



**GRAFEN KATKILI ARAMİD ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN
MEKANİK VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilgehan ŞAHİN

Danışman

Prof.Dr. Atilla EVCİN

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Haziran 2022

Bu tez çalışması 20.FEN.BİL.29 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GRAFEN KATKILI ARAMİD ESASLI KOMPOZİT
MALZEMELERİN MEKANİK VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ

Bilgehan ŞAHİN

Danışman

Prof.Dr. Atilla EVCİN

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ ANABİLİM DALI

Haziran 2022

TEZ ONAY SAYFASI

Bilgehan ŞAHİN tarafından hazırlanan “Grafen Katkılı Aramid Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Balistik Özelliklerinin Değerlendirilmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 24/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof.Dr. Atilla EVCİN

Başkan : Prof. Dr. İbrahim GÜNEŞ
Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Atilla EVCİN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İsmail YILDIZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar MYO

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahimEROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

24 / 06 / 2022

Bilgehan ŞAHİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GRAFEN KATKILI ARAMİD ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK VE BALİSTİK ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bilgehan ŞAHİN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Atilla EVCİN

Bu araştırmada, aramid esaslı kompozit plakalara farklı miktarlarda grafen ve epoksi reçine karışımı takviye ederek nanokompozit yapıda numuneler elde edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan grafen nano tabakalara; FTIR, Raman analizleri yapılarak karakteristik pikler elde edilmiştir. Balistik kompozitler için referans olabilecek bir balistik plakanın üretim prosesi ayrıntılarıyla açıklanmıştır. Grafen nano tabaka takviyeli ve takviyesiz balistik plakalara, balistik test laboratuvarında NIJ-STD-0101.04 standardında atış testleri uygulanmış ve test sonuçlarının kıyaslaması yapılmıştır. Atış testleri sonucunda bir plaka haricinde grafen ve epoksi reçine takviyeli balistik plakalarda başarılı sonuçlar elde edilememiş ve bunun epoksi reçinenin aramid katmanların esneklik ve enerji sönümleme özelliklerine olumsuz tesir etmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Söz konusu balistik nanokompozit numunelerin dijital fotoğrafları çekilerek balistik etki altında oluşan delinme, fiber kopması, delaminasyon gibi enerji yayılım mekanizmaları incelenmiştir. Çekme testleri sonucunda ağırlıkça % 0,5 ve 1 grafen katkı numunelerin nihai gerilme kuvvetlerinin artarak mekanik özelliklerinde iyileşme olduğu görülmüştür.

2022, xi + 72 sayfa

Anahtar Kelimeler: Grafen, Aramid, Kompozit, Balistik Test, Mekanik Karakterizasyon

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EVALUATION OF THE MECHANICAL AND BALLISTIC PROPERTIES OF ARAMID-BASED COMPOSITE MATERIALS WITH GRAPHENE REINFORCEMENT

Bilgehan ŞAHİN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Nanoscience and Nanotechnology

Supervisor: Prof. Atilla EVCİN

In this research, nanocomposite samples were obtained by reinforcing different amounts of graphene and epoxy resin mixture to aramid-based composite plates. Characteristic peaks were obtained by performing FTIR and Raman analyzes on graphene nanoplatelets used in the experimental study. The production process of a ballistic plate, which can be a reference for ballistic composites, is explained in detail. Graphene nanoplatelet reinforced and non-reinforced ballistic plates were exposed shooting test in the ballistic test laboratory in accordance with the NIJ-STD-0101.04 standard and the test results were compared. As a result of the shooting tests, successful results were not obtained in ballistic plates reinforced with graphene and epoxy resin, except for one plate and it was evaluated that this was due to the negative effect of epoxy resin on the flexibility and energy absorption properties of aramid layers. Energy dissipation mechanisms such as perforation, fiber breakage and delamination, which occur under ballistic effect, were investigated in digital photographs of the aforementioned ballistic nanocomposite samples. As a result of the tensile tests, it was observed that the ultimate tensile strength of the 0.5% and 1% by weight graphene added samples increased and their mechanical properties improved.

2022, xi + 72 pages

Keywords: Graphene, Aramid, Composite, Ballistic Test, Mechanical Characterization.

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Atilla EVCİN'e teşekkür ederim. Araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Araştırma süresince 20.FEN.BİL.29 proje numarası ile destek sağlayan BAPK'ya teşekkür ederim.

Mekanik testlerin yapılması sürecinde desteklerini esirgemeyen CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojilerinden Emre GÖKKAYA'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitim ve tez yazım sürecinde her zaman yardım ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Elif TÜRK ŞAHİN'e ve canım oğlum Rüzgar ŞAHİN 'e teşekkür ederim.

Bilgehan ŞAHİN
Afyonkarahisar 2022

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	i
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	4
2.1 Nanoteknoloji, Nanobilim ve Nanomalzeme.....	4
2.1.1 Savunma Alanında Nanoteknoloji.....	4
2.1.2 Nanomalzemelerin Nanokompozitlerde ve Balistik Zırhlarda Kullanımı... ..	7
2.2 Kompozit ve Nanokompozitler.....	8
2.3 Polimer Matris	9
2.3.1 Epoksi Reçine	10
2.4 Elyaf Takviyeler	11
2.4.1 Aramid	13
2.4.2 Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE)	16
2.4.3 Zylon (PBO/P-phenylene-2,6-benzobisoxazole)	18
2.5 Grafen ve Grafen Esaslı Nanokompozitler	19
2.5.1 Grafen ve Önemi.....	19
2.5.2 Grafenin Özellikleri	20
2.5.3 Grafen Oksit (GO)	21
2.6 Kompozitlerin Balistik Etki Altında Davranışı	22
2.6.1 Kompozitin Yapıların Darbe Anında Tepkileri	23
2.6.2 Kompozitlerin Enerji Yayılım Mekanizmaları	24
2.6.3 Nanokompozitlerin Balistik Performansına Nanopartiküllerin Etkisi.....	26
2.7. Balistik Koruma.....	27
2.7.1 Balistik Zırhların Tarihi	28

2.7.2 Balistik Koruyucu Malzemelerin Türleri.....	31
2.7.2.1 Sert Vücut Zırhları	31
2.7.2.2 Yumuşak Vücut Zırhları	32
2.7.3 Balistik Koruma Mekanizması	33
2.7.4 Balistik Test Standartları	34
2.7.4.1 NIJ-STD-0101.04 Standardı.....	35
3. MATERYAL ve METOT	38
3.1 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri	38
3.1.1 Aramid Kumaş.....	38
3.1.2 Epoksi Reçine	39
3.1.3 Grafen Nano Tabaka.....	40
3.2 Deneysel Çalışmada Kullanılan Cihazlar	40
3.2.1 Mekanik Karıştırıcı.....	40
3.2.2. Hassas Terazî	41
3.2.3 FTIR (Fourier Transform Infrared/Fourier Dönüşümlü Kızılötesi) Cihazı.....	41
3.2.4 SEM (Scanning Electron Microscope/ Taramalı Elektron Mikroskobu) ..	42
3.2.5 Raman Cihazı.....	42
3.2.6 Çekme Testi Cihazı.....	43
3.2.7 Otomatik Kumaş Serim ve Kesim Makinesi	43
3.2.8 Hidrolik Pres.....	44
3.2.9 Atış Test Düzenegi	45
3.3 Deneysel Çalışmada Kullanılan Grafenin Karakterizasyonu	45
3.3.1 FTIR Analizi	45
3.3.2 Raman Spektroskopisi	45
3.3.3 SEM Analizi	46
3.4 Numunelerin Üretim ve Test Prosesi.....	46
3.4.1 Balistik Test Plakalarının Üretimi	47
3.4.2 Balistik Test Plakalarına Atış Yapılması	49
3.4.3 Balistik Test Plakalarının Dijital Fotoğraf Makinesinde Görüntülenmesi ..	51
3.4.4 Numunelere Çekme Testi Yapılması.....	52
4. BULGULAR	54
4.1 FTIR Analizi Sonucu	54

4.2 Raman Spektroskopisi Sonucu	54
4.3 SEM Analizi Sonucu	55
4.4 Balistik Test Sonuçları.....	56
4.5 Çekme Testi Sonuçları.....	61
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	64
6. KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	72



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

B ₄ C	Bor karbür
PBO	P-phenylene-2,6-benzobisoxazole
PVB	Polivinil bütiral
m/s	Metre bölü saniye
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
cm	Santimetre
mm	Milimetre

Kısaltmalar

FMJ	Full Metal Jacket
FTIR	Fourier Transform Infrared
GO	Grafen Oksit
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NIJ	National Institute of Justice
PE	Polietilen
SEM	Scanning Electron Microscope
STD	Standard
TS	Türk Standardı
UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene
UTS	Ultimate Tensile Strength

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Maslow'un ihtiyaçlar piramidi.....	1
Şekil 2.1 Savunma ve güvenlik alanında nanoteknoloji uygulamaları	5
Şekil 2.2 Matrislerin polimer yapısı	10
Şekil 2.3 Aramid liflerin moleküler yapısı	15
Şekil 2.4 Bazı balistik fiberlerin ses iletim hızı	18
Şekil 2.5 Zylon'un diğer elyaflar ile mukayesesi	19
Şekil 2.6 Grafen oksitin yapısı	21
Şekil 2.7 Grafen ve grafen oksitin altıgen yapısı	22
Şekil 2.8 Darbe tepkisinin şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.9 Darbe etkileri için standart hız sınıflandırması	24
Şekil 2.10 Kompozitlerde hasar oluşumu	25
Şekil 2.11 Darbe etkisi	26
Şekil 2.12 Merminin kumaş liflerine etkisi	34
Şekil 2.13 Balistik test düzeneği	36
Şekil 2.14 Test Plakasında Yapılacak Atış Konumları	37
Şekil 4.1 Grafen nano tabakaların FTIR spektrumu	54
Şekil 4.2 Test Plakasında Yapılacak Atış Konumları	55
Şekil 4.3 Grafen katkısız aramid numunenin gerilme ve uzama grafiği	61
Şekil 4.4 Ağırlıkça % 0,5 grafen katkılı aramid numunenin gerilme ve uzama grafiği	61
Şekil 4.5 Ağırlıkça % 1 grafen katkılı aramid numunenin gerilme ve uzama grafiği.....	62
Şekil 4.6 Ağırlıkça % 1,5 grafen katkılı aramid numunenin gerilme ve uzama grafiği	62

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Termoset matrislerin temel özellikleri	10
Çizelge 2.2 Aramid ve polietilen elyafların özellikleri	13
Çizelge 2.3 Balistik test standartları	34
Çizelge 2.4 NIJ-STD-0101.04 standardı test kriterleri.....	35
Çizelge 3.1 Grafen nano tabakanın teknik özellikleri	40
Çizelge 3.2 NIJ-STD-0101.04 standardı koruma seviyeleri	50
Çizelge 3.3 Balistik test plakaları	51
Çizelge 4.1 Grafen katkısız plakalara NIJ-STD-0101.04 standardına III-A testi	56
Çizelge 4.2 % 0,5 Grafen katkılı plakalara NIJ-STD-0101.04 standardına göre IIIA testi.....	57
Çizelge 4.3 % 1 Grafen katkılı plakalara NIJ-STD-0101.04 standardına göre IIIA testi.....	58
Çizelge 4.4 % 1,5 Grafen katkılı plakalara NIJ-STD-0101.04 standardına göre IIIA testi.....	59
Çizelge 4.5 % 0,5 ve 1,5 Grafen katkılı plakalara NIJ-STD-0101.04 standardına göre IIIA testi.....	60
Çizelge 4.6 Çekme testi sonuçları	63

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 DuPont Tarafından Üretilmiş Kevlar Lifi	14
Resim 2.2 Dyneema® Tarafından Üretilmiş UHMWPE.....	17
Resim 2.3 Timsah derisinden yapılmış savaş zırhı	29
Resim 2.4 Modern balistik koruyucu başlık ve yelek	30
Resim 2.5 Sert vücut zırhı.....	31
Resim 2.6 Yumuşak vücut zırhı	32
Resim 2.7 Vücutta künt travma oluşumu	36
Resim 3.1 Aramid kumaş.....	38
Resim 3.2 Aramid kumaş parçasının dijital resmi	39
Resim 3.3 Epoksi reçine.....	39
Resim 3.4 Grafen nano tabaka	40
Resim 3.5 Mekanik karıştırıcı.....	41
Resim 3.6 Hassas terazi.....	41
Resim 3.7 FTIR Cihazı	42
Resim 3.8 SEM cihazı.....	42
Resim 3.9 Renishaw Invia Reflex Raman cihazı	43
Resim 3.10 Çekme testi cihazı	43
Resim 3.11 Otomatik kumaş serim ve kesim makinesi	44
Resim 3.12 2000 tonluk hidrolik pres	44
Resim 3.13 Atış testi düzeneği.....	45
Resim 3.14 Bir aramid kumaşın kesilmesi.....	47
Resim 3.15 Bir aramid katmanın ortalama ağırlığı	47
Resim 3.16 Aramid katmanlara grafen karışımının sürülmesi.....	48
Resim 3.17 Test plakalarının hidrolik preste basımı.....	48
Resim 3.18 Hidrolik preste basımı yapılan test plakaları	49
Resim 3.19 Şartlandırılmış macun	50
Resim 3.20 Dijital resim için numuneler	51
Resim 3.21 Dijital resimler	52
Resim 3.22 Çekme testi	52
Resim 3.23 Çekme testi numuneleri	53
Resim 4.1 Grafen nano tabakaların Raman spektroskopisi ve SEM fotoğrafları	55
Resim 4.2 Atış yapılan plakaların arkadan görünümü	56

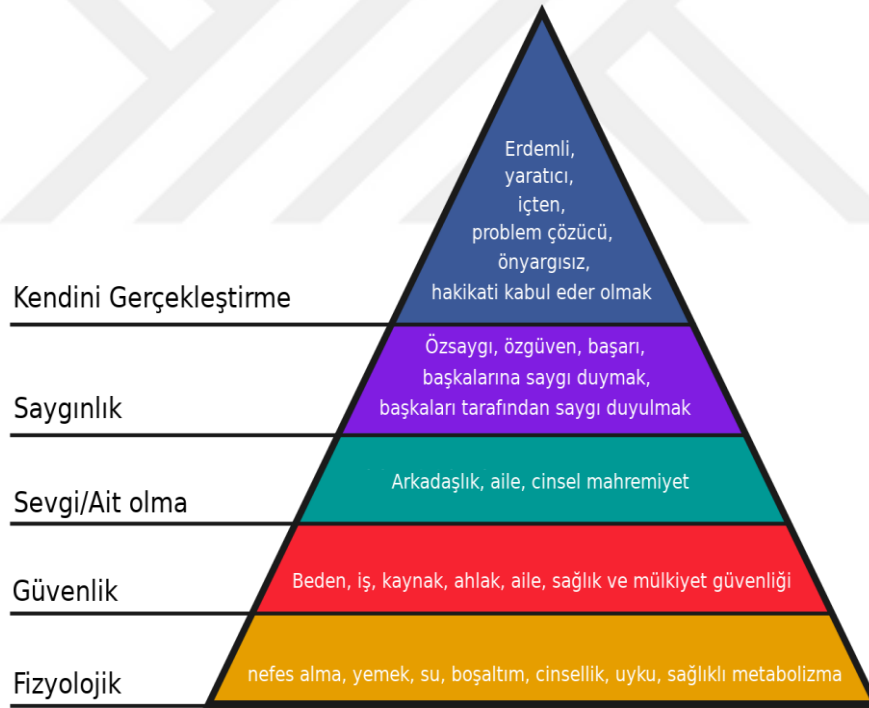
Resim 4.3 Atış yapılan plakaların arkadan görünümü (% 0,5 grafen katkılı)	57
Resim 4.4 Atış yapılan plakaların arkadan görünümü (% 1 grafen katkılı)	58
Resim 4.5 Atış yapılan plakaların arkadan görünümü (% 1,5 grafen katkılı)	59
Resim 4.6 Grafen katkılı aramid plakaların atış sonrası görünümü.....	60



1. GİRİŞ

İnsanoğlunun yeryüzüne geldiği andan itibaren kendisini dış etkilere karşı koruma ve savunma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu korunma; ilk önce yabani hayvanlar ve doğayla mücadele şeklinde ortaya çıkmış, daha sonra insanların ve toplumların kendi arasında mücadelesine karşın savunma ihtiyacı olarak devam etmiştir.

Nitekim Şekil 1.1’de yer alan Maslow’un İhtiyaçlar Piramidinde, insanın güvenlik ihtiyacı ikinci basamakta yer almaktadır (Maslow 1943). Yani Maslow’a göre insan, yeme, barınma gibi temel fizyolojik ihtiyaçlarını giderdikten sonra güvenlik ihtiyacını gidermek durumundadır. Böylece güvenlik konusunun önemini bu piramitte de kolaylıkla görebiliyoruz.



Şekil 1.1 Maslow’un ihtiyaçlar piramidi (Maslow 1943).

Güvenlik ve dış etkilere karşı insanın korunması yukarıda da bahsedildiği üzere çok geniş kapsamlı bir terim olmakla beraber bu çalışmada balistik koruma üzerinde durulmuştur. Balistik koruma, çeşitli büyüklükte, hızda ve şekilde son teknoloji silah, mermi ve şarapnellere karşı vücut ve başın korunması anlamına gelmektedir.

Balistik koruyucu teçhizat ve malzemeler, mermilerin ve şarapnel parçalarının kinetik enerjilerini absorbe ederek vücudu korumaktadır. Bir kişinin balistik açıdan korunmasında balistik koruyucu başlık, yelek ve sert plakaların rolü büyüktür. Söz konusu malzemeler, insan vücudunu yüksek hızlı darbeler sonucunda oluşacak yaralanmalara karşı korumak amacıyla dizayn edilmiş ürünlerdir.

Söz konusu balistik koruyucu ürünler, güvenlik ve kolluk birimlerimizin riskli görevler esnasında can güvenliğini sağlamak maksadıyla kullanıldığından bu alanda sağlanacak gelişmelerin önemi bir kat daha artmaktadır.

Tehditlerin değişkenlik göstermesiyle beraber insanların korunmasında kullanılan zırh teknolojilerinin geliştirilmesi zorunluluk haline gelmiştir. Bu kapsamda son yıllarda birçok farklı endüstri kolunda kullanılmaya başlanan ve halen gelişime açık olan nanoteknoloji ve nanobilim büyük bir potansiyele sahiptir.

Teknolojinin baş döndürücü hızla geliştiği bir ortamda olağanüstü özelliklere sahip nanomalzemeler uzay, havacılık, otomotiv, enerji, tıp, biyoloji, savunma sanayii gibi birçok farklı endüstri kolunda kullanılmaktadır. Makro boyuttan nano boyuta inildiğinde malzemeler; güç/ağırlık oranı, iletkenlik, optik ve manyetik özellikleri önemli ölçüde değişkenlik göstermekte ve nihai malzeme tasarımında katma değer sağlamaktadır.

Günümüzde hafif zırh olarak kullanılan balistik koruyucu malzemelerin üretilmesi için genel olarak aramid ve polietilen esaslı lifler tercih edilerek kompozit yapıda nihai ürünler üretilmektedir.

Son yıllarda ise, nanoparçacık takviyeli kompozit malzemelerin geliştirilmesi ilgi odağı olmuştur. Karbon nanoyapıların (grafen, karbon nanotüp vb.) kompozit malzemelere takviye edilmesi ile ileri teknoloji nanokompozit malzemeler üretilmektedir.

Bu kapsamda nanomalzemeler, balistik koruyucu malzemelerin üretiminde kullanılan polimer esaslı kumaşlara takviye edilmesiyle söz konusu ürünlere fonksiyonellik

katabilecek ve oluşacak nihai ürünlerin fiziksel, mekanik ve balistik özelliklerinde gelişme sağlayabileceği öngörülmektedir.

