kimyasal direnç ve dayanıklılık açısından termoplastikten daha iyidir (Rajak vd. 2019, Yan vd. 2014). Yaygın olarak kullanılan; termoset ve termoplastik reçinelerin listesi Çizelge 2.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 Yaygın olarak kullanılan polimer matrisler (Growda vd. 2018).

Termoset reçineler	Termoplastik reçineler
Fenolik	Polietilen (PE)
Epoksi	Polipropilen (PP)
Polyester	Polivinil klorür (PVC)
Polimid	Polikarbonat (PC)
Poliüretan	Naylon
	Akrilonitril butadiyen stiren(ABS)
	Polieter eter keton (PEEK)
	Polistiren (PS)
	Selüloz asetat

Termosetler reçinenin sertleştirici ile karıştırılmasıyla hazırlanır. Laminer yapı genelde elyaf ve polimer tabakalarının istenilen kalınlık elde edilinceye kadar istiflenmesi ve yapıştırılmasıyla yapılır (Rajak vd. 2019, Thoppul vd. 2009, Wisom vd. 2006).

Termoset ve termoplastik özelliklerinin kıyaslanması ile ilgili özet tablo Çizelge 2.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.5 Termoset ve termoplastik özelliklerinin kıyaslanması (Sing vd. 2018, Nordin vd. 2013).

	Avantajları	Dezavantajları
Termoplastik	• Sınırsız raf ömrü, • Hızlı işleme, • Geri dönüştürülebilir olması, • Yeniden Şekillendirilebilme • Uygulama işlemi sırasında kimyasal reaksiyon meydana gelmemesi • Kullanımı kolay olması (yapışkanlık yok) • Kaynak ve solvent yapıştırma ile tamir edilmesi kolaydır.	• Daha zayıf yapışkan bağlar oluşturma eğiliminde olması • Sürünme eğilimi • Zayıf eriyik akış özellikleri • Elyafı yeterince ıslatmak için termoplastiklerin erime noktasının üzerinde ısıtılması gerekmesi
Termoset	• Deformasyona direnci ve mekanik olarak daha kararlı olması • Güçlü kimyasal bağlar oluşturmak için çeşitli yüzeyler / substratlar ile reaksiyona girebilir olması, • Düşük reçine viskozitesi • İyi elyaf ıslatmaya müsait olması • Polimerleştikten sonra mükemmel termal stabilite • Kimyasal olarak dayanıklı olması • Sürünmeye dayanıklı olması	• Üretiminde daha fazla kontrol gerekli olması, • Kırılma ve kalıcı bağlama gerekli olması, • Kırılma sırasında mekanik gerilime neden olabilecek sabit basınç gerekmesi, • Kırılgan olması • Standart tekniklerle geri dönüştürülememesi, • Sonradan biçimlendirilememesi

Termoplastik prepreglerin daha yüksek darbe direnci, yüksek hasar toleransı, sünekliği, yeniden üretilebilirliği, geri dönüştürülebilirliği, hammaddelerin sınırsız raf ömrü, hem düşük hem de yüksek hacimler için üretime kolayca uyarlanabilir olması, düşük takım maliyetleri ve hızlı çevrim süreleri, geliştirilmiş montaj ve birleştirme yöntemleri kullanılabilmesi, termoset matrisli kompozitlere göre büyük bir rekabet gücü sunar (Xiong vd. 2019, Mohd Nurazzi vd. 2017, Smith vd. 2003, Vaidya vd. 2008).

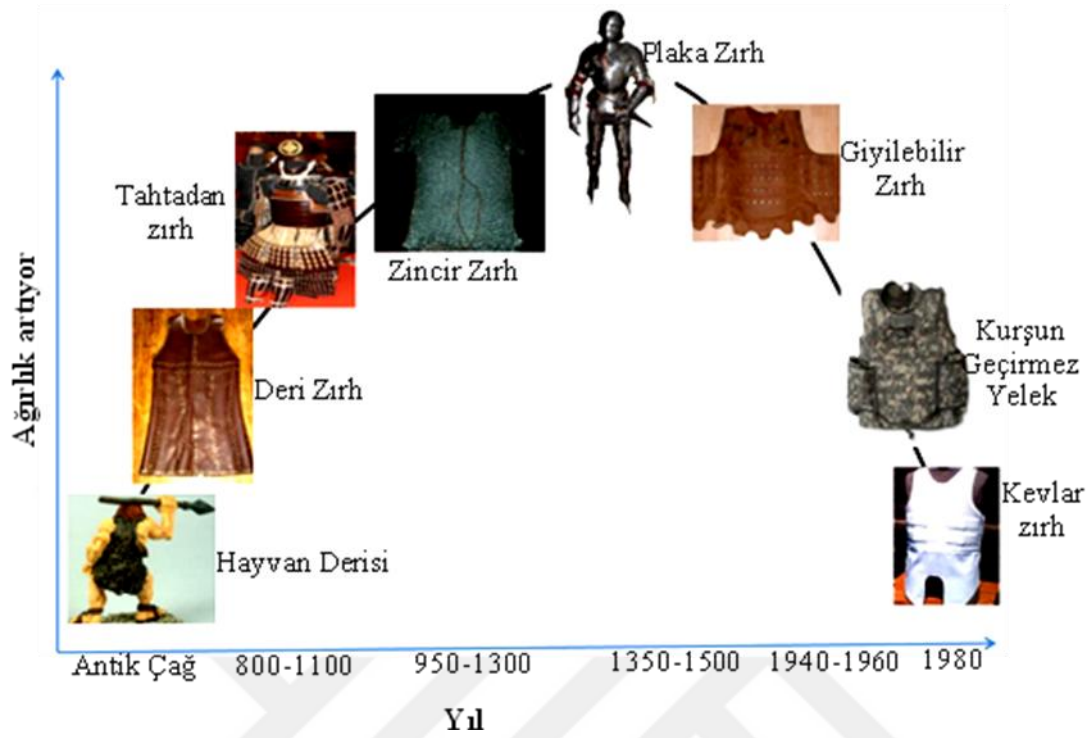
Termosetlerin kullanımı bazı dezavantajlar sunmaktadır. Termoset bazlı sandviçler için üretim yöntemleri emek ve zaman alıcı olduğundan, nadiren yüksek hacimli eşyalarda uygulanır (Grünwald vd. 2017, Skawinski vd. 2004). Diğer bir dezavantaj, termoset kompozitlerin onarımı veya birleştirilmesi sadece özel yapıştırıcılarla mümkün olmasıdır (Raghavalu Thirumalai 2014). Termosetlerin, yakın çevreden gelen termal ve kimyasal etkilerin verdiği hasara karşı daha dayanıklı olmasının doğrudan bir sonucu da, termosetlerin geri dönüştürülmesinin çok zor olmasıdır (Post vd. 2020).

2.3 Balistik Koruyucu Malzemeler

2.3.1 Balistik Koruyucu Malzemelerin Tarihi ve Gelişimi

Balistik koruyucu ürünler, bireyleri mermilerden ve parçacıklardan korumayı amaçlayan koruyucu giysi sınıfıdır (Carr ve Lewis 2014, Bajaj1997). Muharebe dışı, muharebe ve acil durumda hayatta kalma operasyonu sırasında askeri personel için kişisel koruyucu ekipman gereklidir (Agrawal 2011).

İnsanlığın başlangıcından beri insanlar topraklar, din, yemek ve onur için savaştılar. Bununla birlikte, insanlık daha uygar hale geldikçe, silahlar daha gelişmiş hale geldi. Askerleri sürekli değişen silahlardan daha iyi korumak için zırh geliştirmeye sürekli ihtiyaç duydular (Z Gama Haque vd. 2012). İlk zırhlar, kalkan olarak hayvan kürkleri, deri ve ağaç kabuğundan oluşuyordu. Zamanla daha tehlikeli silahlar keşfedildikçe, mermileri ve patlayıcı parçaları durdurmak için metal zırhlar geliştirildi. İnsan uygarlıklarının ilerlemesi ile daha gelişmiş giysiye tutturulmuş yüzlerce küçük metal parçadan oluşan zırhlar kullanıldı. Şekil 2.9, zırh sistemlerinin zamanla gelişimini göstermektedir (Gupta 2013).



Şekil 2.9 Vücut zırhında radikal ağırlık azalması (Gupta 2013).

İnsanlar zamanla daha yeni silahlar geliştirdikçe, korunmak için daha iyi giysilere ihtiyaç duydular (Larsen vd. 2011). Henderson (2008)'a göre kurşun geçirmez zırhlar 16. yy'da biliniyordu ancak tekstiller söz konusu olduğunda, ilk balistik zırh 1860'larda Kore'de icat edildi ve 30 kat pamuktan yapıldı. Yelekler, 1871'de ABD Donanması Kore'deki Ganghwa Adası'na saldırdığında kullanıldı. Balistik zırhın kullanıldığı ilk örneklerden biri, 1879'da Avustralya'da gövde, üst kollar ve üst bacakları kaplayan hurda metallerden zırhlardı. Kaskla birlikte, ev yapımı takım elbise 44 kg ağırlığındaydı. I.Dünya Savaşı sırasında, Amerika Birleşik Devletleri, bir göğüs plakası ve bir başlıktan oluşan ve 820 m/s'de Lewis Gun mermilerine dayanabilen, ancak 18 kg ağırlığında olan krom nikel çelik vücut zırhları geliştirdi. İkinci Dünya Savaşı'nın ilk aşamalarında, Amerika Birleşik Devletleri piyadeler için vücut zırhı tasarladı, ancak çoğu model çok ağırdı ve hareket kabiliyetini kısıtlıyordu. Bu zırhlı yelekler genellikle mevcut ekipmanla uyumsuzdu. Bu sistemlerde konfor yönleri de tamamen göz ardı edilmişti (Agrawal 2011).

Daha sonra koruyucu kumaşlar naylon gibi sentetik liflerle denendi ancak tam

anlamıyla başarılı olamadı. 1970'lerin ortalarında, DuPont Corporation, bir kumaşa dokunan ve katmanlı olan Kevlar sentetik elyafı piyasaya sürdü (Agrawal 2011, Roenbeck vd. 2019).

1976'da Second Chance Body Armour'un kurucusu Richard Davis, ilk tamamı Kevlar yeleğini tasarladı. Hafif, gizlenebilir yelek endüstrisi başladı ve modern polis memurları için yeni bir günlük koruma biçimi gün yüzüne çıktı. 1980'lerin ortalarından sonuna kadar, polis devriye görevlilerinin tahminen 1/3'ü her gün gizlenebilir yelek giyiyordu (Agrawal 2011).

Balistik koruyucu ürünleri giymek askeri ortamlarda ve polis kuvvetlerinde ölümleri ve yaralanmaları azaltmakta çok etkili olmuştur (Larsen vd. 2011)

2006 yılına gelindiğinde, standart bir günlük polis ekipmanı parçası olarak hafif, gizlenebilir vücut zırhının başarısını ve verimliliğini onaylayan 2 000'den fazla polis yeleği "kurtarması" kaydedildi (Agrawal 2011).

Kevlar kumaşlardan üretilen kask ve yeleklerin kara birliklerine verilmesinden sonra çok sayıda ABD askerinin hayatı kurtarıldı. Orijinal yelek tasarımı, hafif makineli tüfek ve tabanca tehditlerine karşı gelişmiş koruma sağlarken, parçacık tehditlerine karşı da eşdeğer balistik koruma sağlamak için son otuz yıl boyunca gelişim gösterdi. Bu koruma seviyeleri, ağırlıklar ve konfor seviyeleri iyileşmesi sürdürüldü (Scott 2006, MIL-H-44099A 1986).

1990'larda DSM, olağanüstü hafif ve dayanıklı olan bir "jel eğirme" polietilen elyafı yönteminin patentini aldı. Ürün Dyneema olarak adlandırıldı ve olta ve ağlardan tıbbi implantlara kadar geniş bir ürün yelpazesinde kullanılmak üzere uyarlandı. Bu ürün ayrıca, sudan hafif olduğu için suda yüzmeye özelliğine de sahipti (Henderson 2008). Geliştirmenin ilk günlerinde, yüksek hızlı parçalara karşı mükemmel bir balistik malzemeydi, ancak son derece zayıf bir yapısal malzemeydi. Bu durumda kullanımını sınırlamaktaydı (Crouch 2019).

Ancak gelinen aşamada yapılan iyileştirmelerle, balistik koruma alanında, yumuşak zırh ve sert zırh olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Henderson 2008). UHMW-PE'ye dayalı ultra hafif laminatların ortaya çıkmasıyla bile, bazı hafif çelik çekirdekli

mühimmatlara karşı koruma sağlanamamaktadır. Bu konuda olağanüstü yetenekleri ile seramikler, çelik çekirdekli mermiler ve zırh delici mühimmatlara karşı en etkili zırh malzemeleri grubu olmaya devam ediyor. Vücut zırhı uygulamaları için, pazarda üç sınıf yer almaktadır. Bunlar (verilen sıraya göre balistik liyakat derecesi ve fiyatı artar.) yüksek saflıkta alüminalar, silisyum karbürler ve bor karbürlerlerdir (Crouch 2019). Seramik plakaların boyutları, ağırlıklarından dolayı sınırlıdır ve kalp gibi hayati organları korumak için tasarlanmıştır (Kuklane 2000, Scott 2000).

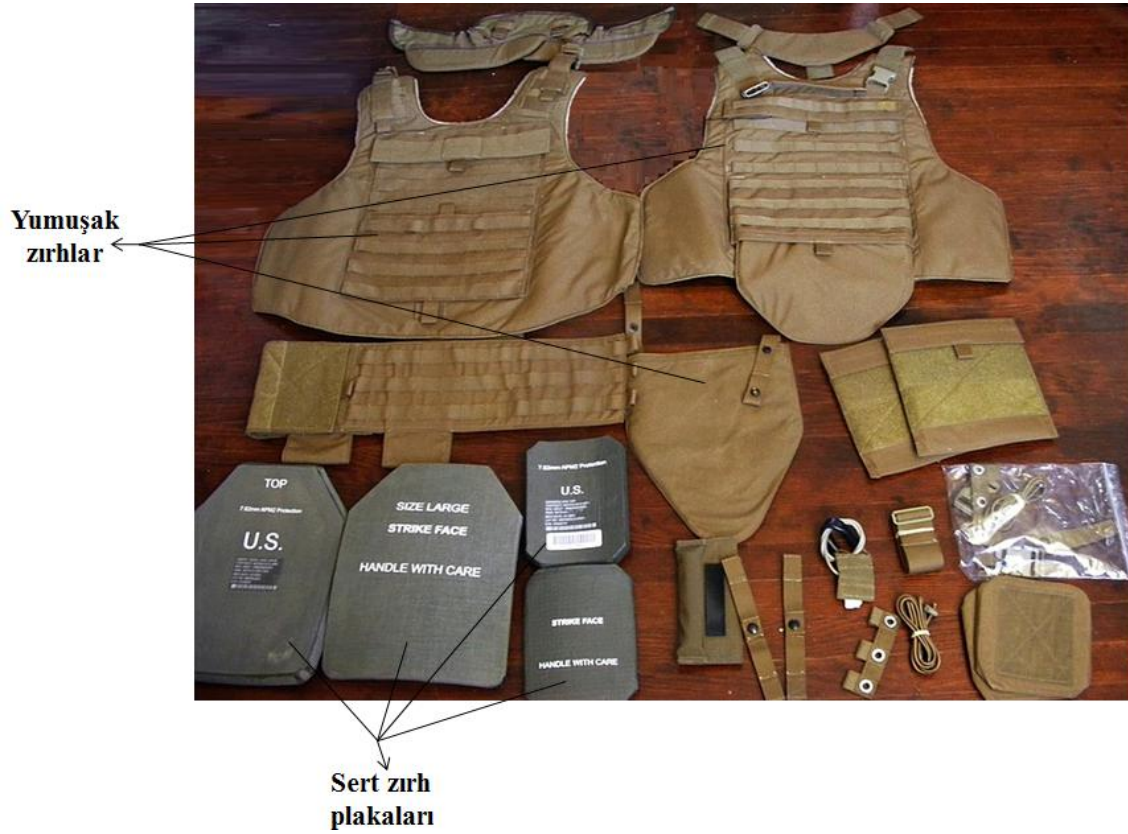
Tüm bu çalışmalara, malzeme ve tasarımdaki gelişmelere rağmen, zırhın en önemli özelliği merminin insan vücuduna girmesini engellemek ve çarpma enerjisini yaymaktır. Bununla birlikte, modern askeri operasyonlarda, sokak savaşlarında artan ölümcül tehditlere ve çatışmalara karşı askeri malzemelerin, yüksek koruma düzeyi, esneklik (kullanıcının giyilebilirliği ve hareketliliği), hafiflik, hasar direnci, verimli enerji emme kapasitesi ile çoklu vuruş kabiliyeti gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir (Yadav vd. 2016, David vd. 2009, Übeyli 2007, Bhatnagar ve Lang 2006, Haq ve Reddy 2020). Diğer taraftan bu sistemler çok pahalı olduğundan, maliyet düşürme aynı zamanda ticari bir itici güçtür (Crouch 2019).

Günümüzde birçok zırh uygulaması yapılmaktadır. Kompozit başlık (Kulkarni vd. 2013) kompozit yelek (Barker ve Black 2009), mayın elbisesi (Mikulic 2013) helikopter taban zırhı (Gooch 2002) araç zırhı (Ash 2016), güvenlik kabinleri (Maho vd. 2019) , gözlükleri, eldivenleri, kol kılıflarını, bomba bidonu, bomba battaniyesi (Long 1986), balistik cam (Feng vd. 2015) bu uygulamalardan bazılarıdır.

2.3.2 Sert ve Yumuşak Zırhlar

Modern vücut zırhı, kullanılan malzemenin türüne bağlı olarak sert vücut zırhı ve yumuşak vücut zırhı olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Genel olarak, sert vücut zırhının koruma seviyesi, yumuşak vücut zırhından daha yüksektir. Bununla birlikte, sert vücut zırhı genellikle giymek için daha ağırdır ve vücut hareketinde yumuşak vücut zırhına göre daha az esneklik sağlar. Kolluk kuvvetleri ve askeri personel, yüksek düzeyde tehdit olduğunda sert vücut zırhı giyebilir. Sert zırhlar, seramikler, güçlendirilmiş plastikler, metal plakalar ve kompozitler gibi sert malzemelerden yapılır.

Genelde günlük kullanım için yumuşak vücut zırhı, daha esnek olması ve yeterli koruma sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. Yumuşak vücut zırhı, balistik liflerden üretilen birkaç yüksek performanslı malzeme katmanından oluşur (Wang vd. 2014, Naveen vd. 2020). Bir balistik kompozit yeleğe ait sert ve yumuşak zırh plakaları Resim 2.1’de verilmiştir (İnt. Kyn.3).



Resim 2.1 Bir yeleğe ait sert ve yumuşak zırhların görüntüsü (İnt. Kyn.3).

2.3.3 Kullanılan Malzemelere Göre Zırhların Avantaj ve Dezavantajları

Piyasada yaygın kullanılan balistik zırh malzemeleri; polimer kompozitler, seramikler ve metal zırhlardır (Şenel 2004). Malzeme özelliklerine göre zırh malzemelerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 Zırh malzemelerinin malzeme özelliklerine göre kıyaslanması (Yadav vd. 2016).

Zırh malzemeleri	Avantajlar	Dezavantajlar
Metalik (Çelik) zırhlar	1. Kolay İşleme 2. Geniş ebat ve kalınlıkta modifikasyon 3. Artan kalınlık ile çeşitli türdeki mermi tehditlerine karşı koruma sağlama	1. Bugünlerde zırh malzemelerinde aktif olarak yer almaması 2. Malzemenin ağırlığını artıran yüksek yoğunluk
Seramik zırhlar	1. Düşük yoğunluk 2. Hafif 3. Yüksek basınç dayanımı 4. Düşük balistik tehditler için en iyi malzeme olması	1. Yıkıcı arıza 2. Oldukça kırılğan 3. Sınırlı tehlide karşı koruma sağlama 4. Ek destek plakası gerektirmesi 5. Süreç sırasındaki hatalar başlıca zorluklar olması 6. Giyilebilirlik en büyük sorun olması
Fiber zırhlar	1. Düşük Yoğunluk 2. Hafif 3. Giyilebilirlik 4. 2-D, 3-D gibi geniş bir yapı yelpazesi 5. Çok katlı sistem oluşturulabilmesi 6. Darbeden sonra daha hızlı ısı dağılımı	1. Çevresel bozulma 2. Bölgesel lif erimesi 3. Yerel lif ufalanması 4. Islak koşullarda balistik etkinlikte azalma
İntegral ve lamine zırhlar	1. Balistik tehditlere göre çeşitli malzemeleri entegre etme imkanı 2. Aynı ağırlığa sahip metal zırhlara göre yüksek balistik etkinlik sağlar 3. Yüksek enerjili mermi için etkilidir	1. Entegre malzemelerin delaminasyonu 2. Matris kırma ve kemik çıkarma 3. İntra ve laminer ayırma

Kompozit malzemeler, mermilerin ve şarapnel parçalarının yüksek momentumu absorbe eder ve çarpmada oluşan kinetik enerjinin çoğunu azaltır (Cunniff 1992). Metalik zırhların artan kalınlığa bağlı olarak yüksek koruma sağlaması avantaj sağlarken, ağır olması en büyük dezavantajıdır (Yadav vd. 2016). Seramik zırhlar çelik çekirdekli mermilerde başarılıdır. Bu başarının nedeni, seramik malzemelerin yüksek sertlikte olması ve büyük ölçüde balistik performansta sertlik özelliğinin çok etkili olmasıdır (Crouch 2019).

2.3.4 UHMW-PE Malzeme Üzerine Çalışmalar

Plastik malzemelerden biri olan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMW-PE) malzeme son yıllarda geniş bir kullanım alanı kazanmış ve hatta birçok durumda çeliklerin yerine kullanılmaya başlanmıştır. UHMW-PE, geleneksel yüksek yoğunluklu polietilen reçinelerin ortalama 10 katı bir moleküler ağırlığa sahiptir. Yüksek moleküler ağırlık, onu daha düşük moleküler ağırlık derecelerinin yetersiz olduğu birçok uygulama için daha uygun hale getiren özelliktir (Aydın 2010). UHMW-PE lifler, bilinen en güçlü ve en hafif lifler arasındadır (Dos Santos Alves vd. 2005).

Aynı ağırlıkta, aramid, karbon ve cam elyaflar ile karşılaştırıldığında daha yüksek mukavemete sahiptir (Hearle 2001). Düşük kopma uzaması değerine sahip olduğu halde kopma enerjisi değeri son derece yüksek olması UHMW-PE malzemeyi diğer fiberlerden ayıran önemli özelliktir (Bhatnagar 2006). Mermilerin kinetik enerjisini emmek için olağanüstü bir kabiliyete sahip olduğundan, kişisel vücut zırhı için en umut verici kumaşlardan biri olmuştur (Dos Santos Alves vd. 2005, Patidar 2018, Gao vd. 2019, Fawaz vd. 2004).

Balistik fiber olarak kullanılan en önemli kompozitlerden biri olan aramid elyaflar UHMW-PE'lere göre daha yüksek sürtünme katsayısına sahiptir ve küçük çaplı mermilerin etkisini absorbe etmek için daha uygundur. UHMW-PE elyafının, kullanılan ikinci kuşak aramid elyaflarına kıyasla daha hafif olan üçüncü kuşak malzeme olduğu söylenebilir. UHMW-PE ile yapılan balistik paneller, günümüzün tehditlerini doğrudan karşılayan çoklu isabet, açılı atış ve yüksek hız durumlarında performans olarak kendini kanıtlamıştır. Ancak, aramid elyaflarına kıyasla UHMW-PE elyafının sıcaklık duyarlılığı şüphelidir (Agrawal 2011).

Literatürde polietilen malzemenin balistik özelliklerinin incelenmesi ile ilgili birçok çalışma vardır (Liu vd. 2010, Cwik vd. 2016).

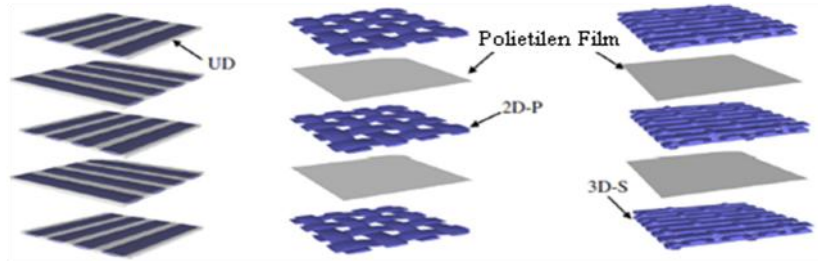
Liu vd. (2018) UHMW-PE kumaşlardan ve yumuşak enerji absorbe etme özellikli malzemelerden oluşan hibrit bir panel tasarlamış ve özelliklerini incelemiştir. Hibrit

panelin ortaya çıkan arka yüz imza (BFS) değerleri, aynı alan yoğunluğuna sahip saf UHMW-PE kumaş paneline kıyasla % 6–17 oranında azaltılmıştır (Liu vd. 2018).

Lassig vd. (2018), UHMW-PE (Dyneema HB26) kompozitlerinin üretim sürecinin dinamik performansı üzerindeki etkisini araştırdı. Malzemenin, presleme parametrelerinden (sıcaklık ve basınç) önemli ölçüde etkilendiğini gösterdi. UHMW-PE kompoziti için balistik direnç ve şok dalgası davranışı, üç farklı basınçla karakterize edildi. Sonuçta, UHMW-PE kompozitler, daha yüksek basınçlarda daha iyi bir balistik performans gösterdi.

Cunniff (1992)'in çalışmasında UHMW-PE (Spectra) kumaş, Kevlar kumaş katmanından önce çarpan yüze yerleştirildiğinde, V50 % 80'in üzerinde bir azalma gösterdi. Bunun, farklı modüllü iki malzeme arasındaki enine sapmanın girişiminden kaynaklandığını düşündü.

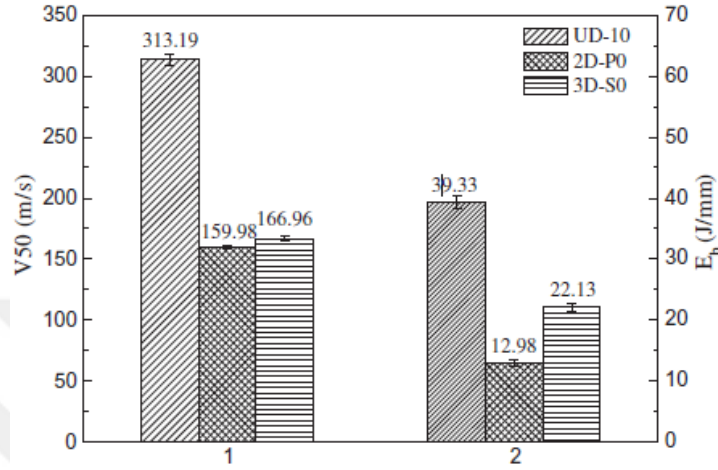
Benzer şekilde; Park vd. (2013) ve Kedzierski vd. 2016) ayrıca UHMW-PE ürünlerinin vurucu yüze yerleştirilmesinin balistik direnç için fayda sağlamadığını bulmuşlardır.



Şekil 2.10 UHMW-PE kumaş şema tipleri (Zhang vd. 2014).

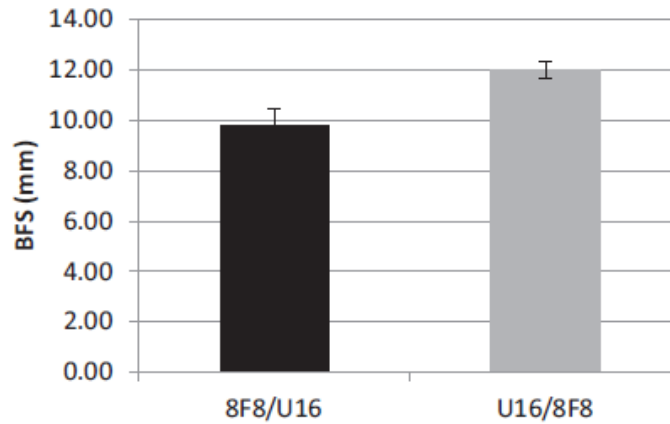
Zhang vd. (2014), UHMW-PE kompozit laminatın kumaş yapısının ve kalınlığının balistik davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Üç çeşit kumaş yapısı (tek yönlü prepreg, 2D düz dokuma ve 3D tek katlı ortogonal dokuma) ile güçlendirilmiş, Şekil 2.10'da görseli verilen UHMW-PE kompozit laminatlar, sıcak presleme işlemi ile üretilmiştir. Bir dizi standart balistik test sonucunda, tek yönlü kompozit laminatların diğerlerine kıyasla daha yüksek enerji absorbe ettiğini göstermiştir (Şekil 2.11).

Şekil 2.11’de E_h , birim kalınlığa göre emilen enerjiyi temsil etmektedir. Ayrıca, tek yönlü kompozit laminatların baskın kırılma mekanizmaları, ince laminatlar için sürtünme, kalın olanlar için ise tabakalara ayrılma, elyaf gerilimi ve şişkinlik olarak tanımlanmıştır.



