

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF SİLAHLARA KARŞI BİREYSEL SAVUNMA
AMAÇLI KOMPOZİT MALZEME TASARIMI VE BALİSTİK
DAYANIMI

Mert Onur YAVAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 18 / 08 / 2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Ahmet AVCI
(Danışman-Üye)

Yrd.Doç.Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
(Üye)

Yrd.Doç.Dr. Necati ATABERK
(Yedek Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HAFİF SİLAHLARA KARŞI BİREYSEL SAVUNMA AMAÇLI KOMPOZİT MALZEME TASARIMI VE BALİSTİK DAYANIMI

Mert Onur YAVAŞ

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof.Dr.Ahmet AVCI

2009, 158 Sayfa

Jüri : Prof.Dr. Ahmet AVCI

Yrd.Doç.Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Yrd.Doç.Dr. Necati ATABERK

Bu çalışmada kompozit malzeme ürün tanımı ve kapsamından bahsedilmiş, malzemelerin üretim yöntemleri tanıtılmış, kullanım alanları ve elde edilen ürünlerin avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Balistik koruyucu zırh malzemeleri hafif silahlara karşı bireysel savunma amaçlı tasarlanmıştır. Hibrit kompozit zırh numuneleri, fiziksel ve balistik dayanımını ölçmek maksadıyla;

1. E cam elyaf/cam yünü/polyester reçine hibrit kompozit plaka numunesi $[(E \text{ cam elyaf} + \text{cam keçe})_{60}]^{\text{polyester reçine}}$,
2. E cam elyaf/Cam keçe/Polyester reçine/Kevlar₄₉ hibrit kompozit numunesi $[(Kevlar_{49})_{20} + [(E \text{ cam elyaf} + \text{Cam keçe})_{10}]^{\text{polyester reçine}} + (Kevlar_{49})_{10} + [(E \text{ cam elyaf} + \text{Cam keçe})_{10}]^{\text{polyester reçine}}]_{50}$,
3. Kevlar₄₉ kompozit aramid kumaş numunesi $[Kevlar_{49}]_{40}$,
4. Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi $[(Kevlar_{49})_{15} + (Polietilen_{HB26})_{15} + (Kevlar_{49})_5 + (Polietilen_{HB26})_{15}]_{50}$,
5. Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE)/polyester reçine hibrit kompozit plaka numunesi $[(Polietilen_{HB26})_{10} + (Kevlar_{49})_{10} + (Polietilen_{HB26})_{10} + (Kevlar_{49})_{10} + (Polietilen_{HB26})_{10}]_{50}^{\text{polyester reçine}}$
6. Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi $[(Kevlar_{49})_1 + (Polietilen_{HB26})_1 + \dots]_{40}$,
7. Preslenmiş Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) kompozit plaka numunesi

[Polietilen_{HB26}]₇₈,

üretim prosesleri takip edilerek hazırlanmış ve oda koşullarında şartlandırılmıştır.

Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26}(UHMW-PE) hibrit kompozit numunelerin farklı katmanlarda balistik dayanım sınırı analizi yapılmıştır. Koruyucu yapının mermi mühimmatını istenilen standartlar içerisinde durdurmasının yanı sıra kat adedi değişiklikleri ile de yapının tam delinme sınırı tespit edilmiştir. Bu numuneler;

- a) [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₅₀
- b) [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₃₀
- c) [(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀]₂₀
- d) [(Kevlar₄₉)₈+(Polietilen_{HB26})₈]₁₆
- e) [(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₅]₁₀, şeklinde tasarlanmıştır.

Farklı çap ve kalibredeki mermilerle [9 mm Full Metal Jacket (FMJ), 7,62 mm Normal NATO] uluslararası standartlar (NIJ STD 0101-04, STANAG 2920) ışığında balistik test laboratuvarında balistik test düzeneği kullanılarak hazırlanan zırh numunelerine atışlar yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Yapılan bu çalışmalar ile hafif silahlara karşı bireysel korumada kullanılan kompozit malzemelerin farklı kat adetlerinde ve kalınlıkta hibrid biçimde gösterdiği tepkiler ve hasar analizleri gözlenmiş ve yorumlanmıştır. Hasar analizlerinin tespiti amacıyla taramalı elektron mikroskopu(Scanning Electron Microscope-SEM) ile kısmi delme ve tam delmenin gerçekleştiği [[(Polietilen_{HB26})₁₀+(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀+(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀]₅₀]^{polyester reçine} ,[(E cam elyaf+cam keçe)₆₀]^{polyester reçine} numune plakalarının görüntüleri yakalanmıştır.

Günümüzde kullanılan balistik koruyucu yapıların yanı sıra farklı hibrit kompozit tasarımlarla koruma seviyesi, ağırlık, kullanım kolaylığı ve maliyet analizleri açısından bakış açıları geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kevlar₄₉, Polietilen_{HB26}(UHMW-PE), E-cam elyaf, cam keçe, polyester reçine, kompozit malzeme, balistik koruyucu, balistik dayanım, koruma seviyesi, enerji absorpsiyon(yutma).

ABSTRACT

MSc Thesis

IMAGINING OF COMPOSITE MATERIAL AND BALLISTIC RESISTANCE PURPOSING PERSONAL DEFENSE AGAINST TO LIGTH WEAPONS

Mert Onur YAVAS

Selcuk University

Institute of The Natural and Applied Sciences

Department Of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2009, 158 pages

Jury: Prof.Dr.Ahmet AVCI
Yrd.Doç.Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Yrd.Doç.Dr. Necati ATABERK

In this study, composite material product definition and it's extent were mentioned, matherials' product methods were explained, using areas and obtained products' advantages and disadvantages were explained. Balistic protective armor materials were planned with the purpose of personal defense against to light weapons. Hybrid composite armor samples, with the purpose to measure physical and ballistic resistance;

1. E glass fibers/glasswool/polyester resin hybrid composite plate sample [(E glass fibers+glasswool)₆₀]^{polyester resin},
2. E glass fibers/Glasswool/Polyester resin/ Kevlar₄₉ hybrid composite sample [(Kevlar₄₉)₂₀+(E glass fibers+glasswool)₁₀]^{polyester resin} +(Kevlar₄₉)₁₀ +[(E glass fibers+glasswool)₁₀]^{polyester resin}]₅₀,
3. Kevlar₄₉ composite aramid fabric sample [Kevlar₄₉]₄₀ ,

4. Kevlar₄₉/ Polyethylene_{HB26} (UHMW-PE) hybrid composite sample
[(Kevlar₄₉)₁₅+(Polyethylene_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polyethylene_{HB26})₁₅]₅₀ ,

5. Kevlar₄₉/Polyethylene_{HB26} (UHMW-PE)/polyester resin hybrid composite plate sample
[[(Polyethylene_{HB26})₁₀+(Kevlar₄₉)₁₀+(Polyethylene_{HB26})₁₀+(Kevlar₄₉)₁₀+(Polyethylene_{HB26})₁₀]₅₀]_{polyester resin} ,

6. Kevlar₄₉/ Polyethylene_{HB26} (UHMW-PE) hybrid kompozit sample
[(Kevlar₄₉)₁+(Polyethylene_{HB26})₁+...]₄₀ ,

7. Pressed Polyethylene_{HB26} (UHMW-PE) composite plate sample
[Polyethylene_{HB26}]₇₈,

were prepared following these product processes and conditioned in the room conditions.

On the [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polyethylene_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polyethylene_{HB26})₁₅]₅₀ composite sample, ballistic resistance frontier analysis were made. Besides protection structures stopping misilse munition in the wanted standarts, with the changes of number of layers structures full puncture frontier was determined. These samples were produced as;

a) [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polyethylene_{HB26})₁₅]₃₀

b) [(Kevlar₄₉)₁₀+(Polyethylene_{HB26})₁₀]₂₀

c) [(Kevlar₄₉)₈+(Polyethylene_{HB26})₈]₁₆

d) [(Kevlar₄₉)₅+(Polyethylene_{HB26})₅]₁₀

With the missiles which have different diameter and caliber (9 mm FMJ, 7,62 mm Normal NATO) in accordance with the international standarts (NIJ STD 0101-04, STANAG 2920) in the ballistic test laboratory, shoots were made to prepared armor samples with using ballistic test mechanism.

With these studies, composite materials which used at personal defense against to light weapons, at different number of layers and thickness showed reactions as hybrid and damage analysis were observed and explained. With the purpose of determining damage analysis, with scanning electron microscope(SEM),
[[(Polyethylene_{HB26})₁₀+(Kevlar₄₉)₁₀+(Polyethylene_{HB26})₁₀+(Kevlar₄₉)₁₀+(Polyethylene_{HB26})₁₀]₅₀]_{polyester resin} ,[(E glass fibers+glasswool)₆₀]_{polyester resin} sample plates images in which partial drilling and full drilling was observed were captured.

Besides ballistic protection structures which are use today, different hybrid composite design and in terms of protection level, using easiness and cost analysis points of view developed.

Key Words: Kevlar₄₉, Polyethylene_{HB26(UHMW-PE)}, E-glass fibers, glasswool, polyester resin, composite material, ballistic protection, ballistic resistance, protection level, energy absorption.

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Yaptığımız planlama ve etütler esnasında bilgi birikimlerini benimle paylaşan, bana her konuda yardımcı olan tez danışmanım Sayın Prof. Dr.Ahmet AVCI 'ya teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında laboratuvar analizlerimi gerçekleştirmemde yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Sinan ULU, kendi tez çalışmasını benimle paylaşan Mak. Müh. Ütğm. Tuğrul ÖZEK, yapılan balistik testler esnasında yardımcı olan Mak. Müh. Metin ÇALIK, Elk. Tekn. Hüseyin GÜNGÖREN, Ceylan ÖZKAN, Zafer YARDIMCI, Beytullah DURGUT, Selçuk SARKIN 'a ve desteklerinden dolayı Mak. Müh. Bnb. Soner MENDERES ile Mak. Müh. Bnb. Gökhan YENİCİL 'e teşekkür ederim.

Tez hazırlıklarım esnasında, hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve maddi manevi destek sağlayan, yardımlarını benden esirgemeyen babam Rasim YAVAŞ, annem Semra YAVAŞ ve kardeşim Selin YAVAŞ 'a şükranlarımı sunarım.

Mert Onur YAVAŞ

Konya, 2009

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
3. MATERYAL VE METOT.....	11
3.1 Materyal	11
3.1.1 Aramid Kumaş	11
3.1.2 Ultra Yoğun Moleküler Yapılı Polietilen Kumaş	11
3.1.3 Cam Lifleri	12
3.2 Metot	13
3.2.1 Mekanik Dayanım Testleri	14
3.2.2 Balistik Testler	14
4. KOMPOZİT MALZEMELER.....	24
4.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	26
4.2 Kompozit Malzeme Yapımındaki Ana Elemanlar	28
4.2.1 Matris Malzemeleri	28
4.2.1.1 Epoksi Reçine Matrisler	29
4.2.1.2 Polyester Reçine Matrisler	30
4.2.1.3 Vinylester Reçine Matrisler	30
4.2.1.4 Fenolik Reçine Matrisler	30
4.2.1.5 Silikon Reçineler	31
4.2.1.6 Metal Matrisler	31
4.2.2 Elyaf(Lifler)	32
4.2.2.1 Cam Lifleri	33
4.2.2.2 Karbon Lifleri	35

4.2.2.3 Aramid Lifler	38
4.2.2.4 Silisyum Karbür Lifler	43
4.2.2.5 Alumina Lifler	44
4.2.2.6 Bor Lifleri	44
4.2.2.7 Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen(UHMW-PE) malzeme.....	45
4.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	49
4.3.1 Elyafli Kompozitler	49
4.3.2 Parçacıklı Kompozitler	50
4.3.3 Tabakalı Kompozitler	50
4.3.4 Karma (Hibrid) Kompozitler	51
4.4 Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	52
4.4.1 Elle Yatırma (Hand Lay-Up).....	52
4.4.2 Püskürtme (Spray-Up)	52
4.4.3 Elyaf Sarma (Filament Winding)	53
4.4.4 reçine Transfer Kalıplama RTM	54
4.4.5 Profil Çekme/Pultrüzyon	55
4.4.6 Hazır Kalıplama (SMC, BMC)	56
4.4.7 Vakum Bonding / Vakum Bagging	58
4.4.8 Otoklav/Autoclave Bonding	59
4.4.9 Preslenebilir Takviyeli Termoplastik/Glass Mat Reinforced Thermoplastics (GMT)	60
5. BALİSTİK KORUYUCU MALZEMELER	61
5.1 Balistik Nedir	61
5.2 Balistik Koruyucu Ölçüm Standardı	65
5.2.1 NIJ-STD-0101.04'e Göre Koruma Seviyeleri.....	66
5.3 Balistik Koruyucu Malzemeler	69
5.3.1 Sert(Hard) Koruyucular	69
5.3.2 Yumuşak (Soft) Koruyucular	72
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TARTIŞMA	81
6.1 Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	81
6.1.1 Cam Elyaf (E Cam)	81
6.1.2 Kevlar ₄₉ Aramid Kumaş.....	82

6.1.3 Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen malzeme (UHMWPE)	
Polietilen _{HB26} Zırh Kumaşı	82
6.1.4 Balistik Kompozit Test Numuneleri	82
6.1.5 Mekanik ve Balistik Testler	93
6.1.5.1 Mekanik Özelliklerin Ölçülmesi	93
6.1.5.2 Balistik Dayanımın Ölçülmesi	98
6.1.5.2.1 Balistik Test Düzeneği	98
6.1.5.2.2 Balistik Test Uygulaması ve Tartışma.....	102
6.1.5.2.3 Kevlar ₄₉ /Polietilen _{HB26} (UHMW-PE) Hibrit Kompozit Numunelerin Farklı Katmanlarda Balistik Dayanım Sınırı Analizi	120
6.1.6 Test Numunelerinin Ağırlıklarına Göre Enerji Absorblama Değerleri ...	129
7. HASAR ANALİZİ	135
7.1 Tam/Kısmi Delmenin Gerçekleştiği Balistik Hibrit Kompozit Malzemelerin Darbe Sonucu oluşan Hasar Analizleri	136
8. MALİYET ANALİZİ.....	146
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	152
10. KAYNAKLAR	157

SİMGELER

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
σ	Çekme Mukavemeti
E	Elastisite Modülü
F	Çekme Kuvveti
E_k	Merminin Kinetik Enerjisi
M	Mermi Kütlesi
V_m	Merminin Hızı
J	Joule
f_1	Frekans
UV	Ultraviole
HTP	High Thermal Performance (Yüksel Termal Performans)
RFC	Rigid Fibrous Ceramic (Katı İnce Lifli Seramik)
PAN	Poliakrilonitril
MMC	Metal Matrisli Kompozit
CMC	Seramik Matrisli Kompozit
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
SMC	Sheet Moulding Composites (Tabaka Kalıplama Kompozitleri)
BMC	Bulk Moulding Composites (Hacim Kalıplama Kompozitleri)
CTP	Camelyaf Takviyeli Polyester
GMT	Preslenebilir Takviyeli Termoplastik
HT	High Tenacity (Yüksek Yapışma)
UHMW-PE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene (Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen)
FMJ	Full Metal Jacket (Tam Metal Kaplama)
NIJ	National Institute Of Justice (Uluslararası Şartname Enstitüsü)
YAGEA	Yapı Ağırlığına Göre Enerji Absorblama
V_{50}	% 50 delme ihtimali olan V hızı

1.GİRİŞ

Türkler tarafından Tuğla, Tolga, Davulga gibi isimlerle savaşlarda saldırılardan korunmak için miğferler yapılmaktaydı. Bu miğferler Peçenekli ve Siperlikli olmak üzere iki şekilde imal edilmekteydi. 16.yy. sonlarına doğru miğferlerin tepeleri basık olarak yapılmaya başlanmış daha sonra da miğfere güneş siperliği eklenmiştir.

Avrupalılar da 10.y.y. dan itibaren miğfer kullanmışlarsa da onların miğferleri saf çelikten olmaları ile dikkat çekmiştir. Şekil 1.1’de peçenekli ve siperlikli miğferler görülmektedir.



Şekil 1.1 Peçenekli ve siperlikli miğferler

Türkler Orta Asya’dan beri vücutlarını korumak için gömlek şeklindeki köseleden veya ince metallere yapılmış zırhları kullanmaktaydılar. İslami dönemde birbirine halkalarla bağlanmış ve hafif metallerle takviyeli zincirler kullanılmaktaydı (Şekil 1.2).



Şekil 1.2 Hafif metallerle takviyeli zincirli zırhlar

Özellikle 20.y.y.da balistik ilminin önemli gelişmeler göstermesinden sonra, korunma çareleri konusunda da araştırmalar hızlandı. Kurşun levhaların yerleştirilmesiyle kurşungeçirmez yelekler yapılmaya başlandı. Bu yelekler büyük sert parçalardan yapılmış olması ve ağır olmaları giyen kişilerin hareket kabiliyetlerini azaltmaktaydı. 1960 'lı yıllardan sonra artış gösteren terör olayları da hareket kabiliyetini kısıtlamayan, hafif elbiselerin altına kolay gizlenebilen koruyucuların yapım çalışmaları hızlandı. (Acarlı, 2002)

Bakırdan veya çelikten yapılan zırhlar ağırlıkları ve tasarımları ile kişilerin hareket kabiliyetini oldukça kısıtlamışlardır. Daha sonraları çelik başlıklar, yelekler, tanklar ve diğer koruyucu malzemeler geliştirilmiş ve koruma amaçlı kullanılmıştır.

1970'li yılların başında Amerika'da Dupont firması ilk defa elyaf teknolojisini bu alanda kullandı. Kevlar diye tanımlanan bu aramid elyafı katkılı malzemeye Hollanda'dan naylon esaslı aramid elyafı Twaron rakip olarak çıkmıştır. Çinlilerde Hollanda'dan patentini alarak porselen esaslı koruyucu yelekler üretmektedir.

Bu sektördeki önemli gelişmelerden biri de 1985 yılında gerçekleşmiştir. Bu gelişme, yoğunluğu sudan az olduğu için suda yüzebilen ve aynı zamanda çelikten on

kat daha güçlü bir dayanıma sahip olan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMW-PE) malzemenin bulunmasıdır. Bu fiber Dyneema adıyla DSM ve Spectra adıyla da Allied Signal firmaları tarafından üretilmektedir.

Mermi çekirdeğinin insan vücudunda özellikle karaciğer, böbrekler ve kalp gibi hassas organ bölgelerine isabet etmesi, yaralanmalara ve de ölümle neticelenen olaylara sebebiyet vermektedir. Bunu engellemek için balistik koruyucu zırh malzemeleri imal edilmiştir. Bu malzemeler vücutta göğüs bölgesini kaplayacak şekilde yerleştirilmektedir.

Amerikan hükümetinin yaptırmış olduğu bir araştırmaya göre Vietnam savaşında ölümlerin %47'sinin göğüs ve karın boşluklarından alınan yaralar sebebiyle meydana geldiği anlaşılmıştır. Bu sonuç balistik koruyucu olarak kullanılan zırh malzemelerinin önemini göstermektedir.

Zırh malzemeleri özellikle askeri amaçla kullanılmak üzere kurşun geçirmeyen ve şarapnel parçacıklarına karşı dayanıklı yelek ve başlık üretiminde kullanılmaktadır.

Koruyucu zırh malzemelerin en önemli görevleri, balistik enerjiyi mümkün olan en kısa zamanda absorbe etmeleridir.

Sürekli gelişen zırh teknolojisi ile beraber, silah sanayi de çok hızlı olarak gelişmekte, çok değişik yapılarda silahlar ve mermiler tasarlanıp üretilmektedir. Bu silahların ve mermilerin etkilerinin ölçülebilmesi ve bu etkilerden korunmak için, balistik koruyucu malzemeler testlere tabi tutulmakta ve gelişimleri için çalışmalar sürekli devam etmektedir.

Bu çalışmada kompozit malzeme ürün tanımı ve kapsamından bahsedilmiş, malzemelerin üretim yöntemleri tanıtılmış, kullanım alanları ve elde edilen ürünlerin avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Balistik koruyucu zırh malzemeleri hafif silahlara karşı bireysel savunma amaçlı tasarlanmıştır. Hibrit kompozit zırh numuneleri, fiziksel ve balistik dayanımı ölçmek maksadıyla;

2. E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine hibrit kompozit plaka numunesi, [(E cam elyaf+cam keçe)₆₀]^{polyester reçine},

2. E cam elyaf/Cam keçe/Polyester reçine/Kevlar₄₉ hibrit kompozit numunesi, [(Kevlar₄₉)₂₀+[(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀]^{polyester reçine} +(Kevlar₄₉)₁₀+[(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀]^{polyester reçine}]₅₀,

3. Kevlar₄₉ kompozit aramid kumaş numunesi, [Kevlar₄₉]₄₀,

8. Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi, [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₅₀,

9. Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE)/polyester reçine hibrit kompozit plaka numunesi, [(Polietilen_{HB26})₁₀+(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀+(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀]₅₀^{polyester reçine},

10. Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi, [(Kevlar₄₉)₁+(Polietilen_{HB26})₁+...]₄₀,

11. Preslenmiş Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) kompozit plaka numunesi, [Polietilen_{HB26}]₇₈, üretim prosesleri takip edilerek hazırlanmış ve oda koşullarında şartlandırılmıştır.

Farklı çap ve kalibredeki mermilerle (9 mm FMJ, 7,62 mm Normal NATO) uluslararası standartlar (NIJ STD 0101-04, STANAG 2920) ışığında balistik test laboratuvarında balistik test düzeneği kullanılarak zırh numunelerine atışlar yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Yapılan bu çalışmalar ile hafif silahlara karşı bireysel korumada kullanılan kompozit malzemelerin farklı kat adetlerinde ve kalınlıkta hibrid biçimde gösterdiği tepkiler gözlenmiş ve yorumlanmıştır. Hasar analizlerinin tespiti amacıyla taramalı elektron mikroskobu(Scanning Electron Microscobe-SEM) ile kısmi delme ve tam delmenin gerçekleştiği [(Polietilen_{HB26})₁₀+(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀+(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀]₅₀^{polyester reçine}, [(E cam elyaf+cam keçe)₆₀]^{polyester reçine} numune plakalarının görüntüleri yakalanmıştır.

Günümüzde kullanılan balistik koruyucu yapıların yanı sıra farklı hibrit kompozit tasarımlarla koruma seviyesi, ağırlık, kullanım kolaylığı ve maliyet analizleri açısından bakış açıları geliştirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Koruyucu teçhizat olarak kullanılan ve diğer koruyucu teçhizatlara göre avantajlarının çok üstün olduğu kompozit malzeme tasarımlarının ne kadar büyük önem arz ettiği anlaşılmaktadır. Bu kapsamda 2000 ile 2008 yılları arasındaki balistik performans ve kompozit malzeme tasarımı çalışmaları kaynak gösterilmiş, yapılan tez çalışmasının bu ölçüde yönlendirilmesine önem verilmiştir.

Karahan, M. ve ark. (2008), farklı kat adedinden oluşan koruyucu zırh kumaşlarının balistik performansı ile ilgili araştırma sonuçlarını göstermiştir. Twaron CT 170 tip kumaş katmanları farklı sayılarda ve farklı dikiş tipleri ile birleştirilmiş ve panel oluşturulmuş, bu paneller NIJ standartlarına göre yapılan balistik testlerden geçirilmiş, balistik performansı, atış sonrası koruyucu panel arkasında oluşan çöküntü derinliği ve çöküntü çapının ölçülmesi ile belirlenmektedir. Kumaşın enerji soğurması(emmesi) ve arkasına geçirdiği enerji miktarı, çöküntü derinliği ve çapı kullanılarak farklı yaklaşımlarla bulunmuştur. Bu testler göstermiştir ki farklı katlarda kumaşlar ile ve farklı örgü, dokuma tipi ile kumaşın performansı değişmektedir. Koşullandırma sonucu oluşan değişiklik sınırlıdır.

Zhang, G.M. ve ark. (2000), “kare çelik çerçeve” ile sıkıştırılmış mermi ağırlığı 124 gram olan 9 mm lik tam metal kaplı test mermisi ile dik olarak atılması sonucu oluşan darbeye maruz kalan 10 kattan oluşan dokuma kevlar zırhın, 3 boyutlu, kararsız deformasyonunu LS-DYNA bilgisayar kodu ile analiz etmiştir. Kompozit zırh atkı ve çözgü iplikleri olarak ayrılmış ve bu sayede dokuma yapısı simüle edilmiş ve üç boyutlu modellenmiştir. Yapılan çalışmada ipliklerin kopması ve yan yana olan katmanlar ve çerçeve ile zırh arasında oluşan sürtünme dikkate alınmıştır. Çerçevelere çok iyi bağlanmış zırh için, çerçeve boyutunun küçülmesi ile hesaplanan, mühimmatın artık hızı ve artık kinetik enerjisi artmaktadır. Bu gösterir ki küçük çerçevelere sabitlenmiş zırhların V_{50} parçacık testi hızı, büyük çerçevelere sabitlenmiş zırhlara göre daha düşüktür.(Zırhın V_{50} parçacık testi hızı denilen şey

test mühimmatının %50 oranda zırhta delinmeye yol amasına neden olan hızıdır.) ereve barları arasında zırhın kaymasının serbest bırakıldığı durumlarda, 4 barlı ve 2 barlı çerçevelerde barlar üzerindeki basıncın artık hız ve artık kinetik enerji üzerinde oluşturduğu etki çalışılmıştır. Hem 4 Barlı hem 2 barlı çerçeveler için basınç arttıkça test mühimmatının hız ve kinetik enerjisi artar. Hesaplanan sonuçlar gösterir ki 2 barlı ereve 4 barlı çerçeveden daha yüksek darbe direnci gösterir. V50 parçacık testi hızı 4 barlı ereve için 270 m/s ve 4 barlı ereve mengeneyle sıkıştırma basıncı 200 Mpa dır. V50 parçacık testi hızı, mengene sıkıştırma basıncı artarken, hem 4 barlı hem 2 barlı ereve için azalır.

Khojin,S.A. ve ark. (2007), darbe altında kevlar ve karbon fiber kompozit sandviin farklı sıcaklıklarda terminal değişimi üzerine yapılan araştırma sonuçlarını vermişlerdir. Yapılan testler; eğme gerilmesi, kayma gerilmesi, maksimum enerji soğurması, soğuma enerjisi ve moment parametresi (AEMP), performans parametresi ve darbe sonrası sıkıştırma mukavemetini bulmaya yönelik yapılmaktadır. Test malzemesi zerine -50 °C ile 120 °C arasında düşük hız darbe enerjileri 15 Joule, 25 Joule ve 45 Joule uygulanmaktadır. Test yapılan kompozit malzemenin petek merkezinde üretan matris malzemesi vakumlama (Vakum Bagging) yöntemi ile doldurulmuştur. Test numunesi sandviç şeklindeyir. Dört katlı kevlar ve karbon yan tabakası ile çevrilmiştir. Sonuçlar bu kompozit malzemenin darbe ile birlikte farklı sıcaklıklarda farklı performans gösterdiğini belirtmektedir.

Gower, H.L. ve ark.ına göre (2007), katmanlı kompozit paneller sıkı tabaka zırhlarının önemli bir parçasıdır ve bu paneller mühimmata, darbe hızına ve panelin yapısına göre farklı darbe koşullarına maruz kalır. 2 adet deforme olmayan mühimmatın (7.5 mm lik sertleştirilmiş elik 120⁰ konik-silindirik ve 9 mm lik yarım küre uçlu) direk darbesine karşı katmanlı kompozit panelin balistik tepkisi açıklanmış ve farklı delinme mekanizmaları (delinme ve katmanların bozulması dhil) gösterilmiştir. Koruyucu zırh olarak kullanılan Kevlar 29 ve 129 kompozit panellerinin balistik tepkisi deneysel ve sayısal olarak çözümlenmiştir. Bu panellere 130 m/s ve 250 m/s hızlı mühimmat (bu hızlar delme limitinin altındadır) ile darbe uygulamıştır. İlk olarak malzemelerin özelliklerini belirleyebilmek için sayısal

parametrik çalışma yapılmıştır. Bu çalışma sayesinde arka yüz maksimum dinamik deplasman (yer değiştirme) (BFS) parametresini buldurur. Bu parametre kişisel koruma performansını gösteren önemli bir parametredir. Deneysel malzeme karakterizasyonu sayısal çözümler için mekanik özellik bilgilerinin belirlenmesini sağlar ve bu sayede elde edilen sonuçlarda özellikle konik mühimmat darbeleri için iki kevlar panel tipinde de sayısal çözümler ile deneysel sonuçlar arasında uyum gözlenmektedir. Darbe testleri için yapılan sayısal benzetimler çok iyi bir şekilde maksimum dinamik deplasmanını ve konik mühimmatlara karşı “dinamik yanıt”ını bulmaktadır. Fakat yarım küre mühimmatlar için bu değerlerden daha düşük değerler bulmaktadır. Bu simülasyonlar, sayısal modeller ile tam olarak bulunamayan baskın katman bozulması mekanizmasını açıklayabilmektedir. Önemli olarak, sayısal analiz, yarım küre mühimmatlar için panel arka yüzünün ilk hızını, konik mühimmatlar için maksimum (BFS) ye ulaşabilmek için gereken zamanı, doğru olarak hesaplar.

Wambua, P. (2007), yüksek performanslı lifler (ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen)(UHMW-PE), aramid ve aramid kompozitleri hakkında çok sayıda çalışma var iken; lif kompozitleri hakkında yeterli araştırma yapılmamıştır. Bu makalede, sıcak baskı döküm ile yapılmış keten, keten ve kenevir takviyeli polipropilen kompozitler kullanılmıştır. Bir (BMCI) silahı şarapnel etkisi yaratan mühimmat kullanılarak V50 parçacık testi hızını bulabilmek için kullanılmıştır. Kompozitin balistik tepkisi ayrıca doğal lif kompozitinin yan ve arka tarafına kalın yumuşak çelik plakalar yapıştırılarak incelenmiştir. Keten kompozitler diğerlerinden enerjiyi daha iyi emmiştir. Kompozitler kayma gerilmesi, katman bozulma ve lif yapısı bakımından iyi sonuç vermemiştir. Ayrıca görülmüştür ki, kenevir kompozitlerin balistik özellikleri, yumuşak çelik plakalar yanlarda ve arka yüzde kullanıldığında daha iyi sonuç vermiştir.

Caprino, C.’nin çalışmasında (2007), farklı kalınlıklarda 4 adet epoksi/grafit dikiş katmanı yüksek hızlı darbe testine maruz bırakılmıştır. Kurşun mühimmatlarının biri 12.7 mm lik birisi 20 mm lik 2 tip çelik küre şekilli mühimmat kullanılmıştır. Atışlar 129 m/s ve 65 m/s hızlarla yapılmıştır. Yapılan testlerde delinme az sayıdaki testlerde gözlenmiş ve diğer testlerde kurşun mühimmatının geri teptiği ve delinme

olmadığı gözlenmiştir. Beklendiği gibi delinme enerjisi panel kalınlığı ve mermi çapının artmasıyla artmaktadır. Delinme enerjisini panel kalınlığı ve mermi çapının fonksiyonu olarak önceden hesaplayabilmek için Reid ve Wen modeli ile Cantwell ve Morton modeli kullanılmıştır. Cantwell ve Morton modeli yeni bir hipotez yapılarak gerektiği gibi düzenlenmiştir. Bu hipotez daha kolay bir formüle sahiptir ve bu formülde sadece 1 değişmez (constant) deneyle bulunması gerekmektedir. Panel kalınlığının (teste tutulan kompozit malzeme kalınlığının) delinme enerjisine etkisi verilen modeller ile iyi şekilde hesaplanmıştır. Yapılan hesaplarla deneyler çok yakın değerler vermektedir. Aynı durum geri tepen mermi için de geçerlidir. Fakat sadece Cantwell ve Morton modeli mermi çapının delinme enerjisine etkisini iyi hesaplayabilmiştir. Reid ve Wen modeli ölçülen değerden %50 daha fazla değerler bulmuştur. Katmanlaşmanın bozulması ultra sonik C-scan ile çarpma-yankı (pulse-echo) modunda ölçülmüştür. Panel kalınlığı ve mermi çapı ne olursa olsun, panelin emdiği enerji ile katmanlaşmanın bozulma genişlemesi arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu bulunmuştur. Bu korelasyon kalın katmanlarda, muhtemelen katmanların çöküntü modlarının yeterince yüksek kalınlıklarda, farklı olmasından dolayı çalışmamaktadır.

Candan, C. 'nın çalışması (2007), aynı kat sayısında preslenerek ve preslenmeden imal edilen ultra yüksek moleküler yoğunluklu polietilen (UHMW-PE) zırh plakalarının, hammadde aşamasından nihai mamul haline gelene kadar takip edilen genel üretim aşamalarını, dünya standartlarına uygun olarak zırhlara uygulanan test yöntem ve sonuçlar ile hasar bölgesinin görüntülenmesini terminal balistik açıdan değerlendirmiştir.

Temiz, S.'nin çalışmasında (2005), silahların yarattığı tehlikelerden korunmak için sert ve yumuşak balistik koruyucu yapılar geliştirilmiştir. Geliştirilen yapılara atış testleri uygulanmıştır. Yumuşak balistik koruyucu yapılar para-aramid, %40 PBI (polibenzimidazol)-%60 para-aramid kumaşlar ve yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) non-woven yapılardan elde edilmiştir. Sert balistik koruyucu yapılar ise epoksi reçinenin para-aramid kumaşlar ve cam lifi non-woven yüzeyler ile sertleştirilmesi sonucu elde edilmiştir. Referans olarak ise kuvvetlendirici

kullanılmamış tabaka kullanılmıştır. Elde edilen yumuşak balistik koruyucu yapılara iki farklı hızda, sert balistik koruyucu yapılara ise tek hızda atışlar yapılmıştır. Atışlar sonucunda para-aramid kumaşlar ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) non-woven yapılardan geliştirilen yumuşak balistik koruyucu yapıların kullanılan mermilere karşı uygun koruma sağladığı, sert balistik koruyucu yapıların ise uygun koruma sağlayamadığı görülmüştür.

Ozek, T. (2005), hafif silahlara karşı zırh yapımında kullanılan polimer matrisli kompozit malzemelerin mekaniksel özellikleri ve balistik performanslarını ölçmek için deneyler yapılmıştır. Bunun için önce deneylerde kullanılacak aramid ve polietilen numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra bu numunelere çekme deneyi, darbe sönümleme deneyi ve atış poligonunda balistik deneyler yapılmış ve elde edilen bulgular incelenmiştir.

Jia-Horng L. ve ark.'na göre (2005), dokuma olmayan ve sandviç yapılı yeni bir tasarım olan tampon malzemesi üzerine balistik dayanım deneyleri yapılmıştır. Dokuma olmayan tampon malzeme yapısına bağlı olarak mermi atışından sonra kurşun geçirmez yeleğin darbe çöküntülerini azaltması gerekmektedir. Analitik sonuçlar gösterir ki; dokuma olmayan sandviç tampon malzeme yapısı ile mermi atıldıktan sonra darbe yüzeyinde oluşan çöküntü düşürülebilir. Kurşun geçirmez yeleğin kullanılabilirliği incelendiğinde mühimmat durdurma, absorbe seviyesi ve yelekte delinme olmaması, güvenilirliğini sağlayan temel göstergedir. Atış sonrası oluşabilecek aşırı darbe çöküntülerini en aza indirmek için merminin kinetik enerjisinin dağıtılmaya ve yayılmaya ihtiyacı vardır.

Young S. Lee ve ark. ları (2003), silika partikülleri ihtiva eden kesici yoğun sıvı akışkanın (Shear Thickening Fluids) (STF) aramid/kevlar dokuma kumaşına emdirilmesi ile oluşan yeni kompozit malzemenin balistik dayanım performansını incelemektedir. Kevlar/kompozit kumaş, esnek ve delinmeye karşı dirençli kompozit malzemelerdir. Kompozit materyal etkinliği göz önüne alındığında 244 m/s 'de mermi etkisine karşı balistik dayanımında olumlu performans göstermiştir. Sonuçlar kumaş malzemesinin esnekliğinden hiçbir şey kaybetmeksizin, kesici yoğun sıvı

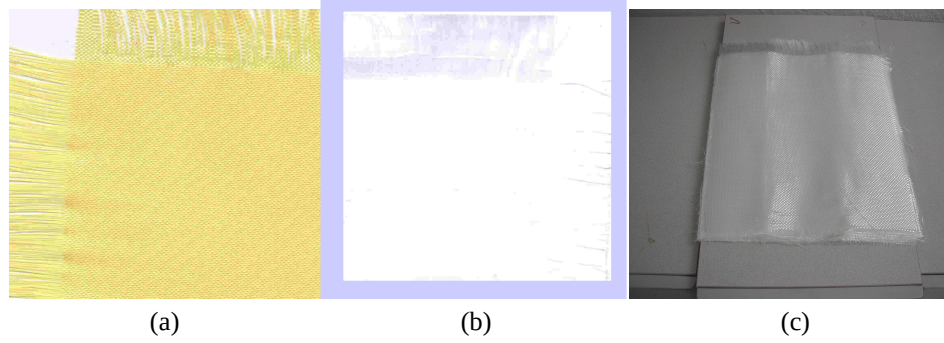
akışkanın emdirilmesi ile balistik direnç etkisinde önemli bir artırma olduğunu göstermektedir. Bu balistik test koşulları altında, kumaş hedefleri önemli ölçüde malzeme yapılarında oluşan esneme değişkenlik gösterirken (az veya çok), bölgesel yoğunluğun eşit olduğu emdirilmemiş temiz kumaş hedeflerinde eşit esnemeler oluşmaktadır. Balistik dayanımının artmasında; kompozit/kevlar kumaşa emdirilen kesici yoğun sıvı akışkanın etkisi görülmektedir.

Ceyhun V.,Turan M. (2003), yapılan çalışmada tabakalı kompozit malzemelerin düşük ve yüksek hızlı darbelere karşı göstermiş olduğu davranış tartışılmıştır. Darbe türünün belirlenmesinde hasar türü ve darbe enerjisinin önemi açıklanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

Deneysel çalışmalarda Şekil 3.1’de görülen aramid kumaş(kevlar), ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen kumaş ve cam elyaf (E camı) malzemeler kullanılmıştır.



Şekil 3.1 (a) aramid kumaş(kevlar), (b) ultra yoğun moleküler yapı polietilen kumaş(HB26), (c) cam elyaf(E-cam) numuneleri

3.1.1 Aramid Kumaş(Kevlar₄₉)

Çok geniş bir sıcaklık aralığında uzun sürelerde mükemmel dayanıklılık özellikleri gösterirler. Aramid’ler yüksek sıcaklıklarda erimezler ve yanmayı (oksitlenmeyi) desteklemezler. 427°C’de kömürleşmeye başlarlar. -196°C gibi ve daha düşük sıcaklıklarda dahi dayanıklılıklarını kaybetmezler. Aynı zamanda mükemmel boyutsal stabilite gösterirler. Aramid fiberlerin yoğunluğu 1.44 g/cm³’dür. Aramid kumaşın metrekare ağırlığı 210 g/m² dir.

3.1.2 Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen Kumaş (U.H.M.W.PE)

Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen lifinin yoğunluğu 0,97 g/cm³’tür. Yoğunluğu 1 g/cm³’den az olan ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen lif bu özelliği sayesinde suda yüzebilir. Ultra yoğun moleküler yapı polietilen düşük yoğunluğa rağmen yüksek mukavemet değerine sahiptir. Çizelge 3.1’de Dyneema HB26 polietilen lifinin mekanik özellikleri görülmektedir. Polietilen kumaşın metrekare ağırlığı 260 g/m² dir.

Çizelge 3.1 Dyneema HB26 mekanik özellikleri

DYNEEMA HB 26	
Yoğunluk (g/cm ³)	0,97
Mukavemet (N/tex)	3,1
Mukavemet (gr/den)	35
Mukavemet (Gpa)	3,0
Kopma Uzaması (%)	3,6

3.1.3 Cam Lifleri (E-cam elyaf)

Cam lifleri veya diğer bir deyişle cam elyaf kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan takviye malzemelerindendir. Üstün özelliklerinin yanı sıra, ekonomik bir takviye türü olması kompozit üretiminde kullanılmasını yaygınlaştırır. Çeşitli matris malzemeleriyle kullanılmış olmasına karşılık, temel kullanım alanı cam takviyeli plastik (CTP) endüstrisidir.