Bu çalışmada; aramid liflere, yukarıda önemi belirtilen nano malzemeler içerisinde önemli bir yere sahip olan grafenin uygun reçinelerle birlikte takviye edilmesiyle nanokompozit yapıda numuneler üretilmiştir. Çalışmalarda kullanılan grafenin karakterizasyonu yapılarak söz konusu madde ile ilgili elde edilen verilerin değerlendirmesi yapılmıştır. Balistik koruyucu başlık ve giyilebilir diğer balistik koruyucu ürünlere örnek teşkil eden bu numunelere balistik ve mekanik testler yapılarak balistik performans ve mekanik özellikler açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Nanoteknoloji, Nanobilim ve Nanomalzeme

Nanoteknoloji yeni, yenilikçi, disiplinler arası bilimsel yaklaşım tasarlamak, geliştirmek ile moleküler seviyede ve nanometre ölçeğinde yani en az bir boyutun ebatı 1 ile 100 nanometre arasında malzeme ve cihazların tasarlanmasıdır (Fakruddin vd. 2012). Nano milyarda bir anlamına gelmektedir ve önüne geldiği kelimeyi milyarda bir oranında küçültmektedir. Aslında “nano” kelimesi Yunanca “nanos” veya Latince “nanus” kelimesinden türetilmiş ve "cüce" anlamına gelmektedir.

Nanobilim ve nanoteknoloji terimleri birbirleri ile yakından ilişkili olsa da nanobilim atomların dizilişi ve nano ölçekteki temel özellikleri hakkında bilgi verir nanoteknoloji ise farklı özelliklerdeki yeni nanomalzemelerin sentezi için maddenin atomik düzeyde yönetilmesinde kullanılan teknolojidir.

Nanoteknolojinin temel ve anahtar unsuru nanomalzemelerdir. Nanomalzemeler en az bir boyutu 100 nm’den daha az olan malzemelerdir. Yani bu malzemeler mikro ölçekten çok daha küçük boyuta sahiptir. Nanomalzemeler, doğası gereği boyutlarına ve şekline bağlı olan malzemenin yığın haline göre farklı fiziksel ve kimyasal özellikler gösterir. Şaşırtıcı bir şekilde nanomalzemeler nano ölçekte boyut ve şeklini değiştirerek yeni özellikler ve yetenekler gösterirler.

Nanoteknoloji neredeyse tüm mühendislik dallarında dikkat çekmektedir ancak insanlar günlük hayattaki varlığı hakkında bilgi sahibi olmasalar da tıp, mühendislik, çevre, elektronik, savunma ve güvenlik alanlarındaki yaygın kullanımı artmaktadır. Nanoteknoloji ve nanomalzemeler alanında birçok farklı endüstri kolunda girişimler başlamış olsa da bu alan hala gelişime açık potansiyeli içinde barındırmaktadır.

2.1.1 Savunma Alanında Nanoteknoloji

Savunma, nanoteknolojinin kullanabileceği önemli alanlardan bir tanesidir ve

nanoteknolojinin savunmada çeşitli uygulamaları mevcuttur (Rai ve Rai 2015). Zor koşullarda kullanılan kişisel balistik zırhların geliştirilmesi ile tespit, savunma ve geliştirmede kullanılan nano silahlar bu uygulamalara örnek teşkil etmektedir. Ayrıca nanoteknolojinin yakıt tasarrufu, askerin korunması ve gizli hareket etmesi konularında da fayda sağlayabileceği öngörülmektedir (Rai ve Rai 2015).

Nanoteknoloji sayesinde savunma alanında mevcut silah ve teçhizat sistemlerinin geliştirilmesinin yanısıra yeni sistemlerin de geliştirilebilmesi mümkündür. Savunma ve güvenlik alanında nanoteknolojinin kullanılabileceği alanlar Şekil 2.1’de gösterilmiştir (Özer 2019).



Şekil 2.1 Savunma ve güvenlik alanında nanoteknoloji uygulamaları (Özer 2019).

Şekil 2.1’deki nanoteknolojinin kullanılabileceği alanlardan bir tanesi de kıyafettir. Kıyafetin alt basamaklarında yer alan balistik koruyucu başlık ve diğer giyilebilir balistik koruyucu teçhizatların da artan ve değişen tehditlere bağlı olarak nanoteknoloji sayesinde geliştirilmesi mümkündür.

Nanomalzemeler o kadar küçüktür ki atomların çoğu yüzeydedir. Bu tür yapılar atomların maddenin kütlesine gömüldüğü normal malzemelerden tamamen farklı özellikler sergileyecektir. Örneğin silikon veya karbondan geliştirilen nanotüpler son derece işlevsel koruyucu giysiler üretmek için çok faydalı olacaktır (Scott 2005).

Nanomalzemeler daha güçlü ve hafif zırh yapılmasını sağlar, bakım maliyetlerini düşürür ve kinetik silahların performansını iyileştirir (Vlandis 2006). Zırh malzemelerinin üretiminde kullanılacak olan nanomalzemelerin hafiflik, mukavemet, balistik koruma, kullanım kolaylığı gibi özelliklerde gelişme sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

Nanoteknoloji araştırma ve geliştirme yatırımlarının en çoğu askeri alanda yapılmaktadır (Vlandis 2006). Dolayısıyla savunma alanında nanoteknoloji üzerine yatırım yapan ülkelerin gelecekte askeri anlamda üstünlük ve caydırıcılık avantajları elde edeceği aşîkardır. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Pentagon Bilim Danışmanı Cliffard Lau'nun sözleri ile ifade edilirse nanoteknoloji, ülkeleri muharebe sahasında daha hızlı ve güçlü kılacak bir kuvvet çarpanıdır (Vlandis 2006).

Dünyada savunma üzerinde nanoteknoloji çalışma ve yatırımlarında Amerika Birleşik Devletleri (ABD) öncülük etmektedir. Askeri Nanoteknolojileri Enstitüsü, ABD Ordusu Araştırma ofisi aracılığıyla kurulan bir araştırma merkezidir. Bu enstitünün amacı modern askerler için konforlu, yüksek teknoloji savaşı kıyafeti oluşturmaktır. Araştırmacılar, nanoteknolojinin kalın olmayan, sağlık durumunu takip eden, yaralanmaları hafifleten, iletişim kuran, kimyasal ve biyolojik maddelere otomatik olarak tepki verebilen kurşun geçirmez tulum üretebilmeleri için yardımcı olacağını ümit ediyorlar (Rai ve Rai 2015).

Massacuhsetts Teknoloji Enstitüsünde (MIT) yapılan çalışmalarda, modern askerleri korumak için doğadan ipuçları bulunmaya çalışılmaktadır. Bu amaçla araştırmacılar düşman saldırılarına karşı 96 milyon yıl hayatta kalabilen dinazor, yılan ve diğer türlerin pullarının nano yapılarını araştırmaya devam ediyorlar (Rai ve Rai 2015).

Yukarıda yer alan gelişmeler değerlendirildiğinde nanoteknolojinin savunma sanayinde kullanımı henüz yeni bir durum olmakla beraber nanoteknolojinin getirebileceği avantajların sınırları belli değildir. Bu anlamda dünyada ve ülkemizde nanoteknoloji ve nanomalzemelerin kullanımı üzerine yapılacak araştırma, geliştirme ve yatırım faaliyetleri büyük öneme haizdir.

2.1.2 Nanomalzemelerin Nanokompozitlerde ve Balistik Zırhlarda Kullanımı

Vücut zırhı araştırmasının hedefi, zırh üretimine ilişkin düşük maliyet, hafiflik, konforlu sistemler ile üstün balistik koruyucu performans gibi çatışan hedefleri yönetmeye yöneliktir (Cunniff 1992). Bu araştırmalar 2. Dünya Savaşından beri devam etmekte olup vücut zırhı malzemelerinin balistik etkisi üzerine çalışmalar artarak devam etmiştir.

Nanomalzemelerin kompozit zırhlarda kullanılmaya başlamasının üzerinden çok zaman geçmemiştir. Karbon nanotüpler kompozitlere yüksek miktarda güç ve sertlik sağlarken, inorganik fullerenler ise kompozitlerin enerji sönümleme kapasitesini artırmıştır (Hogg 2006). Maliyetler etkin olduğu sürece bu nanomalzemelerin balistik kompozitlerin ağırlıklarını azaltacağı ve dayanımı artıracağı düşünülmektedir.

Nanoteknoloji polimerlere yeni özellikler kazandırmış olsa da tekstildeki uygulamaları henüz tam olarak olgunluğa ulaşmamıştır. Nanomalzemeler, malzemenin yığın haline göre çok daha yüksek yüzey enerjisine sahiptir. Yüksek yüzey enerjisi nanomalzemelerin kompozit üzerinde topaklaşmasına neden olabilir bu da kompozitin performansını düşürür ve nanomalzemelerin özelliklerinin azalmasına neden olabilir (Scott 2005). Bu anlamda yüksek yüzey enerjisine sahip nanomalzemelerin kompozitlerde kullanımında, topaklaşma durumu yönetilmesi gereken önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır.

Nanoteknoloji, nanomalzemelerin olağanüstü fiziksel, kimyasal, mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı koruyucu giysiler alanında umut verici bir gelecek vadetmektedir. Thilagavathi vd. (2008) askeri personel için hafif ve konforlu koruyucu giysilerin üretiminin yanı sıra nanoteknolojinin sensör, enerji depolama, iletkenlik, kir tutmayan kumaşlar üzerine uygulamalarını değerlendirmişlerdir. İnceleme, mikro ve nano lifler üzerine odaklanmıştır. Bu liflerden ve bunların kompozitlerinden oluşan koruyucu giysiler daha az ağırlık, boyut, bakım ve maliyet gerektirirken daha fazla performans, konfor ve malzeme ömrü sunmaktadır. Nanomalzemeler ve nanokompozitler aşağıdaki savunma uygulamalarında kullanılmaktadır.

- ✓ Hafif balistik koruyucu giysiler,
- ✓ Esnek antibalistik tekstiller,
- ✓ Kimyasal ve biyolojik silahlara karşı koruyucu giysiler,
- ✓ Vücut ısını koruyabilen adaptif termal giysiler,
- ✓ Çevresel ve durumsal farkındalığın sağlanması için mikro sensör donanımlı başlık ve giysiler.

Günümüzde balistik koruyucu ürünlerin üretiminde aramid, ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE), zylon gibi tekstil lifleri kullanılsa da bu malzemeler de ağırlık hacim oranlarından dolayı bazı dezavantajlara sahiptir. Söz konusu kompozitlerde yeterli homojen dağılım olmadığında koruma durumlarında bölgesel problemler ortaya çıkabilmekte ve bu durum da kullanan personel açısından risk teşkil etmektedir. Söz konusu dezavantajları minimuma indirmek ve daha yüksek performanslı balistik koruyucu ürünler elde etmek için nanomalzeme takviyeli nanokompozitler önemli alternatifler sunmaktadır.

2.2 Kompozit ve Nanokompozitler

Kompozitler veya kompozit malzemeler, fiziksel ve/veya kimyasal olarak birbirinden farklı, uygun şekilde düzenlenmiş veya onları ayıran bir arayüze sahip dağıtılmış fazlardan oluşan iki veya daha fazla maddeden üretilmiş malzemelerdir. Kompozit malzemelerin özellikleri, onları oluşturan herhangi bir bileşen tarafından tek başına temsil edilemez (Chawla 2012).

Kompozit malzemeler, her bir bileşenin üstün özelliklerini sergileyebilir, her iki bileşenin de sahip olmadığı nitelikleri bile sahip olabilirler ve bu kompozitlerin en temel özellikleri arasında yer almaktadır. Üstün tasarımlar ile kompozitlerin sertlik, mukavemet gibi birçok özelliği geliştirilebilir (Jones 1998). Kompozitler genel olarak takviye elemanı ve matris olarak bilinen iki grup bileşenden oluşur. Kompozit malzemenin davranışı; matris, takviye ve bunların arasındaki etkileşimden oluşur.

Matris, kompozitlerin %70'e kadar özelliklerini belirleyen ana bileşenidir ve takviye

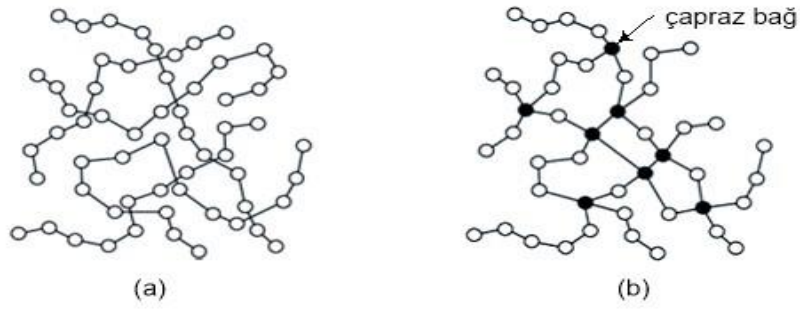
malzemesinin bir arada tutulmasını sağlar. Matris, genel olarak kompozitin yapısal özelliklerinden sorumludur. Genel olarak kompozitler üç ana gruba ayrılır; polimer matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve metal matrisli kompozitler (Hull ve Clyne 1996).

Polimer nanokompozitler ise yaklaşık 40 yıldır kullanılmaktadır. Polimer nanokompozitler iki ana bileşeni, polimer matris ve nano boyutlu parçacıklardır. Polimer nanokompozitlerde en sık kullanılanlar nano parçacıklar, killer ve daha yakın zamanda kullanılan nanotüplerdir (Utracki 2010).

Takviye malzemeleri kompozitlerin özelliklerinde iyileştirme sağlayabilir ancak son uygulamalara göre farklı yapılarda olurlar. Takviyeler, kompozitlerin içerisinde parçacıklar, pullar, kısa lifler, sürekli lifler, tabakalar veya bunların bazılarının bir kombinasyonu şeklinde olabilirler. Lifli formdaki takviyeler, mukavemet ve sertliklerinden dolayı kompozitlerde en yaygın kullanılanlardır (Chawla 2012).

2.3 Polimer Matris

Polimerler zincir benzeri dev moleküllerden oluşur, kovalent bağlı karbon atomları zincirin omurgasını teşkil eder (Chawla 2012) ve bu yapılarıyla metal veya seramikten daha karmaşıklardır. Polimerler genel olarak metallere oranla kimyasallara karşı daha dirençlidirler. Polimerler ucuzdurlar ve üretimleri kolaydır. Ağırlıklı olarak kovalent bağlı olmaları nedeniyle, polimerler genellikle ısı ve elektrik yönünden zayıf iletkenlerdir. Termoset ve termoplastik olmak üzere polimerler iki ana gruba ayrılırlar. Termoset ve termoplastik polimerlerin moleküler yapısı Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Hem termoset hem de termoplastik polimerler, fiber takviyeli polimer kompozitler için matris elemanı olarak kullanılabilirler.



Şekil 2.2 Matrislerin polimer Yapısı (a) termoplastik (b) termoset.

Termoplastik polimerlerin matris olarak birçok avantajı olmasına rağmen termoplastik matrisli kompozitlerin, termoset matrisli kompozitlere göre üretim süreci daha zor ve karmaşıktır.

Genel olarak termoset polimerler endüstride birçok avantajlı özelliklere sahiplerdir (Ryan 1998). Termoset polimerler yüksek sıcaklıklarda temel özelliklerini korurlar, sıcaklık ve korozyona karşı iyi direç gösterirler. Lif yüzeyinin ıslatılması aracılığıyla fiber ile matris etkileşimi, iyi bir mekanik davranış elde etmek için hayati öneme sahiptir. Termoset polimerlerin en önemli avantajlarından biri, takviye elemanına emdirmeye sürecinde yüksek sıcaklık ve basınç olmadan düşük viskoziteye sahip olmalarıdır. Termoset matrislerin bazı temel özellikleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Termoset Matrislerin Temel Özellikleri.

Özellik	Epoksi	Polyester	Vinilester
Yoğunluk (gr/cm³)	1,2-1,3	1,1-1,43	1,12-1,32
Çekme Dayanımı(MPa)	55-130	34,5-103,5	73-81
Çekme Modülü(GPa)	2.75-4,10	2,1-3,45	3-3,5

2.3.1 Epoksi Reçine

Epoksi reçine ilk olarak 1930’ların sonunda ABD ve İsveç’te sentezlenen en önemli termoset matrislerden biridir. Epoksi reçine kimyasal yapısında bir oksijen, iki karbon atomunu ihtiva eden bir polimerdir. Epoksi reçineler günümüzde yapıştırma, yüzey kaplama ve kompozit matris gibi endüstriyel uygulamalar için hala en çok tercih edilen reçinelerdir (Lee ve Neville 1957).

Epoksi reçinelerin endüstriyel uygulamalardaki hızlı gelişimi, sahip oldukları iyi mekanik ve elektriksel özelliklerin kombinasyonu ile kimyasallara ve solventlere karşı iyi direnç özelliklerinden kaynaklanmaktadır (Lee ve Neville 1957). Epoksi reçineler deneysel işlemleri kolaylaştıran ve takviyeleri kolay ıslatabilen düşük viskozite özelliğine sahiptir.

Epoksi reçineler; üstün termal, mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı fiber takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Njuguna vd. 2007). Kimyasal yapılarına ve kürlleme kinetiğine bağlı olarak; epoksi reçinelerin aşırı esneklikten yüksek mukavemet ve sertliğe kadar değişen mekanik özellikleri ile yapışma gücü, kimyasal direnç, ısı direnci ve elektrik direnci gibi fiziksel özelliklerini değiştirmek mümkündür. Termoset polimelere dayalı yüksek performanslı kompozitlerin gelişimi reçine, lif ve arayüz özelliklerinin eş zamanlı olarak geliştirilmesine bağlıdır.

2.4 Elyaf Takviyeler

Elyaf, elyaf takviyeli kompozitlerin temel bileşenlerinden biridir. Elyaf, tane boyutu bakımından küçük bir yarıçapa sahiptir ve daha büyük boyutlu malzemelere nazaran teorik olarak yüksek bir kırılma gücüne sahiptir. Yüksek miktarda yüklenen kuvvet matris aracılığıyla elyafın güçlü ve dayanıklı liflerine iletilir. Elyafın esnek yapısı kompozit malzeme üretmek için birçok farklı teknik kullanmaya imkan sağlar (Chawla 2012).

Kompozit bir malzemede yükün ana kısmı elyaf takviye üzerine uygulandığı için lif tipinin doğru seçimi, lifin hacimsel oranı, lifin kompozit yapıya uyumsal durumu gibi hususlar dikkate alınması gerekmektedir. Mallick (2007), kompozitlerin yoğunluk, gerilme mukavemeti ve modülü, sıkıştırma mukavemeti ve modülü, yorulma mukavemeti gibi çok sayıda karakteristik özelliğinin elektriksel ve termal iletkenliklerden etkilenebileceğini öne sürmüştür.

Balistik koruma için kullanılan elyafın; düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve enerji sönümlene kabiliyetlerine sahip olması gerekir. Bir malzemenin balistik performansı

yerel olarak enerjiyi sönümleme ve enerjiyi bütün yapıya yayabilme yeteneğine bağlıdır. Kopma mukavemeti ve uzama, liflerin sonik hızı (tekstildeki sesin hızı) tekstil lifleri için sağlayabilecekleri korumayı belirleyen önemli parametrelerdir (Jacobs ve Van 2001).

Elyaf lar, kompozit malzemenin iki ana bileşeninden takviye malzemesini oluşturur. Kompozitin diğer ana bileşeni olan matris malzemesinden gelen yük, darbe etkisi veya enerji elyafın liflerine aktarılır. Matris malzemesi elyaf lar a bir yandan yük transferi yaparken bir yandan da elyaf ların sünekliğini ve tokluğunu sağlar (Bulut 2003).

Günümüzde vücut zırhı tasarımlarında; aramid, yüksek performanslı polietilen, poli (p-fenilen-2,6-benzobisoksazol) (PBO- Zylon®)) ve yüksek mukavemetli naylon gibi elyaf lar kullanılmaktadır. Yumuşak vücut zırhının üretimi için halihazırda kullanımda olan aramid ve polietilen elyaf ların özellikleri Çizelge 2.2’de gösterilmektedir. Aramid ve polietilen elyaf ların daha eski dönemlerde kullanılan naylon liflerine oranla elastisite modülleri ve gerilme mukavemetleri daha yüksek olduğundan aramid ve polietilen elyaf lar balistik zırh yapımına daha elverişli elyaf lar dır ve son zamanlarda daha çok tercih edilmektedir.

Çizelge 2.2 Aramid ve Polietilen Elyafların Özellikleri.

