

**TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN BALİSTİK
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

FERHAT ATEŞ

ŞUBAT 2024

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN BALİSTİK
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

FERHAT ATEŞ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV
YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
YÜKSEK LİSANS TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

ŞUBAT 2024

DİYARBAKIR

TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN BALİSTİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Ferhat ATEŞ tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**'nda **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN
Danışman, **Makine Mühendisliği Bölümü,**
Dicle Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. Kadir TURAN (*)
Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN (**)
Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Hamit ADİN
Makine Mühendisliği Bölümü, Batman Üniversitesi

ONAY

Savunma Tarihi: 12 / 02 / 2024

(*) Jüri Başkanı.

(**) Tez Danışmanı

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılıyıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımınla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Ferhat ATEŞ

İmza:

TEŞEKKÜR

Öncelikle danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN' e bu satırları minnettarlığımı ifade etmek için yazıyorum. Çalışmalarımız süresince bana gösterdiğiniz sabır, anlayış ve özveri için size teşekkür etmek istiyorum. Her sorumda ve her aşamada rehberlik ettiğiniz için minnettarım. Sizin rehberliğiniz altında hem kişisel hem de akademik anlamda büyüme fırsatı buldum. Bir öğrenci olarak, sizi danışman olarak görmek benim için büyük bir ayrıcalık ve motivasyon kaynağı oldu. Sizin bilgeliliğiniz, deneyiminiz ve ilginiz, tezimi başarıyla tamamlamak adına güçlü bir destek oldu.

Eğitimim süresinde eşsiz bilgilerini sürekli paylaşan, desteklerinden dolayı Prof. Dr. Kadir TURAN' a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Kimya öğretmeni Deniz KAYMAK'a ve Makine Yüksek Mühendisi Duygu BAYRAM' a katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Çalışmamızda bor karbürün teminini sağlamak konusunda yardımcı olan Boroptik Mühendislik, Ar-Ge, İmalat ve Ticaret A.Ş.'ne, Para-Aramid kumaşın teminini sağlamak konusunda yardımcı olan Kipaş Holding A.Ş' ne katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Dicle Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (DÜBAP), tez çalışması için sağladıkları finansal destek için (Proje No: MÜHENDİSLİK.23.005) için teşekkür ederim.

En önemlisi, bana her zaman destek veren, bana inandıkları için anneme, babama, ikizime ve kardeşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1 Hibrit Kompozitler ile Önceki Yapılan Çalışmalar.....	3
2.2 Kevlar ile Önceki Yapılan Çalışmalar.....	7
2.3 Bor Karbür Kullanılarak Yapılan Önceki Çalışmalar	11
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	17
3.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	19
3.1.1 Takviye malzemesine göre sınıflandırma	19
3.1.2 Matris malzemesine göre sınıflandırma	27
3.2 Üretim Yöntemleri	32
3.2.1 Elle yatırma metodu	32
4. NANOKOMPOZİT MALZEMELER	34
4.1 Nanomalzemeler.....	34
4.2 Nanokompozitlerin sınıflandırılması.....	34
4.2.1 Metal nanokompozitler	34
4.2.2 Polimer nanokompozitler	35
4.2.3 Seramik nanokompozitler	36
4.3 Nanopartiküller.....	36

4.4	Nanopartiküllerin Sınıflandırılması.....	36
4.5	Nanomalzemelerin Özellikleri.....	37
4.6	Nanomalzemelerin Sentezi.....	38
4.7	Nanomalzemelerde Katkı Malzemeleri.....	39
4.7.1	Karbon nanotüp.....	39
4.7.2	Nanokiller.....	39
4.7.3	Grafen.....	39
4.7.4	Bor karbür	40
5.	BALİSTİK KAVRAMI	41
5.1	Balistik Koruyucu Zırhlar.....	41
5.2	Balistik Test Standartları	43
5.2.1	NIJ STD-0101.04 balistik standardı.....	44
5.3	Hasar Mekanizmaları	46
6.	MALZEME VE YÖNTEM	48
6.1	11 Tabakalı Kevlar/Epoksi ve Hibrit Kompozit Üretimi	48
6.1.1	Kullanılan malzemeler	48
6.1.2	Levhaların üretimi.....	50
6.2	20 Tabakalı Kevlar/Epoksi Kompozit Üretimi	53
6.2.1	Kullanılan malzemeler	53
6.2.2	Levhaların üretimi.....	54
6.3	30 Tabakalı B ₄ C Katkılı Kevlar/Epoksi Kompozit Üretimi.....	55
6.3.1	Kullanılan malzemeler	55
6.3.2	Levhaların üretimi.....	57
6.4	Üretimi Gerçekleştirilen Levhalar.....	61
6.5	Balistik Darbe Deneyi	62
7.	BULGULAR VE TARTIŞMA	65
7.1	Balistik Darbe Deneyi Sonuçları.....	65

7.1.1	11 Tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın balistik darbe deneyi sonuçları	65
7.1.2	20 Tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın balistik darbe deneyi sonuçları	68
7.1.3	30 Tabakalı Kevlar/Epoksi ve B ₄ C katkılı Kevlar/Epoksi kompozit levhada balistik darbe deney sonuçları	68
7.1.4	Balistik test sonuçlarının karşılaştırılması	76
7.2	Hasar Mekanizmaları Açısından Değerlendirme	80
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	86
8.1	Sonuçlar	86
8.2	Öneriler	87
	KAYNAKLAR	88
	ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Kompozit malzeme	17
Şekil 3.2 Bazı metallerin, fiberlerin, epoksi ve kompozit malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması	18
Şekil 3.3 Fiber takviyeli kompozitlerde temel bileşenler ve sınıflandırılması	21
Şekil 3.4 Elle yatırma metodu	33
Şekil 4.1 0D, 1D, 2D, 3D karbon nanoyapılara örnek	37
Şekil 4.2 Nanomalzeme sentezi yaklaşımlarının şematik diyagramı	38
Şekil 5.1 Balistik deneylerde kullanılan mermiler	43
Şekil 5.2 Balistik darbe esnasında oluşan hasar mekanizmaları ve sırası	47
Şekil 5.3 Balistik darbe sırasında oluşan belli başlı hasar türleri	47
Şekil 5.4 Balistik darbe sırasında oluşan tipik matris kırılmaları ve delaminasyon hasarı	47
Şekil 6.1 11 tabakalı hibrit kompozit levha üretim şeması	49
Şekil 6.2 Fiber kumaşların yapısı	50
Şekil 6.3 11 tabakalı kompozit levhaların geometrik gösterimi	51
Şekil 6.4 Elle yatırma metodu ile hazırlanan numuneler	51
Şekil 6.5 Üretilen levhaların preslenmesi	52
Şekil 6.6 Preslenen kompozit levha	52
Şekil 6.7 Cnc tezgahı	53
Şekil 6.8 20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha üretim şeması	54
Şekil 6.9 20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha geometrik gösterimi	55
Şekil 6.10 30 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhalarının geometrik gösterimi ...	55
Şekil 6.11 30 tabakalı B ₄ C katkılı Kevlar/Epoksi kompozit levha üretim şeması	56
Şekil 6.12 30 tabakalı kompozit numunede bor karbür ağırlıkça katkı oranları	57
Şekil 6.13 Ultrasonikasyon cihaz	58
Şekil 6.14 Epoksiye nanokatki sonrası karıştırma	59
Şekil 6.15 30 tabakalı kompozit levhanın takviye malzemesinin hazırlanışı	60
Şekil 6.16 Pres ünitesi	60
Şekil 6.17 Balistik darbe deneyi testi şeması	62
Şekil 6.18 Balistik darbe deneyi numune atış yeri şeması	62
Şekil 6.19 Hedef mermi atış yerleri şeması	63

Şekil 7.1 Kevlar/Epoksi numune atış yapılmış kompozit levha	66
Şekil 7.2 3K/1C/3K/1C/3K numune atış yapılmış kompozit levha	67
Şekil 7.3 4K/3C/4K numune atış yapılmış kompozit levha.....	68
Şekil 7.4 % 0 B ₄ C kompozit levha penetrasyon derinliği grafiği	69
Şekil 7.5 %0 B ₄ C atış yapılmış kompozit levha	70
Şekil 7.6 %0 B ₄ C kompozit levha balistik deney sonrası oluşan delaminasyon alanı	70
Şekil 7.7 % 0,125 B ₄ C kompozit levha penetrasyon derinliği grafiği	71
Şekil 7.8 %0,125 B ₄ C atış yapılmış kompozit levha	72
Şekil 7.9 %0,125 B ₄ C kompozit levha balistik deney sonrası oluşan delaminasyon alanı	72
Şekil 7.10 % 0,25 B ₄ C kompozit levha penetrasyon derinliği grafiği	73
Şekil 7.11 %0,25 B ₄ C atış yapılmış kompozit levha	74
Şekil 7.12 %0,25 B ₄ C kompozit levha balistik deney sonrası oluşan delaminasyon alanı	74
Şekil 7.13 % 0,5 B ₄ C kompozit levha penetrasyon derinliği grafiği	75
Şekil 7.14 %0,5 B ₄ C atış yapılmış kompozit levha	76
Şekil 7.15 %0,5 B ₄ C kompozit levha balistik deney sonrası oluşan delaminasyon alanı	76
Şekil 7.16 30 tabakalı kompozit levhalarda balistik darbe deneyi penetrasyon derinliği sonuçları.....	79
Şekil 7.17 Atış sıralaması penetrasyon derinliği ilişkisi grafiği	80
Şekil 7.18 11 tabakalı Kevlar/Epoksi levhası IIA seviyesi hasar görüntüsü a) ön yüz b) arka yüz	81
Şekil 7.19 11 tabakalı 4K/3C/4K dizilimli levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü..	81
Şekil 7.20 11 tabakalı 3K/1C/3K/1C/3K dizilimli levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü.....	82
Şekil 7.21 Şekil 7.21 11 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü.....	82
Şekil 7.22 20 Tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü	83
Şekil 7.23 30 tabakalı %0 B ₄ C Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü.....	83

Şekil 7.24 30 tabakalı %0,125 B4C Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü	84
Şekil 7.25 30 tabakalı %0,25 B4C Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü	84
Şekil 7.26 tabakalı %0,5 B4C Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü.....	85



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 Cam fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [42].....	22
Tablo 3.2 Aramid fiberlerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [39, 40, 41].	23
Tablo 3.3 Karbon fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [49]	24
Tablo 3.4 Dyneema ve Spectra fiberlerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [54]	26
Tablo 3.5 Doğal fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [57]	27
Tablo 3.6 Bazı polimerlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [64]	31
Tablo 4.1 B ₄ C'e ait mekanik özellikler [36]	40
Tablo 5.1 Balistik koruyucular için kullanılan standartlar [90]	44
Tablo 5.2 NIJ Standardı-0101.04 sınıflandırması [91]	45
Tablo 6.1 Kullanılan matris ve sertleştirici malzemelerin özellikleri	49
Tablo 6.2 Kullanılan fiber kumaş malzeme özellikleri.....	50
Tablo 6.3 Kullanılan nanopartikül katkı malzeme Özellikleri.....	57
Tablo 6.4 30 tabakalı kompozit levhanın katkı oranları	57
Tablo 6.5 Üretimi gerçekleştirilen numunelerin özellikleri.....	61
Tablo 6.6 Balistik darbe deneyi hedef numuneleri	64
Tablo 7.1 Kevlar/Epoksi levhanın balistik darbe deney sonuçları.....	65
Tablo 7.2 11 tabakalı 3K/1C/3K/1C/3K dizilimli levhanın balistik deney sonuçları	66
Tablo 7.3 4K/3C/4K dizilimli levhanın balistik deney sonuçları	67
Tablo 7.4 %0 B ₄ C kompozit levha balistik deney sonuçları.....	69
Tablo 7.5 %0,125 B ₄ C kompozit levha balistik deney sonuçları.....	71
Tablo 7.6 %0,25 B ₄ C kompozit levha balistik deney sonuçları.....	73
Tablo 7.7 30 tabakalı numune 4 balistik deney sonuçları.....	75
Tablo 7.8 Balistik darbe deneyi sonuçları.....	77

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge

Açıklama

σ

Gerilim

F

Kuvvet

A

Kesit Alanı

E_f

Kumaşa Aktarılan Enerji

E_{pl}

Toplam Mermi Enerji Kaybı

E_c

Destek Kili Değeri

E

Elastite Modülü

ρ

Yoğunluk

N

Güç Yasası İndeksi

μ

Mikron

V_{50}

Balistik Limit Hızı

Kısaltma

Açıklama

0D

0 Boyutlu

1D

1 Boyutlu

2D

2 Boyutlu

2D-P

2 Boyutlu Düz Dokuma

3D

3 Boyutlu

3D-A

3 Boyutlu Açılı İnterlok

3D-O

3 Boyutlu Ortogonal

ABD

Amerika Birleşik Devletleri

AF

Aramid Fiber

Al

Alüminyum

Al₂O₃

Alüminyum Oksit

AP

Zırh Delici

API

Zırh Delici-Yangın Çıkarıcı

B4C	Bor Karbür
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler
CNT	Karbon Nanotüp
Co	Kobalt
Cu	Bakır
EOD	Patlayıcı Mühimmat İmha
EP	Epoksi
EPDM	Etilene Propylene Dianene Monomere
FEA	Sonlu Elemanlar Analizi
FGM	Dereceli Yapısal Fonksiyonlu Malzemeler
FMJ	Full Metal Jacket
FML	Fiber Metal Levhalar
FRPC	Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler
FSP	Fragment Simulating Projectile
GFRP	Cam Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler
GNP	Grafen
GSM	Grams Per Square Meter
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
HFRPT	Hibrit Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler
HOSDB	UK Home Office Scientific Development
JE	Jüt Epoksi
KFRP	Kevlar Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler
LDPE	Düşük Yoğunluklu Polietilen
M2 AP	M2 Silah Zırh Delici
MF	Melaminler
Mg	Magnezum
MMK	Metal Matrisli Kompozit
MMNK	Metal Matrisli Nanokompozit
MMOD	Mikrometereitler ve Yörünge Enkazı
MIL	United States Military Standard
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NFPC	Doğal Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler
NIJ	National Institute of Justice