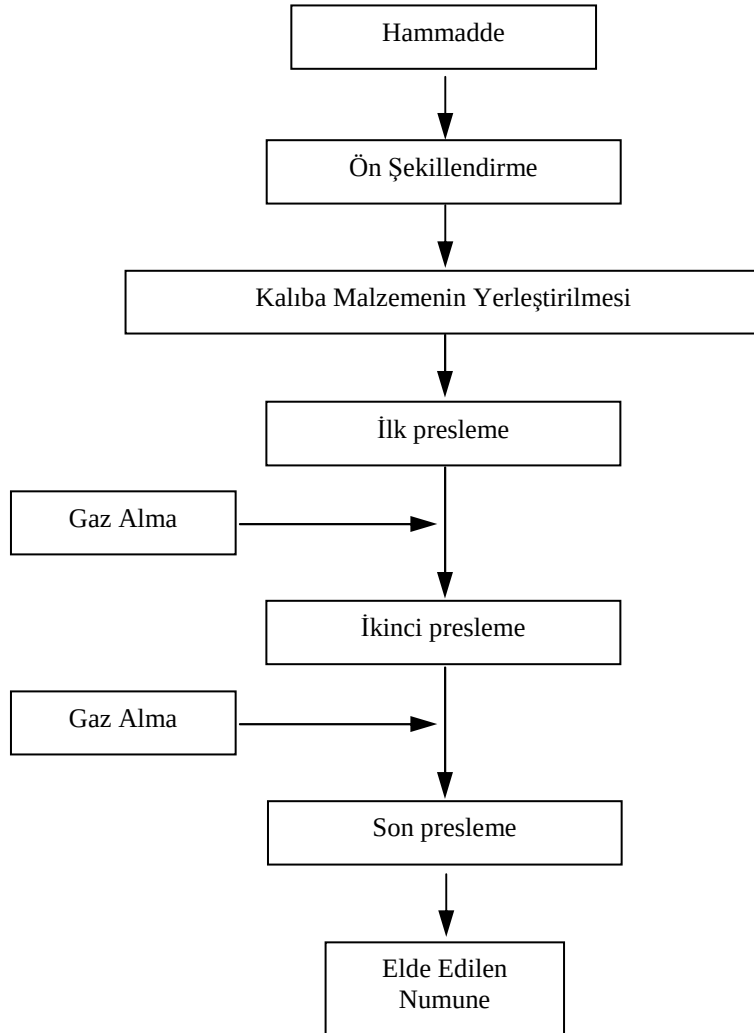
Cam amorf bir malzemedir. Üç boyutlu moleküler yapıda, bir silisyum atomu dört oksijen atomu ile çevrilmiştir. Silisyum metalik olmayan hafif bir malzemedir, doğada genellikle oksijenle birlikte silis (SiO₂) şeklinde bulunur. Cam elyafı, silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda, magnezyum oksit gibi cam üretim hammaddelerinden üretilir. E-cam elyaf kumaş metrekaare ağırlığı 225±%7 g/m² 'dir. E-cam elyaf üretiminde kullanılan katkı malzemeleri Çizelge 3.2 'de görülmektedir.

Çizelge 3.2 Cam elyaf katkı malzemeleri

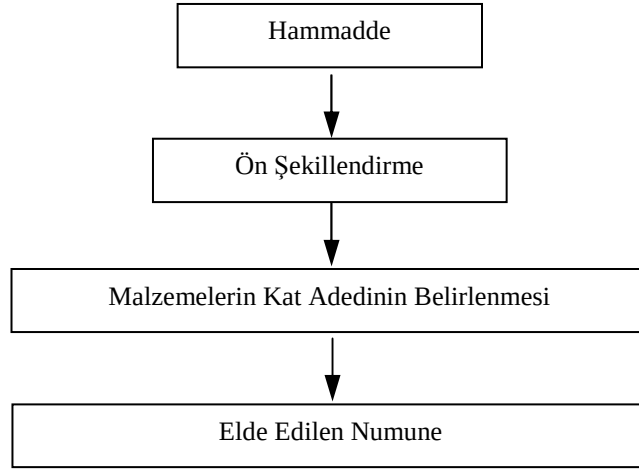
Katkı Malzemeleri (%)
SiO ₂ : 52,4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ : 14,4
CaO : 17,2
MgO : 4,6
BaO : -
B ₂ O ₃ : 10,6
Na ₂ O, K ₂ O : 0,8

3.2 Metot

Balistik deneylerde kullanılan kompozit plaka ve numunelerin üretim prosesi Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 'de sunulmuştur. Buna göre kompozit plaka numunesi oluşturulurken ön şekillendirme yapılan malzeme daha sonra sıcaklık ve basınç altında preslenmek suretiyle ürün haline gelmektedir. Bu esnada hammadde üzerinde bulunan reçineden dolayı açığa çıkan gazların alınma işlemi iki periyot halinde yapılmaktadır. Kompozit numune ise kumaşa bir ön şekillendirme ve kat adedinin belirlenerek bir araya getirilmesi ile elde edilir.



Şekil 3.2 Kompozit plaka numunesi proses şeması



Şekil 3.3 Kompozit numune proses şeması

3.2.1 Mekanik Dayanım Testleri

a) Çekme deneyleri

Balistik koruyucu özelliği bulunan polimer matrisli kompozit malzemelerin mekaniksel özelliklerinin tespitine yönelik olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde aramid kumaş (Kevlar₄₉) ve Polietilen (UHMW-PE) malzemeler kullanılmıştır.

3.2.2 Balistik Testler

Hafif silahlara karşı kullanılan zırhlar için balistik performansın ölçümünde ana tehditler göz önüne alındığında zırhların mermi tesirine karşı koruma sağlaması beklenir.

Mermiye karşı korumada NIJ (National Institute of Justice) değerleri referans olarak alınmıştır. Bu kapsamda zırh arkasına yerleştirilen ve insan tenini simule eden

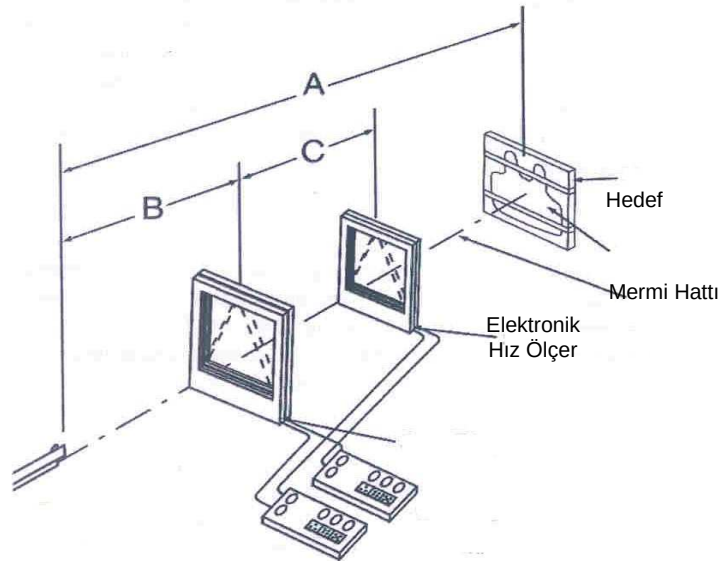
bir dolgu maddesi üzerinde balistik test esnasında meydana gelen çöküntü miktarı değeri balistik dayanım kriterinin ölçütü olarak kabul edilmektedir.

Balistik test laboratuvarında Amerikan NIJ-STD 0101.04 Uluslararası Standardına göre balistik testler yapılmıştır (Şekil 3.4). Deneyler için dokuma aramid (Kevlar₄₉) kumaş numuneleri, UHMW-PE_{HB26} ve polyester reçine matrisi ile cam elyaf kumaşlardan elde edilen çeşitli katlarda ve kalınlıkta bir araya getirilen plaka ve kumaş numuneleri hazırlanmıştır. Bu plaka ve numuneler normal oda şartlarında 24 saat bekletildikten sonra balistik teste tabi tutulmuştur.



Şekil 3.4 Balistik performans test laboratuvarı (NIJ-STD 0101.04)

a) Balistik test düzeneği



Şekil 3.5 Mermi testinde kullanılan test düzeneği (Oehler Research Model ORM 55)

Mermi testinde kullanılan test düzeneğinin işleyişi Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Test düzeneğinde Oehler Research Model ORM 55 model hızölçer kullanılacaktır. Aralarında 1 m mesafe bulunan iki ışık perdesi arasından geçiş süresi ölçülerek merminin hızları tespit edilecektir. Testler esnasındaki sabit namlular kullanılarak mermilerin zırha dik olarak isabet etmeleri sağlanacaktır.

b) Şartlandırma koşulları

Balistik performansı ölçme amacıyla normal oda sıcaklığında 24 saat süre ile şartlandırılmış deney numunelerine test yapılacaktır.

c) Balistik macun testi

Balistik performans testi sırasında kullanılacak olan macunun şartlandırılması, balistik performans testi sonrası oluşacak deformasyonun ölçümlerini yapmayı sağlayacaktır.

d) Mermi türleri ve test koşulları

Delme hızı yüksek, tahribatın az olduğu mermiler gömlekli, delme hızı düşük, tahribatın fazla olduğu mermiler ise gömleksiz mermilerdir. Gömlekli ve gömleksiz mermiler Çizelge 3.3’de görüldüğü gibi kendi aralarında sınıflara ayrılmıştır.

Çizelge 3.3 Mermilerin sınıflandırılması

Gömleksiz Mermiler	Gömlekli Mermiler
Kurşun, yuvarlak burunlu	Metal kaplı
Kurşun, küt	Yumuşak uçlu
Kurşun, yarım yuvarlak	Gömlekli oyuk uç
	Yarım gömlekli, oyuk uç
	Gaz kontrollü, kurşun

Mermi giriş hızının düşük olduğu gömleksiz kurşun mermi genel amaçlı bir mermi olup üzeri yağlı bir madde ile sıvanarak kurşunun namlu iç yüzeyine sıvanmasına engel olunur (Çalık, 2004).

Gömlek, mermilerde namlu aşınmasını azaltan, depolamada paslanmayı engelleyen ve hedefte delme gücünü arttıran bir unsurdur.

Kurşunun namluya zararının azaltıldığı, giriş hızının yüksek tutulduğu mermi metal gömlekli bir mermidir. Yumuşak ucun çarpmanın etkisi ile açılarak, gerideki gömleğin üzerine sıvandığı ve merminin genişleyerek giriş deliğinin büyümesine ve tahribatın artırmasına neden olduğu mermi ise yarım gömlekli bir mermidir.

Oyuk uçlu mermi havada hareket halinde iken oyuğun içine hava dolar ve bu hava mermi hedefe çarpınca serbest kalır. Mermiye takviye bir etki yapar. Çarpma anında mermi ucunun şok dalgaları etkisiyle açılarak genişlediği ve parçalara ayrıldığı yarık uçlu mermide tahribatın artması hedeflenmiştir. Şekil 3.6 'da görülen bazı mermi çeşitleri içerisinde yarım gömlekli ve oyuk uçlu mermiler hem yeterince hızlı, hem de fazla tahribat yapan en etkili mermilerdir (Çalık, 2004).



Şekil 3.6 Mermi çeşitleri



Şekil 3.7 Mermi testlerinde kullanılan 9 mm FMJ makineli tabanca mermisi

Çizelge 3.4 9 mm tam metal kaplama (FMJ) mermi teknik özellikleri

MERMİ	
Mermi Çekirdek Çapı (mm)	9.08
Mermi Çekirdek Ağırlığı (gr)	7.43
Mermi Kovan Ağırlığı (gr)	3.80
Mermi Çekirdek Uzunluğu (mm)	15
Barut Miktarı (gr)	0.41±0.005



Şekil 3.8 Mermi testlerinde kullanılan 7.62 mm NATO normal mermi ve çekirdeği

Çizelge 3.5 7,62 mm NATO Normal mermi teknik özellikleri

MERMİ	
Mermi Çekirdek Çapı (mm)	7.82
Mermi Çekirdek Ağırlığı (gr)	9.50
Mermi Kovan Ağırlığı (gr)	11.84
Mermi Çekirdek Uzunluğu (mm)	28.60
Barut Miktarı (gr)	2.768±0.005

Mermi testlerinde MP5 makineli tabanca namlusu ve G3 Piyade tüfeği namlusu kullanılarak 9 mm ve 7.62 mm çapındaki mermiler ile atışlar yapılmıştır (Şekil 3.7, Şekil 3.8, Çizelge 3.3, Çizelge 3.4, Çizelge 3.5). Atışlar 5 m ve 15 m mesafeden numunelerin ön yüzüne kenar noktalarından en az 50 mm uzakta ve numune üzerinde yer alan daha önceki bir vuruş noktasından veya bir delikten en az 80 mm uzakta olacak şekilde yapılmıştır (NIJ-STD 0101.04).

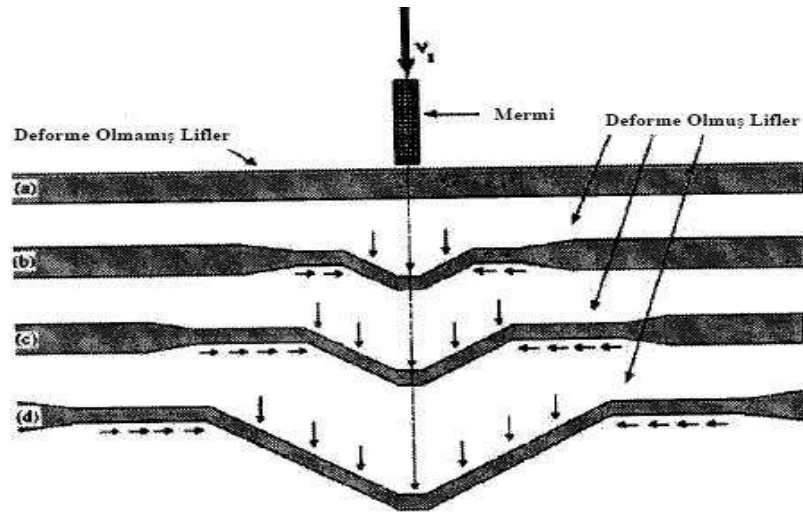
Kinetik enerjiye sahip bir merminin hedef üzerindeki delici etkisi, merminin kütlesine, enerjisine, hedefe vuruş açısına ve mermi ile zırh malzemesinin metalurjik yapısına bağlıdır. Merminin kütlesi (m) ve çarpma anındaki hız (V_m) olduğunda merminin kinetik enerjisi;

$$E_k = \frac{1}{2} m V_m^2 \quad (3.1)$$

şeklindedir(Candan ve Akdemir, 2004).

Merminin balistik koruyucu yapıya çarpmasından itibaren her bir lif merminin enerjisini absorbe etmekte ve enerji diğer liflere ilerlemektedir. Böylece çarpma enerjisi yayılarak diğer katmanlara iletilmekte ve merminin darbe enerjisi yayılarak etkisi azaltılmaktadır. Enerjisi azalan mermi balistik koruyucu tarafından durdurulmakta ve vücutta yarattığı deformasyon azalmaktadır.

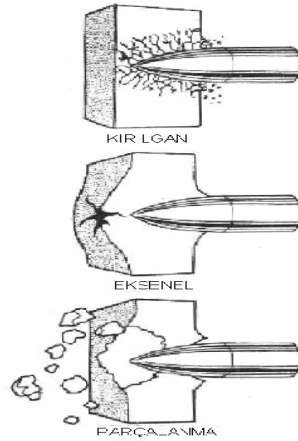
Balistik koruyucuya herhangi bir merminin çarpması Şekil 3.9 'da görülmektedir. Çarpma anında koruyucu yüzeyinde dışa doğru ve mermi hareket yönüne dik hareket eden bir şok dalgası meydana gelir. Ayrıca koruyucu tabakada mermiye doğru yanal bir şok dalgası ilerler.



Şekil 3.9 Balistik koruyucuya merminin çarpması

Yüksek mukavemetli ve yüksek Young modüllü liflerin geliştirilmesi kurşun geçirmez kumaşların ve laminantların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Çarpma olduğu zaman, iplik çarpma hızının büyüklüğüne bağlı olarak ani ve sert bir darbe görür. Düşük hızlardaki çarpmada (bu “kritik hız” olarak adlandırılan hızların altındaki çarpmalardır.) liflere uygulanan kuvvet onları koparmak için yetersiz kalır, bu çarpma enine yönde sapmalara ve sonuçta ipliğin uzamasına ve enerjinin kumaş tarafından absorbe edilmesine sebep olur.

Balistik korunmada lifin enerji sönmüleme yeteneği çok önemlidir. Zırhın sönmülediği enerji merminin zırhı delmek için harcadığı enerjiye eşittir. Merminin zırhı delip geçtiği durumlarda sönmülenen enerji miktarı, merminin çarpma enerjisinden zırhı delip geçtiği an sahip olduğu enerji çıkartılarak bulunur. Balistik limitin altındaki çarpmalar için ise merminin çarpma enerjisi doğrudan zırhın sönmülediği enerjiye eşittir.



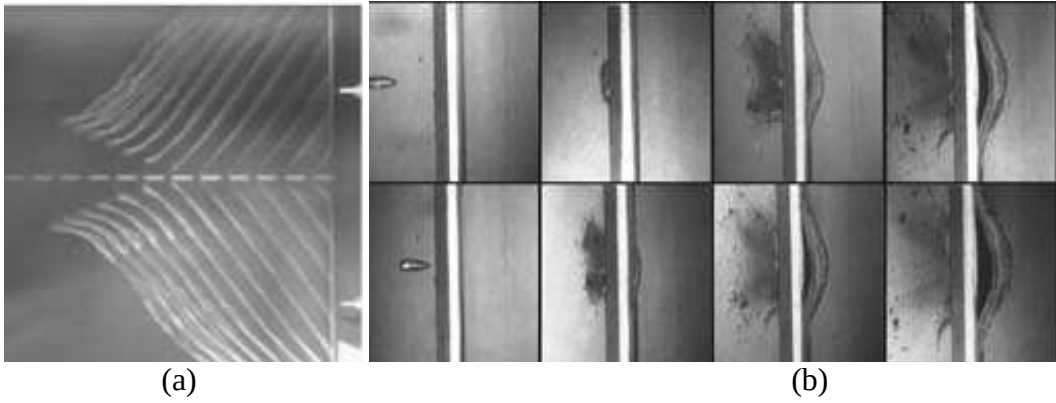
Şekil 3.10 7,62x51 mm zırh delici merminin metal bir hedefe atılması

Şekil 3.10 'da, 7,62x51 mm zırh delici merminin metal bir hedefe atılmadan öncesi ve sonrasındaki şekli görülmektedir. Metal hedef ilk etapta kırılkanlık göstermiştir. İlerleme eksenel yönde devam etmiş ve hedefte parçalanma oluşmuştur. Gömlek kısmı tamamen yok olan merminin çekirdeğinin ise sadece burun kısmı kısmen tahrip olmuştur. Şekil 3.11'de ise 7,62x51 mm normal merminin deformasyon öncesi ve sonrasındaki şekli görülmektedir. Merminin gömlek kısmı tamamen yok olmuş, ancak kurşun-antimon çekirdek ise disk katmanları şeklinde yığılmıştır. Şekil 3.12 (a)'da yüksek hızlı görüntü yakalama yöntemi ile atılan

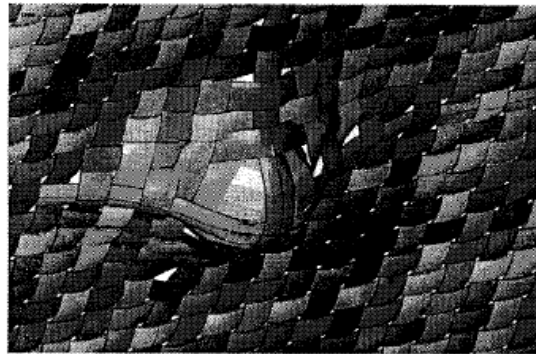
merminin kompozit kumaş fiberleri, Şekil 3.12 (b)'de yüksek hızlı görüntü yakalama yöntemi ile atılan merminin kompozit plaka üzerine gelişi çarpma anı ve oluşan deformasyon etkisi görülmektedir.



Şekil 3.11 7,62x51 mm normal merminin deformasyon öncesi ve sonrası görünümü



Şekil 3.12 Yüksek hızlı görüntü yakalama etkisi.(a) Atılan merminin kompozit kumaş fiberleri üzerindeki etkisi.(b) Atılan merminin kompozit plaka üzerindeki etkisi.



Şekil 3.13 Merminin kumaş içerisine girmesi.(Cheesman-Bogetti, 2003)

Merminin kumaşa yerleşmesi ile oluşan delik sadece kumaş konstrüksiyonuna bağlı

olmayıp ipliklerin hareketliliğine ve mermi geometrisine de bağlıdır(Şekil 3.13). İplik hareketliliği ipliklerin birbirleri ve mermi ile sürtünmelerinden etkilenir ve matriks içindeki ipliklerin yanal hareketinin engellenmesi ile minimize edilir.

Merminin hızı tehlikenin büyüklüğünü etkileyen en önemli parametredir. Hızarttıkça kinetik enerji hızın karesi ile doğru orantılı olarak artacak ve balistik koruyucu yapının mermiyi durdurmak için absorbe etmesi gereken enerji miktarı fazla olacaktır. Ayrıca merminin kütlesi arttıkça kinetik enerji artacak ve yine absorbe edilecek enerji artacaktır.

Delaminasyon, matris bakımından zengin bölgede meydana gelen bir hasardır. Tabakalar arası eğilme rijitliğindeki uyumsuzluk ne kadar büyük olursa, ki 0/90 en kötü fiber doğrultusudur, delaminasyon alanı da o kadar büyük olur. Bunun yanı sıra delaminasyonu malzeme özellikleri, yığılma düzeni ve tabaka kalınlığı gibi diğer bazı faktörler de etkilemektedir.

Delaminasyon hasarının olduğu noktada absorbe edilen elastik şekil değiştirme enerjisi, E_k , için basit bir ifade aşağıdaki gibidir(Ceyhun V. ,2003).

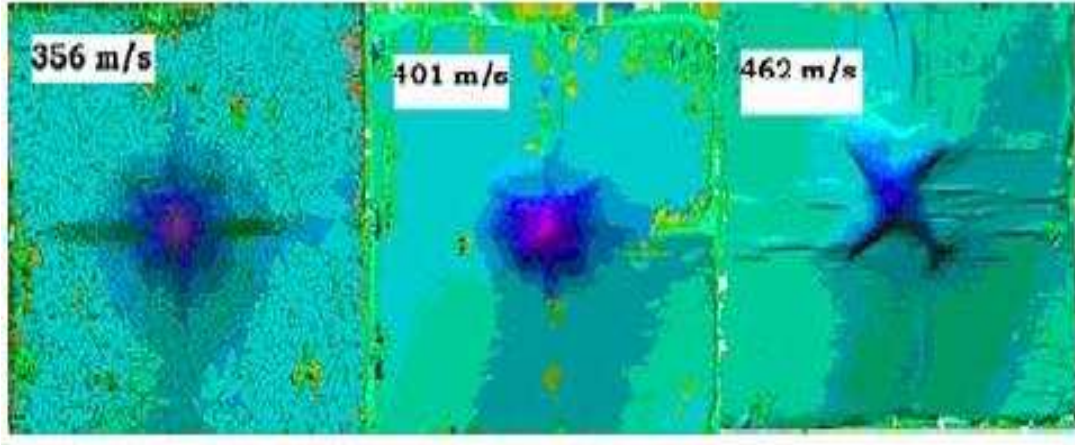
$$E_k = \frac{\tau^2 w L^3}{9 E_f t} \quad (3.2)$$

Burada t : kalınlık τ : tabakalar arası kesme mukavemeti, w : genişlik, L : desteklenmemiş uzunluk, E_f : eğilme modülüdür.

Enine darbeden dolayı oluşan delaminasyon, bir eşik enerjisine ulaşıldıktan sonra ve sadece matris kırılması mevcut ise meydana gelir.

Matris kırılması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matris kırılması ve delaminasyon arasında sıkı sıkıya bir ilişki mevcuttur. Delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgesinde meydana gelirler. Fakat bu bölge her zaman tam olarak ara yüzey bölgesi olmamakla beraber ayrıca her iki

tarafda da bir miktar olabilir. Enine darbeye maruz 0/90/0 tabakaları için delaminasyon ve matris kırılması etkileşmesi göz önüne alındığında; üst katmanlardaki eğimlenmiş kırıklar ara yüzeye ulaştığı zaman durdurulur ve katmanlar arasında delaminasyon olarak ilerler.



Şekil 3.14 Delaminasyon etki alanları.

Şekil 3.14 'de farklı hızlardaki delaminasyon etki alanları görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, mermi hızı arttıkça tabakalar üzerindeki dalgalı bölgenin yüzey alanı ve üst yüzeyde dışa doğru olan çöküntü miktarı artmaktadır.

4. KOMPOZİT MALZEMELER

Malzemeler genellikle;

- Metaller,
- Seramikler
- Organik malzemeler olarak üç ana gruba ayrılırlar.

Bu üç grubun birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri vardır. Bu üç ana grubun yanında, aynı yada farklı gruplardan iki ya da daha fazla malzemenin uygun olan özelliklerini tek malzemedeki toplamak, yada yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malzemeler, karma (kompozit) malzemeler olarak adlandırılırlar (Aran, 1990).

Kompozit malzeme, belirli bir amaca yönelik olarak, en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme grubudur. Üç boyutlu nitelikteki bu bir araya getirmede amaç, bileşenlerin hiç birinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda daha üstün özelliklere sahip yeni bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir.

Kompozit malzemedeki genelde dört koşul aranmaktadır:

- İnsan yapısı olmaması, dolayısıyla doğal bir malzeme olması
- Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı belirli ara yüzeylerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması
- Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması
- Bileşenlerin hiçbirinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması

Buna göre malzeme, mikroskobik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskobik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır.

Kompozit malzemelerin avantajı bileşenlerin en iyi özelliklerini bir araya getirmesidir. Kompozit malzemelerin üretilmesiyle aşağıdaki özelliklerden biri veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır. Bu özellikler;

- Dayanım
 - Yorulmaya karşı dayanım
 - Aşınmaya karşı dayanım
 - Korozyona karşı dayanım
- Kırılma Tokluğu
- Yüksek Sıcaklık Özellikleri
- Isıl İletkenlik
- Elektrik İletkenliği
- Akustik İletkenlik
- Rijitlik
- Ağırlık
- Fiyat

Kompozit malzemelerin özellikleri;

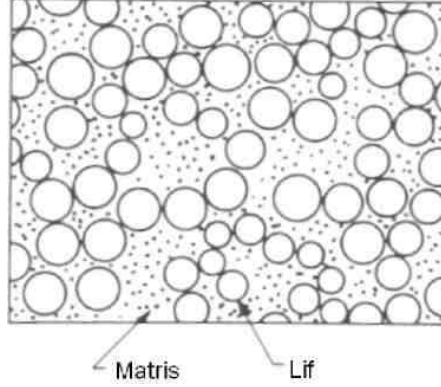
- Bileşenler,
- Bileşenlerin dağılımı,
- Bileşenler arasındaki etkileşim,

faktörlerinden büyük ölçüde etkilenmektedir (Agarwall, 1980).

Kompozit malzemelerin özellikleri, bileşenlerin özelliklerinin hacimsel oranları toplamı olabilir yada bileşenler birbirini sinerjik bir şekilde etkiler ki bu durumda elde edilen kompozit malzemenin özellikleri, basit bir şekilde; bileşenlerin özelliklerinin hacimsel oranlar toplamı ile elde edilemez. Bu nedenle kompozit malzemeyi bir sistem olarak tanımlarken, bileşenleri ve bileşenlerin özelliklerini belirtmenin yanı sıra, takviyenin geometrisinin de sistem için bir referans olarak belirtilmesi gereklidir. Takviyenin geometrisi, şekil, boyut, boyut dağılımı ile

tanımlanabilir (Agarwal, 1976).

Konsantrasyon, genellikle hacimsel ya da kütleli oran ile ölçölür. Temel olarak lif ve matris malzemenin hacimsel veya kütleli oranından bahsetmek mümkündür. Kompozit bir plakanın kesit görünüşüne baktığımızda liflerin ve matris malzemenin durumu Şekil 4.1’ deki gibidir.



Şekil 4.1 Kompozit malzemenin kesit görünüşü(Agarwall, 1980).

4.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin birçok özelliklerinin metallerinkine göre çok farklılıklar göstermesinden dolayı, metal malzemelere göre önem kazanmışlardır. Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır.

Aşağıda bu malzemelerin avantajlı olan ve olmayan yanları kısaca ele alınmıştır. Kompozit malzemelerin dezavantajlı yanlarını ortadan kaldırmaya yönelik teorik çalışmalar yapılmakta olup, bu çalışmaların olumlu sonuçlanması halinde kompozit malzemeler metalik malzemelerin yerini alabilecektir.

a) Yüksek mukavemet: Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Ayrıca kalıplama özelliklerinden dolayı

kompozitlere istenen yönde ve bölgede gerekli mukavemet verilebilir. Böylece malzemeden tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir.

b) Kolay Şekillendirilebilme: Büyük ve kompleks parçalar tek işlemle bir parça halinde kaplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar.

c) Elektriksel Özellikler: Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler.

d) Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Dayanç: Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır.

e) Isıya ve Ateşe Dayanıklılığı: Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı artırılabilir.

f) Kalıcı Renklendirme: Kompozit malzemeye, kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.

g) Titreşim Sönümlendirme: Kompozit malzemelerde süneklik nedeniyle doğal bir titreşim sönümleme ve şok yutabilme özelliği vardır. Çatlak yürümesi olayı da böylece minimize edilmiş olmaktadır.

4.2 Kompozit Malzeme Yapımındaki Ana Elemanlar

4.2.1 Matris Malzemeleri

Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir ya da birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gösterir.

Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf ya da matriste oluşacak bir çatlağın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse, elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise, elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğru bir çatlak elyaf/matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler.

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzeme tipleri epoksi, polyester, vinylester ve fenolik reçinelerdir. Yüksek mukavemet göstermeyen durumlarda en çok kullanılan matris malzemesi polyester reçinesidir. Gelişmiş kompozitlerin üretiminde ise genellikle epoksi reçinesi kullanılmaktadır. Matris iyileştirmesi çalışmaları özellikle yüksek sıcaklıkta kullanıma uygun ve düşük nem duyarlılığına sahip yapıların üretilmesi doğrultusundadır.

4.2.1.1 Epoksi reçine matrisler

Epoksiler iki ya da daha fazla epoksit içeren bileşenlerden oluşurlar. Polifenol'ün epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilirler. Epoksilere uygulanan kür işlemleri ile yüksek sıcaklıklara dayanımı 150-200 °C 'a artırılabilir. Büzülmesi %2'den azdır.

Avantajları:

- Kopma mukavemetleri yüksektir.
- Elyaf yapılarda yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.
- Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
- Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- Düşük ve yüksek sıcaklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.

Dezavantajları:

- Polyesterle karşılaştırıldığında pahalıdırlar.
- Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur.

Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerde kullanılabilme nedeniyle, uçak yapısında da yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar.

4.2.1.2 Polyester reçine matrisler

Polyester matrisler dibazik asitlerin, dihidrik alkoller (glikol) yada dihidrik fenollerle karışımının yoğunlaşması ile şekil alırlar. Polyesterlerin ana tipleri polyester bileşeninin doymuş asitle yada alternatif malzeme olarak glikolle modifikasyonu temeline dayanır. Ayrıca kür işlemi ile matrisin esnekliği iyileştirilerek kopma gerilmesi artırılabilir.

Avantajları:

- Takviyelerin nemini dışarı kolayca atabilmesini sağlayan düşük viskozite
- Düşük maliyet
- İyi çevresel dayanım

4.2.1.3 Vinylester reçine matrisler

Polyestere benzerler. En önemli avantajları elyaf ve matris arasında iyileştirilmiş bir bağ mukavemetine sahip olmalarıdır. Polyesterle glikolün bir kısmının yerine doymamış hidrosilik bileşenlerin kullanılması ile elde edilirler. Korozif ortamlardaki kullanımlar için donatılı plastik bileşenlerin üretiminde yararlanılmaktadır. Bu polimerler kimyasal dayanım gerektiren kimya tesislerinde, borularda ve depolama tanklarında kullanılmaktadır.

4.2.1.4 Fenolik reçine matrisler

Bu yüzyılın başından beri yaklaşık yüz yıldır kullanılmaktadır. Sertleşme, ısı enerjisiyle gerçekleşmekte, laminant ve kalıplama için basınç gerekmektedir. Fenolik reçinelerin ısı stabiliteleri, elektrik özellikleri, suya ve alkaliler dışındaki kimyasal maddelere dayanımları çok iyidir. Bu reçineler 300 °C'ye kadar sürekli, asbest

lifleriyle donatılmaları halinde ise kısa süreli olarak 1000 °C 'ye kadar kullanılabilirler.

4.2.1.5 Silikon reçineler

Silikon reçineler, diğerlerinden farklı olarak yapılarında karbon yerine inorganik esaslı silikonlar bulunan malzemelerdir. Mekanik ve elektriksel özelliklerini çok az değişikliklerle 250 °C'ye kadar koruyabilen silikon esaslı reçinelerin kullanımları, mekanik dayanımlarının diğer reçinelere göre daha düşük ve maliyetinin de genelde daha yüksek olması nedeniyle kısıtlıdır. Süpersonik arabalarda kullanılırlar.

4.2.1.6 Metal matrisler

Kompozit malzemeyi sürekli bir arada tutan ve bu bütünlük içinde lifle birlikte malzemenin özelliklerini belirleyen matris malzemesi olarak metaller, taşıyıcılık açısından, özellikle polimer matris malzemesine kıyasla yüksek dayanıma sahiptirler. Üretimleri zor olup maliyeti yüksek olmasına karşın, metal matris malzemesi kompozit malzemenin tokluğunu önemli ölçüde arttırmakta ve yüksek sıcaklık etkisindeki uygulamalara olanak vermektedir. Metallerin matris malzemesi olarak kullanılması, yine metal olan birçok ince liflerin üretimiyle başlamıştır.

Kompozit üretiminde metal matris malzemesi olarak, bakır alüminyum, titan, nikel, gümüş gibi metaller başta gelmektedir. Matris malzemesi erimiş halde, moleküler yapıda, levha veya ince tabaka şeklinde olabilmekte ve kullanılan üretim teknolojisine bağlı olarak dökme, karıştırma, presleme, elektroliz yoluyla kaplama, haddelme yöntemleriyle liflerle birleştirilmektedir. Bu birleşmede kullanılacak yüksek dayanımlı liflerin zedelenmemesi ve tahrip olmaması sağlanmalıdır. Metal matris içinde en kolay kullanılabilen elyaf bor ve borik elyafıdır. Bu kompozit malzeme 300 °C sıcaklığa kadar oda sıcaklığında özelliğini korumaktadır. Burada kompozit malzeme üretimi 450-500 °C sıcaklıkta, sıcak presleme yöntemiyle yapılır.

4.2.2 Elyaf lar (Lifler)

Matris malzeme içerisinde yer alan elyaf takviyeler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastik modüle ve sertliğe sahip olan elyaf lar kimyasal korozyona da dirençlidirler.

Günümüzde kompozitlerin donatılmasında boyutsal ve şekilsel özellikleri çok farklı lifler (elyaf lar) kullanılmaktadır. Örneğin, cam lifleri gibi lifler üretim sırasında demetler halinde hazırlanmaktadır.

Kompozitlerin donatılmasında kullanılan lifler, E-modülü değerleri, kullanılan matris malzemesinin E-modülü ile kıyaslanarak, matrsten daha düşük ya da yüksek E-modülü değerine sahip lifler olmak üzere iki ana grupta toplanabilir. Ancak, kompozitlerin özellikleri içinde önemli olan bu ayrım sabit matris malzemesi için anlam taşımaktadır.

Teller, milimetrik boyutta metal malzemelerdir. Çapları diğer donatı malzemelerine kıyasla daha büyük olup, genellikle beton ve harçların donatılmasında kullanılır.

Dilimizde lif kelimesinin çoğulu olan “elyaf” kelimesi daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Liflerin çapı ortalama 0,01 mm. mertebesindedir. Narinlik oranı 10000’e kadar çıkabilmektedir. ($L/d \leq 10^4$). Lifler değişik kaynaklardan elde edilmekte ve değişik özellikleriyle büyük çeşitlilik göstermektedir.

Kıllar donatıda kullanılan en ince malzemelerdir. Bunlar, buhar yoğunlaşmasıyla büyütülen değişik şekillerdeki tek kristaller olup, çapları birkaç mikron, boyları birkaç mm. kadardır.

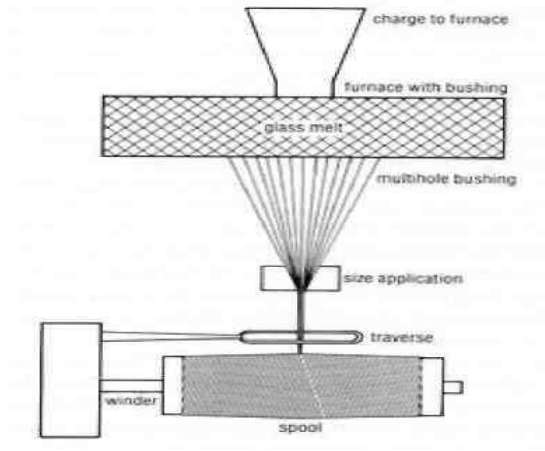
Buharla büyütülen bu kılların genelde yapısal hataları olmamaktadır. Dolayısıyla dislokasyon içermeyen bu cisimlerin dayanımı, normal boyutlardakine oranla yaklaşık olarak yaklaşık bin katı kadar olabilmektedir.

Üstün özelliklere karşın, yapım yöntemi nedeniyle kıllarla donatılı kompozitlerin üretimi son derece sınırlı kalmaktadır. Ayrıca, kılların sahip oldukları yüksek çekme dayanımı sadece elastik bölgededir. Plastik deformasyonunun başlamasıyla kıllarda dislokasyonlar oluşmakta ve dayanım düşmektedir.

4.2.2.1 Cam lifleri

Cam lifleri veya diğ er bir deyişle cam elyafları kompozitlerin üretiminde en çok kullanılan donatı malzemelerindendir. Üstün  zelliklerinin yanı sıra, ekonomik bir donatı türü olması bu sonucu ortaya çıkarmaktadır. Çeşitli matris malzemeleriyle kullanılmış olmasına karşılık, temel kullanım alanı cam takviyeli plastik (CTP) endüstrisidir. Cam liflerinin ticari anlamda üretimi 1930’lu yıllarda İngiltere’de başlanmış olmasına karşılık, bu malzeme plastik malzemenin donatılmasında 1950’lerin başından itibaren kullanılmaya başlanmıştır.

Cam amorf bir malzemedir ve polimerik yapıdadır. Üç boyutlu moleküler yapıda, bir silisyum atomu dört oksijen atomu ile çevrilmiştir. Silisyum metalik olmayan hafif bir malzemedir, doğada genellikle oksijenle birlikte silis (SiO_2) şeklinde bulunur. Cam eldesi için silis kumu, katkı malzemeleri ile birlikte kuru halde iken 1260  C civarına ısıtılır ve soğumaya bırakıldığında sert bir yapı elde edilir (şekil 4.2).



şekil 4.2 Cam lifi  retimi.

Cam liflerinin bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Çekme mukavemeti yüksektir, birim ağırlık başına mukavemeti çeliğinkinden yüksektir.
- Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar.
- Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.

- Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.

- Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam lifli kompozitlerin kullanılmasına imkan tanır.

Başlangıçta, cam liflerinin üretiminde A- camı veya açık adıyla “alkali cam” kullanılmıştır. Bunu çok az alkali içeren ve çok üstün elektriksel ve mekanik özelliklere sahip bir borsilikat camı olan “elektrik dayanımlı camın”, kısa adı ile E- camının kullanılmaya başlanması izlemiştir.

Cam lifi imalinde silis kumuna çeşitli katkı malzemeleri eklendiğinde yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır (Çizelge 4.1). Dört farklı tipte cam lifi mevcuttur:

- A (Alkali) Camı: A camı yüksek oranda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek, en yaygın cam tipidir.

- C (Korozyon) Camı: Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir.

- E (Elektrik) Camı: Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suyu karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E camı kullanılır.

- S (Mukavemet) Camı: Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir. Cam lifleri genellikle plastik veya epoksi reçinelerle kullanılırlar.

Çizelge 4.1 Cam liflerinin mekanik özellikleri

Özellikler –Katki Malzemeleri (%)	A	C	E	S
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.50	2.49	2.55	2.48
Elastik modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti(MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727.0	749.0	841.0	970.0
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

4.2.2.2 Karbon lifleri

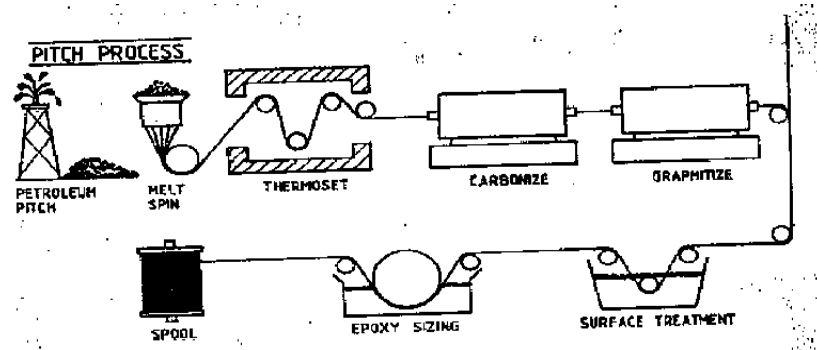
Liflerde donatıl kompozitlerin üretiminde kullanılan önemli bir lif türüdür. 1960'lı yılların ikinci yarısından itibaren kullanılmaya başlanmış olan bu liflerin düşük yoğunluğuna karşın çekme dayanımı ve E – modülü yüksektir. Yüksek sıcaklıklara dayanabilen karbon liflerinin özellikleri, üretimdeki son işlem sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Uygulamada 6 ila 10 mm arasında değişen çaptaki liflerin 1000-1500 adetlik demetlerinden oluşan fitil ve abkumalar kullanılmaktadır. Üstün özelliklerinin yansısı on derece pahalı olan karbon lifleri, özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde yararlanılan bir malzeme niteliğindedir (Şekil 4.3).

Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı elyaflar 2413 ila 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı elyaflar ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı elyaflar kadar iyi değildir ancak maliyetleri düşüktür.



Şekil 4.3 Karbon elyaf örnekleri.

Zift tabanlı karbon lifleri göreceli olarak daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Buna bağlı olarak yapısal uygulamalarda nadiren kullanılırlar. PAN tabanlı karbon lifleri kompozit malzemeleri daha sağlam ve daha hafif olmaları için sürekli geliştirilmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 PAN 'ın karbon lifine birbirini takip eden dört aşamada dönüştürülmesi.