Malzeme	Lif Tipi	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Gerilme Mukavemeti (GPa)	Gerilme Yüzdesi (%)	Lif Çapı µm
Poliamid	Nylon 66	1,14	6	1,16	19	25
Aramid	Twaron	1,45	121	3,1	2	10
	Kevlar 29	1,44	70-83	3,6	4	12
	Kevlar 129	1,44	96	3,39	3,5	12
	Kevlar 49	1,44	113	3,6-4,1	2,6	12
	Kevlar 149	1,47	186	3,3	2	12
	Kevlar M2	1,44	70	3,3	4	12
	Dyneema SK75,76,78	0,97	109-132	3,30-3,90	3,5-4,0	21
UHMWPE (Polietilen)	Dyneema SK60,62,65	0,97	65-100	2,40-3,30	3,5	21
	Dyneema SK25	0,97	52	2,2	3,5	21
	Spectra 900	0,97	73	2,4	2,8	28
	Spectra 1000	0,97	103	2,83	2,8	38
	Spectra 2000	0,97	124	3,34	3	38

Yüksek performanslı polimer kompozitlerde ise en çok tercih edilen lif tipleri; cam, aramid ve karbondur. Doğal lifler, bor lifleri ve seramik lifler ise daha az miktarda kullanılır. Balistik koruyucu ürün imalatında en çok tercih edilen elyaf lar ise para aramid ve polietilendir (Bulut 2003).

2.4.1 Aramid

Aramid ya da aromatik polyamid, ilk olarak ABD menşeli DuPont firması tarafından 1960 yılında tanıtılmıştır. Aramid, olağanüstü kopma mukavemetinden dolayı balistik kompozitlerde, askeri koruyucu malzemelerde ve uzay endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. En popüler ticari aramidler, DuPont tarafından üretilen Kevlar ile Japon firması Teijin tarafından üretilen Twaron'dur.

1970'li yıllarda incelenen, araştırılan ve test edilen tüm ürünlerinin arasındaki en büyük başarı, DuPont şirketi tarafından Kevlar'dan yapılan ve polis tarafından kullanılan vücut

zırhının geliştirilmesi olmuştur. Bu kapsamda ABD Ulusal Adalet Enstitüsü (NIJ/National Institute of Justice) 1971 ve 1976 yılları arasında vücut zırhının geliştirilmesine yönelik dört aşamalı bir plan için 3 milyon dolarlık bir yatırım yapmıştır (Bhise 2015).

1976 yılında bu dört aşamalı plan tamamlandıktan sonra, araştırmacılar Kevlardan yapılan zırhların, kurşun geçirmez ve polis memurlarının tam zamanlı olarak giyebilecekleri kadar hafif olduğu sonucuna vardılar (Bhise 2015). Bu önemli gelişmeden sonra kurşun geçirmez yeleklerin gelişimi başladı. Araştırmacılar IIIA koruma seviyesinde bir adet kurşun geçirmez yeleğin ortalama bir buçuk kilo ağırlığında olduğunu ve kullanıcıyı tüm tabanca mermilerinden koruduğunu tespit ettiler. Bu gelişme sayesinde ateşli silahlara karşı ABD’de görev yapan binlerce güvenlik görevlisi ve sivilin hayatları kurtarıldı.

DuPont tarafından balistik koruma için kullanılan benzersiz özelliklere sahip ve teknik özellikleri Çizelge 2.2’de belirtilen farklı Kevlar ürünleri de geliştirilmiştir. Bu çeşitler arasından en çok kullanılan Kevlar 29 ve Kevlar 49 cinsleridir. Kevlar lifleri, yumuşak ve esnek bir yapıya sahip olduğundan merminin kinetik enerjisini yerel olarak sönmüleme ve bu enerjiyi bütüne yayabilmektedir. Kevların molekül zincirleri zayıf hidrojen bağlarından oluşur, lifli ve ince iplikli yapısı Resim 2.1’de gösterilmiştir (İnt. Kyn. 1). Ancak kevların zayıf tarafı ise yüksek sıcaklıklarda termal dayanımının yüksek olmasına rağmen mukavemetinin düşüş göstermesidir.



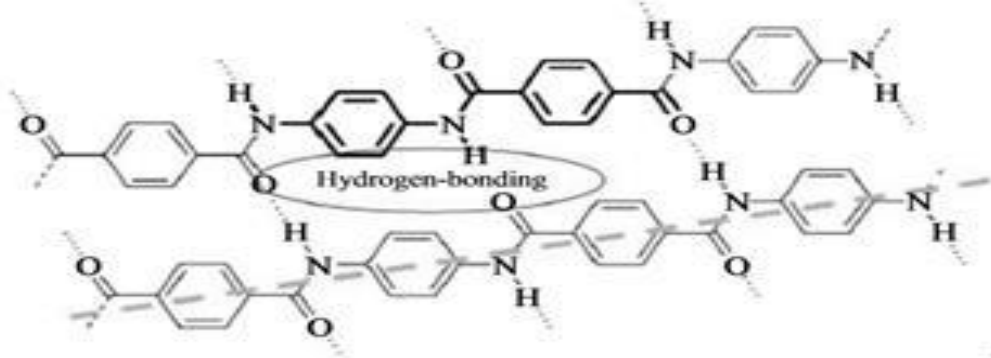
Resim 2.1 DuPont tarafından üretilmiş kevlar lifi (İnt. Kyn. 1).

Twaron ise tıpkı Kevlar gibi başka bir para-aramid elyafıdır ve Akzo Nobel (şimdi

Teijin Twaron) tarafından geliştirilmiştir (Dobb ve Robson 1990). İyi bir ısı direncine ve yüksek kopma mukavemetine sahiptir. Twaron CT mikrofilamentinden yapılmış bir yelek, aramid muadilinden % 23 daha hafiftir. Twaron lifleri çok sayıda ince mikrofilamentten oluşur, bu yapı koruyucu kumaşlarda darbeleri emme kapasitesini artırır. Twaron lifleri, yumuşak ve sert balistik zırhlarda gerekli özellikleri sağlamak için tercih edilmektedir (Utracki 2010).

Technora®, Teijin tarafından geliştirilmiş başka bir para-aramid elyafıdır. Yüksek mukavemet ve kimyasal direnç gerektiren uygulamalar için kullanışlıdır. Balistik korumaya ek olarak kablo ve halat yapımında da kullanılır. Bu lif ayrıca iyi bir yorulma direncine, boyutsal stabiliteye ve yüksek ısı direncine sahiptir.

Aramidin üstün özellikleri, yüksek gerilme dayanımı ve modülü ile sertliğidir. Gerilme mukavemeti, çelikten 5 kat daha fazladır. Aramidin üstün özellikleri, onun özel moleküler yapısından ileri gelmektedir. Aramid liflerin uzun moleküler zincirlere sahip yapısı Şekil 2.3’de gösterilmiştir (Languerand vd. 2009).



Şekil 2.3 Aramid liflerin moleküler yapısı (Languerand vd. 2009).

Moleküler zincirindeki aromatik halkalar aramid lifinin termal özelliklerine olumlu bir şekilde katkıda bulunmaktadır. Aramid lifler için ayrışma sıcaklığı 427 °C ile 482 °C arasındadır (Lane 2005). Bu sayede aramid lifin ısı direnci yüksek olduğundan kullanıldığı balistik yapı, yüksek sıcaklık ortamında yapısal bütünlüğünü korumayı sürdürür. Kevlar bu üstün özellikleri sayesinde 1960’lardan itibaren hafif balistik zırhlarda naylonun yerini almaya başlamıştır.

2.4.2 Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (Ultra High Molecular Weight Polyethylene/UHMWPE)

Ticari anlamda en popüler iki Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen; Spectra ve Dyneema'dır.

Spectra, Allied Signal Incorporation (şimdi Honeywell) tarafından üretilen ultra yüksek moleküler ağırlıklı bir polietilen (UHMWPE) elyafıdır. Molekül ağırlıkları 2×10^6 ila 6×10^6 g/mol arasında değişen, son derece uzun moleküler zincirlere sahip bir termoplastik polietilen (PE) elyafıdır. Uzun moleküler zincirler, yükleri polimer omurgasına daha etkili bir şekilde aktarır ve bu şimdiye kadar mevcut olan termoplastik liflerin herhangi birinin en yüksek darbe mukavemetine sahip olan çok sert bir malzeme ile sonuçlanır (Stein 1988). Son derece düşük nem emme, düşük sürtünme katsayısı ve çok yüksek aşınma direncine sahiptir.

Dyneema, Spectra gibi UHMWPE elyafıdır. Bu lif son derece yüksek bir mukavemet-ağırlık oranına sahiptir ve düşük yoğunluğu nedeniyle su üzerinde yüzebilir. Diğer özelliği ise, darbe sonucu oluşan şok dalgalarını diğer balistik malzemelere göre daha hızlı dağıtmasını sağlayan yüksek enerji sönümleme yeteneğidir. Dyneema elyaflarının çeşitli türleri SK25, SK60, SK65, SK66, SK71, SK75 ve SK76'dır. Bu lifler, kişisel vücut zırhı için hizalanır, tabakalar halinde birleştirilir ve her yönde gerekli gücü vermek için farklı açılarda düzenlenebilir.

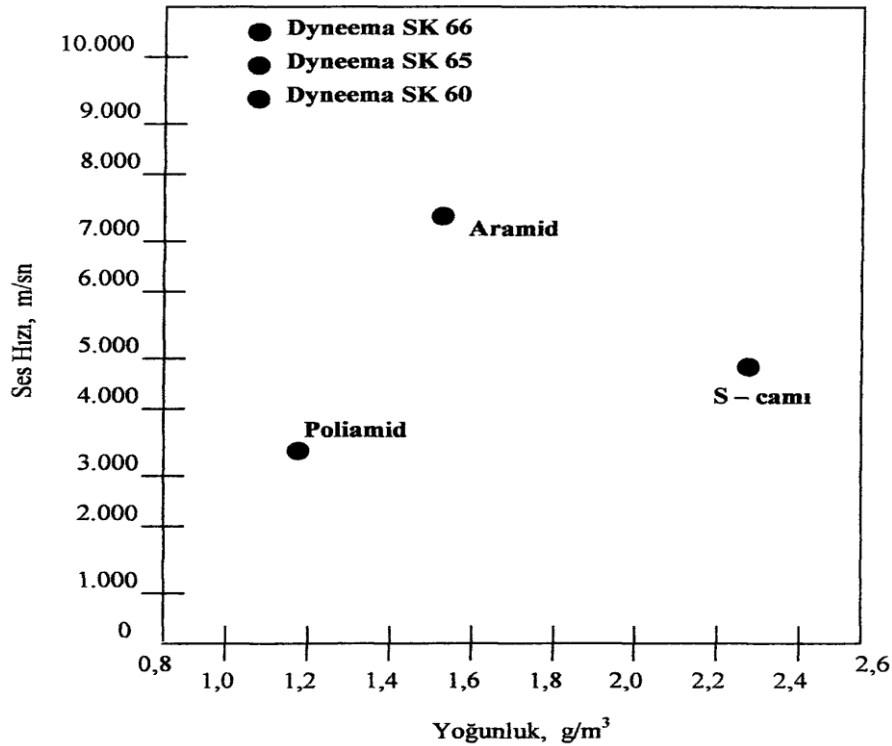
Hollanda menşeli uluslararası bir şirket olan DSM Dyneema, dünyanın en güçlü elyafı olan Dyneema'nın mucidi ve üreticisidir. Dyneema, minimum ağırlıkla birlikte maksimum mukavemet sunan polietilen elyafıdır. Ağırlık bazında, 15 katına kadar çelikten daha güçlü ve aramid elyaflardan ise %40'a kadar daha güçlüdür. Dyneema elyafı su üzerinde yüzer ve nem, ultraviyole ışık ve kimyasallara karşı dayanıklıdır. Dyneema lifi sadece vücut zırhında değil, aynı zamanda balıkçılık, denizcilik ve açık deniz endüstrilerinde halatlar, kablolar ve ağlarda da kullanılan önemli bir bileşendir. Bunların dışında metal işleme endüstrisi için koruyucu eldivenlerde ve spor malzemeleri ile tıp sektöründeki uygulamalar için ince iplikler olarak kullanılır.

Dyneema tarafından üretilmiş polietilen liflerden elde edilen kumaş örneği Resim 2.2’de gösterilmiştir (İnt. Kyn. 2).



Resim 2.2 Dyneema® tarafından üretilmiş UHMWPE (İnt. Kyn. 2).

Balistik özellikli fiberlerin koruma seviyesini belirleyen en önemli iki parametere balistik darbe anındaki enerji sönmleme kapasitesi ve lif üzerindeki ses iletim gücüdür. Ses iletim parametresi açısından Dyneema tarafından üretilen polietilen fiberin, aramid ve diğer fiberlere göre daha üstün olduğu Şekil 2.4’de görülmektedir (Bulut 2003).

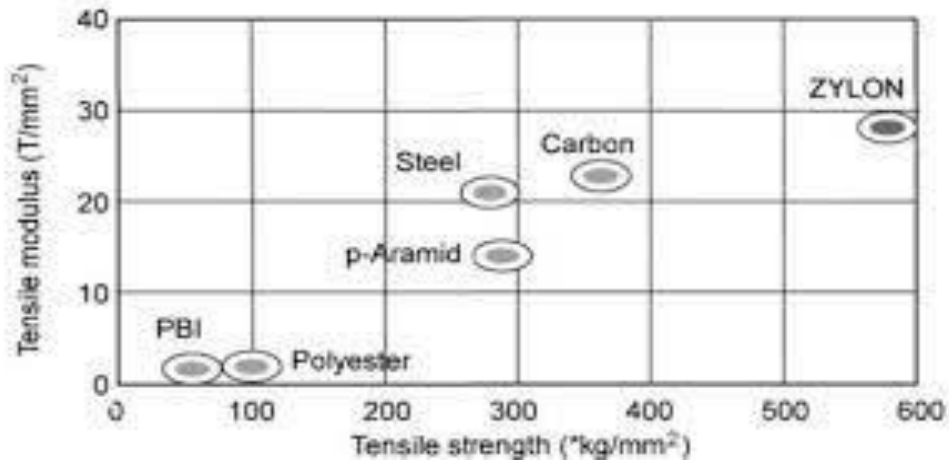


Şekil 2.4 Bazı balistik fiberlerin ses iletim hızı (Bulut 2003).

2.4.3 Zylon (PBO/ P-phenylene-2,6-benzobisoxazole)

Zylon, 1980'li yıllarda SRI International tarafından geliştirildi ve şu anda Japon tekstil şirketi Toyobo Corporation tarafından ticari olarak üretilmektedir. Zylon, Kevlar'dan 1,6 kat daha fazla kopma mukavemetine sahiptir. Zylon, iyi bir termal stabilite ile birlikte çok yüksek mukavemetin gerekli olduğu yerlerde kullanılabilir. Bu liflerin modülü, p-aramid liflerinininkinin neredeyse iki katıdır ve bozunma sıcaklığı, p-aramid liflerinininkinden yaklaşık 100°C daha yüksektir. Zylon ile yapılan vücut zırhı, aramid liflerinden yapılan ürünlerden daha hafif, daha rahat ve daha güçlüdür. Bununla birlikte kopma mukavemeti, yüksek ultraviyole radyasyon gibi belirli aşırı çevresel koşullar altında düşmektedir.

Şekil 2.5'de zylon ile diğer balistik elyafların gerilme mukavemeti ve modülünün mukayesesi gösterilmiştir. Zylon'un karbon, çelik, aramid, polyesterden daha mukavim olduğu görülmektedir.



Şekil 2.5 Zylon'un diğer elyaflar ile mukayesesi.

Poli-p-fenilenbenzobisoksazol (PBO), kolayca yönlendirilen sıvı kristal polimerler ailesinde yer almaktadır. PBO polimeri hafif, mükemmel termal kararlılık ve kimyasal direnç özelliklerinden dolayı; ABD tarafından havacılık ve uzay uygulamalarında geleneksel ağır metallerin yerini alması için geliştirilmiştir (Avcı vd. 2019).

2.5 Grafen ve Grafen Esaslı Nanokompozitler

Nanoparçacıklar, istenen özelliklerde yeni malzemeler geliştirilmesine imkan sağlayabilmektedir. Nanokompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini nanoparçacıklar ile geliştirilebilme imkanı bulunmaktadır. Bu yüzden grafen ve türevleri, nanokompozitlerin geliştirilmesini katkı sağlayabilecek önemli seçeneklerdir.

2.5.1 Grafen ve Önemi

Grafen, bir tür iki boyutlu nanomalzeme olarak 2004 yılındaki keşfinden bu yana dünya çapında büyük ilgi gördü (Yi ve Shen 2015). Grafene olan bu ilgi esas olarak olağanüstü özelliklerinden ve gelecek vaat eden uygulamalarından kaynaklanmaktadır.

Mekanik özellikler açısından tek katmanlı grafen, 0.5-1.0 TPa'lık bir Young modülüne ve 130 GPa'lık yüksek güce, 3000 WmK 'lık yüksek bir termal iletkenliğe sahiptir. Bu benzersiz özellikler grafeni; elektronik cihazlar, fotonik cihazlar, gelişmiş kompozitler, boya, kaplama, enerji depolama, sensör, biyoloji vb. uygulamalar için uygun hale getirmiştir (Yi ve Shen 2015).

Grafen, karbon atomlarının altıgen şeklinde dizildiği tek katmanlı yapıdır ve grafitin yapı taşıdır. Tek atom kalınlığında olmasına rağmen çelikten 200 kat daha güçlüdür.

Grafen, 2004 yılında bir bant desteğiyle grafitin tabakalarına ayrılması sayesinde üretilmiştir. 2010 yılında, Andre Geim ve Konstantin Novoselov grafenin mucitleri olarak Nobel Fizik Ödülü kazanmışlardır. Grafen farklı malzemeler ile beraber kullanılıp özellikleri değiştirilerek birçok uygulamaya uyarlanabilir.

Grafen; üstün mekanik, termal ve elektriksel özellikleri sayesinde hafif, mukavim ve uzun ömürlü kompozit üretiminde tercih edilmektedir. Grafen esaslı takviyeler, askeri alanda sağladığı balistik mukavemet nedeniyle dikkatleri çekmiştir. Grafenin, mermilerin kinetik enerjisini bertaraf edecek potansiyeli üzerine araştırmalar artmıştır. Bu potansiyel, grafenin balistik koruma amaçlı kullanılan başlık ve yelek gibi giyilebilir

donanımlarda kullanılabileceği ve söz konusu ürünlerin mukavemet, hafiflik, performans vb. kriterlerde iyileştirme sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Grafen kaplama ve kompozitler, havacılık başta olmak üzere savunma sanayinin birçok farklı kolunda çalışmalara konu olmaktadır.

2.5.2 Grafenin Özellikleri

Bilim insanları Geim ve Novoselov'un 2004 yılında açıkladığı tek katmanlı grafen çalışmasından bu yana (Novoselov vd. 2004) atomik olarak bu ince karbon levha, malzeme bilimi alanı araştırmalarında artan bir ilgi görmüştür. Grafen; iki boyutlu, atomik ölçekli, altıgen kafes yapıda olan bir karbon allotropudur.

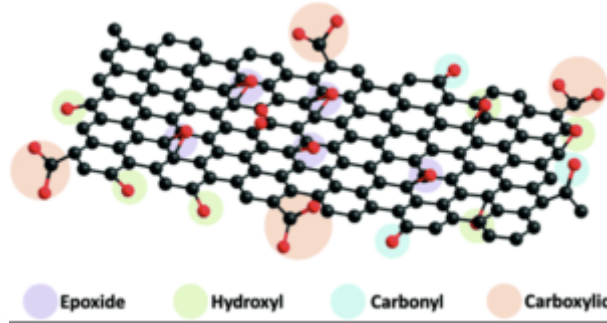
Grafen; geniş yüzey alanı, mükemmel termal iletkenlik, çok yüksek Young modülü, oda sıcaklığında yüksek elektron mobilitesi gibi birçok istisnai özelliğe sahiptir. Son yıllarda artan bilimsel ve teknolojik ivme ile birçok araştırma ve çalışma grafenin benzersiz özelliklerine odaklanmıştır. Örneğin iletken bir nanomalzeme olarak, grafen geleneksel silikon bazlı teknolojilerin yanısıra elektronikleri yazdırmak için kullanılabilir (Kamyshny ve Magdassi 2014).

Prasai vd. (2012), grafeni organik kaplamalarda kullanmış ve grafenin önemli ölçüde organik kaplamaların korozyon direncini artırdığını tespit etmişlerdir. Şimdiye kadar grafenin belirli özelliklerini kullanarak nanoteknoloji ve çeşitli uygulamalarında önemli başarılar elde edilmiştir. Grafenin yüksek Young modülü, gerilme mukavemeti ve kırılma tokluğu gibi olağanüstü mekanik özellikleri bulunmaktadır. Bu özellikler grafeni, nanokompozitler için harika bir tamamlayıcı malzeme haline getirmektedir.