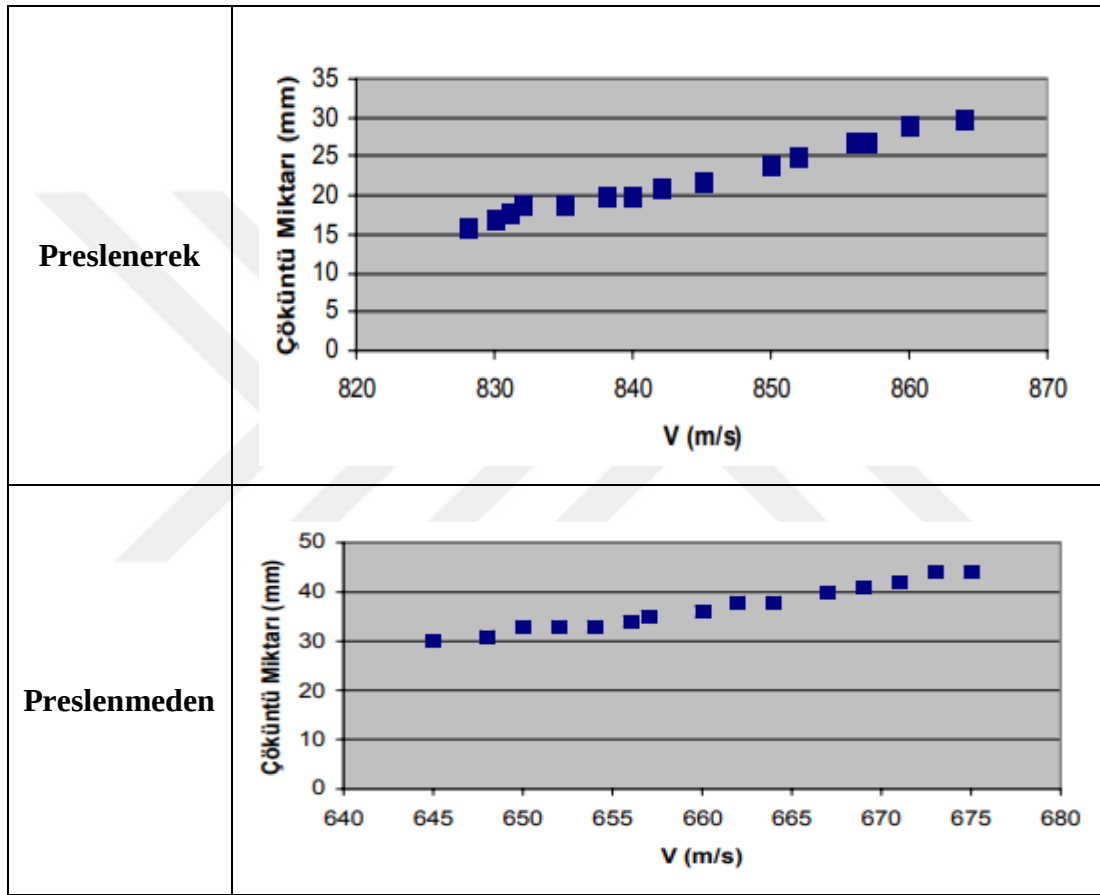
Şekil 2.11 Dokuma tiplerine göre V50 değerleri (Zhang vd. 2014).

Yang ve Chen (2017) UHMW-PE lifleri ve Twaron’dan oluşan hibrit zırhın balistik performansını incelemiştir. Balistik test sonuçları, Dyneema UD laminatı, Twaron kumaştan önce çarpıcı yüze yerleştirildiğinde, enerji sönümlemesi ve arka yüz imzasında (BFS) bariz bir bozulma sergilediğini gösterdi. Katmanlama dizisinin panellerin BFS’si üzerindeki etkisi Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Buna göre önde UHMW-PE (U16/8F8) olan numunenin çöküntü miktarı daha yüksek olmuştur.



Şekil 2.12 Katmanlama dizisinin panellerin BFS’si üzerindeki etkisi (8F8/U16; Önde Twaron olan zırh, U16/8F8; önde UHMW-PE olan zırh) (Yang ve Chen 2017).

Yapılan bir çalışmada UHMW-PE kompozitlerde ilk grup numuneleri presle imal edilmiş (sert kompozit), ikinci grup numuneleri ise preslemeden (yumuşak kompozit) üst üste ekleyerek birleştirmiş ve balistik özelliklerini kıyaslamıştır. Sert plakada 844 m/s olan V50 değeri, yumuşak plakada 660 m/s'ye düşmüştür. Şekil 2.13'te gösterilen grafiğe göre ortalama çöküntü değeri ise sert numunede 22.26 mm iken, ise 36.80 mm olarak ölçülmüştür (Candan 2007).



Şekil 2.13 Preslenerek ve preslenmeden üretilen UHMW-PE'nin mermi testi (Candan 2007).

Giray ve Bailey (2019) UHMW-PE materyallerin parça tehditlerinde iyi olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, arka plan deformasyonunu azaltmak için ise aramid ile hibrid bir kask üzerine çalışmışlardır.

2.3.5 Karbon Fiber Üzerine Çalışmalar

Fiber takviyeli PMK'lar, yüksek mukavemetleri ve sertlikleri nedeniyle savunma sistemleri, havacılık, denizcilik ve otomotiv yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Mallick 2007, Turner vd. 2015). Karbon fiberler; yüksek mukavemeti, yüksek modülü, basınç dayanımı, kesme modülü karmaşık şekil üretimi, azaltılmış hurda, geliştirilmiş yorgunluk ömrü, genel olarak iyileştirilmiş korozyon direnci ve düşük yoğunluğu sebebiyle ön plana çıkmaktadır (Mlnus ve Kumar 2005, Scoutis 2005).

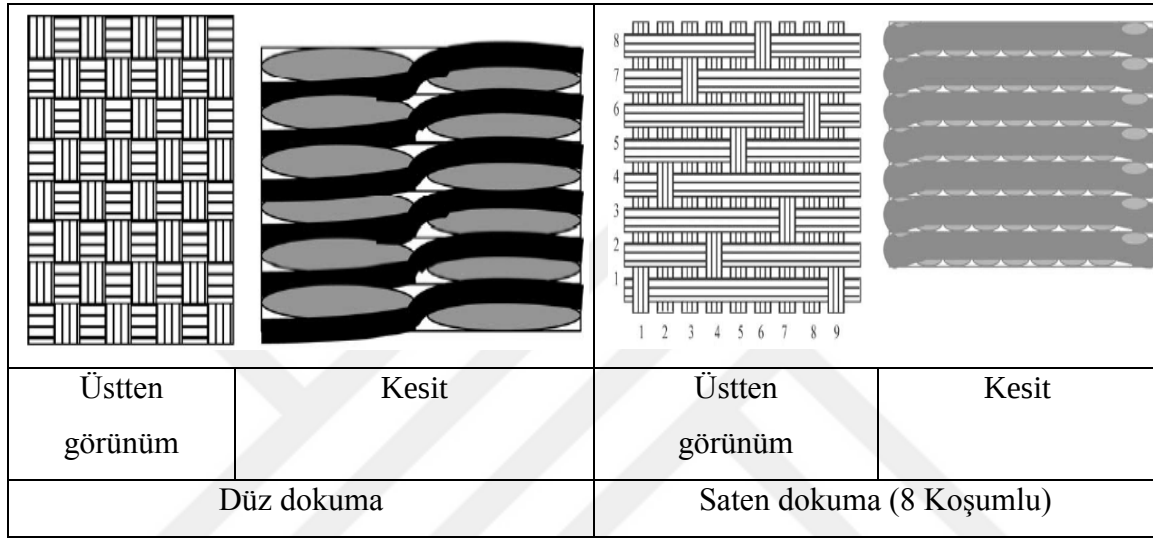
Metallerin yerine karbon fiber ile güçlendirilmiş polimerler kullanılarak önemli maliyet ve performans avantajları elde edilebilir. Deneyimler, gelişmiş kompozit uçak motoru bileşenlerinin mevcut metal parçalara göre % 20-30 maliyet ve ağırlık tasarrufu sağlayabileceğini göstermiştir (King 1997).

Karbon fiber kompozitler, önemli ağırlık tasarrufları elde edilebildiğinden uçak yapımı açısından önemlidir. Hafif metal alaşımları yerine kompozitler kullanılarak kanat ve gövde gibi yapılarda % 20, diğer yapılar için % 40'a yaklaşan ağırlık tasarrufu sağlanabilir. Polimer matrisli karbon fiber takviyeli kanatçık kutusu, metal ünitelerdeki 2 076 parçaya kıyasla, bağlantı elemanları hariç yalnızca 95 parçadan oluşur ve böylece üretimi kolaylaştırır (Soutis 2005).

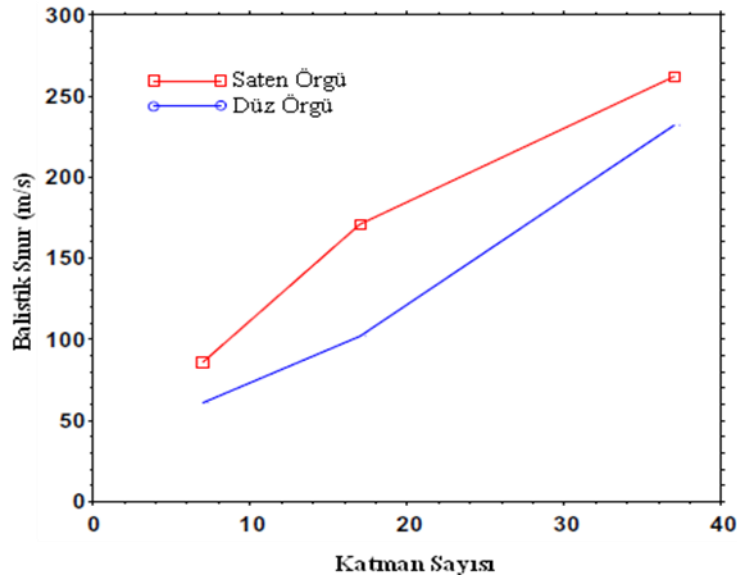
Bununla birlikte, karbon fiberin uygulamasını sınırlayan dezavantajları vardır. Düşük kırılma uzaması, düşük darbe direnci, yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek maliyet, karbon fiberin dezavantajlarıdır (Li vd. 2020, Patil ve Kadam 2017).

Duodu vd. (2018), küresel bir mermi ile karbon fiber epoksi kompozit ve çelik metal yapıların balistik etki davranışı sayısal olarak değerlendirmiştir. Sonuç, karbon epoksi kompozitin, çelik metal yapılara göre yüksek hızlı darbeleri yükleme koşullarında daha yüksek darbeye dayanabildiğini ve mükemmel enerji sönümleyici özellikler sergilediğini göstermiştir.

Hosur vd. (2004), yüksek hızda darbe yüklemesine tabi tutulan dikişli ve dikişsiz dokuma kumaş karbon epoksi kompozit laminatlar üzerine çalışmışlardır. Balistik sınır dikişsiz laminatlar için daha yüksek çıkmış, ayrıca laminat kalınlığının artması ile balistik limit artmıştır. Düz ve saten dokuma (Şekil 2.14) laminatlar için balistik limit, Şekil 2.15'te katman sayısının bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Saten dokuma laminatlar düz dokumalara göre daha yüksek balistik limitler sergilemiştir.



Şekil 2.14 Düz dokuma ve saten dokuma kumaş şematik görünümü (Hosur vd. 2004).



Şekil 2.15 Katman sayısı ve dokuma tipine göre balistik limitin değişimi (Hosur vd. 2004).

Grujicic vd. (2006) karbon fiber takviyeli epoksi (yüksek mukavemetli ve yüksek sertlikte) ve Kevlar elyaf takviyeli epoksi (yüksek süneklik ve yüksek toklukta) ile çeşitli kombinasyonlarda, farklı kalınlıklarda ve istifleme dizilerinde hibrit zırh imal etmiştir. Kompozit laminat zırhın balistik dayanımını, mermiyi simüle eden bir parça kullanarak, dinamik bir hesaplama analizi kullanarak araştırmıştır. Elde edilen sonuçlar, zırhın sabit bir kalınlıkta hem istifleme sırasının hem de laminat sayısının zırhın balistik performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Tanabe vd. (2003), 2 mm kalınlığındaki karbon fiber takviyeli plastikler (CFRP) ve ara yüzey özellikleri ile ilgili bir çalışma yapmıştır. CFRP'ler üzerine 150–314 m/s'de 5 mm çapında bir çelik küre ile test yapmışlar, enerji absorbe ölçümü ve morfolojik gözlemle, arayüz kuvvetinin ve özelliklerinin CFRP'lerin kırılma davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Arka katmanda, daha yüksek enerji emilimi için yüksek mukavemetli fiber kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

Chocron vd. (2019) hem malzeme bileşenleri hem de kompozit için kapsamlı bir deneysel çalışma yapmış, özellikle balistik etki altında, karbon fiber kompozitlerin, diğer materyallere (S-2 cam, Kevlar veya polietilen) kıyasla daha düşük performans gösterdiğini açıklamıştır.

Zhang vd. (2019), ticari olarak Nomex petek olarak bilinen fenolik reçine emdirilmiş aramid kağıt petekler ve epoksi reçineli karbon fiberleri içeren sert ve yumuşak kompozitlerin, balistik performansı, deformasyon durumları, enerji soğurma kapasitesini, 50 m/s ve 300 m/s mermi hızı aralığında deneysel olarak incelemiştir. Hibrit yapının düşük darbe hızında, hibrit olmayan numunelere göre ihmal edilebilir bir hasar aldığını bildirmiştir.

Bandaru vd. (2015), cam fiber, karbon fiber ve Kevlar fiberler ile güçlendirilmiş kompozitlerin farklı kombinasyonlarını üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada karbon fiber katman ile hibritlenen Kevlar kompozit laminatın en iyi balistik dirence sahip olduğunu

ve kompozitlerin tokluğunu artırarak balistik performansın iyileştirilebileceğini gösterilmiştir.

Karbon fiberler ile ilgili çalışma yapan Larsson ve Svensson (2002), hibrit numunelerde ön kısımda karbon fiber olmasının, balistik performans açısından uygun olacağını bildirmiştir.

Kacan ve Elaldi (2020), çarpma yönüne paralel konumlandırılan ve zırh çeliği plakaları ile sandviçlenen tek yönlü karbon fiber takviyeli epoksi tabakanın yüksek hızlı darbe tepkileri incelenmiştir. STANAG 4569 standardına göre seviye-4 koruma amaçlanmış, 911 m/s hızda 14,5 mm'lik zırh delici mermi ile testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlardan, küçük ve büyük panellere yapılan atışların hiçbirinin panelleri delemeyeği görülmüştür. Bu çalışmada, çok katmanlı karbon fiber takviyeli epoksi kompozit-zırhlı çelik hibrit yapının, eşdeğer homojen malzemeden daha az maliyetle daha hafif bir şekilde koruma sağlayabileceğini ortaya konmuştur.

2.3.6 Karbon Fiber ve UHMW-PE Üzerine Çalışmalar

Hibrit kompozitler, yüksek sertlik ve mukavemet sağlayabilir, darbe ve yorulma direncini artırabilir ve hafiflik avantajları gibi kazanımlar verebilirler (Safri vd. 2018). Karbon fiber takviyeli kompozitler, üstün mekanik özelliklerinden dolayı ticari uçaklar, spor ekipmanları, otomotiv yapıları gibi çeşitli yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel olarak yüksek özgül mukavemetleri ve modülleri nedeniyle son zamanlarda, araştırmacılar bu kompozitleri zırh uygulamaları için kullanma olasılığını da araştırıyorlar. Bununla birlikte, karbon kompozitlerin sınırlamaları düşük kopma uzaması ve kırılgenliktir, bu da onları çarpmanın neden olduğu düzlem dışı yüklere karşı daha duyarlı hale getirir (Reddy vd. 2020, Munoz vd. 2015, Reddy vd. 2017, Crouch vd. 2017). Aynı zamanda karbon fiberlerin basınç gerilimi de düşük olduğundan karbon lifleri, balistik son kullanım yetersizdir (Agrawal 2011).

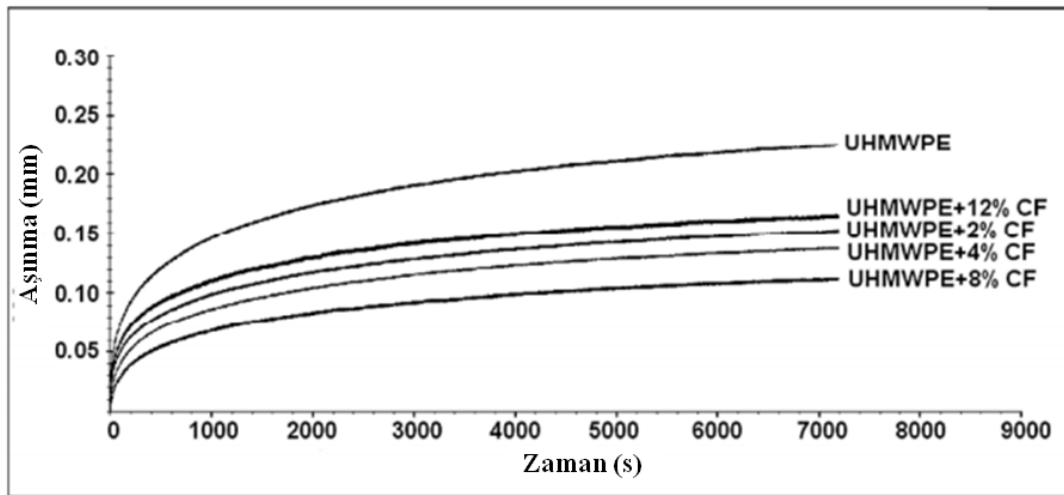
Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMW-PE), yüksek özgül mukavemet, kırılmaya karşı yüksek gerilme, yüksek elastik dalga hızı, daha iyi enerji soğurma

kapasitesi gibi benzersiz özelliklere sahiptir (Van der Werff ve Heisserer 2016). Aynı zamanda, UHMW-PE'nin düşük sertlik, elastisite modülü, sünme deformasyonu, düşük sürtünme katsayısı, düşük erime noktası, zayıf ısıl direnci, zayıf kesme ve sıkıştırma özellikleri gibi bazı özellikleri yapısal kompozit uygulamalarında sınırlamalara neden olur (Kurtz 2009, Peijs vd. 1994, Marrisen 2011, Lu vd. 2006).

Karbon fiberlerin UHMW-PE fiberlerle hibritlenmesi, gerilme mukavemeti, basınç dayanımı ve darbe mukavemeti açısından iyi bir denge sağlayabilir (Li vd. 1999, Cao vd. 2019, Reddy vd. 2020).

UHMW-PE ve karbon fiber hibrit kompozitlerin balistik ve mekanik özellikleri ile ilgili literatürde birçok çalışma vardır.

Chukov vd. (2015) UHMW-PE ve karbon fiber hibrit kompozitlerin, aşınma oranları ve sürtünme katsayıları bir tribometre ile ölçülmüştür. Bir disk ile aşındırılan mumunenin, tribometre ile otomatik olarak kaydedilen test öncesi ve sonrası yüksekliği arasındaki fark olarak ölçüldü. Karbon liflerle takviye, aşınmayı önemli ölçüde azaltmış, en düşük aşınma, ağırlıkça % 8 CF'ye sahip kompozitte elde edilmiştir (Şekil 2.16).

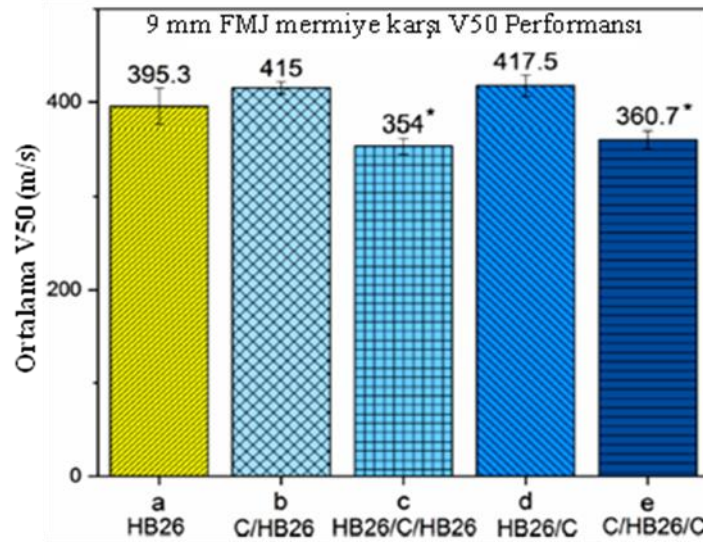


Şekil 2.16 Kompozitlerin aşınma-zaman grafiği (Chukov vd. 2015).

Lia vd. (1999) UHMW-PE ve karbondan üretilen hibrit kompozit plakaların mekanik davranışlarını incelemiştir. UHMW-PE kompozitlere orta miktarda karbon fiber ilavesinin sıkıştırma ve eğilme davranışlarına katkı sağladığı görülmüştür.

Kulkarni vd. (2013) geleneksel kask malzemelerinin (Kevlar K29, K129 elyafları ve termoset polimerleri gibi) ve yeni malzemelerin (UHMW-PE, termoplastik polimerler, nanokompozitler ve karbon nanotüp gibi) balistik performans, ağırlık, gerilme özellikleri, üretim kolaylığı, maliyet etkinliği ve çevresel kaygılar açısından detaylandıkları çalışmada, UHMW-PE / karbon fiber kompozitlerin, mevcut kasklarda kullanılan kompozitlere göre daha düşük ağırlıkta daha yüksek balistik koruma sağladığı görülmüştür.

Folgar (2016) kask çalışmalarında, UHMW-PE malzemeden imal edilen balistik kompozit numunelerin çöküntü miktarını azaltmak için, karbon fiber ile birleştirmenin uygun olacağını belirtmiştir.



Şekil 2.17 V50 balistik limit performansının karşılaştırma ((a) Sadece HB26, (b) ön yüzlü karbon fiber kompozit katman hibrit, (c) orta karbon fiber kompozit katman hibrit, (d) arka yüzlü karbon fiber kompozit katman hibrit ve (e) ön-arka karbon fiber kompozit katman hibrit) (Zulkifli 2019).

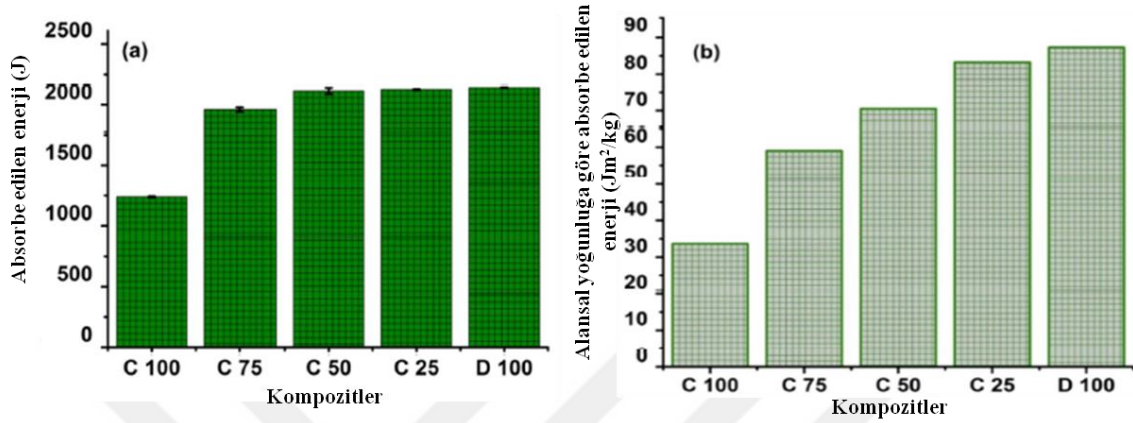
Zulkifli vd. (2019) UHMW-PE ve epoksi reçineli karbon fiberleri kullanarak, hibrit sert balistik kompozit plakalar üzerine bir çalışma yapmıştır. Üretilen plakalarda, karbon fiberli kumaşları, UHMW-PE kumaşların ön, orta ve arkalarına yerleştirmek suretiyle

farklı pozisyonlarda birleştirilmiş ve bu dizilimlere göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Sadece UHMW-PE panel konseptine kıyasla iki karbon fiber kompozit tabakanın eklenmesinin (özellikle ön arka hibrid için) eğilme mukavemetinde yüksek bir iyileşme sağladığı görülmüştür. Çalışmanın devamında; UHMW-PE ve karbon fiber hibritlerin farklı dizilimlerde birleştirilerek BFS değerleri karşılaştırılmış, ortada karbon kullanılan numune tamamen delinmiş, dışa eklenen karbonlar ise balistik özelliklerde iyileşmeye neden olmuştur. Şekil 2.17’de görüldüğü gibi, ön ve arkaya karbon eklenen UHMW-PE numunelerin V50 performansında % 5’lik bir artış, ortada karbon fiber olan çalışmada %12 eksilme, ortada UHMW-PE kumaşta ise % 10 eksilme görülmüştür. Bu nedenle, balistik ve yapısal olarak zorlu ortamlarda UHMW-PE içeren panellerin tasarlanması sırasında, sert-plakanın dış katmanlarına birkaç karbon kompozit katmanı ilave edilmesinin uygun olacağı belirtilmiştir (Zulkifli 2019).

Reddy vd. (2020), değişken hacim oranlarında, C 75, C50 ve C25 (C, karbonu belirtir ve sayı, kompozitin karbon hacmini temsil eder) koduyla üç hibrit kompozit imal etmiştir. Karşılaştırma için, sadece karbon (C 100) ve sadece UHMW-PE (D 100) laminatları da hazırladılar. Kompozit laminatların kalınlığı 24 ile 25 mm arasında tutuldu. Hibrit kompozitlerin her biri $7,62 \times 39$ mm yumuşak çelik mermiden 730 ± 10 m/s çarpma hızında balistik darbeye maruz bırakıldı. Balistik deneylerde, C 100 ve C 75 kompozitleri mermi tarafından tamamen delinirken, C 50, C 25 ve D 100 kompozitleri tarafından mermiler durdurulmuştur. Hibrit kompozitler tarafından emilen enerji Şekil 2.18’de gösterilmektedir. C 100 laminat, yaklaşık 1240 J enerji absorbe ederken, D100 kompozitleri 2100 J’lük enerji absorbe etmiştir.

Hibrit kompozitlerin enerji absorpsiyonunu karşılaştırmak için, spesifik enerji yoğunluğu (SED) yani alan yoğunluğu başına absorbe edilen enerji belirlenmiştir. Şekil 2.18 b’den, D 100’ün en yüksek SED değerine sahip olduğu ve C 25’in ona yakın performans gösterdiği görülmektedir. C 100, C 75 ve C 50 laminatların özgül enerji yoğunluklarının D 100’den sırasıyla % 60, % 30 ve % 20 daha düşük olduğu bulunmuştur. C 25’in enerji emilimi, maksimum tümsek yüksekliği ve tümsek büyüme oranına dayalı olarak, zırh uygulamaları için Dyneema’ya göre daha ucuz bir seçenek

olabileceği açıklanmış, bu hibrit kompozitlerin, hafif zırh ve yapısal uygulamalar için etkili malzemeler olabileceği bildirilmiştir (Reddy vd. 2020).



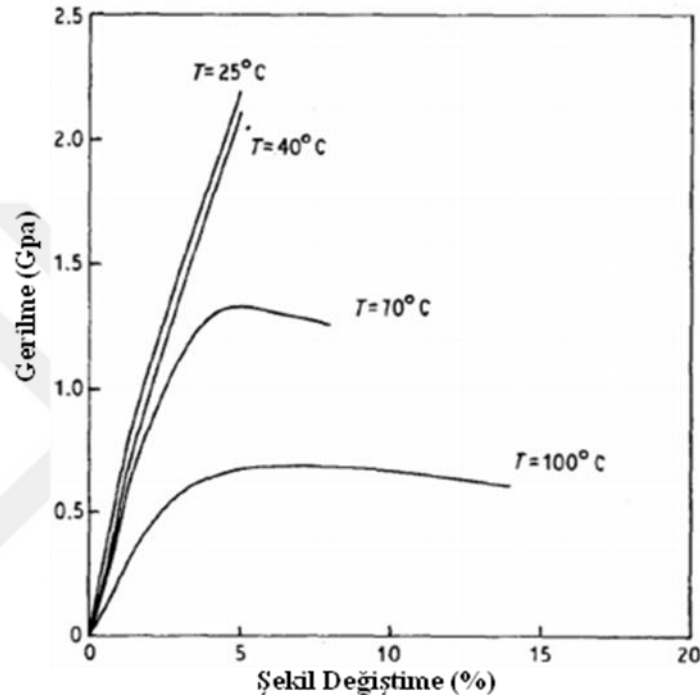
Şekil 2.18 Absorbe edilen ve alansal yoğunluğa göre absorbe edilen enerji miktarları (Reddy vd. 2020).

2.4 Çevresel Şartlandırma

Kompozit ürünlerin çevresel şartlandırmaları ile ilgili literatürde birçok çalışma olmasına rağmen, balistik kompozit ürünlerin şartlandırılmasına dair sınırlı çalışma yapılmıştır (Yang ve Chen 2017). Ortam sıcaklığı diğer malzemeler gibi UHMW-PE'nin balistik performansını etkilerken, mekanik özelliklerini de etkilemektedir. Dinamik koşullar altında farklı sıcaklıklarda UHMW-PE'nin gerilme-uzama eğrileri karşılaştırıldığında, UHMW-PE'nin akma gerilmesi ve elastik modülünün gerilme hızı arttıkça arttığı, sıcaklık arttıkça azaldığı bulunmuştur (Zhang vd. 2020).

Zhang vd. (2020) UHMW-PE'nin mekanik özellikleri üzerindeki sıcaklık ve şekil değiştirme oranı etkilerini araştırmak için, UHMW-PE üzerinde tek eksenli sıkıştırma deneyleri yapmış, gerilme-şekil değiştirme eğrileri 20-100 °C sıcaklıklarda elde etmiştir. Dinamik koşullar altında farklı sıcaklıklarda UHMW-PE'nin gerilme-uzama eğrileri karşılaştırılmış, UHMW-PE'nin akma gerilmesi ve elastisite modülünün sıcaklık arttıkça azaldığı görülmüştür.