- Oksidasyon; Bu aşamada elyaflar hava ortamında 300 derecede ısıtılır. Bu işlem, elyaftan H' nın ayrılmasını daha uçucu olan O 'nın eklenmesini sağlar. Ardından karbonizasyon aşaması için elyaflar kesilerek graphite teknelerine konur. Polimer, merdiven yapısından kararlı bir halka yapısına dönüşür. Bu işlem sırasında elyafın rengi beyazdan kahverengiye, ardından siyaha dönüşür. (Arcasoy O. ,2006)

- Karbonizasyon; Elyafların yanıcı olmayan atmosferde 3000° C’ ye kadar ısıtılmasıyla liflerin 100% karbonlaşma sağlanması aşamasıdır. Karbonizasyon işleminde uygulanan sıcaklık üretilen elyafının sınıfını belirler.
- Yüzey İyileştirmesi; Karbonun yüzeyinin temizlenmesi ve elyafın kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışabilmesi için elektrolitik banyoya yatırılır. (Arıcasoy O. ,2006)
- Kaplama; Elyafı sonraki işlemlerden (prepreg gibi) korumak için yapılan nötr bir sonlandırma işlemidir. Elyaf reçine ile kaplanır. Genellikle bu kaplama işlemi için epoksi kullanılır. Kompozit malzemede kullanılacak olan reçine ile elyaf arasında bir ara yüz görevi görür.

Çizelge 4.2 ’de görüldüğü gibi karbon elyafının tüm diğer liflere göre en önemli avantajı yüksek modülüs özelliğidir. Karbon lifi bilinen tüm malzemelerle eşit ağırlıklı olarak karşılaştırıldığında en sert malzemedir.

Çizelge 4.2 Karbon lifi sınıfları

Karbon Elyafı Sınıfları (Grades)				
Karbonizasyon Isısı (°C)	1000'e kadar	1000-1500	1500-2000	(Grafit) 2000
Karbon elyafı sınıfı	Düşük modülüs	Standart modülüs	Orta modülüs	Yüksek modülüs
Elastic modülüs (GPa)	200'e kadar	200 - 250	250 - 325	325 + ...

Çizelge 4.3 Karbon ve grafit liflerinin karşılaştırılması

Özellik	Grafit	Karbon
Safılık (%)	99	93-95
İşlem Sıcaklığı (°C)	> 1700	< 1700
Elastisite Modülü (GPa)	>345	<345

Karbon liflerinin en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir (Çizelge 4.3). Karbon lifleri, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon lifleri çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaflar alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar.

4.2.2.3 Aramid lifler

Aramid “aromatik polyamid” in kısaltılmış adıdır. Polyamidler uzun zincirli polimerlerdir. Aramidin moleküler yapısında altı karbon atomu birbirine hidrojen ile bağlanmıştır. Camdan daha hafif ve daha rijit olan bu malzeme, fiyat açısından da cam lifleri dışında kalan birçok lif türünden daha ucuzdur.

Para-aramidlerin ise en yaygın üretilen ve kullanılan tipi Du Pont’un ürettiği Kevlar lifleri ve Akzo Ind.Fibers’in ürettiği Twaron lifleridir. Bunların yanısıra Teijin firmasının ürettiği Technora lifleri de bu gruba girmektedir(Karahan,1994).

Özellikle askeri alanda daha yüksek hızlı ve tehlikeli mermilere karşı korunma ihtiyacı, balistik koruyucu materyallerin geliştirilmesi konusunda teşvik edici olmuştur. Yüksek performanslı liflerin ve esnek kompozit malzemelerin üretiminde sağlanan gelişmeler balistik koruma amaçlı birçok yeni ürünün ortaya çıkmasını sağlamıştır. Günümüzde en çok bilinen ve kullanılan balistik koruyucu tekstil materyali para-aramid lifleridir (Şekil 4.5).

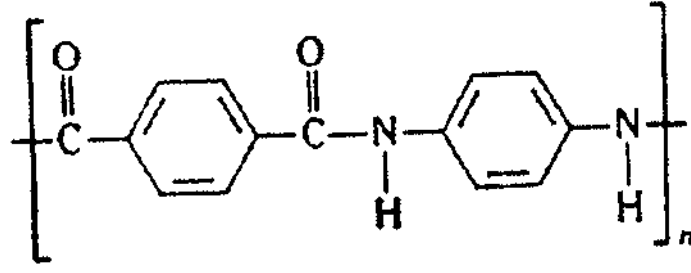
Bununla birlikte ultraviyole ışınlarına direkt olarak maruz kaldıklarında, hassas olan Aramid'ler bir karma materyal içinde yer aldıkları zaman, direkt olarak ultraviyole ışınlarına maruz kalmadıkları için bu ışınların olumsuz etkilerinden çok az etkilenirler veya hiç etkilenmezler (Çalık, 2004).

Aramid'lerin bir diğer özelliği de erimemeleri ve yanmayı (oksitlenmeyi) desteklememeleridir. Ancak 427 °C'de kömürleşmeye başlarlar.

Çok geniş bir ısı yelpazesi içinde (uzun sürelerde) mükemmel dayanıklılık özellikleri gösteren Aramid'ler -196°C gibi ve daha düşük ısılarda dahi dayanıklılığından bir şey kaybetmezler. Aynı zamanda mükemmel boyutsal stabilite özellikleri gösterirler (Özek, 2004).

Kimyasal maddelerden ve nemden etkilenmeyen Aramid'ler birkaç kuvvetli asit ve alkali hariç kimyasal direnci çok iyi olan malzemelerdir (Çalık, 2004).

Aramid fiberlerin yoğunluğu 1.44 g/cm³ iken fiberglas'ın yoğunluğu 2.54 g/cm³ dir. Bu bakımdan fiberglas'tan %43 daha hafif olan Aramid'in, özgül gerilme dayanıklılığı E camından (konvansiyonel cam) 2 kat ve alüminyumdan 10 kat daha güçlüdür.



Şekil 4.5 Para-aramid lifinin kimyasal formülü.

- **Kevlar (p-phenylene terephthalamide, PPD-T) lifleri:**

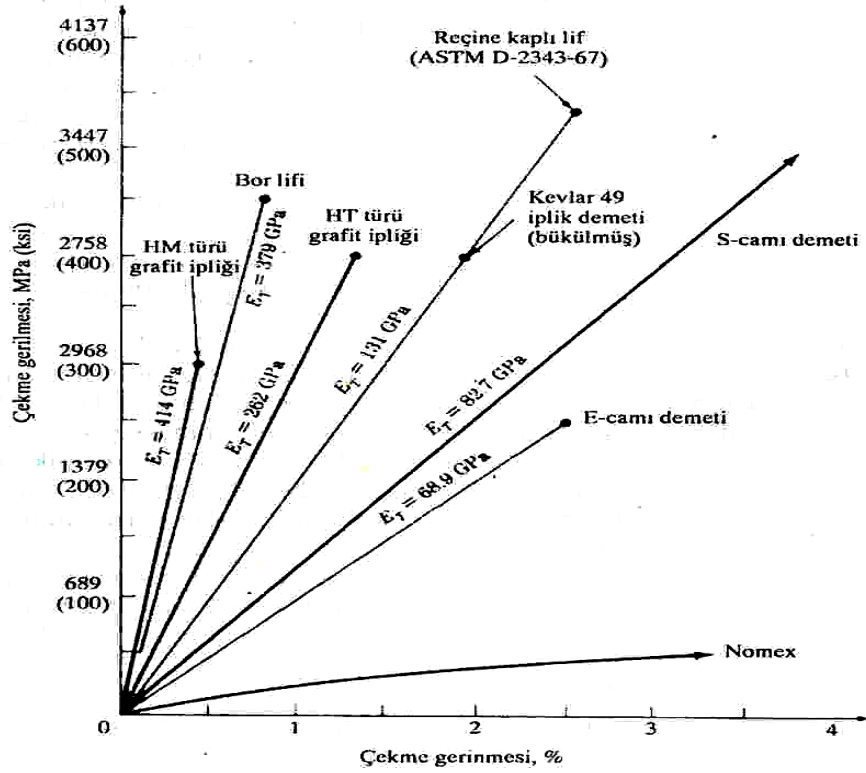
Kevlar, çok hafif karbon kökenli çok sağlam liflerden oluşan bir malzemedir. Dupont firması tarafından 1965 yılında icat edilmiş ve patentleşmiştir. Kevlar günümüzde zırh, sağlam halat yapımı, yanmadan koruyucu giysi yapımında kullanılmaktadır. Kevlar çok yüksek çekme gerilimine dayanabilen liflerden oluşan ipliksi bir yapıdır. Dokunabilir, kumaş haline getirilebilir, kesilebilir ve dikilebilir. Kevlar lifleri “aynı ağırlıktaki çelikten 5 kat daha sağlamdır.” sloganı ile pazarlanmaktadır.

Du Pont firmasının para-aramid fiberler ailesi içerisinde tescilli bir markası olan Kevlar iki tip olarak piyasada bulunmaktadır. Bunlar Kevlar 29 (PRD-29) ve Kevlar 49 (PRD-49) olarak bilinirler (Özek, 2004).

Daha çok kumaş formunda üretilerek balistik koruyucu ürünlerin imalatında kullanılan Kevlar 29 ve Kevlar 49 kumaşlar kaplanmış veya kaplanmamış olarak da üretilmektedir. Kevlar 49 daha yüksek modüllü malzemedir ve plastik güçlendirici olarak tasarlanmıştır.

Kevlar lifinden yapılan balistik koruyucu yapılar insanların maruz kaldığı silahlara karşı kullanılırlar. Balistik tehlike sivil ve askeri olmak üzere ikiye ayrılır. Sivil balistik tehlike genellikle tabanca gibi hafif silahları içerir. Askeri tehlikeler ise daha yüksek hızlarda gelen şarapnel, tüfek mermileri ve diğer fragmentları içeren tehlikelerdir. Bu çeşit tehlikelere karşı en iyi koruyucular balistik koruyucu yeleklerdir.

Kevlar ipliğinin kopma mukavemeti çelik telinkinden 5 kat daha yüksektir ve yoğunluğu çeliğin yoğunluğunun beşte biri oranındadır (Hongu&Phillips, 1997, s.17) (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Çeşitli fiberlerin gerilme davranışları(Smith, 2001).

Yüksek sıcaklıkta sönme dayanımı oldukça iyidir. Ayrıca korozyon dayanımı oldukça iyidir. Kevlar 49'un elastik modülü Kevlar 29'ununkinden yaklaşık iki kat fazladır. Kevlar elyafın yoğunluğu cam ve grafit elyafların yoğunluklarından daha düşüktür. Kevlar49/Epoksi kompozitlerinin darbe mukavemeti grafit epoksi kompozitlere oranla yedi kat, Bor/Epoksi kompozitlere oranla dört kat daha iyidir.

Uçak yapılarında, düşük basma mukavemetleri nedeniyle karbon elyaflarla birlikte hibrit kompozit olarak, kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadır.

Önemli özelliklerini şöyle sıralayabiliriz;

- Yüksek dayanıklılık,
- Yüksek darbe dayanımı,
- Yüksek aşınma dayanımı,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Yüksek kimyasal dayanımı,
- Kevlar elyafı kompozitler Cam elyafı kompozitlere göre 35% daha hafif oluşu,
- E Cam türü elyaflara yakın basınç dayanıklılığı,
- Genellikle sarımtırak renkte olması,
- Düşük yoğunluklu olması.

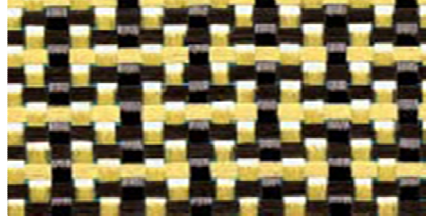
Dezavantajları ise şöyle sıralanabilir:

- Bazı tür aramid elyafı ultraviyole ışınlar maruz kaldığında bozulma göstermektedir. Sürekli karanlıkta saklanması gerekmektedir.
- Elyafar çok iyi birleşmeyebilirler. Bu durumda reçinede mikroskobik çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar malzeme yorulduğunda su emişine yol açmaktadır.

Genellikle polimer matrisler için takviye elemanı olarak kullanılan aramid elyafının bazı kullanım alanları;

- Balistik koruma uygulamaları; Askeri kasklar, kursun geçirmez yelekler, mayın arama teçhizatları.
- Koruyucu giysiler; eldiven, motosiklet koruma giysileri, avcılık giysi ve aksesuarları,
- Yelkenliler ve yatlar için yelken direği,
- Hava araçları gövde parçaları,
- Tekne gövdesi,
- Endüstri ve otomotiv uygulamaları için kemer ve hortum,
- Fiber optik ve elektromekanik kablolar,
- Debriyajlarda bulunan sürtünme balatalarında ve fren kampanalarında,
- Yüksek ısı ve basınçlarda kullanılan conta, salmastra vb. (Arıcasoy O. ,2006)

Kevlar 29 üstün darbe dayanımı özelliğine sahip olması sebebiyle çoğunlukla kurşungeçirmez yelek gibi uygulamalarda kullanılırlar.



Şekil 4.7 Cam ve karbon elyafının kombinasyonu şeklinde olan aramid lifi.

4.2.2.4 Silisyum karbür lifler

Bor gibi, Silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile elde edilirler. 0.1 mm ila 0.14 mm çaplarında üretilirler. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyaflardan daha iyidir. Silisyum karbür elyaf 1370°C' ta mukavemetinin sadece %30'nu kaybeder. Bor elyaf için bu sıcaklık 640 °C' tır .Bu elyaflar genellikle Titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında Titanyum, Alüminyum ve Vanadyum alaşımlı matris ile kullanılırlar. Ancak Silisyum karbür elyaflar Bor elyaflara göre daha yüksek yoğunluğa sahiptirler. Silisyum karbürün karbon çekirdek üzerine kaplanması ile üretilen elyafların yoğunluğu düşüktür (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 Silisyum karbür liflerin özellikleri

	Yoğunluk (Mg/m ³)	Young Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	E _t /p	δ _t /p
Nicalon	2.60	250	2200	96.2	846
CVDmoro-filament ^{ff}	3.05	406	3920	133.1	1285
CVDmoro-filament ^f	3.00	400	3450	133.3	1150
Tyranno	2.40	280	2000	116.7	833
Whisker	3.20	700	10000	218.8	3125

4.2.2.5 Alumina lifler

Alumina, alüminyum oksittir (Al_2O_3). Elyaf formundaki alumina, 0.02 mm çapındaki alumina flamanın Silisyum dioksit (SiO_2) kaplanması ile elde edilir. Alumina elyafların çekme mukavemetleri yeterince yüksek değildir, ancak basma mukavemetleri yüksektir(Çizelge 4.5). Örneğin, alumina epoksi kompozitlerin basma mukavemetleri 2275 ila 2413 MPa'dır. Ayrıca, yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadırlar.

Çizelge 4.5 Alümina fiberlerin özellikleri

Fiber Çeşidi	Bileşim	Çap (μm)	Yoğunluk (g/cm^3)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Young Modülü (GPa)
Sumitomo	(Al_2O_3 -85%, SiO_2 -15%)	9	3.2	2600	250
Nextel 312 (3 M Co.)	(Al_2O_3 -62%, B_2O_3 -14%, SiO_2 -24%)	3.5	2.7	1700	152
Saffil (ICI)	(Al_2O_3 -96%, SiO_2 -4%)	3	3.3	2000	300

4.2.2.6 Bor lifleri

1960'lı yıllarda üretilmeye başlanan bir malzemedir. Yüksek dayanımlı ve pahalı bir malzeme olan bor lifleri, günümüzde özellikle metal motris elemanlarıyla birlikte metal motris malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Elyaf çapı 0,1 mm ile 0,2 mm arasında olan ve diğer bir çok life göre oldukça kalın bir lif özelliği gösteren malzeme, yüksek çekme mukavemetine ve elastik modüle sahiptir. Elastik modülü ise 400 Gpa'dır. bu değer S camının elastik modülünden 5 kat daha fazladır.

Üstün mekanik özelliklere sahip bor elyaflar, uçak yapılarında kullanılmaktadır. Ancak maliyetinin çok fazla olması nedeniyle yerini karbon elyaflara bırakmıştır.

4.2.2.7 Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (U.H.M.W.PE) malzeme

Molekül ağırlığı 10^4 düzeyinde olan olefin bileşiğine ya da plastiğe polietilen denir. Oldukça serttir ve politorbalar ve polietilen şişelerde kullanılır. Ev kullanımı için düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu olmak üzere iki çeşit polietilen vardır(Tutak, 1996, s.11). Çok dallı zincirlerin yoğunluğu düşük, az dallı zincirlerin yoğunluğu ise yüksektir. Düşük yoğunluklu polietilende her 1000 karbon atomuna 10 ila 30 dal karşı gelmekte, molekül zincirleri birbirinden daha uzak ve amorf kısımları çoğunlukta olan gevşek bir yapı oluşmaktadır. Yüksek yoğunluklu polietilende ise her 1000 karbon atomuna 1 ila 3 dal karşı gelmektedir (Arıkan, 2003).

Yüksek yoğunluklu polietilen 10^6 düzeyinde bir molekül ağırlığına sahiptir. Artan molekül ağırlığı ile beraber akışkanlık azalmaktadır. “Jel Eğirme” adı verilen teknikte çekilen polietilenden yüksek performanslı lifler üretilmektedir (Şekil 4.8). Jel eğirme hem çekme, hem de eğirmeyi içermektedir. Yüksek molekül ağırlıklı seyreltilmiş polietilen eriyiği jel gibi yumuşak olacak şekilde suya sıkılır, sonradan ısıtılır ve yaklaşık otuz kat uzunlukta olmak üzere çekilir.



Şekil 4.8 Jel eğirme yöntemi.

1979 yılında DMS firması Dyneema liflerini icat edip patentini almıştır. Normalde polietilen molekülleri paralel değildir. Jel eğirme yöntemi ile moleküller bir çözücünde çözülür ve düzeler boyunca çekilirler. Çok yüksek bir moleküler

oryantasyon sonucunda lifler yüksek mukavemete ve yüksek Young modülüne ulaşırlar. %85'e varan seviyede kristalizasyon ve %95'ten fazla olan paralel oryantasyonu ile karakterize edilirler.

Dyneema HDPE (high density polyethylene)'den üretilmektedir. Aromatik halkalar, amin grupları içermez. Bunun sonucu olarak suya, neme, birçok kimyasallara, UV ışınlarına, mikroorganizmalara karşı dayanıklıdır. Dyneema lifleri suda şişmez ve hidroliz olmaz.

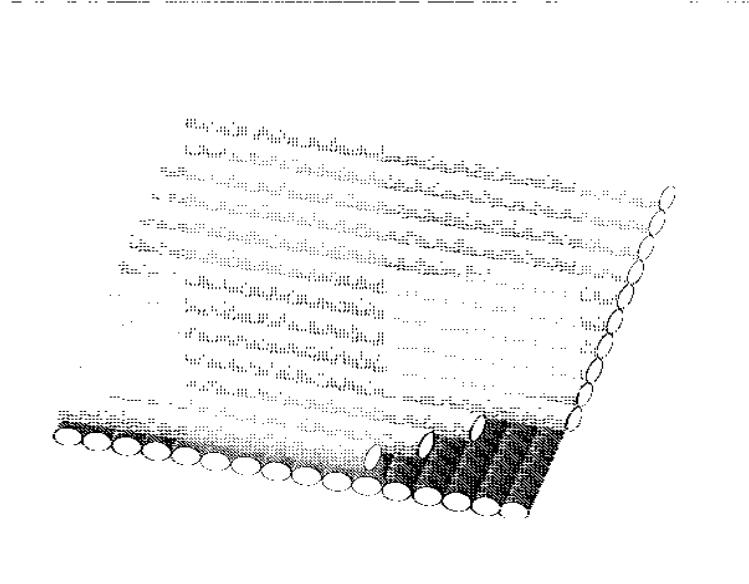
Diğer yüksek performanslı ipliklere nazaran düşük kopma uzaması değerine sahip olmasına rağmen kopma enerji değeri son derece yüksektir.

Balistik uygulamalarda genellikle HB serisi Dyneema polietilen lifleri kullanılmaktadır. SK 65, SK 75 ve SK 76 ise temelde denizcilik ile ilgili çok güçlü halat yapımında kullanılır. Bunun nedeni ise yüksek mukavemet ve malzemenin suda yüzebilme ve sudan etkilenmeme özelliğidir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6 Dyneema liflerinin bazı özellikleri

Dyneema Lifleri	Dyneema SK65	Dyneema HB26	Dyneema SK 75	Dyneema SK 76
Yoğunluk (g/cm³)	0,97	0,97	0,97	0,97
Mukavemet (N/tex)	2,8	3,1	3,3	3,7
Mukavemet (gr/den)	32	35	40	42
Mukavemet (Gpa)	2,7	3,0	3,4	3,6
Kopma Uzaması (%)	3,5	3,6	3,8	3,8

Kompozit yeleklerde kullanılmak için Dyneema UD geliştirilmiştir. Bu iki yönlü bir yapıdadır. İplikler dokunmamıştır, fakat birbirine paralel uzanır. Şekil 4.9'da liflerin Dyneema UD içindeki yerleşimi görülmektedir. Dyneema UD su ve güneş ışığından etkilenmez ve özel bir korumaya gerek duymaz.



Şekil 4.9 Liflerin dyneema UD içindeki yerleşimi.

Balistik korumada, ultra yoğun moleküler yapıli polietilen iplikleri gerek dokunmuş kumaş ve gerekse dokunmamış rulo biçimleri ile farklı hizmetlerde de kullanılırlar. Araştırmalar gösteriyor ki, mermi ve şarapnel parçaları gibi değişik tehlikelere karşı üretilen çeşitli koruma elemanlarının içerisinde (başlık ve kompozit yelek ilave koruma plakaları) ultra yoğun moleküler yapıli polietilen yüksek koruma sağlamaktadır. Mermilere karşı korumak için dizayn edilen yeleklerde en iyi sonuçlar UD66 adlı, çok yönlü dokunmamış malzemeden elde edilir. Patlayan mermilerden kopan parçalara karşı olan korumada ise, “Dyneema Fraglight” bu alandaki tüm diğer ürünlere nazaran çok daha etkilidir.

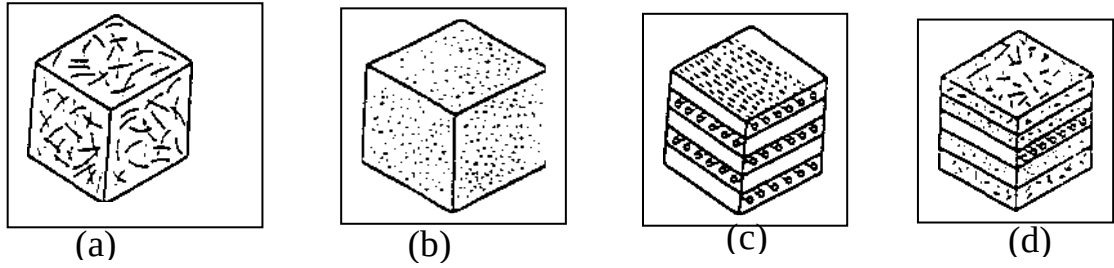
Sektörde balistik koruyucu olarak kullanılan liflerin mekanik özellikleri tablo halinde Çizelge 4.7 ‘de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Balistik koruyucu liflerin özellikleri (Özaydın, 1999)

Malzeme Adı	Max. Sıcaklık (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (GPa)	Modül (GPa)	Uzama (%)
Poliamid HT	255	1,14	0,9	6	20
Kevlar HM/149 (para-aramid)	500	1,47	2,4	160	1,5
Twaron (para-aramid)	500	1,44	2,8	80	3,3
Twaron Hm (para-aramid)	500	1,45	2,8	125	2,0
Dyneema SK60 (yüksek moleküler ağırlıklı polietilen)	145	0,97	2,7	89	3,5
Dyneema SK66 (yüksek moleküler ağırlıklı polietilen)	145	0,97	3,2	99	3,7
Spectra 900 (yüksek moleküler ağırlıklı polietilen)	145	0,97	2,63	119	3,5
Spectra 1000 (yüksek moleküler ağırlıklı polietilen)	145	0,97	3,05	175	2,7
Zylon HM (poli-p-fenilenben zobisoksazol)	650	1,56	5,8	270	2,5

4.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, yapıdaki malzemelerin formuna göre bir sınıflama yapmak mümkündür. Bu sınıflama Şekil 4.10'de verilmektedir.



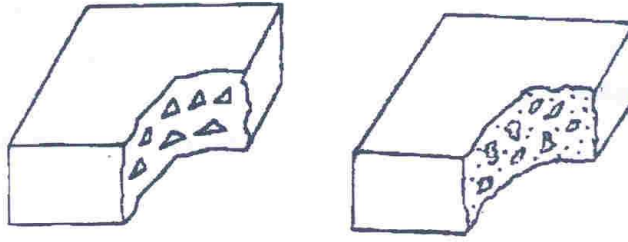
Şekil 4.10 Kompozit malzeme sınıfları. (a) Elyafli kompozitler, (b) Parçacıklı kompozitler, (c) Tabakalı kompozitler, (d) Karma kompozitler.

4.3.1 Elyafli Kompozitler

Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyeleri her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir. Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyaflarla temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir.

4.3.2 Parçacıklı Kompozitler

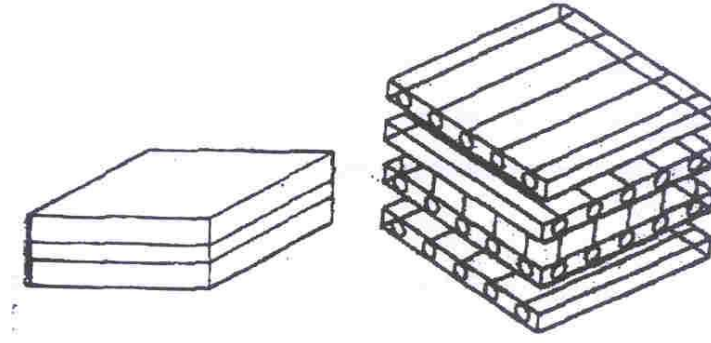
Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotrop yapılardır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Metal parçacıklı plastik matrisler(Çalık, 2004).

4.3.3 Tabakalı Kompozitler

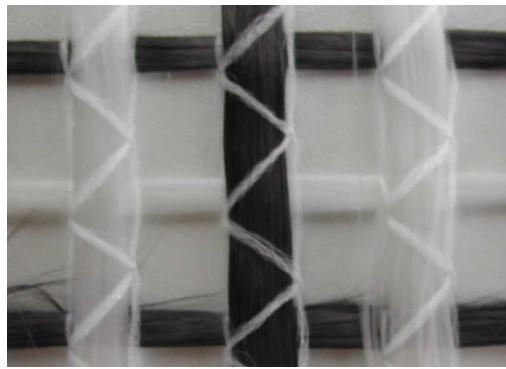
Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir (Şekil 4.12). Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler. Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler. Sandviç yapılar, yük taşımayarak sadece yalıtım özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilirler.



Şekil 4.12 Tabakalı kompozit yapılar(Çalık, 2004).

4.3.4 Karma (Hibrid) Kompozitler

Aynı kompozit yapıda iki ya da daha fazla elyaf çeşidinin bulunması olasıdır. Bu tip kompozitlere hibrid kompozitler denir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyafdır. Ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyafdır. Bu iki elyafın kompozit yapısında hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitten iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyafı kompozitten daha yüksek olmaktadır (Şekil 4.13).



(a)



(b)

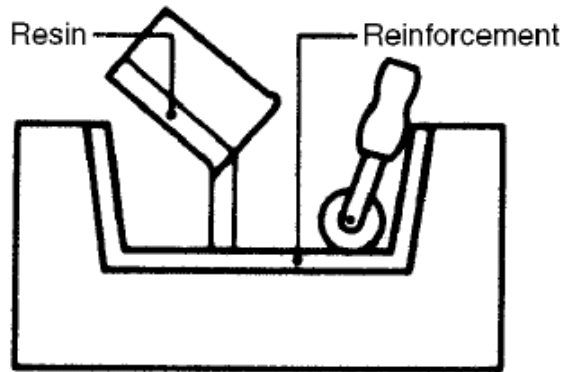
Şekil 4.13 Hibrid kumaşlar: (a) Cam/Karbon, (b) Cam/Aramid

4.4 Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için bir çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden başlıcaları aşağıdadır(Arıcasoy O. ,2006).

4.4.1 Elle Yatırma (hand lay-up)

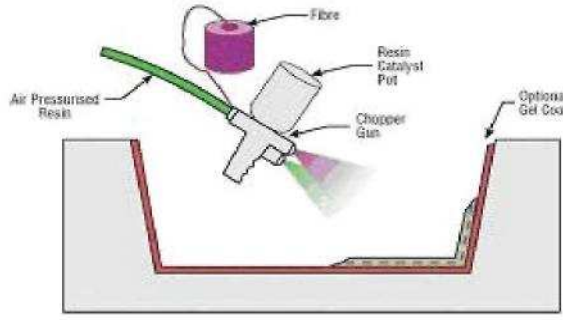
Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları Şekil 4.14'de görüldüğü gibi hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılarak üzerine sıvı reçine elyaf katmanlarına emdirilir. Elyaf yatırılmadan önce kalıp temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. El yatırma tekniğinde en çok kullanılan polyester ve epoksi'nin yanı sıra vinilester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur.



Şekil 4.14 Elle yatırma yöntemi.

4.4.2 Püskürtme (spray-up)

Püskürtme yöntemi elle yatırma yöntemini aletli şekli olarak kabul edilebilir(Şekil 4.15). Kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde yapılır. Püskürtülme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur.



(a)

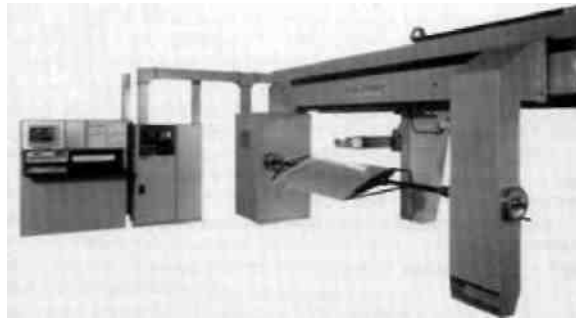


(b)

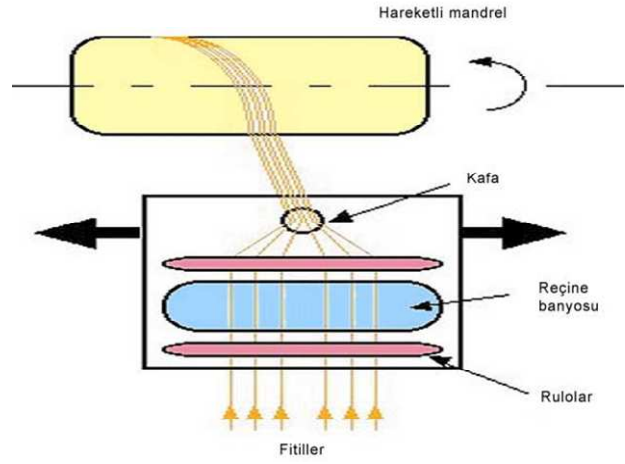
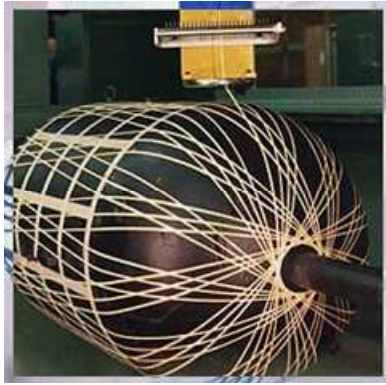
Şekil 4.15 (a) Püskürtme yöntemi, (b) Püskürtme tabancası.

4.4.3 Elyaf Sarma (Filament Winding)

Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır (Şekil 4.16, Şekil 4.17). Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler genellikle silindirik, borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır.



Şekil 4.16 Elyaf sarma makinesi.

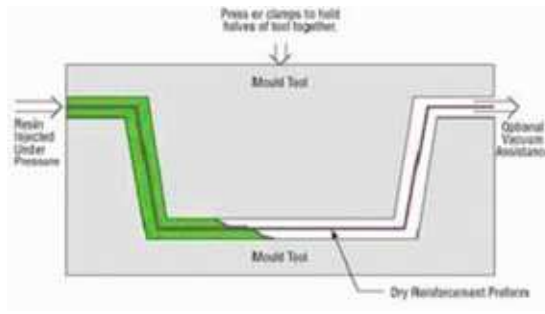


Şekil 4.17 Elyaf sarma yöntemi.

4.4.4 Reçine Transfer Kalıplama RTM / Reçine Enjeksiyonu

Bu kompozit üretim yönteminde elle yatırma sistemlere daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeye yapılması çelik kalıp maliyetine göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. RTM yöntemi çoğunluk jel kotlu veya jel kotsuz her iki yüzeyinde düzgün olması istenen parçalarda kullanılır.

Takviye malzemesi kuru olarak keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaf lar matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir. Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ilik veya en çok 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi islemesi için vakum kullanılabilir. Elyaf ın kalıba yerleştirilmesini gerektirmesinden dolayı uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğu için ise zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilebilir. Concorde uçaklarında, F1 arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır (Şekil 4.18).

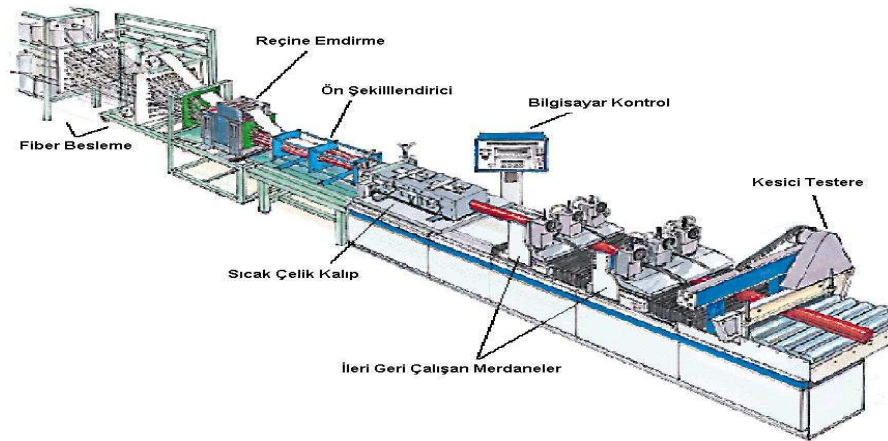


RTM Molding Process

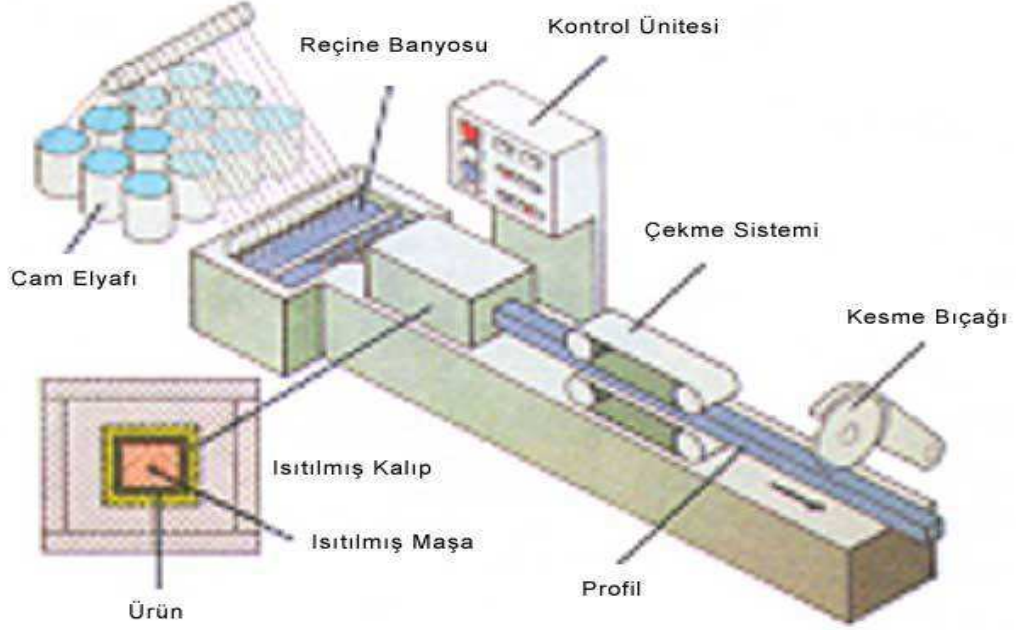
Şekil 4.18 Reçine enjeksiyonu.

4.4.5 Profil Çekme / Pultrüzyon (Pultrusion)

Pultrüzyon işlemi sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilebildiği düşük maliyetli seri üretim yöntemidir. Pull ve Extrusion kelimelerinden türetilmiştir. Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150 °C'ye ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçilerek sertleşmesi sağlanır. Kalıplar genellikle krom kaplanmış parlak çelikten yapılmaktadır. Sürekli elyaf kullanılmasından dolayı takviye yönünde çok yüksek mekanik mukavemet elde edilir. Enine yükleri karşılayabilmek için özel dokumalar kullanmak gerekmektedir. Şekil 4.19, Şekil 4.20'de bu yöntem gösterilmektedir.



Şekil 4.19 Profil çekme yöntemi.



Şekil 4.20 Profil çekme yöntemi.

4.4.6 Hazır Kalıplama / Compression Molding (SMC, BMC)

Hazır kalıplama bünyesinde cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplamaya hazır, hazır kalıplama bileşimleri olarak adlandırılan kompozit malzemelerin (SMC,BMC) sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Ayrıca ürünün iki yüzü de kalıp ile şekillenmektedir. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi karışık şekiller elde edilebilmektedir. Iskarta oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanmaları gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç olmasıdır.

Hazır kalıplama yönteminde kullanılan bileşimler içeriklerine göre çeşitlilik göstermekle beraber en çok iki tür hazır kalıplama bileşimi kullanılmaktadır.

a) Hazır kalıplama pestili / SMC (Sheet moulding composites)

SMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan pestil biçiminde malzemedir. Sürekli lifler, 25-50 mm kırılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında kullanılır. Genellikle 1m genişliğinde ve 3mm. Kalınlığında üretilir.

b) Hazır kalıplama hamuru / BMC (Bulk Moulding Composites)

BMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan hamur biçiminde malzemedir.

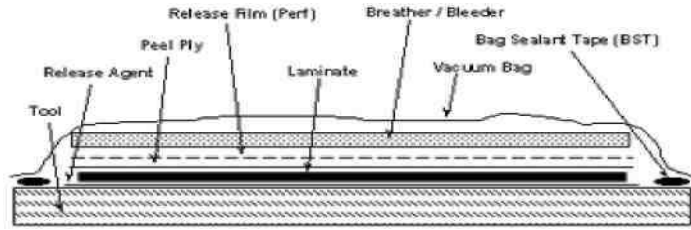
Hazır kalıplama bileşimlerinin avantajları;

- Çok geniş tasarım esnekliği
- Düzgün yüzey
- Kolayca laklanabilme, boyanabilme ve kalıp içinde yüzeyin kaplanabilmesi
- Geri dönüştürülebilme ve hazırlığında geri dönüşümlü malzeme kullanabilme
- Metal gömme parçaların yerleştirilmesi ile montaj kolaylığı
- Yüksek alev dayanımı
- Sıcaklık dayanımı
- Soğukta kırılma olmama, enjeksiyon kalıplama (injection moulding)

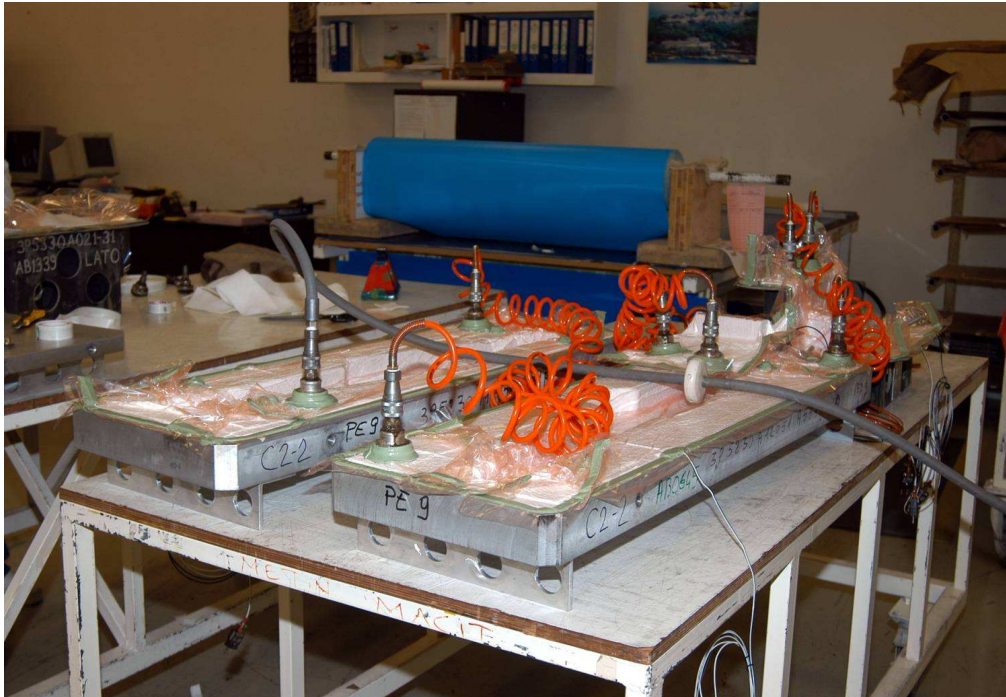
Bu yöntem RTM'ye benzer bir yöntemdir. Farklılığı reçine/elyaf karışımının kalıp dışarısında karışmış ve eritilerek basınç altında boş kalıp içine enjekte ediliyor olmasıdır. Sadece düşük viskoziteye sahip termos et reçineler bu yöntemde kullanılabilir. Diğer yöntemlere göre daha hızlıdır. Çocuk oyuncaklarından uçak parçalarına kadar birçok ürün bu yöntemle üretilmektedir.