NK	Nanokompozitler
NP	Nanopartiküller
NR	Doğal Kauçuk
PA	Poliamid
PAN	Poliakrilonitril
PASGT	Personal Armor System Ground Troops
PC	Polikarbonat
PE	Polietilen
PEBA	Polyether Block Amide
PEEK	Polietereter Keton
PF	Fenolik Reçineler
PMK	Polimerik Matrisli Kompozitler
PMMA	Polimetilmetakrilat
PMNK	Polimer Matrisli Nanokompozit
PP	Polipropilen
PPTA	P-phenylene Terephthalamide
PS	Polistiren
PTFE	Politetrafloroetilen
PUR	Poliüretanlar
PVC	Polivinil Klorür
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si ₃ N ₄	Silikon Nitrür
SiC	Silisyum Karbür
SMK	Seramik Matrisli Kompozitler
SMNK	Seramik Matrisli Nanokompozit
STANAG	Standardization Agreement NATO Askeri
STD	Standart
STF	Kesme Gerilmesi Altında Sertleşen Sıvı
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskopi
Ti	Titanyum
TiB ₂	Titanyum Diborür
TiC	Titanyum Karbür
TiN	Titanyum Nitrür

TPE	Termoplastik Elastomerler
TPU	Termoplastik Poliüretan
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UHMWPE	Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
UP	Doymamış Polyesterler
UV	Ultraviyole
VAE	Vinil Asetat-Etilen
W1.5	B4C Standardı Partikül Boyutu 1.5 µ
W3.5	B4C Standardı Partikül Boyutu 3,5 µ
WC	Tungsten Karbür
Zn	Çinko

ÖZET

TABAKALI KOMPOZİT LEVHALARIN BALİSTİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

ATEŞ, Ferhat

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Bölümü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN

Şubat 2024, 113 sayfa

Kompozit malzemeler birçok avantajlı özelliklerinden dolayı savunma, otomotiv, uzay, vb. birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin üretiminde farklı kumaş tipleri kullanılarak hibrit kompozit elde edilmesi ve bunlarında uygulama alanlarında kullanılması yaygındır. Geleneksel malzemelere alternatif olarak ortaya çıkan kompozit ve hibrit kompozit malzemelerin yetersiz olduğu alanlarda ise, daha iyi mekanik özellikler ve daha iyi performans göstermesi açısından nanokompozitler kullanılmaktadır. Nanokompozit üretimi için kil, bor bileşenleri, grafen vb. nanopartikül olarak kullanılmaktadırlar. Kompozitlerin balistik alanda kullanımı ve bu alandaki çalışmaların sonuçları önemli bir alan oluşturmaktadır. Bu alan özellikle güvenlik, askeri alandaki teçhizat, koruyucu giysiler, zırhlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma; tabakalı kompozitlerin balistik alanda kullanımına dair deneysel çalışmaları içermektedir. Çalışmada Para-Aramid (%100 Kevlar) kumaş kullanılarak üretilen tabakalı kompozit levhalar üç aşamada incelenmiştir. Birinci aşamada, 11 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha ve farklı katmanlarda cam fiber takviyeli kumaşlar kullanılarak hibrit kompozit levhalar üretilmiştir. Bu hibrit levhalar 3Kevlar/1Cam/3Kevlar/1Cam/3Kevlar ve 4Kevlar/3Cam/4Kevlar dizilimlerinde elde edilmiştir. İkinci aşamada Kevlar/Epoksi'den oluşan 20 tabakalı kompozit levha üretilmiştir. Üçüncü aşamada ise 30 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhalar katkısız ve nanokatlı olarak üretilmiştir. Nanokatlı malzemesi olarak bor karbür kullanılmıştır. Ağırlıkça %0,5, %0,25, %0,125 oranlarında bor karbür kullanılarak, nanokatlı kompozit levhalar üretilmiştir. Her üç aşamada üretilen tabakalı kompozit levhalar NIJ 0101.04 standartlarına göre balistik teste tabi tutulmuşlardır. Yapılan test sonuçlarında 11 tabakalı Kevlar/Epoksi ve hibrit kompozit levhalar zırh tipi IIIA ve II seviyesinde delinmişlerdir. Sadece Kevlar/Epoksi levhada zırh tipi IIA seviyesinde delinme gerçekleşmemiştir. 20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha zırh tipi IIIA seviyesinde yapılan test sonucu delinmeye uğramıştır. 30 tabakalı Kevlar/Epoksi ve bor karbür katkılı Kevlar/epoksi levhalar zırh tipi IIIA seviyesinde yapılan test sonucunda delinmemişlerdir. Bu levhalardan elde edilen penetrasyon derinlikleri, standart değeri olan 44 mm'nin altında gerçekleştiği için sonuçlar başarılı olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Hibrit, Para-Aramid, Zırh, Kevlar.

ABSTRACT

INVESTIGATION ON BALLISTIC PERFORMANCE OF LAYERED COMPOSITE PLATES

ATEŞ, Ferhat

Master of Science, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Gurbet ÖRÇEN

February 2024, 113 pages

Composite materials are used in many engineering applications, such as defense, automotive, space, etc., due to their many advantageous properties. It is common to obtain hybrid composites by using different fabric types in the production of composite materials and their application fields. In areas where composite and hybrid composite materials, which have emerged as an alternative to traditional materials, are insufficient, nanocomposites are used for better mechanical properties and performance. Clay, boron compounds, graphene, etc. are used as nanoparticles for nanocomposite production. The use of composites in the ballistic field and the results of studies in this field constitute an important area. This field is especially important for security, military equipment, protective clothing, and armor. This study includes experimental studies on the use of layered composites in the ballistics field. In the study, layered composite plates produced using Para-Aramid (100% Kevlar) fabric were examined in three stages. In the first stage, hybrid composite plates were produced using 11 layers of Kevlar/Epoxy composite plates and glass fiber-reinforced fabrics in different layers. These hybrid plates were obtained in 3Kevlar/1Glass/3Kevlar/1Glass/3Kevlar and 4Kevlar/3Glass/4Kevlar arrangements. In the second stage, a 20-layer composite plate of Kevlar/Epoxy was produced. In the third stage, 30-layer Kevlar/Epoxy composite plates were produced as undoped nanoparticles. Boron carbide was used as a nanocontaining material. Nanoparticulated composite plates were produced by using boron carbide at 0.5%, 0.25%, and 0.125% by weight. Layered composite plates produced in all three stages were subjected to ballistic testing according to NIJ 0101.04 standards. In the test results, 11-layer Kevlar/Epoxy and hybrid composite plates were penetrated at armor type IIIA and II levels. Only the Kevlar/Epoxy plate was not perforated at armor type IIA level. The 20-layer Kevlar/Epoxy composite plate was perforated at armor type IIIA level as a result of the test. 30-layer Kevlar/Epoxy and boron carbide doped Kevlar/Epoxy sheets were not perforated as a result of the armor type IIIA level test. The results were successful because the penetration depths obtained from these plates were below the standard value of 44 mm.

Keywords: Ballistics, Hybrid, Para-aramid, Armor, Kevlar

1. GİRİŞ

Silah teknolojilerinin gelişimiyle birlikte, güvenlik ve korunma ihtiyacı daha fazla ortaya çıkmaktadır. Bu güvenlik ihtiyacını karşılayabilmek için; bu alanda birçok bilimsel çalışmalar yapılmakta birlikte, dış tehditlere karşı kullanılan zırhlar da geliştirilmektedir.

Birçok zırh, tehditlerin varlığının güncellenmesiyle evrim geçirmiştir. Son savaşlarda, büyük silahlardan ateşlenen konvansiyonel mermilerden, el yapımı patlayıcı cihazlara ve mayınlara doğru kaymıştır. Bireysel askerler için tehdit, patlama, yüksek hızlı küçük silah mermileri ve parçalarından gelmektedir. Bu nedenle, giyilebilir kişisel koruma önemlidir. Giyilebilir koruyucu ekipmanların geçmişi binlerce yıl öncesine dayanmakla birlikte, modern savaş ekipmanları bronz, çelik ve hatta altından yapılan eski öncüllerine göre çok daha hafif, çok yönlü ve rahat olduğu bilinmektedir [1]. Günümüzde Birleşik Devletler Ordusu balistik saldırılara karşı seviye III koruma sağlayan “Interceptor Body Armor” vücut zırhı kullanmaktadır. Bununla birlikte, araştırmacılar hafif vücut zırhı geliştirmek için sürekli olarak düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli ve sert yeni malzemeler aramaktadırlar [2].

Bu kapsamda son yıllarda birçok farklı sektörde kullanılan nanomalzemeler, nanoteknoloji nanobilim bu konuda önü açık malzeme sınıfını oluşturmaktadır. Nanoteknoloji, nano ölçekteki (en az bir boyut <100 nm) malzemelerin işlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Yüksek yüzey alanı-hacim oranları ve benzersiz yapıları nedeniyle, çeşitli nanomalzemeler son derece yüksek mukavemet, modül ve olağanüstü enerji emme kabiliyeti göstermektedirler. Bu özellikleriyle nanomalzemeler, güçlü anti-balistik kompozitlerin geliştirilmesi konusunda önemli ölçüde dikkat çekmektedirler. Günümüzde, vücut zırhı olarak balistik koruyucu zırh malzemelerinin üretimi için cam, aramid ve polietilen bazlı fiberler tercih edilmektedir. Son yıllarda ise, nanopartikül katkılı kompozit malzemeler hakkında gelişmeler artmaya başlamıştır. Bor ve bileşenlerinin (bor karbür ve bor nitrür vb.) kompozit malzemelerde katkı olarak kullanılarak zırh alanında yeni çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda balistik performanslarının iyileştirilmesi öngörülmektedir. Çok sayıda araştırmacı, balistik uygulamalarda nanomalzemelerin

fiber ve polimer esaslı kompozitlerin performansı üzerindeki etkisini incelemiş ve umut verici sonuçlar elde etmişlerdir [3].

Bu tez çalışmasında; Para-aramid (%100 Kevlar) kumaş farklı tabaka ve kalınlıklarda üretilmiştir. Yine cam fiber kumaş Kevlar ile hibridizasyonu ile elde edilen farklı dizilimlerdeki kompozit levhalarda üretilmiştir. En son olarak da nanopartikül eklenerek üretim gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerlerinde bor nitrür ve elmasın ardından en sert malzemelerden biri olduğu bilinen [4] bor karbür katkısı farklı oranlarda yapılarak ile nanopartikül katkılı kompozit levhalar elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen tüm levhaların balistik dirençlerini deneysel olarak araştırılmıştır. Giyilebilir koruyucu zırhlara ve diğer balistik koruyucu ürünlere örnek olabilecek bu kompozit levhalardan elde edilen sonuçların balistik performans açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kompozit malzemelerin balistik darbe altında performanslarının incelenmesi konusunda gün geçtikçe yapılan çalışmalar artmaktadır. Araştırmalarda, hibrit kompozitler, Kevlar kullanımı ile elde edilen kompozitler ve nanopartikül eklenmesi ile elde edilen kompozitler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Özellikle nanopartikül kullanımında Bor karbür (B_4C) ün eklenmesi ile elde edilen kompozit malzemelerin balistik darbe altındaki performansları araştırılmıştır.

2.1 Hibrit Kompozitler ile Önceki Yapılan Çalışmalar

Pandya [5] vd., hibrit kompozitlerin balistik davranışını deneysel çalışmalarla incelemişlerdir. Çalışmada, epoksi reçine ile düz dokuma E-cam kumaş ve 8H saten dokuma T300 karbon kumaş kullanılarak, dört tip simetrik kompozit malzeme elde etmişler. Bunların H1 [G_3C_2]_s, H2 [C_2G_3]_s, H4 [C_2G_2]_s, H5 [G_2C_2]_s dizilimlerine sahip olduğunu belirtmişler. Karşılaştırma için düz dokuma E-cam/Epoksi [G]_n ve 8H saten dokuma T300 Karbon/Epoksi [C]_n üzerinde de çalışmalar yapmışlar. Aynı levha kalınlığı için sadece karbon kompozitler ile karşılaştırma yapıldığında, T300 karbon katmanlarına E-cam katmanlar eklenerek kompozitler için balistik limit hızının, V_{50} 'nin artırılabilirliğini gözlemlemişler. E-cam katmanların dış kısma ve karbon katmanların iç kısma yerleştirilmesi, karbon katmanların dış kısma ve E-cam katmanların iç kısma yerleştirilmesinden daha yüksek balistik limit hızı sağladığını tespit etmişler. Farklı polimer matrisli kompozitlerin balistik darbe davranışı üzerine deneysel çalışmalar yapmışlar.