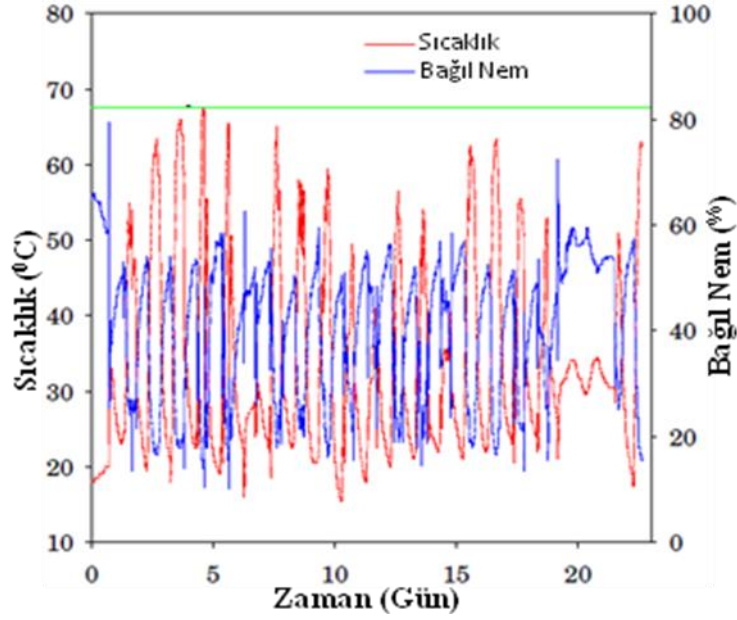
Dessain vd. (1992) değişen sıcaklığa bağlı olarak UHMW-PE liflerinin (Dyneema SK60) şekil değiştirmesinin oldukęa arttığını bildirmişlerdir. Bu sonuçlar, belirli sıcaklık ve uygulanan gerilme altında malzemenin iç yapısında meydana gelebilecek bir değişiklik ile açıklanmıştır. şekil 2.19'da gösterildiği gibi, gerilme mukavemetinin ve elastisite modülünün artan sıcaklıkla azaldığı, 100 °C'de yapılan çalışma için en düşük duruma geldiği görölmektedir.



şekil 2.19 UHMW-PE liflerinin sıcaklığa bağlı gerilme-şekil değiştirme grafiği (Dessain vd. 1992).

Forster vd. (2009) zırh giyme ortamlarını tartışmış ve memurların genellikle zırhları arabalarının bagajlarında sakladıklarını ve zırhların ölke çapında kamyonlarla taşındığını gündeme getirmiştir. Bununla birlikte, bir aracın içindeki sıcaklık ve bağlı nem mevsime, ölkenin coğrafi bölgesine ve aracın içindeki konuma bağlı olarak büyük ölçüde değişebileceği dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında, balistik vücut zırhı ile ilgilenen, bu konuda uzmanlığa sahip olan kolluk kuvvetleri ve diğer görevlilerinden oluşan farklı gruplara evrensel seri veri yolu (USB) ile okunabilir sıcaklık ve bağlı nem veri kaydedicileri verilerek, Amerika Birleşik Devletleri'nin dört bir yanına dağıtılmış, kişisel araçlarının içine yerleştirilmiştir. Temmuz 2006'da Maryland'de 67 °C civarında, 2007 yazında California ve Illinois'de de 63 °C civarında yüksek bir sıcaklık elde

edilmiştir. Temsili araç verilerinin bir örneği Şekil 2.20'de gösterilmektedir (Forster vd. 2009).



Şekil 2.20 Temsili Araç Sıcaklığı ve Bağıl Nem Verileri (Forster vd. 2009).

Aynı çalışmada UHMW-PE sisteminde, 80 °C'nin polimer içindeki moleküler hareketin artmaya başladığı gevşeme sıcaklığı olarak belirtilmiştir (Forster vd. 2009).

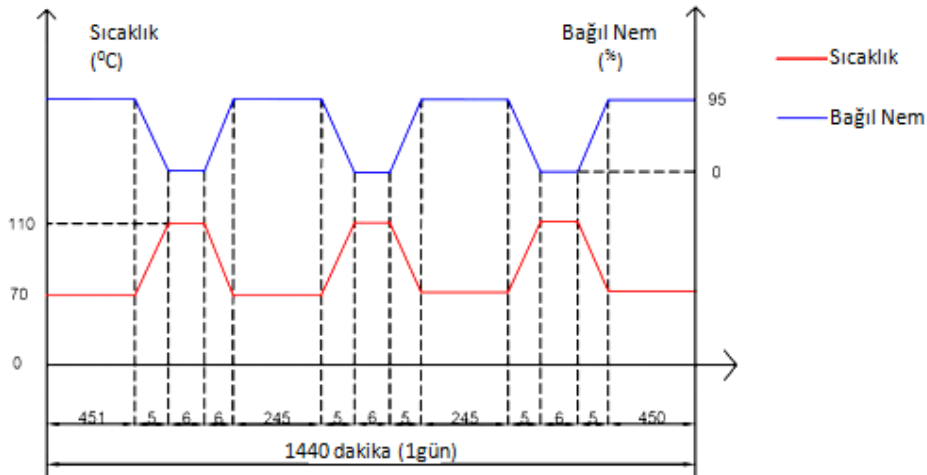
Balistik uygulamalar için UHMW-PE elyaf üreticisi olan DSM Dyneema, 2007 yılında UHMW-PE elyafları için 35 °C ile 65 °C arasında Arrhenius ilişkisi ile yapay bir yaşlandırma çalışmasının sonuçlarını yayınlamıştır. Deneyler 70 °C'nin altındaki sıcaklıklarla sınırlamanın nedeni, çalışmalar sırasında liflerde yeni bozunma mekanizmalarını engellemek olarak açıklanmıştır (Chabba vd. 2007).

Chabba vd. (2007), Dyneema SB21, SB31 ve SB61 kompozitlere, 8 hafta boyunca 65 °C'de ve % 80 bağıl nemde hızlandırılmış yaşlandırma işlemi uygulayarak V50 hızındaki göreceli değişikliği araştırmıştır. Tüm tek yönlü (UD) malzemelerin, 8 haftalık hızlandırılmış yaşlandırma sonrasında V50 performanslarını korumuştur. Sonuçlar, Arrhenius denklemi ışığında hem UHMW-PE bazlı Dyneema ipliğinin, hem de UD malzemelerinin 35 °C'de 5 yıl boyunca gerilme özelliklerini ve balistik (V50) performansını koruduğunu kanıtlamıştır.

Sapozhnikov vd. (2015) UHMW-PE ve aramid kompozitlerin parçacık tesirine karşı korumasını araştırmışlardır. Deneysel veriler, -60°C ila $+60^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında Dyneema kompozitleri için V50 değişiminin ihmal edilebilir olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte veriler, -60°C 'de bir dağılımla karşılaşıldığını göstermiştir. Bu gözlem, sıcaklığın oda sıcaklığından -60°C 'ye düşmesi sırasında termoplastik matrisin akma gerilimindeki keskin düşüşe atfedilmiştir.

Khojin vd. (2007), karbon fiber- kevlar kompozit sandviçin darbe altında farklı sıcaklıklarda terminal değişimi üzerine çalışmışlardır. Bu kompozit sandviçlerin -50°C ile 120°C arasında düşük hız darbe testlerine göre, darbe performansının sıcaklıklara göre değiştiği gösterilmiştir. Ayrıca, arka yüzey hasarının sıcaklıkla önemli ölçüde değiştiği, en fazla hasar alanı ile lif kırılmasının -50°C 'de meydana geldiği ve artan sıcaklık ile hasar alanı ve lif kırılmasının azaldığı gösterilmiştir.

Wang vd. (2014), karbon fiber epoksi kompozitlerin yüksek sıcaklık altında (110°C civarında) kürlenme ve tabaka içi makaslama mukavemeti özelliklerini incelemiştir. Karbon fiberlerle güçlendirilmiş epoksiler sırasıyla 100, 240, 480, 720, 960, 1200 saat yaşlandırıldı. Sonuçta, yaşlandırmadan sonra tabaka içi makaslama mukavemeti, 480 saatte maksimum değere ulaşırken, 720 saatten sonra hızlıca azalmaya başlamıştır. Bu çalışma ile karbon fiberlerin muhteşem yaşlandırma dayanımı olduğu görülmüştür.



Şekil 2.21 Hızlı yaşlandırma çevrimi (Liu vd. 2020).

Liu vd. (2020) karbon fiber epoksi reçineli kompozitlerin sıcaklık ve bağıl nemle yaşlandırılması üzerine çalışmışlardır. Pekin ve Guangzhou'nun ortalama sıcaklık ve nem değerlerine göre belirlenen (Şekil 2.21) çevrimle yaşlandırma işlemi yapmışlardır. Yaşlandırma sonunda balistik test sonuçları Çizelge 2.7’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, enerji Emilimi, 0'dan 70 döngüye kadar keskin bir şekilde arttığı ve sonra 280 çevrime kadar balistik özelliklerin yavaş yavaş azaldığını gösterilmiştir.

Çizelge 2.7 Balistik test sonuçları (Liu vd. 2020).

Numune Adı	Yaşlandırma Çevrim Sayısı	Mermi Ağırlığı (g)	Absorbe Edilen Enerji (Joule)
C0-1	0	13.3	33.9
C0-2		14.9	56.5
C0-3		14.8	64.5
C0-4		14.2	63.0
C14-1	14	14.0	44.6
C14-2		13.9	67.5
C14-3		14.6	75.5
C14-4		14.2	75.3
C42-1	42	14.7	41.1
C42-2		14.7	91.5
C42-3		14.3	76.8
C42-4		14.3	76.3
C70-1	70	14.2	45.1
C70-2		14.2	100.1
C70-3		14.2	87.1
C70-4		14.2	74.0
C140-1	140	14.3	42.3
C140-2		14.2	96.8
C140-3		14.3	85.4
C140-4		14.2	81.1
C210-1	210	14.2	51.9
C210-2		14.2	85.4
C210-3		14.2	82.4
C210-4		14.2	77.8
C280-1	280	14.2	52.7
C280-2		14.2	74.6
C280-3		14.2	74.2
C280-4		14.2	73.3

3. MATERYAL – METOD

3.1. Zırhlarda Kullanılan Kompozit Malzemeler

Yapılan çalışmalarda iki farklı kompozit malzeme kullanılmıştır. Kullanılan malzemeler polimer matrisli malzemelerdir. Bu malzemeler,

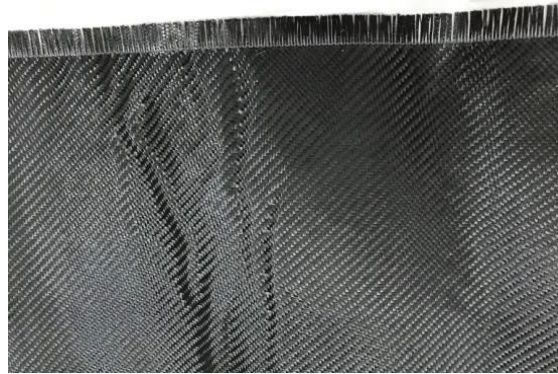
- a) Ultra yoğun moleküler ağırlıklı polietilen (UHMW-PE),
- b) Epoksi reçineli karbon fiber prepreg (ERKFP)'dir.

UHMW-PE' nin cinsi en az % 99,5 yoğun moleküler ağırlıklı polietilen malzemedir. Malzemedeki birbirine paralel olarak yatırılan ipliklerden oluşan katmanlar sırasıyla 0 (sıfır) ve 90 (doksan) derecelik açılarla üst üste yatırılmasıyla oluşturulmuştur. Herhangi bir örgü bulunmamaktadır. Kullanılan kumaşın metrekare ağırlığı $245 \pm 15 \text{ g/m}^2$ 'dir. Kullanılan kumaşa ait görsel Resim 3.1'de gösterilmiştir.



Resim 3.1 UHMW-PE kumaşlara ait fotoğraflar.

ERKFP kumaşa ait görsel Resim 3.2'de gösterilmiştir. ERKFP'de kullanılan fiber tipi karbondur.



Resim 3.2 ERKFP kumaşlara ait fotoğraflar.

ERKFP’de matris malzemesi olarak epoksi kullanılmıştır. Malzemenin ideal kürlenme sıcaklığı 90  C - 140  C arasındadır. Malzemenin dokuma tipi ise twill’dir. Kullanılan kuru kumaşın alansal yoğunluğu 200 g/m²’dir. Ağırlık olarak reçine yoğunluğu % 35’dir.

3.2 Metod

3.2.1. Üretim Yöntemi

Balistik deneylerde kullanılan kompozit malzemelerin tamamı, sıcaklık ve basınç ile şekillendirilerek elde edilen zırh plakalarıdır.

 lk olarak kullanılan kumaşlar, masaya serilerek görsel olarak herhangi bir hata olup olmadığı gözle kontrol edilmiştir. Uygun olan kumaşlar, daire kesim motoru kullanılarak kesim işlemi yapılmıştır. Kullanılan kumaşların eni ve boyu 1 metre olarak ayarlanarak kesim yapılmıştır. UHMW-PE’lerin kesiminde 25 kat üst üste serilerek tek seferde kesim gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kumaşların kesimi Resim 3.3’te gösterilmiştir.



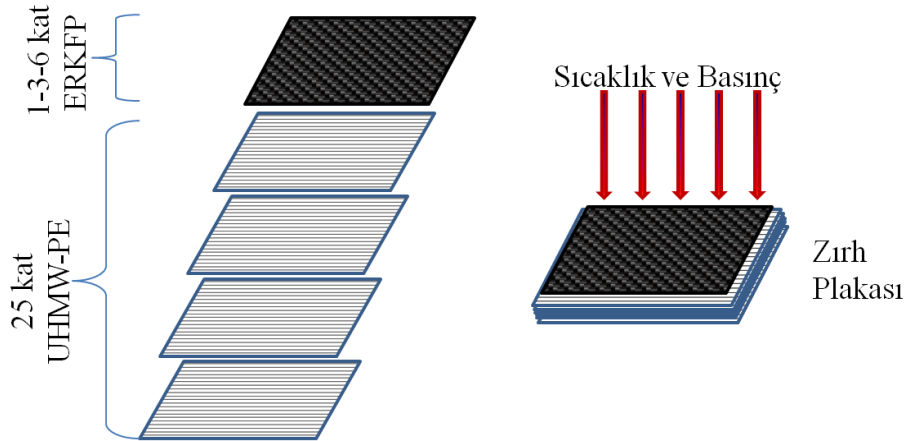
Resim 3.3 Kompozit kumaş kesimi.

Kumaş kesim işlemi bittikten sonra malzemeler istenilen konfigürasyona göre sıralanarak düz olacak şekilde kalıba yerleştirilmiştir. Presleme esnasında, ilk olarak kalıplara (sıralanan kompozitler ile birlikte) ortam sıcaklığından başlayarak 125 °C'ye kadar ön ısıtma yapılmıştır. Sonrasında sıcaklık ve basıncı ayarlanabilen, Resim 3.4'te fotoğrafı verilen 600 ton kapasiteli pres ile üretim yapılmıştır.



Resim 3.4 600 Tonluk hidrolik prese ait fotoğraf.

UHMW-PE ve ERKFP kompozitlerin dizilişi ve preste basımı Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Kompozitler, alt kısma UHMW-PE, üst kısma ERKFP gelecek şekilde prese yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Kumaşların diziliş şekli.

Kumaşın presleme işleminde, basıncın tespiti denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$F=600 \text{ ton} =600\ 000 \text{ kg}$$

$$A=1 \text{ m}^2$$

$$A=10\ 000 \text{ cm}^2$$

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

P: Basıncı (kg/cm²)

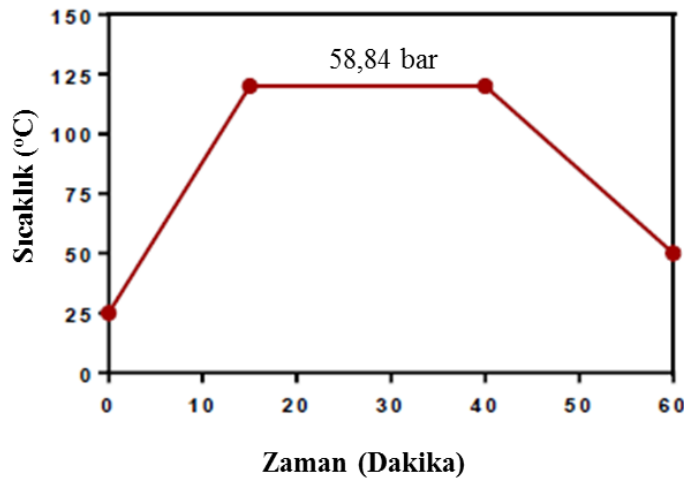
F: Basıncı kuvveti (kg)

A: Alan (cm²)

$$P=60 \text{ kg/cm}^2$$

$$P=58,84 \text{ bar}$$

Numunelere 58,84 bar basınç yüklemesi yapılmıştır. Bu yükleme 25 dakika süre ile devam etmiştir. Tam basınç verildikten sonra numune 50 °C'ye kadar soğutulmuştur. Preslemede kullanılan sıcaklık zaman grafiği Şekil 3.2'de verilmiştir. Şekilde belirtilen ısıtma ve soğutma zamanları presin durumu ile ortam sıcaklığına bağlı olarak her preslemede az miktarlarda değişebilmektedir.



Şekil 3.2 Presleme işleminde uygulanan sıcaklık- zaman grafiği.

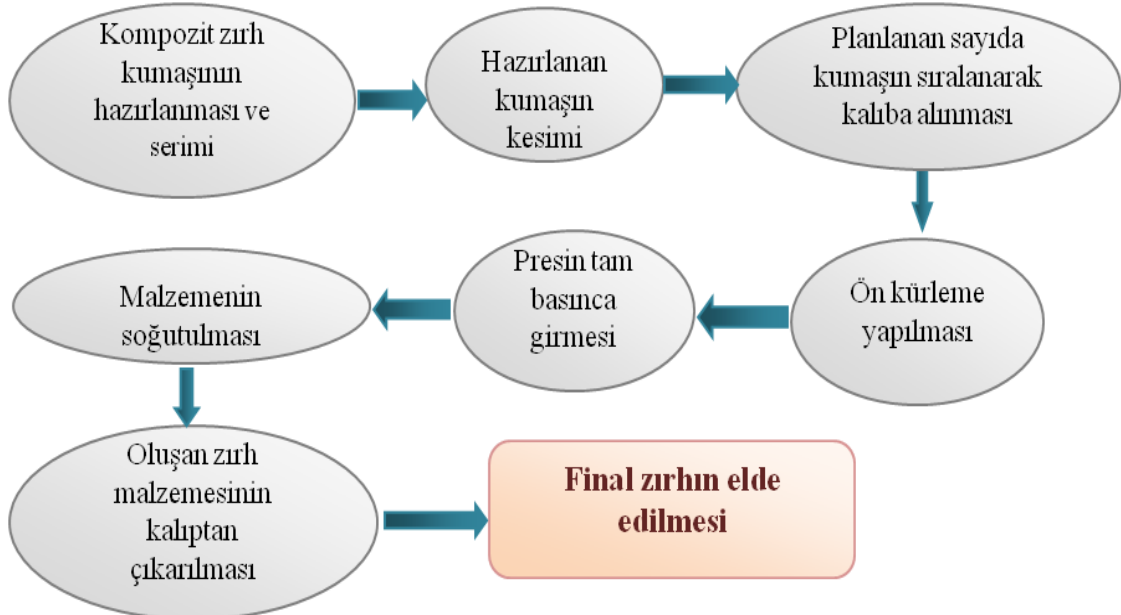
Kalıptan çıkan 1 m² alanlı (en: 1m, boy: 1m) olan plakalar ortam sıcaklığında en az 24 saat bekletildikten sonra 1600 cm² alanlı (eni ve boyu 40 cm) olacak şekilde

Resim 3.5'de fotoğrafı verilen şerit testere ile 4 eşit parçaya bölünmüş ve ardından kenar temizliği yapılmıştır. Bu şekilde nihai ürün elde edilmiştir.



Resim 3.5 Şerit testere ile zırhların kenar temizliği.

Balistik testlere tabi tutulacak zırhların özet üretim akış döngüsü Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

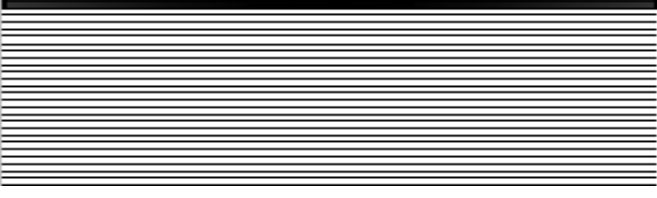


Şekil 3.3 Kompozit plakaların üretim akış şeması.

3.2.2 Üretimi Yapılan Zırh Konfigürasyonları

Belirtilen üretim yöntemi kullanılarak, 4 farklı tipte numuneler imal edilmiştir. İlk olarak 25 kat UHMW-PE kompozit üretimi yapılmıştır. Sonrasında da 25 kat UHMW-PE kompozite sırasıyla, 1, 3 ve 6 kat ERKFP eklenerek hibrit zırh numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin temsili kesit görüntüleri çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Numune tiplerinin temsili kesit görüntüleri.

Numune Tipi	Temsili Kesit resmi
25 kat UHMW-PE	
25 kat UHMW-PE + 1 kat ERKFP	
25 kat UHMW-PE + 3 kat ERKFP	
25 kat UHMW-PE + 6 kat ERKFP	

Üretimi yapılan numunelerden, 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP içeren numuneye ait fotoğraflar Resim 3.6’da gösterilmiştir.



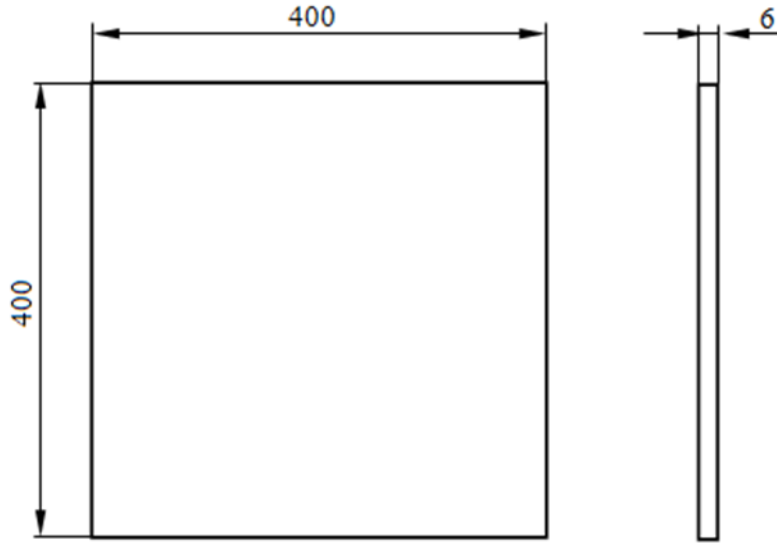
a) Önden



b) Yandan

Resim 3.6 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP içeren hibrit numuneye ait fotoğraflar.

Üretimi yapılan zırh plakalarına ait teknik resim Şekil 3.4’te gösterilmiştir. Verilen ölçüler sadece 25 kat UHMW-PE içeren numuneye aittir. Ölçüsü 6 mm verilen et kalınlığı, eklenen ERKFP katsayısına göre değişiklik göstererek bir miktar artmaktadır.



Şekil 3.4 Üretimi yapılan plakaların teknik resmi.

3.2.3 Sıcak ve Soğuk Şartlandırma

Türk Standartları Enstitüsünün TS11843 numaralı, “Çevre Şartları Deney Yöntemleri ve Mühendislik Kuralları - Yüksek Sıcaklık Deneyi (Askeri Amaçlı)” başlıklı standardında, Türkiye ile ilgili kısımda (Orta Asya’nın güneyi ve güney batısı,

Türkiye'nin güneyi, ortalama hava sıcaklığı olarak $+30^{\circ}\text{C}$ ve $+43^{\circ}\text{C}$ aralığında olduğu belirtilmiştir. Aynı standartta tesir ile hasıl olan ortam sıcaklığı (aşırı depolama ve nakliye koşullarında) ise $+30^{\circ}\text{C}$ ve $+63^{\circ}\text{C}$ olarak verilmiştir (TSE 2016). Yapılan bu çalışmada ise malzemeler $+70^{\circ}\text{C}$ 'de şartlandırılmıştır.

Türk Standartları Enstitüsünün TS11703 numaralı, "Çevre Şartları Deney Metotları Ve Mühendislik Kuralları - Düşük Sıcaklık Deney Metodu (Askeri Amaçlı) başlıklı standartta, Türkiye ile ilgili kısımda, düşük sıcaklık ortam hava sıcaklığı -21°C ve -31°C olarak gösterilmiştir. Depolama ve nakliye koşullarında öngörülen düşük ortam sıcaklığı ise -25°C ve -35°C arasında olduğu belirtilmiştir (TSE 2013). Bu çalışmada ise malzemeler -35°C 'de soğuk şartlandırmaya tabi tutulmuştur.

Sıcak şartlandırma Nüve marka KD 200 fırında yapılmıştır. Fırına ait fotoğraf Resim 3.7'de gösterilmiştir.



Resim 3.7 Şartlandırmanın yapılacağı fırına ait fotoğraf.

Cihaz ortam sıcaklığı ile 80 °C arasında ayarlanabilen sıcaklık değerine kadar ısıtılabilmekte ve belirtilen toleranslar dahilinde stabil sıcaklıklar oluşturabilmektedir. Ayrıca istenildiğinde bu sıcaklıklara eriştikten sonra ayarlanan sürede bu sıcaklıkta bekleyerek süre bitiminde ısıtma işlemini durdurabilmektedir.

Cihaz kullanılır hacmin dış yüzeylerine yerleştirilmiş ısıtıcı plakalar yardımıyla üç yüzeyinden ısıtılarak homojen bir sıcaklık dağılımı oluşturmaktadır. Mikro işlemci termostat-termometre ile hassas sıcaklık kontrolü ve ayarlanabilir emniyet termostatu ile de güvenli bir çalışma sağlamaktadır. Fırına ait teknik özellikler Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Nüve KD200 fırına ait teknik özellikler.

Sıcaklık çalışma Sınırı	Ortam Sıcaklığı/ 80 °C
Sıcaklık Hissedicisi	Fe-Const
Termostat Ayar Hassasiyeti	0,1 °C
Termostat Çalışma Hassasiyeti	±0,1 °C
Termostat okuma Hassasiyeti	0,1 °C
Sıcaklık Dağılımı (40 °C’de)	±0,5 °C
Zaman Ayarı	100 saat- Süresiz çalışma
Zamanlama	Ayar sıcaklığa ulaşınca
Emniyet Sistemi	Gaz genleşmeli termostat
Güç Değerleri	220 V, 50 Hz
Kullanılır Hacim	120 dm ³
Raflar	2 adet
İç Ölçüler (mm)	500 X 490 X 500
Net Ağırlık (Kg)	51

Soğuk Şartlandırma için ise, 220 V ve 50 Hz ile çalışan Siemens markalı derin dondurucu kullanılmıştır. Soğuk şartlandırmada kullanılan cihaz Resim 3.8’de gösterilmiştir.



Resim 3.8 Derin dondurucuya ait fotoğraf.

Şartlandırma uygulamasında; 4 farklı konfigürasyonda üretilen numuneler (**i.** 25 kat UHMW-PE, **ii.** 25 kat UHMW-PE+ 1 kat ERKFP, **iii.** 25 kat UHMW-PE + 3 kat ERKFP, **iv.** 25 kat UHMW-PE + 6 kat ERKFP) ayrı ayrı sıcak ve soğuk şartlandırılmaya maruz bırakılmıştır.

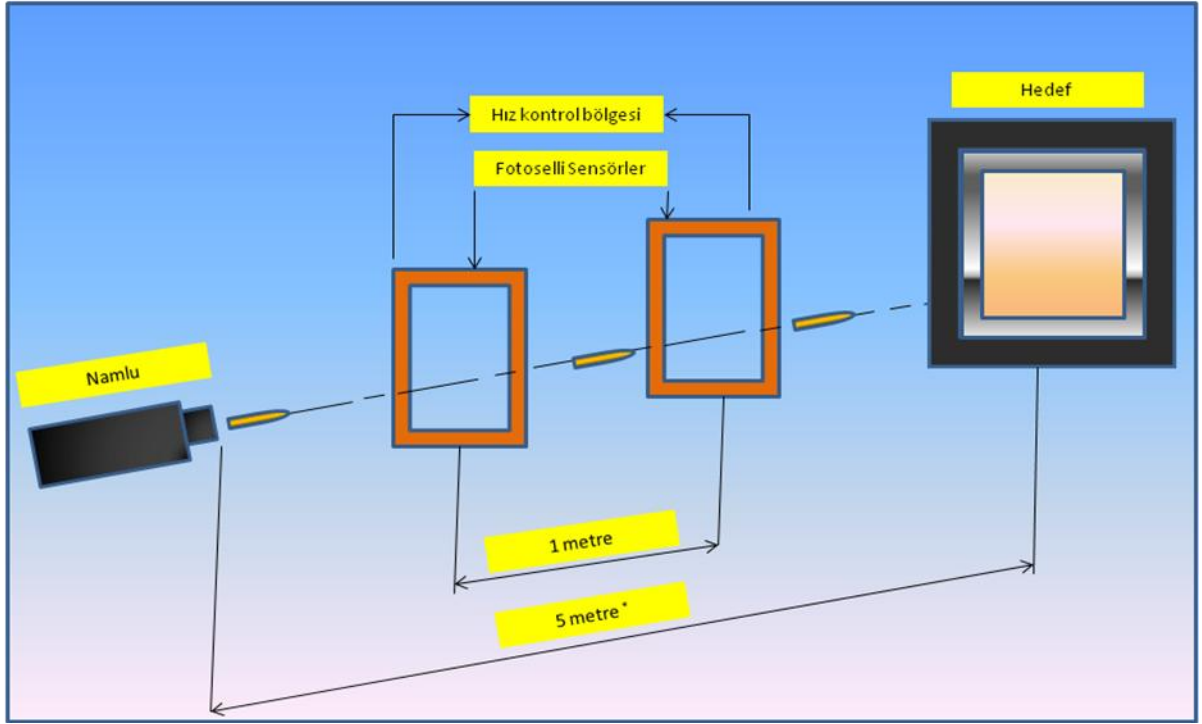
İlk olarak her numune oda sıcaklığında 24 saat bekletilerek testler yapılmıştır. Daha sonra, Nüve KD200 Fırın ile +70 °C 'de 24 saat bekletilerek atışlar yapılmıştır. Son olarak da, -35 °C 'de 24 saat şartlandırılan numuneler balistik ve mekanik testlere tabi tutulmuştur.