2.5.3 Grafen Oksit (GO)

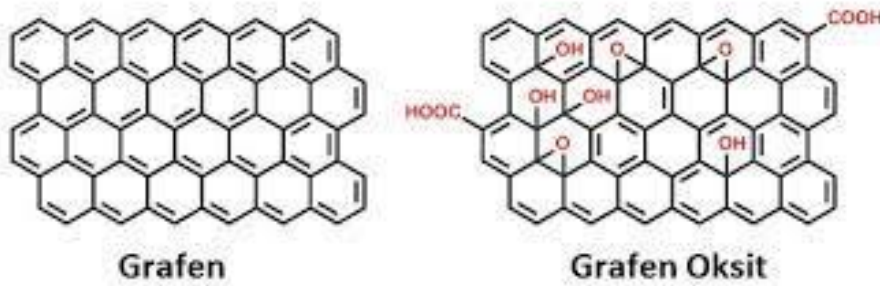
Grafen oksit (GO), çeşitli oranlarda karbon, oksijen ve hidrojenle oluşan bir bileşiktir ve grafitin güçlü oksitleyicilerle işlenmesiyle üretilir (Coclite vd. 2013). Grafen oksit (GO), grafitin oksitlenmesi sonucu elde edilen bir grafen türevidir. Yapısında epoksi, hidroksil, karbonil ve karboksil grupları içermektedir ve bu işlevsel grupların Şekil

2.6’de renk grupları ile belirtilmiştir. Bu fonksiyonel gruplar, GO’ya diğer moleküller ile bağlanma imkânı vermektedir. GO’nın bu özelliği, diğer malzemeler ile beraber kullanılmasına ve istenen özelliklerde nanokompozit malzeme üretmek için önemli bir avantajdır.



Şekil 2.6 Grafen oksitin yapısı.

Grafende karbon atomları altıgen şekilde dizilmektedir. Grafen ve grafen oksitin altıgen yapısı Şekil 2.7’de görülmektedir. Oldukça oksitlenmiş olan karbon atomları bal peteği altıgen kafes modelinde düzenlenmiştir.



Şekil 2.7 Grafen ve grafen oksitin altıgen yapısı.

Günümüzde eksfoliyasyon (Katman ayırma yöntemi) ve grafen oksitin indirgenmesi yöntemleri, büyük ölçekli grafen üretimi için en çok kullanılan yöntemler olarak kabul edilmektedir. (Zurutuza and Marinelli 2014).

Diğer nano parçacıklarda gözlemlendiği gibi grafen tanecikleri de matris içerisine homojen bir şekilde yayıldığı zaman, nanokompozit malzemenin özellikleri maksimum oranda gelişmektedir. Çünkü darbe etkisi, bütünleşen polimer ve nano parçacık

tabakasına transfer edilir (Wajid vd. 2012). Bu sayede, grafen ile matris arasındaki homojen dağılım ve güçlü etkileşim grafen nanokompozit malzemenin performansını artırır (Liew vd. 2015). Balistik panel üzerindeki darbe etkisini yüzey ve tabakalar üzerinde dağıtmak balistik mukavemet açısından istenen özelliklerden bir tanesidir. Böylece grafen ve matrisler arasındaki dağılım ve güçlü etkileşim grafen nanokompozitlerin performansı için çok önemlidir.

2.6 Kompozitlerin Balistik Etki Altında Davranışı

Kompozitlerin balistik darbe anında tepkilerini belirleyen en önemli faktör darbe hızıdır. Mermi ile kompozit yapı arasındaki enerji geçişi, enerji dağılımı ve hasar yayılım durumu darbe hızına bağlı olarak değişmektedir (Naik ve Shrirao 2004).

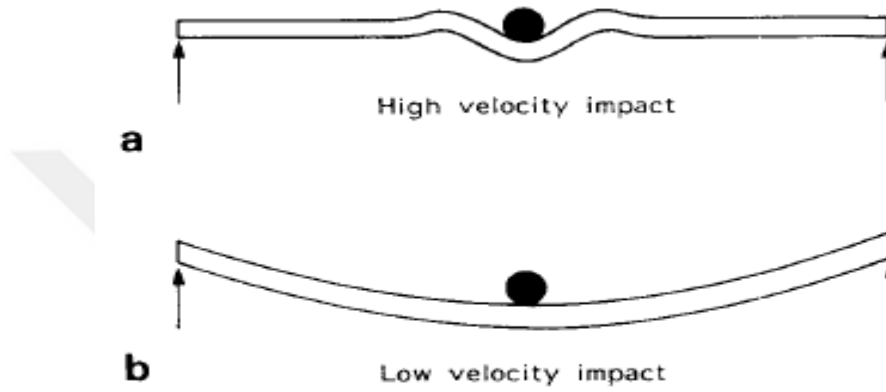
Kompozit yapılar yüksek hızlı bir darbe aldığında çöküntü, matris çatlaması, delaminasyon (tabakalara ayrılma), kesme tıkanması ve elyaf çekme hatası dahil olmak üzere farklı sonuçlar gözlemlenebilir (Bhatnagar 2016). Genel olarak balistik darbe, 100-1000 m/s aralığında hıza sahip mermi veya diğer şarapnellerin kompozit veya yumuşak zırh malzemelerine çarpma etkisini ifade etmektedir (Starratt vd. 2000).

Lif özellikleri, fiber ve matris arasındaki arayüz özellikleri, kumaş mimarisi, matris performansı gibi kompozit bileşenlerinin özellikleri, kompozitlerin balistik performansını büyük ölçüde etkiler. Bu kapsamda kompoziti oluşturan her bir bileşenin doğru seçimi, kompozitin balistik mukavemeti üzerinde doğrudan etki yapmaktadır.

2.6.1 Kompozitin Yapıların Darbe Anında Tepkileri

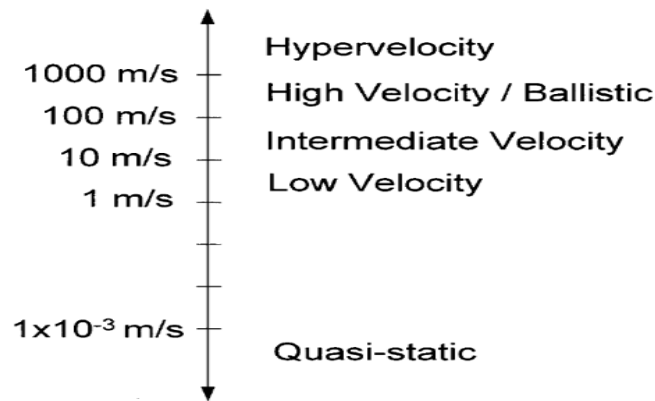
Bir balistik darbe olayı sırasında kompozit panellerin tepkisi, küresel ve yerel olmak üzere iki ayrılır (Ursenbach vd. 1995). Genel olarak, yerel tepki çarpma aktörü ile doğrudan teması olan kompozit bölgesinin davranışdır, küresel tepki ise kompozitin geri kalanının davranışı olarak ifade edilir (Ursenbach vd. 1995).

Genellikle merminin hızı, bu iki tür tepkiyi belirleyen en önemli faktör olarak bilinmektedir. Robinson ve Davies (1992), mermi hızı ile levha kalınlığı yönündeki ses hızı arasındaki oran tarafından belirlenen düşük ve yüksek hızlı darbe esnasında arasındaki sınır değerlerini belirlemişlerdir. Etki oranı hedefin başarısızlık geriliminden daha büyükse, yüksek hızlı etki olarak kabul edilir. Kompozitlerin yüksek ve düşük hızdaki etki altındaki tepkilerinin şematik gösterimi Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8 Darbe tepkisinin şematik gösterimi (a) yüksek hızlı darbe altında yükleme (b) düşük hızlı darbe yüklemesi.

Yüksek ve düşük hız aralığını kapsayan hız sınıflandırması ise Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Orta dereceli mermi hızları 10-100 m/s aralığında, yüksek hızlı mermi yani balistik hız ise 100-1000 m/s aralığındadır. Bu kapsamda üretimi yapılacak kişisel balistik zırhlar da yüksek hızlı mermilere karşı koruma sağlayacak şekilde dizayn edilmelidir.



Şekil 2.9 Darbe etkileri için standart hız sınıflandırması.

Cantwell ve Morton (1989), düşük ve yüksek hızlı mermi darbelerine karşı karbon fiber takviyeli polimerlerin tepkilerini karşılaştırmıştır. Nispeten yüksek bir darbe hızında, yerel hasarın enerji sönümleme sürecinde önemli bir rol oynadığını, nispeten düşük bir çarpma hızında ise küresel plaka hasarının daha önemli olduğunu tespit ettiler. Bu araştırma artan darbe enerjisinin delaminasyon alanında bir artış meydana getirdiğini ortaya çıkardı. Bu faktörler göz önüne alındığında balistik darbe etkisinde kalan kompozit yapıların verdiği tepkilerin araştırılması, daha mukavim yapıda kompozitlerin oluşturulmasında fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

2.6.2 Kompozitlerin Enerji Yayılım Mekanizmaları

Yüksek hızlı balistik darbe anındaki enerji sönümleme kapasitesi, kompozitlerin balistik performansı etkileyen kilit faktördür (Naik ve Shrirao 2004). Balistik darbe sırasında çeşitli biçimlere aktarılan merminin genel kinetik enerjisinin ana kısmı kompozitler tarafından sönümlenir.

Balistik çarpma anında kompozitler için enerji yayma mekanizmaları; ipliklerin çekme kırılması, matris çatlaması, tabaka içi/tabakalar arası delaminasyon ve sürtünme süreçleridir (Naik ve Shrirao 2004). Kompozitler enerjiyi sadece deformasyon yoluyla değil, aynı zamanda matris çatlaması ile liflerin kendilerinin deformasyonu ve yırtılması şeklinde sönümleyebilir (Hogg 2006). Balistik darbe anında kompozit yapıda meydana gelebilecek olan delinme, fiber kopması ve delaminasyon durumları Şekil 2.10'da gösterilmiştir (Turan 2007). Delaminasyon, tabakalı kompozit malzemeyi oluşturan katmanların birbirinden ayrılması olarak ifade edilmektedir. Ayrılma katmanların arasında bulunan ve katmanları birbirine bağlayan alanda bulunan ince matris malzemesinde gerçekleşmektedir.

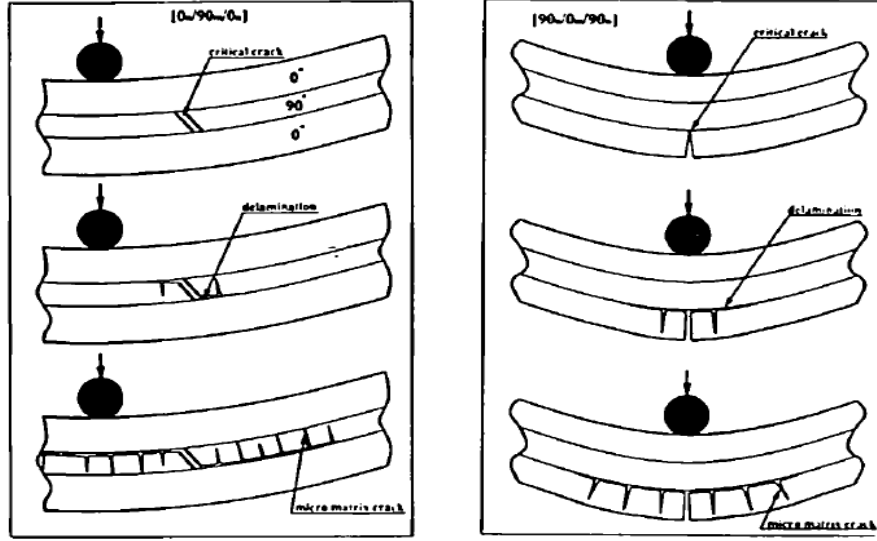


Şekil 2.10 Kompozitlerde hasar oluşumu (Turan 2007).

Kompozit yapıların balistik darbe performansı, takviye ile matrisin mekanik ve fiziksel özelliklerine, merminin ve hedefin ise fiziksel özelliklerine bağlıdır (Naik ve Shrirao 2004). Hedefin mekanik özellikleri arasında elastisite modülü, çekme mukavemeti, kırılma gerinimi ve tabaka yapısı vardır. Mermi özellikleri, merminin kütle ve şeklini içerir. Hedefin kalınlık ve ebat parametreleri balistik mukavemet performansını etkiler. Balistik mermi genellikle düşük kütleli, yüksek hızlı bir darbe gücünü ifade eder. Bir hedefin balistik limiti, tam delinmenin sıfır çıkış hızıyla gerçekleştiği bir merminin maksimum hızı şeklinde tanımlanır.

Cunniff (1995) balistik etki altında vücut zırh sistemlerinin enerji sönümleme özelliklerini; malzeme parametreleri, yapı parametreleri ve darbe koşulları olmak üzere üç kategoride sınıflandırmıştır. Malzeme parametreleri, malzeme başarısızlık kriterleri ve yapısal özellikleri içerir. Yapı parametreleri; kumaş türü, zırhın kalınlığı, sistem alan yoğunluğu vb. unsurları içerir. Darbe koşulları ise mermi kütlesi, çarpma hızı, çarpma eğimi, geometrisi ve özellikle merminin burun şekli unsurlarını içerir.

Yi ve Shen (2015), balistik darbe sırasında meydana gelen iki tip matris çatlağını tanımlamıştır. Bu çatlakların delaminasyon için başlangıç mekanizmaları olarak hizmet ettiği sonucuna varılmıştır. Şekil 2.11’de gösterildiği gibi enine kesme ve eğilme çatlakları olmak üzere iki tip çatlak vardır. Enine kesme çatlakları, tabakalar arası kayma gerilmesi ve enine gerilmeye bağlı olarak çarpma noktasından yaklaşık 45 derece uzakta meydana gelmektedir. Eğilme çatlakları ise panelin bükülmesinin neden olduğu çekme geriliminden dolayı panelin alt katmanlarında görülmektedir. Ayrıca delaminasyon tabakalar için önemli bir enerji soğurma mekanizması olarak kabul edilmektedir.



Şekil 2.11 Darbe etkisi.

Kompozitler için yüksek hızlı çarpma anında mermi normalde kesme tıkanması olarak adlandırılan hedefin ilk birkaç katmanını deler. Bu durum daha fazla keskin kenarları olan mermilerde ortaya çıkar. Hedefteki sonraki katmanlar gerilir ve enerjiyi sönümler (Scott 1999).

2.6.3 Nanokompozitlerin Balistik Performansına Nanopartiküllerin Etkisi

Balistik darbe esnasında matris çatlaması ve delaminasyon da dahil olmak üzere farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Kompozitlerin enerji yayma kapasitesinin artırılmasına için nanopartiküllerin katkı sağlaması yönünde muazzam çabalar ortaya konmaktadır (Njuguna vd. 2007). Deneysel sonuçlar belirli nanopartiküllerin balistik mukavemet için gerekli olan sertlik, kırılma tokluğu ve enerji sönümler gibi kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirebildiğini göstermiştir. Nanokompozitlerin darbe enerjisini sönümler kapasitesi; nanokompozitleri oluşturan her bir bileşenin (lif, matris ve parçacık) türüne, bileşenlerin ara yüzey özelliklerine, partikül ağırlık oranına, partikül dağılım durumuna ve dağılım yöntemine bağlıdır (Avila vd. 2011).

Avila vd. (2011) cam/epoksi kompozitler üzerinde nanokil ve nanografitin balistik darbe performansına etkisini incelemiştir. Nanokil ve grafit nano tabakaların cam/epoksi kompozitlere ilave edilmesi, bu kompozitlerin yüksek hızlı darbe direncini

arttırmasının yanısıra başarısızlık mekanizmaları üzerinde de önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Nanokompozitlerde bileşen türlerinin yanısıra nanoparçacıkların ağırlık oranı ile matris içindeki dağılım biçimleri istenen özellikleri elde etmek için anahtar faktörlerdir.

Gibson vd. (2013), bir epoksi matris içinde karbon nanotüpler ve/veya öğütölmüş karbon fiberler eklenmiş Kevlar 29 kumaştan oluşan çeşitli zırh kompozit panellerini farklı balistik darbe koşulları altında test etmiştir. Ağırlıkça % 1,65 karbon nanotüp ile % 1,65 öğütölmüş lif kombinasyonu için V50 balistik test sonuçlarında % 6.5' luk bir iyileşme tespit etmiştir.

Yukarıda yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, grafen ve türevlerinin sahip olduğu kopma mukavemeti, kırılma tokluğu, sertlik vb. istisnai mekanik özelliklerin nanokompozitlerin enerji sönmöleme yeteneklerini geliştirebileceği öngörülmektedir. Ancak grafen ve türevlerinin balistik performansa etkisinin bulunması üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

2.7. Balistik Koruma

Balistik koruma; farklı büyüklükte, hızda ve yapıda ileri teknoloji silah, mermi ve şarapnellere karşı insan vücudunun ve başın korunması anlamına gelir ve kullanılan zırh malzemelerinde olması gereken önemli bir özelliktir. Balistik koruyucu malzeme ve teçhizatlar, mermi ve şarapnel parçacıklarının kinetik enerjilerini sönmöleyerek vücudu savunmaktadır (Çay vd. 2007).

Balistik koruma amaçlı kullanılan askeri teçhizatların başında insanların hayati organlarını koruyan balistik başlık ve yelekler gelmektedir. Balistik yelekler ve başlıklar, balistik çarpma anında hayati organları yüksek hızlı darbeler sonrasında oluşacak yaralanmalara ve ölümlere karşı korumak üzere tasarlanmış malzemelerdir (Turan 2007).

Balistik başlıklar, şarapnel veya düşük enerjili mermilere (tabancalar ve makinalı

tabancalardan ateşlenen) karşı koruma sağlar. Genel olarak balistik başlıklar, tüfeklerden ateşlenen yüksek enerjili mermileri durduramaz. Vücut zırhı (balistik yelek vb.) ise şarapnel, düşük ve yüksek enerjili mermilere hatta bıçaklara karşı koruma sağlar. En kapsamlı kişisel vücut zırh sistemleri, yaygın olarak patlayıcı mühimmat imhasında kullanılan EOD (Explosive Ordnance Disposal/Patlayıcı Mühimmat Yok Etme) bomba imha kıyafetleridir (Cooper ve Gotts 2005). Modern vücut zırhları, Ortaçağ'da şövalyelerin kullandığı bütün vücudu kaplayan ağır zırh yapılarından değişime uğrayarak vücudun hassas organlarını koruyan ve hareket kabiliyetini daha az etkileyen balistik koruyucu yeleklere dönüşmüştür.

Balistik koruyucu ürünlerin tasarımında birçok kriter göz önünde bulundurulurken ağırlık performans kriteri dikkate alınması gereken en önemli unsurlardan biridir. Çünkü koruma seviyesini artarken doğru orantılı olarak koruyucu balistik ürünün de ağırlığı da artmaktadır. Sonuç olarak balistik koruyucu ürünün nihai ağırlığı ve yapısı; kullanan kişinin hareket kabiliyetini ve performansını doğrudan etkilemektedir.

2.7.1 Balistik Zırhların Tarihi

Balistik zırhlar, en az beş bin yıldır muharebe alanlarında kullanılmaktadır. Balistik zırhlar bu uzun zaman zarfında büyük değişimler geçirmiştir. Eski zamanlarda kullanılan deri, hayvan kürkü, metal vb. malzemelerden günümüzde kullanılan ileri teknoloji kompozit malzemelere kadar büyük değişimler olmuştur.

İlkçağlarda, ilkel toplumlarda daha çok doğada bulunan doğal malzemeler kullanılarak kişisel zırhlar yapılmıştır. Örneğin Mısır'da M.Ö 3. yüzyılda kullanılmış timsah derisinden savaş zırhı Resim 2.3'de gösterilmiştir (İnt. Kyn. 3). Eski çağlarda yapılan bu ilkel savaş zırhlarından sonra; kullanılan malzemelerin değişmesi, tehdit çeşitlerinin artması ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte farklı kişisel zırhlar geliştirilmiştir.



Resim 2.3 Timsah derisinden yapılmış savaş zırhı (İnt. Kyn. 3).