Yahaya [6] vd., dokuma kenaf-aramid hibrit kompozitlerin balistik darbe özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında, dokuma kenaf-Kevlar hibrit kompozitlerin, dokuma kenaf oranı hacim fraksiyonuna göre 5,40 ila 14,99 arasında değişirken iki farklı düzenleme kullanarak hazırlamışlar. Yapılan bu çalışmada, dokuma kenaf-Kevlar hibridizasyonuna dayanarak, aramid fiberlerin kısmen değiştirilmesi için daha ucuz dokuma kenaf kullanan hibrit kompozitlerin uygun tasarımı yoluyla aramid levhaların daha yüksek V_{50} ve enerji emilimini elde edebileceğini belirtmişlerdir. Hibrit kompozitlerin (14 kat Kevlar ve 2 kat kenaf) diğer hibrit kompozitlere kıyasla daha üstün bir balistik performans sergilediğini tespit etmişler. Kenaf oranının artmasıyla birlikte hibrit kompozitlerin balistik özelliklerinin azaldığını belirtmişler. Kompozit tabakaların düzeninin de hibrit kompozitlerin balistik performansını önemli ölçüde

etkilediğini belirtmişler. Hibrit kompozitlerin kalınlık ve alansal yoğunluğunun artmasının kompozitlerin balistik özelliklerini artırdığını belirtmişler.

Palta [7] vd., çelik ve hibrit zırh levhalarını (Kevlar ile birleştirilmiş çelik) balistik darbeler altında sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, yüksek mukavemetli çelik Weldox 700E ve Kevlar 129/Epoksi levhaların doğrusal olmayan sonlu eleman (FE) modelleri oluşturulmuş ve deneysel verilerle doğrulamışlar. Üç monolitik çelik, on çok katmanlı çelik ve on yedi çok katmanlı hibrit levha olmak üzere 30 farklı konfigürasyonu üzerinde 900 m/s hızında .223 mermi darbelerine maruz bırakılan sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişler. Çalışma sonucunda, tabaka konfigürasyonunun tabakalı çelik ve hibrit levhaların balistik performansını önemli ölçüde etkileyebileceğini belirtmişler. Tabakalı bir çelik levhanın, karşılık gelen monolitik bir çelik levhaya göre daha üstün balistik korumaya sahip olduğunu ve ayrıca hibrit Çelik/Kevlar levha konfigürasyonlarının daha iyi balistik koruma sağlarken, monolitik çelik levhalara kıyasla ağırlıkta %26 azalma sağladığı tespit ettiklerini belirtmişler. Ayrıca katman sayısı arttıkça katmanlı çelik levhaların balistik performansının azaldığını (yani artık hızın arttığı) gözlemlemişler. Ayrıca, çift katmanlı çelik levhalar için, daha kalın bir arka katmana sahip olanın, daha ince bir arka katmana sahip olanlardan daha fazla balistik dirence sahip olduğunu tespit etmişler.

Mahesh [8] vd., yaptıkları çalışmada, düz kumaş, uyumlu, hibrit uyumlu ve sert kompozit malzemelerin balistik darbe tepkisi üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, saf jüt kumaşın balistik limitini bulmak için deneysel yaklaşımın yanı sıra uyumlu kompozit, iç içe geçmiş doğal kauçuk (NR) tabakaları olan ve bunları içermeyen uyumlu hibrit kompozit ve sert jüt epoksi (JE) kompoziti ele almışlar. Yazarlar yaptıkları çalışmada, uyumlu hibrit kompozitlerin, temiz jüt kumaşlara, uyumlu ve sert kompozitlere kıyasla gelişmiş balistik tepki sergilediğini ve NR yardımcı maddelerinin dahil edilmesinin kompozitin esnekliğini koruyarak kompozitin balistik performansını önemli ölçüde etkilediğini belirtmişler. Sert JE kompozitinin hasar mekanizması incelemesinde matris çatlaması, delaminasyon ve fiber kırılması görüldüğünü belirtmişler. Bu nedenle, önerilen uyumlu hibrit kompozitlerin balistik uygulamalar için en uygun malzeme olduğunu belirtmişler.

Peng [9] vd., hibrit kompozitlerin balistik tepkilerini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada, 7,62 mm mermi kullanmışlar. Balistik darbe direncini arttırmak için seramik, Dyneema, Kevlar ve sıkıştırılmış ahşap kombinasyonları ile geliştirilen hibrit tabakalı yapılar önermişler. 25 levha üretilerek, 19 hibrit ve 6 tek malzemeli panel olmak üzere on dört tip, 7,62 mm'lik bir mermi ile yüksek hızlı darbeye karşı test etmişler. Beş hibrit panel, mermiye karşı başarılı bir şekilde direnç gösterirken, yirmi panelin çeşitli çıkış hızlarıyla delindiğini belirtmişler. Kumaş levhaların kalınlığı aynı olduğunda, Dyneema'da oluşan bombe deformasyonunun, Kevlar'dan daha büyük olduğunu belirtmişler. Sıkıştırılmış ahşapta ise hafif malzemelerden biri olmasına rağmen, balistik performansının ve enerji emiliminin zayıf olduğunu belirtmişler. Balistik sonuçlara göre, B₄C-Dyneema kompozit panel, diğer dört kısmi penetrasyon paneline kıyasla en düşük alansal yoğunluk ve kalınlıkta en iyi balistik performansı gösterdiğini belirtmişler.

Karthick [10] vd., hibrit kompozitlerinin sayısal olarak balistik darbe davranışlarını incelemiştir. Yazarlar, hibridizasyonun yüksek hızlı darbe altında kompozit zırhlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Hibrit kompozit zırh korumasını, Kevlar fiber takviyeli polimer kompozitler (KFRP), E-Cam fiber takviyeli polimer kompozitler (GFRP) ve Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler (CFRP) gibi farklı kompozitler ve farklı dizilim sırası kullanarak oluşturmuşlar. Hibrit kompozit zırhların tamamen farklı karışımlarını, optimum bir zırh kalınlığı için farklı konumlarda GFRP ile KFRP kaplama, CFRP ile KFRP kaplama ve CFRP ile GFRP kaplama olarak yapmışlar. Elde ettikleri sayısal sonuçlarda hibrit kompozitlerin hibridleştirilmesinin ve farklı dizilim sırasının balistik performans üzerinde kritik bir tepki gösterdiğini elde ettiklerini belirtmişler. Karbon fiber kompozitlerin Kevlar'a kıyasla darbe dayanımının zayıf olduğunu belirtmişler. Bununla birlikte, karbon kompozitin Kevlar ve Cam ile hibridizasyonu ile darbe dayanımının ve balistik limit hızının artırılabilmesini belirtmişler.

Nugroho [11] vd., yoğunlaştırılmış Teak Platinum ahşap kaplama-aramid hibrit kompozitlerin balistik darbe karşısında enerji emilimini incelemiştir. Yazarlar çalışmalarında, hibrit olan ve hibrit olmayan malzemeleri incelemiştir. NIJ 0108.01 standardına göre 9 mm Luger mühimmat kullanarak, 5 m mesafede balistik testleri

gerçekleştirmişler. Elde edilen sonuçlarda, hibrit panellerin performansının aynı kalınlıktaki hibrit olmayan panellerden daha düşük olduğunu belirtmişler. Çalışmalarında, en iyi hibrit panel konfigürasyonunun 2:1 aramid-kaplama oranı ve 354.70 J' deki balistik enerjinin %78,64'ünü absorbe eden kaplama-aramid-kaplama katman dizilimi olduğunu belirtmişler. Hibrit panellerdeki hasarın, darbe yüzeyindeki aramid fiberlerin kayma kırılması, arka yüzeydeki aramid fiberlerin bükülmesi, delaminasyonu ve gerilme hasarı kombinasyonundan kaynaklandığını belirtmişler.

Sathyaseelan [12] vd., areka/kenaf fiber takviyeli hibrit epoksi kompozit levhaların balistik darbe özellikleri üzerine deneysel araştırma yapmışlardır. Farklı dizilimle üretilmiş dört numune içerisinde iki levhanın saf malzemelerden oluştuğunu belirterek elde ettikleri sonuçlarda, tüm areka tabakalarıyla yapılan kompozitin daha iyi darbe dayanımına sahip olduğunu ve daha fazla darbe enerjisi emdiğini gösterdiğini belirtmişler. Saf (Kenaf fiber) kompozit levhası KKKKK'nın, saf (Areka) AAAAA'dan daha az darbe enerjisi emdiğini belirtmişlerdir. KAKAK ve AKAKA kompozitlerinin, areka ve kenaf fiberlerinin alternatif katmanları ile yapıldığını ve saf KKKKK levhadan daha fazla enerji emdiğini elde etmişler.

Li [13] vd., Kevlar ve UHMWPE fiberleri içeren farklı dizilimlerde tasarlanan hibrit düz dokuma levhaların, penetrasyon hasarlarını balistik testlerle incelemişlerdir. Karbon/Kevlar, Karbon/Ultra Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE) ve UHMWPE/Kevlar olmak üzere üç çeşit hibrit levha hazırlamışlar. Kevlar katmanlarının ön yüz olarak kullanıldığı UHMWPE/Kevlar hibrit levhaların en yüksek enerji emme kapasitesine ve daha yüksek balistik limite sahip olduğu tespit etmişler. Temel hasar tiplerinin, fiber kırılmaları, matris çatlağı ve katmanlar arası delaminasyon olduğunu belirtmişler. Sonlu elemanlar analizi (FEA) ile darbe hasarı mekanizmalarını incelemişler. FEA sonuçlarında majör hasarın ön katmanlar için kayma hasarı olduğunu, arka katmanlar için ise çekme hasarı olduğunu elde ettiklerini belirtmişler. Ayrıca kevlar ile hibridleştirilmiş UHMWPE katmanlarının arka yüzeye yerleştirilmesinin daha yüksek bir yavaşlama etkisi sağlayabileceğini belirtmişler.

Sah [14] vd., hibrit kompozitlerin balistik darbe dirençlerini araştırmışlar. Çeşitli hibrit kompozit kombinasyonları üzerindeki balistik etkinin sayısal bir analizini yaparak,

Kevlar-3D (üç boyutlu kumaş), Bazalt-3D ve Hibrit-3D katmanlarının (Kevlar-3D ve bazalt-3D kumaş katmanlarının kombinasyonu) farklı dizilimleri kullanarak, altı hibrit kompozit panel (K3B3, B3K3, B3H3, H3B3, K3H3 ve H3K3) modellemişler. 240 m/s ile 350 m/s çarpma hızı aralığında 9 mm Full Metal Jacket (FMJ) mermi kullanmışlar. Elde edilen sonuçlarda, B3K3 paneli 332 m/s balistik limit ile tüm paneller (K3B3, B3K3, B3H3, H3B3, K3H3, H3K3) arasında en iyi performansı gösterdiğini, H3B3'nin 251 m/s balistik limit ile daha kötü performans gösterdiğini elde etmişler. B3K3 levhasının K3B3, B3H3, H3B3, K3H3 ve H3K3 levhalara kıyasla sırasıyla %5,1, %18,37, %24,39, %14,15 ve %18,37 daha yüksek balistik limit gösterdiğini belirtmişler. Kevlar'ın daha yüksek hasar sönmüleyici enerjisi ve hibrit levhaya göre daha yüksek fiber gerilme uzaması nedeniyle, Kevlar'ın arka katman olarak kullanıldığı levhaların balistik performansının çok iyi olduğunu belirtmişler.

Pathak [15] vd., hafif kompozitin balistik limit hızını iyileştirmek için Kevlar ve alümina ile bazalt-3D kumaşın farklı dizilim sıralamalarının etkisini araştırmışlar. Hibrit kompozit levhalarda yüksek hızlı darbe altında farklı hızlarda 9 mm FMJ mermi kullanmışlar. Yazarlar yaptıkları çalışmada, ön tarafta alümina koyularak desteklenen bazalt/Kevlar (AB2K2) kompozit panelin balistik limitinin K-16, B-16, B2-A-K2, B2K2-A panellerine kıyasla sırasıyla %16,74, %21,77, %14,25, %40,23 oranında daha iyi olduğunu tespit etmişler.

Xu [16] vd., karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve aramid fiber kompozitten (AF) oluşan hibrit fiber takviyeli polimerin (HFRPT) balistik davranışlarını incelemişlerdir. Toplam kalınlığı 10 mm olan HFRPT'ler için, AF/CFRP hibridizasyonunun CFRP/AF hibridizasyonundan daha iyi balistik darbe direnci performansı gösterdiklerini belirtmişler. Çalışmalarında; AF'nin 9 mm ve CFRP'nin 1 mm istiflendiği HFRPT kompozitlerin, 420 m/s'lik maksimum balistik limite ve 323 J/ (g/cm²)'lik en yüksek darbe enerjisi oranına ulaştığını elde etmişler. Bu konfigürasyonlar arasında, 9 mm AF ve 1 mm CFRP istifleme sırasına sahip HFRPT'nin daha hafif bir ağırlığı korurken üstün balistik darbe direnci performansı sergilediğini belirtmişler.