3.2.4 Balistik Testler

Zırhların balistik dayanımlarını ölçmek amacıyla dünyada farklı standartlar kullanılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında NIJ 0101.04 ve STANAG 2920’ye göre testler yapılmıştır.

3.2.4.1 NIJ 0101.04 Vücut Zırhının Balistik Direnci

Amerikan Adalet Enstitüsü (NIJ) tarafından hazırlanan bu standardın amacı, silah ateşine karşı korunmayı amaçlayan kişisel vücut zırhının balistik direnci için minimum performans gereklerini ve test yöntemlerini oluşturmaktır. Bu amaçla kullanılan test düzeneği, atışın gerçekleştiği hareket etme özelliğine sahip namlu, mermi hızını ölçen hız tüneli ve test yapılacak numunelerin bağlandığı hedef kısmından oluşur. Hedefle, sabit namlunun arasında bulunan Oehler Research Model ORM 55 model hız ölçer ile ölçümler yapılmıştır (NIJ 2001). Test alanının temsili görüntüsü şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Balistik test düzeneği (* Yapılacak testin seviyesine göre değişiklik göstermektedir.).

Şekil 3.5'te hedef ile namlu arasında bulunan (5 m) mesafe testin seviyesine göre değişmektedir. Bu çalışma kapsamında kullanılacak standartlar için bütün testlerde 5 m mesafe kullanılmıştır. Namlu düzeneğinin alt kısmında bulunan raylı bir araba veya farklı sistemlerle mesafeler ayarlanabilmektedir.

Hedefin arka kısmına, zırh malzemesine çarpan bir mermi ya da parçacığın delme ya da delmeme durumuna göre arka yüzeyde oluşacak deformasyonu ölçmek maksadıyla

insan tenini simüle eden, standartlarda Roma plastiline kili olarak tarif edilen ve resim 3.9’da görseli verilen cam macunu benzeri bir ürün yerleştirilmektedir.



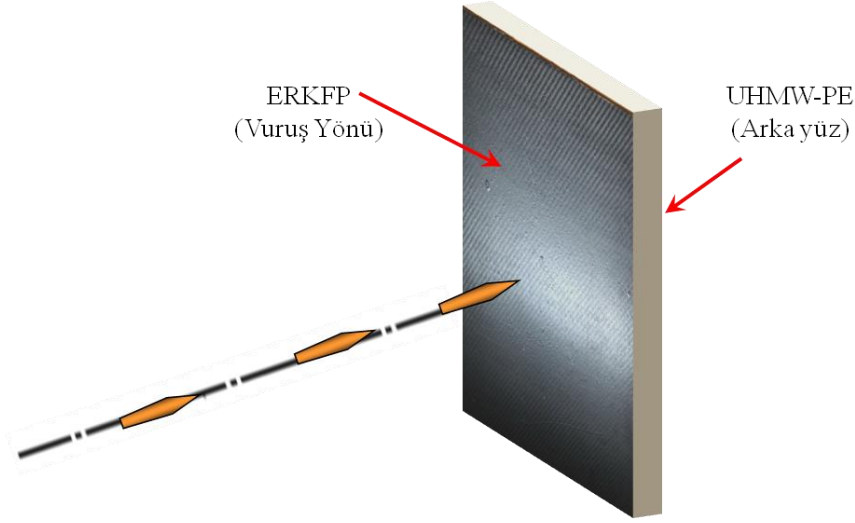
Resim 3.9 Arka kısım malzemesi ve yerleştirilmesi.

Balistik test yapıldıktan sonra arka tarafta meydana gelen çöküntü ve çöküntünün ölçülmesine ait fotoğraf Resim 3.10’da gösterilmiştir. Arka tarafta meydana gelen deformasyon, oluşan çöküntünün maksimum noktasının kumpas yardımıyla ölçülmesi ile hesaplanır. Zırhta delinme gerçekleşmemişse, deformasyon ilgili standartta belirtilen sınırlar dahilinde ise zırhın uygun olduğu belirtilir.



Resim 3.10 Arka kısım dolgu malzemesinde meydana gelen deformasyon.

ERKFP içeren numunelerde vuruş yönü, literatürde yapılan çalışmalar da (Cuniff 1992, Park vd. 2013, Kedzierski vd. 2016, Yang ve Chen 2017) göz önüne alınarak, balistik performans açısından daha faydalı olabilmesi için, ERKFP olan taraftır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Zırhların vuruş yönleri.

NIJ 0101.04 standardında farklı tehdit seviyeleri tanımlanmıştır. Bu seviyeler çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 NIJ 0101.04 standardına göre tehdit seviyeleri.

Tehdit Seviyesi	Atış Mesafesi (m)	Kullanılan Mermi Tipi	Atış Hızı (m/s)	Çekirdek Ağırlığı (gr)	Çöküntü Miktarı (mm)
I	5	0,38 FMJ RN ^a	329 ±10	10.2	44 ^g
		0,22 kalibre LR LRN ^b	322 ±10	2.6	
IIA	5	9mm FMJ ^c	341 ±10	10.2	
		40 S&W FMJ	322 ±10	8.0	
II	5	0,357 mag. JSP ^d	436 ±10	10.2	
		9mm FMJ	367 ±10	8.0	
III-A	5	44 mag. SJHP ^e	436 ±10	15.55	
		9mm FMJ		8.0	
III	15	7,62 mm FMJ	838 ±10	9.7	
IV	15	,30 kalibre M2 AP ^f	869±10	10.8	

a) FMJ RN (Tam metal kaplama yuvarlak burunlu mermi), b) LR LRN (Uzun tüfek yuvarlak burunlu mermi), c) FMJ (Tam metal kaplama), d) JSP (kaplamalı yumuşak uçlu), e) SJHP (Magnum yarı zırhlı delik uçlu), f) AP (Zırh delici), g) Standarda göre izin verilen en yüksek çöküntü miktarıdır.

Bu çalışmada zırh malzemeleri seviye III-A testlere tabi tutulmuştur. Bu testlerde çizelge 3.4’de özellikleri verilen 9 mm FMJ (Full metal jacket) makineli tabanca mermisi kullanılmıştır. Bu seviyede, zırh plakasının dışa bakan yüzüne, III-A koruma

seviyesinde $436\pm9,1$ m/s hızlarda 5 metre mesafeden atış yapıldığında, delinme olmaması ve arka kısma yerleştirilmiş olan macun üzerinde en fazla 44 mm deformasyon (çöküntü) olması istenir. Balistik atış uygulaması sonrasında, zırh arka kısmına yerleştirilen macunda oluşan deformasyonun derinliği ölçülerek, balistik malzemenin istenilen seviyedeki koruma yeteneğine (bu standart için en fazla 44 mm) sahip olup olmadığı belirlenir (NIJ 2001).

Çizelge 3.4 9 mm Full metal jacket (FMJ) mermi teknik özellikleri (Yavaş 2008).

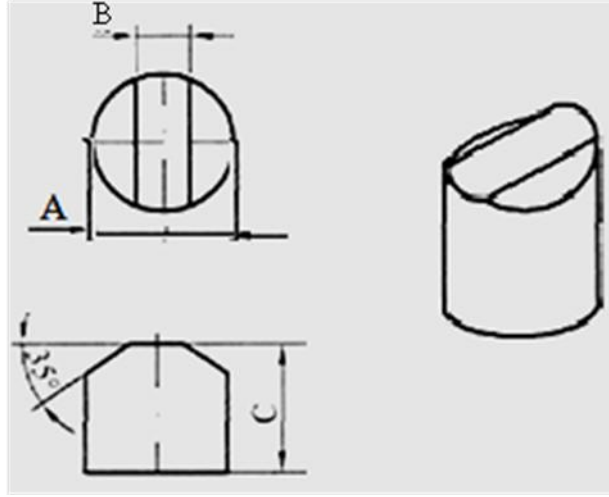
Mermi Teknik Özellikleri	
Mermi Çekirdek Çapı	9.08 mm
Mermi Çekirdek Ağırlığı	7.43 gr
Mermi Kovan Ağırlığı	3.8 gr
Mermi Uzunluğu	15 mm
Barut Miktarı	0.41 ± 0.005 gr



3.2.4.2 Balistik Şarapnel Testi

Numuneler STANAG 2920 kapsamında fragment testine tabi tutulmuştur. Parça tesirinde, balistik dayanım kriterinin ölçütü V50 hızıdır. V50 hızı parçacığın zırha dik konumda çarpması sonucu hedefi % 50 delme kapasitesine haiz olduğu hızdır. Bu testte aralarında en fazla 40 m/s hız farkı olan, 3 tane delen, 3 tane delmeyen parçacıkların hızının aritmetik ortalaması esas alınarak test yapılmaktadır (STANAG 2007).

Test atışlarında kullanılan parçacık, STANAG 2920’de A3 olarak belirtilen, 1,102 gr (17 grain) ve 5,385 mm çapındaki şarapneldir (STANAG 2007). Parçacığın geometrik şekli standartta belirtilmiş ve Şekil 3.5’te gösterilmiştir. Ayrıca teknik özellikleri de Çizelge 3.7’de verilmiştir (STANAG 2007).



Şekil 3.7 Kesik burunlu fragmanın teknik resmi (STANAG 2007).

Çizelge 3.5 Fragmentin teknik özellikleri (STANAG 2007).

Parçacık tipi	Boyutlar (mm)			
	Ağırlığı (gr)	A	B	C
A3/6723/1	$1,102 \pm 0,02$	$5,385 \pm 0,02$	$2,54^{+0,0}_{-0,5}$	6,350

Parçacık testleri yapılırken atış yapılacak mühimmatın ayarlanması çok önemlidir. Bunun için ilk başta, standart mühimmatlardan elde edilen barutlar ayrı bir yerde birleştirilir. Bu yapılırken merminin çekirdeği de kovandan ayrılır. Mermi, kovan ve barutun görüntüsü Resim 3.11’de gösterilmiştir.



Resim 3.11 Kovan, çekirdek ve barutun mermiden ayrılması.

Daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen deneyimle, belli bir hızda atışa başlanır. Test edilen numunenin delinip delinmemesine göre hız artırıp azaltılarak testler yapılır. Numune delinmemişse, barut artırılarak parçacığın hız artırılır ve numune delinene

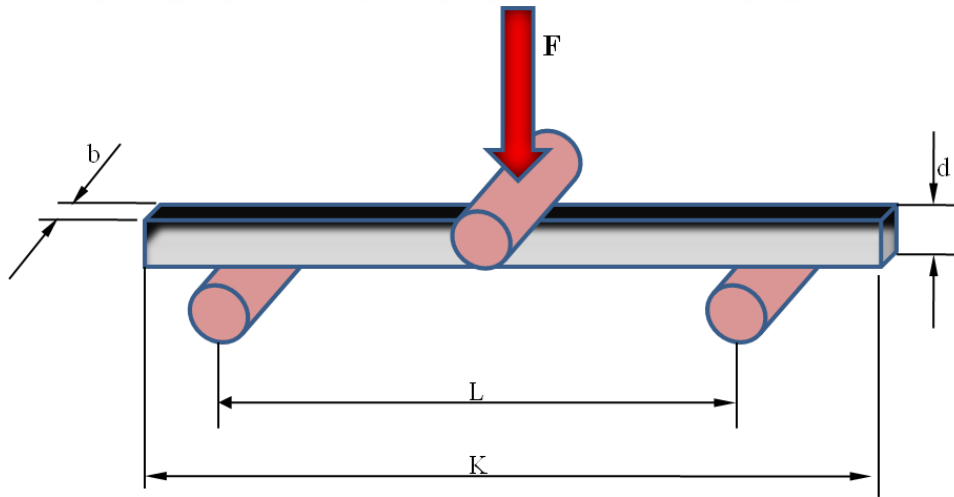
kadar bu işlem devam eder. Hassas terazide tartım, barut ilavesi ve parçacık ile ilgili görsel Resim 3.12’de sunulmuştur.



Resim 3.12 Barutların hazırlanması.

3.2.5 Üç Nokta Eğme Testi

Zırh malzemelerinin eğilme özelliklerini tespit etmek için ASTM D790-03 standardına göre testler üç nokta eğme testi yapılmıştır (ASTM 2003).



Şekil 3.8 Üç nokta eğme test düzeneği.

F = Uygulanan kuvvet (N)

L = İki destek arası mesafe (mm)

K = Numune uzunluğu (mm)

b = Kiriş genişliği (mm)

d = Kirişin yüksekliği (mm)

D = Sehim (mm)

m = Yük-sehim eğrisinin eğimi (N/mm)

ASTM 790-03 standardına göre, kirişin yüksekliği / destekler arası mesafe oranı için, 1/8, 1/16, 1/20, 1/32 gibi oranlar kullanılabilir. Bu çalışmada 1/32 oranı kullanılmıştır. Buna göre, ortalama numune kalınlığı 6.25 mm, destekler arası mesafe 200 mm'dir. Numunenin uzunluğu, destekler arası mesafenin % 20 fazlası olup, 240 mm'dir. Numunelerin eni ise 13,5 mm'dir. Probun ilerleme hızı, 5 mm/d olarak seçilmiştir (Zulkifli vd. 2019). Deney düzeneği Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

Esneklik gerilmesi ($\sigma_{e\check{g}}$); iki noktada desteklenen ve orta noktada yüklenen basit bir kiriş eğilmede test edildiğinde meydana gelen gerilmedir. Maksimum gerilme test numunesinin dış yüzeyindeki orta noktada meydana gelir. Bu gerilme, yük-sehim eğrisi üzerindeki herhangi bir nokta için denklem 3.2 vasıtasıyla hesaplanabilir (ASTM 2003).

$$\sigma_{e\check{g}} = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

Destek açıklığının % 10'unu aşan sehim meydana gelecek şekilde, 16'ya 1'den büyük destek açıklığı-derinlik oranları kullanılırsa, basit bir kiriş için numunenin dış yüzeyindeki gerilim denklem 3.3 kullanılarak yaklaşık olarak tahmin edilebilir (ASTM 2003).

$$\sigma_{e\check{g}} = \frac{3FL}{2bd^2} \left[1 + 6 \left(\frac{D}{L} \right)^2 - 4 \left(\frac{d}{L} \right) \left(\frac{D}{L} \right) \right] \quad (3.3)$$

Şekil Değiştirme (ϵ); maksimum gerilmenin meydana geldiği orta açıklıkta test numunesinin dış yüzeyinin bir elemanının uzunluğundaki oransal değişiktir. Denklem 3.4 kullanılarak herhangi bir sehim için şekil değiştirme hesaplanabilir (ASTM 2003).

$$\epsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (3.4)$$

Eğilme elastisite modülü ($E_{e\check{g}}$) ise malzemenin elastik davranış gösterdiği bölgede gerilme ile şekil değiştirmenin birbirine oranıdır. Denklem 3.5 kullanılarak hesaplanır (ASTM 2003).

$$E_{e\check{g}} = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (3.5)$$



Resim 3.13 Shimadzu AGS-J 10 kN test cihazı.

Testlerin yapılmasında, Shimadzu AGS-J markalı 10 kN kapasiteli test cihazı kullanılmıştır. Cihazın görüntüsü Resim 3.13'te gösterilmiştir.

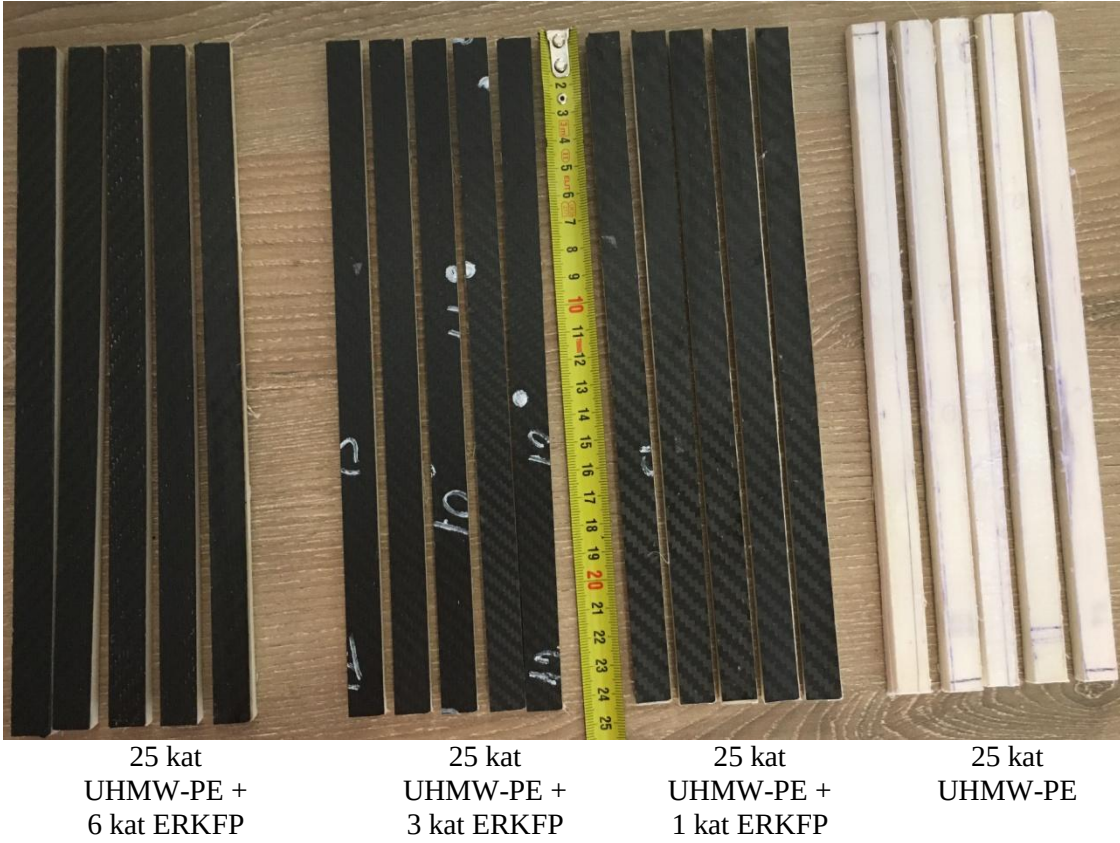
Üç nokta eğme test numunelerinin kesimi ve balistik testlerin ardından zırh plakalarından hasarlı bölgeleri incelemek üzere çıkarmak için su jeti makinası tercih edildi. Mavi jet markalı, bilgisayar kontrollü 5 eksenli su jeti kesim makinası kullanılmıştır.

Su jeti yönteminin tercih edilme sebebi plakalardaki parçacık atılan bölgelerde (balistik testlerde) oluşan hasar bölgelerinin çok fazla değişikliğe uğramadan dışarıya çıkarılmasıdır. Çünkü UHMW-PE malzemeler sıcaklığa karşı çok hassas bir malzeme olduğundan, klasik yöntemlerde kesim işleminde sıcaklık arttıkça erime ve bölgesel şişmeler meydana gelmektedir. Kesimin yapıldığı su jeti makinasının görseli Resim 3.14'te gösterilmiştir.



Resim 3.14 Bilgisayar kontrollü beş eksenli su jeti tezgahı.

Üç nokta eğme testi için, 4 çeşit malzeme tipinden beşer adet numune hazırlanmış, numunelerin fotoğrafları Resim 3.15'te gösterilmiştir.



Resim 3.15 Üç nokta eğme testi numuneleri

4. BULGULAR

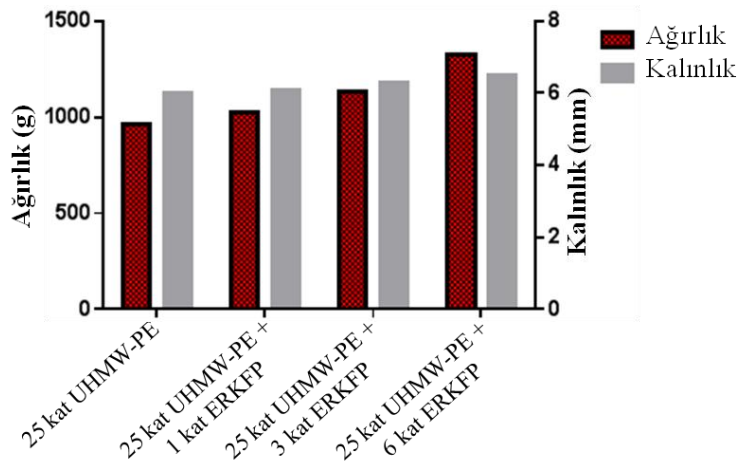
Materyal - metod bölümünde ayrıntıları verilen üretim yöntemleri takip edilerek imalatları yapılan balistik kompozit zırh plakaları laboratuvar ortamında balistik ve mekanik testlere tabi tutulmuştur.

4.1 Testlere Tabi Tutulacak Numuneler

Sıcaklık ve basınç altında malzemenin şekillendirilmesi yöntemi kullanılarak, 4 farklı tipte numune imal edilmiştir. İlk olarak 25 kat UHMW-PE kompozit plaka üretimi yapılmış, sonrasında da 25 kat UHMW-PE kompozite sırasıyla, 1, 3 ve 6 kat ERKFP eklenerek hibrit zırh plakaları üretilmiştir. Üretilen numunelerin ağırlıkları ve kalınlıkları Çizelge 4.1’de sunulmuş, belirtilen ağırlık ve kalınlıkların dağılımını gösteren sütun grafik Şekil 4.1’de gösterilmiştir. UHMW-PE malzemeye ERKFP ilave edildikçe ağırlık ve kalınlıkların düzenli olarak arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.1 Numune tipine bağlı ağırlık ve kalınlık değerleri.

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



Şekil 4.1 Numune tipine göre ağırlık ve kalınlıkların dağılımı.

Üretimi yapılan numunelerden, UHMW-PE ve ERKFP içeren numuneye ait test öncesi fotoğraflar resim 4.1’ de gösterilmiştir.



Resim 4.1 UHMW-PE ve ERKFP içeren hibrit numuneye ait fotoğraflar; (a önden, (b yandan, (c arkadan.

4.2 Balistik Testler

Balistik testler kapsamında NIJ0101.04 Seviye III-A mermi ve STANAG 2920 şarapnel testi olarak 2 farklı test yapılmıştır.

4.2.1 Mermi Testi (NIJ0101.04 Seviye III-A)

İlk önce 25 kat polietilen malzemenin mermi testlerine dayanımını ölçmek maksadıyla NIJ 0101.04 standardına göre III-A seviyesinde, tabanca-makineli tabanca mermileri (9 mm FMJ Parabellum) ile testler yapılmıştır. Yapılan test sonuçları çizelge 4.2-4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 25 kat UHMW-PE plaka mermi testi-1.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Çöküntü (mm)
UHMW-PE plaka (40x40 cm) 25 kat kalınlık: 6,1 mm ağırlık: 960 g	Oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiş	9X19 mm MP-5 FMJ mermi	1	442	26
			2	444	26
			3	436	27
			4	435	24
			5	435	25
			6	435	26

Çizelge 4.3 UHMW-PE plaka mermi testi-2.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Çöküntü (mm)
UHMW-PE plaka (40x40 cm) 25 kat kalınlık: 6,1 mm ağırlık: 960 g	Oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiş	9X19 mm MP-5 FMJ mermi	1	443	23
			2	446	25
			3	449	26
			4	448	24
			5	446	24
			6	458	26

Çizelge 4.4 UHMW-PE plaka mermi testi-3.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Çöküntü (mm)
UHMW-PE plaka (40x40 cm) 25 kat kalınlık: 6,1 mm ağırlık: 960 g	Oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiş	9X19 mm MP-5 FMJ mermi	1	451	21
			2	457	22
			3	450	21
			4	454	20
			5	451	20
			6	447	20

Çizelge 4.5 UHMW-PE plaka mermi testi-4.

Malzeme Cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Çöküntü (mm)
UHMW-PE plaka (40x40 cm) 25 kat kalınlık: 6,1 mm ağırlık: 960 g	Oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiş	9X19 mm MP-5 FMJ mermi	1	442	21
			2	444	22
			3	436	21
			4	435	20
			5	435	20
			6	435	20

Çizelge 4.2-4.5'te sunulan test sonuçlarına göre maksimum çöküntü değeri 27 mm olarak bulunmuştur. Testin NIJ 0101.04 standardına göre III-A seviyesinde başarılı olabilmesi için herhangi bir delinme olmaması ve arka dolgu malzemesinde en fazla 44 mm çöküntü olması gerekmektedir. 25 kat UHMW-PE plakada herhangi bir delinme gerçekleşmeyip, çöküntü miktarının en fazla 27 mm (44 mm'den düşük olduğu için) olduğundan belirtilen tehdit seviyesi için yeterli olduğu görülmüştür.

Merminin çarpma anında kinetik enerjisi;

$$E_k = \frac{1}{2} m (v_s - V_i)^2 \quad (4.1)$$

E_k = Kinetik Enerji

m = Merminin kütlesi

V_s = Merminin son hızı

V_i =Merminin ilk hızı

Mermi ve hedef arasındaki kuvvetin anlık büyüklüğü;

$$F = dE/dx \quad (4.2)$$

Denklem 4.2'de dE/dx penetrasyon derinliğine göre enerjinin ilk türevidir. Başka bir deyişle, penetrasyon derinliği başına yerel kinetik enerji kaybı oranıdır. Bu kuvvet yerel enerji kaybı oranına eşit olup hız ve kütle kaybına bağlı olarak sürekli değişir (Courtney vd. 2007).

Zincir kuralı ile;

$$F = \frac{dE}{dx} = dE/dm * dm/dx + dE/dV * dV/dx \quad (4.3)$$

$$F = 1/2 * V^2 * dm/dx + m * V * dV/dx \quad (4.4)$$

Denklem 4.4'te dm/dx ve dV/dx , penetrasyon derinliğine göre yerel kütle ve hız kaybı oranlarıdır. Bu formülün doğrudan uygulanması, mermi yolu boyunca her noktada merminin anlık kütlesi ve hız değişiklikleri hakkında ayrıntılı bilgi gerektirir. Daha kolay yapılabilecek bazı basit ve makul tahminler var. Kütlenin sabit olduğu durumlarda, hedef ve mermi arasındaki ortalama F kuvveti (F_{ort}), basitçe başlangıç kinetik enerjisi E 'nin penetrasyon derinliğine d bölünmesiyle elde edilir (Courtney vd. 2007).

$$F_{ort} = E/d \quad (4.5)$$

9 mm FMJ mermi çekirdeğinin kütlesi 7,43 g ve çizelge 4.2'deki çöküntü değerleri (penetrasyonun en yüksek olduğu değerler), denklem 4.1 ve denklem 4.5'de yerine konulursa, çizelge 4.6'daki değerler elde edilir.

Çizelge 4.6 UHMW-PE plaka için kinetik enerji ve ortalama kuvvet değerleri.

Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Çöküntü (mm)	Kinetik enerji (Joule)	Ortalama kuvvet (Newton)
1	442	26	725,7773	27 914,51
2	444	26	732,3602	28 167,7
3	436	27	706,2066	26 155,8
4	435	24	702,9709	29 290,45
5	435	25	702,9709	28 118,84
6	435	26	702,9709	27 037,34

Çizelge 4.6'ya göre mermi hızı arttıkça kinetik enerji artmıştır. Çöküntü miktarı arttıkça malzemenin mermiye gösterdiği ortalama tepki kuvveti azalmıştır. Yani malzeme mermiyi daha kısa sürede durdurmak için daha fazla anlık kuvvet uygulamıştır.

4.2.2 Şarapnel Testi (STANAG 2920)

Şarapnel testleri STANAG 2920'ye göre, 1,1 gramlık fragmentlerle yapılmıştır (STANAG 2003). Bu testlere ait çizelgelerde sarı renk ile işaretlenen değerler, hesaplama yapılırken dikkate alınan, aritmetik ortalaması alınan değerlerdir. Bu değerler, en yükseği ile en düşüğü arasında en fazla 40 m/s olan, 3 adet delinen ve 3 adet delinmeyen atışlar olup bu atışların ortalaması V50 hızını vermektedir. Çizelgeler sarı renge boyanmayan değerler ise 40 m/s hız farkı kriterine uymadığından hesaplamaya katılmayan değerlerdir. Ayrıca söz konusu çizelgelerde zırh plakalarının ağırlıkları, kalınlıkları ve boyutları da verilmiştir.

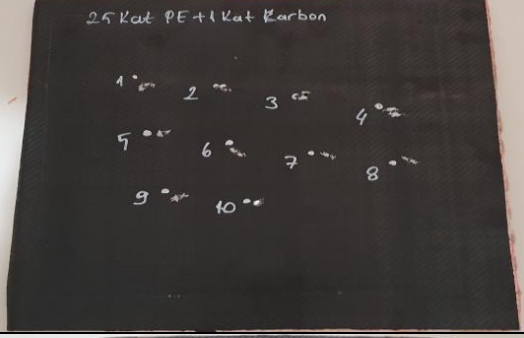
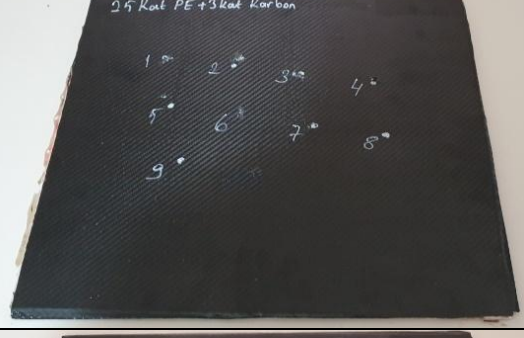
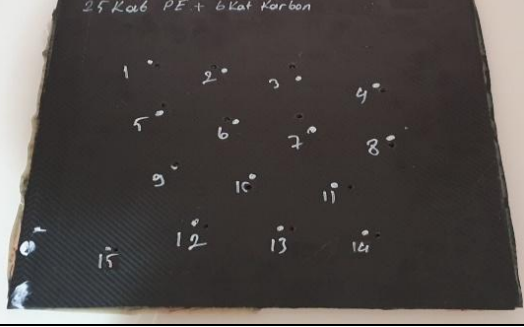
Şarapnel testleri oda sıcaklığında, +70 °C (sıcak şartlandırma) ve -35 °C'de (soğuk şartlandırma) yapılmıştır.

4.2.2.1 Oda Sıcaklığında Yapılan Şarapnel Testi



Resim 4.2 Test malzemesinin sabitlenmesi.