4.4.7 Vakum Bonding / Vakum Bagging

Kompozit malzeme (genellikle geniş sandviç yapılar) önce bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası en üst katman olarak yerleştirilir (Şekil 4.21). İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygulayarak aşağıya çekilir. Sonraki aşamada tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin kür işlemi için ısıtılır. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanır. Kompozit malzeme tamir işlemlerinde de vakum bagging yöntemi kullanılmaktadır (Şekil 4.22).



Şekil 4.21 Geniş sandviç yapıların vakumlanması.

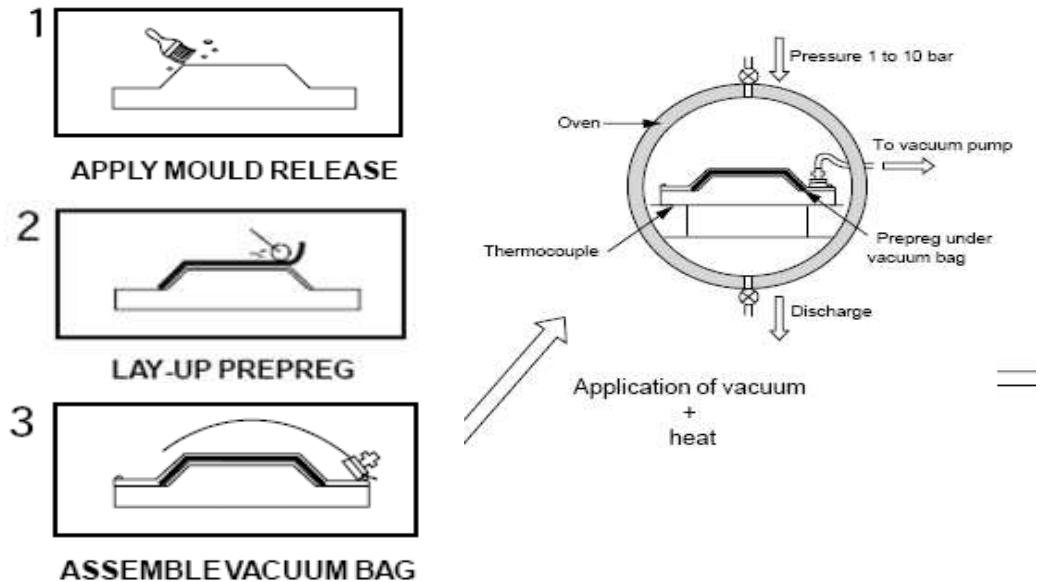


Şekil 4.22 Vakum bagging uygulaması.

4.4.8 Otoklav / Autoclave Bonding

Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için elyaf/reçine oranını artırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek gerekmektedir. Bunun sağlanması için malzemeyi yüksek ısı ve basınca uygulayarak sağlanabilir. Vakum bagging yöntemindeki gibi sızdırmaz bir torba ile elyaf/reçine yatırmasına basınç uygulanabilir. Fakat 1 atmosferden fazla düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanabilmesi için dışsal basınca ihtiyaç duyulur. Bu uygulama için, otoklav yönteminde de uygulanan ve karmaşık şekillerde en çok kontrol edilebilen metot, dışarıdan sıkıştırılmış gazın kompozit malzemenin içinde bulunduğu kaba verilmesidir(Şekil 4.23).

Otoklav kesin basıncın, isinin ve emisin kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır. Vacum bagging yöntemi ile benzerdir. Fırın yerine bir otoklav kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır.



Şekil 4.23 Otoklav kalıplama yöntemi.

4.4.9 Preslenebilir Takviyeli Termoplastik/Glass Mat Reinforced Thermoplastics (GMT)

Keçe türünde elyaf takviyesi içeren termoplastik reçine ile yapılmış plaka şeklinde preslenebilir kalıplamaya hazır özel amaçlı bir takviyeli termoplastik çeşidini tanımlamaktadır. GMT nin hazırlanması SMC ye benzemektedir. Ekstruderden çekilen bir termoplastik levha üzerine yumuşak haldeyken bir elyaf takviyesi yerleştirilir. Bu katmanların üzerine bir diğer termoplastik levhada yumuşakken yerleştirilerek soğuk hadde silindirlerinin arasından geçirilir. Sertleşen plakalar kesilerek preslenmeye hazır duruma getirilir.

5. BALİSTİK KORUYUCU MALZEMELER

5.1 Balistik Nedir

Fransızca "balistique" sözcüğünden gelen bir kelime olup, özellikle mermilerin bir namlunun içindeki, dışındaki devinimlerini ve hedef üzerindeki etkisini inceleyen bilimdir. Bir başka deyişle, mermilerin itme kuvveti, uçuşu ve çarpma etkisini inceleyen bir bilimdir. 19.yy boyunca silah alanında ortaya çıkan teknik ilerlemeler sonucunda gelişen modern balistik bilimi üç dala ayrılır:

- Mermi veya füzenin, silah içerisinde ve tesir sahasındaki hareketini inceleyen iç balistik,
- Uçuş sırasındaki hareketini araştıran dış balistik,
- Hedefteki etkileri inceleyen hedef balistiği olarak sınıflandırılabilir.

a) İç balistik

Bu bölüm, kimyasal enerji kaynağını, gazın genişlemesini ve ortaya çıkan enerjinin kontrolünü ve yönlendirilmesini inceler. Askeri silahlar, askeri olmayanlara göre sıcaklık ve basınç bakımından daha çok zorlanmış durumlarda çalışırlar. Bir merminin silah içindeki hareketi, gazın mermiye etkisi ile ilgilidir. Mermi hareketi sırasında, içinde bulunduğu namluya basınç yaparken arada sürtünme kuvveti ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıktaki gaz, namluyu o derece ısıtır ki, onunla kimyasal reaksiyona dahi girer.

Gerçekte modern bir silah bir ısı makinesinden ibarettir. Çalışması otomobil motoruna benzer. Burada genişleyen gaz bir piston yerine merminin hareketine sebep olur. Ateşlemenin yapılması sonucu yüksek basınçla yayılan gazın basıncı artarken, mermi atalet ve sürtünme sebebiyle hareket etmez. Ancak, basıncın daha da artması, merminin hareketine sebep olur. Merminin hareketi sonucu hacim büyürken, basınç bir maksimuma erişinceye kadar hızla yükselir. Bundan sonra basınç düşer, mermi

silahı terk ederken bu miktar maksimumun % 10-30'u arasında değişir. Silahın ağzındaki basınç, merminin burayı terk etmesinden sonra da belli bir mesafe için hızlanmasını sağlar. Değişik bir düzen şekli de, genişleyen gazların bir kısmının diğer yönde çıkması sağlanarak silahı etkileyen kuvvetler dengelenir. Mermi hızlarını ve gaz basınçlarını zaman ve merminin silah içindeki hareketine bağlı olarak ifade eden formüller geliştirilmiştir. Modern top mermilerinde yerçekimi ivmesinin 20.000-30.000 katları kadar ivme elde edilirken, yüksek gerilimler meydana gelir. Bu sebeple, iç balistik namlu gerilmesinin hesabını önemli bir konu olarak telakki eder. Silahta ortaya çıkan iç gerilmeler, aynı zamanda dışardan tatbik edilecek gecikmelerle önemli ölçüde azaltılır.

İç balistiğin diğer bir konusu da, silahın namlu içindeki spiral şeklindeki yiv ve setlerdir. Bu, uzun bir merminin dönerek hedefe ulaşmasına sebep olurken, yörüngesinin kararlı olmasını sağlar. Spiral yivler silah namlusunun eğimine bağlıdır. Düzgün olabileceği gibi, ağza doğru sıkışabilir veya bunların bir çeşit birleşmesinden ibarettir.

b) Dış balistik

Mermi veya füzeye tesir eden atalet, yerçekimi ve hava tarafından tesir eden aerodinamik kuvvetlerin bilinmesi halinde, yörüngelerin hesabı önemli bir zorluk arz etmez. Ancak, aerodinamik kuvvetlerin bilinmesi oldukça zordur. Bir mermi, hava direncini yenmek ve dengeli (stabil) uçuş yapmak için uçuş müddeti boyunca hedef noktasına doğru ilk çıkış pozisyonunda gitmek zorundadır. Eğer mermi pozisyonunu değiştirirse, hatta takla atarsa, bu uçuşun planlandığı gibi sonuçlanmamasına ve menziline düşmemesine sebep olur. Uçuş stabilizasyonunu sağlamak için iki metot vardır. Bunlar, kanatçık stabilizasyonu ve spin, dönme stabilizasyonudur. Kanatçık stabilizasyonunda, mermi üzerine monte edilmiş kanatcıklar merminin kendi ekseninde dönmeden gitmesini sağlarlar. Bu durum kanatcıklar üzerinde ortaya çıkan aerodinamik kuvvetler yardımıyla temin edilir. Spin stabilizasyonlu bir merminin ise sahip olduğu jirokobik dönme hareketinin bir sonucu olarak daima ilk hedef

doğrultusu boyunda hareketi devam eder. Bu dönme hareketinin ataleti, doğru eksenden olacak sapmalara müsaade etmez.

c) Hedef balistiği

Temel bilgilerin elde edilmesindeki güçlükler dolayısıyla balistiğin bu kolu, diğer dallar olan iç balistik ve dış balistikten geri durumdadır. Fakat Radyografi alanındaki ve yüksek sürat fotoğraf çağındaki hızlı gelişmeler bu konuya yardımcı olmuştur. Ancak alınan bilgilerin güvenilebilirliği konusu hala tartışıla gelmektedir. Bütün bilinen silah tipleri ve hedef şartlarında hedefin tahrip edilmesi aşağıdaki fiziki tesirlerle olmaktadır:

- Bomba, roket, harp başlığı, el bombası kullanıldığı durumlarda genellikle parçalanma etkisi veya küçük parçacıkların birbirlerinden farklı hareketleri sebebiyle,
 - Karşı kütleyi delme ve sızma sonucunda parçalama sebebiyle,
 - Su veya hava gibi akışkan bir ortam içerisinde büyük miktarda bir enerjinin ani olarak serbest kalmasının sebep olduğu infial hadisesiyle,
 - Nispeten yüksek süratli sarsıntıların meydana getirdiği yıkma etkisiyle,
 - Bir infilakın ateşi veya radyasyonu sonucu çıkan ısı sebebiyle,
 - Yangın bombaları veya infilaklar sebebi ve çıkan yangınlar sebebiyle,
 - Özellikle duman veya zehirli gazların kimyasal etkisiyle,
 - Bakteriyolojik etkiyle,
 - Radyasyon etkisiyle radyoaktivite. Bu tür hedef etkilerin analiz edilebilmesi ve değerlendirilebilmesi sonucu bu konuyla ilgili birtakım esaslar geliştirilmektedir.

Hedefe çarpan bir merminin meydana getirdiği etkiler üzerine yapılan bilimsel çalışmalar yenidir. Bu kapsamda hedefte meydana gelen zararı ve silahın verimliliğini arttırmak için ilk çalışmalar kovani büyütme şeklinde düşünülmüştür. Bununla birlikte savaşlarda zırh ve uçakların kullanılması, zırh delici sistemlerin gelişimini beraberinde getirmiştir. Ayrıca, metalürji bilimindeki son yenilikler, çok yüksek

basınçlar ile milisaniye aralığında gerçekleşen olayları ölçebilen cihazların bulunuşu hedef balistiğinin gelişimine imkân sağlamıştır.

Mermi, ateşli silahlar tarafından atılan delici, patlayıcı madde, kurşun anlamına gelmektedir. Küçük çaplı ateşli silahlar ile ağır ateşli silahların mermileri farklıdır. Tüfek, tabanca gibi küçük silahların mermisi çarpma etkisiyle hedefi deler. Büyük çaplı, ağır ateşli silahlar olan topların mermileri ise hedefi bulduğunda patlar.

Ateşli silahların mermisi üç ana bölümden oluşur. Merminin uç bölümüne mermi çekirdeği denir. Silah ateşlenince mermi çekirdeği hedefe doğru fırlar. İkinci bölüm, sevk barutudur. Sevk barutu yandığı zaman meydana getirdiği basınçla mermiyi iterek namludan fırlatır. Üçüncü bölüme mermi kovanı denir. Tek yanı kapalı bir metal silindir olan mermi kovanının içinde sevk barutu bulunur. Mermi kovanının arka ucunda kapsül denen bir ateşleyici bulunur ve tetik çekilince barutun ateşlenmesini sağlar. Ateşleme iğnesinin çarpmasıyla ya da elektrik akımıyla ateşlenen kapsül kovandaki barutu tutuşturur. Barutun yanmasıyla ortaya çıkan sıcak gazın basıncı mermi çekirdeğini ileriye doğru iter ve çekirdek namlu ağzından büyük bir hızla hedefe doğru fırlar. Küçük çaplı ateşli silahlarda, mermi çekirdeği, mermi kovanı ve sevk barutundan oluşan mermiye fişek denir. Bu parçalar bir birbirine sıkıca bağlı olduğu için fişek tek parça gibi görünür. Mermi çekirdekleri kurşundan yapıldığı için, hafif silahların mermileri kurşun olarak da adlandırılır. Fişeklerde mermi çekirdeği ile mermi kovanı bir bütündür ve yalnızca sevk barutu ateşlendiğinde birbirinden ayrılır. Oysa top mermilerinde mermi çekirdeği ile kovan birbirinden ayrılabilir ve içindeki barut miktarı hedefin uzaklığına göre ayarlanabilir.

Barut, çok hızlı yanan bir maddedir (Şekil 5.1). Yandığında ortaya çıkan gazların basıncı, ateşli silahlarda mermi için itici gücü oluşturur. Barut düşük seviyeli patlayıcılar grubuna girer. Yandığında sestten yavaş bir parlama ortaya çıkar. Bu sayede silahta barutun yanmasından oluşan basınç, mermiyi itecek kadar güç ortaya çıkarırken, namluya da zarar veremez.



Şekil 5.1 Barut.

5.2 Balistik Koruyucu Ölçüm Standardı

Balistik koruyuculuğu ölçmek amacıyla National Institute of Justice (NIJ) ve NATO çeşitli standartlar geliştirmiştir. NIJ ve Alman standartlarında, kullanılan merminin kalibresi, tipi, ağırlığı ve hızı dikkate alınarak çeşitli koruma seviyeleri tanımlanmıştır. Ayrıca bu konu ile ilgili çeşitli askeri standartlar ve Türk Standartları Enstitüsü tarafından da bir standart hazırlanmıştır. Çizelge 5.1’de uluslararası balistik koruyucu standartlardan bazıları sunulmuştur. (Temiz, 2005).

Çizelge 5.1 Bazı uluslararası balistik koruyucu standartlar

STANDART NO	STANDART ADI
MIL-STD-662 F	Balistic Test For Armor
NIJ-STD-0101.04	Balistic Resistance of Personel Body Armor (Personel Korumasında Kullanılan Malzemelerin Balistik Dayanımları.)
STANAG 2920	Balistic Test Method For Personel Armor (Personel Korumasında Kullanılan Malzemelerin Balistik Test Metotları Dokümanı.)
TS 11164	Balistik Koruyucu Yelek
PPAA STD-1989-05	Personel Protective Armor Assosiation Testing Standards For
MIL-P-46199	Balistic Resistance of Personel Body Armors Aluminium Oxide Ceramic (For Use In Armor Composite)
pR EN ISO 14876-2	Protective Clothing-Body Armor-Part-2:Bullet Resistance- Requirements and Methods

5.2.1 NIJ-STD-0101.04 ‘e göre koruma seviyeleri

Koruma seviyesi; balistik uygulamalarda kullanılan mermi mühimmatının kalibresi, tipi, ağırlığı, hızı dikkate alınarak belirlenen bir ölçüttür. Aşağıda dünyadaki balistik uygulamalarda değişik özelliklerdeki mermi mühimmatlarının oluşturduğu koruma seviyeleri açıklanmıştır.

- **Seviye I**

Seviye I zırhlar, kütlesi 2.6 g (124 grain) olan ve asgari 320 m/s (1050 ft/s) veya daha düşük hızla etki eden .22 kalibre uzun tüfek kurşun burunlu mermilere (LR LRN) ve kütlesi 6.2 g (95 grain) olan ve asgari 312 m/s (1025 ft/s) veya daha düşük hızla etki eden 380 ACP tam metal kaplama burunlu mermilere (FMJ RN) karşı korur.

- **Seviye II-A**

Seviye IIA zırhlar, kütlesi 8.0 g (124 grain) olan ve asgari 322 m/s (1090 ft/s) veya daha düşük hızla etki eden 9 mm Tam Metal Kaplama Burunlu Mermilere (FMJ RN) ve kütlesi 11.7 g (180 grain) olan ve 312 m/s (1025 ft/s) veya daha düşük hızla etki eden 40 S & W kalibre tam metal kaplama mermilere(FMJ) karşı korur.

- **Seviye II**

Seviye II zırhlar, kütlesi 8.0 g (124 grain) olan ve asgari 358 m/s (1175 ft/s) veya daha düşük hızla etki eden 9 mm tam metal kaplama burunlu mermilere (FMJ RN) ve kütlesi 10.2 g (158 grain) olan ve 427 m/s (1400 ft/s) veya daha düşük hızla etki eden 357 Magnum yumuşak nokta kaplama mermilere (JSP) karşı korur.

- **Seviye III-A**

Seviye IIIA zırhlar, kütlesi 8.0 g (124 grain) olan ve asgari 427 m/s (1400 ft/s) veya daha düşük hızla etki eden 9 mm tam metal kaplama burunlu mermilere (FMJ RN) ve kütlesi 15.6 g (240grain) olan ve 427 m/s (1400 ft/s) veya daha düşük hızla etki eden 44 Magnum kaplama çukur nokta mermilere (JHP) karşı korur.

- **Seviye III**

Seviye III zırhlar, kütlesi 9.6 g (148 grain) olan ve asgari 838 m/s (2750 ft/s) veya daha düşük hızla etki eden 7.62 mm tam metal kaplama mermilere (FMJ) (A.B.D. Askeri adı M80) karşı korur.

- **Seviye IV**

Seviye IV zırhlar, kütlesi 10.8 g (166 grain) olan ve asgari 869 m/s (2850 ft/s) veya daha düşük hızla etki eden .30 mm zırh delici (AP) mermilere (A.B.D. Askeri adı M2 AP) karşı korur. Bahsedilen tehditlere karşı en az tek vuruş koruması sağlar.

NIJ Standard-0101.04 P-BFS performance test summary

Test Variables					Performance Requirements						
Armor Type	Test Round	Test Bullet	Bullet Weight	Reference Velocity (± 30 ft/s)	Hits Per Armor Part at 0° Angle of Incidence	BFS Depth Maximum	Hits Per Armor Part at 30° Angle of Incidence	Shots Per Panel	Shots Per Sample	Shots Per Threat	Total Shots Req'd
I	1	.22 caliber LR LRN	2.6 g 40 gr.	329 m/s (1080 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	.380 ACP FMJ RN	6.2 g 95 gr.	322 m/s (1055 ft/s)	4	44mm (1.73 in)	2	6	12	24	
IIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 g 124 gr.	341 m/s (1120 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	40 S&W FMJ	11.7 g 180 gr.	322 m/s (1055 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 g 124 gr.	367 m/s (1205 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	357 Mag JSP	10.2 g 158 gr.	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
IIIA	1	9 mm FMJ RN	8.2 g 124 gr.	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	48
	2	44 Mag JHP	15.6 g 240 gr.	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	12	24	
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g 148 gr.	838 m/s (2780 ft/s)	6	44 mm (1.73 in)	0	6	12	12	12
IV	1	.30 caliber M2 AP	10.8 g 166 gr.	869 m/s (2880 ft/s)	1	44 mm (1.73 in)	0	1	2	2	2
Special	*	*	*	*	*	44 mm (1.73 in)	*	*	*	*	*

Panel = Front or back component of typical armor sample.

Sample = Full armor garment, including all component panels (F & B).

Threat = Test ammunition round by caliber.

Şekil 5.2 NIJ STD-0101.04'e göre balistik test kriterleri.

Çizelge 5.2 NIJ STD-0101.04'e göre koruma seviyelerini belirleyen mermi özellikleri

Koruma Seviyesi	Mermi Tipi	Atış Hızı	Çekirdek Ağırlığı(gr)
Seviye I (5m mesafeden)	.22 kalibre LR LRN 0.38 ACP FMJ RN	329± 10 322±10	2.6 6.2
Seviye II-A (5m mesafeden)	9mm FMJ 40 S&W FMJ	341±10 322±10	8 11.7
Seviye II (5m mesafeden)	357 Mag. JSP 9mm FMJ	436±10 367±10	10.2 8.0
Seviye III-A (5m mesafeden)	0.44 mag. JHP 9mm FMJ RN	436±10 436±10	15.6 8.2
Seviye III (15m mesafeden)	7.62 mm NATO FMJ	838± 10	9.6
Seviye IV (15m mesafeden)	.30 kalibre M2 AP	869± 10	10.8

Çizelge 5.2 ve Şekil 5.2 'de balistik test kriterleri ve koruma seviyelerini belirleyen mermi özellikleri sunulmuştur.

5.3 Balistik Koruyucu Malzemeler

Balistik koruyucu malzemeler kullanım alanına göre eldiven ve yelekte olduğu gibi vücuda rahatlıkla giyilebilecek kadar esnek yapıda olmalı veya araç, tank zırhlandırması, başlık şeklinde kullanılması için katı olmalıdır.

Balistik korunmada kullanılan malzemeleri sert (hard) ve yumuşak (soft) koruyucular olmak üzere iki sınıfta toplayabiliriz. Sert koruyucular cam, seramik ve metalden yapılan koruyuculardır. Bunlar plaka, koruyucu başlık, zırh, kalkan şeklinde kullanılırlar. Yumuşak koruyucular ise kumaş ve kumaş benzeri yapılardan oluşan polimer esaslı malzemelerdir (Temiz, 2005).

5.3.1 Sert (Hard) koruyucular

Cam, metal ve seramik yapılardan oluşan zırh şeklindeki koruyuculara sert koruyucular denir. Cam artık sert koruyucu olarak kullanımdaki önemini kaybetmiştir. Metal ve seramiklerin yanında bazı yumuşak koruyucu malzemeler de çeşitli işlemlerden geçirilerek sert koruyucu olarak kullanılmaktadırlar.

- **Cam lifleri:** Cam lifleri uzunluk ve enine yönde eşit elastik modüle sahip olan, genellikle amorf yapılardır. Lif çapı 5-20 µm arasındadır. Camın sıcaklığı, viskozitesi ve çekme hızı değiştirilerek farklı çaplarda filamentler elde edilebilir. Yüksek çekme ve darbe dayanımına sahiptirler. Sürtünerek birbirlerini aşındırırlar. Mekaniksel özellikleri sıcaklık artışıyla fazla değişmez ve yanmazlar. Kimyasal dayanımları çok iyidir. Çok güçlü alkaliler ve hidroflorik asit dışında korozyon dayanımları mükemmeldir (Turhan, 1999).

En yaygın kullanılan cam “Soda-Kireç-Silis” camıdır. Kumdan elde edilir. Bundan dolayı silika camı da denir. Ayrıca boroksit, kurşunoksit gibi diğer

oksitlerden de üretilir.

A, C, D, E, S tipi cam lifleri bulunmaktadır. Bunlardan en çok E ve S tipi kullanılmaktadır.

E camı en çok kullanılan camdır. Boyutsal kararlılığı, kimyasal maddelere ve neme karşı direnci iyidir ve ucuzdurlar.

S tipi cam çok yüksek mukavemetin gerekli olduğu yerlerde kullanılır. Yüksek termal stabiliteye sahiptirler. Alümina içeriği ve mukavemeti E camına göre fazladır. Pahalıdır.

Cam lifleri helikopter gövde ve kanatlarının yapımında, roket yapımında, kazan ve kabloların kaplanmasıda kullanılırlar.

- **Metal lifleri:** Balistik korunma amaçlı kullanılan metaller; çelik, alüminyum ve titanyum alaşımlarıdır. Metaller kolay bulunabilirlik, maliyet, esneklik ve şekillendirilebilirlik özelliklerinden dolayı zırh yapımı için her zaman önde gelen malzemeler olmuşlardır. Zırh çeliği ısıtılarak sertleştirilmekte, böylece çarpan mermiye karşı delinme direnci artmakta ve çarpan merminin kinetik enerjisini daha iyi absorbe edebilmek için zırh çeliğini toklaştırmaktadır.

MIL-A-12560 B standardı zırh olarak kullanılacak çeliğin özelliklerini anlatmaktadır. Bu standarda göre Sınıf-1 ve Sınıf-2 olmak üzere iki çeşit zırh bulunmaktadır. Sınıf-1 maksimum delinme direncini, Sınıf-2 ise maksimum şok direncini sağlayacak şekilde ısıtılarak sertleştirilir.

1950'li yıllardan itibaren çelikten daha hafif olan alüminyum alaşımlı zırhlar büyük ilgi çekmiştir. Bu tür zırhlar düşük kalibreli mermilere ve şarapnel parçalarına karşı geliştirilmiştir. Yüksek hızlı mermilere karşı balistik dirençlerinin az olması sebebiyle alüminyum alaşımlarının dış yüzeyinde yüksek sertlikli ince bir çelikte oluşturduğu kombinasyonları düşünülmüştür.

Titanyum alaşımları da çeliğe göre daha hafif olduğu için zırh alanında kullanılmaya başlanmıştır. Titanyum alaşımları çelik ve alüminyum alaşımlarından

yapılan zırhlara göre daha yüksek kütle etkinliğine sahiptirler. Birden fazla yapılan atışlara karşı balistik performansı iyidir. Yüksek dayanım/ağırlık oranına ve mükemmel korozyon direncine sahiptirler. Bu sayede zırhlı araçların bakım masrafları azalmaktadır. Fakat küçük parçaların kopmasına karşı özel bir muhafaza gerektirirler ve işleme masrafları yüksektir (Özer, 2004).

- **Seramikler:** Balistik koruyucularda sert koruyucu olarak Al_2O_3 (Alumina), SiC (Silikon Karbit) ve B_4C (Bor karbür) hammaddeli seramik plakalar kullanılmaktadır. Kullanılan seramiğin sertliği arttıkça balistik koruma performansı da artmaktadır. Seramiğin yoğunluğu ise plakanın ağırlığını belirlemektedir. Düşük yoğunluklu ve yüksek sertliğe sahip seramikler balistik koruyucu yapımında tercih edilmektedir. Fiyat ve performans yönünden en çok tercih edilen seramik Al_2O_3 tür (Özaydın, 1999).

Seramiğin performansını etkileyen bir başka etkende, seramik imalatı sırasında sinterleme yapılırken içinde kalan hava boşluklarıdır. Bu hava boşluklarının fazla olması balistik performansı olumsuz etkilemektedir (Özaydın, 1999).

Balistik koruyucu tasarlarken ağırlık ve koruyucu performans yönünden optimum seramik çeşidi ve kalınlığını seçmek gerektir. Uygun malzeme ve malzeme kalınlığı seçilmez ise, elde edilen koruyucu yapı gereğinden ağır veya pahalı olabilir.

Balistik koruyucularda seramik yerine yüksek sertlikte (60-70 RC) çelik plakalar da kullanılabilir. Ancak daha ağır olacağı için seramik kullanılması tercih edilmektedir. Çizelge 5.3 'de değişik mermi türlerine karşı seramik kompozit plakalar ile çelik plakaların ağırlık yönünden bir karşılaştırması yapılmıştır.

Çizelge 5.3 Alumina kompozit plakalar ve zırh çeliğinin farklı mermiler için ağırlıkları (Özaydın, 1999)

Mermi Tipi	Mermi Hızı (m/sn)	Alumina Komp.Ağ. (kg/m²)	Zırh Çeliği Ağ. (kg/m²)	Ağ. Kazancı (%)
7.62x51 Normal	840	38	45	20
7.62x51 Ap	830	46	104	55
7.62x39 mm	710	38	88	57
7.62x45 mm	985	33	68	49

5.3.2 Yumuşak (Soft) koruyucular:

Balistik koruyucu yapı tasarlarken en önemli unsur hafif olması ve merminin çarptığı andaki darbe enerjisini emerek dokuların en az düzeyde zarar görmesini sağlamaktır. Ayrıca kullanan kişinin hareket kabiliyetini kısıtlamayacak şekilde esnek olmaları gerekmektedir.

Hızla gelişen teknolojiye paralel olarak balistik koruyucu olarak kullanılan malzemelerin çeşitlerinde de önemli ilerlemeler kaydedilmiş ve polimer esaslı malzemelerden lif çekilmek suretiyle kumaş ve kumaş benzeri yapılar elde edilerek balistik koruyucu yapımında kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde poliamid, aramid, polietilen ve poli-p-fenilenbenzobisoksazol liflerinden elde edilirler. Bazı alanlarda cam elyafı da yumuşak koruyucu olarak kullanılmaktadır.

Polimer malzemeler çeşitli tekniklerle lif haline getirildikten sonra değişik konstrüksiyonlarda kumaşların üretilmesinde veya dokusuz yüzey elde edilmesinde kullanılırlar. Elde edilen bu yapılar kullanım alanına göre çeşitli kat sayılarında üst üste koyularak, dikim tekniği ile veya reçinelerle ve ısıtma işlemleriyle kompozit yapı haline getirilerek balistik koruyucu yapımında kullanılırlar.

Yumuşak koruyuculardan balistik koruyucu yelek ve balistik koruyucu başlıklar üretilir. Ayrıca bomba eldivenleri ve bomba battaniyeleri de yumuşak koruyucu dediğimiz bu yapılardan yapılmaktadırlar.

- **Kompozit yelek:** Askeri personel, polis, avcı, güvenlik görevlileri, çatışma bölgesindeki gazeteciler, yakın koruma görevlileri vb. personele tehdidin nereden geleceği belli olmayan ani saldırılarda balistik koruma sağlayan yeleklerdir (Şekil 5.3).

Balistik koruyucu yelekler vücudun ön arka, yan kısımları, kasık bölgesi, yaka ve boyun bölgesini koruyabilmektedir. Yeleğin ön ve arkasındaki plaka ceplerine plaka ilavesi ile tabanca, makinalı tabanca (9 mm FMJ), G3 piyade tüfeği, kaleşnikof tüfeği (7,62 mm FMJ NATO normal) mermilerine karşı maksimum koruma değeri yükseltilebilmektedir.



Şekil 5.3 Kompozit yelek.

- **Kompozit yelek zırh plakası:** Askeri personel, özel harekât timleri, polis, güvenlik görevlileri, çatışma bölgesindeki gazeteciler, yakın koruma görevlileri, avcı vb. personele tehdidin nereden geleceği belli olmayan ani saldırılarda G3 piyade tüfeği, kaleşnikof tüfeği, makineli tabanca, tabanca mermilerine karşı balistik koruma sağlayan zırh plakalarıdır (Şekil 5.5).



Şekil 5.4 Kompozit yelek zırh plakası.

- **Kompozit gizli yelek:** Gömlek ve tişört altından belli olmayacak şekilde giyilebilen yeleklerdir (Şekil 5.6).



Şekil 5.5 Kompozit gizli yelek.

- **Mayın elbisesi:** Her türlü mayın tespit edilen arama sahalarında, intikallerde, şüpheli paketlerin imha edilmesi uygulamalarında giyilebilir (Şekil 5.7).



Şekil 5.6 Mayın elbisesi.

- **Açılır kalkan çanta:** İç güvenlik harekâtları, operasyonlar, sivil ve resmi görevlendirmeler, özel koruma faaliyetleri, emekli personelin (asker, polis, kamu) güvenliği vb. durumlar esnasında bireysel savunma amaçlı, personeli ani saldırılardan koruyacak ve kalkan vazifesi görecektir (Şekil 5.8).



Şekil 5.7 Açılır kalkan çanta.

- **Bomba bidonu:** Terör örgütleri eylemlerini gerçekleştirirken hazırladıkları bombayı patlamadan fark edilmemesi ve dikkat çekmemesi amacıyla genellikle çöp tenekelerine bırakmaktadır. Bombaya dayanıklı bidon işte bu amaçla üretilmiş olup binaya ve insanlara gelebilecek parçacık, basınç (blast) etkisini minimize etmeyi amaçlar. Bomba bidonunun normal bir çöp bidonundan ayırt edilemez özellikte olması amaçlanmıştır. Şekil 5.9'da bu uygulamalar için tasarlanan bir bomba bidonu gösterilmektedir.



Şekil 5.8 Bomba bidonu.

- **Bomba battaniyesi:** Bomba battaniyesi binaya ve insanlara gelebilecek parçacık ve blast (basınç) etkisini minimize etmeyi amaçlar. Battaniyenin esnekliği sayesinde şüpheli cismin üzeri tamamen örtülerek mümkün olan maksimum koruma amaçlanır. Bomba battaniyesi bombanın etkisini mümkün olduğunca en aza indirmeye yardımcı olmaktadır (Şekil 5.10).

Bomba battaniyeleri NIJ-STD 0101.04 'e göre şarapnel korumasını sağlayacak şekilde 120x120 ve 150x150 ebatlarında üretilmektedir.



Şekil 5.9 Bomba battaniyesi.

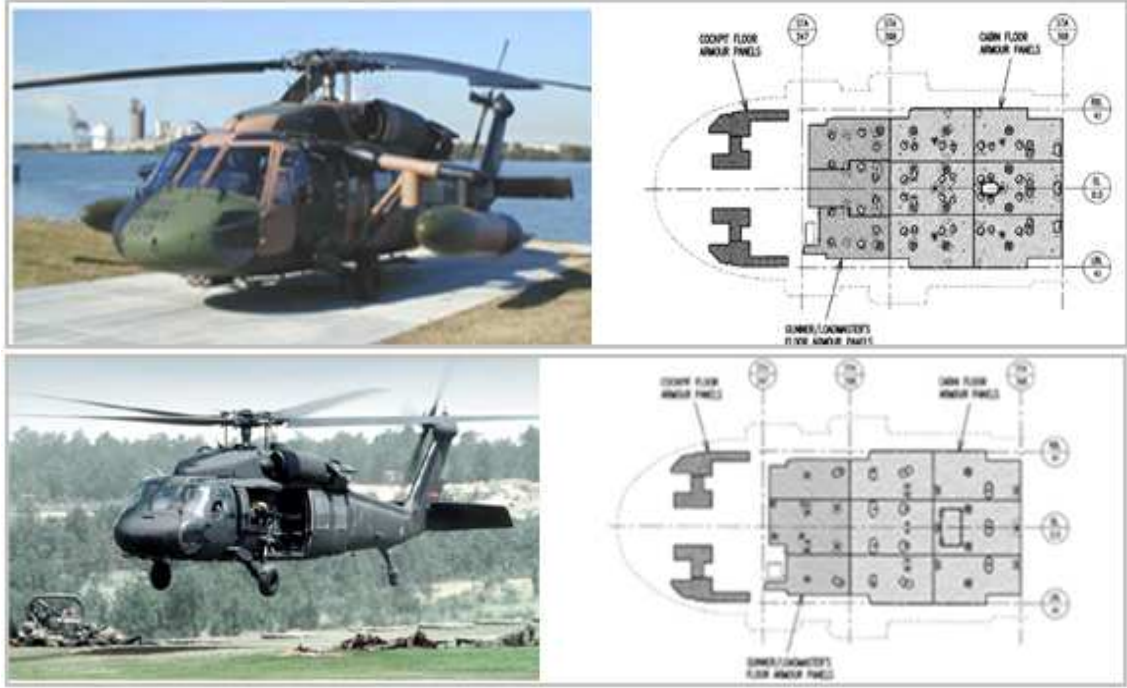
- **Balistik perde:** Tüm ofis, büro ve stratejik mekânlara (her türlü araç,kapalı mekanlar) uygulanabilir. Özel ray sistemi sayesinde yüksek mermi basıncını absorbe eder (Şekil 5.11).



Şekil 5.10 Balistik perde.

- **Helikopter taban zırhı:** Helikopterler yere yakın mesafede uçtuklarında karadan tüfeklerin atış mesafesine girer ve isabet alabilirler. Bu tehdide karşı, hafif ve etkili bir zırh ile önlem alınabilir. Skorsky S-70A-9, Black Hawk, Cougar AS-532

vb. operasyon helikopterleri için zırh kiti geliştirilebilir (Şekil 5.12). Geliştirilecek bu zırh kitinde HB₂₆ polietilen zırh kumaşı kullanılarak 7,62 mm Normal NATO mermisi ile G3 piyade tüfekleri, kaleşnikof tüfekleri, 9 mm FMJ mermi ile makineli tabanca ve tabanca mühimmatına karşı koruma sağlanabilir.



Şekil 5.11 Helikopter taban zırhı.

• **Araç zırhı:** Zırhlandırılması istenen her türlü askeri, sivil aracın yan kapılarında, tabanında ve tavanında, kasa yan çeperlerinde, yakıt deposunda ön ve arka kaput kısmında kullanılabilir. Şekil 5.13’de araç zırhlandırması ve zırhlandırılmış komple araç görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.12 Araç zırhlandırması. (a) Kapı ve damper gövdesi, (b) Komple araç.

• **Güvenlik kabinleri:** Meskun mahallerde, sınır karakollarında, sınır bölgelerinde sıfır noktalarında, ani saldırılarda ve taciz atışlarında personele piyade tüfekleri, tabanca ve makineli tabanca mermilerine karşı kapalı alan koruması sağlayacaktır (Şekil 5.14).

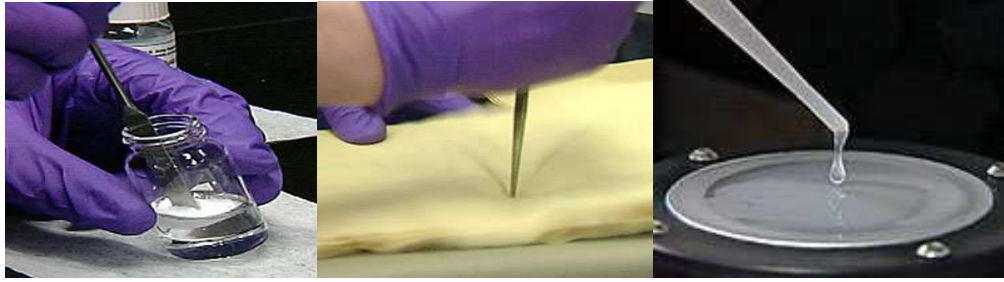


Şekil 5.13 Güvenlik kabini

Hali hazırda günümüzde nano teknoloji ışığında devam eden kompozit malzeme tasarım çalışmalarına en güzel örneklerden biri de **nano kompozit** malzemelerdir.

Nano kompozit malzemeler tasarlanırken “sıvı zırh” teknolojisi kullanılmaktadır. Polimer kompozit malzemelerin nano seviyesinde sıvı zırh ile birleştirme çalışmaları

sürdürülmektedir (Şekil 5.15). Sıvı zırh; silisyum esaslı partiküller kullanılarak “STF” adında jel kıvamında güç uyguladıkça katılaşan çözeltiler halinde hazırlanmaktadır. Jel kıvamındaki çözelti darbe alması halinde anında sertleşmekte, jel içerisindeki partiküller birbirine yaklaşarak bir çeşit bariyer oluşturmakta ve darbeyi emmektedir.



Şekil 5.14 STF-sıvı jel teknolojisi

Young S. Lee ve ark. ları (2003), silika partikülleri ihtiva eden yoğun sıvı jel akışkan çözeltisini (STF) “aramid-kevlar” dokuma kumaşına emdirerek oluşan yeni kompozit malzemenin balistik dayanım performansını değerlendirmişlerdir. Kompozit materyal etkinliği göz önüne alındığında 244 m/sn’de mühimmat etkisine karşı balistik dayanımda olumlu performans göstermiştir. Sonuçlar, kumaş malzemesinin esnekliğinden hiçbir şey kaybetmeksizin, STF-jel ‘in emdirilmesi ile balistik direnç etkisinde önemli bir artma olduğunu göstermektedir.

Ancak bilim dünyasında devam eden çalışmalarda belli bir zaman dilimi geçtikten sonra STF-jel süspansiyon çözeltisinde çökme, ayrışma gözleendiği ve yapının aynı etkiyi göstermediği görülmüştür.

STF-jel ‘in emdirilmesinden belli bir zaman sonra polimer kompozitlerin raf ömrü özelliklerinin nasıl değişeceği, aynı özellikleri gösterip gösteremeyeceği balistik ömür testleriyle gözlenebilecektir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar esnasında;

- Du-Pont firması ürünü Kevlar₄₉ aramid dokuma kompozit kumaş,
- Dyneema firması ürünü olan ultra yüksek moleküler ağırlıklı Polietilen (UHMW-PE) HB26 zırh kumaşı,
- Şişe Cam firması ürünü cam elyaf (E cam),

malzemeleri ile oluşturulan plaka ve kumaş numuneleri kullanılmıştır. Çizelge 6.1’de bu malzemelerin mekanik özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 6.1 Kevlar₄₉ aramid dokuma kompozit kumaş, UHMW-PE Polietilen_{HB26}, Cam elyaf (E cam) kumaş malzemelerinin mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk(g/cm ³)	Ağırlık (g/m ²)	Çekme Mukavemeti σ (Gpa)	Elastisite Modülü E (Gpa)	Uzama (%)	Yanma Sıcaklığı (°C)	Ses Hızı V_s (1000 m/s)
Kevlar ₄₉	1,44	210	2,9	120	1.9	500	8.2
Polietilen _{HB26}	0,97	260	3.0	95	3.6	145	10
Cam Elyaf (E cam)	2,55	300	0.167	72.4	1.9	-	-

6.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

6.1.1 Cam Elyaf (E cam)

Yapılan deneysel çalışmalarda 3’üncü ve 4’üncü bölüm 3.1.3 ve 4.2.2.1 maddelerinde belirtilen cam elyaf türlerinden E (Elektrik) camı kullanılmıştır(Şekil

6.1). Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mekanik özellikleri Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Suya karşı direnci de oldukça iyidir.