2.2 Kevlar ile Önceki Yapılan Çalışmalar

Tham [17] vd., Kevlar'dan üretilmiş kaskın balistik etkilerini deney ve simülasyon yöntemleriyle araştırmışlardır. Deneyde, hafif bir gaz tabancasından fırlatılan 11,9 g

kütleli küresel mermi, 205 m/s'lik bir çarpma hızı ile deneyi gerçekleştirmişler. İki farklı standart için de simülasyon deneylerini yapmışlar. Bunların, NIJ-STD-0106.01 Tip II standardı ile Amerika Birleşik Devletleri'nin (ABD) ordusu tarafından geliştirilen Personal Armor System Ground Troops (PASGT) Kaskı için yayınladığı MIL-H-44099A şartnamesinde yer alan V₅₀ standardı olduğunu belirtmişler. MIL-H-44099A simülasyonu için, bir FSP mermisinin 610 m/s hız ile çarpışma testi gerçekleştirmişler. Simülasyon, 9,5 mm kalınlığındaki Kevlar levhasını delmek için 610 m/s'nin üzerinde bir darbe hızının gerekli olduğunu ortaya koyduğunu belirtmişler. NIJ-STD-0106.01 Tip II kask üzerindeki simülasyon deneyinde 358 m/s çarpma hızına sahip 9 mm'lik FMJ bir mermi kullanmışlar. Simülasyondan elde edilen sonuçlarda, Kevlar kaskın 358 m/s hızla hareket eden 9 mm'lik FMJ mermiyi durdurabildiğini belirtmişler. Hem yandan hem de üstten gelen darbeler için yapılan simülasyonlarda 9 mm'lik merminin çarpma sonrasında deforme olduğunu göstererek kaskın her iki yönden gelen mermiyi durdurabildiğini belirtmişler.

Bandaru [18] vd., Kevlar takviyeli Polipropilen (PP) matrisli termoplastik kompozit zırhların balistik darbe tepkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında, NIJ-STD 0106.01 Tip IIIA standardını kullanmışlar. 2D düz dokuma (2D-P), 3D ortogonal (3D-O) ve 3D açılı interlok kumaşlar (3D-A) olmak üzere üç tip farklı kompozit zırh levhalarını sıkıştırma kalıplama teknolojisi kullanılarak üretmişler. Balistik darbe testlerinde 9 mm FMJ mermi kullanmışlar. Balistik test sonuçlarında, 2D zırhların 3D zırhlara göre %2,4-7 daha fazla hasara duyarlı olduğunu belirtmişler. 3D kompozit zırhların 9 mm FMJ mermisine karşı koyabildiğini; ancak 2D düz dokuma zırhların başarısız olduğunu belirtmişler. Balistik limit hızı, 2D-P zırhtan 3D-O ve 3D-A zırhlara artışın sırasıyla %16,44 ve %20 olduğunu ve bunun da kumaş mimarisinin etkisini gösterdiğini belirtmişler. 3D-A levhaların balistik limit hızı 2D-P levhalarından %20 ve 3D-O levhalarından %4,2 daha yüksek olduğunu belirtmişler.

Chu [19] vd., Kevlar KM2 dokuma kumaşının balistik darbe davranışlarını sayısal olarak araştırmışlardır. Dört kenarından sıkıştırılmış tek katlı düz dokuma kumaş Kevlar KM2 üzerindeki darbe balistiğinin sayısal bir simülasyonunda, iplik yoğunluğu ve boylamsal Young modülü gibi farklı iplik malzeme özelliklerine sahip kumaşların balistik performansını incelemişler. Çalışmalarında, iplik sıklığının kumaşın balistik

performansını önemli ölçüde etkilemediğini belirtmişler. Boyuna Young modülünün daha yüksek bir değerinin, mermiyi daha hızlı yavaşlatacağını, ancak bu yavaşlamanın önemli olmadığını belirtmişler. Bununla birlikte, çok yüksek bir boyuna Young modülü, düşük bir darbe hızında bile birincil ipliklerin erken kopmasına ve kumaşın delinmesine neden olabileceğini aktarmışlar. İplik mukavemetinin balistik darbe sırasında erken kopmasının önlenmesi ve ardından kumaşın balistik performansının iyileştirilmesi için çok önemli bir rol oynadığını belirtmişler.

Rubio [20] vd., aramid kompozit savaş kaskının balistik performansını incelemişler. Yazarlar çalışmalarında; 1,1 gr. FSP ile 1,7 gr. mermiler kullanılarak minimum katman sayısını belirlemek için sonlu elemanlar modeli önermişler. Yaptıkları çalışmanın sonucunda, balistik limitin çok üzerindeki darbe hızları için, darbe bölgesi konumunun önemli olmadığını, balistik darbe sonrası darbe hasarının darbe alan bölgede lokalize olduğunu, kohezif ara katmanları dikkate alındığında balistik limite kadar darbe hızıyla artış gösteren delaminasyon alanının genişlenmesinde rol oynadığını belirtmişler. Bu genişleyen alanın değerleri, merminin kesitinden birkaç kat daha büyük olduğunu ve kaskın kalan bütün yapısını tehlikeye sokabileceğini belirtmişler. Hasar gören bu alanın, balistik sınırın çok üzerindeki hız ile azalacağını ve merminin kesit değerine yaklaşacağını belirtmişler. Çalışmalarında, geliştirdikleri sayısal savaş kaskı modelinin, çıkış hızı, balistik limit ve deformasyonlarla ilgili olarak küçük mermi darbeleri altında aramid kompozitlerin mekanik davranışını yakaladığını belirtmişler.

Pinkos [21] vd., çift eksenli ve üç eksenli Kevlar 29 kumaşlarından yapılan 30 katmanlı paketlerle korunan bir insan vücudundaki balistik darbe etkilerini ve balistik darbenin yarattığı travmalarına ilişkin deneysel analiz yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada 406 ± 5 m/s hızda Parabellum 9 mm $\times$ 19 mm FMJ mermisi kullanmışlar. Ayrıca, insan vücudunun fiziksel bir modelini geliştirilerek kalp, akciğerler, iskelet ve kas sistemlerinin bir modelini oluşturmuşlar. Mermi çarpması sırasında, insan vücudunun belirli noktalarına yerleştirilen sensörler kullanılarak basınç kuvvetlerini kaydetmişler. Ateşleme sırasında hem çarpma yerinde hem de iç organlarda basıncın arttığı ve bunun da çoklu organ hasarına yol açabileceği tespit etmişler. Deneysel analizde, üç eksenli kumaşlardan yapılmış bir balistik paket ile vücudun korunması durumunda, belirli organlara uygulanan basınçların, çift eksenli kumaşlardan yapılmış

bir pakete kıyasla her zaman daha düşük olduğunu belirtmişler. Üç eksenli kumaşlardan yapılan balistik paketler için basınç değerlerinin genellikle çift eksenli kumaşlardan yapılan balistik paketlerin yarısından daha fazla olduğunu gösterdiğini belirtmişler. Üç eksenli kumaşlardan yapılan balistik paketler kullanıldığında göğüs kemiğindeki çatlak sayısının ve hasar alanının daha az olduğunu tespit etmişler.

Prakash [2] vd., yaptıkları çalışmada seramik ve Kevlar/Epoksi bileşenlerinin üç boyutlu bir sonlu eleman modeli ile balistik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada 7,62 mm zırh delici (AP) mermi kullanmışlar. Çalışmalarında; perforasyonun, ilk olarak merminin kinetik enerjisinin, zırh sisteminin toplam iç enerjisini aştığında meydana geldiğini belirtmişler. Çarpma hızının, kompozit zırh içindeki iç enerjinin dağılımını etkilediğini ve daha yüksek hızların, bir eşik sınırına kadar daha fazla enerji emilimine yol açtığını belirtmişler. Merminin hızı arttığında, zırhta daha büyük hasar görüldüğünü ve delaminasyonun zırhın işlevselliğini azalttığını tespit etmişler. Daha yüksek hızlarda, iç enerjinin eş zamanlı olarak artmasının ve kinetik enerji kaybı nedeniyle mermide önemli ölçüde aşınma meydana geldiğini belirtmişler. Kompozit zırhın balistik basınçlara dayanabilmesi için hem sünek hem de sağlam olması gerektiği belirtmişler. Yazarlar çalışmalarında, toplam zırh kalınlığının optimize edilerek, hafif bir zırh yapısını da koruyarak, maksimum balistik limite ulaşmanın önemli olduğunu vurgulamışlar.

Stopforth [22] vd., yaptıkları çalışmada, farklı ağırlık ve katman sayısına sahip Kevlar'ın 9 mm Parabellum mermilerle kurşun geçirmezlik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları testlerde, 160 GSM, 200 GSM, 400 GSM Kevlar'ın balistik etkileri altındaki karşılaştırmalarını yapmışlar. Birkaç Kevlar katmanının mermileri durdurmada etkili olmadığını, aksine mermileri balistik jelin içinde daha fazla ilerlemeye zorladığını gözlemlediklerini belirtmişler. Sadece katman sayısı artırıldığında, merminin balistik jele nüfuz etmesinde azalma olduğunu belirtmişler. Yazarlar, 200 GSM Kevlar'ın 9 mm Parabellum mermisini durdurmada daha etkili olduğunu belirtmişler. Dünyada en yaygın olarak kullanılan 9 mm Parabellum mühimmatı için merminin durdurulması için minimum 21 kat 200 GSM Kevlar gerektiğini belirtmişler.

2.3 Bor Karbür Kullanılarak Yapılan Önceki Çalışmalar

Xu [23] vd., yaptıkları çalışmada, B₄C nanopartikül katkılı sertleşen sıvı (STF) ve Twaron aramid kumaştan oluşan kompozit malzemelerin balistik performansını incelemişlerdir. Katkısız, W3.5 partikül boyutlu B₄C ve W1.5 partikül boyutlu B₄C katkısı ile hazırladıkları altı kompozit malzemeyi iplik çekme testi, balistik deney ve sonlu elemanlar analizi ile incelemişler. Aramid kumaşlara STF emprenye edilmesinden sonra iplikler arasındaki sürtünmenin büyük ölçüde arttığını bulmuşlar. Balistik test sonucunda ise, tek katmanlı katkısız Twaron kumaşın balistik limit hızının saf STF kullanıldığında 114 m/s'den 160 m/s'ye, STF' ye W3.5 partikül boyutunda ağırlıkça %10 B₄C'nin eklendiği kompozit malzemede ise 179 m/s'ye ulaştığını tespit etmişler. Çok katmanlı kumaşlar için, üç katmanlı B₄C/STF/Twaron kompozit kumaşın balistik performansının üç katmanlı saf Twaron' dan daha iyi iken, dört katmanlı saf Twaron' dan (üç katmanlı kompozit ile benzer alansal yoğunluğa sahip) daha kötü olduğunu belirtmişler. W1.5 B₄C'nin balistik performansının, W3.5'a göre daha düşük olduğunu belirtmişler. B₄C/STF/Twaron kumaşların artan katkı oranları, kompozitlerin genel olarak esnekliğinin azalmasına ve dolayısıyla daha düşük bir iyileşme göstermesine yol açtığını belirtmişler.

Chagas [24] vd., B₄C nanopartikül katkılı UHMWPE'nin balistik performansını araştırmışlardır. Çalışmalarında, UHMWPE'yi 200 °C'de çift vidalı ekstrüzyon ile ağırlıkça %0,01, %0,05 ve %0,1 oranında B₄C ile birleştirmişler. 0.22 kalibrelik mühimmat ile balistik olarak test etmişler. Ağırlıkça %0,05 B₄C katkılı nanokompozitin; en düşük mermi penetrasyon derinliğine ve 0,22 kalibrelik mermiye karşı en iyi balistik performansı gösterdiğini belirtmişler. Bu nedenle, sadece ağırlıkça %0,05 B₄C'nin balistik performansta bir artışa neden olduğunu; numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendiğinde, en yüksek katkılı olan ağırlıkça %0,10 B₄C' de nanopartiküllerin topaklanma eğiliminde olduğunu tespit etmişlerdir. Ağırlıkça en düşük olan %0,01 B₄C içeriğinin yeterli olmadığını ve bu oranda da nanopartiküllerin topaklanmasından dolayı balistik performansının artışını sağlamadığını tespit etmişler.

Huang [25] vd., mikrometereoitler ve yörünge enkazı (MMOD) koruma uygulaması için B₄C tamponlu Whipple kalkan dizilimi ile tasarlanan B₄C/Alüminyum (Al)

numunelerde hiper hız darbe hasar davranışları üzerine çalışma yapmışlardır. Kritik mermi boyutunu test etmek için 3 km/s ile 6,5 km/s arasında değişen hiper hız darbe testlerini gerçekleştirmişler. Geleneksel Al-alaşım Whipple kalkanı konfigürasyonu ile karşılaştırıldığında, Whipple konfigürasyonunun 3 km/s-6,5 km/s darbe hızı aralığındaki kritik mermi boyutunun, B₄C/Al tampon kullanıldığında yaklaşık %20 iyileştirilebildiğini tespit etmişler.

Zhang [26] vd., yaptıkları çalışmada, sayısal simülasyonlar kullanarak B₄C seramik levha ve kompozit arka levhadan oluşan hafif kompozit zırh sistemi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, 12,7 mm zırh delici-yangın (API) mermilerin B₄C/UHMW-PE ve B₄C/C/UHMW-PE zırhları üzerindeki etkisini simülasyon ve deneysel olarak test etmişler. B₄C/UHMW-PE zırhının mermi tarafından delindiğini, B₄C/C/UHMW-PE zırhının ise delinmediğini belirtmişler. Bu delinmeme nedeninin; T300/5208 karbon/epoksi malzemelerinin, UHMW-PE' den daha yüksek bir Young modülüne sahip olduğunu, B₄C seramik için yeterli destek sağlayabildiğini, eğilme deformasyonunu azaltabildiğini ve B₄C seramikte gerilme kırılmasının meydana gelmesini geciktirebildiğinden dolayı olduğunu belirtmişler.