Balistik koruma amaçlı tekstil bazlı ilk yumuşak zırh örnekleri ipekten yapılmıştır (Cheeseman ve Bogetti 2003). Daha sonra ipeğin yerini naylon almıştır (Lim vd. 2005). Bu lifler zırhlar için gerekli olan yüksek gerilme mukavemetine sahiptir. Son zamanlarda kullanılanlar ise; aromatik poliamid (Cheeseman ve Bogetti 2003), ultra-yüksek modüllü polietilen (UHMPE) (Marissen vd. 2010), zylon (Holmes vd. 2009), balistik naylon gibi yüksek performanslı liflerdir. Bu lifler, merminin oluşturduğu kinetik enerjiyi etki noktasından zırhın farklı katmanlarına yayarak darbe etkisini azaltmaktadır (Scott, 2005). Yukarıda bahsi geçen lifler kullanılarak yapılan modern balistik koruyucu başlık ve yelek örnekleri Resim 2.4’de gösterilmiştir (İnt. Kyn. 4).



Resim 2.4 Modern balistik koruyucu başlık ve yelek (İnt. Kyn. 4).

Yeni nesil kompozit yapıda imal edilen tekstil bazlı bu ürünler birçok avantaj sağlamıştır. Günümüzde kullanılan bu ürünler; deri, metal vb. bazlı yapılan koruyuculara nazaran ağırlık, kullanım konforu, esneklik, hareket kabiliyeti, bedensel farklılıklara bağlı imalat kolaylığı ve balistik performans kriterlerinde önemli oranda gelişme sağlamıştır. Ayrıca söz konusu liflerin katmanlı yapıda dizayn edilebilmesi, balistik çarpma anındaki merminin kinetik enerjisini sönmüleme ve diğer katmanlara yayması kişisel zırhların koruma seviyesini artırmaktadır.

Günümüzde balistik koruyucu teçhizatların koruma seviyesi, etki altında kalınabilececek olan tehdit seviyesine göre belirlenmektedir (Scott 2005). Ancak koruma seviyesi arttıkça ağırlığın da artması kaçınılmaz bir durumdur. Koruyucu teçhizatı kullanan kişi fiziksel performans gösterdiği için ağırlığın etkisiyle vücut ısısı artacaktır. Vücut ısısını artması; kan basıncı artışı, sıvı kaybı, stres, konfor kaybı vb. olumsuz etkilere maruz kalacaktır. Nanoteknoloji ile beraber nefes alabilir membranların üretilmesi bu tür olumsuz etkileri azaltacaktır.

Günümüzde kişisel zırhlar tasarlanırken tehdit seviyesi göz önünde bulundurularak balistik koruma ve hareket kabiliyeti arasında dengeyi gözetebilecek optimal bir çözüm geliştirilmesi hedeflenmektedir. Tehdit seviyeleri ise; şarapnel, düşük hızlı mermi ve yüksek hızlı mermi olarak üçe ayrılmaktadır.

2.7.2 Balistik Koruyucu Malzemelerin Türleri

Modern anlamda kişisel balistik koruyucu zırhlar, kullanılan malzemenin cinsine göre sert ve yumuşak zırhlar olarak ikiye ayrılmaktadır. Genellikle sert zırhların koruma seviyesi yumuşak zırhlardan daha yüksek olmaktadır. Buna rağmen sert zırhlar yumuşak zırhlara göre daha ağır ve esneklik özelliği daha az olmaktadır.

2.7.2.1 Sert Vücut Zırhları

Sert vücut zırhları adlarından da anlaşabileceği gibi seramik, metal, kompozit, takviye edilmiş plastik gibi sert malzemelerden yapılmaktadır. Sert zırhlar genellikle seramik ve

kompozit yapıda malzemeler beraber kullanılmasıyla oluşmaktadır. Seramik malzeme mermiyi körletmek ve parçalamak için kullanılırken, kompozit malzeme merminin ilerleyişini durdurmak için kullanılır. Seramik ve kompozit malzemelerden üretilen zırhlarda koruma seviyesinde önemli ölçüde artış meydana gelmiştir (Medvedovski 2010).

Genellikle seramik zırh sistemleri monolitik bir seramik veya kompozit seramik-metalden oluşur. Sert zırhlar ise balistik koruma seviyesinin sağlanması için seramik ve lifli kompozit yapının birleşiminden oluşur. Seramik kısmın yanı sıra lifli kısım da Kevlar, Twaron, Spectra, Dyneema gibi ticari elyaflar kullanılır. Bu iki kısım yüksek sıcaklık ve basınçta altında birleştirilir. Seramik malzemesi bor karbür (B4C), kompozit malzemesi ise ultra yüksek modüllü polietilen kumaş (Ultra High Molecular Polyethylene/UHMPE) olan ve zırh delici mermilere karşı koruma sağlayan örnek bir sert plaka, Resim 2.5’de görülmektedir. Koruma seviyesi daha yüksek olduğu için sert zırhlar yumuşak zırhlara göre daha ağırdır.



Resim 2.5 Sert vücut zırhı (İnt. Kyn. 5).

2.7.2.2 Yumuşak Vücut Zırhları

Yumuşak vücut zırhları balistik liflerden oluşan katmanlı yapılardır. Bu lifler, balistik koruyucu ürün elde etmek için gelişmiş dokuma kumaşlara dönüştürülürler. Kullanılan lifin tipi ve performansının yanı sıra iplik özellikleri, dokuma türü, katman sayısı balistik koruma üzerinde etkili olan faktörlerdir. Bu tür vücut zırhları yeterli koruma düzeyinde esneklik, konfor ve hafiflik gerektiği zamanlarda tercih edilirler. Hareket kabiliyeti ve esneklik özelliklerinin ön planda tutulan yumuşak zırh örneği Resim 2.6’de gösterilmiştir.

Ayrıca mermi tipi, geometrisi, hızı ve çarpma açısı yumuşak vücut zırhların koruma seviyesini etkilemektedir (Karahana 2008). Yumuşak vücut zırhlarının yapısında seramik esaslı malzeme kullanılmadığından koruma seviyeleri daha düşük olmakta ve genellikle tabanca ve makinalı tabanca mermilerine karşı koruma sağlamaktadır.



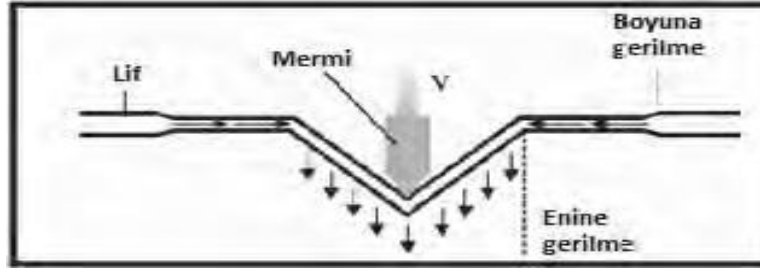
Resim 2.6 Yumuşak vücut zırhı (İnt. Kyn. 6).

2.7.3 Balistik Koruma Mekanizması

Balistik koruyucu malzemelerin çalışma prensipleri genel olarak darbe enerjisinin emilmesi ve darbe enerjisinin yeniden dağıtılması olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir (Karahana 2008). Koruyucu bir malzeme, bir merminin enerjisini malzemeye tamamen girmeden önce absorbe etmelidir. Enerji emilimi; malzemeyi gererek, sıkıştırarak veya yok ederek elde edilir. Başka bir deyişle vücut zırhının çalışma prensibi, vuran bir mermiden gelen kinetik enerjinin balistik vücut zırhı içinde gerilim enerjisine hızlı bir şekilde dönüştürülmesine ve dağılmasına dayanmaktadır (Cooper ve Gotts 2005).

Darbe enerjisinin dağılma şeklini etkileyen ana parametreler; kumaşların ve ipliklerin gerilme mukavemeti, kumaş yapıları ve kumaş katmanlarının sayısıdır. Bir mermi bir kumaşa veya birkaç kumaş katmanına çarptığında, dış yüzeyde çarpma noktasından boyuna ve enine dalgalar olmak üzere iki dalga yayılır. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi boyuna dalga kumaş düzleminde hareket eder ve enine dalga kumaşa dik olarak yayılır. Oluşan bu dalgaların kumaşın katmanları tarafından sönümlenme kapasitesi, balistik

performansı belirleyen önemli bir faktördür.



Şekil 2.12 Merminin kumaş liflerine etkisi.

2.7.4 Balistik Test Standartları

Dünya üzerinde balistik koruyucu özellikli malzemelerin koruma durumlarının tespit edilmesi için kullanılan birçok farklı standart bulunmakta olup bu standartlar Çizelge 2.3’de gösterilmiştir (Bozdoğan vd. 2015).

Çizelge 2.3 Balistik Test Standartları (Bozdoğan vd. 2015).

Standart Nu	Standart Adı
TS 11164	Balistik koruyucu vücut zırhı
TS 13349	Askerî zırhlar - V50 balistik hız deneyi
MIL-A-46103 C	Light Weight, Ceramic Faced Composite Armor Procedure Requirements
MIL-B-44053	A Fragmentation Protective Body Armor, Vest Ground Troops
MIL-STD-662 F	Balistic Test For Armor
NIJ-STD-0101.04	Balistic Resistance Of Personal Body Armor
NIJ-STD-0101.06	Balistic Resistance Of Personel Body Armor
NIJ-STD-0108.04	Balistic Resistance Of Protective Materials
STANAG 2920	Balistic Test Method for Personal Armor
UK/SC/4697	The Balistic Testing Of Fragment Protective Personal Armors
UL 752	Balistic Resistance Equipment
PPAA STD-1989-05	Balistic Resistance Of Personel Body

Bu standartlar arasında yaygın olarak kullanılan standartlar NIJ (National Institute of Justice) standartlarıdır. Bu standartlar ABD Adalet Departmanı Ulusal Adalet Enstitüsü tarafından belirlenmektedir. Bu standartların amacı, gövdeyi silah ateşine karşı

korumaya yönelik kişisel vücut zırhının balistik direnci için minimum performans gerekliliklerini ve test yöntemlerini belirlemektir.

2.7.4.1 NIJ-STD-0101.04 Standardı

NIJ-STD-0101.04 standardı, vücut zırhlarının koruyuculuğu test etmek için kullanılan en yaygın standartlardan birisidir. NIJ-STD-0101.04 standardını test kriterleri Çizelge 2.4’de gösterilmiştir (NIJ-STD-0101.04 2001). Bu tabloda farklı koruma seviyelerinde test yapılması için kullanılması gereken merminin çapı, ağırlığı, hızı, hedefe çarpma açısı, atış miktarı, hedefteki maksimum çöküntü miktarı gibi değerler yer almaktadır.

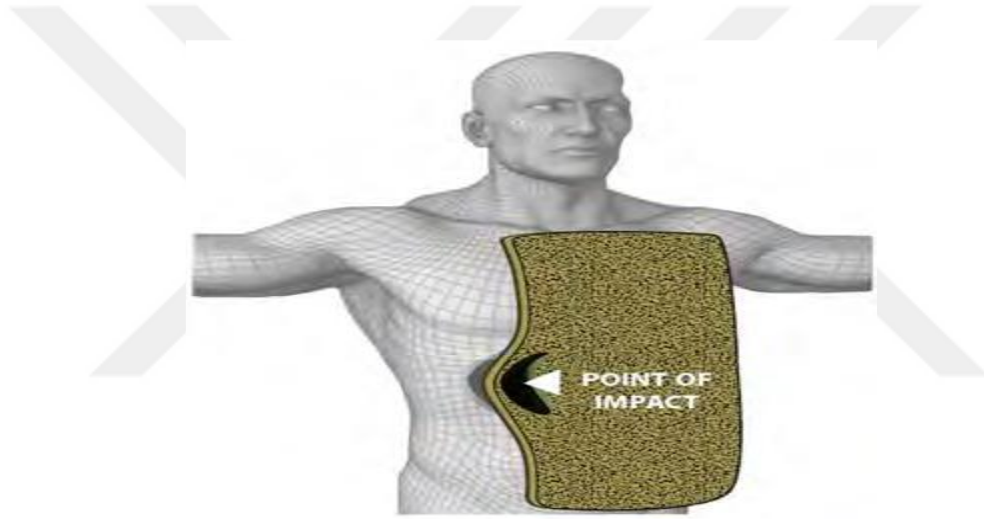
Çizelge 2.4 NIJ-STD-0101.04 Standardı Test Kriterleri (NIJ-STD-0101.04 2001).

Koruma Seviyesi	Test Mermisi	Mermi Ağırlığı (g)	Memri hızı (m/s)	0” açılı ile çarpan mermi sayısı	30” açılı ile çarpan mermi sayısı	Panel için Toplam Atış Sayısı	Maksimum Çöküntü Derinliği (mm)
I	0,22 caliber	2,6	329	4	2	6	44
IIA	9 mm FMJ RN	8	341	4	2	6	44
II	9 mm FMJ RN	8	367	4	2	6	44
IIIA	9 mm FMJ RN	8,2	436	4	2	6	44
III	7,62 NATO FMJ	9,6	838	6	0	6	44
IV	0,30 caliber M2 AP	10,8	869	1	0	1	44
Special	--	-	-	-	-	-	44

Bu değerlerin birçoğu koruma seviyesine göre değişirken değişmeyen tek kriter maksimum çöküntü miktarıdır ve bu da 44 mm’dir. Bu değer balistik darbe anında insan vücudunda balistik plaka arakasındaki künt travmanın oluşmaması için gereken maksimum değer olarak hesaplanmıştır. Test plakasında delinme olması veya çöküntü

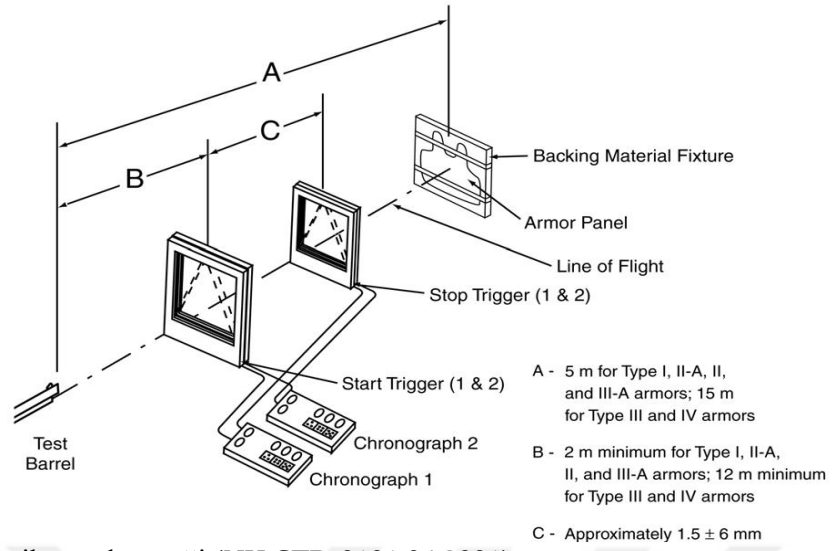
miktarının 44 mm'den fazla olması o test numunesinin koruyuculuk anlamında başarısız olduğunu göstermektedir.

Vücut zırhları hafif silah mermilerinin vücuda nüfuz etmesini önlemek için kullanılmasına rağmen bazen mermiler girinti şeklinde deformasyonlar meydana getirebilir ve hayati tehlike arz eden yaralanmalar olabilir. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi darbe etkisi zırh arkasında künt travmaya neden olabilir. Dokularda, iskelet yapılarında ve organlarda ciddi yaralanma oluşabilir ve ölümcül olabilir. Künt travma anlık olmayabilir, ancak balistik dalgaların vücuda yayılmasına bağlı olarak daha sonra kendini gösterebilir ve uzak organlara zarar verebilir (Cavallaro 2011).



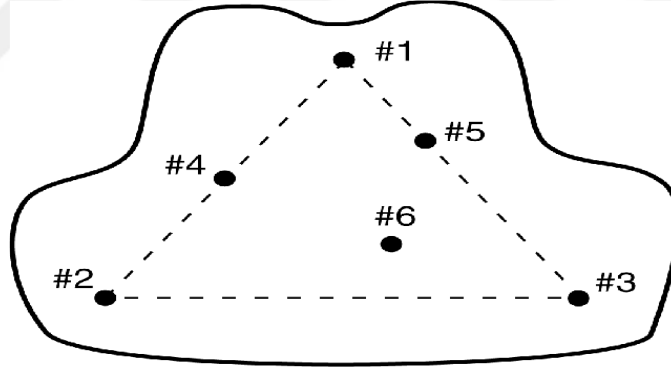
Resim 2.7 Vücutta künt travma oluşumu (Cavallaro 2011).

Bu standarda göre oluşturulan balistik test düzeneği Şekil 2.13'de görülmektedir. Koruma seviyesi I, II-A, II ve III-A olan plakalar için namlu ile hedef arasındaki mesafe 5m, III ve IV seviye plakalar için ise 15 m olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Balistik test düzeneği (NIJ-STD-0101.04 2001).

Örnek bir test paneline yapılması gereken 6 adet atışın yapılacağı noktalar ise Şekil 2.14’da gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Test Plakasında Yapılacak Atış Konumları (NIJ-STD-0101.04 2001).

Hayati organları korumada önemli yer tutan balistik koruyucu yeleklerde koruma seviyesi genellikle seviye IIIA, III ve IV olarak belirlenmektedir. Balistik koruyucu başlıklarda ise koruma seviyesi azami seviye IIIA olarak belirlenmektedir. Çünkü daha üst seviye bir koruma seviyesinde ağırlık artacağından balistik çarpma esnasında boyun travması oluşabilecektir.

IIIA seviyesinde tabanca ve makinalı tabanca mermilerine karşı korunma sağlanmaktadır. Balistik koruyucu yeleklerde ise daha üst seviyede koruma sağlanabilmektedir. Yeleklerde yumuşak ve sert vücut zırhları kullanarak tehdit

seviyesine koruma seviyesi belirleme imkanı mevcuttur. Yeleklerde başlıkların koruma seviyesine ilave olarak seviye III piyade tüfekleri ile seviye IV zırh delici mermilere karşı koruma imkanı bulunan yelekler üretme imkanı mevcuttur. Yeleklerde bulunan modüler sert plakaların değiştirilerek kullanılabilmesi tehdit seviyesine göre alternatif c z mler sunmaktadır.



3. MATERYAL ve METOT

3.1 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

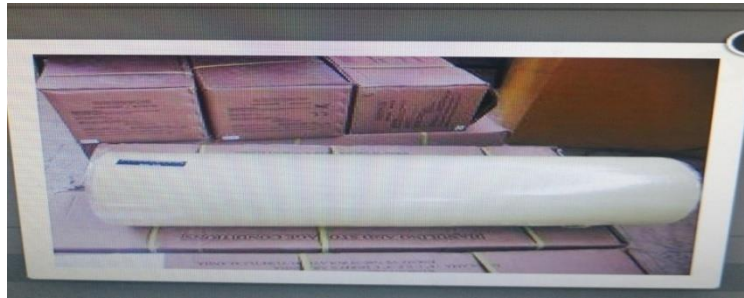
Balistik test plakalarının üretim prosesinde kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

3.1.1 Aramid Kumaş

Aramid kumaşa olması gereken özellikler aşağıda belirtilmiştir.

- ✓ Kumaş cinsi %100 aramid olacaktır.
- ✓ Kumaş doku tipi 1/1 (bir bölü bir) bezayağı olacaktır.
- ✓ Kumaşın eni 100 ± 2 cm.'dir.
- ✓ Kumaşın bir yüzü renksiz fenolik esaslı polivinül bütiral (PVB) reçine ile kaplanmış olacaktır.
- ✓ PVB reçine kaplı kumaşın birim alan kütlesi en fazla 490 g/m^2 olacaktır.
- ✓ Kaplamanın birim alan kütlesi 55 g/m^2 olacaktır.
- ✓ Kumaşın iplik sıklığı atkı ve çözgüde en az 60adet/10 cm olacaktır.
- ✓ Delinme testine tabi tutulduğunda hiçbir delinme olmayacak ve çöküntü derinliği en fazla 44 mm olacaktır.
- ✓ Kumaştan imal edilen başlıklarda yapılan balistik testlerde koruma seviyesi NIJ standartlarına göre Seviye IIIA olacaktır.

Deneysel çalışmada kullanılan aramid kumaş Resim 3.1'de, aramid kumaş parçasının dijital fotoğraf makinesinde incelenmesi ise Resim 3.2'de gösterilmiştir.



Resim 3.1 Aramid kumaş.

Resim 3.2’ de görülen dijital resimde aramid kumaşın orjinal özelliklerini koruduğu ve hidrolik preste basım işlemlerinde kullanılmasında bir sakınca olmadığı görülmektedir.



Resim 3.2 Aramid kumaş parçasının dijital resmi.