Şekil 6.1 Cam elyaf.

6.1.2 Kevlar₄₉ Aramid Kumaş

Deneyisel çalışmalarda Du Pont firmasının para-aramid fiberler ailesi içerisinde tescilli bir markası olan Kevlar₄₉ (PRD-49) tip aramid kumaş kullanılmıştır. Kumaşın kullanım alanları ve mekanik özellikleri 3. ve 4. bölüm, 3.1.1 ve 4.2.2.3 maddelerinde belirtilmiştir.

6.1.3 Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMW-PE) Polietilen_{HB26} Zırh Kumaşı

Balistik uygulamalarda genellikle HB (hard ballistic) serisi Dyneema polietilen lifleri kullanılmaktadır. Kumaşın mekanik özellikleri ve teknik özellikleri 3. ve 4. bölüm 3.1.2 ve 4.2.2.7 maddelerinde belirtilmiştir.

6.1.4 Balistik Kompozit Test Numuneleri

a) E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine kompozit plaka numunesi

[(E cam elyaf+cam keçe)₆₀] polyester reçine

Plaka numunesi elle yatırma tekniği ile elde edilmiştir[bölüm 4.4.1 Elle Yatırma (hand lay-up)]. Numunenin kalıbı hazırlanır. Elyaf yatırılmadan önce kalıp

temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra cam elyaf kumaş katları kalıp üzerine elle yatırılır. Bu işlem sırasında cam keçe malzemesi çok iyi bağlayıcı eleman özelliği gösterir. Polyester sıvı reçine elyaf katmanlarına emdirilir. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. En son olarak, numune dış yüzeyi polyester reçine ile kaplanır ve normal oda şartlarında kurumaya bırakılır. Elde edilen plaka Şekil 6.2’de görülmektedir.



Şekil 6.2 Polyester reçine kaplı E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine kompozit plaka numunesi.

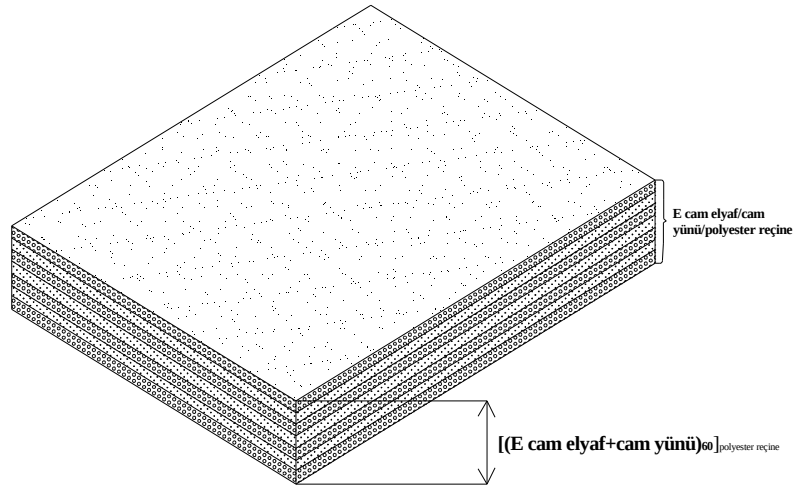
Polyester malzemesi yapısı gereği düşük viskoziteye ($\nu = 400 \pm 60$ cps) ve yüksek kopma gerilmesine sahiptir. Cam elyaflar çok kolay ıslanma ve işlenebilme özelliği sayesinde polyester reçinelerle uyumludur.

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan matris malzeme tiplerinden en çok kullanılanı polyester reçinelerdir. Çizelge 6.2’de mekanik özellikleri belirtilmiştir.

Çizelge 6.2 Numunede kullanılan polyester reçine mekanik özellikleri

Polyester Reçine (Neoxil RP 325)	
Çekme Dayanımı (MPa)	45-48
Elastik Modülü (GPa)	3-3.8
Uzama (%)	1,4
Özgül ağırlık (g/cm^3)	1.09-1.12
Sertlik (Barcol)	45

Polyester reçine kaplı E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine kompozit plaka numunesi 60 kat cam elyaf/cam keçe/polyester reçine kullanılarak, 23 mm kalınlığında, 5000 g ağırlığında, 35x35 cm ebadında üretilmiştir (Şekil 6.3). Kompozit numune üretiminde fiber elemanı olarak elyaf/cam , matris elemanı olarak polyester reçine kullanılmıştır.



Şekil 6.3 Polyester reçine kaplı E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine kompozit plaka numunesi.

$[(E \text{ cam elyaf} + \text{cam keçe})_{60}]$ polyester reçine kompozit hibrit numune plakasında fiber/matris hacimsel oranı;

m_f (gr): yapının fiber kütlesi	d_f (gr/cm ³): yapının fiber yoğunluğu
m_m (gr): yapının matris kütlesi	d_m (gr/cm ³): yapının matris yoğunluğu
v_f (cm ³): yapının fiber hacmi	v_m (cm ³): yapının matris hacmi

$$d_{f,m} = \frac{m_{f,m}}{v_{f,m}} \quad (6.1)$$

$m_f : 300 \text{ g/m}^2 \times 0,1225 \text{ m}^2 \times 60 \text{ adet} + 225 \text{ g/m}^2 \times 0,1225 \text{ m}^2 \times 60 \text{ adet}$
 $m_f : 3858,75 \text{ gr}$
 $m_{\text{toplam}} : 5000 \text{ gr}$
 $m_m : 1141,25 \text{ gr}$

$d_f : 2,55 \text{ gr/cm}^3$ (Çizelge 4.1)

$d_m : 1,11 \text{ gr/cm}^3$ (Çizelge 6.2)

$$v_f = \frac{m_f}{d_f} = \frac{3858,75}{2,55} = 1513,23 \text{ cm}^3$$

$$v_m = \frac{m_m}{d_m} = \frac{1141,25}{1,11} = 1028,15 \text{ cm}^3$$

$$\frac{v_f}{v_m} = \frac{1513,23}{1028,15} = 1,471 \quad \text{şeklinde hesaplanır.}$$

b) Polyester reçine kaplı E cam elyaf/Cam /Kevlar₄₉ hibrit kompozit numunesi

$[(\text{Kevlar}_{49})_{20} + [(\text{E cam elyaf} + \text{Cam keçe})_{10}]^{\text{polyester reçine}} + (\text{Kevlar}_{49})_{10} + [(\text{E cam elyaf} + \text{Cam keçe})_{10}]^{\text{polyester reçine}}]_{50}$

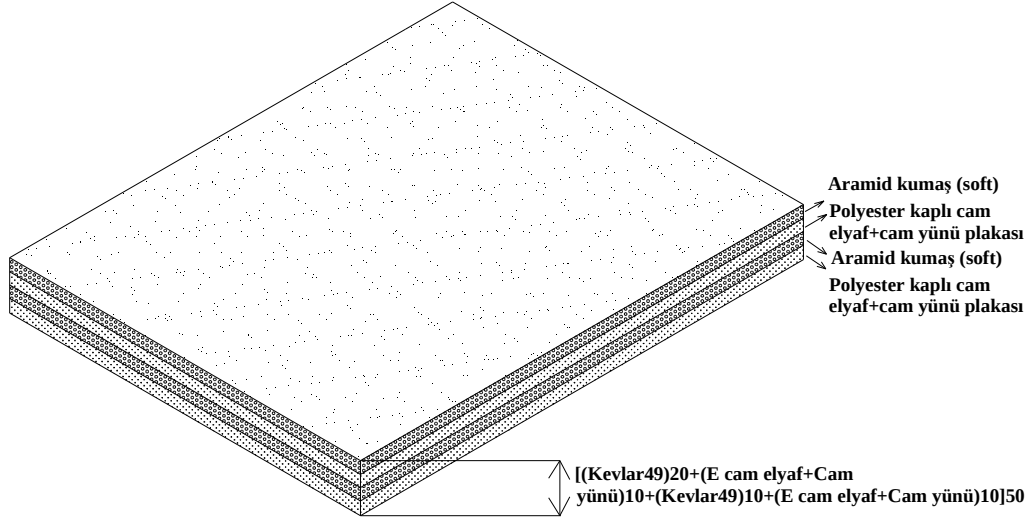
Kompozit numunesinin 2'nci ve 4'üncü katmanları $[(\text{E cam elyaf} + \text{Cam keçe})_{10}]^{\text{polyester reçine}}$ plakaları elle yaturma tekniği ile plaka haline getirilmiştir. 1'inci ve 3'üncü katmanlar Kevlar₄₉ aramid kumaşlardan oluşmakta olup belirtilen katlarda bir araya getirilerek dikiş ipliği ile dikilmişlerdir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Polyester reçine kaplı E cam elyaf/Cam keçe /Kevlar₄₉ hibrit kompozit numunesi.

En son aşama olarak hazırlanan katmanlar belirtilen sırada bir araya getirilmiştir. (Şekil 6.5). Değişik katmanlarda (20 kat Aramid kumaş(soft)+10 kat Polyester reçine

kaplı cam elyaf ve cam keçe plakası + 10 kat Aramid kumaş(soft) + 10 kat Polyester reçine kaplı cam elyaf ve cam keçe plakası) hazırlanmış; Toplamda 16 mm kalınlığında, 1970 g ağırlığında, 30x30 cm ebadında üretilmiştir. İkinci ve üçüncü katmanın üretiminde fiber elemanı olarak elyaf+cam keçe, matris elemanı olarak polyester reçine kullanılmıştır.



Şekil 6.5 Polyester reçine kaplı E cam elyaf/Cam keçe /Kevlar₄₉ hibrit kompozit numunesi.

$[(E \text{ cam elyaf} + \text{Cam keçe})_{10}]^{\text{polyester reçine}}$ numune plakasında Fiber/Matris hacimsel oranı;

m_f (gr): yapının fiber kütlesi d_f (gr/cm³): yapının fiber yoğunluğu
 m_m (gr): yapının matris kütlesi d_m (gr/cm³): yapının matris yoğunluğu
 v_f (cm³): yapının fiber hacmi v_m (cm³): yapının matris hacmi

$$d_{f,m} = \frac{m_{f,m}}{v_{f,m}} \quad (6.1)$$

$$m_f : 300 \text{ g/m}^2 \times 0,09 \text{ m}^2 \times 10 \text{ adet} + 225 \text{ g/m}^2 \times 0,09 \text{ m}^2 \times 10 \text{ adet}$$

$$m_f : 472,5 \text{ gr}$$

$$m_{\text{toplam}} : 820 \text{ gr}$$

$$m_m : 347,5 \text{ gr}$$

$$d_f : 2,55 \text{ gr/cm}^3$$

(Çizelge 4.1)

$$d_m : 1,11 \text{ gr/cm}^3$$

(Çizelge 6.2)

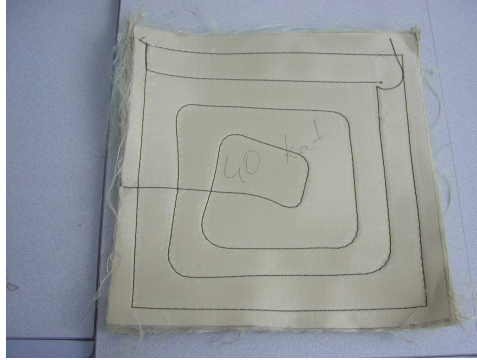
$$v_f = \frac{m_f}{d_f} = \frac{472,5}{2,55} = 185,29 \text{ cm}^3$$

$$v_m = \frac{m_m}{d_m} = \frac{347,5}{1,11} = 313,06 \text{ cm}^3$$

$$\frac{v_f}{v_m} = \frac{185,29}{313,06} = 0,591 \quad \text{şeklinde hesaplanır.}$$

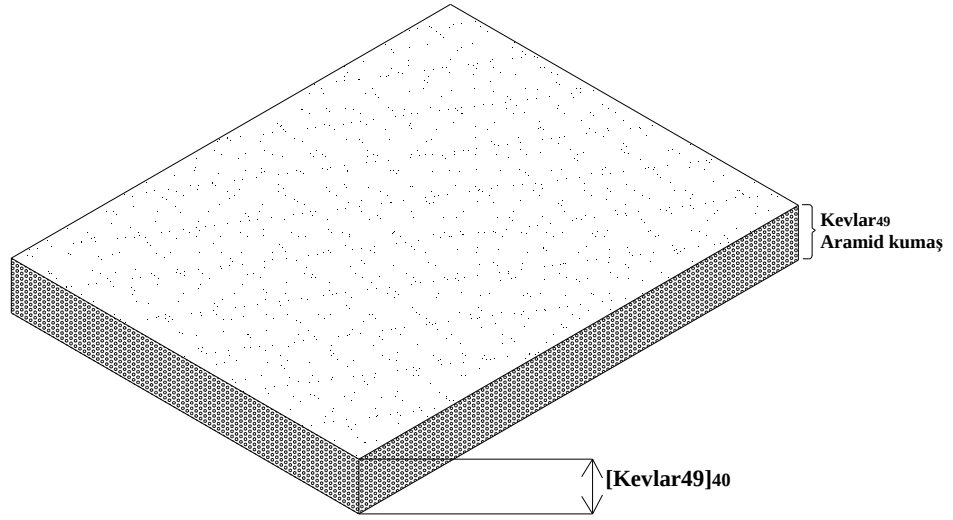
c) Kevlar₄₉ aramid kumaş numunesi [Kevlar₄₉]₄₀

Kevlar₄₉ aramid kumaşlar belirtilen katlarda [(Kevlar₄₉)₄₀] bir araya getirilerek dikiş ipliği ile dikilmişlerdir(Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Kevlar₄₉ aramid kumaş numunesi [Kevlar₄₉]₄₀.

40 kat Kevlar₄₉ aramid kumaş kullanılarak [Kevlar₄₉]₄₀ toplamda 6 mm kalınlığında, 745 g ağırlığında, 30x30 cm ebadında üretilmiştir(Şekil 6.7).

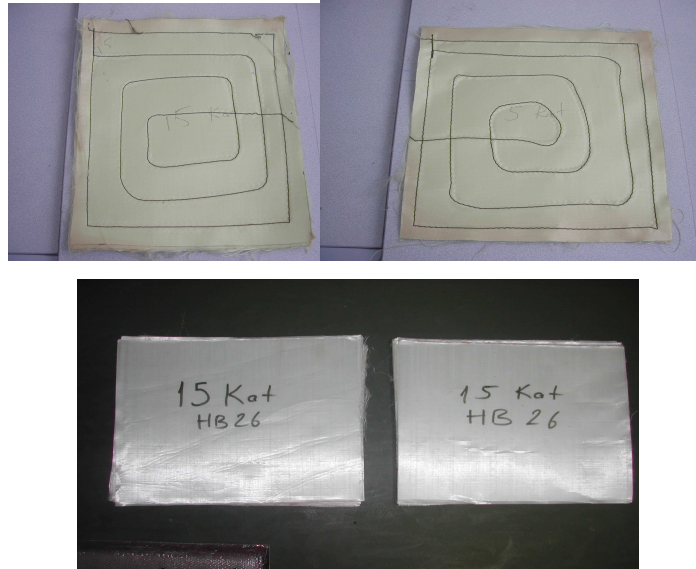


Şekil 6.7 Kevlar₄₉ aramid kumaş numunesi.

d) Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi

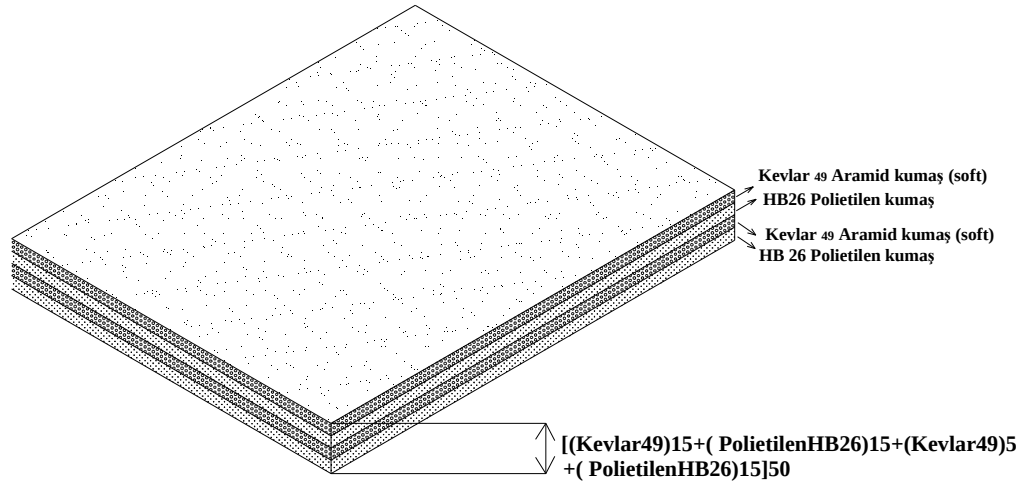
$[(\text{Kevlar}_{49})_{15} + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15} + (\text{Kevlar}_{49})_5 + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15}]_{50}$

Kevlar₄₉ aramid kumaşlar belirtilen katlarda $[(\text{Kevlar}_{49})_{15}]$, $[(\text{Kevlar}_{49})_5]$ bir araya getirilerek dikiş ipliği ile dikilmişlerdir. Polietilen HB26 kumaşlar ise belirtilen katlarda $[(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15}]$ ve sırada $[(\text{Kevlar}_{49})_{15} + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15} + (\text{Kevlar}_{49})_5 + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15}]_{50}$ üst üste konmak suretiyle bir araya getirilmiştir (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) kumaş numuneleri.

Değişik katmanlarda belirtilen sırada (15 kat Kevlar₄₉ aramid kumaş + 15 kat HB26 Polietilen kumaş+ 5 kat Kevlar₄₉ aramid kumaş + 15 kat HB26 Polietilen kumaş) hazırlanan hibrit kompozit numune; Toplamda 14 mm kalınlığında, 950 g ağırlığında, 30x30 cm ebadında üretilmiştir(Şekil 6.9).

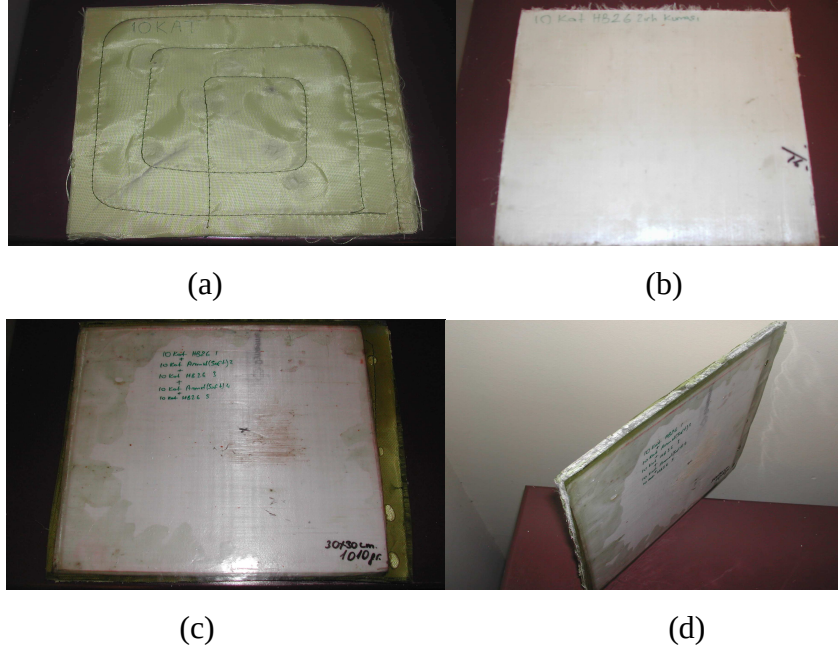


Şekil 6.9 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi.

e) Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi

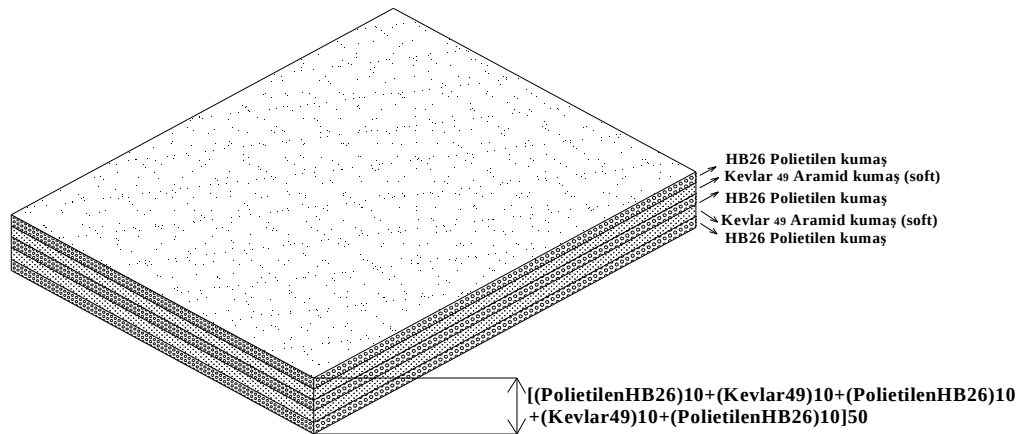
[[(Polietilen_{HB26})₁₀ + (Kevlar₄₉)₁₀ + (Polietilen_{HB26})₁₀ + (Kevlar₄₉)₁₀ + (Polietilen_{HB26})₁₀]₅₀]^{polyester reçine}

Kevlar₄₉ aramid kumaşlar belirtilen katlarda [(Kevlar₄₉)₁₀] bir araya getirilerek dikiş ipliği ile dikilmişlerdir. Polietilen HB26 kumaşlar ise belirtilen katlarda [Polietilen_{HB26})₁₀] kalıplanarak 200 bar basınç altında 120-130 °C’de, 30 dakika süreyle preslenmiş ve plaka haline getirilmiştir(Şekil 6.10). Belirli bir sırada [[(Polietilen_{HB26})₁₀ + (Kevlar₄₉)₁₀ + (Polietilen_{HB26})₁₀ + (Kevlar₄₉)₁₀ + (Polietilen_{HB26})₁₀]₅₀]^{polyester reçine} bir araya getirilen katmanlar polyester reçine kaplanarak plaka halini almıştır.



Şekil 6.10 (a) 2'nci ve 4'üncü katman[(Kevlar₄₉)₁₀] (b) 1'inci, 3'üncü, 5'inci katmanlar[(Polietilen_{HB26})₁₀] (c),(d) Preslenmiş Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26}(UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi.

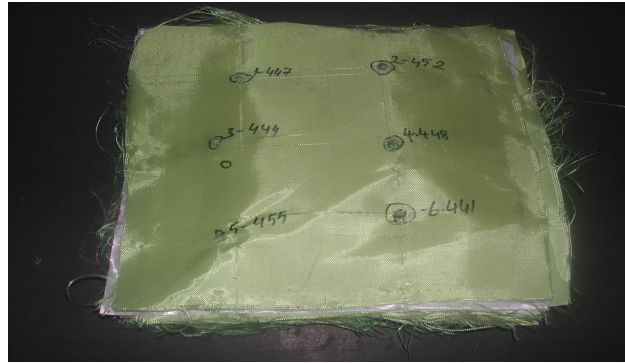
Hibrit kompozit numune, değişik katmanlarda belirtilen sırada (10 kat HB26 Polietilen kumaş + 10 kat Aramid Kumaş(soft) + 10 kat HB26 Polietilen kumaş + 10 kat Aramid kumaş(soft) + 10 kat HB26 Polietilen kumaş) bir araya getirilmiştir. Toplamda 13 mm kalınlığında olan numune, 1010 g ağırlığında, 30x30 cm ebadında üretilmiştir (Şekil 6.11).



Şekil 6.11 Polyester reçine kaplı Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} UHMW-PE hibrit kompozit numunesi.

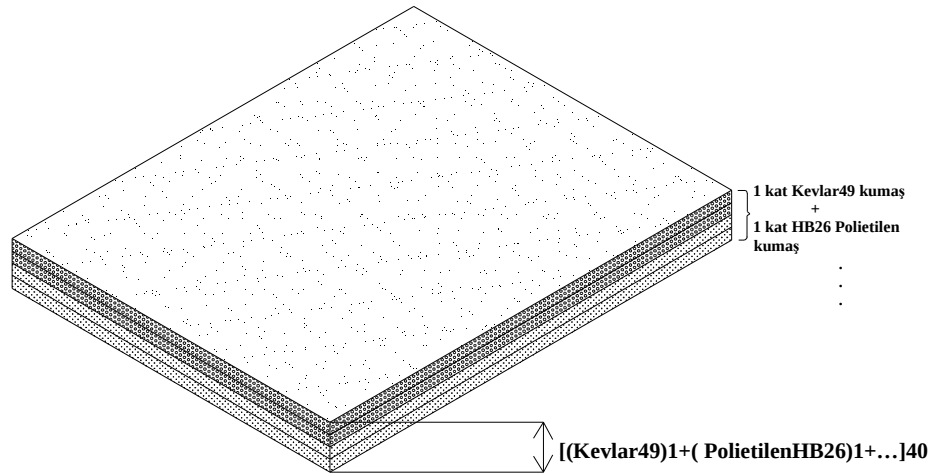
f) Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi
[(Kevlar₄₉)₁+(Polietilen_{HB26})₁+...]₄₀

Hibrit kompozit malzeme, 1 kat Kevlar₄₉ kumaş, 1 kat Polietilen_{HB26} kumaş olacak şekilde (20 kat Kevlar₄₉ kumaş + 20 kat Polietilen_{HB26} kumaş) üst üste konularak bir araya getirilmiştir (Şekil 6.12).



Şekil 6.12 Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} UHMW-PE hibrit kompozit numunesi.

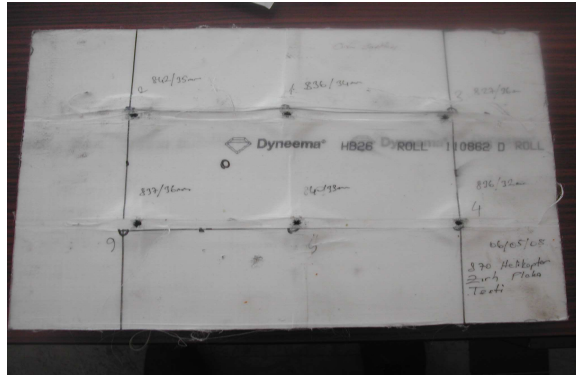
Hazırlanan hibrit kompozit malzeme; Toplamda 11,5 mm kalınlığında, 835 g ağırlığında, 30x30 cm ebadında üretilmiştir (Şekil 6.13).



Şekil 6.13 Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} UHMW-PE hibrit kompozit numunesi.

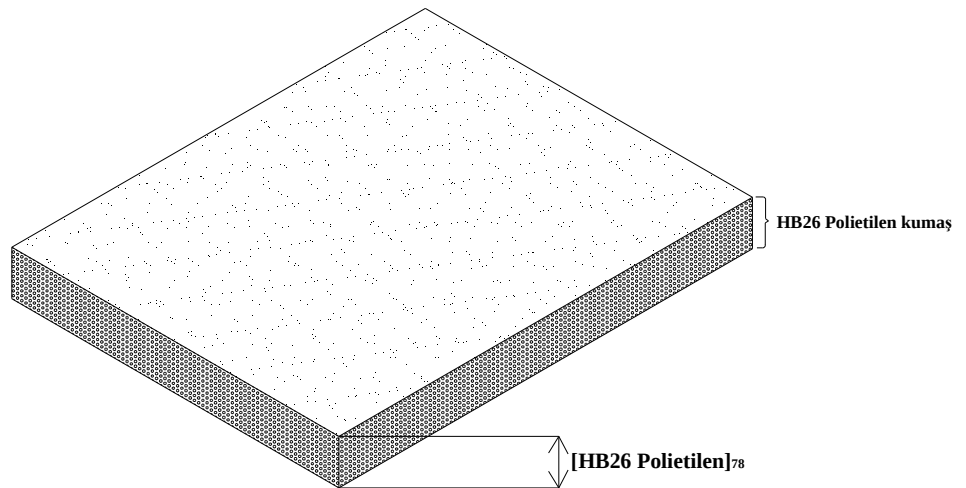
[Polietilen_{HB26}]₇₈

numunesi haline getirilmiştir (Şekil 6.14).



Şekil 6.14 Preslenmiş Polietilen_{HB26} UHMW-PE kompozit plaka numunesi.

ebadında üretilmiştir(Şekil 6.15).



Şekil 6.15 Preslenmiş Polietilen_{HB26} UHMW-PE kompozit plaka numunesi.

6.1.5 Mekanik ve Balistik Testler

6.1.5.1 Mekanik özelliklerin ölçülmesi

Fiziki testler ile dayanıklılığı ölçülecek olan numunelerde kullanılan kumaşların kopma ve çekme mukavemeti, kopma uzaması ve elastisite modülü tespit edilerek kullanılan malzemenin dayanım sınırları tespit edilir.

Testler için gerekli ortam şartları sağlandıktan ve bu şartların ölçümleri yapıldıktan sonra testler gerçekleştirilmektedir. Testler normal oda şartlarında 24 saat bekletilen numunelere %55 nem oranında uygulanmıştır.

a) Çekme deneyi

Kevlar₄₉ kumaş fiberi, Kevlar₄₉ ve Polietilen_{HB26(UHMW-PE)} kumaşlar üzerine mekanik özelliklerinin tespitine yönelik olarak çekme deneyi yapılmıştır. Ayrıca [E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine]₆₀ plaka kesitinin de mekanik özellikleri belirlenmiştir. Tespit edilen bu özelliklere sahip dokuma kumaşlardan üretilen numuneler üzerinde balistik dayanım ölçülecektir. Şekil 6.16 'de çekme deneyi test düzenekleri görülmektedir.

Testler **TS 138 EN 10002-1** Türk standardına göre normal oda şartlarında 24 saat bekletilmiş deney numunelerine yapılmıştır. 1983 imali 83ÇD01 kodlu “**Alşa laboratuvar aletleri**” firmasının ürünü olan çekme cihazının çekme kapasitesi maksimum 20 tondur. Bu cihazda [E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine]₆₀ plaka kesiti teste tabi tutulmuştur[Şekil 6.16 (b)]. Kevlar₄₉ kumaş fiberi, Kevlar₄₉ ve Polietilen_{HB26(UHMW-PE)} kumaşlar üzerine uygulanan testler ise **TIRA Test System** programı kullanılarak **TIRA 2710** çekme deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler fizik-kimya laboratuvar test analiz odalarında gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.16 Çekme deneyi test düzenekleri. (a) Kumaş, fiber çekme düzeneği (b) Çekme deney cihazı.

- Kevlar₄₉ fiber çekme deneyi

Bu deneyde Kevlar₄₉ kumaşından bir demet aramid fiberi ayrılarak çıkartılmıştır. Daha sonra bu fiber çekme cihazına bağlanarak çekme deneyine tabi tutulmuştur (Özek, 2004). Şekil 6.17 'de Kevlar₄₉ aramid fiber çekme anı görülmektedir.

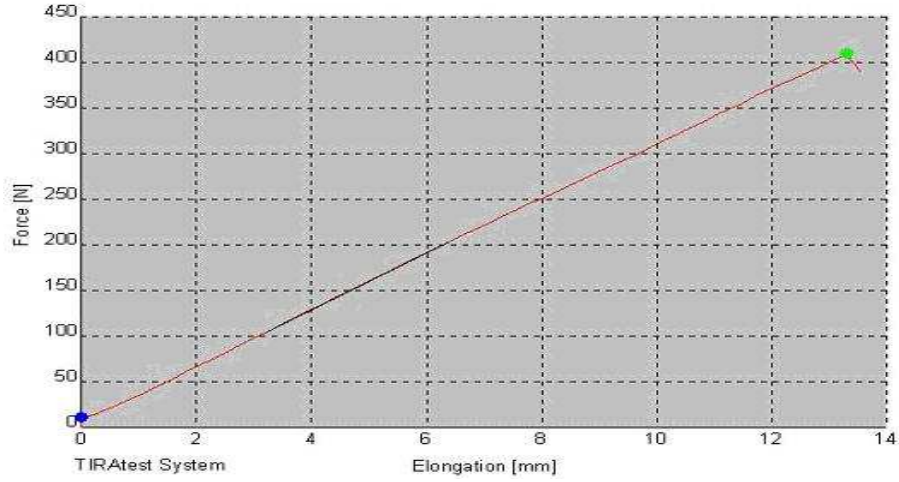


Şekil 6.17 Kevlar₄₉ aramid fiber çekme anı.

Deneyde elde edilen sonuçlar Çizelge 6.3'de, deneyde elde edilen grafik Şekil 6.18'de sunulmuştur.

Çizelge 6.3 Kevlar₄₉ aramid fiber çekme deneyi sonuçları

Kesit Alan (mm ²)	Lo (mm)	ΔL (mm)	Çekme Kuv. (N)	Çekme Muk. (σ)	Kopma Uzaması (%)	E Modülü N/(mm ²)
0,135	360	13,4	426,66	3160,44	3,72	84958,06



Şekil 6.18 Kevlar₄₉ aramid fiberinin çekme grafiği.

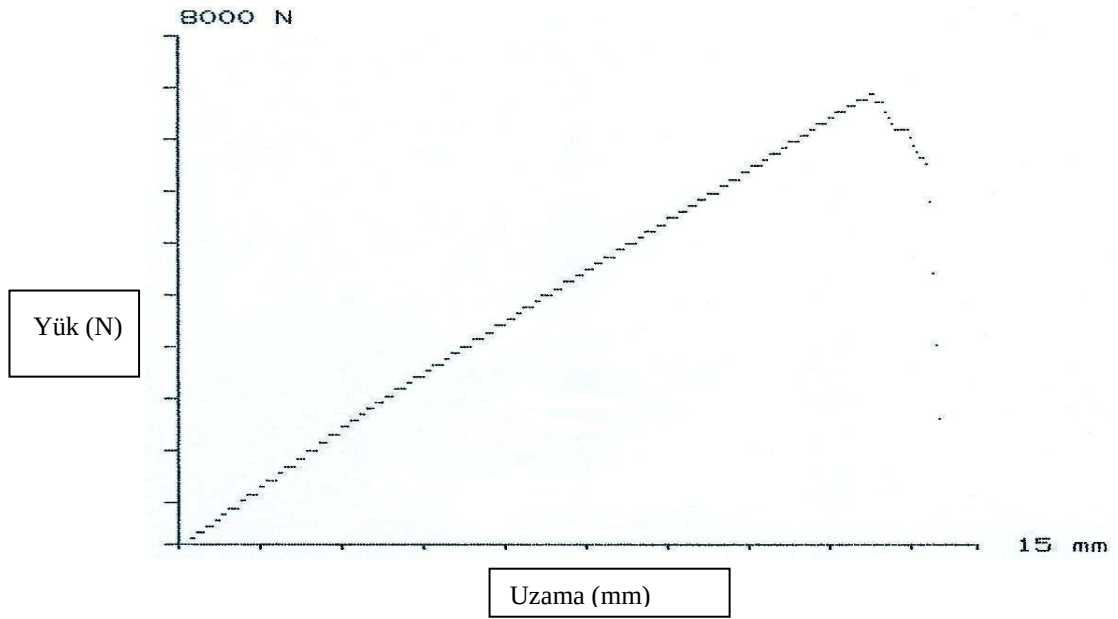
- Kevlar₄₉ ve Polietilen_{HB26(UHMW-PE)} kumaşların çekme deneyi

Bu deneyde Kevlar₄₉ kumaş ve Polietilen_{HB26 UHMW PE} kumaş çekme deneyine tabi tutulmuştur. İlk olarak Kevlar₄₉ kumaş çekme cihazına takılarak çekme testi yapılmıştır. Daha sonra Polietilen_{HB26 UHMW PE} kumaş çekme cihazına sabitlenerek çekme testi yapılmıştır.

Deney sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5’de deneyde elde edilen grafikler ise Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’de sunulmuştur. Polietilen kumaşın elastisite modülü aramid kumaşa göre daha yüksek olmasına karşılık, çekme mukavemeti aramid kumaştan daha düşüktür.

Çizelge 6.4 Kevlar₄₉ aramid kumaşın çekme deneyi sonuçları

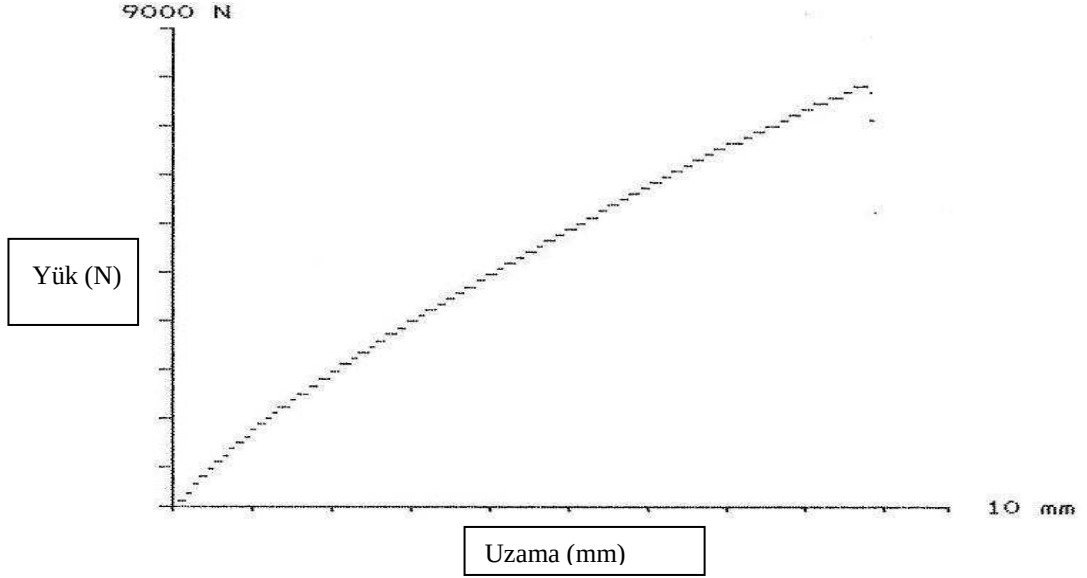
Kesit Alan (mm ²)	Lo (mm)	ΔL (mm)	Çekme Kuv. (N)	Çekme Muk. (σ)	Kopma Uzaması (%)	E Modülü (N/mm ²)
2,025	280	13,05	7037	3475,06	4,66	74572,10



Şekil 6.19 Kevlar₄₉ aramid kumaşın çekme grafiği.

Çizelge 6.5 Polietilen_{HB26} UHMW PE kumaş çekme deneyi sonuçları

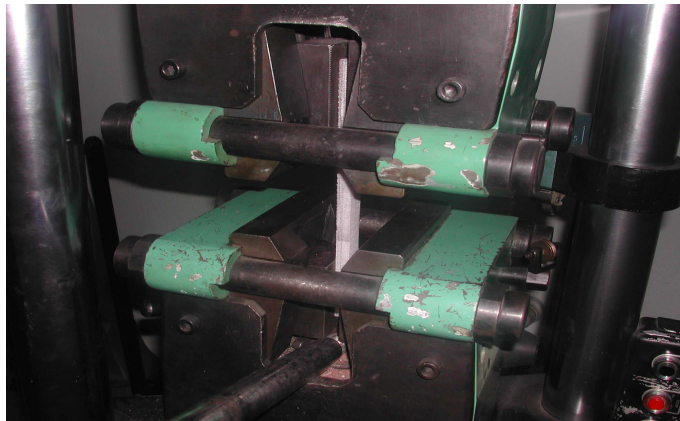
Kesit Alan (mm ²)	Lo (mm)	ΔL (mm)	Çekme Kuv. (N)	Çekme Muk. (σ)	Kopma Uzaması (%)	E Modülü N/(mm ²)
2,62	280	8,73	8315	3173,66	3,117	101817,77



Şekil 6.20 Polietilen_{HB26 UHMW PE} kumaşın çekme grafiği.

- [E cam elyaf/cam /polyester reçine]₆₀ plakası çekme deneyi

Bu deneyde [E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine]₆₀ plaka kesit numunesi çekme cihazına bağlanarak çekme deneyine tabi tutulmuştur. Şekil 6.21’de 83ÇD01 kodlu “**Alşa laboratuvar aletleri**” firmasının çekme cihazına sabitlenen [E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine]₆₀ plakası çekme anı görülmektedir.



Şekil 6.21 Cam elyaf plakası çekme anı.

Deneyde elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6 ’da sunulmuştur.

Çizelge 6.6 [E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine]₆₀ plakası çekme deneyi sonuçları

Kesit Alan (mm ²)	Lo (mm)	ΔL (mm)	Çekme Kuv. (N)	Çekme Muk. (σ)	Kopma Uzaması (%)	E Modülü (N/mm ²)
253	50	13,4	4308	167,008	1,9	66273,74

6.1.5.2 Balistik dayanımın ölçülmesi

İnsan vücudunu silah ateşine karşı koruyacak vücut zırhlarının balistik dayanıklılığı için, minimum performans gereklilikleri ve test metotları oluşturulmaktadır.