Kumar [27] vd., B₄C takviyeli Titanyum (Ti)/Cam fiber takviyeli polimer (GFRP) fiber metal levhaların (FML) yüksek hızlı darbe deformasyon davranışları üzerinde hasar araştırmasını yapmışlardır. Ti/GFRP FML kompozitlerine ağırlıkça %5 ve %10 oranında B₄C partikülleri eklemişler. Yüksek hızlı balistik deneyleri, 7,62 mm çapında ve 350 m/s ile 450 m/s arasında değişen hızlarda Zırh Delici (AP) Mermi kullanarak gerçekleştirmişler. Ağırlıkça %5 B₄C ilavesinin Ti/GFRP FML hedeflerinin balistik limitini %45-50 iyileştirdiğini ve B₄C partiküllerin varlığının, Ti/GFRP FML numunesinin balistik direncini, mermi nüfuzuna karşı sürtünme direnci sunarak önemli ölçüde arttırdığını belirtmişler. Ağırlıkça %10 B₄C içeren numunede B₄C partiküllerin daha fazla eklenmesi topaklanma nedeniyle balistik performansı düşürdüğünü belirtmişler. Çoklu mermi etkisinin metal katmanlarda deformasyonun birleşmesini tetiklediğini ve ciddi delaminasyona neden olduğunu ancak GFRP katmanlarda böyle bir davranış gözlenmediğini belirtmişler. Ağırlıkça %5'lik B₄C katkısıyla hazırlanan Ti/GFRP FML için penetrasyon derinliği 19,5 mm ve ağırlıkça %0 B₄C katkılı numunede 39,6 mm ve ağırlıkça %10 B₄C ilaveli numunede 25 mm

penetrasyon derinliği tespit etmişler. %5'lik B₄C katkılı kompozit malzemenin, diğer kompozit malzemelere göre penetrasyon derinliğinin daha az olduğunu belirtmişler. Bunun başlıca nedeninin, mermi hızını geciktiren ve FML numunesinin balistik direncini artıran seramik tozlarının sunduğu sürtünme direnci olduğunu belirtmişler.

Zhou [28] vd., B₄C katkılı B₄C/2024Al kompozitlerinin balistik darbe sonrası morfoloji ve mikroyapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Hacimsel olarak %55 oranında ortalama boyutu 17,5 µm olan B₄C partikülleri içeren B₄C/2024Al kompozitlerini basınçlı infiltrasyon yöntemiyle hazırlamışlar. Kompozitlerin balistik performansını test etmek için balistik darbe deneylerinde 7,62 mm AP mermiler kullanmışlar. B₄C/2024Al kompozitlerinin koruma katsayısının, önce düşme, sonra yükselme eğilimi gösterdiğini, en sonunda ise numune kalınlığı arttıkça sabit kalarak 2,8'e kadar ulaştığını belirtmişler. Bu çalışmada B₄C parçacığının kırılma tokluğunun B₄C/2024Al kompozitlerinde büyük ölçüde artırdığını belirtmişler.

Lo [29] vd., B₄C malzemenin iki varyantı üzerinde mekanik özelliklerini ve balistik darbe davranışlarını incelemişlerdir. Ticari olarak temin edilebilen basınçsız sinterlenmiş B₄C-Titanyum diborür (TiB₂) (malzeme Z) ve sıcak preslenmiş B₄C (malzeme S) seramiğinin mikroyapısını, hıza bağlı basınç davranışını ve balistik performansı üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlar. 7,62 mm AP M2 mermileri kullanarak penetrasyon derinliği testi yapmışlar. İki malzemenin normalleştirilmiş balistik verimliliğinin 932 m/s'de benzer düzeyde bulunduğunu, S malzemesi 1078 m/s'lik bir çarpma hızında Z malzemesinden daha üstün bulunduğunu belirtmişler.

Sharma [30] vd., çalışmalarında ortalama boyutu 30 µm'den küçük olan B₄C partikül takviyeli Al-Zn-Mg-Cu matrisli dereceli yapısal fonksiyonlu malzemelerin (FGM) balistik performansını incelemişlerdir. Her biri güç yasası indekslerine (N=0,5, 1 ve 2,5) sahip beş katmandan oluşan üç FGM üretmişler. FGM; N=2,5 ile en yüksek sertliğin, seramik bakımından zengin olan en üst katmanda (hacimce %70 B₄C) olduğunu tespit etmişler. Hacimce %70 B₄C'nin, merminin kinetik enerjisini dağıtmaya yardımcı olduğunu ve 700 m/s'de gerçekleştirilen balistik testlerde, FGM-N=1 ve N=2,5'in N=0,5'e kıyasla penetrasyon derinliğinde %36,27 ve %26,89'luk bir iyileşme ile daha iyi balistik dayanımı sunduğunu gösterdiğini belirtmişler. Tüm

durumlarda, yüksek hızlı mermi FGM ile temasa geçtiğinde hacimce %70 B₄C katmanına sahip sert üst katmanın parçalandığını gözlemlediklerini bildirmişler. Yazarlar, üretilen FGM N=1 ve N=2,5 numunelerin, 700 m/s'ye kadar hızlarda 7,62x39 mm tip III+ seviyesindeki mermi tehditlerine karşı önemli bir koruma sağladığını ve hafif zırh olarak kullanılabileceğini önermişler.

Yiding [31] vd., çalışmalarında, 12,7 mm T12A sert çelik çekirdekli API mermileri kullanarak, zırha nüfuz eden sert çelik çekirdeğin kırılma davranışını ve gerilme dağılımını araştırmışlardır. Aramid fiber-B₄C-6061T6 alüminyum alaşımlı hafif kompozit zırh üzerinde dokuz adet deney setiyle penetrasyon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Farklı penetrasyon hızlarında yapılan sayısal simülasyonlarda, Seramik/6061-T6 alüminyum alaşımlı kompozit zırhın mermi çekirdeği için kinetik enerji emme kapasitesinin, çarpma hızı arttıkça genişlediğini belirtmişler. Yazarlar, yaptıkları çalışmada, 498,9 m/s hızında nüfuz eden bir mermi için 13°'ye eşit veya daha büyük nüfuz açılarına sahip mermilere dayanabileceğini ve belli bir dereceye kadar, bu nispeten ince seramik kompozit zırhın, çoğu açıda 12,7 mm API mermilere karşı başa çıkabileceğini belirtmişler.

Wu [32] vd., çalışmalarında dört tip seramik B₄C, SiC, Si₃N₄ (silikon nitrür) ve Al₂O₃ (alüminyum oksit) ve bunların kompozit yapılarının balistik davranışları ve performansları deneyler ve simülasyonlar yoluyla incelemişlerdir. Farklı seramik kombinasyonlarının karşılaştırmalı analizinin ardından, B₄C malzemesini SiC, Al₂O₃ ve Si₃N₄ ile birleştirildiğinde, B₄C'nin ön katmana yerleştirilmesinin, arkaya yerleştirildiği duruma kıyasla birim alan başına enerji emme verimliliğinin sırasıyla %28,27, %7,78 ve %18,96 oranında arttığını belirtmişler. Ayrıca, Al₂O₃'ün Si₃N₄ ve SiC ile kombinasyonlarının, birim alan başına enerji emme kapasitesinin sırasıyla %5,96 ve %1,72 oranında artmasına neden olduğunu ifade etmişler. Yüksek sertlik ve yüksek kırılma tokluğuna sahip çift katmanlı bir seramik yapı, kompozit zırhın anti-penetrasyon etkinliğini önemli ölçüde artırabildiğini belirtmişler.

Chao [33] vd., çalışmalarında B₄C hacim oranına sahip B₄C/AA2024 FGM kompozitlerin mikroyapısını ve balistik performansını incelemişlerdir. B₄C'nin hacimce oranı üst, orta ve alt katmanda sırasıyla %70, %47 ve %25 şeklinde olduğunu

ve alansal yoğunluğu 80 kg/m^2 ve 38 kg/m^2 olan farklı numunelerin balistik testlerini $7,62 \text{ mm}$ API kullanarak gerçekleştirdiklerini belirtmişler. Yazarlar, üç katmanlı hacimce %70-%47-%25 $\text{B}_4\text{C}/\text{AA2024}$ FGM'lerin homojen hacimce %70 $\text{B}_4\text{C}/\text{AA2024}$ hedefinden daha iyi bir bütünlüğü koruma yeteneğine sahip olduklarını ve penetrasyonun alansal yoğunluğunun homojen %47 $\text{B}_4\text{C}/\text{AA2024}$ kompozitlerine kıyasla %14 oranında azaldığını belirtmişler. %25 hacimden %70 hacime kadar geniş bir B_4C hacim oranına sahip bir gradyan yapısını tasarlayarak, alüminyum matrisli kompozitlerin balistik performansının geliştirilebileceğini belirtmişler.

Chao [34] vd., yaptıkları çalışmada basınçlı infiltrasyon yöntemiyle üretilen %45 hacimli $\text{B}_4\text{C}/\text{AA2024}$ kompozitlerinin balistik davranışını ve geçirimli elektron mikroskopu (TEM) ile mikroyapı gelişimini incelemişlerdir. Kompozitlerin balistik davranışını incelemek için deneyde $7,62 \text{ mm}$ API mermi kullanmışlar. %45 hacimli $\text{B}_4\text{C}/\text{AA2024}$ kompozitlerinin mükemmel balistik performansa sahip olduğunu ve koruma katsayısının 3,6'ya ulaştığını belirtmişler. B_4C parçacıklarının kalıntı mikroyapısının esas olarak dislokasyonları, istifleme hatalarını, ikizlenmeleri ve çoklu kristalleşmeyi içerdiğini belirtmişler. B_4C seramik parçacıklarında dislokasyonların oluşumunun çok fazla enerji gerektirdiğini belirterek, yüksek hızlı darbenin ürettiği yüksek sıcaklık ve yüksek basınç ile B_4C parçacıklarının dislokasyon oluşturmaya yetecek enerjiye sahip olmasını sağladığını belirtmişlerdir.

Wang [35] vd., yaptıkları çalışmada $7,62 \text{ mm}$ mermilerin, eğik $\text{B}_4\text{C}/\text{UHMWPE}$ kompozit hedefe nüfuz etme davranışını, balistik testler ve sayısal simülasyonlarla incelemişler. Merminin geliş hızının artmasıyla, merminin ve seramik panelin parçalanma derecesinin kademeli olarak arttığını, merminin geliş hızının balistik limiti aşmasıyla merminin ve seramik panelin parçalanma derecesinin önemli ölçüde azaldığını belirtmişler. UHMWPE levhanın hasar modunun, merminin geliş hızı balistik limitten düşük olduğunda esas olarak gerilme hasarının ve hız balistik limite yaklaştığında veya aştığında kayma hasarı formunun kademeli olarak belirginleştiğini belirtmişler. Merminin geliş açısının artmasıyla, $\text{B}_4\text{C}/\text{UHMWPE}$ kompozit numunenin balistik limitinin önemli ölçüde iyileştiğini, mermi ve seramik panelin parçalanma derecesinin önemli ölçüde arttığını ve merminin sapma açısının kademeli

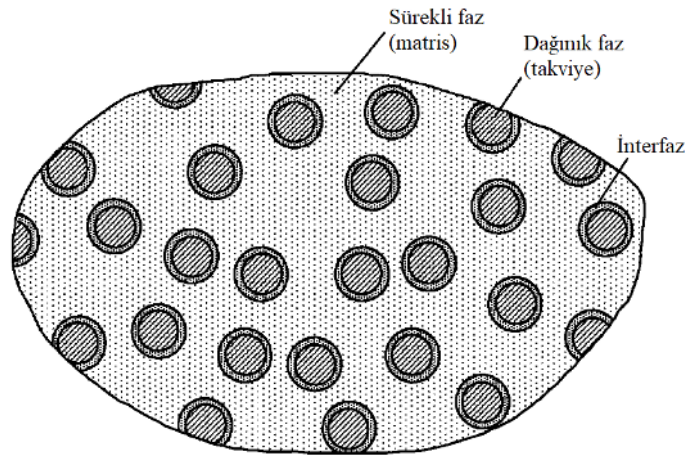
olarak arttığını, ayrıca seramik panel ve arka levhanın optimum kalınlık oranının, geliş açısı arttıkça kademeli olarak azalma eğiliminde olduğunu belirtmişler.

Metin [36] yaptığı çalışmada, hafif araç zırhı olarak tasarlanan çeşitli oranlarda B_4C ve grafen (GNP) nanopartikül içeren Al matrisli kompozit yapıların mekanik ve balistik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma için üretilen monoblok ve hibrit Al matrisli kompozit yapılar, AA7075 Al alaşımına karıştırılmalı döküm yöntemi ile hacimce %2,5, %7,5, %15, %22,5 oranında B_4C ve %2,5, %7,5, %15, %22,5 oranlarında B_4C ile %0,5 oranında GNP ilave edilerek üretilmişler. STANAG 4569 standartlarına uygun olarak yapılan atış testlerinin sonucunda hacimce %7,5 B_4C takviye oranı ile balistik performansın önemli ölçüde arttığını, %15 B_4C takviye oranında en yüksek performansın sergilendiğini, B_4C takviye oranının %15'in üzerine çıktığında ise balistik verimin düşmeye başladığını gözlemlemişlerdir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Tarih boyunca, kullanılan materyallerin istenilen koşullarda kullanımını sağlayabilmek için birçok malzeme kullanılmıştır. Kompozitlerin tarihte ilk kullanımlarından biri, saman takviyeli kerpiçler olarak bilinmektedir. Literatüre baktığımız zaman, M.Ö. 1500'lü yıllarda Mısırlılarda, bambu ile takviye edilmiş çamurların, yapıştırılmış tabakalı tahtaların evlerin duvarlarında kullanıldığı görülmektedir. 1800'lü yıllarda dövme kılıçlardaki tabakalı metaller örnek olarak belirtilmiştir. 1930 yıllarında ise cam fiberle takviye edilen reçinelerin 20.yüzyılda modern kompozitlerde de kullanılmaya başlandığı görülmektedir. 1970'li yıllardan bugüne boron, karbon, aramid gibi yeni fiberlerin, metaller ve seramiklerden meydana gelmiş matrislere sahip yeni kompozit yapıların geliştirilmeyle beraber kompozit malzemelerin uygulama alanının geniş ölçüde arttığı belirlenmiştir [37]. Günümüze yakın olan son elli yılda kompozit malzemeler, plastikler ve seramikler malzemelerin kullanımı ile beraber kompozit malzemelerin pazar payı her geçen yıl artış göstermektedir.