3.1.2 Epoksi Reçine

Epoksi reçinede olması gereken özellikler aşağıda belirtilmiştir.

- ✓ Şeffaf olacak, solvent içermeyecek ve çift bileşenli olacaktır.
- ✓ Epoksi reçine modifiye edilmiş reçinesi ve sertleştiricisi ile beraber olacaktır.
- ✓ Reçine ile sertleştiricinin ağırlıkça karışım oranı 4/1 olacaktır.
- ✓ Karıştırılınca homojen bir görünüm alacaktır.

Deneysel çalışmalarda Resim 3.3’de belirtilen epoksi reçine ile hızlandırıcısı kullanılmıştır.



Resim 3.3 Epoksi reçine.

3.1.3 Grafen Nano Tabaka

Nanografi firmasından temin edilen grafen nano tabakalar Resim 3.4’de ve söz konusu malzemeye ait teknik özellikler ise Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.



Resim 3.4 Grafen nano tabaka.

Deneysel çalışmada kullanılan grafenin tipik bir şekilde grafenin genel özellikleri yansıttığı Çizelge 3.1’de görülmektedir.

Çizelge 3.1 Grafen Nano Tabakanın Teknik Özellikleri.

Teknik Özellikler	Grafen Nano Tabaka
Saflık	% 99.9
Kalınlık (nm)	5
Çap (µm)	7
Yüzey Alanı (m ² /g)	135
İletkenlik (s/m)	1100-1600
Renk	Gri

3.2 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar

3.2.1 Mekanik Karıştırıcı

Grafen nano toz ve epoksi reçinenin karıştırılarak söz konusu karışımın homojen bir yapı alması ve aramid kumaş üzerinde mümkün olduğunca düzgün bir dağılım sağlanması ve kumaş üzerindeki gözeneklerin kapanması için mekanik karıştırıcı kullanılmıştır (Resim 3.5).



Resim 3.5 Mekanik karıştırıcı.

3.2.2 Hassas Terazi

Aramid katmanların ağırlıklarının hesaplanması, grafen ile epoksi reçine karışım miktarlarının tespiti, hidrolik preste basımdan önce ve sonra balistik plakaların ağırlıklarının tespiti işlemlerinde hassas terazi kullanılmıştır (Resim 3.6).



Resim 3.6 Hassas terazi.

3.2.3 FTIR (Fourier Transform Infrared/Fouirer Dönüşümlü Kızılötesi) Cihazı

Nanografi firmasından temin edilen grafenin malzeme karakterizasyonunun ve içindeki molekül yapılarını tespit etme işlemlerinde FTIR (Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi) analizinin yapılması için Afyon Kocatepe Üniversitesi Polimer-Kompozit Malzemeler laboratuvarında bulunan FTIR cihazı kullanılmıştır (Resim 3.7).



Resim 3.7 FTIR cihazı.

3.2.4 SEM (Scanning Electron Microscope/Taramalı Elektron Mikroskobu)

Balistik plaka yapımında kullanılacak olan grafen nano tozun morfolojik analizlerin yapılması aşamasında AKÜ TUAM'da bulunan SEM cihazı kullanılmıştır (Resim 3.8).



Resim 3.8 SEM cihazı.

3.2.5 Raman Cihazı

Raman spektroskopisi, grafen örneklerinin yapısı hakkında bilgi sağlayan ender cihazlardan biridir. Deneysel çalışmada kullanılan grafenin karakterizasyonu için Renishaw Invia Reflex Raman cihazı kullanılmıştır (Resim 3.9).



Resim 3.9 Renishaw Invia Reflex Raman cihazı.

3.2.6 Çekme Testi Cihazı

Grafen katkılı aramid plakaların mekanik özelliklerini belirlemek için Shimadzu marka çekme test cihazı kullanılmıştır (Resim 3.10).



Resim 3.10 Çekme testi cihazı.

3.2.7 Otomatik Kumaş Serim ve Kesim Makinesi

Balistik plaka yapımında kullanılacak olan aramid kumaşın bilgisayar destekli otomasyon sistemiyle kesim işleminde Serkon marka Otomatik Kumaş Serim ve Kesim Makinesi kullanılmıştır (Resim 3.11).



Resim 3.11 Otomatik kumaş serim ve kesim makinesi.

3.2.8 Hidrolik Pres

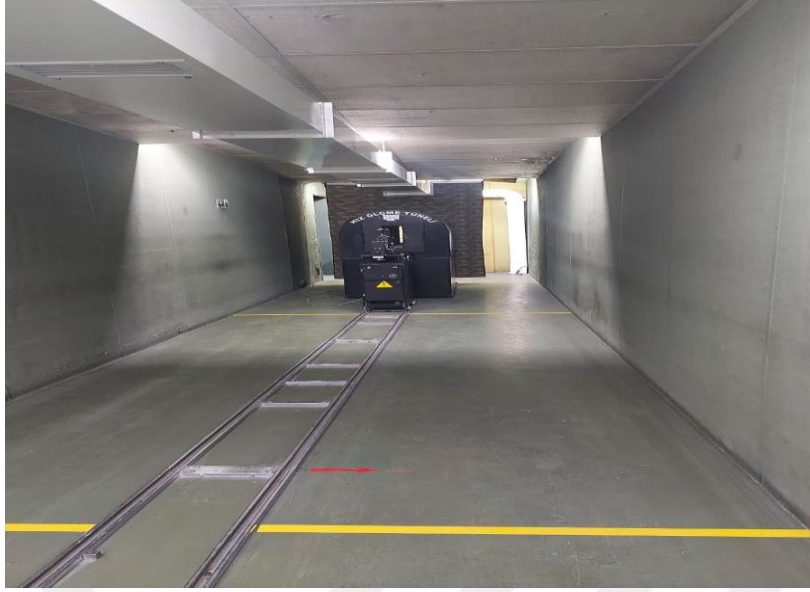
Balistik koruyucu plakaların uygun sıcaklık ve basınç koşullarında basım işlemleri için elektrik ısıtmalı, hava soğutmalı 2000 tonluk hidrolik pres kullanılmıştır (Resim 3.12).



Resim 3.12 2000 tonluk Hidrolik Pres

3.2.9 Atış Test Düzeneği

NIJ-STD 0101.04'e göre atış testlerin yapıldığı atış test düzeneği; atış namlusu (ileri-geri hareket sehpalı), mermi hızı ölçme tüneli, hedef bağlama aparatından oluşmaktadır (Resim 3.13).



Resim 3.13 Atış test düzeneği.

3.3 Deneyisel Çalışmada Kullanılan Grafenin Karakterizasyonu

3.3.1 FTIR Analizi

Deneyisel çalışmada kullanılan grafene Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) analizi yapılmıştır. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, bir çeşit titreşim spektroskopisi olmakla beraber malzeme karakterizasyonu için en çok kullanılan yöntemlerden birisidir. Bu yöntemde kızılötesi ışını kullanılarak moleküllerin farklı bağ yapılarının titreşim frekanslarını bulunur ve titreşimlerden kaynaklanan yapısal ve fonksiyonel bilgilerin elde edilmesini sağlar.

3.3.2 Raman Spektroskopisi

Deneyisel çalışmada kullanılan grafene Raman analizi yapılmıştır. Raman analizi, bir maddenin yapısı ve özellikleri ile ilgili bilgiler edinmek amacıyla ışığın madde ile etkileşiminden yararlanan bir yöntemdir. Raman spektroskopisi molekül içi ve moleküller arası titreşimlerle ilgili bilgi verir ve bir maddenin tanımlanmasını sağlar. Raman spektroskopisi, grafenin tabaka kalınlığının karakterizasyonu için mükemmel bir cihazdır. Grafen çeşitlerinin yapısı hakkında bilgi sağlayan sınırlı sayıda yöntem vardır ve bunların başında raman spektroskopisi gelmektedir.

3.3.3 SEM Analizi

Grafenin SEM cihazında görüntülerinin incelenmesi için analizi yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) odaklanmış elektron demeti sistemini kullanarak, incelenecek malzeme yüzeyini tarayıp görüntü oluşturan bir elektron mikroskobu çeşididir. Elektronlar numune olarak seçilen malzemedeki atomlarla etkileşim içerisine girer. Numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgilerin üretilmesini sağlayan sinyaller elde edilir. Bu sinyaller çeşitli algılayıcılar tarafından tespit edilerek bilgisayara ortamına transfer edilmesi sonucunda görüntü elde edilir.

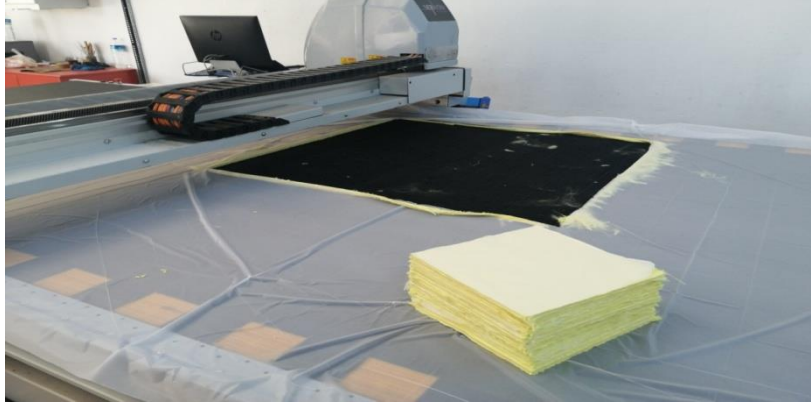
3.4 Numunelerin Üretim ve Test Prosesi

Buradaki amaç, balistik plaka yapısında temsili numune hazırlamaktır. Daha sonra hazırlanan numuneler NIJ-STD-0101.04 standardına uygun olarak IIIA seviyesinde balistik laboratuvarında atış testlerine tabi tutulacaktır. Ayrıca söz konusu numunelerde mermi giriş ve çıkış bölümleri dijital fotoğraf makinesinde incelenerek kompozitlerin balistik etki sonrasındaki enerji yayılım mekanizmaları değerlendirilecektir. Müteakiben hazırlanan numunelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için çekme testi yapılacaktır.

Grafen katkısı ile aramid katmanlarının sayısını azaltmak balistik koruyucu başlık ve giysilerin ağırlığını azaltacaktır. Bu da aynı koruma seviyesini daha az ağırlık ile başarma imkanı sağlayacaktır.

3.4.1 Balistik Test Plakalarının Üretimi

Balistik test plakalarının üretimi için öncelikle ana zırh kumaşı olan aramid kumaş Otomatik Kumaş Serim ve Kesim Makinasında kesilir. İstenen ölçülerde kesilen aramid kumaş kesitleri yine istenen kat sayısında üst üste dizilir.



Resim 3.14 Aramid Kumaşın Otomatik Serim ve Kesim Makinasında Kesilmesi.

Resim 3.14’de de görüldüğü aramid kumaşlar plaka basımı için 25x25 cm ölçülerinde kesilmiştir.

Plaka üretimi için ikinci aşama grafen ve epoksi reçine karışımının aramid kumaş katmanlarına elle yatırma tekniği ile sürülme işlemidir. Aramid kumaş katmanları plaka oluşumu için 13 kat olarak üst üste dizilmiştir. Bir aramid katmanının ağırlığı 27 gr olarak ölçülmüş ve Resim 3.15’de görülmektedir. Dolayısıyla 13 katmanın toplam ağırlığı ortalama 350 gr olarak alınmıştır.



Resim 3.15 Bir aramid katmanın ortalama ağırlığı.

Doğru miktarda grafen katkısını belirleyebilmek için toplam ağırlığın % 0,5, 1 ve 1,5 oranında grafen katkısı hazırlanmıştır. Hazırlanan grafen nano tabakalar ile epoksi ve hızlandırıcısı ile birlikte bir cam beherde homojen yapı elde edilene kadar manuel karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Elde edilen bu karışım, aramid kumaşların bir yüzünde bulunan reçineleri sökildükten sonra bu yüzeylere sürülmüştür. 13 katmanlı plakaların,

üç katmanına bu işlem uygulanmış ve Resim 3.16’da bu işlem gösterilmiştir.



Resim 3.16 Aramid katmanlara grafen karışımının sürülmesi.

Bu aşamada ağırlıkça % 1,5 olan karışımda, grafen miktarı fazla olduğu için grafende topaklaşma meydana gelmiş ve aramid yüzeylere sürülme işlemi daha zor olmuştur. Bu maksatla 4/1 oranında karışım sağlanan epoksi ve hızlandırıcı miktarı artırılmıştır.

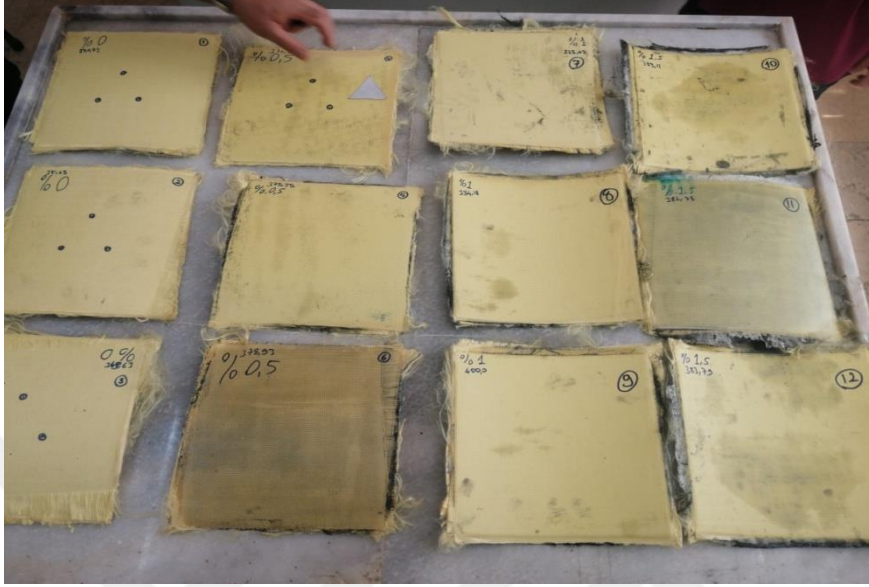
Test numunelerinin oluşturulmasındaki son aşama ise balistik plakaların hidrolik preslerde basım işlemidir. Grafen ve epoksi reçine karışımları sürüldükten sonra aramid katmanlar 13 kat olacak şekilde tekrar üst üste dizilerek basım işlemine hazırlanmıştır.



Resim 3.17 Test plakalarının hidrolik preste basımı.

Bir önceki aşamada hazırlanan numuneler Resim 3.17’de görülen 600 tonluk hidrolik preste uygun sıcaklık ve basınç değerlerinde basım işlemine tabi tutulmuştur. Grafen katkısız yalın aramid katmanlı 3 adet, ağırlıkça % 0,5 grafen katkılı 3 adet, ağırlıkça % 1 grafen katkılı 3 adet, ağırlıkça % 1,5 grafen katkılı 3 adet olmak üzere toplam 12 adet

test plakası imal edilmiştir. Basımı yapılan test plakaları Resim 3.18’de gösterilmiştir. Test plakaları basımdan sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.



Resim 3.18 Hidrolik preste basımı yapılan test plakaları.

3.4.2 Balistik Test Plakalarına Atış Yapılması

Bu çalışmadaki tüm atış test işlemlerinde, NIJ-STD-0101.04 standardı referans olarak alınmış ve atışlar bu standarttaki test kriterlerine uygun şekilde balistik test laboratuvarında yapılmıştır. Çizelge 3.2’de de görüldüğü üzere NIJ-STD-0101.04 standardı IIIA koruma seviyesinde hedefe 5 m mesafeden 9 mm çapındaki mermi ile yapılan atışlarda hedefte oluşan çöküntü değerinin en fazla 44 mm olması ya da hedefte delinme olmaması gerekmektedir. Ayrıca IIIA koruma seviyesinde, test düzeneğinde merminin namludan çıkış hızının 436 ± 10 olması gerekmektedir.

Çizelge 3.2 NIJ-STD-0101.04 standardı koruma seviyeleri.

Koru ma Seviye si	Kullanılan Mermi Tipi	Atış Hızı (m/sn)	Çekir dek Ağırlığı (gr)	Hedefe Olan Mesafe (m)	Mak. Çöküntü Derinliği (mm)
Seviye I	0.38 special RN 0.22 kalibre	329± 10 322± 10	10.2 2.6	5	44
Seviye IIA	0.357 mag, JSP 9mm FMJ	341± 10 322± 10	10.2 8.0	5	44
Seviye II	0.44 mag, JW 9mm FMJ	436± 10 367± 10	10.2 8.0	5	44
Seviye IIIA	0.44 mag, SWC 9mm FMJ	436± 10 436± 10	15.55 8.0	5	44
Seviye III	7.62 mm FMJ	838± 10	9.7	15	44
Seviye IV	36-60 AP	869± 10	10.8	15	44

Test düzeneğinde hedefte oluşacak çöküntü derinliğini ölçmek için Resim 3.19’da görülen macun kullanılmıştır. Test düzeneğinde macun test plakalarının arkasına yerleştirilmekte ve balistik test plakasını taşıyan canlıyı simüle etmektedir. Macun atış faaliyetinden önce tıpkı balistik test plakaları gibi oda sıcaklığında 24 saat süre ile şartlandırılmıştır.



Resim 3.19 Şartlandırılmış macun.

Hidrolik preste basım işlemi tamamlanan ve 24 saat oda sıcaklığında dinlendirilen balistik test plakaları atış öncesinde Çizelge 3.3’de numaralandırılmıştır.

Çizelge 3.3 Balistik Test Plakaları.

S.Nu	Balistik Test Plakası	Özellikler
1	13 Kat Aramid 25x25 cm	Katkı yok
2	13 Kat Aramid 25x25 cm	Katkı yok
3	13 Kat Aramid 25x25 cm	Katkı yok
4	13 Kat Aramid 25x25 cm	% 0,5 Grafen ve Epoksi
5	13 Kat Aramid 25x25 cm	% 0,5 Grafen ve Epoksi
6	13 Kat Aramid 25x25 cm	% 0,5 Grafen ve Epoksi
7	13 Kat Aramid 25x25 cm	% 0,1 Grafen ve Epoksi
8	13 Kat Aramid 25x25 cm	% 0,1 Grafen ve Epoksi
9	13 Kat Aramid 25x25 cm	% 0,1 Grafen ve Epoksi
10	13 Kat Aramid 25x25 cm	% 1,5 Grafen ve Epoksi
11	13 Kat Aramid 25x25 cm	% 1,5 Grafen ve Epoksi
12	13 Kat Aramid 25x25 cm	% 1,5 Grafen ve Epoksi

NIJ-STD-0101.04 standardına uygun olacak şekilde; IIIA seviyesinde balistik mukavemetin ölçülmesi için 12 adet numuneye, 5 metre mesafeden 9 mm FMJ (Full Metal Jacket) Parabellum mermisi ile her numuneye 3 atım olacak şekilde atış yapılmıştır. Balistik test atışları, 22 °C sıcaklık ve % 55 bağıl nem ortamındaki balistik test laboratuvarında yapılmıştır.

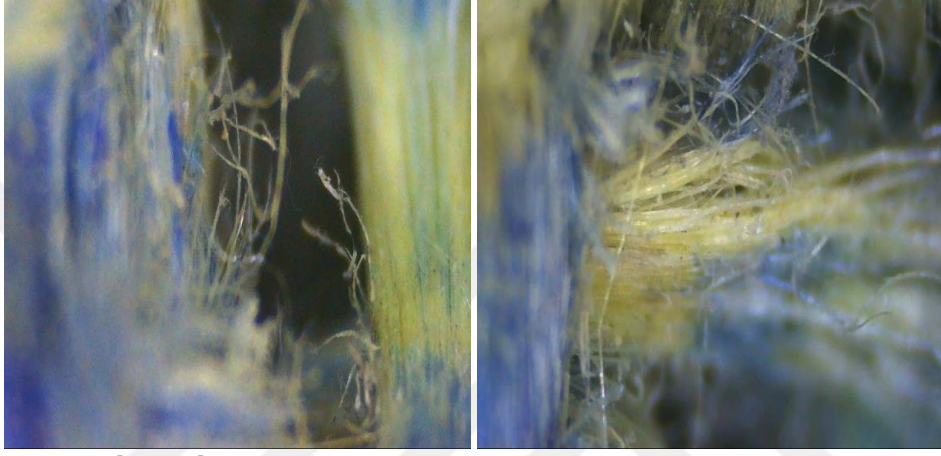
3.4.3 Balistik Test Plakalarının Dijital Fotoğraf Makinesinde Görüntülenmesi

Atış testleri sonucunda balistik plaka üzerindeki mermi giriş ve çıkışları ile mermilerin plaka yüzeyinde ve kumaş katmanlarında oluşturduğu etki dijital fotoğraf makinesinde incelenmiştir. Bu amaçla plakalardan alınan kesitler Resim 3.20’de gösterilmiştir.