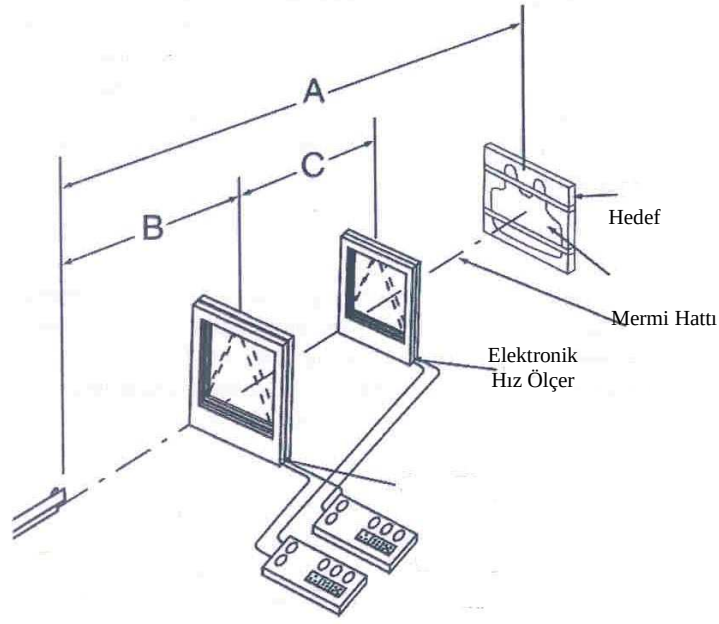
Koruyucu bir yapının balistik dayanıklılığını belirlemede vuruş sonrası yapıda oluşan bozulmanın büyüklüğü ve yapının mermideki enerjiyi absorbe etme miktarı olmak üzere iki parametre göz önüne alınır. İlk parametre merminin yapıyı delmediği (macun testi), ikincisi ise delmenin gerçekleştiği durumlarda belirlenir. Macun testinde koruyucu vuruş hızı ve düzlem dışı(enine) deformasyonun büyüklüğü birbiriyle ilişki kurularak balistik açıdan değerlendirilir. Diğerinde ise mermideki enerji kaybı ya da koruyucunun merminin enerjisini absorbe edebilme oranı tespit edilerek bir değerlendirme yapılır. Bu testlerin gerçekleştirilmesi için birçok teknik geliştirilmiştir (Temiz, 2005).

6.1.5.2.1 Balistik test düzeneği

Hafif silahlara karşı kullanılan zırhlar için balistik performansın ölçümünde iki ana tehdit göz önünde tutulmaktadır. Bunlardan birincisi parça tesirine karşı koruma diğeri ise mermi tesirine karşı korumadır.

Mermiye karşı korumada NIJ (National Institute of Justice) değerleri referans olarak alınmıştır. Bu kapsamda zırh arkasına yerleştirilen ve insan tenini simule eden bir dolgu maddesi üzerinde balistik test esnasında meydana gelen çöküntü miktarı değeri balistik dayanım kriterinin ölçütü olarak kabul edilmektedir.

Deneyler, Amerikan NIJ-STD 0101.04 uluslararası standardına göre dokuma aramid (Kevlar₄₉) kumaş, polietilen_{HB26} UHMW-PE kumaş ve polyester reçine matrisi ile cam elyaf kumaşlardan elde edilen çeşitli katlarda ve kalınlıkta bir araya getirilen plaka ve kumaş numunelerine yapılan balistik testleri ve bu test sonuçlarının değerlendirilmesini içermektedir.



Şekil 6.22 Amerikan NIJ-STD 0101.04 uluslararası standardına göre kullanılan test düzeneği.

Mermi testinde kullanılan test düzeneği Şekil 6.22 'de gösterilmiştir. Test düzeneğinde Oehler Research Model ORM 55 model hızölçer kullanılmıştır. Aralarında 1 m mesafe bulunan iki elektrik perde arasından geçiş süresi ölçülerek merminin hızları tespit edilmiştir. Testler esnasındaki sabit namlular kullanılarak mermilerin zırha dik olarak isabet etmesi sağlanmıştır.

a) Şartlandırma

Balistik performansı ölçme amacıyla deney numunelerine şartlandırma testi yapılacaktır. Adı geçen şartlandırma testi ile deney numuneleri;

- %50 (yüzde elli) nem ve 23 ± 2 °C 'de (normal oda şartlarında) 24 saat bekletilip, numunelere 10-30 dakika içerisinde atışlar gerçekleştirilmiştir.

b) Macun şartlandırma

Balistik performans testi sırasında kullanılacak olan macunun şartlandırılması, balistik performans testi sonrası oluşacak deformasyonun ölçümleri için gereklidir.



Şekil 6.23 Şartlandırma dolapları.



Şekil 6.24 Şartlandırılmış macun hazırlama.

Balistik test öncesinde cam macunu veya eş değer malzeme en az 3 saat süre ile 15°C ile 30°C arasında Şekil 6.23'deki şartlandırma dolaplarında tutularak şartlandırılacak ve içindeki boşluklar tamamen ortadan kaldırılacak şekilde sıkıştırılacaktır. Malzemenin balistik test için hazır olduğunu belirleyebilmek amacıyla bir ucu yarım küre şeklinde olmak üzere $44,5 \pm 0,5$ mm çapında ve 1000 ± 10 gr ağırlığında silindirik bir çelik parça hazırlanacaktır. Bu parça, Şekil 6.24'de gösterildiği gibi yarım küre şeklindeki darbe ucu yere doğru gelecek şekilde 200 ± 2

cm yükseklikten dik olarak bırakıldığında, cam macunu veya benzeri malzemenin yüzeyi üzerinde meydana gelen çöküntü 25 ± 3 mm olacaktır. Silindirik çelik parçanın malzeme yüzeyine tam dik olarak düşmesini sağlamak maksadıyla bir kılavuz boru veya başka bir vasıta kullanılabilecektir. Bu şekilde üç düşürme testi yapılacaktır. Söz konusu malzeme bu maddede açıklanan esnekliği muhafaza edecek herhangi bir sıcaklık derecesinde tutulabilmektedir. Bu özelliklerdeki cam macunu veya benzeri malzemeden kalınlığı en az 10 cm olacak şekilde konulacak yeri tam olarak kaplayacaktır.

6.1.5.2.2 Balistik test uygulaması ve tartışma

Atış yapılan numuneler macunun ön tarafına gelecek şekilde sabitlenmiştir. Atışlar 5 m ve 15 m mesafeden plakaların ön yüzüne kenar noktalarından en az 50 mm uzakta ve plaka üzerinde yer alan daha önceki bir vuruş noktasından veya bir delikten en az 80 mm uzakta olacak şekilde yapılmıştır. Plakalara mermilerin barut imla hakları ayarlanarak değişik hızlarda atışlar yapılmıştır. Atışlar plaka yüzeyine 90 ± 1 derece ile gerçekleştirilmiştir. Bu atışlar neticesinde değişik hızlarda malzemelerde meydana gelen deformasyona bağlı olarak oluşan çöküntü miktarları ölçülmüştür.



Şekil 6.25 Macunda deformasyon oluşumu.

NIJ Standard-0101.04'e göre mermiye karşı korumada balistik dayanım kriterinin ölçütü atış yapılan numune arkasına yerleştirilen ve insanı simule eden macunun

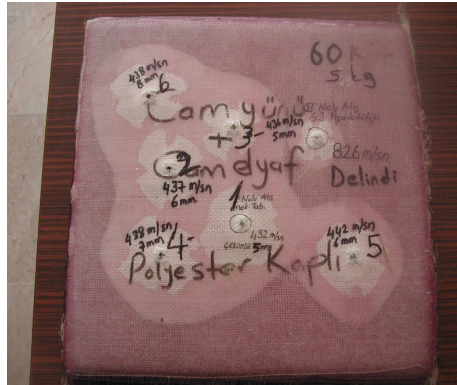
üzerinde meydana gelen çöküntü miktarının 44 mm 'nin altında olması gerekmektedir. Şekil 6.25’de macunda meydana gelen deformasyon görülmektedir.

Merminin kinetik enerjisi (E_k), merminin kütlesi (m) ve mermi hızı (V_m) değerleri tüm numunelerde bölüm 3’de 3.1 denklemini kullanılarak hesap edilmiştir. Buradaki mermi hızı (V_m) , Oehler Research Model ORM 55 model hızölçere, aralarında 1 m mesafe bulunan iki elektrik perde arasında geçiş süresi ölçümü ile balistik koruyucu yapıya çarptığı andaki hızdır.

a) E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine kompozit plaka numunesi

[(E cam elyaf+cam keçe)₆₀] polyester reçine

Normal oda sıcaklığında şartlandırılmış polyester reçine kaplı E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine kompozit plaka numunesi sürgülü çerçeve kaide plakalar arasına yerleştirilmiş ve mengene yardımıyla tutturularak, 5 m mesafeden atışlar gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası plakanın ön ve arka yüzünün fotoğrafları Şekil 6.26’da görülmektedir. Elde edilen mermi hızları, oluşan çöküntü ve kinetik enerji değerleri Çizelge 6.7’de belirtilmiştir.



(a)



(b)

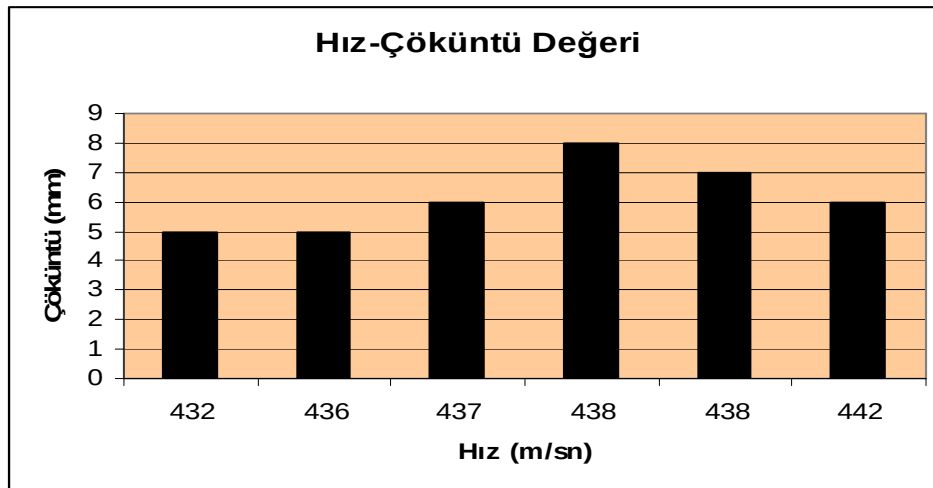
Şekil 6.26 Atış sonrası; (a) [E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine]₆₀ plakası ön yüz, (b) [E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine]₆₀ plakası arka yüz

Çizelge 6.7 [(E cam elyaf+cam keçe)₆₀]^{polyester reçine} plakası balistik test sonuçları

Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	1	5	432	693,3	5	Delinme Yok
+23	3	5	436	706,2	5	Delinme Yok
+23	2	5	437	709,4	6	Delinme Yok
+23	4	5	438	712,7	8	Delinme Yok
+23	5	5	438	712,7	7	Delinme Yok
+23	6	5	442	725,7	6	Delinme Yok

Atış performansını değerlendirecek olursak; 6.2.4-a) maddesinde belirtilen fiziksel özelliklere sahip [E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine]₆₀ plaka numunesine 5 m mesafeden 9 mm FMJ Mak.Tab. mermi mühimmatı ile yapılan atışlarda (430 m/s - 440 m/s) delinme olmadığı, çöküntü miktarının istenen standartlar içinde olduğu (5~8 mm< 44 mm), III-A koruma seviyesine karşı (NIJ-STD 0101.04) koruma sağladığı gözlenmiştir.

Bu veriler ışığında elde edilen hız ve çöküntü miktarları arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilebilir. Şekil 6.27 'de mermi hızları ve çöküntü değerleri arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 6.27 Normal şartlar altında şartlandırılan polyester reçine kaplı E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine kompozit plaka numunesine yapılan atışlardaki mermi hızı ile plakadaki çöküntü miktarı ilişkisi.

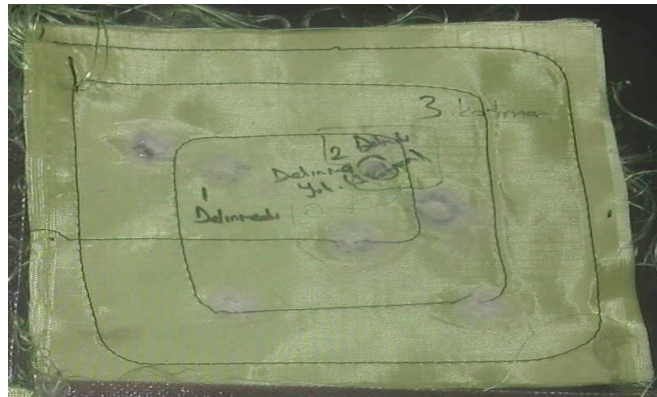
b) E cam elyaf/Cam keçe/Polyester reçine/Kevlar₄₉ hibrit kompozit numunesi
 $[(\text{Kevlar}_{49})_{20} + [(\text{E cam elyaf} + \text{Cam keçe})_{10}]^{\text{polyester reçine}} + (\text{Kevlar}_{49})_{10} + [(\text{E cam elyaf} + \text{Cam keçe})_{10}]^{\text{polyester reçine}}]_{50}$

Normal oda sıcaklığında şartlandırılmış polyester reçine kaplı E cam elyaf/Cam keçe/Kevlar₄₉ hibrit kompozit numunesi sürgülü çerçeve kaide plakalar arasına yerleştirilmiş ve mengene yardımıyla tutturularak, 5 m mesafeden atışlar gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası numune katman fotoğrafları Şekil 6.28’de görülmektedir.



Şekil 6.28 Atış sonrası numune katmanlarının görünümü.

Yapılan atışlar neticesinde 1’inci katman (Kevlar₄₉)₂₀ ve 2’nci katmanda [(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀]^{polyester reçine} tam delinme gerçekleşmiştir. 3’üncü ve 4’üncü katmanda (Kevlar₄₉)₁₀, [(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀]^{polyester reçine} tam delinme olmamıştır. Şekil 6.29’da (Kevlar₄₉)₁₀ ‘ın mermileri tuttuğu görülmektedir.



Şekil 6.29 Atış sonrası 3’üncü katman [(Kevlar₄₉)₁₀].

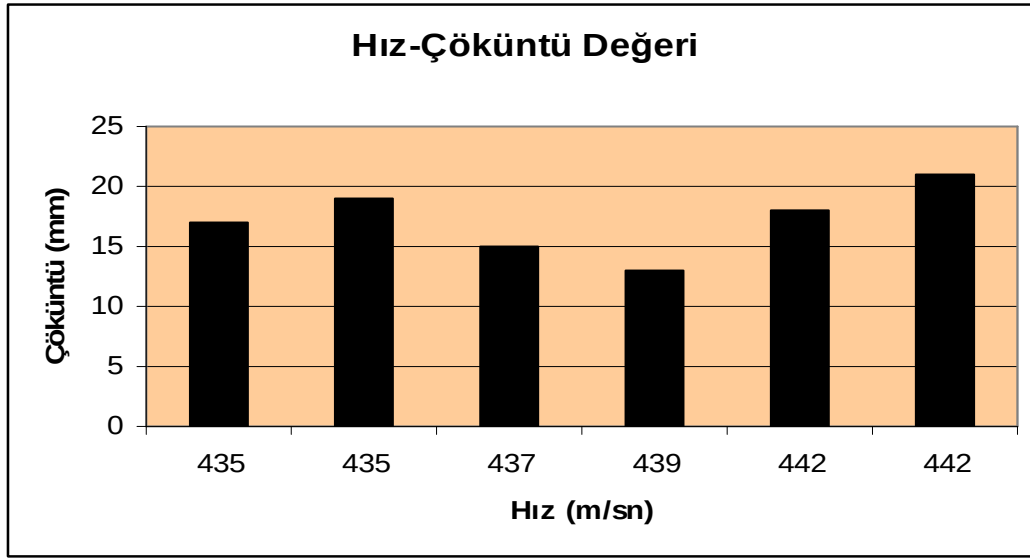
Çizelge 6.8 Polyester reçine kaplı E cam elyaf/Cam keçe/Polyester reçine/Kevlar₄₉ hibrit kompozit numunesi balistik test sonuçları

Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	1	5	435	702,9	17	Delinme Yok
+23	5	5	435	702,9	19	Delinme Yok
+23	2	5	437	709,4	15	Delinme Yok
+23	3	5	439	715,9	13	Delinme Yok
+23	4	5	442	725,7	18	Delinme Yok
+23	6	5	442	725,7	21	Delinme Yok

Elde edilen mermi hızları, oluşan çöküntü ve kinetik enerji değerleri Çizelge 6.8’de belirtilmiştir.

Atış performansına bakıldığında; değişik katmanlarda hazırlanan, 6.2.4-b) maddesinde belirtilen fiziksel özelliklere sahip [(Kevlar₄₉)₂₀+(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀] ^{polyester reçine} +(Kevlar₄₉)₁₀+(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀] ^{polyester reçine}]₅₀ hibrit kompozit numunesine, 5 m mesafeden 9 mm FMJ Mak.Tab. mermi mühimmatı ile yapılan atışlarda üçüncü tabakanın [(Kevlar₄₉)₁₀] mermileri durdurması sonucu balistik açıdan çöküntü miktarlarının belirlenen standart dışına çıkmadığı (13~21 mm < 44 mm), III-A koruma seviyesine karşı (NIJ-STD 0101.04) koruma sağladığı tespit edilmiştir.

Bu veriler ışığında elde edilen hız ve çöküntü miktarları arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilebilir. Şekil 6.30 ’da mermi hızları ve çöküntü değerleri arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 6.30 Normal oda şartlarında şartlandırılmış polyester reçine kaplı E cam elyaf/Cam keçe/Kevlar₄₉ hibrit kompozit numunesine yapılan atışlardaki mermi hızı ile numunedeki çöküntü miktarı ilişkisi.

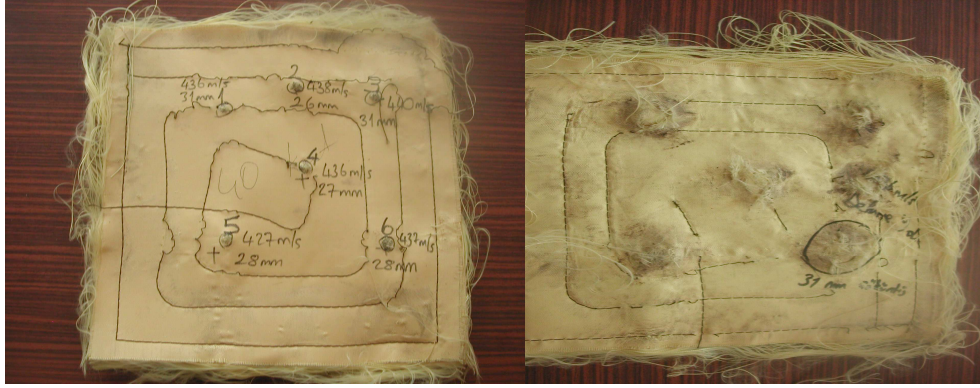
c) Kevlar₄₉ aramid kumaş numunesi [Kevlar₄₉]₄₀

Normal oda sıcaklığında şartlandırılmış [Kevlar₄₉]₄₀ aramid kumaş numunesi sürgülü çerçeve kaide plakalar arasına yerleştirilmiş ve mengene yardımıyla tutturularak, 5 m mesafeden atışlar gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası Kevlar₄₉ aramid kumaş numune fotoğrafları Şekil 6.31 'de görülmektedir.





(c)



(d)

Şekil 6.31 (a) Atış sonrası mevcut düzenekteki numune, (b) İlk atış sonrası ön yüz, (c) İlk atış sonrası arka yüz, (d) Atış sonrası ön ve arka yüz görüntüleri.

Şekil 6.31-(a),(b),(c) 'de ilk atış sonrası numunenin ön yüzü ve arka yüzü görülmektedir. Yapılan tüm atışlar sonucu Kevlar₄₉ aramid kumaş numunesinde delinme olmadığı ve çöküntü miktarının da uygun olduğu gözlenmiştir [Şekil 6.31-(d)].

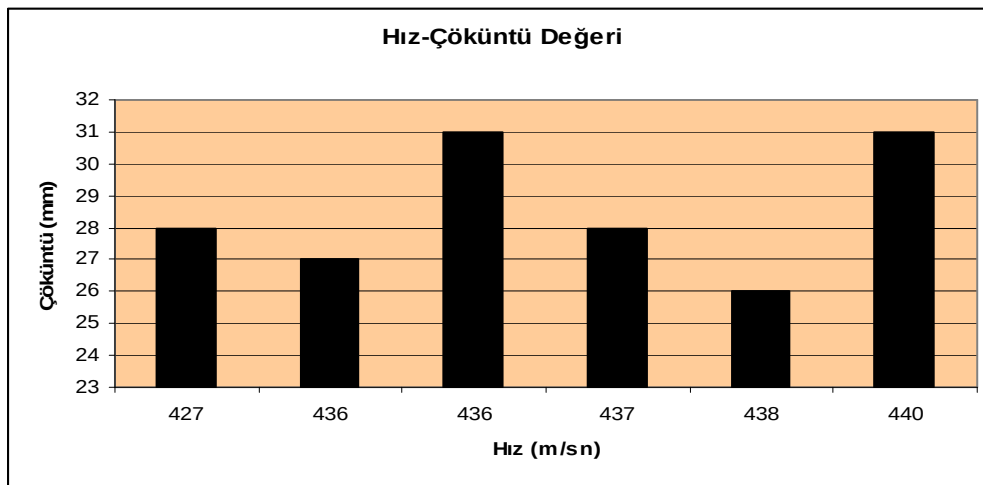
Çizelge 6.9 Kevlar₄₉ aramid kumaş numunesinde balistik test sonuçları

Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	5	5	427	677,3	28	Delinme Yok
+23	4	5	436	706,2	27	Delinme Yok
+23	1	5	436	706,2	31	Delinme Yok
+23	6	5	437	709,4	28	Delinme Yok
+23	2	5	438	712,7	26	Delinme Yok
+23	3	5	440	719,2	31	Delinme Yok

Atışlar neticesinde elde edilen mermi hızları, oluşan çöküntü ve kinetik enerji değerleri Çizelge 6.9 'da sunulmuştur.

Kevlar₄₉ aramid kumaş numunesinde çöküntü miktarının numunenin ağırlığı ölçüsünde (745 gr) iyi derecede olduğu (26~31 mm < 44 mm) gözlenmiştir. Ayrıca III-A (NIJ-STD 0101.04) koruma seviyesinde sağlanan korumanın yanı sıra kompozit malzeme oluşturma ve balistik korumanın temel ilkelerinden biri olan ağırlık faktörünün 1'inci ve 2'nci numuneye oranla çok düşük seviyelerde olduğu görülmektedir.

Bu veriler ışığında elde edilen hız ve çöküntü miktarları arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilebilir. Şekil 6.32 'de mermi hızları ve çöküntü değerleri arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 6.32 Normal oda şartlarında şartlandırılmış Kevlar₄₉ aramid kumaş numunesi yapılan atışlardaki mermi hızı ile numunedeki çöküntü miktarı ilişkisi.

d) Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi
[(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₅₀

Normal oda sıcaklığında şartlandırılmış katmanlar sürgülü çerçeve kaide plakalar arasına yerleştirilmiş ve mengene yardımıyla tutturularak, 5 m mesafeden atışlar gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} UHMW-PE hibrit kompozit numune fotoğrafları Şekil 6.33’de belirtilmiştir.



Şekil 6.33 Atış sonrası Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} UHMW-PE hibrit kompozit numune katmanlarının görünümü.

Çizelge 6.10 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune balistik test sonuçları

Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	1	5	426	674,1	18	Delinme Yok
+23	2	5	434	699,4	18	Delinme Yok
+23	6	5	435	702,9	20	Delinme Yok
+23	3	5	436	706,2	19	Delinme Yok
+23	5	5	436	706,2	22	Delinme Yok
+23	4	5	437	709,4	20	Delinme Yok

Atışlar neticesinde elde edilen mermi hızları, oluşan çöküntü ve kinetik enerji değerleri Çizelge 6.10’da sunulmuştur.

Daha önce de belirtildiği gibi (madde 5.3.2) HB26 UHMW-PE polietilen zırh kumaşı

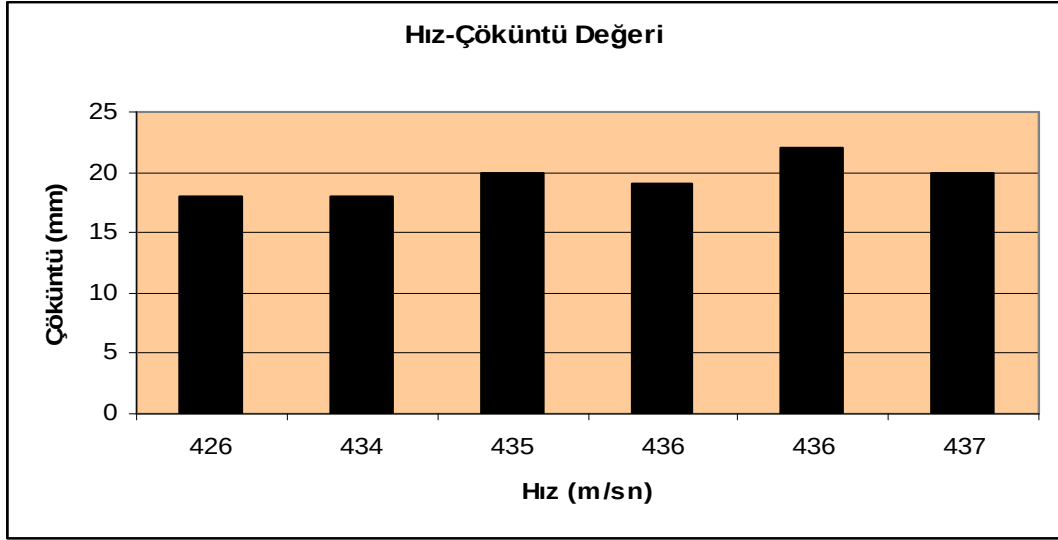
yapısı itibariyle yumuşak(soft) kumaş kategorisinde gösterilir. Sıcak presleme yöntemiyle basıldığında sert plakalar haline gelirler. HB26_{UHMW-PE} polietilen zırh kumaşı bu balistik testte, **preslenmeden** kullanılmış ve balistik performansı test edilmiştir.

Yapılan atışlarda delinme olmamıştır. Çöküntü miktarı numune ağırlığına oranla (950 gr) son derece iyi durumdadır(18~25 mm < 44 mm) ve III-A (NIJ-STD 0101.04) koruma seviyesinde koruma sağlamıştır. Yapılan ilk 5 atış neticesinde, 1'inci katman olan (Kevlar₄₉)₁₅ aramid kumaş numunesi mermileri arka yüzüne geçirmemiştir. 13 ve 14'üncü katlarında mermileri durdurmuştur. 6'ıncı atışta ise (ilk 5 atışın oluşturduğu deformasyonu da göz önüne alarak) 1'inci katmanın delindiği fakat mermilerin 2'nci katmanın [(Polietilen_{HB26})₁₅] ön yüzünde kaldığı gözlenmiştir(Şekil 6.35). Bunun gayet iyi bir balistik performans olduğu söylenebilir. Numuneyi oluşturan 3'üncü [(Kevlar₄₉)₅] ve 4'üncü [(Polietilen_{HB26})₁₅] katmanların ise ilk 6 atışta hafif çöküntülere maruz kaldığı tespit edilmiştir.

4. numune (Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26(UHMW-PE)} hibrit kompozit numunesi) ile 3. numune (Kevlar₄₉ aramid kumaş numunesi) arasında ağırlık ve fiziksel yakınlık göz önüne alınarak kıyaslama yapıldığında oluşan balistik çöküntü miktarlarının 4. numunede daha iyi seviyelerde olduğu görülmektedir.

Balistik performansın daha az katmanlarda uygulanabilirliğini test etmek maksadıyla (Kevlar₄₉)_n+(Polietilen_{HB26})_n (preslenmemiş HB26_{UHMW-PE} polietilen zırh kumaşı) olacak şekilde değişik katmanlarda hazırlanmış numunelere yapılacak atışlar ile istenilen korumanın sağlanabilirliği, kullanılan kat adedine göre delinme sınırının tespiti, istenilen korumaya göre ağırlık tasarrufu ve maliyet analizleri unsurlarının tespiti yapılmalıdır.

Bu veriler ışığında elde edilen hız ve çöküntü miktarları arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilebilir. Şekil 6.34 'de mermi hızları ve çöküntü değerleri arasındaki ilişki görülmektedir.

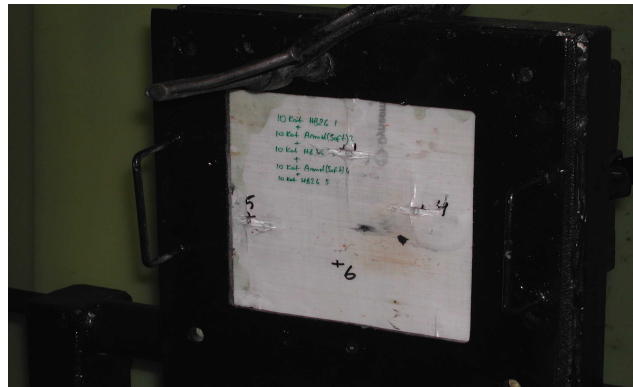


Şekil 6.34 Normal oda şartlarında şartlandırılmış Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} UHMW-PE hibrit kompozit numunesine yapılan atışlardaki mermi hızı ile numunedeki çöküntü miktarı ilişkisi.

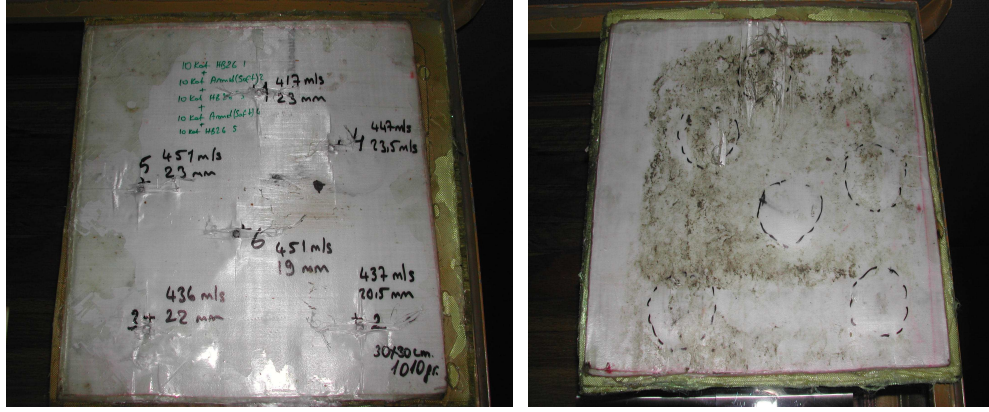
e) Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} (UHMW-PE)/Polyester reçine hibrit kompozit numunesi

[[(Polietilen_{HB26})₁₀ + (Kevlar₄₉)₁₀ + (Polietilen_{HB26})₁₀ + (Kevlar₄₉)₁₀ + (Polietilen_{HB26})₁₀]₅₀]^{polyester reçine}

Normal oda sıcaklığında şartlandırılmış numune sürgülü çerçeve kaide plakalar arasına yerleştirilmiş ve mengene yardımıyla tutturularak, 5 m mesafeden atışlar gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası polyester reçine kaplı Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} UHMW PE/Polyester reçine hibrit kompozit numune fotoğrafları Şekil 6.35 'de belirtilmiştir.



(a)



(b)

(c)

Şekil 6.35 (a) Atış sonrası mevcut düzenekteki polyester reçine kaplı Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE)/Polyester reçine hibrit kompozit numunesi, (b) Atış sonrası polyester reçine kaplı Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE)/Polyester reçine hibrit kompozit numune ön yüz, (c) Atış sonrası polyester reçine kaplı Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE)/Polyester reçine hibrit kompozit numune arka yüz görüntüleri.

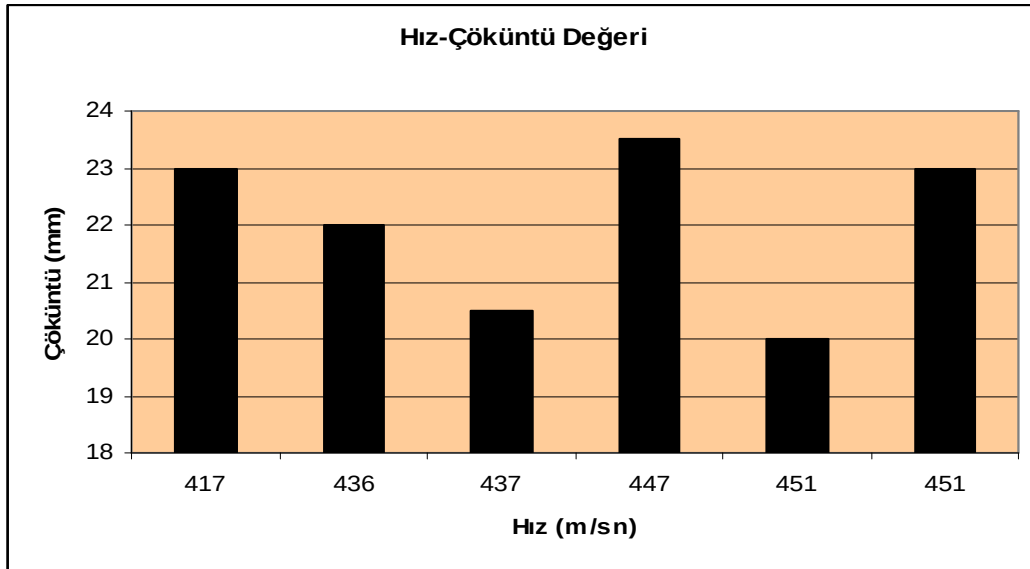
Çizelge 6.11 Polyester reçine kaplı Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26}(UHMW-PE)/Polyester reçine hibrit kompozit numune plakası balistik test sonuçları

Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	1	5	417	645,9	23	Delinme Yok
+23	3	5	436	706,2	22	Delinme Yok
+23	2	5	437	709,4	20,5	Delinme Yok
+23	4	5	447	742,2	23,5	Delinme Yok
+23	5	5	451	755,6	20	Delinme Yok
+23	6	5	451	755,6	23	Delinme Yok

Atışlar neticesinde elde edilen mermi hızları, oluşan çöküntü ve kinetik enerji değerleri Çizelge 6.11’de sunulmuştur.

Yapılan atışlar sonucu, çöküntü miktarının istenen aralıklarda olduğu (20~23,5 mm < 44 mm) gözlenmiştir. Numune III-A (NIJ-STD 0101.04) koruma seviyesinde koruma sağlamaktadır. 5. numunenin $[(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}+(\text{Kevlar}_{49})_{10}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}+(\text{Kevlar}_{49})_{10}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}]_{50}$ polyester reçine ağırlığının (1050 gr) 3. numune $[(\text{Kevlar}_{49})_{40}]$ ağırlığı (745 gr) ve 4. numune $[(\text{Kevlar}_{49})_{15}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15}+(\text{Kevlar}_{49})_5+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15}]_{50}$ ağırlığına (950 gr) göre, aynı koruma seviyesine karşın yüksek bir değer aldığı gözlemlenmiştir.

Bu veriler ışığında elde edilen hız ve çöküntü miktarları arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilebilir. Şekil 6.36 'da mermi hızları ve çöküntü değerleri arasındaki ilişki görülmektedir.



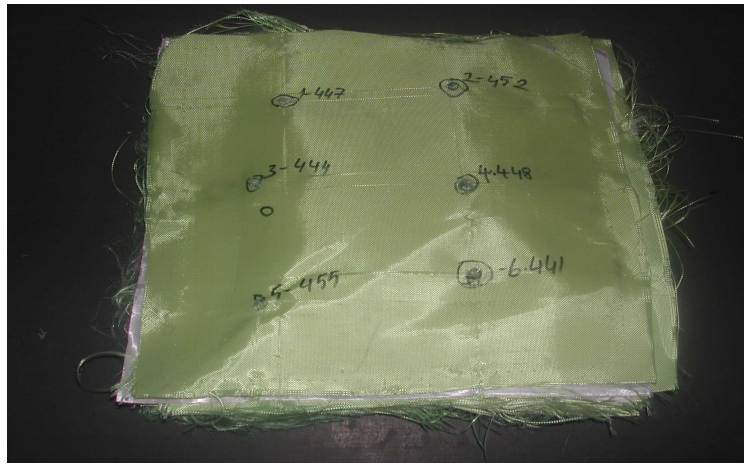
Şekil 6.36 Normal oda şartlarında şartlandırılmış, polyester reçine kaplı Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE)/Polyester reçine hibrit kompozit numune plakasına yapılan atışlardaki mermi hızı ile numunedeki çöküntü miktarı ilişkisi.

f) Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesi
 $[(\text{Kevlar}_{49})_1+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_1+\dots]_{40}$

Normal oda sıcaklığında şartlandırılmış katmanlar sürgülü çerçeve kaide plakalar arasına yerleştirilmiş ve mengene yardımıyla tutturularak, 5 m mesafeden atışlar gerçekleştirilmiştir. Atış sonrası numune fotoğrafları Şekil 6.37'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 6.37 (a) Atış yapılırken mevcut düzenekteki 6. deney numunesi $[(\text{Kevlar}_{49})_1 + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_1 + \dots]_{40}$ ön yüz, (b) Atış sonrası 6. deney numunesi $[(\text{Kevlar}_{49})_1 + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_1 + \dots]_{40}$ ön yüz görüntüleri.

Çizelge 6.12 Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune balistik test sonuçları

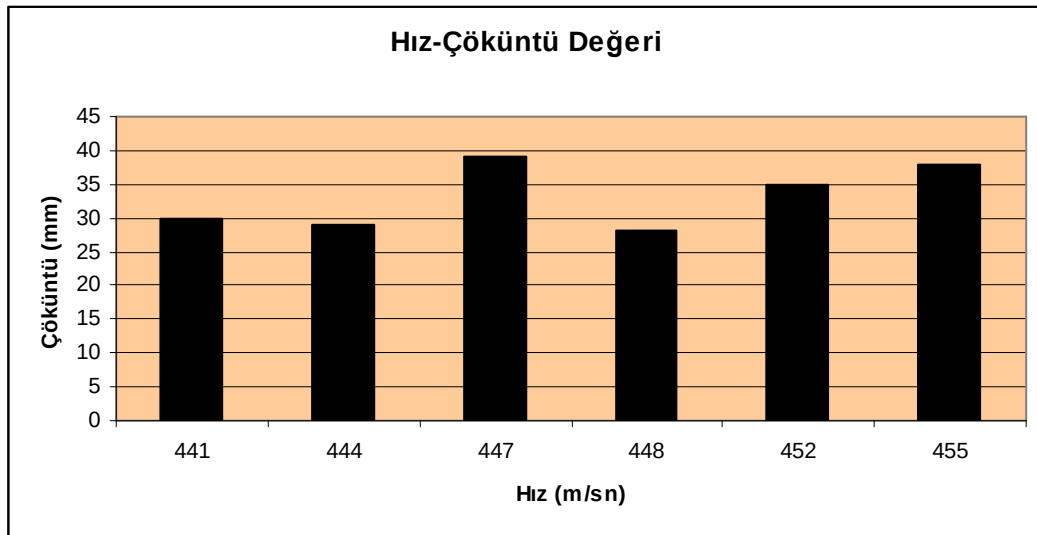
Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	6	5	441	722,4	30	Delinme Yok
+23	3	5	444	732,3	29	Delinme Yok
+23	1	5	447	742,2	39	Delinme Yok
+23	4	5	448	745,6	28	Delinme Yok
+23	2	5	452	758,9	35	Delinme Yok
+23	5	5	455	769,0	38	Delinme Yok

Atışlar neticesinde elde edilen mermi hızları, oluşan çöküntü ve kinetik enerji değerleri Çizelge 6.12’de sunulmuştur.

Yapılan atışlarda, çöküntünün NIJ standardında belirtilen en üst sınıra, yani tehlike bölgesine çok yaklaşık değerler aldığı (28~39 mm < 44 mm) görülmektedir. Numune III-A (NIJ-STD 0101.04) koruma seviyesinde korumayı sağlamakta fakat, [[Kevlar₄₉]₄₀] numunesi ve [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₅₀] numunesine göre çöküntü miktarlarının yüksek seviyelerde kaldığı gözlenmektedir.

Bu da göstermektedir ki, aynı cins kompozit malzemeler veya birbiriyle gruplaşmış hibrit kompozit malzemeler, [(Kevlar₄₉)₁+(Polietilen_{HB26})₁+...]₄₀] numunesinde homojen olarak birbirinin arasına yerleştirilmiş kompozit sandviç yapılara göre daha iyi balistik performans göstermektedir.

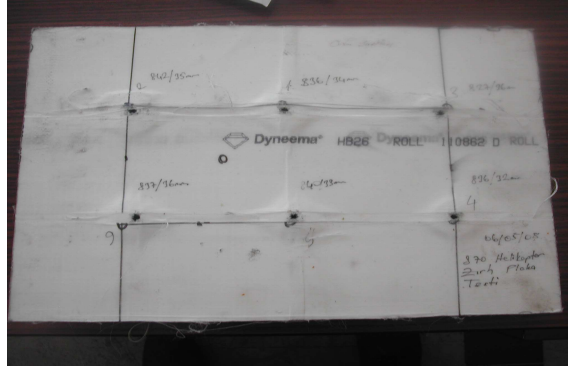
Bu veriler ışığında elde edilen hız ve çöküntü miktarları arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilebilir. Şekil 6.38 ’de mermi hızları ve çöküntü değerleri arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 6.38 Normal oda şartlarında şartlandırılmış Kevlar₄₉/ Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunesine yapılan atışlardaki mermi hızı ile numunedeki çöküntü miktarı ilişkisi.

g) Preslenmiş Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) kompozit plaka numunesi
[Polietilen_{HB26}]₇₈

Normal oda sıcaklığında şartlandırılmış kompozit plaka numunesi sürgülü çerçeve kaide plakalar arasına yerleştirilmiş ve mengene yardımıyla tutturularak, 15 m mesafeden (7,62 mm NATO normal) atışlar yapılmıştır. Atış sonrası 7. numune (preslenmiş polietilen_{HB26} (UHMW-PE) kompozit plaka) numune fotoğrafları Şekil 6.39'da belirtilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.39 (a) Atış sonrası preslenmiş polietilen_{HB26} (UHMW-PE) kompozit plaka numunesi(7.numune) ön yüz, (b) Atış sonrası preslenmiş polietilen_{HB26} (UHMW-PE) kompozit plaka numunesi arka yüz görüntüleri.