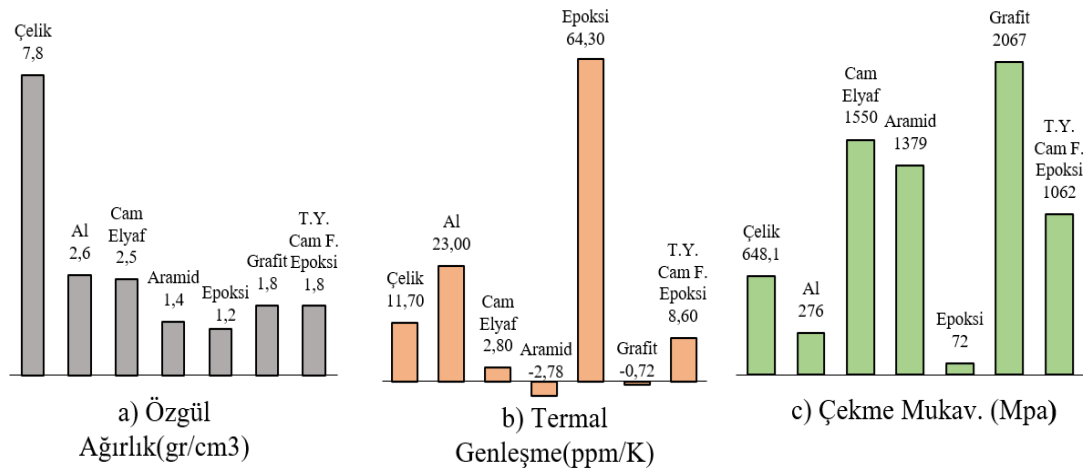
Kompozit malzemeler makroskobik ölçekte iki veya daha fazla fazdan oluşan yeni bir malzeme olup, bu malzemenin mekanik özellikleri ve performansı, malzemeyi meydana getiren bileşenlerden daha iyi olacak şekilde tasarlanmış bir yapıdır. Bu fazlardan biri çoğunlukla daha sert, daha güçlü ve süreksiz olup takviye elemanı olarak adlandırılmaktadır. Diğer faz ise daha zayıf sürekli ve daha az sert olup matris malzemesi olarak adlandırılmaktadır (Bkz. Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Kompozit malzeme [38]

Bazen kimyasal etkileşimler veya başka proseslerin etkileriyle takviye ve matris arasında interfaz adı verilen ek bir farklı faz bulunmaktadır. Kompozit malzeme, bileşenlerin özelliklerine, geometrilerine ve ilgili fazların dağılımına bağlıdır. En önemli özelliklerinden biri takviye elemanın hacim (veya ağırlık) oranı veya fiber hacim oranıdır. Takviyenin dağılımı, malzeme yapısındaki homojenliği belirlemektedir. Takviye dağılımı ne kadar homojen değilse, malzeme o kadar heterojen olmakta ve özelliklerdeki dağılım ve en zayıf bölgelerde hasar olasılığı o kadar yüksek olmaktadır. Takviyenin geometrisi ve yönelimi yapının anizotropisini etkilemektedir. Diğer taraftan matris elemanın, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini yöneten ana taşıyıcı elemanıdır. Matris fazı, hassas fiberler için koruma, bağlama, destek ve bir fiberden diğerine lokal gerilim aktarımı sağlamaktadır. Geleneksel monolitik malzemeler metaller, seramikler ve polimerler olarak üç geniş kategoride sınıflandırılmaktadır. Kompozitler, bu kategorilerin bir veya daha fazlasından iki veya daha fazla malzemenin kombinasyonlarıdır [38].

Günümüzde kullanılan bazı malzemelerin özgül ağırlık, termal genleşme, rijitlik ve çekme mukavemet özellikleri aşağıda Şekil 3.2 ‘de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 3.2 Bazı metallerin, fiberlerin, epoksi ve kompozit malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması [37]

Kompozit malzemeler günümüzde, geleneksel malzemelere göre bazı özelliklerin veya bunların birkaçını barındıran özellikler üretmek amacıyla yapılmaktadır [39] ;

- Mukavemet özellikleri
- Korozyon direnci

- Kırılma tokluğu
- Yüksek sıcaklık özellikleri
- Isıl iletkenlik
- Termal genleşme
- Elektrik iletkenliği
- Rijitlik
- Akustik iletkenlik
- Ağırlık
- Estetik görünüm
- Maliyet

Tüm bu sayılan özelliklerin hepsinin aynı anda olması mümkündür değildir, kullanılacak alanda istenilen özelliklere göre tasarlanmaktadır.

Özgül ağırlığın düşük olması da istenilen bir özelliktir, çelik bir malzeme ile tek yönlü cam fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme ile karşılaştırıldığında, mukavemet özellikleri bakımından kompozit malzeme daha avantajlı olarak karşımıza çıkmaktadır [37]. Bu özelliklerinden dolayı spor otomobillerinde, uzay-havacılık endüstrisinde, savunma endüstrisi gibi hafifliği önemseyen sektörlerde kompozit malzemelere talep daha fazla olmaktadır.

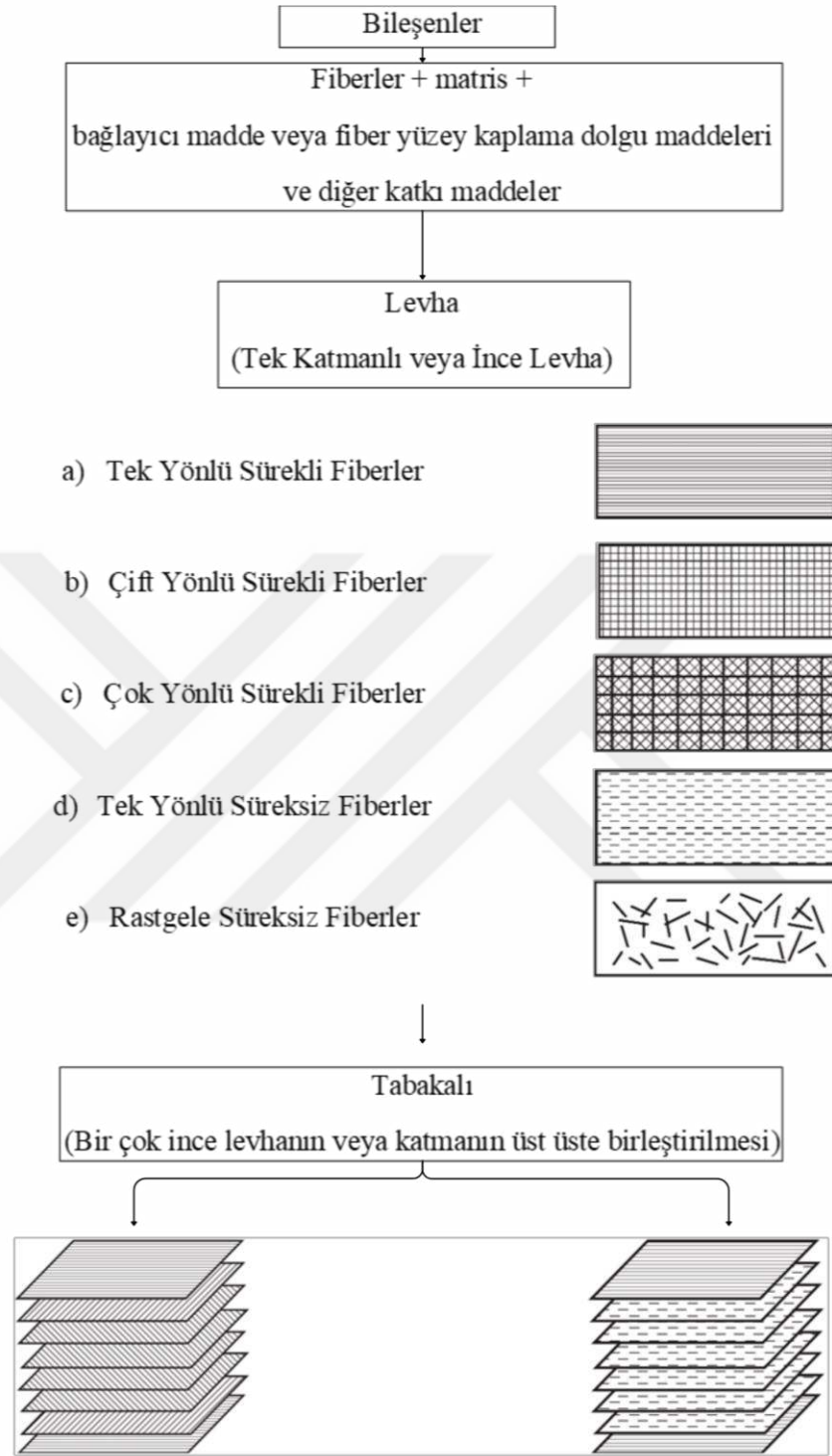
3.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler kendi aralarında, takviye malzemesine ve kullanılan matris malzemelerine göre sınıflandırılmaktadırlar (Bkz. Şekil 3.3).

3.1.1 Takviye malzemesine göre sınıflandırma

Fiber takviyeli bir kompozit malzemedeki ana bileşenler, takviye edici fiberler ve fiberler için bir bağlayıcı görevi gören bir matrislerdir. Ayrıca bulunabilecek diğer bileşenler ise bağlayıcı maddeler, kaplamalar ve dolgu maddeleridir. Bağlayıcı maddeler ve kaplamalar, fiber-matris arayüzü boyunca bağlanmayı desteklemenin yanı sıra matris ile ıslanmalarını iyileştirmek için fiberlere uygulanmaktadır. Her ikisi de fiberler ve matris arasında daha etkili bir yük iletimi sağlamaktadır. Dolgu maddeleri bazı polimerik matrislerde öncelikle maliyeti düşürmek ve boyutsal stabilitelerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bir kompozit yapının üretimi, bir levha (tabaka) oluşturmak için çok sayıda fiberin ince bir matris tabakasına dahil

edilmesiyle başlamaktadır. Bir levhanın kalınlığı genellikle 0,1-1 mm (0,004-0,04 inç) aralığındadır. Levhanın yapımında sürekli (uzun) fiberler kullanıldığında, bunlar tek yönlü (yani, tüm fiberler tek yönde, Bkz. Şekil 3.1a), çift yönlü (yani, fiberler iki yönde, genellikle birbirine normal, Şekil 3.1b) veya çok yönlü (yani, fiberler ikiden fazla yönde, Bkz. Şekil 3.1c) olarak düzenlenmektedir. Fiberlerin iki veya çok yönlü oryantasyonu dokuma veya tekstil endüstrisinde kullanılan diğer işlemlerle elde edilmektedir. Tek yönlü fiberler içeren bir levha için, kompozit malzeme fiberlerin uzunlaması yönünde en yüksek mukavemet ve modüle sahiptir. Bununla birlikte, enine yönde, mukavemeti ve modülü çok düşüktür. Çift yönlü fiber içeren bir levha için, mukavemet ve modül, uzunlamasına ve enine yönlerde farklı miktarlarda fiber kullanılarak değiştirilebilmektedir. Dengeli bir levha için bu özellikler her iki yönde de aynı olmaktadır. Bir matris içinde süreksiz (kısa) fiberler kullanılarak da bir levha inşa edilebilmektedir. Süreksiz fiberler tek yönlü (Bkz. Şekil 3.3d) ya da rastgele (Bkz. Şekil 3.3e) olarak düzenlenebilmektedir. Süreksiz fiber takviyeli kompozitler, sürekli fiber kompozitlere göre daha düşük mukavemet ve modüle sahiptir. Bununla birlikte, fiberlerin rastgele yönlendirilmesiyle (Bkz. Şekil 3.3e), levhanın düzlemindeki tüm yönlerde eşit mekanik ve fiziksel özellikler elde etmek mümkün olmaktadır. Fiber takviyeli bir kompozit yapıda belirli bir yükü desteklemek veya belirli bir sapmayı korumak için gereken kalınlık, birkaç levhanın belirli bir sırayla istiflenmesi ve ardından bir tabakalı yapı oluşturmak üzere birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bir tabakalı içindeki çeşitli levhalar tek bir yönde veya farklı yönlerde fiberler içerebilmektedir. Farklı türdeki fiberleri birleştirerek bir hibrit tabakalı yapı oluşturmak da mümkün olmaktadır [40].



Şekil 3.3 Fiber takviyeli kompozitlerde temel bileşenler ve sınıflandırılması [40]

3.1.1.1 Cam fiberler

Cam fiberler, polimerik matrisli kompozitler için tüm takviye fiberler arasında en yaygın olarak kullanılmaktadır.

Cam fiberler yüksek mukavemet, esneklik, sertlik ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılık gibi mükemmel özelliklere sahip olan fiberlerdir. Fital, kıyılmış iplik, iplik, kumaş ve mat şeklinde olabilmektedir [41] . Dezavantajları ise nispeten düşük gerilme modülü ve yüksek yoğunluk (ticari fiberler arasında), kullanım sırasında aşınmaya karşı hassasiyet (gerilme mukavemetini sıklıkla azaltır), nispeten düşük yorulma direnci ve yüksek sertliktir (kalıplama kalıplarında ve kesme aletlerinde aşırı aşınmaya neden olur) [40].