Testin öncesinde, Resim 4.2'deki zırh için tecrübelerle dayalı olarak tahmini atış noktaları işaretlenmiştir. Testin durumuna göre, aralarında en fazla 40 m/s olan 3 delinmiş, 3 delinmemiş atış elde edilinceye kadar teste devam edilmiştir. Testin sonucu en az 6 atışta belirlenmekte olup, bu atış sayıları zırhın durumuna göre artabilmektedir. Balistik test sonrası numunelerin görüntüleri Resim 4.3'te gösterilmiştir.

Malzeme tipi	Numunelerin fotoğrafı
25 kat UHMW-PE	
25 kat UHMW-PE + 1 Kat ERKFP	
25 kat UHMW-PE + 3 Kat ERKFP	
25 kat UHMW-PE + 6 Kat ERKFP	

Resim 4.3 Zırhların atış sonrası görüntüleri (Atış yapılan yön).

ERKFP içermeyen, 25 kat UHMW-PE'den oluşan plakanın V50 değeri Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. Çizelge 4.7'ye göre 3 delinen (672, 673, 675 m/s) ve 3 delinmeyen (664, 667, 664 m/s) atışların aritmetik ortalaması alınmış, V50 değeri 669,1 m/s olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.7 UHMW-PE plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
		Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE 40x40 cm kalınlık: 6 mm ağırlık: 960 g	1,1 g fragment	1	672	Delindi
		2	673	Delindi
		3	705	Delindi
		4	694	Delindi
		5	664	Delinme yok
		6	667	Delinme yok
		7	434	Delinme yok
		8	675	Delindi
		9	664	Delinme yok
V50			669,1 m/s	

25 kat UHMW-PE ile 1 kat ERKFP'nin hibrit olarak birleşmesinden oluşan plakaya yapılan test sonucu Çizelge 4.8'de gösterilmiştir. ERKFP, UHMW-PE kompozitlerin tek yönde dış katmanına ilave edilmiş, test sonucu 10 atış yapıldıktan sonra elde edilmiştir. V50 değeri, 723 m/s olarak bulunmuş, sadece UHMW-PE'den elde edilen zırhın V50 değerine göre artış göstermiştir.

Çizelge 4.8 25 Kat UHMW-PE plaka ve 1 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
		Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE + 1 kat ERKFP 40x40 cm kalınlık: 6,1 mm ağırlık: 1020 g	1,1 g fragment	1	693	Delindi
		2	644	Delinme yok
		3	710	Delindi
		4	715	Delinme yok
		5	785	Delinme yok
		6	843	Delinme yok
		7	734	Delinme yok
		8	727	Delinme yok
		9	741	Delindi
		10	713	Delindi
			V50	723 m/s

25 kat UHMW-PE ile 3 kat ERKFP'den oluşan zırh plakasına yapılan test sonucu Çizelge 4.9'da gösterilmiştir. Sonuç, 9 atışta 766 m/s olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.9 25 Kat UHMW-PE plaka ve 3 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi.

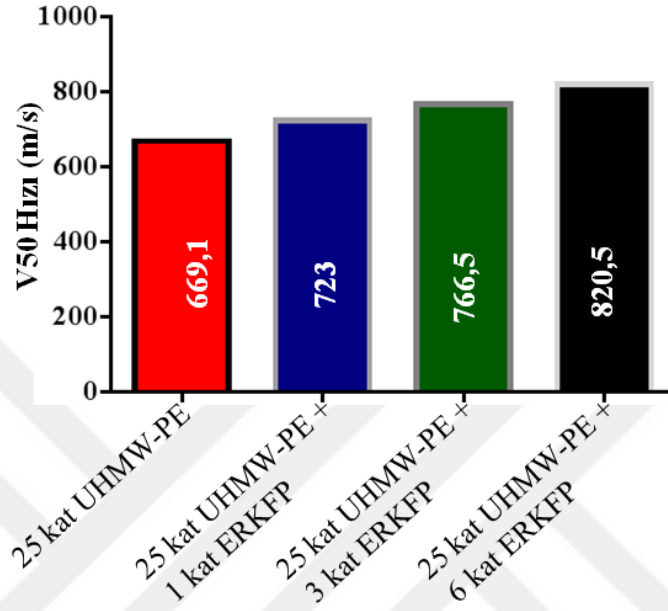
Malzeme cinsi	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
		Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE + 3 kat ERKFP 40x40 cm kalınlık: 6,3 mm ağırlık: 1139 g	1,1 g fragment	1	734	Delinme yok
		2	738	Delinme yok
		3	726	Delinme yok
		4	750	Delinme yok
		5	788	Delindi
		6	761	Delinme yok
		7	782	Delindi
		8	764	Delindi
		9	755	Delinme yok
			V50	766,6 m/s

25 kat UHMW-PE ile 6 kat ERKFP'nin hibrit olarak birleşmesinden oluşan plakaya yapılan test sonucu Çizelge 4.10'da gösterilmiştir. Bu numunede V50 değeri 15 atışta ancak elde edilmiştir.

Çizelge 4.10 25 Kat UHMW-PE plaka ve 6 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
		Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE +6 kat ERKFP 40x40 cm kalınlık: 6,5 mm ağırlık: 1326 g	1,1 g fragment	1	688	Delinme yok
		2	673	Delinme yok
		3	688	Delinme yok
		4	703	Delinme yok
		5	736	Delinme yok
		6	727	Delindi
		7	796	Delinme yok
		8	779	Delinme yok
		9	843	Delinme yok
		10	814	Delindi
		11	804	Delinme yok
		12	756	Delinme yok
		13	808	Delindi
		14	830	Delinme yok
		15	824	Delindi
			V50	820,5 m/s

UHMW-PE malzemelere sırasıyla, 1, 3 ve 6 kat ERKFP ekledikçe V50 değeri korelatif olarak artmıştır. Bu dört farklı konfigürasyondaki numunenin V50 hız dağılım grafiği Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 UHMW-PE kompozitlere ERKFP eklemenin balistik özelliklere katkısı.

Her numunede V50 değerinin bulunması için farklı sayılarda atış yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu durum testin doğasından (3 delinen, 3 delinmeyen atış olması ve bu 6 atış arasında en fazla 40 m/s olması) kaynaklanmıştır.

Parçacığın numuneye isabet ettikten sonra ne kadar enerji absorbe edildiğini tespit etmek için kinetik enerji (denklem 4.1) formülünden yararlanılmıştır.

Çizelge 4.11 Oda sıcaklığında test numunelerinin enerji absorblaması.

Numune tipi	Çarpma hızı (m/s)	Absorbe edilen kinetik enerji (Joule)
25 kat UHMW-PE	669,1	246,6798403
25 kat UHMW-PE + 1 kat ERKFP	723	288,023679
26 kat UHMW-PE + 3 kat ERKFP	766,5	323,7247598
27 kat UHMW-PE+ 6 kat ERKFP	820,5	370,9443578

Mermi çekirdeğinin ağırlığı, 1,102 gram (STANAG 2920), çarpma anındaki hız V50 değerleri esas alınarak, hesaplanan kinetik enerjiler Çizelge 4.11’de gösterilmiştir. Çizelge 4.11’e göre, en çok enerji absorblayan ve dolayısıyla V50 hızı dikkate alındığında balistik performans açısından en mukavemetli numune 6 kat ERKFP içeren numunedir.

4 farklı konfigürasyonda hazırlanan zırhların balistik performanslarının daha iyi kıyaslanabilmeleri için alansal yoğunluklara göre absorbe edilen kinetik enerjileri denklem 4.6’da ve alansal yoğunluklar ise 4.7’de çıkarılmıştır.

Alansal yoğunluğa göre enerji absorblama (AYGAE);

$$AYGAE = \frac{\text{Tehditin Kinetik enerjisi}}{\text{Alansal yoğunluk}} \quad (4.6)$$

Alansal yoğunluk(d_{alansal}) ise;

$$d_{\text{alansal}} = \frac{\text{Zırhın kütlesi}}{\text{Zırhın yüzey alanı}} \quad (4.7)$$

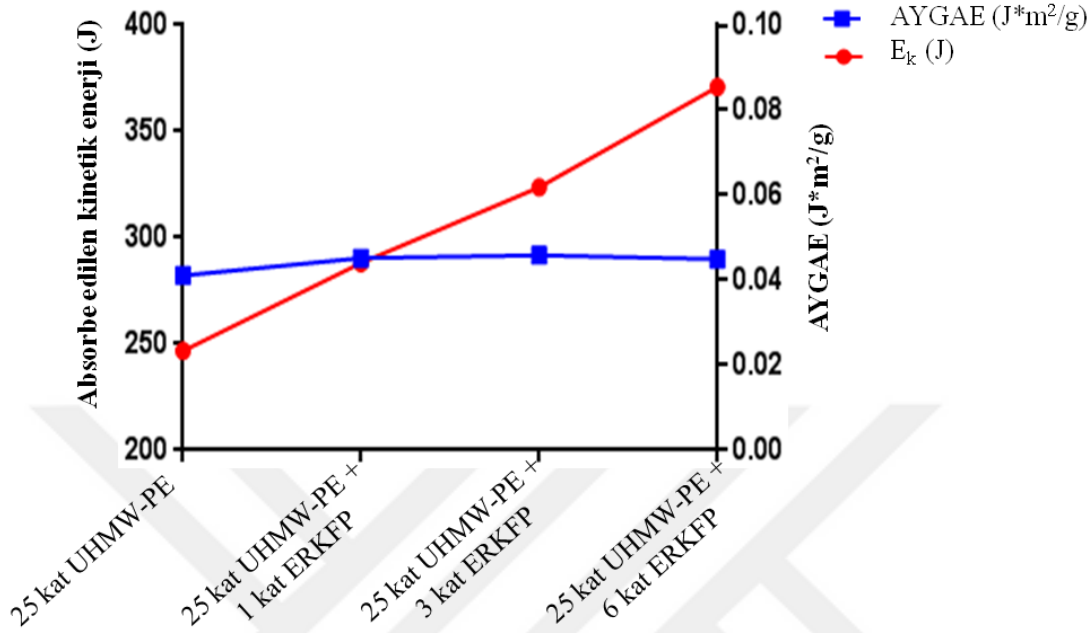
Denklem 4.6 ve denklem 4.7, söz konusu zırhlar için uygulandığında, çizelge 4.12’deki değerler elde edilir.

Çizelge 4.12 Zırhların alansal yoğunluklarına göre enerji absorblaması.

Numune Tipi	d_{alansal} (g/m ²)	AYGAE (J *m ² /g)
25 kat UHMW-PE	6000	0,041113
25 kat UHMW-PE + 1 kat ERKFP	6375	0,04518
25 kat UHMW-PE + 3 kat ERKFP	7062,5	0,045837
25 kat UHMW-PE + 6 kat ERKFP	8250	0,044963

En çok enerji absorbe eden numune UHMW-PE ve 6 kat ERKFP içeren numunedir. Alansal yoğunluğu ve dolayısıyla ağırlığı en az olan numune ise sadece UHMW-PE’den oluşan numunedir. Ancak, yapılan hesaplamalara göre, yoğunluğa göre absorbe edilen enerji optimizasyonunda en iyi konfigürasyonun UHMW-PE ve 3 kat ERKFP içeren

zırh olduğu görülmüştür. Kinetik enerji ve AYGAЕ'nin bütün zırhlardaki değerlerinin gösterimi Şekil 4.3' dendir.

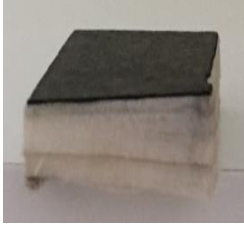
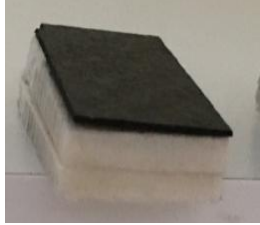
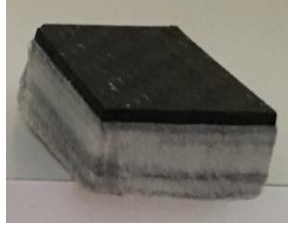
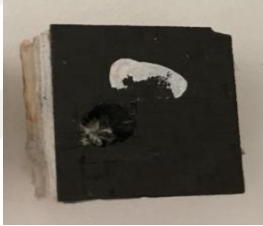


Şekil 4.3 Absorbe edilen kinetik enerji ve alansal yoğunluğa göre absorbe edilen kinetik enerjinin kıyaslanması.

Oda sıcaklığında atış yapılan zırhlardan bir kısmının hasar bölgeleri (su jeti makinası yardımıyla kesilerek) incelemek üzere çıkarılmıştır. Bu incelemeler yapılırken birbirine olabildiğince yakın atış hızları olan bölgeler tercih edilmiştir.

Delinmeyen numunelerden alınan hasarlı bölge örneklerine ait fotoğraflar Resim 4.4'te gösterilmiştir. Resim 4.4'teki hasarlı bölgeler incelendiğinde, 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP içeren numuneye karbonlu kısım tarafından atış yapıldığında ön kısmın diğer numunelere göre daha çok dağıldığı (üstten görünüş) görülmektedir.

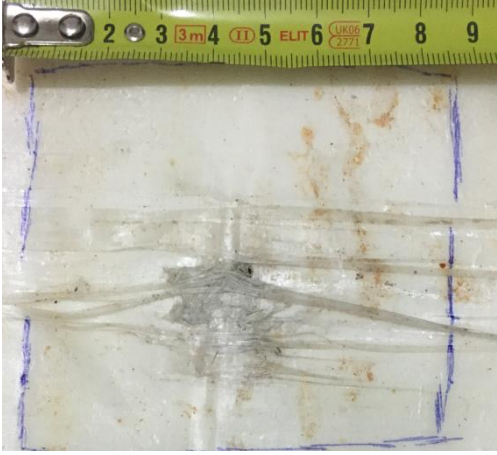
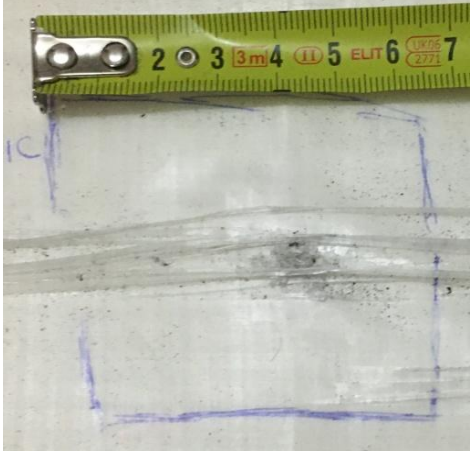
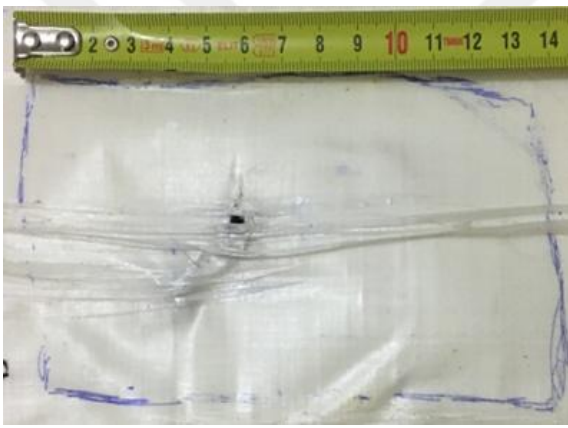
Resim 4.4'te ERKFP içeren numunelerin hasarlı bölgelerinin yandan kesiti incelendiğinde, parçacıkların 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP içeren numunede en çok ilerlediği görülmektedir. Parçacıkların, 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP içeren numunede son 3 kata, 3 kat ERKFP içeren numunede son 5 kata, 6 kat ERKFP içeren numunede son 7 kata kadar ilerlediği görülmektedir.

Malzeme Cinsi	25 kat UHMW-PE + 1 kat ERKFP	25 kat UHMW-PE + 3 kat ERKFP	25 kat UHMW-PE+ 6 kat ERKFP
Atış hızı	727 m/s	726 m/s	736 m/s
Parçacık atılmayan bölgenin kesiti			
Parçacık atılan bölgenin yandan görünüşü			
Parçacık atılan bölgenin üstten görünüşü			

Resim 4.4 Delinmeyen zırhların zırhların V50 testi sonrası görüntüleri.

V50 testi sonrası delinen numunelerin arka kısımlarında oluşan deformasyonların görüntüsü Resim 4.5'te gösterilmiştir. İncelenen numunelerde delinme hızları seçilirken birbirine en yakın hızdaki parçacıkların atıldığı bölgelerin seçilmesine dikkat edilmiştir.

Resim 4.5'e göre sadece 25 kat UHMW-PE içeren numune ile 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP içeren numunenin arka kısımlarındaki deformasyon bölgeleri incelendiğinde, ilk numunenin delinme hızı daha düşükken ($705 < 710$ m/s), arka kısımda oluşan deformasyon bölgesi daha büyük olmuştur. Benzer şekilde 25 kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP içeren numune ile 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP içeren numune kıyaslandığında da, ikinci numuneye daha yüksek hızla atış ($808 > 788$ m/s) yapılmasına rağmen arka kısmında daha düşük deformasyon ortaya çıkmıştır.

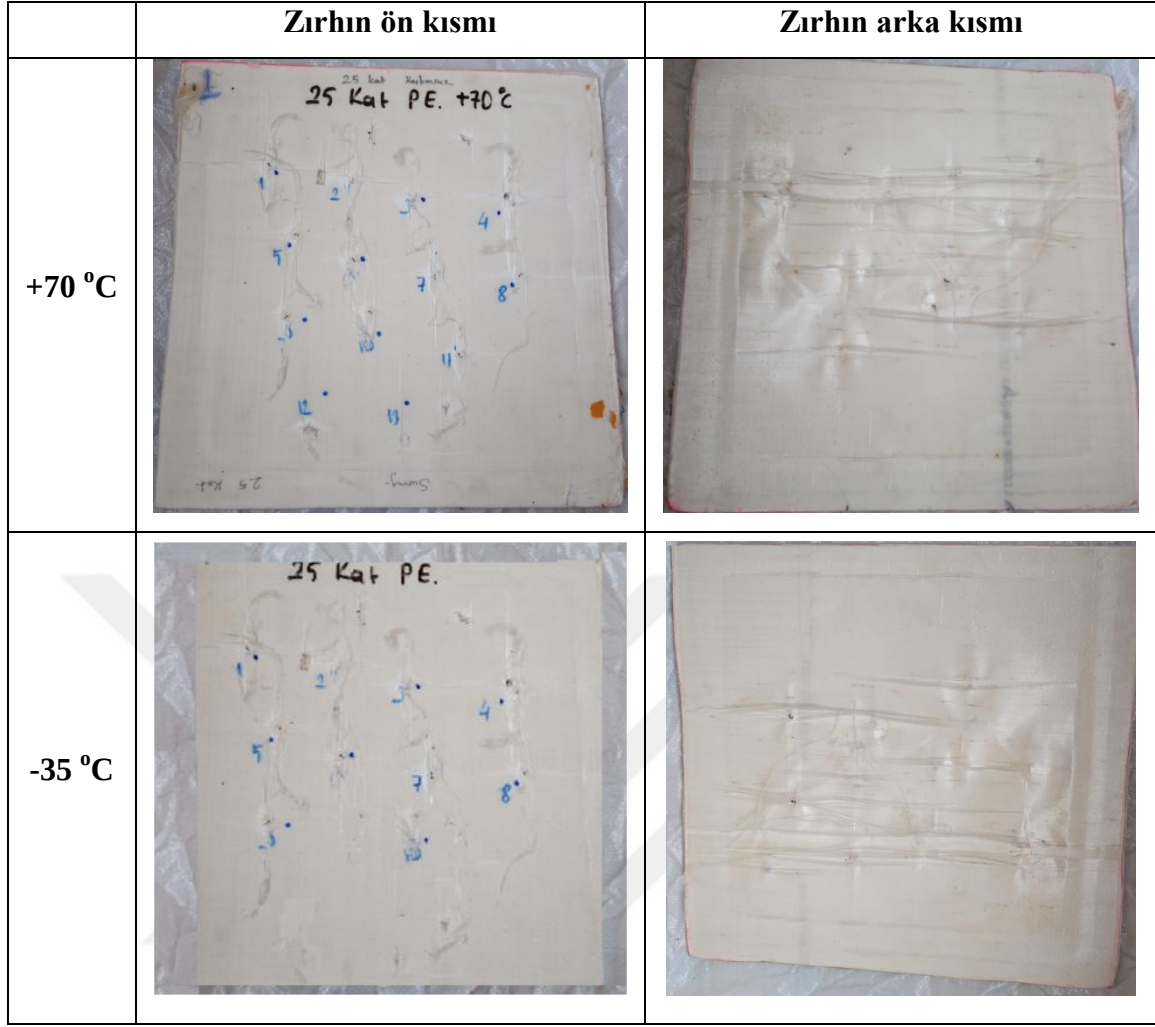
	
25 kat UHMW-PE (705 m/s)	25 kat UHMW-PE + 1 kat ERKFP (710 m/s)
	
25 kat UHMW-PE + 3 kat ERKFP (788 m/s)	25 kat UHMW-PE + 6 kat ERKFP (808 m/s)

Resim 4.5 V50 testinde delinen numunelerin arka kısım deformasyonları.

4.2.2.2 Şartlandırılmış Numunelerin Şarapnel Testi

Çalışma kapsamında sıcak ve soğuk şartlandırma olarak iki tip şartlandırma yapılmıştır. Bunun için, zırhlar hazırlandıktan sonra sıcak şartlandırma için +70 °C’de ve soğuk şartlandırma için -35 °C’de 24 saat bekletilmiştir. Ardından fragment testine tabi tutulmuştur.

Sadece 25 kat UHMW-PE içeren zırhların +70 °C ve -35 °C’ de şartlandırılması sonrası, parçacıkların atıldığı yönden (zırhın ön kısmı) ve arka kısımdan görüntüleri Resim 4.6’da gösterilmiştir.



Resim 4.6 Şartlandırılmış 25 kat UHMW-PE zırhın balistik test sonrası görüntüleri.

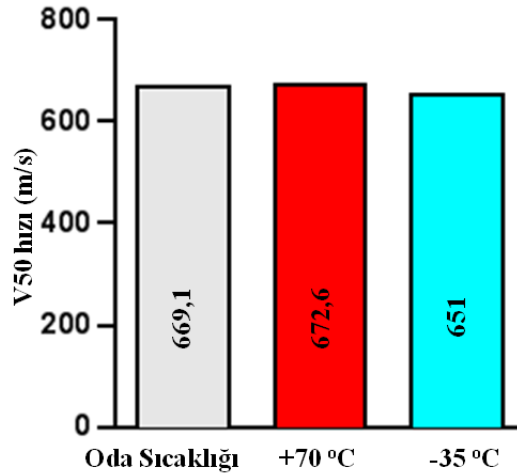
Çizelge 4.13 +70 °C’de şartlandırılmış sadece UHMW-PE içeren plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE plaka (40x40 cm) kalınlık: 6 mm ağırlık:958 g	+70 °C 'de 24 saat bekletilmiş	1,1 g Fragment	1	645	Delinme yok
			2	690	Delindi
			3	788	Delindi
			4	681	Delindi
			5	772	Delindi
			6	669	Delinme yok
			7	652	Delinme yok
			8	653	Delinme yok
			9	759	Delindi
			10	663	Delinme yok
			11	680	Delindi
			V50	672,6 m/s	

Sadece 25 kat UHMW-PE içeren numunelerin +70 °C’de şartlandırıldıktan sonra yapılan fragment test sonuçları Çizelge 4.13’te, -35 °C’de şartlandırılması ile elde edilen test sonuçları ise Çizelge 4.14’te verilmiştir. UHMW-PE plakaların V50 hızı, +70 °C’de şartlandırıldığında 11 atışta 672,6 m/s, -35 °C’de şartlandırıldığında 10 atışta 651 m/s olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.14 -35 °C’de şartlandırılmış sadece UHMW-PE içeren plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE plaka (40x40 cm) kalınlık: 6 mm ağırlık: 960 g	-35 °C 'de 24 saat bekletilmiş	1,1 g fragment	1	656	Delindi
			2	661	Delinme yok
			3	719	Delindi
			4	704	Delindi
			5	664	Delindi
			6	624	Delinme yok
			7	718	Delindi
			8	748	Delindi
			9	662	Delindi
			10	639	Delinme yok
			V50	651,0 m/s	



Şekil 4.4 Sadece UHMW-PE içeren plakaların şartlandırmaya göre özet V50 grafiği.

25 kat UHMW-PE zırhların, oda şartlarında, +70 °C’ de ve -35 °C’de şartlandırıldıktan sonra yapılan fragment test sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.4’de verilmistir. Bu sonuçlara göre sıcak şartlandırmada zırhların V50 hızı çok küçük bir artış gösterirken

(3,5 m/s), soğuk şartlandırmada azalmıştır. Ancak zırh balistik koruma işlevini (belirtilen seviyelerde) devam ettirmiştir.



Resim 4.7 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP zırhın balistik test sonrası görüntüleri.

25 kat UHMW-PE ile 1 kat ERKFP'lerin hibrit olarak birleşmesinden oluşan zırhların sıcak ve soğuk şartlandırılmasından sonra yapılan V50 testi sonrası hasar görüntüleri Resim 4.7'de gösterilmiştir.

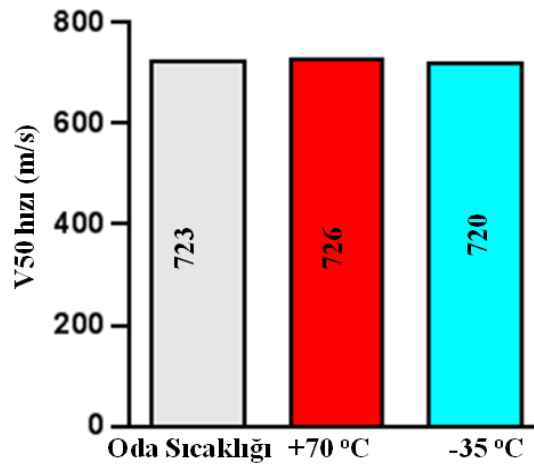
+70 °C' de şartlandırılması ile elde edilen test sonuçları Çizelge 4.15'te, -35 °C'de şartlandırılması ile elde edilen test sonuçları ise Çizelge 4.16'da verilmiştir. +70 °C'de yapılan testlerde 9 atış sonucunda V50 hızı 726 m/s bulunurken, -35 °C'de 6 atış sonucunda 720 m/s olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.15 +70 °C’ de şartlandırılmış 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE + 1 Kat ERKFP (40x40 cm) kalınlık: 6,1 mm ağırlık: 1025 g	+70 °C 'de 24 saat bekletilmiş	1,1 g fragment	1	730	Delindi
			2	662	Delinme yok
			3	733	Delindi
			4	720	Delinme yok
			5	719	Delinme yok
			6	675	Delinme yok
			7	693	Delinme yok
			8	717	Delinme yok
			9	737	Delindi
			V50	726 m/s	

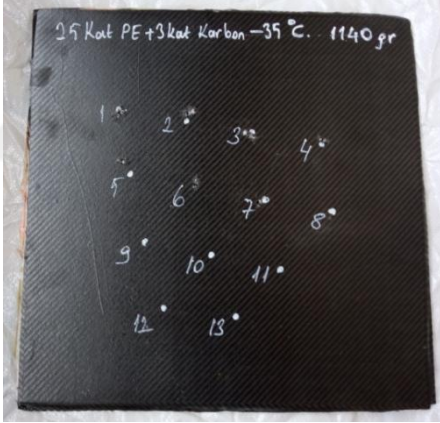
Çizelge 4.16 -35 °C’ de şartlandırılmış 25 Kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE + 1 Kat ERKFP (40x40 cm) kalınlık: 6,1 mm ağırlık: 1023 g	-35 °C 'de 24 saat bekletilmiş	1,1 g Fragment	1	728	Delindi
			2	721	Delindi
			3	706	Delinme yok
			4	713	Delinme yok
			5	720	Delinme yok
			6	732	Delindi
			V50	720 m/s	



Şekil 4.5 UHMW-PE ve 1 kat ERKFP içeren plakaların şartlandırmaya göre özet V50 grafiği.

25 kat UHMW-PE ve 1 Kat ERKFP zırhların şartlandırmadan önce ve sonra balistik test sonuçları karşılaştırmalı olarak şekil 4.5'te verilmiştir. UHMW-PE ve 1 kat ERKFP içeren plakaların V50 değerlerinde ihmal edilebilecek kadar küçük değişim gerçekleşmiştir. Zırhlar belirtilen hızlarda koruma özelliklerini devam ettirmiştir.

	Zırhın ön kısmı	Zırhın Arka kısmı
+70 °C		
-35 °C		

Resim 4.8 25 kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP zırhın balistik test sonrası görüntüleri.

+70 °C' de, -35 °C'de şartlandırılan 25 kat UHMW-PE ile 3 kat ERKFP zırhların balistik test sonrası görüntüleri Resim 4.9'da gösterilmiştir. Belirtilen zırhların +70 °C ve -35 °C'de şartlandırılmasının ardından yapılan V50 test sonuçları sırasıyla çizelge 4.17 ve çizelge 4.18'de verilmiştir.