Çizelge 6.13 Preslenmiş polietilen_{HB26} (UHMW-PE) kompozit numune plakası balistik test sonuçları

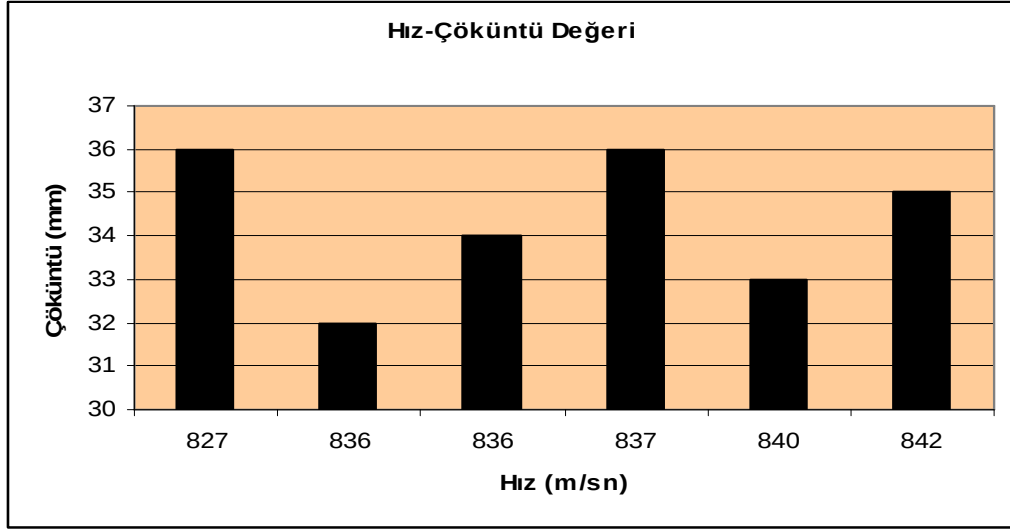
Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	3	15	827	3248,6	36	Delinme Yok
+23	4	15	836	3319,7	32	Delinme Yok
+23	1	15	836	3319,7	34	Delinme Yok
+23	6	15	837	3327,7	36	Delinme Yok
+23	5	15	840	3351,6	33	Delinme Yok
+23	2	15	842	3367,5	35	Delinme Yok

Atışlar neticesinde elde edilen mermi hızları, oluşan çöküntü ve kinetik enerji değerleri Çizelge 6.13’de sunulmuştur.

Daha önce de belirtildiği gibi (madde 5.3.2 Yumuşak(Soft) koruyucular) HB26_{UHMW-PE} polietilen zırh kumaşı yapısı itibariyle yumuşak(soft) kumaş kategorisinde gösterilir. Sıcak presleme yöntemiyle basıldığında sert plakalar haline gelirler. HB26_{UHMW-PE} polietilen zırh kumaşı bu numunede, preslenerek imal edilmiş ve balistik performansı test edilmiştir. Elde edilen ürünün kullanım alanlarının nereler olacağı bir önceki bölümde değerlendirilmiştir.

Preslenmiş polietilen_{HB26} (UHMW-PE) kompozit plakada çöküntü miktarının yapılan atış hızına ve sağladığı koruma seviyesine göre iyi seviyelerde olduğu (32~36 mm < 44 mm) gözlenmiştir. Hazırlanan plakanın III (NIJ-STD 0101.04) koruma seviyesinde koruma sağladığı tespit edilmiştir.

Bu veriler ışığında elde edilen hız ve çöküntü miktarları arasındaki ilişki grafiksel olarak gösterilebilir. Şekil 6.40 ’da mermi hızları ve çöküntü değerleri arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 6.40 Normal oda şartlarında şartlandırılmış preslenmiş Polietilen_{HB26} UHMW-PE kompozit plaka numunesine yapılan atışlardaki mermi hızı ile numunedeki çöküntü miktarı ilişkisi.

6.1.5.2.3 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunelerin farklı katmanlarda balistik dayanım sınırı analizi

a) [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₅₀

Çizelge 6.14 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune balistik test sonuçları

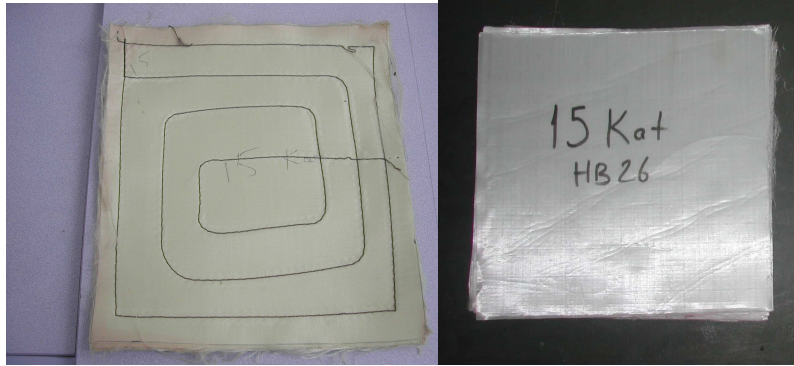
Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	1	5	426	674,1	18	Delinme Yok
+23	2	5	434	699,4	18	Delinme Yok
+23	6	5	435	702,9	20	Delinme Yok
+23	3	5	436	706,2	19	Delinme Yok
+23	5	5	436	706,2	22	Delinme Yok
+23	4	5	437	709,4	20	Delinme Yok

Çizelge 6.15 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune toplam katman sayısı ve ortalama çöküntü değeri

Deney Numunesi	Toplam Katman Sayısı (Ad.)	Ortalama Çöküntü Değeri (mm)
$[(\text{Kevlar}_{49})_{15} + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15}]_{50}$	50	19,5

6.1.4-d maddesindeki fiziksel özelliklere sahip hibrit kompozit numuneye yapılan balistik test uygulama analizleri 6.1.5.2.2-d maddesinde belirtilmiştir. Buda göstermektedir ki Çizelge 6.15 'deki katman sayısında oluşturulan hibrit yapıya yapılan atışlarda(Çizelge 6.14) istenilen koruma sağlanmıştır.

b) $[(\text{Kevlar}_{49})_{15} + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15}]_{30}$



Şekil 6.41 Atış öncesi hazırlanan; (a) (Kevlar₄₉)₁₅, (b) (Polietilen_{HB26})₁₅ numune katmanları görünümü

Değişik katmanlarda belirtilen sırada (15 kat Kevlar₄₉ aramid kumaş + 15 kat HB26 Polietilen kumaş) hazırlanan hibrit kompozit numune(Şekil 6.41); Toplamda 8.5 mm kalınlığında, 610 g ağırlığında, 30x30 cm ebadında üretilmiştir.

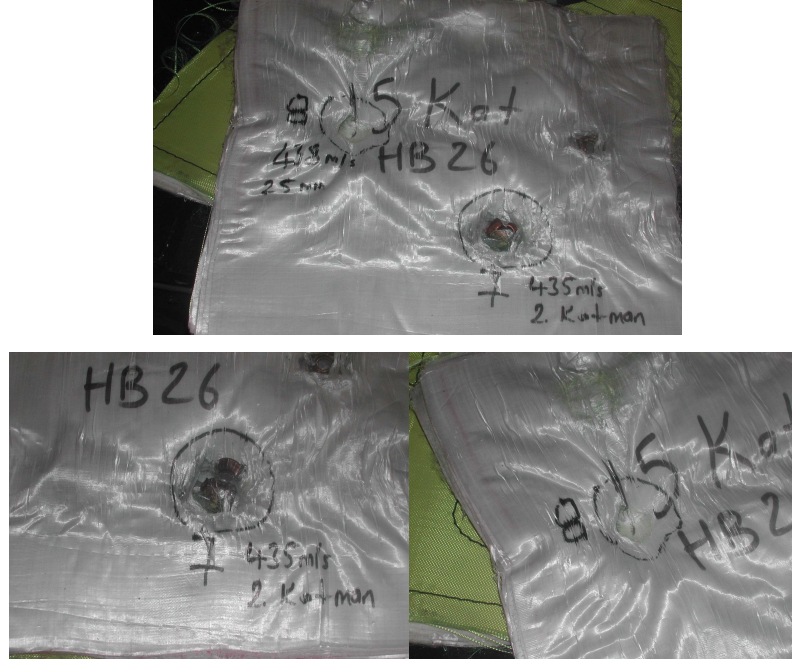
Çizelge 6.16 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune balistik test sonuçları

Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	1*	5	435	702,9	23	Delinme Yok
+23	2*	5	438	712,7	25	Delinme Yok

* [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₅₀
numunesinin ilk iki katmanına [[(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₃₀] yapılan atışlar

Çizelge 6.17 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune toplam katman sayısı ve ortalama çöküntü değeri

Deney Numunesi	Toplam Katman Sayısı (Ad.)	Ortalama Çöküntü Değeri (mm)
[(Kevlar ₄₉) ₁₅ +(Polietilen _{HB26}) ₁₅] ₃₀	30	24



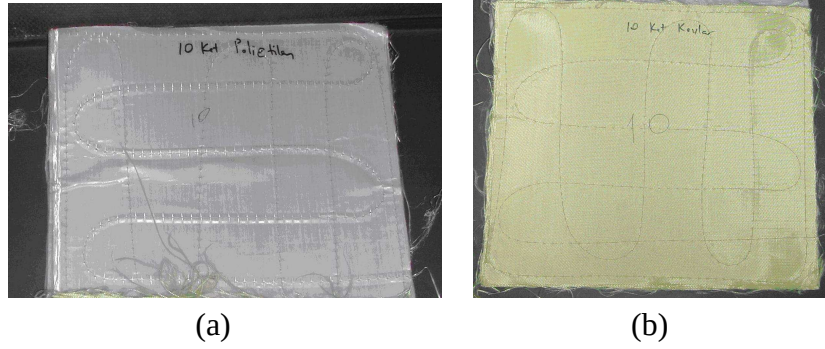
Şekil 6.42 Yapılan atışlar sonrası polietilen_{HB26} UHMW-PE kumaş numunesi [(Polietilen_{HB26})₁₅] (2. katman) görüntüleri.

Toplamda 630 gr ağırlığında (Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅ dizilişi ile oluşturulan numuneye yapılan atışlar neticesinde (Çizelge 6.16); mermilerin 1'inci katmanı [(Kevlar₄₉)₁₅] tam deldiği, 2'nci katmanın [(Polietilen_{HB26})₁₅] ön yüzünde kaldığı, 2'nci katmanın tam delinmediği tespit edilmiştir(Şekil 6.42). Buda göstermektedir ki Çizelge 6.17 'deki katman sayısında oluşturulan hibrit yapıya yapılan atışlarda istenilen koruma sağlanmıştır.

Kullanılan kat adedi, maliyet analizi, üretim prosesi vb. unsurlar göz önüne alındığında istenilen Amerikan NIJ-STD 0101.04 standardına göre III-A koruma seviyesinde istenilen şekilde tasarlanarak birim üründe ekonomi ve ağırlık bakımından tasarruf ve kolaylık sağlayacaktır.

c) [(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀]₂₀

Değişik katmanlarda belirtilen sırada (10 kat Kevlar₄₉ aramid kumaş + 10 kat HB26 Polietilen kumaş) hazırlanan hibrit kompozit numune (Şekil 6.43); Toplamda 5,6 mm kalınlığında, 360 g ağırlığında, 30x30 cm ebadında üretilmiştir.



Şekil 6.43 Atış öncesi hazırlanan; (a) (Kevlar₄₉)₁₀, (b) Polietilen_{HB26})₁₀ numune katman görüntüleri.



(a)

(b)

Şekil 6.44 Yapılan atışlar sonrası; (a) (Kevlar₄₉)₁₀, (b) (Polietilen_{HB26})₁₀] numune katman görüntüleri.



(a)

(b)

Şekil 6.45 Yapılan atışlar sonrası; (a) (Kevlar₄₉)₁₀, (b) (Polietilen_{HB26})₁₀] numune katmanlarının arka yüz çöküntü durumu görüntüleri.

Hazırlanan numuneye yapılan atışlar neticesinde (Çizelge 6.18); mermilerin 1'inci katmanı [(Kevlar₄₉)₁₀] tam delip geçtiği gözlenmiştir(Şekil 6.44-a) (Şekil 6.45-a). 2'nci katmanda [(Polietilen_{HB26})₁₀] 1'inci, 2'nci ve 3'üncü atışlar sonucunda tam delmenin gerçekleşmediği, mermilerin ön yüzde kaldığı tespit edilmiştir(Şekil 6.44-b) (Şekil 6.45-b). Şekil 6.45-b 'de atış sonrası 2. katmanın [(Polietilen_{HB26})₁₀] arka yüzünde oluşan deformasyon görülmektedir. İlk atışta katman yüzeyinde diğer atışlara nazaran daha az bir deformasyon oluşmuştur. Numune üzerinde atış sayısı arttıkça mermilerin kinetik enerjisi çarpma enerjisiyle birlikte dış yüzeye doğru şekil değişiklikleri, tepecikler halinde kendini göstermiştir. En fazla şekil değişikliği 3'üncü atışta gerçekleşmiştir.

Çizelge 6.19 'daki katman sayısında oluşturulan hibrit yapıya yapılan atışlarda istenilen koruma sağlanmıştır.

Çizelge 6.18 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune balistik test sonuçları

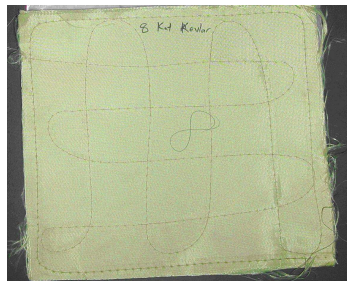
Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	3	5	386	553,5	25	Delinme Yok
+23	2	5	411	627,5	28	Delinme Yok
+23	1	5	438	712,7	33	Delinme Yok

Çizelge 6.19 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune toplam katman sayısı ve ortalama çöküntü değeri

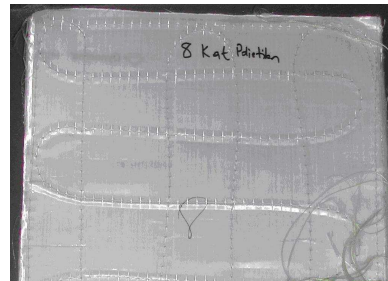
Deney Numunesi	Toplam Katman Sayısı (Ad.)	Ortalama Çöküntü Değeri (mm)
[(Kevlar ₄₉) ₁₀ +(Polietilen _{HB26}) ₁₀] ₂₀	20	28,6

d) [(Kevlar₄₉)₈+(Polietilen_{HB26})₈]₁₆

Değişik katmanlarda belirtilen sırada (8 kat Kevlar₄₉ aramid kumaş + 8 kat HB26 Polietilen kumaş) hazırlanan hibrit kompozit numune (Şekil 6.46); Toplamda 4,5 mm kalınlığında, 300 g ağırlığında, 30x30 cm ebadında üretilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.46 Atış öncesi hazırlanan; (a) (Kevlar₄₉)₈, (b) (Polietilen_{HB26})₈ kompozit numune katman görüntüleri.



(a) (b)

Şekil 6.47 Yapılan atışlar sonrası; (a) (Kevlar₄₉)₈, (b) (Polietilen_{HB26})₈ hibrit kompozit numune katman görüntüleri.



(a) (b)

Şekil 6.48 Yapılan atışlar sonrası (a) (Kevlar₄₉)₈, (b) (Polietilen_{HB26})₈ hibrit kompozit numune katmanlarının arka yüz çöküntü durum görüntüleri.

Hazırlanan numuneye yapılan atışlar neticesinde (Çizelge 6.20); mermilerin 1'inci katmanı [(Kevlar₄₉)₈] tam delip geçtiği gözlenmiştir (Şekil 6.47-a) (Şekil 6.48-a). 1'inci, 2'nci, 3'üncü ve 4'üncü atışlar sonucunda 2'nci katmanda [(Polietilen_{HB26})₈] tam delmenin gerçekleşmediği, mermilerin ön yüzde kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 6.47-b). Şekil 6.48-b 'de atış sonrası 2. katmanın [(Polietilen_{HB26})₁₀] arka yüzünde oluşan deformasyon görülmektedir. İlk atışta katman yüzeyinde diğer atışlara nazaran daha az bir deformasyon oluşmuştur. Yapı üzerinde atış sayısı arttıkça mermilerin kinetik enerjisi çarpma enerjisiyle birlikte dış yüzeye doğru şekil değişiklikleri, tepcikler halinde kendini göstermiştir. En fazla şekil değişikliği 4'üncü atışta gerçekleşmiştir.

Çizelge 6.20 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune balistik test sonuçları

Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	1	5	337	421,9	36	Delinme Yok
+23	2	5	380	536,4	38	Delinme Yok
+23	3	5	418	649	42	Delinme Yok
+23	4	5	435	702,9	51	Delinme Yok/Çöküntü Fazla

Çizelge 6.21 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune toplam katman sayısı ve ortalama çöküntü değeri

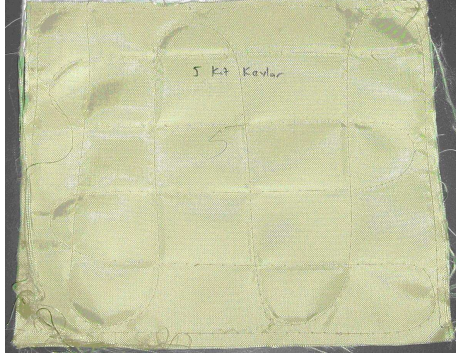
Deney Numunesi	Toplam Katman Sayısı (Ad.)	Ortalama Çöküntü Değeri (mm)
[(Kevlar ₄₉) ₈ +(Polietilen _{HB26}) ₈] ₁₆	16	41,7

Çizelge 6.20 'de belirtilen ilk iki atışta istenilen koruma sağlanmış fakat takip eden 3'üncü ve 4'üncü atışlarda tam delinme olmamasına karşın oluşan çöküntülerin travma çöküntüsü sınırına (travma çöküntü sınır değeri = 44 mm) çok yaklaştığı/geçtiği ve hayati tehlike bölgesinde olduğu gözlenmiştir.

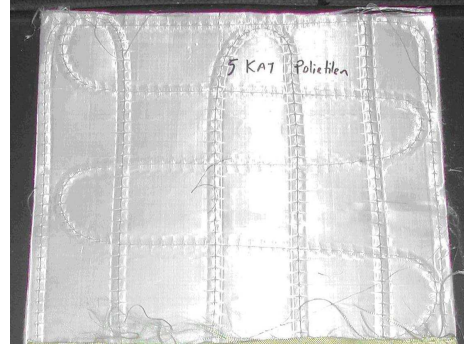
Çizelge 6.21 'deki katman sayısında oluşturulan hibrit yapıya yapılan çoklu atışlarda **istenilen koruma sağlanamamıştır.**

e) [(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₅]₁₀

Değişik katmanlarda belirtilen sırada (5 kat Kevlar₄₉ aramid kumaş + 5 kat HB26 Polietilen kumaş) hazırlanan hibrit kompozit numune (Şekil 6.49); Toplamda 2,9 mm kalınlığında, 175 g ağırlığında, 30x30 cm ebadında üretilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.49 Atış öncesi hazırlanan; (a) (Kevlar₄₉)₅, (b) (Polietilen_{HB26})₅ hibrit kompozit numune katman görüntüleri.



(a)



(b)

Şekil 6.50 Yapılan atışlar sonrası (a) (Kevlar₄₉)₅, (b) (Polietilen_{HB26})₅ hibrit kompozit numune katman görüntüleri.



(a)



(b)

Şekil 6.51 Yapılan atışlar sonrası (a) (Kevlar₄₉)₅, (b) (Polietilen_{HB26})₅ hibrit kompozit numune katmanlarının arka yüz çöküntü durum görüntüleri.

Hazırlanan numuneye yapılan atış neticesinde (Çizelge 6.22); merminin 1'inci [(Kevlar₄₉)₅] ve 2'nci katmanı [(Polietilen_{HB26})₅] tam delip geçtiği gözlenmiştir(Şekil 6.50) (Şekil 6.51). Yapılan atış sonrası 2. katmanın [(Polietilen_{HB26})₅] arka yüzünde oluşan deformasyon Şekil 6.51-b 'de görülmektedir. Merminin kinetik enerjisi çarpma enerjisiyle birlikte yapı üzerinde dış yüzeye doğru tepecik oluşturmuştur.

Çizelge 6.22 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune balistik test sonuçları

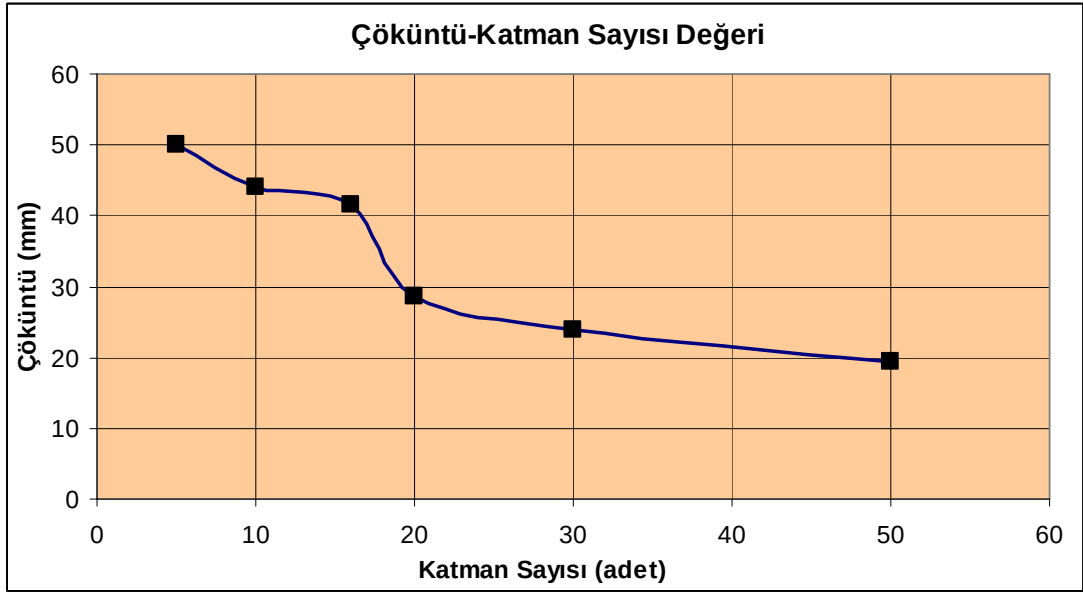
Sıcaklık (°C)	Atış No	Mesafe (m)	V _m (m/s)	E _k (Nm)	Çöküntü Değeri(mm)	Değerlendirme
+23	1	5	340	429,4	-	Delinme Var

Çizelge 6.23 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numune toplam katman sayısı ve ortalama çöküntü değeri

Deney Numunesi	Toplam Katman Sayısı (Ad.)	Ortalama Çöküntü Değeri (mm)
[(Kevlar ₄₉) ₅ +(Polietilen _{HB26}) ₅] ₁₀	10	Delinme Var

Çizelge 6.22 'de belirtilen atışta oluşturulan hibrit kompozit yapının tam delinmeye maruz kalmıştır.

Çizelge 6.23 'deki katman sayısında oluşturulan hibrit yapıya yapılan atışta istenilen koruma sağlanamamıştır.



Şekil 6.52 Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numunelerinin balistik sınır analizi.

Şekil 6.52 'de Kevlar₄₉/Polietilen_{HB26} (UHMW-PE) hibrit kompozit numuneleri kullanılarak farklı katlarda oluşturulan yapılarla, bu yapılara uygulanan balistik mermi atışları sonucunda oluşan ortalama çöküntü miktarları yapıların NIJ –STD 0101.04 Amerikan standardına göre istenilen koruma seviyesine göre balistik koruma sınırını göstermektedir. Şekil 6.52 'de görüldüğü üzere katman sayısı arttıkça yapılarda oluşan çöküntü miktarı azalmaktadır.

Maruz kalınacak tehdit göz önüne alındığında hafif silahlara karşı bireysel savunma amaçlı hibrit yapı üzerinde değişiklikler yapılabilir. Tehdit derecesine göre hibrit numunelerin katmanlarında artırma ve eksiltme ile tasarımlar gerçekleştirilebilir.

6.1.6 Test Numunelerinin Ağırlıklarına Göre Enerji Absorblama Değerleri

Çarpma enerjisini absorbe eden(soğuran) balistik koruyucu hibrit kompozit malzemeler bireysel savunmada oluşabilecek her türlü travmaya karşı önlem amacıyla tasarlanıp üretilmektedir. Bu amaçla travma ve darbe enerjisini istenilen sınırlar içerisinde (NIJ-STD 0101.04)(... < 44 mm) absorbe(soğurma) etmek, mermi mühimmatının “tam delme” durumunu engellemekten daha fazla önem arz

etmektedir. Kompozit malzemenin enerji soğurması(absorbe etmesi) ve arkasına geçirdiği enerji miktarı balistik dayanımı belirlemede ölçü alınmaktadır.

Bu bölümde balistik testlerde kullanılan hibrit kompozit numunelerin enerji absorblama değerleri tespit edilecektir.

Yapı ağırlığına göre

$$\text{enerji absorblama (YAGEA)} = \frac{\text{Tehlikenin kinetik enerjisi (J)}}{\text{Yapı ağırlığı (g/m}^2\text{)}} \quad (6.2)$$

a) [(E cam elyaf+cam keçe)₆₀] ^{polyester reçine} hibrit kompozit numune plakası

Yapının ağırlığı 6.2.4 maddesine göre belirlenmiş olup, tehlikenin kinetik enerjisi 3.2.2. -d maddesi 3.1 denklemi kullanılarak hesap edilmiştir.

Diğer bütün test numuneleri için enerji absorblama değerleri 6.2.6-a maddesinde belirtilen denklemler kullanılarak hesap edilmiştir. Bu değerler; Çizelge 6.24, Çizelge 6.25, Çizelge 6.26, Çizelge 6.27, Çizelge 6.28, Çizelge 6.29, Çizelge 6.30, Çizelge 6.31, Çizelge 6.32, Çizelge 6.33, Çizelge 6.34, Çizelge 6.35, Çizelge 6.36, Çizelge 6.37 'de verilmiştir.

Çizelge 6.24 'de numune ağırlığına göre enerji absorblama değerinin düşük seviyede olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 6.24 [(E cam elyaf+cam keçe)₆₀]^{polyester reçine} kompozit numune plaka için enerji absorblama değerleri

Çarpma Anındaki Hız Değeri(m/sn)	Yapı Ağırlığına Göre Enerji Absorblama Değeri (J/g/m ²)
432	0,1386
436	0,1412
437	0,1418
438	0,1425
438	0,1425
442	0,1451

Çizelge 6.25 'de enerji absorblama değerinin [(E cam elyaf+cam keçe)₆₀]^{polyester reçine} numune plakasına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.25 [(Kevlar₄₉)₂₀+[(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀]^{polyester reçine} +(Kevlar₄₉)₁₀+[(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀]^{polyester reçine}]₅₀ hibrit kompozit numune için enerji absorblama değerleri

Çarpma Anındaki Hız Değeri(m/sn)	Yapı Ağırlığına Göre Enerji Absorblama Değeri (J/g/m ²)
435	0,3568
435	0,3568
437	0,3601
439	0,3634
442	0,3683
442	0,3683

Çizelge 6.26 [Kevlar₄₉]₄₀ hibrit kompozit numune için enerji absorblama değerleri

Çarpma Anındaki Hız Değeri(m/sn)	Yapı Ağırlığına Göre Enerji Absorblama Değeri (J/g/m ²)
427	0,9091
436	0,9479
436	0,9479
437	0,9522
428	0,9566
440	0,9653

Çizelge 6.26 'da enerji absorblama değeri önceki numunelere göre daha yüksektir.

Çizelge 6.27 [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₅₀ hibrit kompozit numune için enerji absorblama değerleri

Çarpma Anındaki Hız Değeri(m/sn)	Yapı Ağırlığına Göre Enerji Absorblama Değeri (J/g/m ²)
426	0,7095
434	0,7362
435	0,7398
436	0,7433
436	0,7433
437	0,7467

Çizelge 6.28 'de enerji absorblama değeri, aynı koruma seviyesinde (III-A) koruma sağlayan diğer numunelere göre en yüksek değeri almıştır.

Çizelge 6.28 [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₃₀ hibrit kompozit numune için enerji absorblama değerleri

Çarpma Anındaki Hız Değeri(m/sn)	Yapı Ağırlığına Göre Enerji Absorblama Değeri (J/g/m ²)
435	1,152
438	1,168

Çizelge 6.29 [(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀]₂₀ hibrit kompozit numune için enerji absorblama değerleri

Çarpma Anındaki Hız Değeri(m/sn)	Yapı Ağırlığına Göre Enerji Absorblama Değeri (J/g/m ²)
386	1,072
411	1,141
438	1,216

Çizelge 6.30 $[(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10} + (\text{Kevlar}_{49})_{10} + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10} + (\text{Kevlar}_{49})_{10} + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}]_{50}^{\text{polyester reçine}}$ hibrit kompozit numune için enerji absorblama değerleri

Çarpma Anındaki Hız Değeri(m/sn)	Yapı Ağırlığına Göre Enerji Absorblama Değeri (J/g/m ²)
417	0,6395
436	0,6992
437	0,7023
447	0,7348
451	0,7481
451	0,7481

Çizelge 6.31 'de numune ağırlığına göre enerji absorblama değeri $[(\text{Kevlar}_{49})_{15} + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15} + (\text{Kevlar}_{49})_5 + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15}]_{50}$ numunesinden yüksek bir değer almıştır.

Çizelge 6.31 $[(\text{Kevlar}_{49})_1 + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_1 + \dots]_{40}$ hibrit kompozit numune için enerji absorblama değerleri

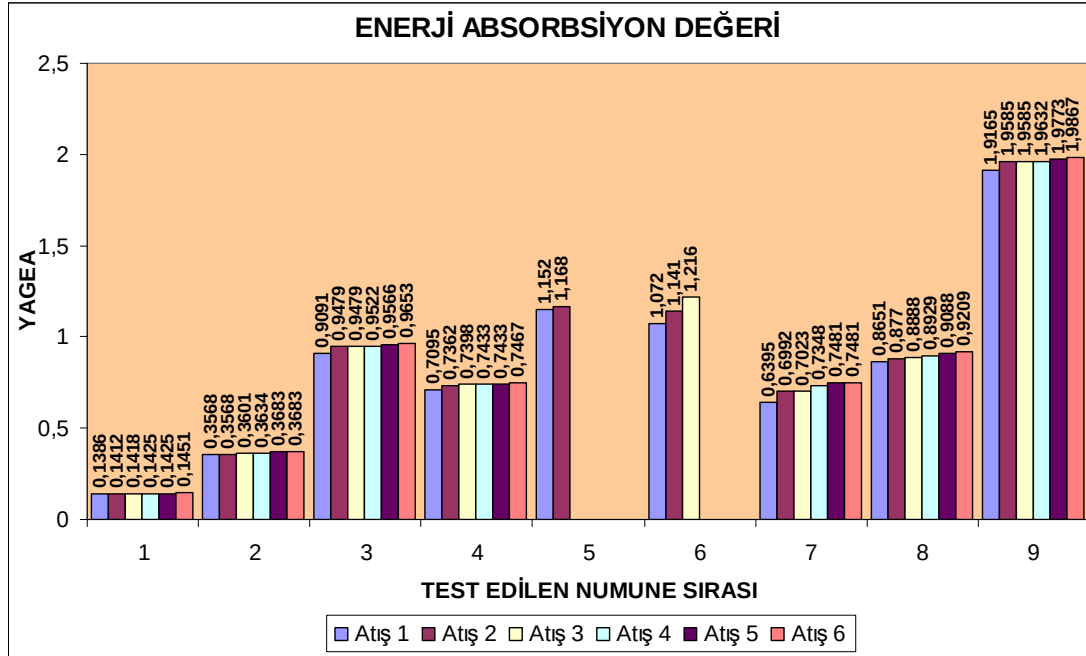
Çarpma Anındaki Hız Değeri(m/sn)	Yapı Ağırlığına Göre Enerji Absorblama Değeri (J/g/m ²)
441	0,8651
444	0,8770
447	0,8888
448	0,8929
452	0,9088
455	0,9209

Çizelge 6.32 'de enerji absorblama değeri koruma seviyesine göre (III) yüksek bir değer almıştır. Bu değer tüm numuneler içerisinde alınan en yüksek değerdir.

Çizelge 6.32 (Polietilen_{HB26})₇₈ hibrit kompozit numune plaka için enerji absorblama değerleri

Çarpma Anındaki Hız Değeri(m/sn)	Yapı Ağırlığına Göre Enerji Absorblama Değeri (J/g/m ²)
827	1,9165
836	1,9585
836	1,9585
837	1,9632
840	1,9773
842	1,9867

Şekil 6.53’de [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₃₀,[(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀]₂₀ numunelerinin enerji absorblama değerleri aynı koruma seviyesinde (III-A) koruma sağlayan diğer numunelere göre daha yüksek bir değer almıştır. (Polietilen_{HB26})₇₈ numune plakası yapılan atışlarda III koruma seviyesinde en yüksek absorblama değerlerini almıştır.



Şekil 6.53 Yapı ağırlığı üzerinden enerji absorbsiyonu ile numuneler arasındaki ilişki.

7. HASAR ANALİZİ

Tasarımı yapılmış hibrit kompozit malzemelere karşı dışardan gelebilecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, bu malzemelerin kendi yapılarına göre beklenen tepkiyi göstermesi istenmektedir. Kullanım amacı ve uygulama yerlerine göre malzemelerin göstereceği tepki farklı şekillerde olabilir. Metal ve metal alaşımlı malzemelerin cevabı elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı çarpma yüzeyinde başlamasıyla beraber kolay bir şekilde tespit edilebilir. Metaller ve metal alaşımlı malzemeler plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde ise darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir veya iç yapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma), matris kırılması, fiber kopması v.b. şeklinde başlayabilir. Kompozit yapılar çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler, yapısal bütünlükte ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Oluşan hasarlar gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlardır.

Tabakalı kompozit malzeme, kalınlık boyunca en büyük darbe enine doğrultuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden biri, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle kompozit malzemelerin enine hasar direnci zayıftır. Tabakalar arası gerilemeler (kesme ve normal) tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir.

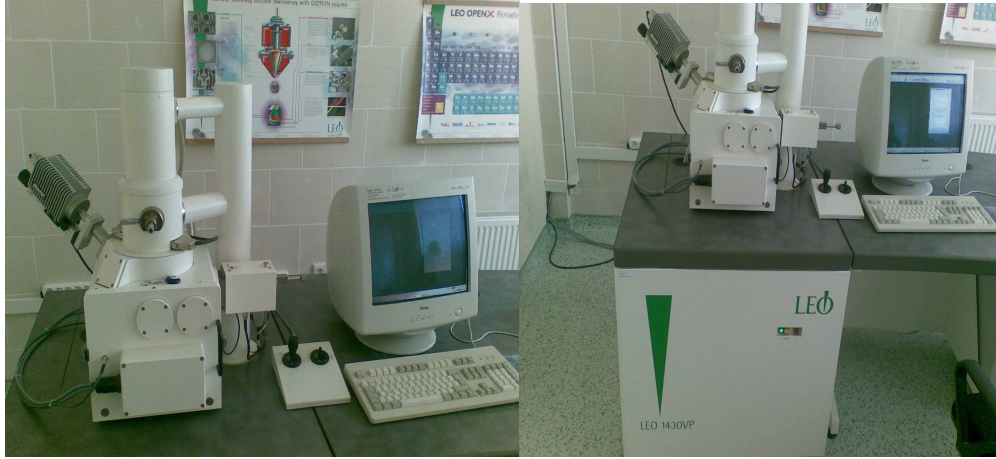
Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılabilecek enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönmüleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı kompozit malzemelerde darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük öneme sahiptir.

5'inci ve 6'ncı bölümlerde hafif silahlara karşı bireysel savunma amaçlı geliştirilen hibrit kompozit malzemelerin tasarımları yapılmış bu yapılar uygun proseslerde üretilmiş ve bu malzemelerin uluslararası standartlar (NIJ 0101.04, STANAG 2920, TS 138 EN 10002-1) ışığında darbe dirençleri belirlenmiştir.

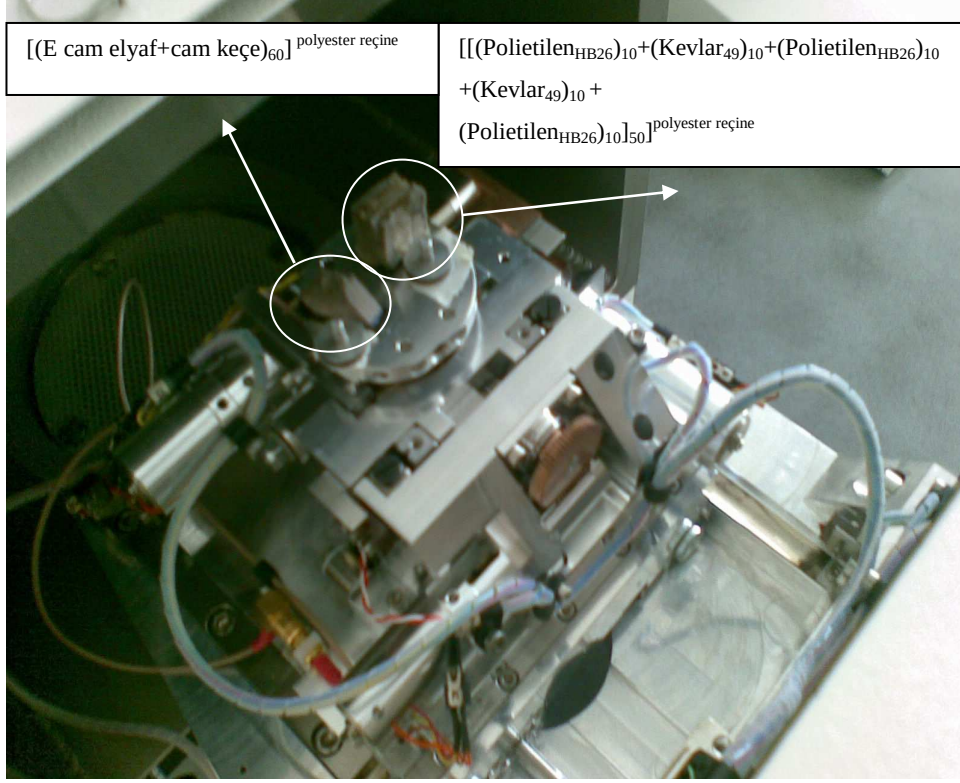
7.1 Tam/Kısmi Delmenin Gerçekleştiği Balistik Hibrit Kompozit Malzemelerin Darbe Sonucu Oluşan Hasar Analizleri

Balistik testler sonucu oluşan darbe hasarları hibrit kompozit malzemelerde analiz edilmiş ve açıklanmıştır.

Yapılan atışlar sonrası atış noktası bölgelerinde özel kesitler alınmıştır. Taramalı elektron mikroskobu(Scanning Electron Microscope-SEM) ile alınan kesit üzerinde görüntüler yakalanmıştır. Şekil 7.1'de **LEO 1430VP** model taramalı elektron mikroskobu görülmektedir. Mikroskoba kesit numuneleri en uygun görüntülerin yakalanabilmesi amacıyla en uygun geometride yerleştirilmiştir(Şekil 7.2).



Şekil 7.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM).



Şekil 7.2 Taramalı elektron mikroskobuna kesit numunelerin yerleştirilmesi.

a) [(E cam elyaf+cam keçe)60] polyester reçine

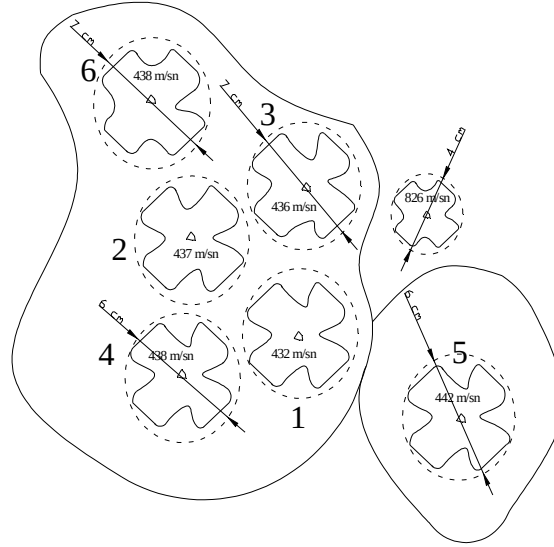


(a)

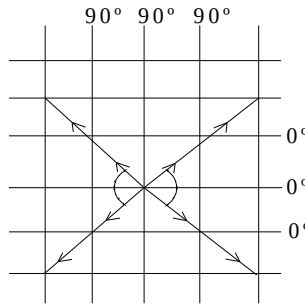
(b)

Şekil 7.3 Atış sonrası; (a) [E cam elyaf/cam /polyester reçine]₆₀ plakası ön yüz, (b) [E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine]₆₀ plakası arka yüz görüntüleri.

Plaka ön yüzünde her atış ile birlikte merminin girdiği nokta merkez olacak şekilde plaka yüzeyine paralel yaklaşık 6 cm ile 7 cm çapında delaminasyon şekilleri oluşmuştur. Bu şekiller tıpkı dört yapraklı yonca bitkisini andırmaktadır(Şekil 7.4). Delaminasyon, fiber yönüne ($0^\circ/90^\circ$) yaklaşık 45° lik açıyla ilerleme göstermiştir(Şekil 7.5).