Günümüzde ise elektronik, havacılık ve otomobil uygulamaları vb. alanlarda kullanılmaktadır [41]. Cam fiberlerinin birçok tipi vardır. Cam fiber tiplerine özel spesifik özellikler söz konusudur. A-cam fiber yüksek dayanıklılık, güç ve elektriksel dirence, C-cam yüksek korozyon direnci, D-cam fiber düşük dielektrik sabitine, E-cam daha yüksek mukavemet ve elektriksel direncine, AR-cam fiber alkali direncine, R-cam yüksek mukavemet ve asit korozyon direncine, S-cam yüksek çekme mukavemetine, S₂-cam yüksek mukavemet, modül ve kararlılığa sahiptir [42]. Tablo 3.1’de cam fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.1 Cam fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [42]

Fiber	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Elastite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Termal Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁷ /°C)	Poison oranı
E-cam	2,58	3,445	72,3	4,8	54	0,2
C-cam	2,52	3,310	68,9	4,8	63	–
S ₂ -cam	2,46	4,890	86,9	5,7	16	0,22
A-cam	2,44	3,310	68,9	4,8	73	–
D-cam	2,11–2,14	2,415	51,7	4,6	25	–
R-cam	2,54	4,135	85,5	4,8	33	–
EGR-cam	2,72	3,445	80,3	4,8	59	–
AR cam	2,70	3,241	73,1	4,4	65	–

3.1.1.2 Aramid fiberler

Aramid fiber, gelişmiş kompozitlerde takviye olarak kullanılan, oldukça yüksek çekme modülüne ve mukavemete sahip ilk organik fiberdir. Eşit ağırlık bazında çelik ve cam fiberden çok daha iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Aramid fiberler doğal olarak ısıya ve aleve dayanıklıdır ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda da korumaktadırlar. "Aramid" terimi, ABD Federal Ticaret Komisyonu tarafından tanımlanmıştır. Bu bağların para veya meta olarak yapılandırılması genellikle polimeri

sınıflandırmak için kullanılmaktadır. Bu sınıfta geliştirilen ilk fiber 1960'larda ortaya çıkan DuPont'un Nomex'idir. Bu iplik sadece orta mukavemete sahip olmakla birlikte yanmaz özelliğine sahip ve yanmaz giysi, elektrik yalıtımı vb. üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte birkaç yıl sonra DuPont tarafından Kevlar denilen aramid esaslı fiber üretilmiştir. Bu fiberler iyi termal kararlılığın yanı sıra olağanüstü mekanik özelliklere de sahiptir. Aramid fiberlerin özellikleri, onları balistik koruma ve güçlendirilmiş fiber optik kablolardan inşaat mühendisliği ürünlerine ve otomotivdeki uygulamalara kadar birçok teknik uygulama için uygun hale getirmektedir [43]. Teijin tarafından Twaron, Technora, Teijinconex fiberleri geliştirilmiştir. Tablo 3.2'de aramid fiberlerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.2 Aramid fiberlerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [39, 40, 41]

Fiber	Polimer	Fiber Tipi	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavameti (GPa)	Kopma Uzaması (%)	Elastite Modülü (GPa)
Kevlar	PPTA	K-29	1,44	2,9	3,6	71
		K-49	1,44	3	2,4	112
		K-68	1,44	3	3,3	99
		K-119	1,44	3,1	4,4	55
		K-129	1,44	3,32	3,6	75
		K-149	1,47	2,4	1,5	160
Twaron	ODA/PPTA	Std	1,44	2,9	3,6	70
		HM	1,45	2,9	2,5	110
Teijinconex	MDPI	HM	1,45	2,9	2,5	110
		Std	1,39	3,4	4,6	72
Nomex	MDPI	HT	1,38	0,73-0,86	20-30	11,6-12,1
		430	1,38	0,59	31	11,5
Kermel	PAIs	Std	1,34	0,482	16	4,2

Aramid fiber kumaşlar, savunma, güvenlik, havacılık, uzay ve spor endüstrilerinde kullanılmaktadır. Kevlar fiberleri genellikle hafiflik, yüksek mukavemet ve sertlik, hasar direnci ve yorulmaya karşı direncin son derece önemli olduğu yüksek performanslı kompozit uygulamalarında kullanılmaktadır. Aramid fiberler genellikle yüksek mukavemet ve düşük ağırlık ile birlikte yüksek darbe direnci gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Aramid malzemeleri kurşun geçirmez yelekler, soğutma araçları, gemi gövdelerinde ve son zamanlarda inşaat yapıların yapısal olarak güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Genel olarak, aramid fiberler Meta-aramid ve Para-aramid olmak üzere iki kategoride gruplandırılmaktadır. Meta ve para terimleri

aramid fiber yapısındaki kimyasal bağların göreceli konumunu ifade etmektedir. Para-aramid fiberlerin kimyasal bağları, fiberlerin uzun yönünde daha fazla hizalanmaktadır. Meta-aramid fiberler ise nispeten daha azdır ve/veya hizalanmamıştır ve bu nedenle para-aramid bağların aksine daha yüksek gerilme mukavemeti oluşmamaktadır. Meta-aramid fiberlerden yapılan fiberler genellikle oldukça iyi termal, kimyasal ve radyasyon direnci sunmaktadır. Genellikle itfaiyeciler ve yarış arabası sürücülerini için dış giyim gibi yangın geciktirici tekstillerin imalatında kullanılmaktadır. Nomex ve teijiconex, meta-aramidlerin iyi bilinen örnekleridir. Para-aramidlerden yapılan fiberler daha yüksek mukavemet sunar. Bunlar daha çok mühendislik yapıları, yalıtımlı paneller ve diğer yüksek çekme mukavemeti uygulamaları için fiber takviye plastiklerinde kullanılmaktadır. Kevlar ve Technora ticari açıdan önemli para-aramid fiberlerdir [46].

3.1.1.3 Karbon fiberler

Karbon fiber takviyeli polimerler veya plastikler (CFRP) havacılık, askeri, araç üretimi, ulaşım, mimari, spor endüstrileri ve tıp gibi endüstrilerdeki geniş uygulama yelpazeleri nedeniyle popülerlik kazanmaktadır [47]. Karbon fiberler, en az ağırlıkça %90 ve en fazla ağırlıkça %100 karbon içeren fiberleri ifade eder. Poliakrilonitril (PAN), selüloz, zift ve polivinilklorür gibi polimerik öncü malzemelerden üretilebilirler. Bu öncül maddeler, ısıtma ve gerdirme gibi bir dizi işleminden geçirilerek karbon fiberlere dönüştürülmektedirler [48]. Tablo 3.3’de karbon fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.3 Karbon fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [49]

Karbon Fiberler		Yoğunluk (g/m ³)	Çekme Mukavemeti (GPa)	Elastite Modülü (GPa)	Kopma Uzunluğu (%)
Standart	XAS, 3k	1,80	3,27	235	1,44
Yüksek Mukavemet	T300, 3k	1,74	3,04	226	1,3
	M40	1,81	2,45	392	0,6
	P555	2,02	2,1	380	0,5
Yüksek Modül	M50	1,91	2,45	490	0,5
	Gy 70	1,96	1,86	517	0,38
	P 75	2,0	20,7	517	0,4

Karbon fiberler, birbirine kaynaşmış uzun karbon atomu zincirlerinden oluşmaktadır. Karbon fiberin çapı yaklaşık 5 ila 10 mikrometredir ve bu da bir insan saç telinin çapından daha küçüktür. Karbon fiberler, cam fiberler ve plastik fiberler gibi diğer

fiber türlerine kıyasla yüksek fiyatları nedeniyle genellikle birinci sınıf ürünlerde kullanılmaktadır. Karbon fiberler süper sert ve yüksek mukavemetlidirler, ancak son derece hafiftirler. Bu nedenle, yapı malzemesi olarak, ulaşım ve yüksek teknoloji endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Dokumalar, örgüler, "ham" yapı taşları ve iplikler olmak üzere çeşitli karbon fiber yapıları veya şekilleri vardır. Karbon fiberler genellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle kompozit malzemeleri güçlendirmek için kullanılmaktadırlar. Karşılaştırıldığında, özellikleri çeliğe oldukça benzer ve ağırlıkları plastiğe yakın olmaktadır [50].

Günümüzde karbon fiber kompozit ürünler spor ekipmanları, deniz ürünleri, inşaat, uçak ve otomotiv endüstrisinde rutin olarak kullanılmaktadır. Dünya çapında karbon fiber üretimi hızla artmasına rağmen, yılda 30 milyon poundun altında kalmaktadır. Karbon fiber üretiminin ve talebinin maliyeti, yaygın kullanımını sınırlamaktadır. Temel zorluk, öncül maliyet, verim, işleme maliyeti ve benzerlerinin birleşik sonucudur [51].

3.1.1.4 UHMWPE fiberler

Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) fiberi, yüksek gerilme mukavemeti, düşük özgül yoğunluk, yüksek darbe direnci ve mükemmel kimyasal dayanıklılık gibi birçok gelişmiş özelliğe sahiptir. Bununla birlikte, basit metilen yapısı, fiberin epoksi reçinesi ile reaksiyona girmesini zorlaştıran inert bir kimyasal yüzeye yol açmaktadır. Buna ek olarak, yüksek oranda yönlendirilmiş UHMWPE fiberi epoksi reçinesine kolayca nüfuz etmeyen UHMWPE fiberinin geniş uygulamasını sınırlayan zayıf hidrofilikliğe sahiptir. UHMWPE fiberin yapışkan özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde önemle durulan konulardan biri haline gelmektedir [52]. UHMWPE kanalizasyon borularında, cevher taşıma kamyonlarında, kablolu köprü halatlarında, balıkçılık halatlarında, demirleme halatlarında, kesilmez eldivenlerde, kurşun geçirmez zırhlarda, hareketli zırhlı araçlarda ve total diz/kalça/ayak bileği eklem replasmanlarında geniş bir uygulama alanı sağlamaktadır [53]. Tablo 3.4'te Dyneema ve Spectra adıyla ticarileşmiş fiberlerdir. Tabloda 3.4'de Dyneema ve Spectra fiber tiplerinin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.4 Dyneema ve Spectra fiberlerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [54]

Fiber Tipi	Yoğunluk (g/m ³)	Kopma Dayanımı (N/tex)	Modül (N/tex)	Kopma Uzunluğu (%)
Dyneema SK60	0,97	2,8	89	3,5
Dyneema SK65	0,97	3,1	95	3,6
Dyneema SK71	0,97	2,8	122	3,7
Dyneema SK75	0,97	3,5	110	3,8
Dyneema SK76	0,97	3,7	120	3,8
Spectra 900	0,97	2,6	75	3,6
Spectra 1000	0,97	3,2	110	3,3
Spectra 2000	0,97	3,4	120	2,9

Tablo incelendiğinde, UHMWPE'nin balistik koruma malzemelerinde kullanımı için düşük yoğunluk değerleri cezbedici özelliğe sahiptir. UHMWPE fiberli kurşun geçirmez kompozitlerin iyi bir darbe önleme ve enerji emme özellikleriyle bilinmekte ve daha yüksek verimlilik, hafiflik ve işlev entegrasyonu yönünden balistik koruyucu ekipmanın geliştirilmesi için destekleyici malzeme olarak çalışmaları yapılmaktadır [55].

3.1.1.5 Doğal fiberler

Çevresel konulara ilişkin artan küresel farkındalık, sürdürülebilir yeşil malzemelerin ve süreçlerin geliştirilmesini gerektirmiştir [56]. Doğal fiberler kolayca erişilebilen bitkiler, hayvanlar ve mineral kaynaklar da dahil olmak üzere doğal olarak oluşan çeşitli malzemelerden elde edilmektedir. Bununla birlikte, bitki fiberleri, düşük işleme maliyetleri ve geniş bulunabilirlikleri nedeniyle doğal fiber takviyeli polimer kompozitlerde kullanılmaktadır [57]. Doğal fiberler, maliyet etkinliği, hafiflik, üstün spesifik modül, kullanılabilirlik ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi olağanüstü özellikleri sayesinde cam ve karbon gibi sentetik fiberlere karşı cazip bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu durum, son birkaç on yılda çeşitli evsel ve endüstriyel uygulamalarda kullanımlarını artırmıştır. Doğal fiber takviyeli polimer kompozitler (NFPC'ler) son zamanlarda otomobil, inşaat ve mobilya endüstrilerinde çok popüler hale gelmiştir. Çeşitli polimerlerde takviye olarak yaygın şekilde kullanılan doğal fiberlerden bazıları; Jüt, Kenevir, Muz, Sisal, Kenaf, Rami vb.'dir [56].

Bu alandaki araştırmacılar, sürdürülebilirlik ilkelerini korurken ürün kalitesini artırabilen malzemeler geliştirmek gibi önemli bir zorlukla karşılaşmaktadır.

Son zamanlarda araştırmacıların odak noktası, askeri personelin ve terör saldırılarına karşı savunmasız sivillerin güvenliği için uygun koruyucu giysi olarak bu malzemeleri kolayca temin edilebilir hale getirmek için hazır bulunan, uygun fiyatlı balistik koruma kompozit malzemelerinin işlenmesi ve karakterizasyonu üzerine yoğunlaşmıştır. Bu nedenle sentetik fiberlere olan bağımlılığı azaltmak için doğal bazlı malzemeler önemli olmaya başlamıştır. Çok katmanlı zırh sistemlerinde, ilk vurulan yüz seramikten yapılır, bunu alüminyum levha tarafından desteklenen bir ara katman olan FRPC izler. Ara katman, matris olarak termosetler veya termoplastikler ile doğal fiber takviyeli kompozitlerden yapılır. Bu tür uygulamalarda kullanılan doğal fiberler ve özellikleri Tablo 3.5’te listelenmiştir [57].