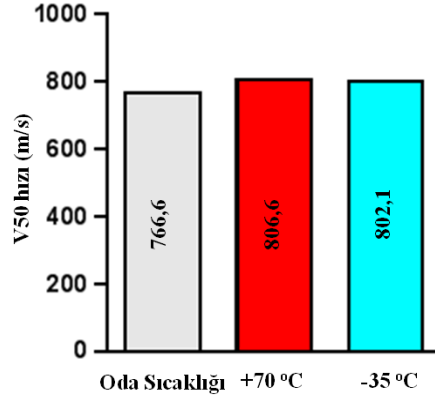
Çizelge 4.17 +70 °C’ de şartlandırılmış 25 Kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE + 3 Kat ERKFP (40x40 cm) kalınlık: 6,3 mm ağırlık: 1120 g	+70 °C 'de 24 saat bekletilmiş	1,1 g fragment	1	625	Delinme yok
			2	690	Delinme yok
			3	729	Delinme yok
			4	796	Delinme yok
			5	759	Delinme yok
			6	805	Delindi
			7	785	Delinme yok
			8	804	Delinme yok
			9	767	Delinme yok
			10	825	Delindi
			11	756	Delinme yok
			12	796	Delinme yok
			13	814	Delindi
			V50	806,6 m/s	

Çizelge 4.18 -35 °C’ de şartlandırılmış 25 Kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE + 3 Kat ERKFP (40x40 cm) kalınlık: 6,2 mm ağırlık: 1140 g	-35 °C 'de 24 saat bekletilmiş	1,1 g fragment	1	807	Delindi
			2	851	Delindi
			3	791	Delinme yok
			4	788	Delinme yok
			5	812	Delindi
			6	790	Delinme yok
			7	825	Delindi
			V50	802,1	

UHMW-PE ve 3 kat ERKFP içeren zırhların oda sıcaklığı ve şartlandırmalara göre özet V50 değerleri ise Şekil 4.6’da verilmiştir. +70 °C’de şartlandırma yapıldıktan sonra gerçekleştirilen testte V50 değeri on üç atışta ancak elde edilmiştir. Şekil 4.6’ya göre zırhların +70 °C’de şartlandırıldıktan sonra yapılan testlerde V50 değeri 40 m/s artarken, -35 °C’de şartlandırılmasında 35,5 m/s artış göstermiştir. Zırhlar koruma özelliklerini devam ettirmişlerdir



Şekil 4.6 25 kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP içeren plakanın şartlandırmaya göre özet V50 değeri.

	Zırhın ön kısmı	Zırhın arka kısmı
+70 °C		
-35 °C		

Resim 4.9 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP zırhın balistik test sonrası görüntüleri.

+70 °C' de, -35 °C'de şartlandırılan 25 kat UHMW-PE ile 6 kat ERKFP zırhların balistik test sonrası görüntüleri Resim 4.9'da gösterilmiştir. Bahse konu zırhların +70 °C

ve -35 °C’de şartlandırılmasının ardından yapılan test sonuçları sırasıyla çizelge 4.19 ve çizelge 4.20’de verilmiştir.

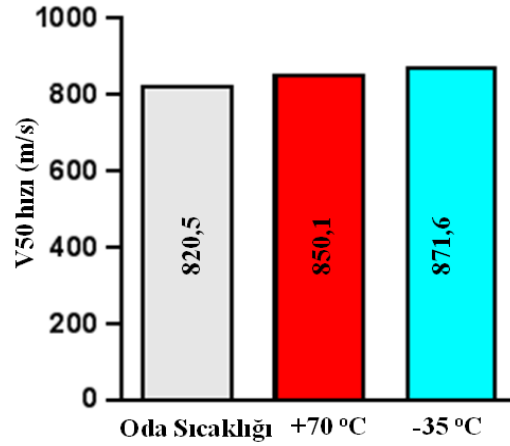
Çizelge 4.19 +70 °C’ de şartlandırılmış 25 Kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE + 6 Kat karbon (40x40 cm) kalınlık: 6,5 mm ağırlık: 1330 g	+70 °C 'de 24 saat bekletilmiş	1,1 g fragment	1	814	Delinme yok
			2	845	Delindi
			3	855	Delindi
			4	845	Delinme yok
			5	804	Delinme yok
			6	849	Delinme yok
			7	830	Delinme yok
			8	781	Delinme yok
			9	845	Delinme yok
			10	877	Delindi
			V50	850,1	

Çizelge 4.20 -35 °C’de şartlandırılmış 25 Kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP hibrit plakanın V50 testi.

Malzeme cinsi	Şartlandırma	Mermi cinsi	Ölçülen Değerler		
			Vuruş noktası	Çarpma hızı (m/s)	Delinme
25 kat UHMW-PE + 6 Kat karbon (40x40 cm) Kalınlık: 6,5 mm Ağırlık: 1310 g	-35 °C 'de 24 saat bekletilmiş	1,1 g Fragment	1	853	Delinme yok
			2	831	Delindi
			3	870	Delindi
			4	893	Delinme yok
			5	871	Delinme yok
			6	863	Delinme yok
			7	880	Delindi
			V50	871,6	

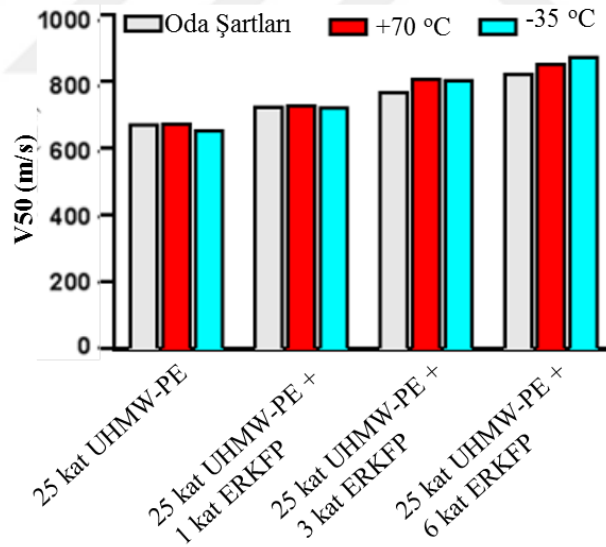
UHMW-PE ve 6 kat ERKFP içeren zırhların şartlandırmaya göre özet V50 değerlerini gösteren grafik Şekil 4.7’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, soğuk şartlandırmada daha fazla artış (51,1 m/s) görülürken, sıcak şartlandırmada da (29,6 m/s) artış meydana gelmiştir. Zırhların balistik özellikleri korunmuştur.



Şekil 4.7 UHMW-PE ve 6 kat ERKFP içeren plakaların şartlandırmaya göre özet V50 değeri.

4.2.2.3 V50 Testlerinin Kıyaslanması ve İstatistiksel Analiz

Sekil 4.8’de sadece 25 kat UHMW-PE ile 25 kat UHMW-PE ile (sırasıyla) 1, 3 veya 6 kat ERKFP’nin hibrit olarak birleşmesinden oluşan zırhlara ait şartlandırma sonuçları özet olarak yer almaktadır.



Şekil 4.8 Şartlandırılmış ve şartlandırılmamış tüm numunelerin özet V50 grafiği.

Sekil 4.8’e göre dört farklı konfigürasyonda da, UHMW-PE zırhlara ERKFP ekledikçe balistik özellikler kesinlikle artmıştır. Fakat şartlandırmalar yapıldığında, farklı sonuçlar elde edilmiştir. +70 °C’de şartlandırılarak yapılan testlerde genel itibarıyla her numunede farklı oranlarda artışlar görülmüştür. -35 °C’de ise bazı numunelerde (sadece

25 kat UHMW-PE ile 25 kat UHMW-PE ve 1 kat ERKFP) V50 hızlarında düşüş görülürken, bazı numunelerde (sadece 25 kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP ile 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP) artış görülmüştür.

İstatistiksel analizler için SPSS programı kullanılarak, Spearman korelasyon analizi yapılmıştır. Bu analizler ile sıcaklık ve kompozit ürünlerin katsayılarındaki değişimlerin, V50 hızındaki değişimlerle ilişkisi incelenmiştir. Bu analizde korelasyon katsayısı (r) -1 (Negatif yönlü) ile 1 (Pozitif yönlü) arasında değerler almaktadır. Değerin negatif yönlü olması halinde biri artarken, diğeri düşüş göstermektedir. Bu değer arttıkça korelasyon ilişkisi artmaktadır. Yapılan analiz sonucu elde edilen değerler çizelgede 4.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.21 Artan ERKFP miktarı ve artan sıcaklıkların V50 hızına etkisi.

	ERKFP miktarı		Sıcaklık
	r	0,972	0,030
	p	0	0,927

r; korelasyon katsayısı, p; anlamlılık derecesi

ERKFP miktarı ile hız arasında korelatif ilişki olup olmadığını değerlendirmek için spearman korelasyon testi yapılmıştır. Analiz bulgularına göre karbon miktarı ile hız arasında pozitif yönlü çok güçlü ($r=0,972$) ve istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmuştur ($p<0,05$).

Sıcaklık ile hız arasında korelatif ilişki olup olmadığını değerlendirmek için yapılan analizde ise sıcaklık ile hız arasında pozitif yönlü çok zayıf bir ($r=0,030$) ilişki bulunmuştur. Analiz bulgularına göre sıcaklık ile hız arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunamamıştır ($p>0,05$). Analiz yapılırken sıcaklıklar (sırasıyla), -35 °C, oda sıcaklığı, +70 °C olarak (artan şekilde) analize dahil edilmiştir.

4.3 Üç Nokta Eğme Testleri

Zırh malzemelerinin eğilme davranışlarının tespit edilmesi için ASTM D790-03 standardına göre üç nokta eğme testleri yapıldı. UHMW-PE kompozitler için, üç nokta eğme testi, tam olarak uygulanamayan doğrusal kiriş teorisi, nötr ekseninde kayma ve diğer doğrusal

olmayan etkiler nedeniyle sadece görünür özellikler olarak ele alınmalıdır (Zülkifli vd. 2019).

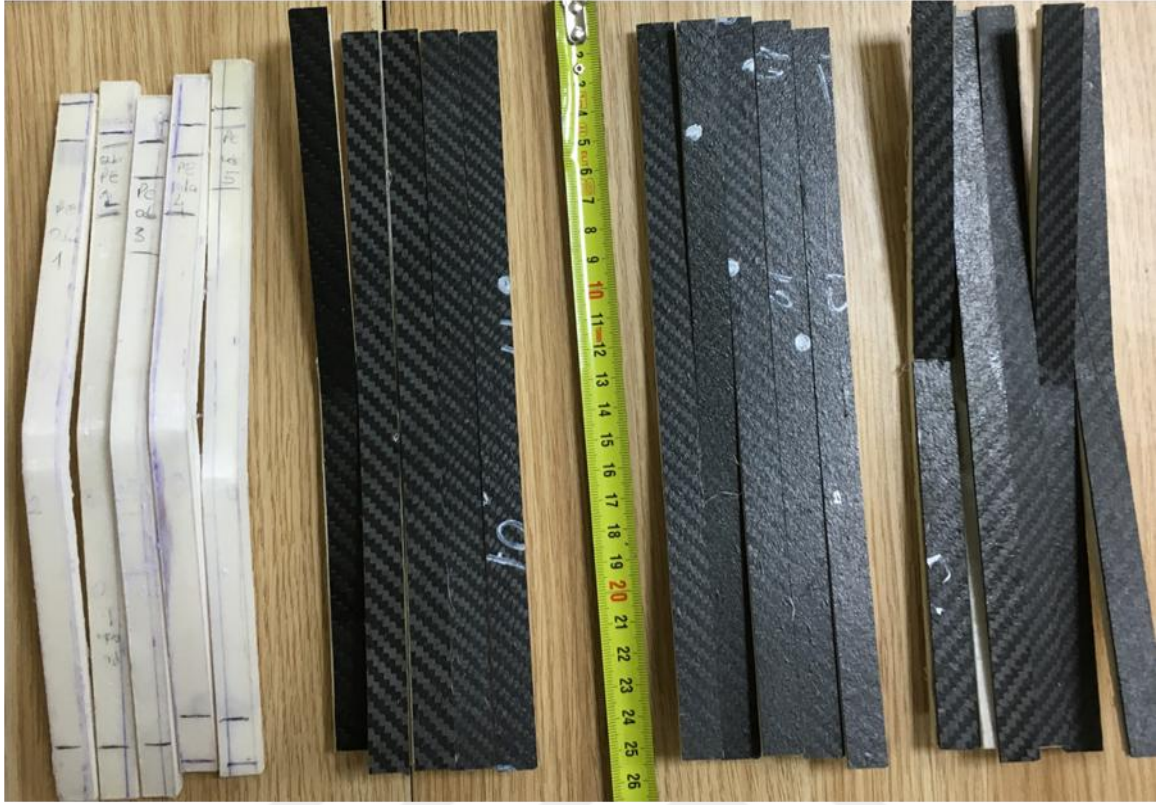


Resim 4.10 UHMW-PE ve ERKFP içeren numunenin üç nokta eğme testi.

İlk önce oda sıcaklığında testler yapıldıktan sonra, sıcak ve soğuk şartlandırma yapılarak testler gerçekleştirildi. UHMW-PE ve ERKFP içeren numunenin test edilmesine ait fotoğraf Resim 4.10’da gösterilmiştir. UHMW-PE ve ERKFP’den oluşan numunelerden, her konfigürasyon için beşer adet numune test edilmiş, yapılan testlerin ortalamaları alınarak sonuçlar çıkarılmış ve yorumlanmıştır.

4.3.1 Oda Sıcaklığında Yapılan Testler

Oda sıcaklığında test yapılan 4 konfigürasyondan beşer adet numunenin test sonrası görüntüleri Resim 4.11’de gösterilmiştir. Test sonrasında ERKFP eklenen numunelerin bir kısmında, ERKFP’lerin UHMW-PE’lerden bölgesel olarak ayrıldıkları gözlemlenmiştir. Ancak aynı malzemelerin (ERKFP ve UHMW-PE) kendi içlerinde çok iyi yapıştıkları ve kesinlikle birbirlerinden ayrılmadıkları görülmüştür.



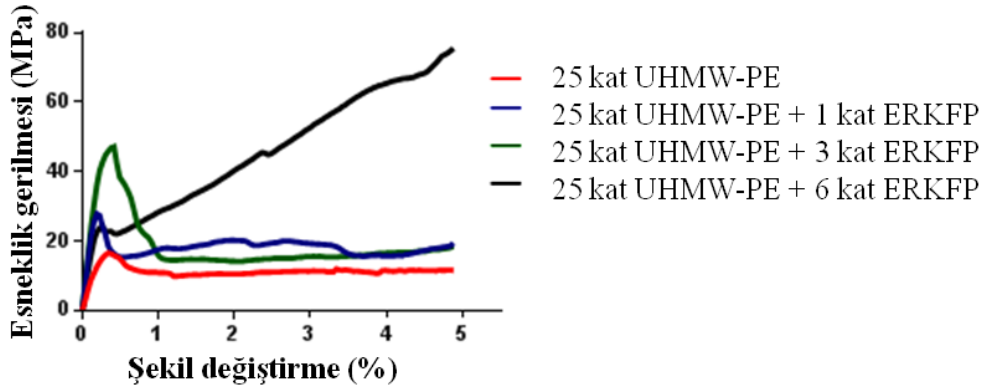
25 kat
UHMW-PE

25 kat
UHMW-PE +
1 kat ERKFP

25 kat
UHMW-PE +
3 kat ERKFP

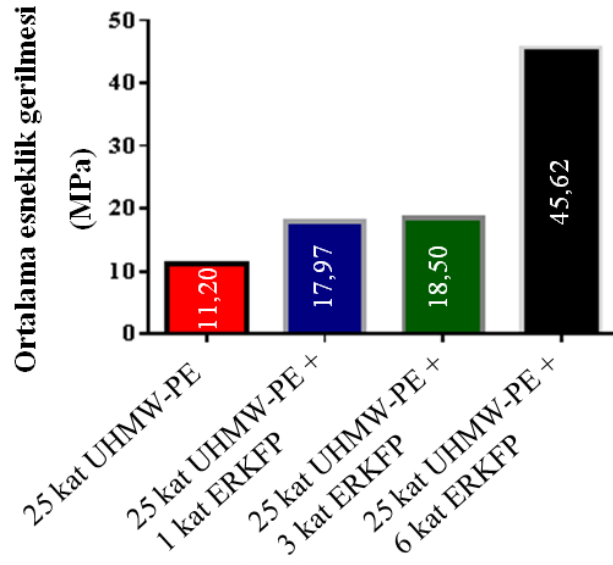
25 kat
UHMW-PE +
6 kat ERKFP

Resim 4.11 Numunelerin test sonrası görüntüleri.



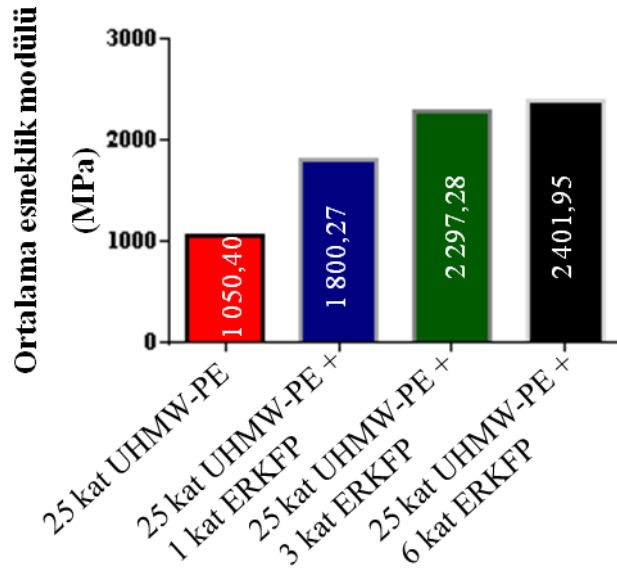
Şekil 4.9 Artan ERKFP miktarına göre σ_{eg} - ϵ değişimi.

Şekil 4.9'a göre numunelerin ERKFP miktarı arttıkça esneklik gerilmesi de artmıştır. Test ASTM D790-03'e göre esnek malzemelerde, test numune kırılınca kadar ya da şekil değişirme % 5 oluncaya kadar devam ettirilmektedir. Yapılan testlerde numuneler kırılmamış ve şekil değişirme % 5 olunca sonlandırılmıştır.



Şekil 4.10 Artan ERKFP miktarına göre ortalama esneklik gerilmesi.

Artan ERKFP miktarına göre malzemelerin ortalama esneklik gerilmesini gösteren grafik Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Şekil 4.10’da elde edilen değerler, test süresince ortaya çıkan ve denklem 3.3 kullanılarak hesaplanan bütün değerlerin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. ERKFP miktarı arttıkça ortalama gerilmeler de artmış, sadece 25 kat UHMW-PE içeren numune de 11,20 MPa iken, 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP eklenen numunede 45,62 MPa seviyesine kadar yükselmiştir.



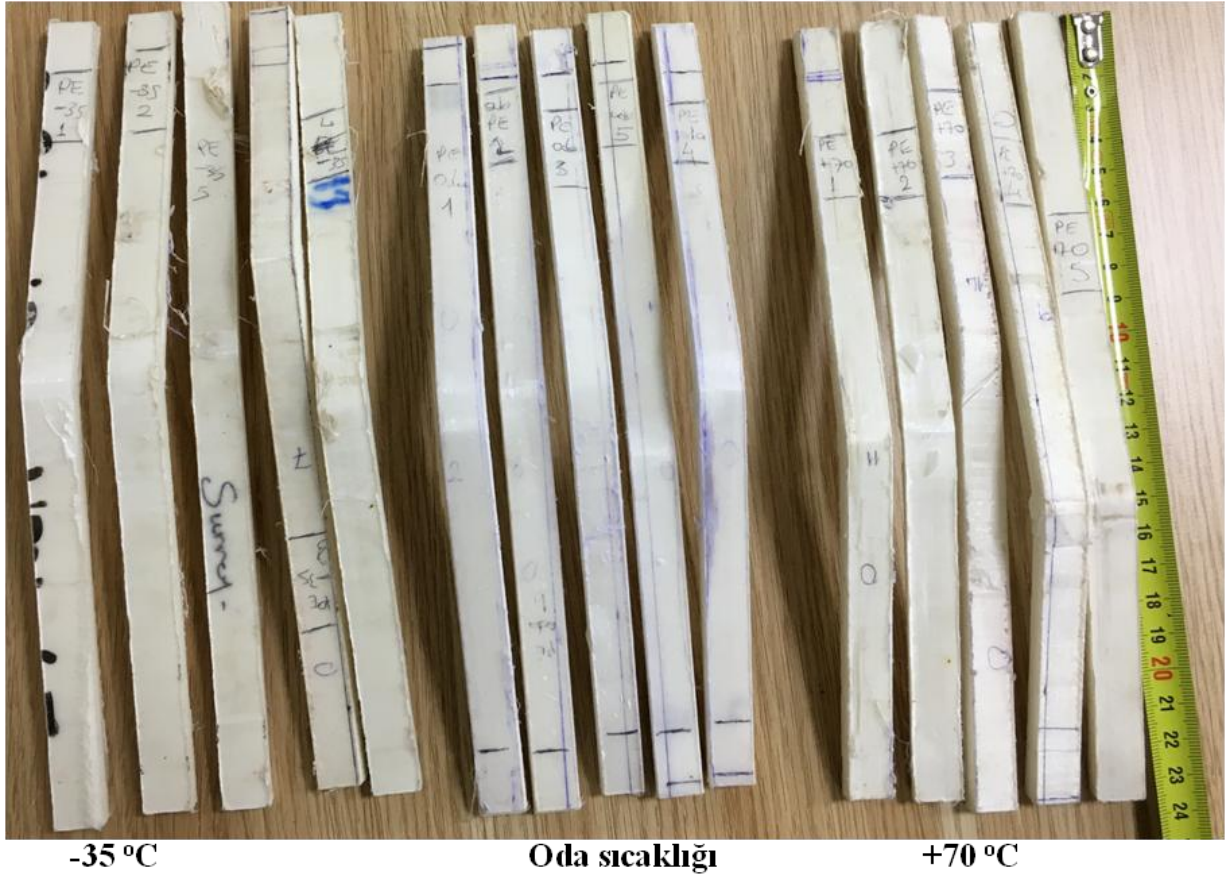
Şekil 4.11 Artan ERKFP miktarına göre ortalama esneklik modülü.

Numunelerin denklem 3.5 ile hesaplanan ortalama esneklik modülü şekil 4.11’de gösterilmiştir. Sadece 25 kat UHMW-PE’den oluşan numunenin ortalama esneklik modülü 1 050,40 MPa seviyesindeyken, 6 kat ERKFP eklendiğinde bu değer 2 401, 95 MPa seviyesine yükselmiştir.

4.3.2 Şartlandırmaya Tabi Tutulan Numunelere Yapılan Testler

Sadece 25 kat UHMW-PE ile 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP’den oluşan numuneler sıcak ve soğuk şartlandırmaya tabi tutulmuştur.

4.3.2.1 UHMW-PE Numunenin Şartlandırılması

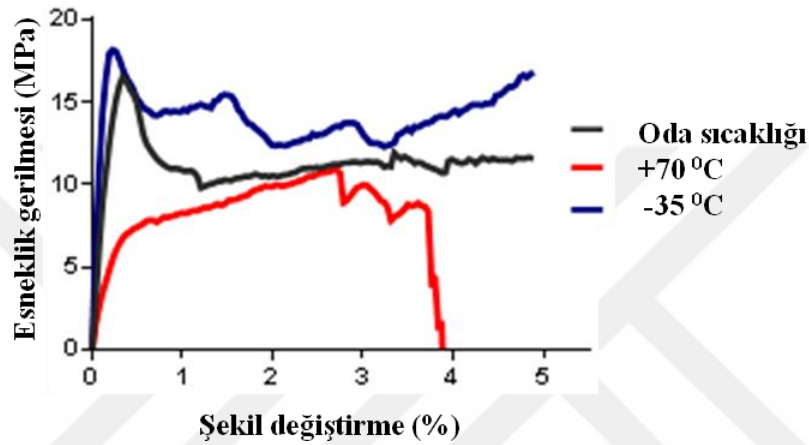


Resim 4.12 Şartlandırılan 25 kat UHMW-PE numunenin test sonrası görüntüleri.

Sadece UHMW-PE’den oluşan numune, +70 °C ve -35 °C sıcaklıkta 24 saat şartlandırılmış ve hemen ardından üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Test

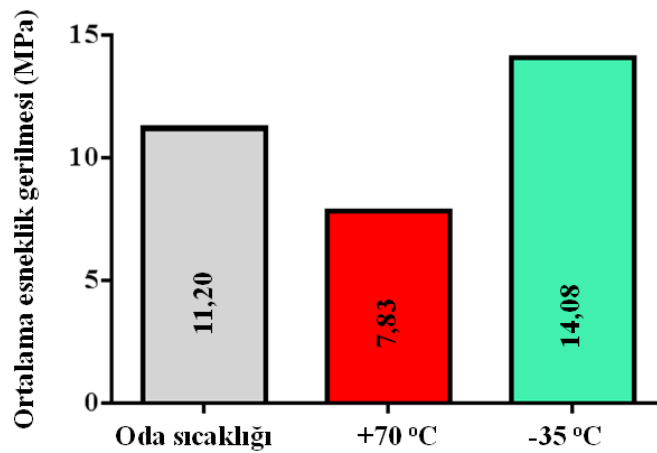
sonucunda ortaya çıkan numune görüntüleri (her sıcaklıkta 5 adet toplam 15 numune) Resim 4.12’de gösterilmiştir.

Şartlandırma sonucu elde edilen σ_{eg} - ϵ grafiği Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Sadece 25 kat UHMW-PE numune, -35 °C’de şartlandırıldığında esneklik gerilmesi bir miktar artarken, +70 °C’de ise önemli ölçüde azalmış, şekil değiştirmesi % 4’e ulaştıktan sonra ise özelliklerini tamamen kaybetmiştir.



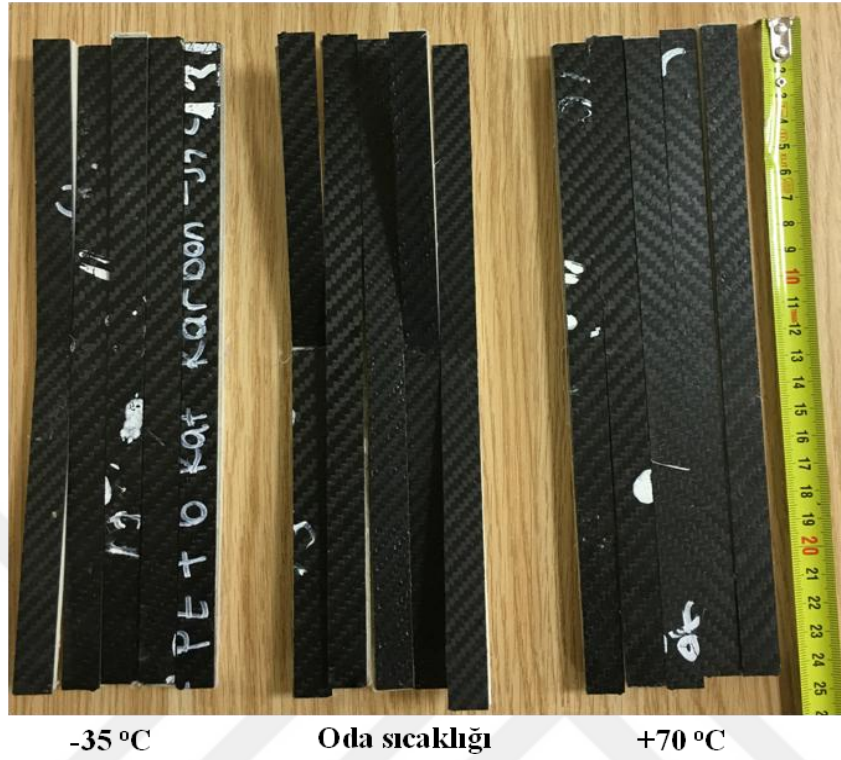
Şekil 4.12 Şartlandırılan 25 kat UHMW-PE’nin σ_{eg} - ϵ grafiği.

Testler süresince elde edilen ortalama esneklik gerilmeleri verilerinin gösterildiği grafik Şekil 4.13’te gösterilmiştir. Ortalama esneklik gerilmesi, soğuk şartlandırmada artmış, sıcak şartlandırmada ise azalmıştır. Sıcak şartlandırmada şekil değişirme % 4 olunca, test sonlandığı için daha az veri kullanılarak, ortalama alınmıştır.



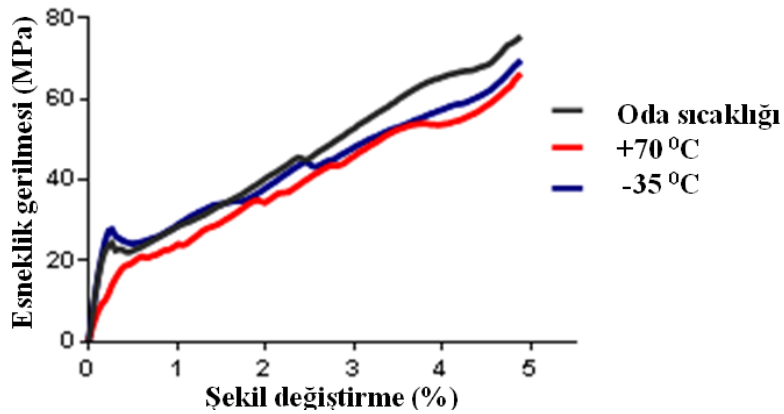
Şekil 4.13 25 kat UHMW-PE’nin sıcaklık değişimine bağlı ortalama esneklik gerilmesi grafiği.

4.3.2.2 UHMW-PE ve 6 kat ERKFP Numunenin Şartlandırılması

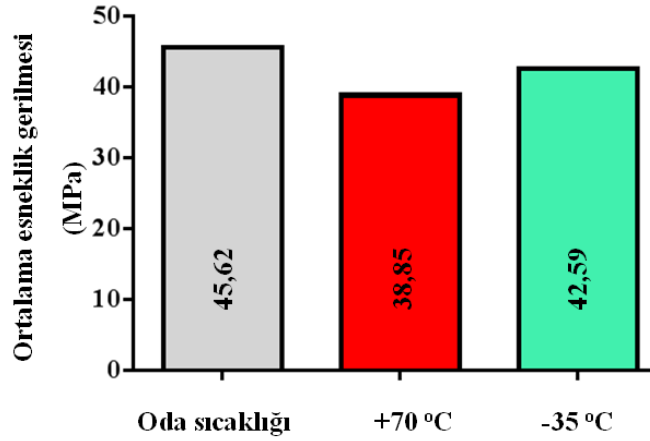


Resim 4.13 Şartlandırılan 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP numunenin test sonrası görüntüleri.

25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP'den oluşan numunenin şartlandırma sonrası görüntüleri Resim 4.13'de gösterilmiştir. 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP numune, -35 °C ve +70 °C'de şartlandırıldıktan sonra esneklik gerilmesinde meydana gelen değişim Şekil 4.14'de gösterilmiş, şartlandırmalardan sonra malzemenin esneklik gerilmesi özelliğinde önemli bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 4.14 Şartlandırılan 25 kat UHMW-PE ve 6 ERKFP'nin σ_{ϵ} - ϵ grafiği.