Resim 3.20 Dijital resim için numuneler.

Resim 3.21’de sol tarafta merminin balistik plaka üzerinde açtığı delik görülmektedir. 2.6.2 maddesinde belirtilen kompozitlerin enerji yayılım mekanizmaları içerisinde yer alan delinme olayı gerçekleşmiştir. Sağ tarafta ise mermi balistik plakayı delememiş sadece çöküntü oluşturmuştur. Ancak söz konusu resim incelediğinde 2.6.2 maddesinde belirtilen aramid liflerin fiber kopması ve delaminasyon olaylarının gerçekleştiği görülmektedir.



Resim 3.21 Dijital resimler.

3.4.4 Numunelere Çekme Testi Yapılması

Grafen nano tabakaların aramid kumaşlara uygulanması sonucunda oluşan numuneler ayrıca mekanik özellikler açısından değerlendirilmek üzere Resim 3.22’de görüldüğü üzere çekme testine tabi tutulmuştur.



Resim 3.22 Çekme testi.

Böylece ağırlıkça % 0,5, 1 ve 1,5 oranında grafen katkıli numunelerin, grafen katkısı olmayan numuneye kıyasla değerdendirmesi yapılacaktır. Balistik plakalaradan çekme testi için alınan kesitler Resim 3.23’de gösterilmiştir.

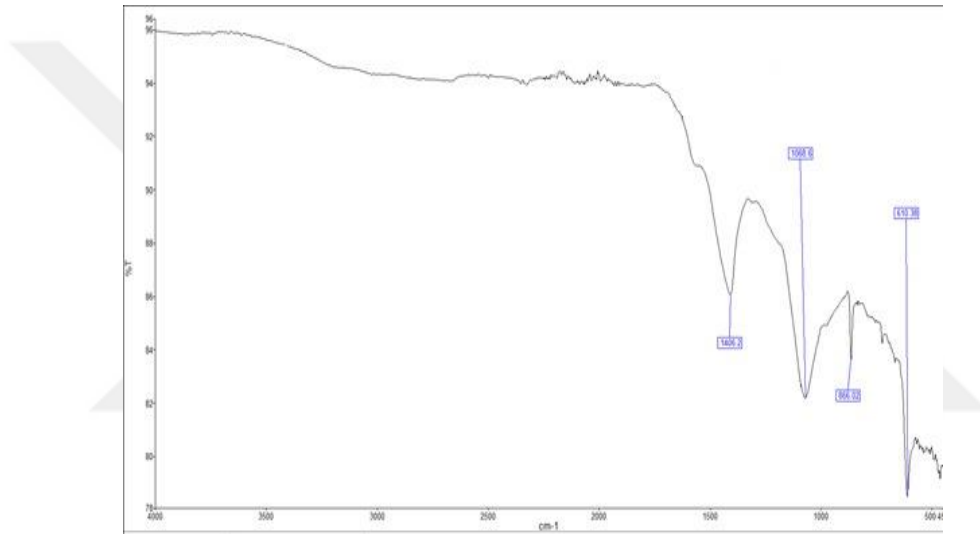


Resim 3.23 Çekme testi numuneleri.

4. BULGULAR

4.1 FTIR Analizi Sonucu

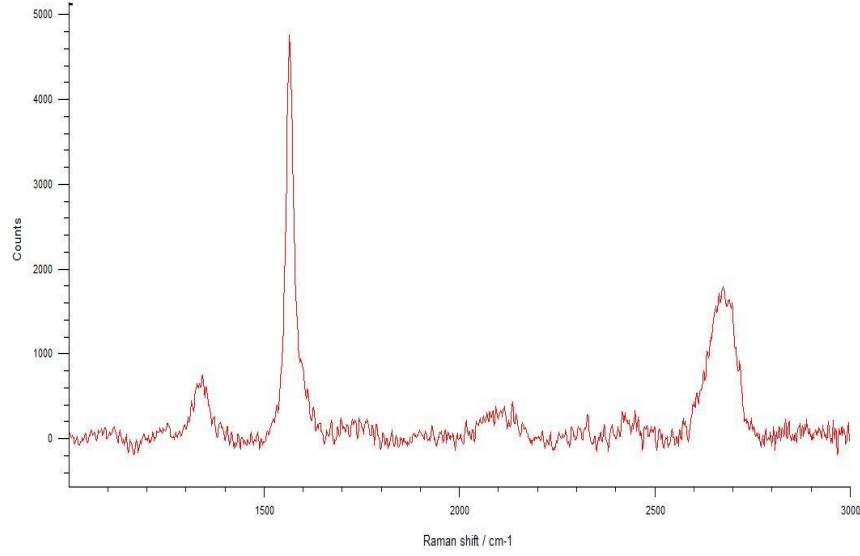
Grafen nano tabakaların FTIR spektrumunda literatürde bildirilen bazı sonuçlara göre; 1406 (C-H), 1068 (C-O), 886 ve 610 (OH) cm^{-1} karakteristik bantlar elde edilmiştir (Gong vd. 2015). Şekil 4.1’de deneysel çalışmada kullanılan grafen nano tabakaların FTIR spektrumunda, pik noktalarının yukarıda literatürde yer alan değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 4.1 Grafen nano tabakaların FTIR spektrumu.

4.2 Raman Spektroskopisi Sonucu

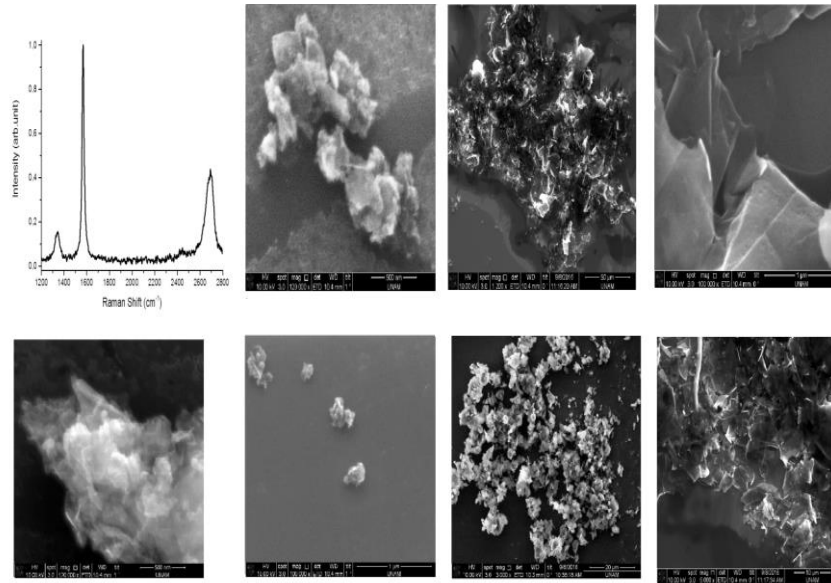
Tek tabakalı grafenin Raman spektrumundaki en belirgin özellikleri, 1582 cm^{-1} (grafit) ve 2,41 eV’de lazer uyarımı kullanan ve 2700 cm^{-1} ’de görülen bantlardır (Malard vd. 2009). Deneysel çalışmada kullanılan grafenin Şekil 4.2’de yer alan Raman spektroskopisinde de pik noktalarının literatürde yer alan yukarıdaki değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2 Grafen nano tabakaların Raman spektroskopisi.

4.3 SEM Analizi Sonucu

4.1 ve 4.2 maddelerinde Raman Spektroskopisi ve FTIR analizi sonucunda literatürdeki bant değerleri ile örtüştüğü tespit edilen grafenin Resim 4.1’de görülen SEM fotoğraflarında da literatür ile uyumlu olduğu, homojen ve saydam bir görünüm sağladığı tespit edilmiştir.



Resim 4.1 Grafen nano tabakaların Raman spektroskopisi ve SEM fotoğrafları.

4.4 Balistik Test Sonuçları

Grafen katkılı ve katkısız aramid plakalara NIJ-STD-0101.04 standardı IIIA koruma seviyesinde belirtilen test kriterlerine uygun olarak atış testi yapılmıştır. Balistik testler, hedefe 5 m mesafeden 9 mm çapındaki FMJ mermisi ile yapılmıştır. Standarda göre başarı kistası, hedefte oluşan çöküntü değerinin en fazla 44 mm olması ya da hedefte delinme olmamasıdır. Grafen katkısı olmayan aramid plakalara yapılan balistik test sonuçları Çizelge 4.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 Grafen katkısız plakalara NIJ-STD-0101.04 standardına göre III-A testi.

S.Nu.	Balistik Test Plakası	Mermi Cinsi	Atış Noktası	Mermi Hızı (m/sn)	Çöküntü Değeri (mm)
1	13 Kat Aramid 25x25 cm	9 mm FMJ RN mermisi	1	433	23
			2	436	24
			3	440	29
2	13 Kat Aramid 25x25 cm	9 mm FMJ RN mermisi	1	441	28
			2	438	23
			3	436	25
3	13 Kat Aramid 25x25 cm	9 mm FMJ RN mermisi	1	444	29
			2	441	27
			3	438	23

3 farklı plakaya yapılan toplam 9 atış sonucunda plakalarda delinme olmadığı ve macunda oluşan çöküntü değerlerinin 44 mm’nin altında olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla aramid plakaların herhangi bir katkı malzemesi kullanılmadan minimum 13 katta başarılı olduğu görülmüştür. Atış sonucunda balistik plakada oluşan çöküntü Resim 4.2’de gösterilmiştir. Bir numaralı plakaya atılan 3 mermi de balistik plaka içinde kalmış ve mermilerin yarattığı etki plaka arkasında görülmüştür.



Resim 4.2 Atış yapılan plakanın arkadan görünümü.

Ağırlıkça % 0,5 Grafen katkılı plakalara yapılan balistik test sonuçları Çizelge 4.2’de belirtilmiştir. 13 katmanlı balistik plakanın ağırlığı ortalama 314 g olduğundan, ağırlıkça % 0,5’e karşılık gelen 1,57 g grafen kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 %0,5 Grafen katkılı plakalara NIJ-STD-0101.04 standardına göre IIIA testi.

S.Nu.	Balistik Test Plakası	Mermi Cinsi	Atış Noktası	Mermi Hızı (m/sn)	Çöküntü Değeri (mm)
4	13 Kat Aramid ve %0,5 grafen 25x25 cm	9 mm FMJ RN mermisi	1	439	Delindi
			2	440	Delindi
			3	426	21 mm
5	13 Kat Aramid ve %0,5 grafen 25x25 cm	9 mm FMJ RN mermisi	1	438	Delindi
			2	440	Delindi
			3	441	Delindi
6	13 Kat Aramid ve %0,5 grafen 25x25 cm	9 mm FMJ RN mermisi	1	429	Delindi
			2	430	Delindi
			3	445	Delindi

3 farklı balistik plakadan her birine üçer toplam 9 adet atış yapılmıştır. Atış sonuçlarında bir atış hariç hepsinde delinme olduğu ve sonuçların başarısız olduğu Resim 4.3’de görülmüştür.



Resim 4.3 Atış yapılan plakanın arkadan görünümü (%0,5 grafen katkılı).

Ağırlıkça % 1 grafen katkılı plakalara yapılan balistik test sonuçları Çizelge 4.3’de belirtilmiştir. 13 katmanlı balistik plakanın ağırlığı ortalama 314 g olduğundan, ağırlıkça % 1’e karşılık gelen 3,14 g grafen kullanılmıştır.

Çizelge 4.3 % 1 Grafen katkılı plakalara NIJ-STD-0101.04 standardına göre IIIA testi.

S.Nu.	Balistik Test Plakası	Mermi Cinsi	Atış Noktası	Mermi Hızı (m/sn)	Çöküntü Değeri (mm)
7	13 Kat Aramid ve %1 grafen 25x25 cm	9 mm FMJ	1	438	Delindi
		RN mermisi	2	432	Delindi
			3	430	Delindi
8	13 Kat Aramid ve %1 grafen 25x25 cm	9 mm FMJ	1	428	Delindi
		RN mermisi	2	426	Delindi
			3	430	Delindi
9	13 Kat Aramid ve %1 grafen 25x25 cm	9 mm FMJ	1	429	Delindi
		RN mermisi	2	441	Delindi
			3	430	Delindi

3 farklı balistik plakadan her birine üçer toplam 9 adet atış yapılmıştır. Atış sonuçlarının tamamının da delinme olduğu ve sonuçların başarısız olduğu Resim 4.4’de görülmüştür.



Resim 4.4 Atış yapılan plakanın arkadan görünümü (% 1 grafen katkılı).

Ağırlıkça % 1,5 grafen katkılı plakalara yapılan balistik test sonuçları Çizelge 4.4’de belirtilmiştir. 13 katmanlı balistik plakanın ağırlığı ortalama 314 g olduğundan, ağırlıkça % 1,5’e karşılık gelen 4,71 g grafen kullanılmıştır.

Çizelge 4.4 % 1,5 Grafen katkılı plakalara NIJ-STD-0101.04 standardına göre IIIA testi.

S.Nu.	Balistik Test Plakası	Mermi Cinsi	Atış Noktası	Mermi Hızı (m/s)	Çöküntü Değeri (mm)
10	13 Kat Aramid ve %1,5 grafen 25x25 cm	9 mm FMJ RN mermisi	1	436	Delindi
			2	438	Delindi
			3	442	Delindi
11	13 Kat Aramid ve %1,5 grafen 25x25 cm	9 mm FMJ RN mermisi	1	426	Delindi
			2	438	Delindi
			3	430	Delindi
12	13 Kat Aramid ve %1,5 grafen 25x25 cm	9 mm FMJ RN mermisi	1	440	21
			2	428	20
			3	430	19

3 farklı balistik plakadan her birine üçer toplam 9 adet atış yapılmıştır. Atış sonuçlarında 9 ve 10 numaralı plakalardaki 6 atışta da delinme olduğu ancak son plakada delinme olmadığı tespit edilmiştir. Son plakada macunda oluşan çöküntü değerlerinin 44 mm altında olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak iki plakanın başarısız olduğu, bir plakanın ise başarılı olduğu Resim 4.5’de görülmüştür.



Resim 4.5 Atış yapılan plakaların arkadan görünümü (% 1,5 grafen katkılı).

Ağırlıkça % 0,5, 1 ve 1,5 grafen katkılı 13 kat aramid plakalarda istenen sonuçlara ulaşılamaması nedeniyle deneysel çalışmalara devam edilmiştir. Bu kez 11 kat 40x40 cm ebatlarında aramid plakalar hazırlanmıştır. Ağırlıkça % 1,5 oranında grafen miktarının fazla olması nedeniyle grafenin topaklaşmasından ve aramid katmanlar üzerinde homojen dağılmamasından dolayı ağırlıkça % 0,5 ve % 1 grafen katkılı plakalar hazırlanmıştır. Bir önceki numunelerde grafen katkısının 3 katmana uygulanmasından dolayı bazı numune üretim kriterlerinde değişikliğe gidilmiştir.

Çizelge 4.5 % 0,5 ve 1 Grafen katkılı plakalara NIJ-STD-0101.04 standardına göre IIIA testi.

S. N u.	Balistik Test Plakası	Katkı Oranı	Mermi Cinsi	Atış Noktası	Mermi Hızı (m/s)	Çöküntü Değeri (mm)
1	11 Kat Aramid ve 40x40 cm	% 0,5 grafen	9 mm	1	446	25 mm
		3 katman	FMJ RN	2	436	25 mm
		grafen	mermisi	3	446	Delindi
2	11 Kat Aramid ve 40x40 cm	% 1 grafen	9 mm	1	443	Delindi
		3 katman	FMJ RN	2	445	Delindi
		grafen	mermisi	3	440	Delindi
3	11 Kat Aramid ve 40x40 cm	% 1 grafen	9 mm	1	440	Delindi
		5 katman	FMJ RN	2	428	Delindi
		grafen	mermisi	3	430	Delindi
4	11 Kat Aramid ve 40x40 cm	% 1 grafen	9 mm	1	440	Delindi
		11 katman	FMJ RN	2	428	Delindi
		grafen	mermisi	3	430	Delindi

4 adet 40x40 cm ebatlarındaki balistik plakadan birincisinde 3 katmana ağırlıkça % 0,5 grafen, ikincisinde 3 katmana % 1 grafen, üçüncüsünde 5 katmana % 1 grafen, dördüncüsünde 11 katmana % 1 grafen katkısı yapılmıştır. Ancak Çizelge 4.5 ve Resim 4.6'de de görüldüğü üzere tüm plakalarda delinme olmuş ve istenen sonuçlara ulaşılamamıştır.

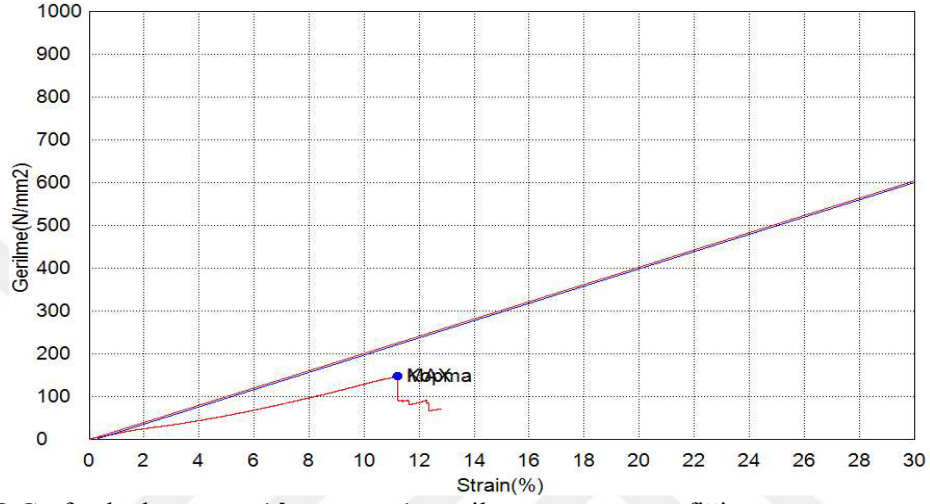


Resim 4.6 Grafen katkılı aramid plaka atış sonrası görünümü.

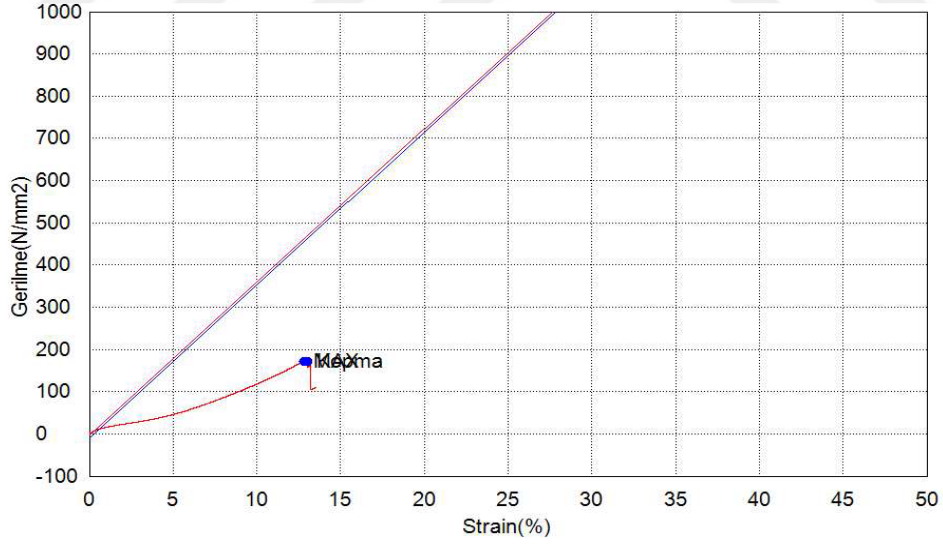
Kompozitlerin enerji yayılım mekanizmaları, 2.6.2 maddesinde belirtilmiş bu mekanizmalardan delinme, fiber kopması ve delaminasyon Şekil 2.10'da gösterilmiştir (Turan 2007). Sonuç olarak balistik plakalarda delinme, aramid fiberlerin kopması, delaminasyon mekanizmalarının gerçekleştiği tespit edilmiştir.