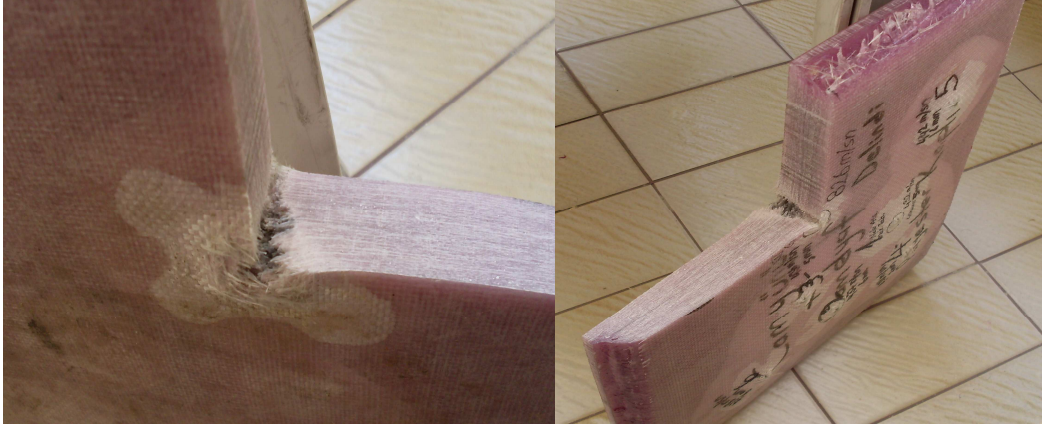
Şekil 7.4 Atış sonrası [E cam elyaf/cam keçe/polyester reçine]₆₀ plakası ön yüz delaminasyon şekilleri.



Şekil 7.5 Atış sonrası delaminasyon ilerlemesi.

[(E cam elyaf+cam keçe)₆₀] polyester reçine numune plakasında tam delmeyi gözlemleyebilmek ve oluşan hasarı analiz edebilmek maksadıyla 7.62 mm 'lık tam metal kaplı (FMJ) NATO normal mermi ile (G3 piyade tüfeği, Kaleşnikof tüfeği., M80 makinalı tüfek) 826 m/sn çarpma hızında 15 metre mesafeden atış yapılmış (NIJ-STD 0101.04) (Şekil 7.3 a,b), taramalı elektron mikroskobu(Scanning Electron Microscope-SEM) görüntülerini yakalayabilmek amacıyla numune plaka üzerinde

tam delmenin gerçekleştiği noktadan 1cm x 1,5cm x 0,6cm (en x boy x derinlik) boyutlarında bir kesit alınmıştır(şekil 7.6-a,b).



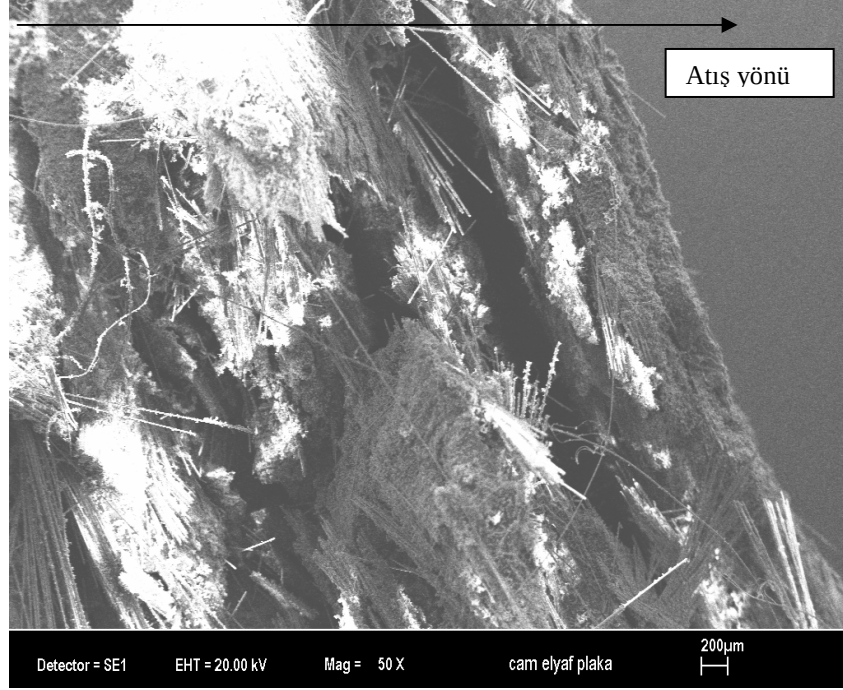
(a)



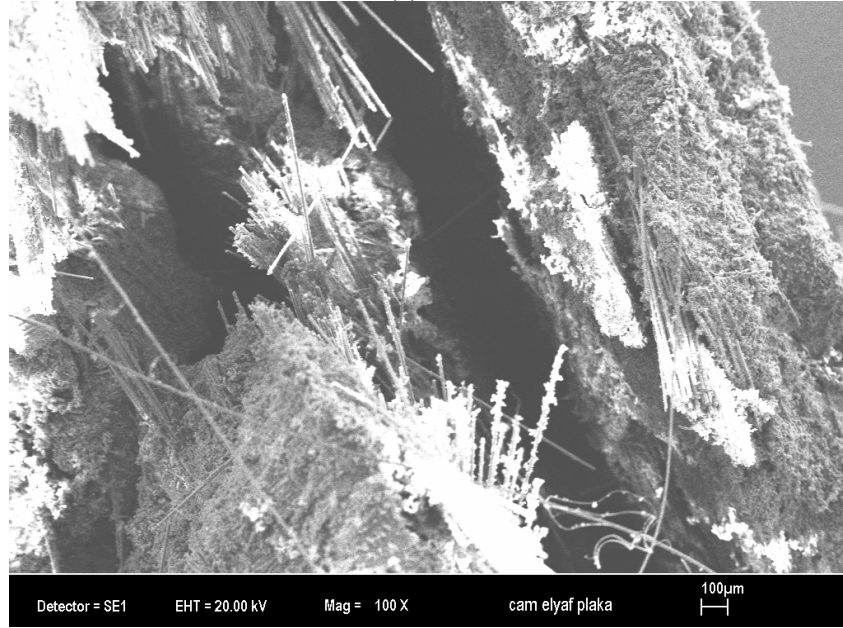
(b)

şekil 7.6 (a) Numune plakadan kesit alınması, (b) numune kesit.

Kesit numune plakanın taramalı elektron mikroskop görüntüleri şekil 7.7’de sunulmuştur.



(a)



(b)

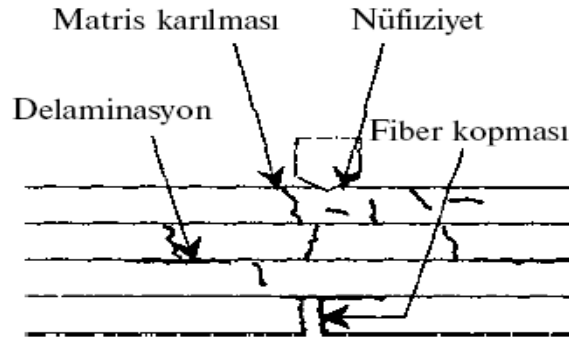
Şekil 7.7 [(E cam elyaf+cam keçe)₆₀] polyester reçine kompozit numune plaka kesiti taramalı elektron mikroskop görüntüleri (a) 50X büyütme oranı (b) 100X büyütme oranı.

Hibrit kompozit malzeme oluşturmada matris elemanının fiberlerle katmanlar arasında her bölgede iç içe ve uyumlu bir birleşim göstermesi çok önemlidir.

Şekil 7.7 (a),(b) 'de görüldüğü gibi fiber matris oranına bakıldığında, (madde 6.2.4-a) bu oranın iki materyal arasında homojen olarak dağılım gösterdiği söylenebilir.

Darbe sonucu oluşan hasar modları şunlardır(Şekil 7.8);

- Nüfuziyet
- Matris modu
- Delaminasyon modu
- Fiber modu

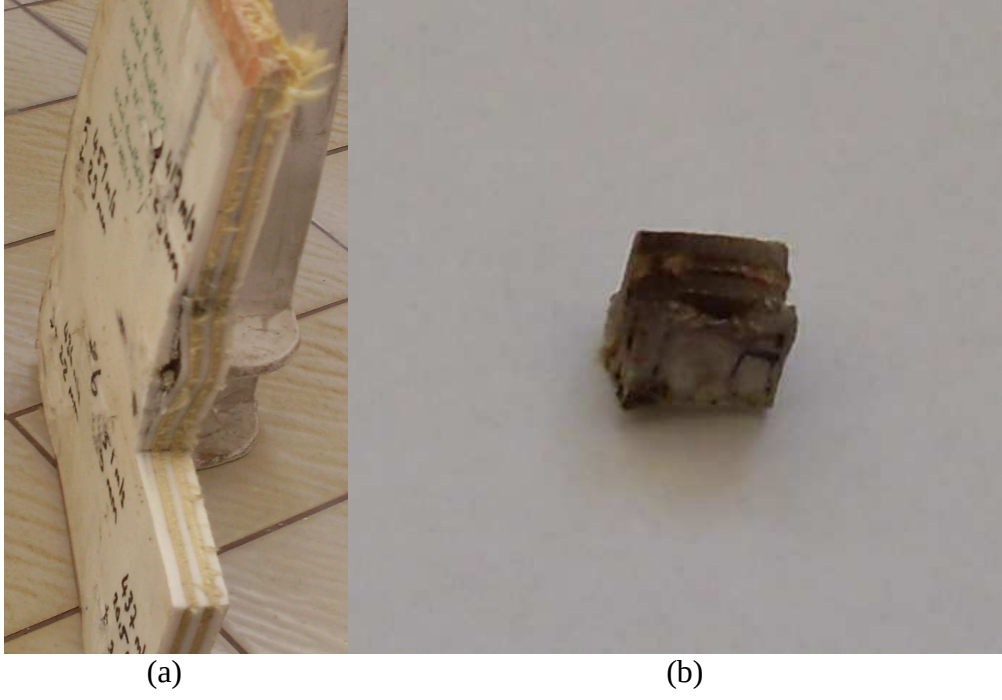


Şekil 7.8 Darbe sonucu oluşan hasar modları.

Darbe ile oluşan hasar modlarından nüfuziyet, hasarın makroskobik bir modudur. Çarpan mermi ile fiber, kritik uzamaya ulaşır ve mühimmatın malzemeye tamamıyla nüfus etmesine müsaade eder. Nüfuziyetin olduğu bölgeden bir parça kesilip dışarı çıkar. Malzemeden bu parçanın kopup dışarı çıkartılmasıyla absorbe edilen enerji, toplam absorbe edilen enerjinin büyük bir kısmını oluşturur(Ceyhun, 2003).

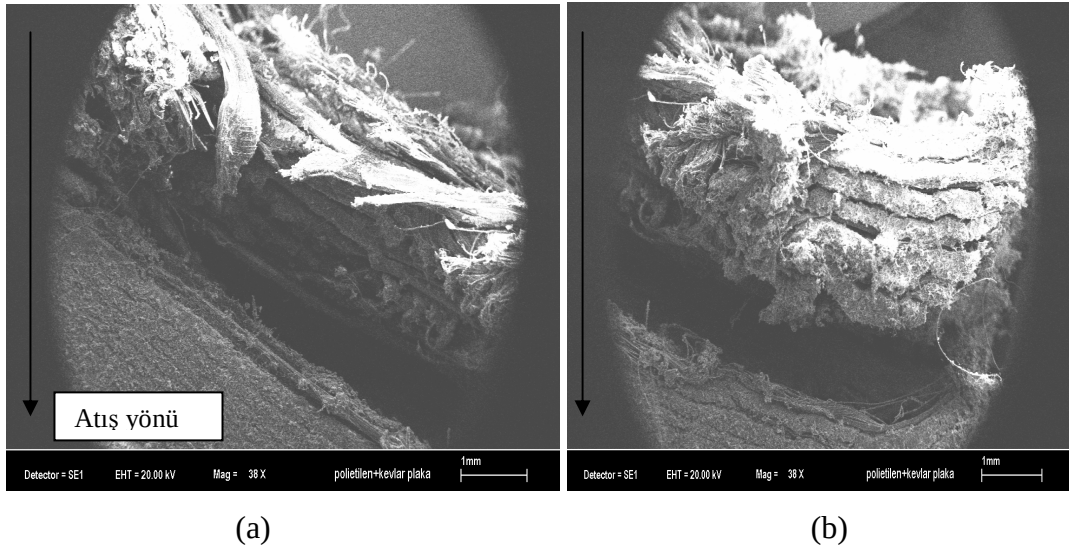
Şekil 7.7 'de görülmektedir ki atış sonrası [(E cam elyaf+cam)₆₀] polyester reçine kompozit numune plakasında matris kırılması fiber kalınlığına paralel meydana gelmiştir. Bunun nedeni basma gerilmesi ve kesme gerilmeleridir.

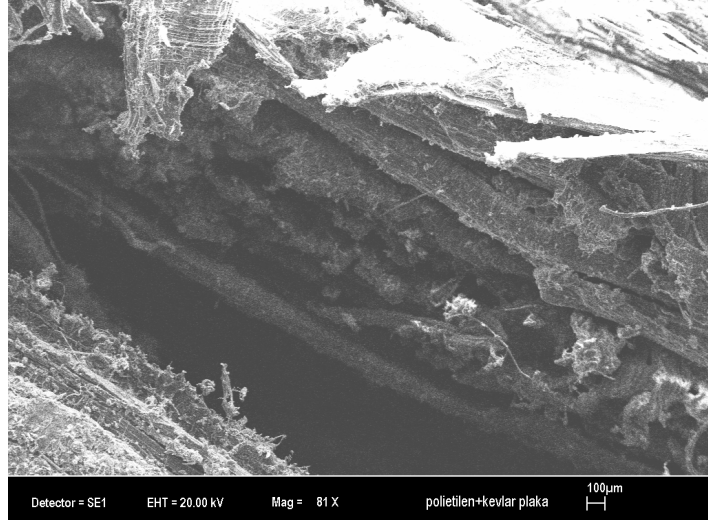
Plaka numune üzerine gelen darbe ile iç yüzeyde fiber/matris tabakaları arasında darbe yönünde eğilme uyumsuzluğu oluşmuştur ve delaminasyon (ayrılma) meydana



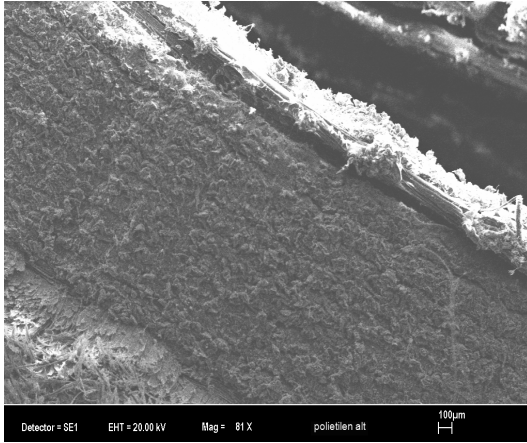
Şekil 7.10 (a) Numune plakadan kesit alınması, (b) numune kesit.

Kesit numune plakada hasarın meydana geldiği kısımdaki[ilk katman (Polietilen_{HB26})₁₀] taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 7.11’de sunulmuştur.

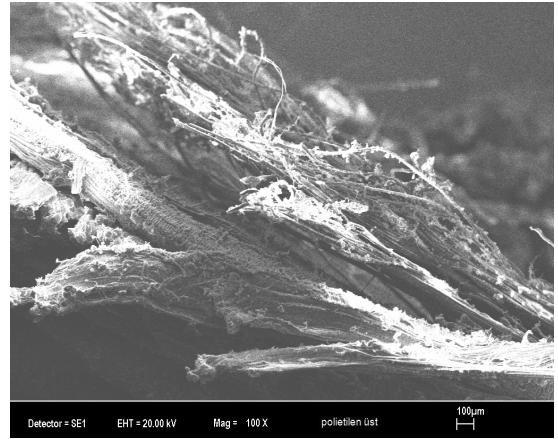




(c)



(d)



(e)

Şekil 7.11 $[(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10} + (\text{Kevlar}_{49})_{10} + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10} + (\text{Kevlar}_{49})_{10} + (\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}]_{50}$ polyester reçine kompozit numune plaka kesitinin taramalı elektron mikroskop görüntüleri. (a) 38X büyütme oranı, (b) 38X büyütme oranı, (c) 81X büyütme oranı, (d) 81X büyütme oranı, (e) 100X büyütme oranı.

Yüksek performanslı lifler “Jel Eğirme” adı verilen teknikle üretilmiştir (madde 4.2.2.7).

Şekil 7.11 'de kısmi delmenin gözlemlendiği $(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}$ katmanında görülmektedir ki yüksek performanslı lifler dokunmamıştır, bu lifler birbirine paralel uzanmaktadır.

Darbe sonucu oluşan hasar modları şunlardır;

- Nüfuziyet
- Delaminasyon modu
- Fiber modu

Çarpan mermi ile fiber, kritik uzamaya ulaşır ve mühimmatın malzemeye tamamiyla nüfus etmesine müsaade eder.

Kalınlık boyunca en büyük darbe enine doğrultuda oluşmuştur. Merminin plakaya delme noktasından nüfus etmesi ile fiberler kritik uzamaya ulaşır. Fiberlerde bir eğilme gözlemlenmiştir(Şekil 7.11-b). Darbeye maruz kalan kesimde büyük ölçüde deformasyon meydana gelmiştir. Takibinde ara yüzeyde delaminasyon olarak ilerleme olmuştur(Şekil 7.11-c). Delaminasyondan hemen sonra fiber kırılmaları ve kopmaları gerçekteşmiştir(Şekil 7.11-e).

8. MALİYET ANALİZİ

Test numunelerinin üretiminde kullanılan; Kevlar₄₉, Polietilen_{HB 26 UHMW-PE}, E cam elyaf dokuma, cam keçe, elyaf tipi polyester reçine malzemelerinin birim malzeme maliyetleri, günümüz kur paritesi ve güncel piyasa fiyatları Çizelge 8.1 'de verilmiştir. Testlerde kullanılmak üzere üretimi yapılan numunelerin, 6.2.4 ve 6.2.5.2.2 maddelerinde belirtilen fiziksel özellikleri ve balistik analizlerine göre, Çizelge 8.2, Çizelge 8.3, Çizelge 8.4, Çizelge 8.5, Çizelge 8.6, Çizelge 8.7, Çizelge 8.8, Çizelge 8.9, Çizelge 8.10 'da balistik kriterler ve maliyet analizleri belirlenmiştir.

Çizelge 8.1 Kompozit kumaşların birim malzeme maliyeti

KEVLAR₄₉ ARAMİD KUMAŞ	
Birim Malzeme Maliyeti (birim fiyat/m ²)	n
POLİETİLEN_{HB 26 UHMW-PE} ZIRH KUMAŞI	
Birim Malzeme Maliyeti (birim fiyat/m ²)	1,6n
E CAM ELYAF	
Birim Malzeme Maliyeti (birim fiyat/m ²)	0,09n
CAM KEÇE	
Birim Malzeme Maliyeti (birim fiyat/m ²)	0,83n
ELYAF TİPİ POLYESTER REÇİNE	
Birim Malzeme Maliyeti (birim fiyat/kg)	0,16n

Çizelge 8.2 [(E cam elyaf+cam)₆₀]^{polyester reçine} hibrit kompozit numune plaka balistik analizi ve maliyet bilgileri

[(E cam elyaf+cam keçe) ₆₀] ^{polyester reçine} Hibrit Kompozit Numune				
Numune Boyutu (m ²)	0,1225			
Numune Ağırlığı (g)	5000			
Kullanılan Malzeme (E cam elyaf/Cam /Polyester Reçine)	E cam elyaf/ Cam keçe/Polyester Reçine			
Kat Adedi/ Ağırlığı (Ad.)/(Kg)	60	/	60	/ 0,410
Ortalama Çöküntü) Miktarı (mm	6,1			
Koruma Seviyesi (NIJ STD 0101.04)	III-A			
Numune Maliyeti (fiyat)	6,82n			

Çizelge 8.3 [(Kevlar₄₉)₂₀]+[(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀]^{polyester reçine}+(Kevlar₄₉)₁₀ +[(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀]^{polyester reçine}]₅₀ hibrit kompozit numune plaka balistik analizi ve maliyet bilgileri

[(Kevlar ₄₉) ₂₀]+[(E cam elyaf+Cam keçe) ₁₀] ^{polyester reçine} +(Kevlar ₄₉) ₁₀ +[(E cam elyaf+Cam keçe) ₁₀] ^{polyester reçine}] ₅₀ Hibrit Kompozit Numune				
Numune Boyutu (m ²)	0,09			
Numune Ağırlığı (g)	1970			
Kullanılan Malzeme (E cam elyaf/Cam /Polyester Reçine)	Aramid k. /E cam e. /Cam k. /Polyester R.			
Kat Adedi/ Ağırlığı (Ad.)/(Kg)	30	/	20	/ 20 / 0,150
Ortalama Çöküntü) Miktarı (mm	17,1			
Koruma Seviyesi (NIJ STD 0101.04)	III-A			
Numune Maliyeti (fiyat)	4,38n			

Çizelge 8.4 [Kevlar₄₉]₄₀ hibrit kompozit numune balistik analizi ve maliyet bilgileri

[Kevlar₄₉]₄₀ Hibrit Kompozit Numune	
Numune Boyutu (m ²)	0,09
Numune Ağırlığı (g)	745
Kullanılan Malzeme (Kevlar ₄₉ Aramid kumaş/Polietilen)	Aramid kumaş / Polietilen
Kat Adedi (Ad.)	40 / -
Ortalama Çöküntü) Miktarı (mm	28,5
Koruma Seviyesi (NIJ STD 0101.04)	III-A
Numune Maliyeti (fiyat)	3,6n

Çizelge 8.5 [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₅₀ hibrit kompozit numune balistik analizi ve maliyet bilgileri

[(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₅₀ Hibrit Kompozit Numune	
Numune Boyutu (m ²)	0,09
Numune Ağırlığı (g)	950
Kullanılan Malzeme (Kevlar ₄₉ Aramid kumaş/Polietilen)	Aramid kumaş / Polietilen
Kat Adedi (Ad.)	20 / 30
Ortalama Çöküntü Miktarı (mm)	19,5
Koruma Seviyesi (NIJ STD 0101.04)	III-A
Numune Maliyeti (fiyat)	6,12n

Çizelge 8.6 [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₃₀ hibrit kompozit numune balistik analizi ve maliyet bilgileri

[[Kevlar ₄₉] ₁₅ +(Polietilen _{HB26}) ₁₅] ₃₀ Hibrit Kompozit Numune			
Numune Boyutu (m ²)	0,09		
Numune Ağırlığı (g)	610		
Kullanılan Malzeme (Kevlar ₄₉ Aramid kumaş/Polietilen)	Aramid kumaş / Polietilen		
Kat Adedi (Ad.) *	15	/	15
Ortalama Çöküntü Miktarı (mm)	24		
Koruma Seviyesi (NIJ STD 0101.04)	III-A		
Numune Maliyeti (fiyat)	3,51n		
* [[Kevlar ₄₉] ₁₅ +(Polietilen _{HB26}) ₁₅ +(Kevlar ₄₉) ₅ +(Polietilen _{HB26}) ₁₅] ₅₀ numunesinin ilk iki katmanına [[[Kevlar ₄₉] ₁₅ +(Polietilen _{HB26}) ₁₅] ₃₀ yapılan atışlar			

Çizelge 8.7 [(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀]₂₀ hibrit kompozit numune balistik analizi ve maliyet bilgileri

[(Kevlar ₄₉) ₁₀ +(Polietilen _{HB26}) ₁₀] ₂₀ Hibrit Kompozit Numune			
Numune Boyutu (m ²)	0,09		
Numune Ağırlığı (g)	360		
Kullanılan Malzeme (Kevlar ₄₉ Aramid kumaş/Polietilen)	Aramid kumaş / Polietilen		
Kat Adedi (Ad.)	10	/	10
Ortalama Çöküntü Miktarı (mm)	28,6		
Koruma Seviyesi (NIJ STD 0101.04)	III-A		
Numune Maliyeti (fiyat)	2,34n		

Çizelge 8.8 $[(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}+(\text{Kevlar}_{49})_{10}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}+(\text{Kevlar}_{49})_{10}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}]_{50}^{\text{polyester reçine}}$ hibrit kompozit numune plaka balistik analizi ve maliyet bilgileri

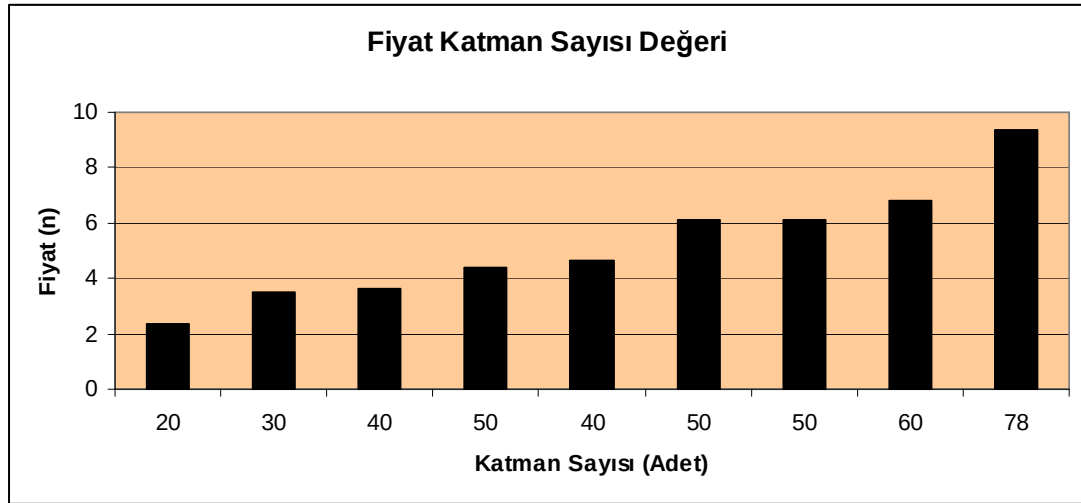
$[(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}+(\text{Kevlar}_{49})_{10}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}+(\text{Kevlar}_{49})_{10}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}]_{50}^{\text{polyester reçine}}$				
Hibrit Kompozit Numune				
Numune Boyutu (m ²)	0,09			
Numune Ağırlığı (g)	1010			
Kullanılan Malzeme (E cam elyaf/Cam /Polyester Reçine)	Aramid kumaş /Polietilen /Polyester Reçine			
Kat Adedi/ Ağırlığı (Ad.)/(Kg)	20	/	30	/ 0,06
Ortalama Çöküntü) Miktarı (mm)	22			
Koruma Seviyesi (NIJ STD 0101.04)	III-A			
Numune Maliyeti (fiyat)	6,13n			

Çizelge 8.9 $[(\text{Kevlar}_{49})_1+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_1+\dots]_{40}$ hibrit kompozit numune balistik analizi ve maliyet bilgileri

$[(\text{Kevlar}_{49})_1+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_1+\dots]_{40}$				
Hibrit Kompozit Numune				
Numune Boyutu (m ²)	0,09			
Numune Ağırlığı (g)	835			
Kullanılan Malzeme (Aramid(soft)/Polietilen)	Aramid kumaş / Polietilen			
Kat Adedi (Ad.)	20	/	20	
Ortalama Çöküntü Miktarı (mm)	33,1			
Koruma Seviyesi (NIJ STD 0101.04)	III-A			
Numune Maliyeti (fiyat)	4,68n			

Çizelge 8.10 (Polietilen_{HB26})₇₈ hibrit kompozit numune plaka balistik analizi ve maliyet bilgileri

(Polietilen _{HB26}) ₇₈ Hibrit Kompozit Numune	
Numune Boyutu (m ²)	0,075
Numune Ağırlığı (g)	1695
Kullanılan Malzeme (Aramid(soft)/Polietilen)	Aramid kumaş / Polietilen
Kat Adedi (Ad.)	— / 78
Ortalama Çöküntü Miktarı (mm)	34,3
Koruma Seviyesi (NIJ STD 0101.04)	III
Numune Maliyeti (fiyat)	9,36 n



Şekil 8.1 Hibrit kompozit numunelerinin kat adedine göre maliyet analizi.

NIJ STD 0101.04 standardına göre istenilen koruma seviyesinde (III/ III-A) üretilen numunelerin maliyet analizleri göstermektedir ki [(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀]₂₀ en **ekonomik** kullanım seçeneği olmaktadır. (Polietilen_{HB26})₇₈ hibrit kompozit numunesi diğer numunelere göre bireysel savunmada koruma seviyesi (III) daha yüksektir. 9,36n oran ile en yüksek mali değeri almıştır(Şekil 8.1).

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kompozit malzeme ürün tanımı ve kapsamından bahsedilmiş, malzemelerin üretim yöntemleri tanıtılmış, kullanım alanları ve elde edilen ürünlerin avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir. Balistik koruyucu zırh malzemeleri hafif silahlara karşı bireysel savunma amaçlı tasarlanmıştır. Hibrit kompozit zırh numuneleri, fiziksel ve balistik dayanımı ölçmek maksadıyla; üretim prosesleri takip edilerek hazırlanmış ve oda koşullarında şartlandırılmıştır.

Farklı çap ve kalibredeki mermilerle (9 mm FMJ, 7,62 mm Normal NATO) uluslararası standartlar (NIJ STD 0101-04, STANAG 2920) ışığında balistik test laboratuvarında balistik test düzeneği kullanılarak zırh numunelerine atışlar yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Yapılan bu çalışmalar ile hafif silahlara karşı bireysel korumada kullanılan kompozit malzemelerin farklı kat adetlerinde ve kalınlıkta hibrid biçimde gösterdiği tepkiler gözlenmiş ve yorumlanmıştır. Hasar analizlerinin tespiti amacıyla taramalı elektron mikroskobu(Scanning Electron Microscope-SEM) ile kısmi delme ve tam delmenin gerçekleştiği $[(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}+(\text{Kevlar}_{49})_{10}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}+(\text{Kevlar}_{49})_{10}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}]^{\text{polyester reçine}}, [(\text{E cam elyaf}+\text{cam keçe})_{60}]^{\text{polyester reçine}}$ numune plakalarının görüntüleri yakalanmıştır.

Günümüzde kullanılan balistik koruyucu yapıların yanı sıra farklı hibrit kompozit tasarımlarla koruma seviyesi, ağırlık, kullanım kolaylığı ve maliyet analizleri açısından bakış açıları geliştirilmiştir.

a) $[(\text{E cam elyaf}+\text{cam keçe})_{60}]^{\text{polyester reçine}}$ kompozit numune plakasına III-A koruma seviyesinde toplam 6 atış yapılmıştır(NIJ-STD 0101.04). III-A koruma seviyesi standartlarında hız değeri ortalaması 425 m/sn, en yüksek çöküntü miktarı 44 mm iken yapılan atışlar sonucu 437,1 m/sn ortalama hız değeri yakalanmış ve çöküntü değeri çok düşük bir değerde (ortalama 6 mm) kalmıştır. Ağırlık, üretim

süresi ve maliyet (Çizelge 8.2) göz önüne alındığında plakanın kullanılabilirliği azalmaktadır.

b) Değişik katmanlarda hazırlanan [(Kevlar₄₉)₂₀+(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀]^{polyester reçine}+(Kevlar₄₉)₁₀+(E cam elyaf+Cam keçe)₁₀]^{polyester reçine}]₅₀ balistik performansı III-A koruma seviyesine göre yapılan atışlarda (V_{ort} 438,3 m/sn) olumlu sonuçlanmıştır. Fakat uluslararası standartlarına göre (NIJ-STD 0101.04) ağırlık faktörü (30cmx30cm: 1970 gr) belirlenen koruma seviyesine göre beklenenin üstündedir.

c) [Kevlar₄₉]₄₀ kompozit numunesine III-A koruma seviyesinde yapılan atışlar (V_{ort} 435,6 m/sn) sonucunda olumlu sonuçlar alınmıştır. [Kevlar₄₉]₄₀ numunesinin ağırlık faktörü (30cmx30cm: 745 gr), şekil alabilirliği ve yumuşak yapısı itibariyle bireysel korumada kullanılması uygun görülmektedir. [Kevlar₄₉]₄₀ numunesinin kullanım alanlarını değerlendirecek olursak; kompozit yelek, kompozit gizli yelek, mayın elbisesi, açılır kalkan çanta, bomba bidonu, bomba battaniyesi, balistik perde vb. ürünler örnek olarak gösterilebilir.

ç) [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅+(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₅₀, kompozit numunesine, III-A koruma seviyesinde yapılan atışlar (V_{ort} :434,6 m/sn) sonucunda olumlu sonuç vermiştir. Kompozit numune önceden de belirtildiği gibi hibrid (karma) bir yapı teşkil etmektedir. Polietilen zırh kumaşının gösterdiği performansa bakıldığında **preslenmeden** kullanılabileceği değerlendirilmiştir(madde 6.2.5.2.2-d). Oluşturulan hibrid yapının kullanım alanları; Kompozit yelek, kompozit gizli yelek, açılır kalkan çanta, bomba bidonu, bomba battaniyesi, balistik perde vb. gibi ürünlerde balistik koruyucu olarak yer alabilir.

d) [(Kevlar₄₉)₁₅+(Polietilen_{HB26})₁₅]₃₀, kompozit numunesine III-A koruma seviyesinde yapılan atışlar (V_{ort} :436,5 m/sn) olumlu sonuçlanmış, ve çöküntü miktarı istenilen seviyelerde kalmıştır(Çöküntü_{ort}: 24 mm). Kullanılan kat adedi, maliyet analizi, üretim prosesi vb. unsurlar göz önüne alındığında istenilen şekilde tasarlanarak birim üründe ekonomi ve ağırlık bakımından **tasarruf ve kolaylık**

sağlayacaktır. Oluşturulan hibrid yapının kullanım alanları; Kompozit yelek, kompozit gizli yelek, açılır kalkan çanta, bomba bidonu, bomba battaniyesi, balistik perde vb. gibi ürünlerde balistik koruyucu olarak yer alabilir.

e) [(Kevlar₄₉)₁₀+(Polietilen_{HB26})₁₀]₂₀, kompozit numunesine III-A koruma seviyesinde yapılan atışlar (V_{ort} :411,6 m/sn) olumlu sonuçlanmış, ve çöküntü miktarı istenilen seviyelerde kalmıştır(Çöküntü_{ort}: 28,6 mm). Kullanılan kat adedi, maliyet analizi, üretim prosesi vb. unsurlar göz önüne alındığında istenilen şekilde tasarlanarak birim üründe ekonomi ve ağırlık bakımından **tasarruf ve kolaylık** sağlayacaktır. Oluşturulan hibrid yapının kullanım alanları; Kompozit yelek, kompozit gizli yelek, açılır kalkan çanta, bomba bidonu, bomba battaniyesi, balistik perde vb. gibi ürünlerde balistik koruyucu olarak yer alabilir.

f) [(Kevlar₄₉)₈+(Polietilen_{HB26})₈]₁₆, kompozit numunesine III-A koruma seviyesinde yapılan atışlar (V_{ort} :392,5 m/sn) olumsuz sonuçlanmıştır. Çöküntü miktarı kritik seviyelerdedir(Çöküntü_{ort}: 41,75 mm). İstenilen koruma seviyesine göre kullanılan toplam kat adedi yetersiz kalmıştır.

g) [(Kevlar₄₉)₈+(Polietilen_{HB26})₈]₁₆, kompozit numunesine yapılan atışlar (V_{ort} :392,5 m/sn) olumsuz sonuçlanmıştır. Çöküntü miktarı kritik seviyelerdedir(Çöküntü_{ort}: 41,75 mm). Çöküntünün travma çöküntüsü sınırına (travma çöküntü sınır değeri = 44 mm) çok yaklaştığı/geçtiği ve hayati tehlike bölgesinde olduğu gözlenmiştir. İstenilen koruma seviyesine göre kullanılan toplam kat adedi yetersiz kalmıştır.

h) [(Kevlar₄₉)₅+(Polietilen_{HB26})₅]₁₀, kompozit numunesine yapılan atış (V_1 :340 m/sn) ile tam delinme gözlenmiştir. Belirlenen toplam kat adedinde tabanca, makinalı tabanca tehditlerine karşı balistik uygulamalarda kullanılması uygun değildir.

ı) $[(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}+(\text{Kevlar}_{49})_{10}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}+(\text{Kevlar}_{49})_{10}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{10}]_{50}^{\text{polyester reçine}}$ plaka numunesine, III-A koruma seviyesinde yapılan atışlar (V_{ort} 439,8 m/sn) olumlu sonuçlanmıştır. Yapılan atışlar neticesinde oluşan çöküntü miktarları (20~23,5 mm < 44 mm) $[(\text{Kevlar}_{49})_{15}+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15}+(\text{Kevlar}_{49})_5+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_{15}]_{50}$ numune yapısının değerlerine yakındır. Koruma seviyesi III-A olacak şekilde plaka ile zırhlandırılması dışınülen; açılır kalkan çanta, araç zırhlandırılması, güvenlik kabinleri vb. uygulamalarda kullanılabilir.

i) $[(\text{Kevlar}_{49})_1+(\text{Polietilen}_{\text{HB26}})_1+...]_{40}$ kompozit numunesine, III-A koruma seviyesinde yapılan atışlar (V_{ort} 447,8 m/sn) olumlu sonuç vermiştir. Kompozit numune önceden de belirtildiği gibi 1 kat aramid kumaş, 1 kat polietilen zırh kumaş olacak şekilde hibrid (karma) bir yapı teşkil etmektedir. öküntü miktarları (28~39 mm < 44 mm) aynı kullanım alanlarını hedefleyen madde c ve madde  'deki numune değerlerine göre tehlike sınırına daha yakın olduğu gözlenmiştir. Ayrıca $[\text{Kevlar}_{49}]_{40}$ numunesine oranla daha ağırdır(805 gr). Kullanım alanlarını değerlendirecek olursak; kompozit yelek, kompozit gizli yelek, mayın elbisesi, açılır kalkan çanta, bomba bidonu, bomba battaniyesi, balistik perde vb. ürünler örnek olarak gösterilebilir.

j) ($\text{Polietilen}_{\text{HB26}}$)₇₈ plaka numunesi, 15 metre mesafeden III koruma seviyesinde yapılan atışlarda (V_{ort} 836,3 m/sn) mermi mühimmatını istenen düzeyde durdurmuştur. Oluşan çöküntü miktarları yapının sağladığı koruma seviyesine göre iyi derecededir. Performansına göre yapının zırhlandırma uygulamalarından bahsedecek olursak; Kompozit yelek zırh plakası, helikopter taban zırhı, araç zırhı, açılır kalkan çanta, güvenlik kabinleri vb. gibi alanlarda balistik koruyucu olarak yer alabilir.

10. KAYNAKLAR

1. Akovalı G., “Polimerik İleri Malzemeler” ,“Metalurji Mühendisleri Odası Yayını, Ekim Vol. 20, s32, 1996.
2. Candan, C., The Examination Of Terminal Ballistic Qualifications Of High Density Polythene (UHMW-PE) Armor Plaque Which Are Produced With Pressing And Without Rassing Against Small Arms, 176-184, 2007.
3. Candan, C., Kompozit Zırh İmalat Parametrelerinin Terminal Balistik Özellikler Üzerine Etkileri, 14-87, 2005.
4. Cam Elyaf, Bülten Sayı 6, Cam Elyaf Sanayi A.S., 1997.
5. Caprino, C., Ballistic Impact ;Behaviour Of Stitched Graphite/Epoxy Laminates, Composites Science And Technology, 325–335, 2007.
6. Ceyhun, V., Turan, M., Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı,Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Mühendisleri Odası Yayını, Mühendis ve Makine, Cilt 44, Sayı 516, 2003.
7. Gower, H., L., Ballistic Impact Response Of Laminated Composite Panels, International Journal Of Impact Engineering, 2007.
8. Havacılık Sanayinde Kullanılan Plastik Matrisli Kompozit Malzemeler Hava İkmal Bakım Merkezi, 1. Ana Jet Üssü Komutsnlığı, Eskişehir, 2005.
9. Karahan, M., An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics,499–510, 2008.
10. Khojin, S., A., Temperature effects on Kevlar/hybrid and carbon fiber composite

sandwiches under impact loading,197–206, 2007.

11. NIJ STD 0101-04 Balistic Resistance of Personnel Body Armor, Personnel Korumasında Kullanılan Malzemelerin Balistik Dayanımları Dokümanı.

12. . Philips N. L., Design with Advance Composite Materials, Springer-Verlag, The Design Council, Great Britain Younnossi O., Kennedy M., Graser J. C I., 2001.

13. Ozek, T., Hafif Silahlara Karşı Zırh Yapımında Kullanılan Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi, 44-90, 2005.

14. Olcay Y., Akyol M., Gemci R., Polimer Esaslı Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Arabirim Mukavemeti Üzerine Farklı Kür Metodlarının Etkisinin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık fakültesi, Cilt 7, Sayı 1, 2002.

15. STANAG 2920 Balistic Test Method For Personnel Armor, Personnel Korumasında Kullanılan Malzemelerin Balistik Test Metotları Dokümanı.

16. Şenel F., Balya B., Parnas L., İleri Kompozit Malzemelerin Balistik Analizi, Savunma Teknolojileri Kongresi, ODTÜ, Ankara, 1-10, 2004.

17. Ünal O., Yapı Malzemesi, Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Bölüm 6, S:1-10.

18. Temiz, S., An investigation about ballistic fabrics and test methods, 3-95, 2005.

19. Wambua, P., The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles, Composite Structures, 232–240, 2007.

20. Yavas, M.O., High Performance Strategical Composite Materials, 1-42, 2008.

21. Zhang, G., M., Effect of frame size, frame type, and clamping pressure on the ballistic performance of soft body armor, Part B 2007.