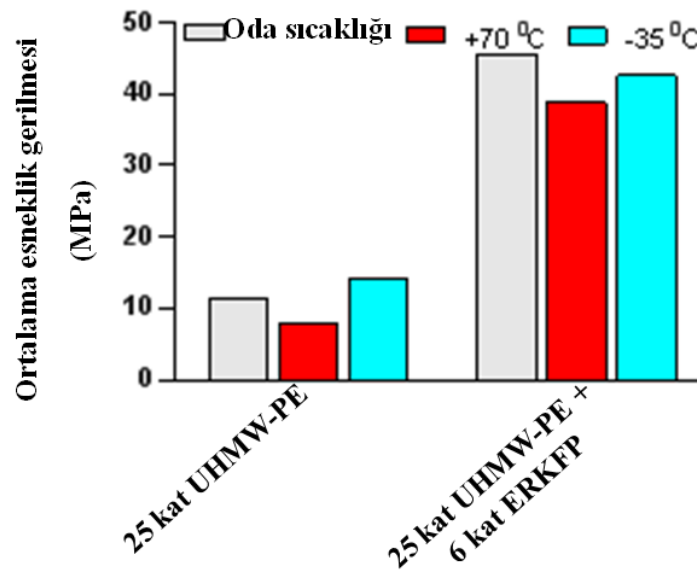


Şekil 4.15 25 kat UHMW-PE ve 6 ERKFP'nin sıcaklık değişimine bağlı ortalama esneklik gerilmesi grafiği.

25 kat UHMW-PE ve 6 ERKFP'nin sıcaklık değişimine bağlı ortalama esneklik gerilmesi grafiği Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Numunenin ortalama esneklik gerilmesi sıcak ve soğuk şartlandırmayla beraber oda sıcaklığı ile kıyaslandığında azalmıştır.

4.3.3 Bütün Numunelerin Ortalama Esneklik Gerilmelerinin Kıyaslanması ve İstatistiksel Analiz

Şartlandırma yapılan numunelerin (25 kat UHMW-PE ve 25 kat UHMW-PE + 6 kat ERKFP) ortalama esneklik gerilmelerinin kıyaslanması Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Şartlandırma yapılan numunelerin ortalama esneklik gerilmelerinin kıyaslanması.

Şekil 4.16'ya göre, 25 kat UHMW-PE ile 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP numunelerinin tüm testleri karşılaştırıldığında çok büyük bir artış (bütün testlerin ortalamaları alındığında yaklaşık % 284) ortaya çıkmıştır. 25 kat UHMW-PE'nin soğuk şartlandırmada ortalama esneklik gerilmesi artarken, 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP'nin azalmıştır. Ancak, sıcak şartlandırmada bütün numunelerin ortalama esneklik gerilmesi azalmıştır.

Çizelge 4.22 Artan ERKFP miktarı ve artan sıcaklıkların ortalama esneklik gerilmesine etkisi.

		ERKFP Miktarı	Sıcaklık
Ortalama esneklik	r	0,951	-0,231
gerilmesi (MPa)	p	0	0,581

r; korelasyon katsayısı, p; anlamlılık derecesi

Artan ERKFP miktarı ve artan sıcaklıkların ortalama esneklik gerilmeleri ile korelatif ilişkisinin olup olmadığını anlamak için SPSS programı ile korelasyon analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucu elde edilen korelasyon katsayısı ve anlamlılık derecesi Çizelge 4.22'de gösterilmiştir.

Karbon miktarı ile ortalama esneklik gerilmesi arasında korelatif ilişki olup olmadığını araştırmak için Spearman korelasyon testi yapılmıştır. Karbon miktarı ile ortalama eğilme gerilmesi arasında pozitif yönlü çok güçlü ($r=0,951$) bir ilişki bulunmuştur. Analiz bulgularına göre Karbon miktarı ile ortalama eğilme gerilmesi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmuştur ($p<0,05$).

Sıcaklık ile ortalama eğilme gerilmesi arasında negatif yönlü zayıf ($r= -0,231$) bir ilişki bulunmuştur. Analiz bulgularına göre sıcaklık ile hız arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunamamıştır ($p>0,05$).

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Zırh konusu, dünyada yaşanan gelişmeler, terör, iç güvenlik ve sınır ötesi hareketler dikkate alındığında her zaman önemini devam ettirecek bir çalışma alanıdır. Yapılan bu çalışma ile UHMW-PE ve ERKFP malzemelerden farklı konfigürasyondaki zırhlar birleştirilerek hibrit zırh geliştirilmiş ve balistik özellikleri incelenmiştir.

Buna ilave olarak bahse konu zırhların çeşitli iklim koşullarında kullanılacağı da göz önüne alınarak, üretilen zırhlar sıcak ve soğuk şartlandırma işlemine de tabi tutulmuştur.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, sadece ERKFP veya sadece UHMW-PE malzemeler ile ilgili ayrı ayrı birçok çalışma olduğu, bu malzemelerin farklı yönleriyle incelendiği görülmektedir. Ancak; bu iki malzemelerin hibrit olarak birleştirilmesi, şartlandırılması, balistik ve mekanik dayanımının aynı anda incelenmesi ile ilgili çok çalışma olmadığı görülmüştür.

5.1 Balistik Testler

Balistik testlerde, NIJ0101.04 standardına göre III-A seviyesi mermi testleri ve STANAG 2920 standardına göre şarapnel testi yapılmıştır.

5.1.1 Mermi Testleri

Mermi testlerinde zırhın testten geçmesi için önce delinmemesi gerekmektedir. Eğer bu kriter sağlanırsa, zırhın arkasına yerleştirilen macunda oluşan deformasyonun derinliği ölçülerek, balistik malzemenin istenilen seviyede koruma yeteneği olup olmadığı belirlenir. NIJ0101.04 standardına göre III-A seviyesine göre, 9 mm FMJ mermi ile 5 m mesafeden $436 \pm 9,1$ m/s hızlarda atışlar yapılmıştır. Söz konusu standarda göre, numuneyi delmeyen vuruşta, numunenin arka kısmında bulunan dolgu malzemesi üzerinde meydana getirdiği azami çöküntünün 44 mm olması istenir.

Mermi testleri sadece 25 kat UHMW-PE zırha uygulanmıştır. Yapılan 4 testten (24 atış) sonra zırhların arka kısmındaki malzemede oluşan çöküntü miktarı 20 ve 27 mm olarak ölçülmüştür. 25 kat UHMW-PE zırhın bu seviyede koruma yeteneğini sağladığı görülmüştür.

Lassig vd. (2018) UHMW-PE ile yaptığı çalışmada presleme işleminde, daha yüksek basınçlarda daha iyi bir balistik performans gösterdiğini belirtmiştir. 600 tonluk presin maksimum basıncı (58,84 bar) ile presleme yapılmış, zırhlar literatüre uygun olarak istenen seviyede balistik performans göstermiştir.

Zırhlar tek yönlü (UD) UHMW-PE'den imal edilmiştir. Zhang vd. (2014), UD, 2D düz dokuma ve 3D tek katlı ortogonal dokuma UHMW-PE kompozit laminatların balistik davranışlarını incelemiş, en yüksek korumalı zırhların tek yönlü kompozit olduğunu göstermişlerdir. Yapılan bu tez çalışmasında da UD malzeme istenen seviyede koruma sağlamıştır.

Zulkifli vd. (2019), UHMW-PE ve ERKFP'nin diziliş sırasıyla ilgili çalışmalarında, UHMW-PE malzemenin ortasına ERKFP eklediklerinde mermi testlerinde delinme olduğunu göstermişlerdir. Dolayısıyla, hibrit zırhlarda araya herhangi bir ilave malzeme girmeden 25 kat UHMW-PE birleştirilmiştir. Sonrasında ERKFP içeren numunede 25 kat UHMW-PE üretildikten sonra sadece ön yüzeylere ilave edilmiştir.

25 kat UHMW-PE zırhın bu seviyede koruma yeteneğini sağladığından fragment testlerine 25 kat UHMW-PE zırh konfigürasyonu ile başlanmıştır.

5.1.2 Şarapnel Testleri

V50 değeri, 1,1 g'lık çelik bir parçacığın belirtilen hızda, zırha isabet ettiğinde % 50 ihtimalle delineceği hızı ifade etmektedir. Bu açıdan V50 değeri önem arz etmektedir. Geçmiş dönemlerde, birçok güvenlik görevlisi mayın ve el yapımı patlayıcıların infilak etmesi sonucu oluşan parçacıklar nedeniyle şehit olmuş, uzuv kaybı yaşamış ya da ciddi şekilde yaralanmışlardır. Nitekim, Cantenar ve Tümlü (2016), 1993-2012 arasında

terörle mücadele olaylarını incelemişler, mayın ve el yapımı patlayıcılardan kaynaklı eylemlerin tüm eylemlerin % 20,5'i, zayıflığın ise bütün kayıpların % 26'sı olduğunu bildirmişlerdir. Bu tehditlerin her dönemde devam etmesi nedeniyle zırhların V50 dayanımlarının yüksek olması, parçacık tesirine karşı zırhın ve dolayısıyla kullanan kişinin daha iyi korunması anlamına gelmektedir.

Zulkifli vd. (2019)'nin yaptıkları çalışmada, sadece UHMW-PE plaka ile kıyaslandığında ön ve arkaya karbon eklenen plakalarda V50 performansında iyileşme, ortada karbon fiber olan plakalarda ise bozulma olduğunu gösterdiler. Literatüre uygun olarak (Park vd. 2013, Kedzierski vd. 2016, Cuniff 1992, Yang ve Chen 2017) balistik direnç için fayda sağlamaması nedeniyle UHMW-PE'ler zırhın vurucu yüzüne yerleştirilmemiş, ERKFP kompozitlerin vurucu yüzeylerine yerleştirilmiş ve parçacık tesirine karşı yüksek dayanım sağlanmıştır. Ön kısımlara ilave edilen ERKFP miktarına bağlı olarak balistik performans düzenli olarak artmıştır.

Hali hazırda kullanılan balistik yeleklerde kullanılan zırh plakaları incelendiğinde, bazılarında vuruş yönleri belirtilmektedir (Resim 5.1). Sadece UHMW-PE zırhlarda yön belirtilmezken, UHMW-PE ve ERKFP hibrit zırhlarda ERKFP tek yüze yerleştirildiğinde bu yön atış yönü olarak özellikle belirtilmelidir.



Resim 5.1 Vuruş yönü belirtilen zırh plakası örneği (İnt. Kyn. 4).

Parçacık testleri, ilk olarak oda sıcaklığında yapılmış, daha sonra sıcak ve soğuk şartlandırmaya tabi tutularak yapılmıştır.

Oda sıcaklığında yapılan parçacık testlerinde UHMW-PE kompozitlere, ERKFP ekledikçe V50 değeri yükselmiştir. Sadece 25 kat UHMW-PE'den oluşan zırhların V50 değeri 669 m/s iken, 1 kat ERKFP ilave edildiğinde 723 m/s, 3 kat ERKFP ilave edildiğinde 767 m/s ve 6 kat ilave edildiğinde ise 821 m/s seviyesine kadar yükselmiştir. Dolayısıyla 1, 3 ve 6 kat ERKFP ilave edildiğinde V50 değerleri sırasıyla, % 8, % 14,6 ve % 22,6 artmıştır. Bu artışı sağlamak için sırasıyla yaklaşık, % 6, % 18 ve % 38'lik ilave ağırlık artışı olmuştur.

Zırhların balistik performanslarının daha iyi karşılaştırılması için alansal yoğunluğa göre absorbe edilen enerjiler (AYGAE) hesaplanmıştır. UHMW-PE zırha, 1, 3 ve 6 kat ERKFP eklendiğinde AYGAE değerleri sırasıyla, % 9,9, % 11,5 ve % 9,4 artmıştır. Bu sonuçlara göre; en hafif zırh konfigürasyonu sadece 25 kat UHMW-PE, balistik olarak en mukavemetli zırh konfigürasyonu 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP iken, ağırlık ve balistik özelliklerle ilgili optimizasyon yapıldığında en iyi konfigürasyonun 25 kat UHMW-PE ve 3 kat ERKFP'den oluşan konfigürasyon olduğu görülmektedir.

Güvenlik kuvvetleri zırhları farklı iklim koşullarında (çöl şartlarında, soğuk iklimlerde) kullanmaktadır. Bu nedenle tasarlanan ürünlerin farklı iklim koşullarında koruyuculuklarını sürdürmeleri çok büyük bir önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında tasarlanan tüm zırhların -35 °C ve +70 °C'de şartlandırma yapıldıktan sonra balistik açıdan koruma işlevini devam ettirdikleri belirlenmiştir.

Sadece UHMW-PE malzeme ile şartlandırma testleri sonucunda, literatüre (Chabba vd. 2007) uygun olarak zırhta bozulma olmadığı görülmüştür. Benzer şekilde, Sapozhnikov vd. (2015) UHMW-PE ve aramid kompozitlerin parçacık tesirine karşı korumasını araştırdıkları çalışmada -60 °C ila +60 °C sıcaklık aralığında Dyneema kompozitleri için V50 değişiminin ihmal edilebilir olduğunu göstermişlerdir.

ERKFP ve UHMW-PE hibrit zırhların sonuçları incelendiğinde ise, +70 °C'de literatüre uygun olarak (Liu vd. 2020) V50 hızında bir miktar yükselme görülmüştür. Ancak 1 kat ERKFP eklenmesi V50 hızında çok düşük bir artışa neden olmuştur. 3 kat ERKFP

eklenen numunede V50 hızı yaklaşık % 5 artarken, 6 kat ERKFP eklenen zırhta ise yaklaşık % 3 oranında artmıştır.

ERKFP ve UHMW-PE hibrit zırhların -35 °C’de şartlandırmasında, tek kat ERKFP eklenen numunede V50 hızı aynı kalırken, 3 kat ERKFP eklenen numunede % 5 artmış, 6 kat ERKFP eklenen numunede ise % 6 artmıştır. Literatür incelendiğinde (Gomez del Rio vd. 2005), ERKFP numunelerin soğuk şartlandırma ile ilgili mekanik özelliklerinin bir miktar düştüğü görülmüş, ancak düşük sıcaklıklarda balistik özelliklerinin incelenmesi ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Yapılan istatistik analizlerde, ERKFP miktarı arttıkça V50 hızının korelatif olarak arttığı, ancak sıcaklık değişimi ile ilgili korelatif anlamlı bir değişim olmadığı tespit edilmiştir.

5.2 Üç Nokta Eğme Testleri

Malzemelerin eğilme özelliklerini incelemek maksadıyla üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Zırhlara ilk olarak oda sıcaklığında testler yapılmış, sonra sıcak ve soğuk şartlandırma yapılarak testler yapılmıştır.

Oda sıcaklığında yapılan testlerde, literatüre uygun olarak (Zulkifli vd. 2019) UHMW-PE kompozitlere, ERKFP ekledikçe eğme gerilmesi artmıştır. Ortalama eğme gerilmesi 25 kat UHMW-PE malzemeye, 1 kat ERKFP eklendiğinde % 60, 3 kat ERKFP eklendiğinde % 65 ve 6 kat ERKFP eklendiğinde % 307 artmıştır. Ortalama gerilme modülü ise, 1, 3 ve 6 kat ERKFP eklendikçe, sırasıyla % 71, % 119 ve % 129 artmıştır.

UHMW-PE’ye farklı oranlarda epoksi emdirilmesi ile ilgili yapılan bir çalışmada (Liu vd.2006), epoksi ilavesi ile camsı geçiş sıcaklığı değişim göstermemiş, çekme mukavemeti artmış, sürünme davranışı ve termal özelliklerinde bir miktar iyileşme sağlamıştır. Diğer bir çalışmada (Li vd. 2019) kromik asitle birleştirilmiş UHMW-PE liflerine ve saf UHMW-PE liflerine epoksi eklenince eğilme mukavemeti ve modülü,

saf epoksiden sırasıyla % 26.2 ve % 26.0 daha artmıştır. Yapılan çalışmada da EFRKP ilavesi ile eğilme mukavemeti ve eğilme modülü artmıştır.

Sadece 25 kat UHMW-PE'den oluşan zırh ile 25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP'den oluşan zırhlara şartlandırma yapıldıktan sonra üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Malzemeler, 24 saat soğuk (-35 °C) ve sıcak (+70 °C) şartlandırmaya tabi tutulduktan sonra testler yapılmıştır.

25 kat UHMW-PE'nin +70 °C' de, şartlandırılmasında deplasman 40 mm seviyesine ulaştığında malzeme kendini bırakmış, kuvvet sıfırlanmıştır ve malzemenin mekanik özelliklerinde bozulmalar görülmüştür. Literatüre uygun olarak (Zhang vd. 2020 ve Dessain vd. 1992), ortalama esneklik gerilmesi, oda sıcaklığında yapılan testlere kıyasla, sıcak şartlandırmada % 30 azalmıştır. -35 °C soğuk şartlandırmada ise (oda sıcaklığında yapılan testlere göre) % 25,65 artış göstermiştir. Bu sonuçlara göre UHMW-PE kompozitlerin ortam sıcaklıklarına karşı çok hassas oldukları görülmektedir. Li vd. (1999) ve Folgar (2016)'ın yaptıkları çalışmalarda bu hassasiyetleri nedeni ile karbon ile hibritlemenin uygun olacağını belirtmişlerdir.

25 kat UHMW-PE ve 6 kat ERKFP'den oluşan numunelere sıcak şartlandırmaya tabi tutulduğunda ortalama esneklik gerilmesi % 15 azalmış, soğuk şartlandırmada ise % 7 azalmıştır. Wang vd. (2014) yaptıkları çalışmada 110 °C yaptıkları yaşlandırmada 480 saate kadar mekanik özelliklerinin arttığını belirtmişlerdir. Sıcak şartlandırmada esneklik gerilmesinde oluşan azalmanın, eklenen 6 kat ERKFP'den değil UHMW-PE malzemedan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Yapılan istatistik analizlerde, ERKFP miktarı arttıkça ortalama esneklik gerilmesinin korelatif olarak arttığı, ancak sıcaklık değişimi ile ilgili korelatif, anlamlı bir değişim olmadığı tespit edilmiştir.

5.3 Zırhların Kullanım Alanları ve Genel Değerlendirmeler

Karbon fiberler balistik son kullanım için uygunsuz (Agrawal 2011) olduğundan ve UHMW-PE malzemenin çevresel etkilere karşı çok hassas olduğundan, bu iki malzemeden hibrit bir zırh imal edilmesi birbirlerinin zayıf yönlerini gidermesi nedeniyle uygun olacaktır.

UHMW-PE zırhlara ERKFP ilave edilmesi, zırhın stabilitesine önemli katkı sağlamaktadır. Çünkü UHMW-PE malzemeler balistik dayanımı çok yüksek olmasına rağmen çevresel etkilere (sıcaklık, soğukluk, suyla temas vb.) daha kolay etkilenebilir. Uzun süre kullanımda sadece UHMW-PE malzemelerden imal edilen zırhlarda, katlar arasında ayrışmalar ve deformasyonlar gözlemlenmektedir. Bu ayrışmalar, termoplastik malzeme olmasından ötürü, yeniden sıcak presleme ile giderilmektedir. Ancak bu iş için, tekrar enerji ve işçilik maliyeti gerekmektedir. Epoksi reçineli zırh kullanımı ile UHMW-PE zırhlarda bulunan bu ek giderlerin azaltılabileceği öngörülmektedir.

Tasarlanan hibrit zırhların hafif olması ve farklı çevresel koşullarda bile koruyuculuğunun yüksek olması nedeniyle sahada kullanım yeri bulabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, hibrit malzemeler istenen tehdit seviyelerine göre optimize edilerek (zırhların katsayı artırılması veya azaltılması) kullanılabilir. Örnek olarak uzun yürüyüşlerde kullanılan zırhlarda balistik korumanın yanında hafiflik de çok önemli olmaktadır. Diğer taraftan, fazla yürüyüş gerektirmeyen nokta operasyonlarda (tehdidin yerinin ve operasyonun zamanının belli olduğu) balistik koruma daha ön plana çıkmaktadır. Bahsedilen iki durum içinde katsayıları değiştirilerek istenen koruma seviyesi ve ağırlıkta zırhlar üretilebilecektir.

Ayrıca açıkta (herhangi bir kılıf benzeri malzeme kullanmadan ya da havayla direkt temas ettiği durumlarda) kullanımda, özellikle suyla temas ettiği durumlarda, poliürea benzeri bir malzeme ile kaplanması halinde zırhın daha uzun ömürlü olacağı öngörülmüştür. UHMW-PE ile hibritlenmiş zırhların poliürea ile kaplanmasının darbe dayanımına da katkısı olduğu belirtilmiştir (McDowall 2018). Ancak yapılacak bu

kaplamanın da ilave ağırlık ve kalınlık getireceği de unutulmamalıdır. Kaplama çalışmasının bu çalışmanın devamı niteliğinde olabileceği mütalaa edilmiştir.

Resim 5.2’de NIJ 0101.04 standardına göre III-A seviyesinde koruma sağlayan balistik kompozit başlık örneği verilmiştir. Geliştirilen bütün konfigürasyondaki zırhlar, istenen şekle göre kalıp tasarımı (ısıtma ve soğutma özelliği olan) yapılarak III-A koruma sağlayan kompozit başlık imalatında kullanılabilir. Literatür (Li vd. 2019, Kulkarni vd. 2013, Folgar 2016, Zulkifli vd. 2019) ve tez kapsamında yapılan çalışmalar dikkate alındığında, sıcaklık ve çevresel şartlara karşı hassasiyeti de göz önüne alınarak, sadece UHMW-PE’den oluşan zırhların yerine, UHMW-PE ve ERKFP’den oluşan hibrit zırhların kullanımının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Buna ilave olarak, piyasada bulunan kompozit başlıkların STANAG 2920’ye göre koruma seviyeleri, 450 m/s’den başlayarak 1000 m/s seviyelerine kadar geniş bir yelpazede bulunduğu görölmektedir. Tez kapsamında, geliştirilen zırh konfigürasyonlarının V50 değerleri (oda sıcaklığında), 669,1 m/s ile 820 m/s arasında değişmektedir. Zırhlar, istenen koruma seviyesi ve ağırlık optimizasyonu yapılarak, ihtiyaç olması halinde V50 değerini artırmak için kat sayısı ilavesi de yapılarak başlık imalatında kullanılabilir.



Resim 5.2 Kompozit başlık örnekleri (a) İnt. Kyn. 5, b) İnt. Kyn. 6).

Resim 5.3’de balistik kompozit yelek örneği gösterilmiştir. Balistik yeleklerde isteğe bağlı olarak sert ve yumuşak zırhlar kullanılmaktadır. Yumuşak zırhlar, daha esnek olmasına rağmen, NIJ 0101.04 standardında III-A seviyesinde (tabanca, makineli

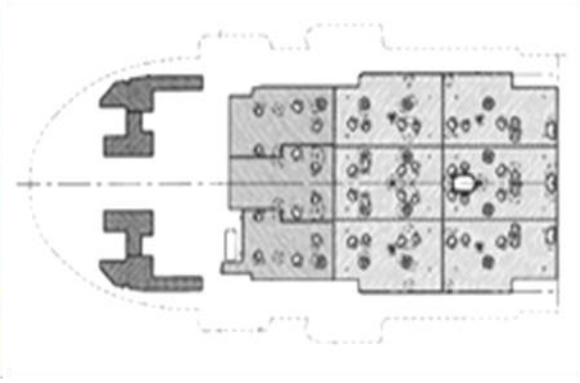
tabanca 9 mm FMJ mermi) koruma sağlamaktadırlar. Sert zırhlar ise NIJ 0101.04 standardında III ve IV seviyesinde (piyade tüfeği) koruma sağlamaktadır. Sert zırhlar kullanıcının ihtiyacına göre yeleğin farklı bölgelerinde (Ön, arka, yan, omuz) kullanılabilmektedir.

Piyasada bulunan yeleklerin V50 koruma seviyeleri 550 m/s ile 1000 m/s arasında değişmektedir. Tez kapsamında üretilen zırhlar, parçacık tesirine karşı koruma kriterini sağlamakla birlikte III-A seviyesinde koruma sağlayabilmektedir. Bu nedenle zırhların III seviyesinde koruma ihtiyacı olması durumunda, 25 kat UHMW-PE zırha kat ilavesi yapılması gerekmektedir. Ancak, IV seviye koruma söz konusu olduğunda seramik zırhlar kullanıldığından, kat sayısı ilavesi yapılsa bile UHMW-PE zırhlarla bu ihtiyaç giderilemeyecektir.



Resim 5.3 Balistik kompozit yelek (İnt. Kyn.7).

Helikopterlere modüler olarak sökülüp takılabilen taban zırhı ile ilgili fotoğraf Resim 5.4’te gösterilmiştir. Helikopterlerde, manevra ve hareket için ağırlık çok önemli bir özelliktir. Bu nedenle de içine konulan zırhların olabildiğince hafif olması gerekmektedir. Piyasada bulunan zırhların birçoğunun UHMW-PE malzemeden imal edildiği görülmüştür. Bu çalışmada imal edilen zırhların istenen balistik koruma ve ağırlığa göre optimize edilerek kullanılabileceği öngörülmüştür.



Resim 5.4 Helikopter taban zırhı (Yavaş 2008).

Zırh konusu tartışmasız hayatın her alanında, tehditin görüldüğü her yerde ortaya çıkmaktadır. Bomba çöp bidonu, balistik perdeler, araç ve helikopter zırhlandırmaları ve bina zırhlandırmaları bunun örneklerindendir. Bu çalışmada geliştirilen zırhlarda ihtiyaca bağlı olarak, balistik açıdan istenen şartları sağlandığı her yerde kullanılabilir. Bu tez kapsamında çalışılan malzemelerle yapılacak ilave çalışmalarla, son kullanım için çok farklı seçenekler ortaya çıkabilecektir.

Bu çalışma kapsamında yapılan çalışmalarda üretilen zırhlarla ilgili sonuçlar özet olarak müteakip maddelerde sunulmuştur.

- a) UHMW-PE zırhlara ERKFP ilavesi balistik ve mekanik özellikler açısından çok önemli katkı sağlamıştır.
- b) UHMW-PE kompozitlere 6 kat ERKFP eklendiğinde balistik özellikler (V50 hızı) % 22,6, ortalama esnek gerilmesi ise % 307 oranında artış göstermiştir. Bunun için zırhlara yaklaşık % 38'lik ek ağırlık artışı meydana gelmiştir.
- c) Çalışma kapsamında üretilen bütün zırhların sıcaklık değişimine karşı balistik özellikleri korunmuştur.
- d) Üç nokta eğme testinde ise sadece UHMW-PE'den oluşan zırhlar +70 °C'de mekanik özellikleri büyük ölçüde azaldığından, yüksek sıcaklığa maruz kalan yerlerde UHMW-PE zırhların yapısal özelliklerini koruyabilmek için ERKFP ile hibritlemenin uygun olacağı görülmüştür.

6. KAYNAKLAR

- Agrawal B J, 2011, High performance textiles for ballistic protection, In 2011 Defense Science Research Conference and Expo (DSR), 3-5 August, Singapore, 1-4
- Ahmed U, Tariq A, Nawab Y, Shaker K, Khaliq Z, Umair M, 2020, Comparison of Mechanical Behavior of Biaxial, Unidirectional and Standard Woven Fabric Reinforced Composites, *Fibers and Polymers*, 21, 1308-1315.
- Akçay M, Başyurt A, Çağlayan M, Başak O, Hafif Silah Mühimmatının İç Balistik, Aerodinamik ve Dış Balistik Parametrelerinin Tespiti, Savunma Teknolojileri Kongresi, 27-29 Haziran 2018, ODTÜ, Ankara.
- Andrew J J, Srinivasan S M, Arockiarajan A, Dhakal, H N, 2019, Parameters Influencing The Impact Response of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Materials: A Critical Review. *Composite Structures*, 224, 111007, 1-26
- Ash R A, 2016, Vehicle armor, Bhatnagar A (Ed.), *Lightweight Ballistic Composites* (285-309). Woodhead Publishing, Woodhead Publishing, 482p, Cambridge.
- ASTM D790-03, 2003, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM, West Conshohocken.
- Aydın M, 2010, Effects of Welding Parameters and Pre-Heating on The Friction Stir Welding of Uhmw-Polyethylene, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 49, 595-601.
- Aydın M, Soydemir M, 2018, Serbest Parçacıklı Modüler Zırh Tasarımı, *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 4, 176-188
- Bajaj P S, 1997, Ballistic Protective Clothing: An Overview, *Indian Journal of Fiber and Textile Research*, 22, 274-291

- Balasubramanian M, 2013, Composite materials and processing. CRC press, 595, Boca Raton.
- Bandaru A K, Vetiyatil L, Ahmad S, 2015, The Effect of Hybridization on The Ballistic Impact Behavior of Hybrid Composite Armors, Composites Part B: Engineering, 76, 300-319.
- Barker J, Black C, 2009, Ballistic Vests for Police Officers: Using Clothing Comfort Theory to Analyse Personal Protective Clothing, International Journal of Fashion Design, Technology and Education, 2, 59-69.
- Bhargava A K, 2012, Engineering Materials: Polymers, Ceramics And Composites(Second Edition), PHI Learning Private Limited, 420, New Delhi.
- Bhatnagar A, 2006, Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications, Woodhead Publishing Ltd., 1st edition, 429p, Cambridge.
- Bhatnagar A, Lang D, 2006, Military and Law Enforcement Applications of Lightweight Ballistic Materials, Bhatnagar A (Ed.), Lightweight Ballistic Composites (364-397), Woodhead Publishing, 482p, Cambridge.
- Bhosale S B, Pawade R S, Brahmanekar P K, 2014, Effect of Process Parameters on MRR, TWR and Surface Topography in Ultrasonic Machining of Alumina–Zirconia Ceramic Composite, Ceramics International, 40, 12831-12836.
- Binner J, Porter M, Baker B, Zou J, Venkatachalam V, Diaz V R, vd., 2020, Selection, Processing, Properties and Applications of Ultra-High Temperature Ceramic Matrix Composites, UHTCMCs–A review, International Materials Reviews, 65, 389-444.
- Biswal A, Swain S K, 2020, Smart composite materials for civil engineering applications, Bouhfid R, Qaiss A, Jawaaid M (Ed), Polymer Nanocomposite-Based Smart Materials (197-210), Woodhead Publishing, 260p, Cambridge.