4.5 Çekme Testi Sonucu

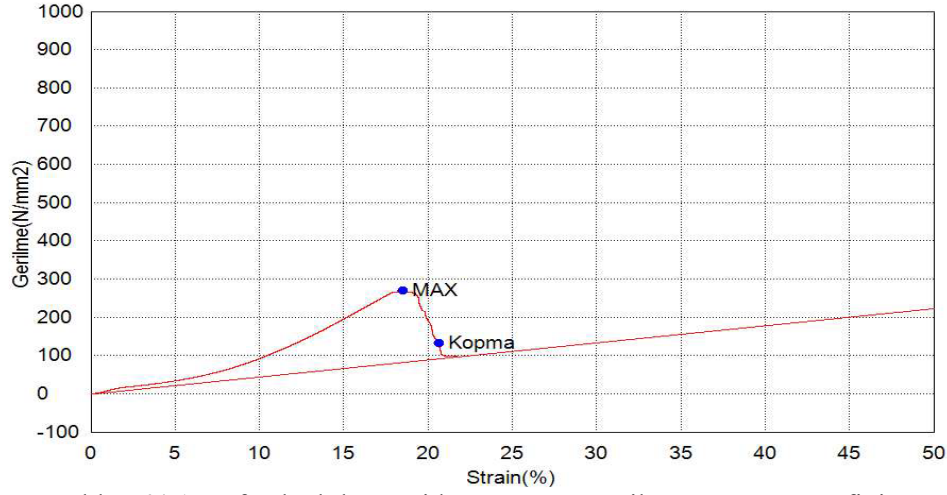
Grafen katkısı olmayan ve ağırlıkça % 0,5, 1 ve 1,5 grafen katkılı 4 farklı numuneye çekme testi yapılmış ve söz konusu numunelerin gerilme ve uzama grafikleri Şekil 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6’da gösterilmiştir.



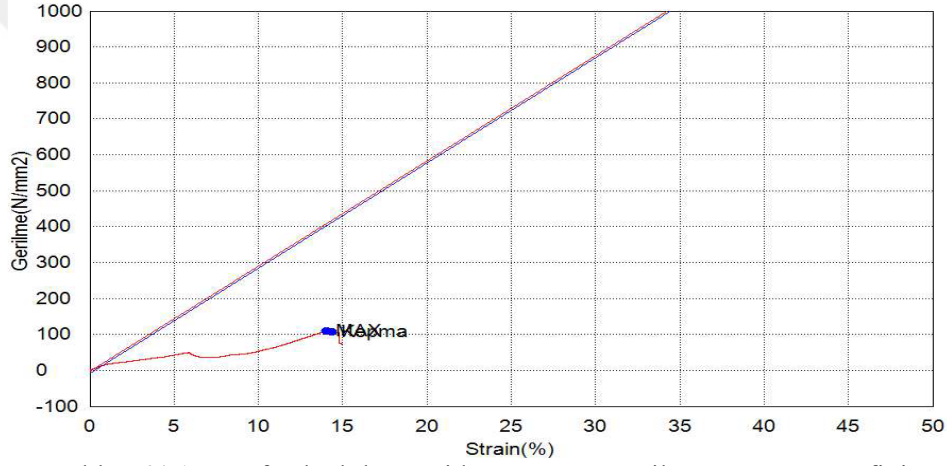
Şekil 4.3 Grafen katkısız aramid numunenin gerilme ve uzama grafiği.



Şekil 4.4 Ağırlıkça % 0,5 grafen katkılı aramid numunenin gerilme ve uzama grafiği.



Şekil 4.5 Ağırlıkça % 1 grafen katkılı aramid numunenin gerilme ve uzama grafiği.



Şekil 4.6 Ağırlıkça % 1,5 grafen katkılı aramid numunenin gerilme ve uzama grafiği.

Söz konusu grafiklerde nihai gerilme kuvveti “max” ifadesi ile gösterilmiştir. Nihai gerilme kuvveti (UTS/Ultimate Tensile Strength), bir çekme testinde ulaşılan maksimum mühendislik gerilme seviyesi olarak tanımlanmaktadır yani bir malzemenin kırılmadan dış güçlere dayanabilme seviyesidir. Yukarıdaki grafiklerde tespit edilen nihai gerilme kuvvetleri Çizelge 4.6’da gösterilmiştir. Aşağıdaki değerlere bakıldığında grafen katkısının ağırlıkça % 0,5 ve 1 oranlarında, aramid numunenin gerilme mukavemetini artırdığı ancak ağırlıkça % 1,5 oranında ise gerilme kuvvetini azalttığı görülmektedir.

Çizelge 4.6 Çekme testi sonuçları.

S.Nu.	Grafen Katkı Oranı (%)	Nihai Gerilme Kuvveti (UTS) (MPa)
1	Katkısız	147
2	0,5	172
3	1	270
4	1,5	108

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Teknoloji ile beraber balistik ve silah teknolojileri de geliştiği için zırh teknolojisi de bu gelişime ayak uydurmak zorundadır. Gelişmekte olan bu tehditleri bertaraf etmek için kişisel zırh üretiminde dönemin teknolojik imkanlarına bağlı olarak geçmişten günümüze birçok farklı malzeme ve hammadde kullanılmıştır.

Yirminci yüzyılın ikinci yarısından itibaren naylon, aramid, polietilen gibi lifler kişisel balistik zırh yapımında kullanılmaya başlanarak kompozit yapıda ürünler üretilmiştir. Yine seramik esaslı kompozit zırhlar da daha yüksek koruma seviyesinde tercih edilmeye başlanmıştır.

Son yıllarda ise kompozit kavramı bir seviye daha ileri götürülerek nanoteknolojinin gelişimi ile beraber nanokompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Nanomalzemelerin üstün mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde kompozit zırhların işlevselliğini artıracak değerlendirilmektedir. Ancak ülkemizde ve dünyada kişisel zırh tasarımında nanokompozit yapıların kullanılması henüz başlangıç aşamasında olup bu alanda yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu tezde aramid esaslı balistik zırhlarda son yıllarda önemi daha çok anlaşılan nano boyutlu bir malzeme olan grafenin katkısının balistik performansa ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla aramid plakalar ile birlikte farklı miktarlarda grafen katkısı kullanılarak aramid esaslı balistik plakalar üretilmiştir. Grafenin aramid lifler üzerine uygulanması için reçine olarak epoksi reçine tercih edilmiştir.

Bu kapsamda üretilen numuneler üzerinde koruyuculuğun ölçülmesi için balistik ve mekanik testler yapılmıştır. Ayrıca numunelerde atış sonrası oluşan deformasyon, çöküntü, delinme, fiber kopması gibi kompozitlerin enerji yayılım mekanizmaları incelenmiştir.

Balistik testler NIJ-STD-0101.04 standardı IIIA koruma seviyesine göre balistik test laboratuvarında yapılmıştır. Ancak balistik test sonuçlarında başarılı sonuçlar elde

edilememiş ve numunelerin birçoğunda delinme meydana gelmiştir. Sadece ağırlıkça ağırlıkça % 1,5 grafen katkısı sağlanan bir adet nanokompozit plakada başarı sağlanmıştır.

Atış testleri sonucunda delinen plakalar ve mermiler incelenmiştir. Grafen ve epoksi reçine katkılı nanokompozit yapıdaki aramid plakaların grafen ve epoksi katkısız plakalara oranla daha sert, gevrek ve kırılğan yapıda oldukları gözlemlenmiştir. Bu durumun epoksi ve hızlandırıcısının sıcak presleme esnasında aramid kumaşlara nüfuz etmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Yani epoksi reçine, aramidin esnek yapısını gevrek hale getirerek aramid liflerin kinetik enerjisini sönümleme kapasitesini düşürmüştür. Daha sert ve kırılğan hale gelen plakalar merminin kinetik enerjisini sönümleyememiş ve delinme olmasına neden olmuştur.

Balistik nanokompozitlerin darbe etkisi altındaki enerji sönümleme kapasiteleri başarı durumlarını belirlemektedir. Enerji sönümleme kapasitesi ise; nanopartikülün çeşidi, partikül yayma yöntemi, kompozit panelin üretim metodu, reçine çeşidi vb. kriterlere bağlıdır.

Seçilen nanomalzemenin kompozit plaka üzere yayma metodu balistik performansı etkilemektedir. Nanomalzemenin kompozit plaka üzerinde homojen bir şekilde dağılması plakanın mekanik özelliklerini geliştirecektir. Bu çalışmada kullanılan elle yatırma yönteminin yanısıra vakum destekli reçine transferi, vakum destekli elle yatırma gibi farklı metotlar kullanmanın yüksek kaliteli numuneler oluşmasını sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Atış sonrasında kullanılan mermiler incelendiğinde sadece aramid plakalarda kullanılan mermiler bütünlüğünü korurken, grafen ve epoksi reçineli plakalarda kullanılan mermilerin ise parçalandığı gözlenlenmiştir. Yani söz konusu plakalar mermiyi durduramamış ancak merminin fiziki yapısına zarar vermiştir. Grafenin, aramid kumaşlara uygulanmasında kullanılan epoksi reçinenin yerine farklı reçinelerin veya reçine kullanmadan uygulanacak teknikler sayesinde söz konusu kırılğan ve gevrek yapıyı ortadan kaldırılarak olumlu sonuçların alınabileceği değerlendirilmektedir.

Yapılan çekme testleri sonucunda ağırlıkça % 0,5 ve 1 oranlarında grafen katkısının aramid plakanın nihai gerilme kuvvetini artırarak mekanik özelliklerinde iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir. Grafen katkısız numunelere kıyasla; ağırlıkça % 0,5 grafen katkısında % 21, ağırlıkça % 1 grafen katkısında % 84 nihai gerilme kuvvetinde (UTS) artış meydana gelmiştir. Ancak ağırlıkça % 1,5 grafen katkısında nihai gerilme kuvveti (UTS) % 27 oranında azalmıştır. Sonuç olarak nanomalzemelerin kompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanılmasında doğru karışım miktarının belirlenmesi, kompozitin performansını etkileyen önemli bir kriter olduğu unutulmamalıdır.

Ayrıca bir balistik ürün üretiminde üretim prosesinin çok önemli olduğu bilinmelidir. Kompozit ve nanokompozit malzemelerin üretiminde kullanılan farklı özellikler taşıyan malzemelerin karışım oranları, karışım teknikleri, presleme şartları vb. durumlar nihai ürünün performansını etkilemektedir. Örneğin test numunesinin sıcak preslemedeki kalış süresi, basım için gerekli sıcaklık ve basınç koşulları doğru belirlenmelidir.

6. KAYNAKLAR

- Avcı H, Hassanin A, Hamouda T, Kılıç A, 2019, High Performance Fibers: A Review on Current State of Art and Future Challenges, Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University, 27, 130-155.
- Avila A F, Neto A S, Junior H N, 2011, Hybrid Nanocomposites for Mid-range Ballistic Protection, International Journal of Impact Engineering, 38, 669-676.
- Bhatnagar A, 2016, Lightweight Ballistic Composites: Military and Law Enforcement Applications, Woodhead Publishing, 460p, Cambridge.
- Bhise K, 2015, Non Destructive Testing of Soft Body Armor, Purdue University, Aeronautics and Astronautics, Master of Science, 105p, Indiana.
- Bozdoğan F , Üngün S, Temel E, Süpüren Mengüç G, 2015, Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri, Tekstil ve Mühendis, 22, 84-103.
- Bulut H, 2003, Balistik Koruyucu Teçhizatın İmalatında Kompozit Malzeme Kullanımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 151s, İstanbul.
- Cantwell W J and Morton J, 1989, Comparison of the Low and High Velocity Impact Response of CFRP, Composites, 20, 545-551.
- Cavallaro P V, 2011, Soft Body Armor: An Overview of Materials, Manufacturing, Testing, and Ballistic Impact Dynamics, DTIC Document, 34, 50-70.
- Chawla K K, 2012, Composite Materials: Science and Engineering, Springer Science and Business Media, 541p, New York.
- Cheeseman B A and Bogetti T A, 2003, Ballistic Impact into Fabric and Compliant Composite Laminates, Composite Structures, 61, 161-173.
- Coclite A M, Howden R M, Borrelli D C, Petruczok C D, Yang R, Yagüe J L, vd., 2013, 25th Anniversary Article: CVD Polymers: A New Paradigm for Surface Modification and Device Fabrication, Advanced Materials, 25, 5392-5423.
- Cooper G ve Gotts P, 2005, Ballistic protection. In Ballistic Trauma, Springer, 67-90.

- Cunniff P M, 1992, An Analysis of the System Effects in Woven Fabrics Under Ballistic Impact, *Textile Research Journal*, 62, 495-509.
- Çay A, Süpüren G, Kanat Z E, Gülümser T, Tarakçıoğlu I, 2007, Balistik Lifler (Bölüm 1), *Tekstil ve Konfeksiyon*, 4, 232- 236.
- Dobb M and Robson R, 1990, Structural Characteristics of Aramid Fibre Variants, *Journal of Materials Science*, 25, 459-464.
- Fakruddin M, Hossain Z, Afroz H, 2012, Prospects and Applications of Nanobiotechnology:A Medical Perspective, *Journal of Nanobiotechnology*, 10, 1-8.
- Gibson J, McKee J, Freihofer G, Raghavan S, Gou J, 2013, Enhancement in Ballistic Performance of Composite Hard Armor Through Carbon Nanotubes, *International Journal of Smart and Nano Materials*, 4, 212-228.
- Gong Y, Li D, Fu Q, Pan C, 2015, Influence of Graphene Microstructures on Electrochemical Performance for Supercapacitors, *Progress in Natural Science:Material International*, 25, 379-385.
- Hogg P J, 2006, Composites in Armor, *Science*, 314, 1100-1101.
- Holmes G A, Kim J H, Mcdonough W G, Riley M A, Rice K D, 2009, A Detailed Investigation of the Mechanical Properties of Polybenzoxazole Fibers within Soft Body Armor, *Journal of Materials Science*, 44, 3619-3625.
- Hull D and Clyne T, 1996, An Introduction to Composite Materials, Chapter 2
Fibres and Matrices, Cambridge University Press, 547p, Liverpool.
- Jacobs M and Van J, 2001, Ballistic Protection Mechanisms in Personal Armour, *Journal of Materials Science*, 36, 3137-3142.
- Jones R M, 1998, *Mechanics of Composite Materials*, CRC Press, 538p, Boca Raton.
- Kamyshny A and Magdassi S, 2014, Conductive Nanomaterials for Printed Electronics, *Small*, 10, 3515-3535.
- Karahan M, 2008, Comparison of Ballistic Performance and Energy Absorption Capabilities of Woven and Unidirectional Aramid Fabrics, *Textile Research Journal*, 78, 718-730.

- Lane R A, 2005, High Performance Fibers for Personnel and Vehicle Armor Systems, Amptiac Quarterly, 9, 3-9.
- Languerand D, Zhang H, Murthyc N S, Rameshb N S, Sansoz F, 2009 Inelastic Behavior and Fracture of High Modulus Polymeric Fiber Bundles at High Strain-rates, Materials Science and Engineering:A, 500, 216-224.
- Lee H and Neville K, 1967, Handbook of Epoxy Resins, ACS Publications, 267p, New York.
- Liew K, Lei Z and Zhang L, 2015, Mechanical Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube Reinforced Composites:A Review, Composite Structures, 120, 90-97.
- Lim C, Shim V, Ng Y, 2003, Finite-element Modeling of the Ballistic Impact of Fabric Armor, International Journal of Impact Engineering, 28, 13-31.
- Malard L, Pimenta M A, Dresselhaus G, Dresselhaus M, 2009, Raman Spectroscopy in Graphene, Physics Reports, 473, 51-87.
- Mallick P K, 2007, Fiber-Reinforced Composites:Materials, Manufacturing, and Design, CRC Press, 638p, Boca Raton.
- Marissen R, Duurkoop P D, Hoefnagels H, Bergsma O, 2010, Creep Forming of High Strength Polyethylene Fiber Prepregs for the Production of Ballistic Protection Helmets, Composites Science and Technology, 70, 1184-1188.
- Maslow A H, 1943, A Theory of Human Motivation. Psychological Review, 50, 370-396.
- Medvedovski E, 2010, Ballistic Performance of Armour Ceramics:Influence of Design and Structure, Ceramics International, 36, 2103-2115.
- Naik N K and Shrirao P, 2004, Composite Structures Under Ballistic Impact, Composite Structures, 66, 579-590.
- NIJ-STD-0101.04, 2001, Ballistic Resistance of Personal Body Armor, U.S. Department of Justice Office of Justice Programs National Institute of Justice, USA.

- Njuguna J, Pielichowski K and Alcock J R, 2007, Epoxy Based Fibre Reinforced Nanocomposites, *Advanced Engineering Materials*, 9, 835-847.
- Novoselov K S, Geims A K, Morozov S V, Jiang D, Zhang Y, Dubonos S V, vd., 2004, Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*, 306, 666-669.
- Özer Y, 2019, Nanoteknolojinin Askeri Uygulamaları Üzerine Bir Değerlendirme, *Güvenlik Bilimleri Dergisi, IDEF Özel Sayı*, 33-52.
- Prasai D, Tuberquia J C, Harl R R, Jennings G K, Bolotin K, 2012, Graphene: Corrosion-Inhibiting Coating, *ACS Nano*, 6, 1102-1108.
- Rai S ve Rai A, 2015, Review: Nanotechnology-The Secret of Fifth Industrial Revolution and the Future of Next Generation, *Nusantara Bioscience*, 7, 61-66.
- Robinson P and Davies G, 1992, Impactor Mass and Specimen Geometry Effects in Low Velocity Impact of Laminated Composites, *International Journal of Impact Engineering*, 12, 189-207.
- Ryan A J, 1998, *Polymer Processing and Structure Development*, Kluwer Academic Publishers, 580p, The Netherlands.
- Scott B, 1999, The Penetration of Compliant Laminates by Compact Projectiles, In *Proceedings 18th International Symposium on Ballistics*, 15-19 November 1999.
- Scott R , 2005, *Textiles for Protection*, Woodhead Publishing, 757p, Cambridge.
- Starratt D, Sanders T, Cepus E, Poursartip A, Vaziri R, 2000, An Efficient Method for Continuous Measurement of Projectile Motion in Ballistic Impact Experiments, *International Journal of Impact Engineering*, 24, 155-170.
- Stein H L, 1988, Ultra High Molecular Weight Polyethylenes (UHMWPE), *Engineering Materials Handbook*, 2, 167-171.
- Thilagavathi G, Raja A S M, and Kannaian T, 2008, Nanotechnology and Protective Clothing for Defence Personnel, *Defence Science Journal*, 58, 451-459.
- Turan M, 2007, Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı, *Mühendis ve Makina*, 575, 3- 8.
- Ursenbach D, Vaziri R and Delfosse D, 1995, An Engineering Model for Deformation of CFRP Plates During Penetration, *Composite Structures*, 32, 197-202.
- Utracki L A, 2010, Rigid Ballistic Composites (Review of literature), 16885314, 78.

- Vlandis A, 2006, The Risks of Military Applications of Nanotechnology, Chain Reaction, 97, 27-28.
- Wajid A S, Das S, Irin F, Ahmed H T, Shelburne J L, Parviz D. vd, 2012, Polymer-Stabilized Graphene Dispersions at High Concentrations in Organic Solvents for Composite Production, Carbon, 50, 526-534.
- Yi M and Shen Z, 2015, A Review on Mechanical Exfoliation for the Scalable Production of Graphene, Journal of Materials Chemistry A, 3, 11700-11715.
- Zurutuza A and C Marinelli, 2014, Challenges and Opportunities in Graphene Commercialization, Nature Nanotechnology, 9, 730-734.

İnternet Kaynakları

- 1- http://www.tirendaz.com/tr/?page_id=2833, 12.12.2021
- 2- <https://www.ec21.com/product-details/Dyneema-Plain-Twill-Woven-Fabric--4295308.html>, 12.12.2021
- 3- <https://www.sahaexpo.com/katilimcilar/ces-ileri-kompozit-ve-savunma-teknolojileri-a-s/>, 12.12.2021
- 4- <https://tr.dhgate.com/product/nij-level-iv-icw-b4c-pe-bullet-proof-plate/399512809.html>, 12.12.2021
- 5- <https://mili-tech.com/collections/nij-iiia-hg2-armor/products/militech%C2%AE-soft-multi-threat-body-armor-vest>, 12.12.2021
- 6- <https://www.dupont.com/products/dupont-kevlar-aramid-pulp.html>, 12.12.2021