- Bozdoğan F, Üngün S, Temel E, Mengüç G S, 2015, Tekstil ve Mühendis Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri, Journal of Textiles and Engineer, 22, 98.
- Candan C, 2007, Hafif Silahlara Karşı Preslenerek ve Preslenmeden Üretilen Yüksek Yoğunluklu Polietilen (UHMW-PE) Zırh Plakalarının Terminal Balistik Özelliklerinin İncelenmesi, 8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı 7– 9 Kasım, İstanbul, 176-185
- Cantenar Ö F, Tümlü F, 2016, PKK Terör Örgütünün Eylemlerinin Güvenlik Güçleri Zaiyatı Açısından Analizi, Kara Harp Okulu Bilim Dergisi, 26, 1-22.
- Cao M, Zhao Y, Gu B H, Sun B Z, Tay T E, 2019, Progressive Failure of Inter-Woven Carbon-Dyneema Fabric Reinforced Hybrid Composites, Composite Structures, 211, 175-186.
- Carr D, Lewis E A, 2014, Ballistic-Protective Clothing and Body Armour, Wang F, Gao C (Ed.), Protective Clothing (146-170). Woodhead Publishing, 500p, Cambridge.
- Chabba S, Van Es M, Van Klinken E J, Jongedijk M J, Vanek D, Gijsman P, vd., 2007, Accelerated Aging Study of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Yarn and Unidirectional Composites for Ballistic Application, Journal of Materials Science, 42, 2891-2893.
- Chandramohan D, Marimuthu K, 2011, A Review on Natural Fibers, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 8, 194-206.
- Chawla K K, 2012, Composite Materials: Science and Engineering, Springer-Verlag, 542p, New York
- Chocron S, Carpenter A J, Scott N L, Bigger R P, Warren K, 2019, Impact on Carbon Fiber Composite: Ballistic Tests, Material Tests, and Computer Simulations, International Journal of Impact Engineering, 131, 39-56.

- Chukov D I, Stepashkin A A, Maksimkin A V, Tcherdyntsev V V, Kaloshkin S D, Kuskov K V, vd., 2015, Investigation of Structure, Mechanical and Tribological Properties of Short Carbon Fiber Reinforced UHMWPE-Matrix Composites, *Composites Part B: Engineering*, 76, 79-88.
- Courtney M, Courtney A, 2007, Ballistic Pressure Wave Contributions to Rapid Incapacitation in The Strasbourg Goat Tests, *ArXiv Preprint Physics/0701267*.
- Crouch I G, 2017, Introduction to armour materials, Crouch I G (Ed.), 2016, The science of armour materials (1-54), 754p, Woodhead Publishing, Cambridge.
- Crouch I G, Sandlin J, Thomas S, 2017, Polymers and Fibre Reinforced Plastics, Crouch I (Ed.), The science of armour materials, (203-268), Woodhead Publishing, 754p, Cambridge.
- Crouch I G, 2019, Body Armour - New Materials, *Defence Technology*, 15, 241-253
- Cunniff P M, 1992, An Analysis of The System Effects in Woven Fabrics under Ballistic Impact, *Textile Research Journal*, 62, 495-509.
- Cwik T K, Lannucci L, Curtis P, Pope D, 2016, Investigation of The Ballistic Performance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composite Panels, *Composite Structures*, 149, 197-212.
- Daniel I M, Ishai O, Daniel I M, Daniel I, 1994, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, 396p, New York.
- David N V, Gao X L, Zheng J Q, 2009, Ballistic Resistant Body Armor: Contemporary and Prospective Materials and Related Protection Mechanisms, *Applied Mechanics Reviews*, 62, 1-20
- Davim J P, Reis P, 2003, Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Using Design Experiments, *Composite structures*, 59, 481-487.

- Deng M, Latour R A, Drews M J, Shalaby, S W, 1996, Effects of Gamma Irradiation, Irradiation Environment, and Postirradiation Aging on Thermal and Tensile Properties of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 61, 2075-2084.
- Dessain B, Moulaert O, Keunings R, Bunsell A R, 1992, Solid Phase Change Controlling The Tensile and Creep Behaviour of Gel-Spun High-Modulus Polyethylene Fibres. *Journal of Materials Science*, 27, 4515-4522.
- Diaz O G, Luna G G, Liao Z, Axinte D, 2019, The New Challenges of Machining Ceramic Matrix Composites (CMCS): Review of Surface Integrity, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 139, 24-36.
- Donald I W, McMillan P W, 1976, Ceramic-Matrix Composites, *Journal of Materials Science*, 11, 949-972.
- Dos Santos Alves A L, Nascimento L F C, Suarez, J C M, 2005, Influence of Weathering and Gamma Irradiation on The Mechanical and Ballistic Behavior of UHMWPE Composite Armor, *Polymer Testing*, 24, 104-113.
- Duodu E A, Gu J, Ding W, Shang Z, Tang S, 2018, Comparison of Ballistic Impact Behavior of Carbon Fiber/Epoxy Composite and Steel Metal Structures, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 42, 13-22.
- Fawaz Z, Zheng W, Behdinan K, 2004, Numerical Simulation of Normal and Oblique Ballistic Impact on Ceramic Composite Armours, *Composite Structures*, 63, 387-395.
- Fazeli M, Florez J P, Simao R A, 2019, Improvement in Adhesion of Cellulose Fibers to The Thermoplastic Starch Matrix by Plasma Treatment Modification. *Composites Part B: Engineering*, 163, 207-216.
- Fejdys M, Landwijt M, Habaj W, Struszczyk M H, 2015, Ballistic Helmet Development Using UHMWPE Fibrous Materials, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*.

- Feng R Q, Jihong Y, Yao Y, 2015, A New Type of Structure: Glass Cable Truss, *Journal of Bridge Engineering*, 20, 04015024.
- Folgar F, 2016, Thermoplastic Matrix Combat Helmet with Carbon-Epoxy Skin For Ballistic Performance, Chen X (Ed.), *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection* (437-456), Woodhead Publishing, 548, Cambridge,
- Forster A L, Rice K D, Riley M A, Messin G, Petit S, Clerici C, vd., 2009, Development of Soft Armor Conditioning Protocols for NIJ Standard-0101.06: Analytical Results, *National Institute of Standards and Technology*, 1-44.
- Friedrich K, Almajid A A, 2013, Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications, *Applied Composite Materials*, 20, 107-128.
- Gao Y, Feng X, Liu J, Fu H, Li S, He C, 2019, Design and Ballistic Penetration of “SiC/Ti6Al4V/UHMWPE” Composite Armor, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 563, 042043.
- Gay D, 2014, *Composite Materials: Design and Applications*. CRC Press, 599, Boca Raton.
- Gellert E P, Pattie S D, Woodward R L, 1998, Energy Transfer in Ballistic Perforation of Fibre Reinforced Composites, *Journal of Materials Science*, 33, 1845-1850.
- Giray M, Bailey S, 2019, Developments in Lightweight Composite Ballistic Helmet Manufacture, *Güvenlik Bilimleri Dergisi*, 79-94.
- Gómez-del Río T, Zaera R, Barbero E, Navarro C, 2005, Damage in CFRPs due to Low Velocity Impact at Low Temperature, *Composites Part B: Engineering*, 36, 41-50.
- Gooch W A, 2002, An Overview of Ceramic Armor Applications, *Ceramic Transactions*, 134, 3-21.

- Gowda T Y, Sanjay M R, Bhat K S, Madhu P, Senthamaraikannan P, Yogesha B, 2018, Polymer Matrix-Natural Fiber Composites: An Overview. Cogent Engineering, 5, 1-13.
- Grujicic M, Pandurangan B, Koudela K L, Cheeseman B A, 2006, A Computational Analysis of The Ballistic Performance of Light-Weight Hybrid Composite Armors, Applied Surface Science, 253, 730-745.
- Grujicic M, Pandurangan B, Zhao C L, Biggers S B, Morgan D R, 2006, Hypervelocity Impact Resistance of Reinforced Carbon–Carbon/Carbon–Foam Thermal Protection Systems, Applied Surface Science, 252, 5035-5050.
- Grünewald J, Parlevliet P, Altstadt V, 2017, Manufacturing of Thermoplastic Composite Sandwich Structures: A Review of Literature, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 30, 437-464.
- Gu H, Liu C, Zhu J, Gu J, Wujcik E K, Shao L, vd., 2018, Introducing Advanced Composites and Hybrid Materials, Advanced Composites and Hybrid Materials, 1, 1–5.
- Gupta N, 2013, Development of TiB₂-Ti Based Homogeneous/Bilayered Functionally Graded Armor Materials and ZrB₂-SiC-TiSi₂ Composites Using Spark Plasma Sintering, Doktora Tezi, Indian Institute of Technology Kanpur.
- Haq A U, Reddy N S K, 2021, A Brief Review on Various High Energy Absorbing Materials, Materials Today: Proceedings, 5, 3198-3204.
- Hearle J W (Ed.), 2001, High-Performance Fibres, CRC Press, 344p, Boca Raton
- Henderson J, Ballistic Body Armor Protecting The Protectors, 2008, Strategic Standardization, 0-18.
- Hosur M V, Vaidya U K, Ulven C, Jeelani S, 2004, Performance of Stitched/Unstitched Woven Carbon/Epoxy Composites under High Velocity Impact Loading, Composite Structures, 64, 455-466.

- Humphrey C, Kumaratilake J, 2016, Ballistics and Anatomical Modelling, Legal Medicine, 23, 21–29.
- Idusuyi N, Olayinka J I, 2019, Dry Sliding Wear Characteristics of Aluminium Metal Matrix Composites: A Brief Overview, Journal of Materials Research and Technology, 8, 3338-3346.
- Jacobs M J N, Van Dingenen J L J, 2001, Ballistic Protection Mechanisms in Personal Armour, Journal of Materials Science, 36, 3137-3142.
- Joseph J D, Kumaragurubaran B, Sathish S, 2019, Effect of MoS₂ on the Wear Behavior of Aluminium (AlMg0.5Si) Composite, Silicon, 12, 1481–1489
- Kacan Y O, Elaldi F, 2020, Ballistic Performance of Unidirectionally Oriented Carbon Fiber Reinforced Composite Armor with High-Velocity Impact. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 39, 733–741
- Kaya H, 1999, The Application of Ceramic-Matrix Composites to The Automotive Ceramic Gas Turbine, Composites Science and Technology, 59, 861-872.
- Kayrak M A, 1999, Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri, TC Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 103s, Eskişehir.
- Kędzierski P, Gieleta R, Morka A, Niezgoda T, Surma Z, 2016, Experimental Study of Hybrid Soft Ballistic Structure, Composite Structures, 153, 204-211.
- Kelly A, 2006, Composite Materials After Seventy Years, Journal of Materials Science, 41, 905-912.
- King J, 1997, Composites Take off Without A Parachute, Materials World, 5, 324-327.
- Kuklane K, 2000, Ergonomics of Protective Clothing Proceedings of NOKOBETEF, 6 and 1st European Conference on Protective Clothing Held in Stockholm, 7-10 May, Sweden.

- Kulkarni S G, Gao X L, Horner S E, Zheng J Q, David N V, 2013, Ballistic Helmets—Their Design, Materials, And Performance Against Traumatic Brain Injury, *Composite Structures*, 101, 313-331.
- Kumar S, Singh R, Hashmi M S J, 2020, Metal Matrix Composite: A Methodological Review, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 6, 13-24.
- Kurtz S M (Ed.), (2009). *UHMWPE Biomaterials Handbook: Ultra High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices*, Academic Press, 840, California.
- Larsen B, Netto K, Aisbett B, 2011, The Effect of Body Armor on Performance, Thermal Stress, and Exertion: A Critical Review, *Military Medicine*, 176, 1265-1273.
- Larsson F, Svensson L, 2002, Carbon, Polyethylene and PBO Hybrid Fibre Composites for Structural Lightweight Armour, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33, 221-231.
- Lassig T R, May M, Heisserer U, Riedel W, Bagusat F, Van der Werff H, vd., 2018, Effect of Consolidation Pressure on The Impact Behavior of UHMWPE Composites, *Composites Part B: Engineering*, 147, 47-55.
- Li J, Laghari R A, 2019, A Review on Machining and Optimization of Particle-Reinforced Metal Matrix Composites, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 2929-2943.
- Li W, Feng M, Liu X, Huang M, Ma R, 2019, Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fibers/Epoxy Composites: Effect of Fiber Treatment on Properties, *Fibers and Polymers*, 20, 421–427.

- Li Y, Xian X J, Choy C L, Guo M, Zhang Z, 1999, Compressive and Flexural Behavior of Ultra-High-Modulus Polyethylene Fiber and Carbon Fiber Hybrid Composites, *Composites Science and Technology*, 59, 13-18.
- Li Z X, Zhang X, Shi Y, 2020, Experimental Study on Dynamic Properties of BFRP Laminates Used for Structural Strengthening under High Strain Rates, *Construction and Building Materials*, 251, 118731.
- Liu L, Zhao Z, Chen W, Xue M, Shuang C, 2020, Interlaminar Shear Property and High-Velocity Impact Resistance of CFRP Laminates After Cyclic Hygrothermal Aging, *International Journal of Crashworthiness*, 25, 307-320.
- Liu S, Wang J, Wang Y, Wang Y, 2010, Improving the Ballistic Performance of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber Reinforced Composites Using Conch Particles, *Materials and Design*, 31, 1711-1715.
- Liu S, Wang X, Wang Y, Wang Y. (2006). Study on the Structure and Properties of UHMWPE / Epoxy Resin Composite Fiber, *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 45, 593-600.
- Liu X, Li M, Li X, Deng X, Zhang X, Yan Y, vd., 2018, Ballistic Performance of UHMWPE Fabrics/EAMS Hybrid Panel, *Journal of Materials Science*, 53, 7357-7371.
- Long D, 1986, *Modern Ballistic Armor: Clothing, Bomb Blankets, Shields, Vehicle Protection--everything You Need to Know*, Paladin Press, 98, Boulder.
- Lu S H, Liang G Z, Zhou Z W, Li F, 2006, Structure and Properties of UHMWPE Fiber/Carbon Fiber Hybrid Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 101, 1880-1884.
- Maho B, Sukontasukkul P, Jamnam S, Yamaguchi E, Fujikake K, Banthia N, 2019, Effect of Rubber Insertion on Impact Behavior of Multilayer Steel Fiber Reinforced Concrete Bulletproof Panel, *Construction and Building Materials*, 216, 476-484.

- Majeed K, Jawaaid M, Hassan A A B A A, Bakar A A, Khalil H A, Salema A A, Inuwa I, 2013, Potential Materials for Food Packaging from Nanoclay/Natural Fibres Filled Hybrid Composites, *Materials and Design*, 46, 391-410.
- Mallick P K 2007, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, CRC press, 638p, Boca Raton.
- Marissen R, 2011, Design with Ultra Strong Polyethylene Fibers, *Materials Sciences and Applications*, 2, 319-330.
- Matthews F L, Rawlings R D, 1999, *Composite Materials: Engineering and Science*, CRC Pres, 480p, Boca Raton.
- Mavhungu S T, Akinlabi E T, Onitiri M A, Varachia F M, 2017, Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends, *Procedia Manufacturing*, 7, 178-182.
- Mazumdar S, 2001, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC press, 416p, London
- McDowall C, 2018, The Effect of Polyurea Coating on Impact Resistance of UHMWPE Reinforced LDPE Composite, *The UNSW Canberra at ADFA Journal of Undergraduate Engineering Research*, 9.
- MIL-H-44099A, 1986, *Military Specifications Helmet, Ground Troops and Parachutists*, US Government Printing Office, Washington.
- MInus M, Kumar S, 2005, The Processing, Properties, and Structure of Carbon Fibers, *Jom*, 57, 52-58.
- Mikulic D, 2013, Personal protective equipment, Mikulic D (Ed.) *Design of Demining Machines* (169-178), Springer, 213p, London.

- Mohd Nurazzi N, Khalina A, Sapuan S M, Dayang Laila A H A M, Rahmah M, Hanafee Z, 2017. A Review: Fibres, Polymer Matrices and Composites, *Pertanika Journal of Science & Technology*, 25, 1085 – 1102
- Mukherjee M, Das C K, Kharitonov A P 2006, Fluorinated and Oxyfluorinated Short Kevlar Fiber-Reinforced Ethylene Propylene Polymer, *Polymer Composites*, 27, 205-212.
- Munoz R, Martinez-Hergueta F, Galvez F, Gonzalez C, LLorca J, 2015, Ballistic Performance of Hybrid 3D Woven Composites: Experiments and Simulations, *Composite Structures*, 127, 141-151.
- Naveen J, Jayakrishna K, Hameed Sultan M T B, Amir S M M, 2020, Ballistic Performance of Natural Fiber Based Soft and Hard Body Armour-A Mini Review, *Frontiers in Materials*, 7, 440.
- NIJ 0101.04, 2001, Ballistic Resistance of Personal Body Armor, U.S. Department of Justice, Washington.
- Nordin N A, Yussof F M, Kasolang S, Salleh Z, Ahmad M A, 2013, Wear Rate of Natural Fibre: Long Kenaf Composite. *Procedia Engineering*, 68, 145-151.
- Park J L, Chi Y S, Kang T J, 2013, Ballistic Performance of Hybrid Panels Composed of Unidirectional/Woven Fabrics, *Textile Research Journal*, 83, 471-486.
- Patidar S, 2018, Application of Material Used in Bulletproof Products, *Academic Journal of Material Sciences*, 1, 16-20.
- Patil P R, Kadam G A, 2017, Overview on Comparative Study of Characterization of Properties of Natural Fiber Composites, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4, 2019-2022.
- Peijs T, Rijdsdijk H A, De Kok J M M, Lemstra P J, 1994, The Role of Interface And Fibre Anisotropy in Controlling The Performance of Polyethylene-Fibre-Reinforced Composites, *Composites Science and Technology*, 52, 449-466.

- Post W, Susa A, Blaauw R, Molenveld K, Knoop R J, 2020, A Review on The Potential and Limitations of Recyclable Thermosets for Structural Applications, *Polymer Reviews*, 60, 359-388.
- Prasad V V, Talupula S, 2018, A Review on Reinforcement of Basalt and Aramid (Kevlar 129) Fibers, *Materials Today: Proceedings*, 5, 5993-5998.
- Prevorsek D C, Kwon Y D, Chin, H B, 1994, Analysis Of The Temperature Rise in The Projectile And Extended Chain Polyethylene Fiber Composite Armor During Ballistic Impact And Penetration. *Polymer Engineering and Science*, 34, 141-152.
- Priyanka P, Dixit A, Mali H S, 2017, High-Strength Hybrid Textile Composites with Carbon, Kevlar, and E-Glass Fibers for Impact-Resistant Structures. A Review, *Mechanics of Composite Materials*, 53, 685-704.
- Raghavalu Thirumalai D P, 2014, A Critical Review of Future Materials for Wind Turbine Blades, *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 5, 81-99.
- Rajak D K, Pagar D D, Kumar R, Pruncu C I, 2019, Recent Progress of Reinforcement Materials: A Comprehensive Overview of Composite Materials, *Journal of Materials Research And Technology*, 8, 6354-6374.
- Rana S, Figueiro R, 2016, *Advanced Composites in Aerospace Engineering*, Rana S, Figueiro R (Ed.), *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering* (1-15), Woodhead Publishing, 496p, Cambridge.
- Ray B C, 2006, Temperature Effect During Humid Ageing on Interfaces of Glass and Carbon Fibers Reinforced Epoxy Composites, *Journal of Colloid and Interface Science*, 298, 111-117.
- Rayat M S, Gill S S, Singh R, Sharma L, 2017, Fabrication and Machining of Ceramic Composites—A Review on Current Scenario, *Materials and Manufacturing Processes*, 32, 1451-1474.

- Reddy T S, Reddy P R S, Madhu V, 2020, Dynamic Behaviour of Carbon/Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Hybrid Composite Laminates under Ballistic Impact, *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 1-11.
- Reddyak P R S, Reddy T S, Mogulannaa K, Madhua I S V, Raoc K V, 2017, Ballistic Impact Studies on Carbon and Eyglass Fibre Based Hybrid Composite Laminates, *Procedia Engineering*, 173, 293-298.
- Roenbeck M R, Cline J, Wu V, Afshari M, Kellner S, Martin P, vd., 2019, Structure–Property Relationships of Aramid Fibers via X-ray Scattering and Atomic Force Microscopy, *Journal of Materials Science*, 54, 6668-6683.
- Rohatgi P, 1991, Cast Aluminum-Matrix Composites for Automotive Applications, *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*, 43, 10-15.
- Safri S N A, Sultan M T H, Jawaid M, Jayakrishna K, 2018, Impact Behaviour of Hybrid Composites for Structural Applications: A Review. *Composites Part B: Engineering*, 133, 112-121.
- Salehi-Khojin A, Mahinfalah M, Bashirzadeh R, Freeman B, 2007, Temperature Effects On Kevlar/Hybrid and Carbon Fiber Composite Sandwiches under Impact Loading, *Composite Structures*, 78, 197-206.
- Sapozhnikov S B, Kudryavtsev O A, Zhikharev M V, 2015, Fragment Ballistic Performance of Homogenous and Hybrid Thermoplastic Composites. *International Journal of Impact Engineering*, 81, 8-16.
- Schlarb A K, 2006, Grundlagen der Verbundwerkstoffe, Arbeitsunterlagen zum Seminar: Entwicklung und Fertigung von Bauteilen aus langfaserverstärkten Faser-Kunststoff-Verbunden, Carl Hanser Seminar, 17–18 Mai, Mannheim.
- Scott B R, 2006, New ballistic products and Technologies, Bhatnagar A (Ed.), *Lightweight ballistic composites* (336-363), Woodhead Publishing, 482p, Cambridge

- Scott R A, 2000, Fibres, Textiles And Materials For Future Military Protective Clothing, *Ergonomics of Protective Clothing*, 108-313.
- Selvakumar N, Narayanasamy P, 2016, Optimization and Effect of Weight Fraction of MoS₂ on The Tribological Behavior of Mg-TiC-MoS₂ Hybrid Composites, *Tribology Transactions*, 59(4), 733-747.
- Sharma D K, Mahant D, Upadhyay G, 2020, Manufacturing of Metal Matrix Composites: A State of Review, *Materials Today: Proceedings*, 26, 506-519.
- Singh A K, Panda B P, Mohanty S, Nayak S K, Gupta M K, 2018, Recent Developments on Epoxy-Based Thermally Conductive Adhesives (TCA): A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57, 903-934.
- Skawinski O, Binetruy C Krawczak P, Grando J, Bonneau E, 2004, All-Thermoplastic Composite Sandwich Panels–Part I: Manufacturing and Improvement of Surface Quality, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 6, 399-421.
- Smith J C, McCrackin F L, Schiefer H F, 1958, Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading: Part V: Wave Propagation in Long Textile Yarns Impacted Transversely, *Textile Research Journal*, 28, 288-302.
- Smith, W F, Hashemi J, Presuel-Moreno F, 2003, *Foundations of materials science and engineering*, McGraw-Hill Education, 908, New York.
- Soutis C, 2005, Carbon Fiber Reinforced Plastics in Aircraft Construction, *Materials Science and Engineering: A*, 412(1-2), 171-176.
- STANAG 2920, 2007, Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing, Ed. 3, NATO, Brussels
- Stepanov E, Vavilov S A, 1997, The Main Problem of External Ballistics, *Computers & Mathematics with Applications*, 33, 95-101.

- Strong A B, 2008, Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, Society of Manufacturing Engineers, 620p, Michigan.
- Şenel F, Balya B, Parnas L, 2004, İleri Kompozit Zırh Malzemelerin Balistik Analizi, Savunma Teknolojileri Kongresi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 24-25 Haziran, Ankara.
- Tanabe Y, Aoki M, Fujii K, Kasano H, Yasuda E, 2003, Fracture Behavior of CFRPs Impacted by Relatively High-Velocity Steel Sphere, International Journal of Impact Engineering, 28, 627-642.
- Thoppul S D, Finegan J, Gibson R F, 2009, Mechanics of Mechanically Fastened Joints in Polymer–Matrix Composite Structures–A Review, Composites Science and Technology, 69, 301-329.
- Thori P, Sharma P, Bhargava M, 2013, An Approach of Composite Materials in Industrial Machinery: Advantages, Disadvantages And Applications, International Journal of Research in Engineering and Technology, 2, 350-355.
- TS11703, 2013, Çevre Şartları Deney Metotları ve Mühendislik Kuralları - Düşük Sıcaklık Deney Metodu (Askeri Amaçlı), TSE, Ankara.
- TS11843, 2016, Çevre Şartları Deney Yöntemleri ve Mühendislik Kuralları - Yüksek Sıcaklık Deneyi (Askeri Amaçlı), TSE, Ankara.
- Turner P, Liu T, Zeng X, 2015, Dynamic Response of Orthogonal Three-Dimensional Woven Carbon Composite Beams under Soft Impact, Journal of Applied Mechanics, 82, 121008.
- Übeyli M, Yıldırım R O, Ögel B, 2007, On The Comparison of The Ballistic Performance of Steel and Laminated Composite Armors, Materials And Design, 28, 1257-1262.
- Üner B, Çakır İ, 2007, Adli Balistik, Arıkan Yayınları, 210s, İstanbul.

- Vaidya U K, Chawla K K, 2008, Processing of Fibre Reinforced Thermoplastic Composites, *International Materials Reviews*, 53, 185-218.
- Van der Werff H, Heisserer U, 2016, High-Performance Ballistic Fibers: Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE), Chen X, *Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection (71-107)*, Woodhead Publishing, 517p, Cambridge.
- Walsh S M, Scott B R, Spagnuolo D M, Wolbert J P, 2006, Hybridized Thermoplastic Aramids: Enabling Material Technology For Future Force Headgear, U.S. Army Research Laboratory Weapons And Materials Research Directorate Aberdeen Proving Ground, 21005-5069, 30s.
- Wang L, Kanesalingam S, Nayak R, Padhye R, 2014, Recent Trends in Ballistic Protection. *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, 3, 37-47.
- Wang R, Jiang L, Xu Z, Yang F, Hao L, Jiao W, vd., 2014, Thermal Aging Behavior of Carbon Fiber/Epoxy Composites at High Temperature, *Polymers and Polymer Composites*, 22, 309-312.
- Wisom M R, Gigliotti M, Ersoy N, Campbell M, Potter K D, 2006, Mechanisms Generating Residual Stresses and Distortion During Manufacture of Polymer–Matrix Composite Structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 522-529.
- Xiong H, Hamila N, Boisse P, 2019, Consolidation Modeling During Thermoforming of Thermoplastic Composite Prepregs, *Materials*, 12, 2853.
- Xu Y, Chung D D L, Mroz C, 2001, Thermally Conducting Aluminum Nitride Polymer-Matrix Composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32, 1749-1757.
- Yadav R, Naebe M, Wang X, Kandasubramanian B, 2016, Body Armour Materials: From Steel to Contemporary Biomimetic Systems. *RSC advances*, 6, 115145-115174.

- Yan L, Chouw N, Jayaraman K, 2014, Flax Fibre and Its Composites—A Review, *Composites Part B: Engineering*, 56, 296-317.
- Yang G, Park M, Park S J, 2019, Recent Progresses of Fabrication and Characterization of Fibers-Reinforced Composites: A Review, *Composites Communications*, 14, 34-42.
- Yang Y, Chen X, 2017, Investigation of Failure Modes and Influence on Ballistic Performance of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Uni-Directional Laminate for Hybrid Design, *Composite Structures*, 174, 233-243.
- Yavaş, M., 2008, Hafif Silahlara Karşı Bireysel Savunma Amaçlı Kompozit Malzeme Tasarımı ve Balistik Dayanımı, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 167 s, Konya.
- Z Gama Haque B, M Kearney M, W Gillespie J, 2012, Advances in Protective Personnel and Vehicle Armors, *Recent Patents on Materials Science*, 5, 105-136.
- Zhang D, Sun Y, Chen L, Zhang S, Pan N, 2014, Influence of Fabric Structure and Thickness on The Ballistic Impact behavior of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composite Laminate. *Materials and Design (1980-2015)*, 54, 315-322.
- Zhang K, Li W, Zheng Y, Yao W, Zhao C, 2020, Dynamic Constitutive Model of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE): Considering The Temperature and Strain Rate Effects, *Polymers*, 12, 1561.
- Zhang Y, Liu T, Xu Z, 2019, Dynamic Response of Hybrid Carbon Fibre Laminate Beams under Ballistic Impact, *Composite Structures*, 210, 409-420.
- Zulkifli F, Stolk J, Heisserer U, Yong A T M, Li Z, Hu X M, 2019, Strategic Positioning of Carbon Fiber Layers in An UHMWPE Ballistic Hybrid Composite Panel, *International Journal of Impact Engineering*, 129, 119-127.

İnternet Kaynakları

- 1) <https://www.spurlock.illinois.edu / collections / search-collection / details.php?a=1913.09.0004A>, 20.02.2021
- 2) <http://www.historyofarmor.com / armor-history / history-of-bulletproof-vest/>, 20.02.2021
- 3) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Modular _ Tactical _ Vest _ components.jpg, 10.12.2020
- 4) <https://holttacticalsolutions.com / products / level-iii-10x12-stand-alone - ballistic-plates-these-plates-float>, 26.02.2021
- 5) <https://www.protectiongroup.dk / en / bullet-proof-helmets-c-5 / arch-ballistic-helmet-od-green-p-27>, 17.02.2021
- 6) <https:// caliberarmor.com / product / ach3 – level–iiia–ballistic - helmet>, 16.02.2021
- 7) <https://www.ncstar.com / performance-gear / first-responders-gear / plate-carrier-vest-with-ballistic-panel-plates / buccvpcv2924-a-2924-plate-carrier-wuhmwpe-10x12-level-iiia-shooters-cut-2x-hard-ballistic-panels-med-2xl>, 16.02.2021