Tablo 3.5 Doğal fiberlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [57]

Fiber	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavameti (MPa)	Elastite Modülü (GPa)	Kopma Uzaması (%)
Ramie fiber	1,5	400–938	61,4–128	3,6–3,8
Fique fiber	1,47	132–262	3,9–7,9	4,8–10,6
Koko fiber	1,2	593	4–6	30
Sisal fiber	1,5	511–635	9,4–22	2–2,5
Jüt fiber	1,3	393–773	26,5	1,5–1,8
Bagas fiber	1,25	290	17	–
Mallow fiber	1,33	342–548	7–15	1,39
Bambu fiber	1,3	540–630	11–17	1,4
Guaruman fiber	0,57	614	21	–
Curaua fiber	1,4	500–1150	11,8	3,7–4,3

3.1.2 Matris malzemesine göre sınıflandırma

Matris malzemelerini sınıflandırdığımızda, metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve polimer matrisli kompozitler olmak üzere üç ayrı sınıfa ayrılırlar.

Metalik ve seramik matrisli kompozitlerin üzerinde yapılan çalışmalar, polimer matrisli kompozitlerden çok daha yenidir. Matrisin rolü, takviye edilen malzemeleri yerinde tutmak ve onları desteklemektir. Genel olarak, takviyeler mekanik ve fiziksel özellikleri veya matris malzemesinden geliştirilmiş diğer özel özellikleri etkiler. Belirli gereksinimleri karşılamak üzere malzeme özelliklerini değiştirmek için birçok olası takviye ve matris birleştirilerek çok çeşitli özellikler elde edilebilir. Matris, genellikle takviyenin gömülü olduğu ve matris boyunca eşit olarak dağıtılması gereken

monolitik bir malzemedir. Alüminyum, magnezyum, nikel, titanyum, kobalt gibi malzemeler matris malzemesi olarak kullanılabilir. Takviye fazı matris malzemesine iyi bir şekilde bağlanmalıdır [58].

3.1.2.1 Metal matrisli kompozitler (MMK)

Metal Matrisli Kompozitler (MMK) yaygın olarak gelişmiş malzemeler olarak kabul edilmektedir. MMK'ler, iyi aşınma direnci ve olağanüstü termal iletkenliği benimseyen gelişmiş mekanik ve termal özellikler açısından geleneksel malzemelerden daha iyidir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan matris metalleri Alüminyum, Bakır, Demir, Magnezyum, Nikel ve Titanyumdur [58].

Alüminyum alaşımları, iyi şekillendirme ve birleştirme özellikleri, düşük yoğunluk, mükemmel mukavemet ve korozyon direnci nedeniyle yapısal uygulamalarda çoğunlukla otomobil ve havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Seramik parçacıklar, alüminyum ve alaşımlarının mukavemetini artırmak için kompozit bir malzeme yapmak üzere bir araya getirilir. Titanyum bazlı kompozitler, özellikle yüksek sıcaklık yapıları için bir malzeme olarak geniş bir uygulama alanına sahiptir. Titanyum alaşımları, yüksek sıcaklıkta üstün mukavemet ve iyi korozyon direnci nedeniyle tipik olarak havacılık ve uzay bileşenlerinde kullanılır. Ancak bu malzeme pahalıdır. Magnezyum, demir dışı metaller arasında en hafif olanıdır ve genellikle elektronik ekipmanlarda, zincirli testere gövdelerinde ve havacılık ve uzay uygulamaları için dişli kutusu gövdelerinde kullanılır. Bakır kolayca dökülebilir ve şekillendirilebilir. Bakır bazlı kompozit malzemeler mükemmel aşınma direncine sahiptir ve elektronikte elektrik kontakları ve elektronik sistemin elemanları olarak kullanılır. Genellikle mukavemeti ve elastikiyet modülünü artırmak için kullanılan ve yaygın olarak kullanılan takviye partikülleri SiC, Al₂O₃, TiN, TiC, B₄C, TiB₂'dir. Bunlar arasında alüminyum matris içerisine SiC ve Al₂O₃ ilavesi gelişmiş özellikler göstermektedir [58].

Metal zırh sistemleri temel olarak çelik, alüminyum ve titanyum alaşımlarından oluşmaktadır. Düşük maliyeti ve üretim kolaylığı nedeniyle çelik, tanklardaki ağır zırhın ana malzemesidir. 1960'ların başından beri alüminyum alaşımları, araştırmacılar tarafından askeri araçlar için zırh tasarlamak ve üretmek için kullanılan zırh malzemelerindendir. Alüminyumun çelikten daha düşük yoğunluğu nedeniyle, sabit

bir ağırlıkta, alüminyum levhanın kalınlığı çelik levhadan daha fazladır, bu da onu hafif zırh tasarımı ve üretimi için çelikten daha iyi bir malzeme haline getirmiştir [59].

3.1.2.2 Seramik matrisli kompozit malzemeler (SMK)

Geleneksel zırh malzemeleri tipik olarak çelik, alüminyum veya diğer sert metallerden yapılmaktadır. Bu metalik malzemeler uygun kalınlıklarda (veya alansal yoğunluklarda) oldukça iyi balistik koruma sağlamaktadır. Fakat bu fazladan ağırlığa neden olmakta ve sonucunda sadece yakıt verimliliğini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda hareket kabiliyetini de azaltmaktadır. Hızlı konuşlanma, gelişmiş yakıt tasarrufu ve güvenilir balistik (ve patlama) korumanın gelecekteki savaşılarâ hâkim olmanın anahtarları olduğunun farkına varılmasıyla, seramik ve polimerler gibi daha hafif malzemeleri içeren yeni ve yenilikçi yaklaşımlar kesinlikle gerekli hale gelmiştir. Ayrıca birden fazla darbeye dayanabilen seramik kompozit zırh ihtiyacı da ortaya çıkmıştır. Alümina gibi yapısal seramikler 1960'larda ABD'de zırh uygulamaları için geliştirilmiştir. Birincil kullanım alanı kurşun geçirmez yelekler ve helikopter koltukları olmuştur. Amaç, küçük, zırh delici mermileri metal koruma kullanan zırh sistemlerinden daha düşük bir ağırlıkta (alansal yoğunluk) durmasını sağlamaktır. Yüksek alümina ve alümina-zirkonya seramikler askeri ve taktik polis personelinin balistik koruması için başarıyla kullanılırken, uçakların kritik parçalarını korumak için de kullanılmıştır. Metaller ve seramikler, mermilerin kinetik enerjisini emen mekanizmalar açısından farklılık göstermektedir. Sünek metaller enerjiyi öncelikle plastik deformasyon yoluyla emmektedir. Seramikler enerjiyi, merminin deformasyonunu ve seramikte küçük çatlakların başlamasını içeren kırılma mekanizmaları yoluyla dağıtmakta, bu da çatlağın yayılmasına ve seramiğın tahrip olmasına yol açmaktadır [60].

Seramik matrisli kompozitler, bir seramik matris içinde fiberler, ipliksiler, karbon nanotüpler (CNT'ler), grafen, partiküller ve ikinci polimerler veya metal faz gibi bir veya daha fazla takviyeden oluşmakla birlikte, bu tür kompozitler genel olarak üstün mukavemet ve aşınma direnci, iyi kırılma tokluğu, yüksek sıcaklık kararlılığı ve mükemmel termal şok direncinin yanı sıra işlevsellik sunmaktadır. SMK'lerin bu olağanüstü mekanik ve fiziksel özellikleri, bu malzeme sınıfına havacılık ve savunma otomotiv, enerji ve güç, elektronik ve elektrik ve kimya ve biyomedikal mühendisliği endüstrilerindeki uygulamalar için büyük ihtiyaç duyulmasını sağlamaktadır [61].

3.1.2.3 Polimer matrisli kompozit malzemeler (PMK)

Bina, havacılık, otomotiv veya tıbbi uygulamalar söz konusu olduğunda, polimerler metal ve seramiklerin yerini almıştır. PMK'lerin popülerliği, ucuz maliyetine ve üretim kolaylığına bağlanmaktadır. Polimer matrisli bir kompozitte takviye, seramik matrisli bir kompozitten farklı olarak, yalnızca kırılma tokluğunu iyileştirmek yerine matrise güç ve sertlik eklemek için kullanılmaktadır. PMK'ler en yaygın kullanılan, en hızlı genişleyen ve en büyük kompozit malzeme sınıfıdır. Basitçe tanımlamak gerekirse, bir polimer matrisli kompozit malzeme bir polimer matrise sahiptir ve ek bileşenlerle güçlendirilmiştir. Polimer bazlı kompozit malzemelerde matris olarak termosetler veya termoplastikler kullanılmaktadır. PMK'ler normalde inşaat, ulaşım, havacılık, spor, sağlık ve diğer sektörlerde kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, ortaya çıkan en eski ve en hızlı gelişen malzeme biçimidir. Gelişmiş kompozit malzeme üstün özelliklere sahip olup, uçaklar, roketler ve uzay araçları dahil olmak üzere havacılık araçları için kullanılmaktadır [62].

Termoplastikler

Termoplastikler, kimyasal olarak bağımsız makromoleküller ile en basit moleküler yapıya sahiptir. Isıtılarak yumuşatılır veya eritilir, ardından şekillendirilir, biçimlendirilir, kaynaklanır ve soğutulduklarında katılaşır. Çoklu ısıtma ve soğutma döngüleriyle ciddi hasar vermeden tekrarlanabilir, bu da yeniden işleme ve geri dönüşüme izin vermektedir. Termoplastik polimer esaslı kompozitler kısa, uzun veya sürekli fiberler kullanılarak elde edilmektedir. Termoplastikler işlenmeden önce doğru şekilde kurutulursa gaz veya su buharı salmazlar. Sıcaklığın artmasıyla modül düşmektedir. Çeşitli alanlarda kullanılan termoplastiklere Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Klorür (PVC), Polistiren (PS), kopolimerler, Poliamid (PA), Polikarbonat (PC), Polimetilmetakrilat (PMMA), Polietereter Keton (PEEK), Politetrafloroetilen (PTFE) örnekleri verilebilir [63].

Termoplastik elastomerler

Termoplastik elastomerler (TPE'ler) termoplastik ve kauçuk kopolimerleri veya bileşikleridir. Bu yapı termoplastik tekniklere uygun olarak işlenmesine olanak sağlamaktadır. Kauçuk, elastikiyet sağlamaktadır. TPE'ler toplam plastik tüketiminin yaklaşık %1'ini oluşturmaktadır. Elastomerler, sınırlı bir sıcaklık aralığında esneklik ve kütleme olmadan ve genellikle karıştırma adımı olmadan termoplastik işleme kolaylığı sağlamaktadır. Termoplastiklerde olduğu gibi geri dönüşüm kolaylığı

sağlamaktadır. Öte yandan, termoplastik olmaları nedeniyle sıcaklık arttıkça mekanik özellikleri azalmaktadır. Yüksek mekanik özelliklere sahip elastomer Termoplastik poliüretan (TPU) olarak örnek verilebilir. Yüksek performans sağlayan ancak oldukça yüksek maliyetli olan elastomerlere COPE, Polyether Block Amide (PEBA), TPE/ Si-V örnekleri verilebilir. Daha iyi esneklik ve daha iyi termal dirence sahip elastomere Polipropilen (PP/EPDM-V) içinde dağılmış vulkanize EPDM örnek verilebilir [63].

Termosetler

Sertleşmeden önce termosetler, termoplastikler gibi, bağımsız makromoleküllerdir. Ancak son hallerinde, sertleştikten sonra (püskürtmeli kalıplama veya filament sarma) veya işleme sırasında (örneğin sıkıştırma veya enjeksiyon kalıplama) üretilen kimyasal çapraz bağlama ile elde edilen 3 boyutlu bir yapıya sahiptirler. Termosetler sıvı hale geçmeden ısı ile bozulmaktadır. Sıcaklık arttığında, 3D yapı nedeniyle modül tutma daha iyidir. Termosetlerde kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi için genellikle ısıtma ve ek bir maliyet gerekmektedir. Termoset atıkları, sertleşme reaksiyonunun geri döndürülememesi nedeniyle işlenmemiş madde olarak yeniden kullanılamazlar. En iyi ihtimalle öğütüldükten sonra dolgu maddesi olarak kullanılabilirler. Termosetlere fenolik reçineler (PF), melaminler (MF) ve doymamış polyesterler (UP'ler) ve poliüretanlar (PUR), epoksi (EP) örnek verilebilir [63]. Tablo 3.6'da bazı polimerlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.6 Bazı polimerlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [64]

Polimerler	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Young Modülü (GPa)	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)	Darbe Dayanımı
Epoksi	-	55-130	2,7-4,1	110-150	3-4	-
Fenolik	-	50-60	4-7	80-135	2-4	-
Poliesterler	-	34-105	2,1-3,5	70-110	2-4	-
Vinilesterler	-	73-81	3-3,5	130-140	3	-
Polilaktit	1,24	56,3	3,6	-	-	-
Polyester	1,2	61	4	-	-	-
Polivinil klorür (PVC)	1,35	48	3,300	-	-	0,32 J/cm
Polistiren	-	46	2,9	-	-	0,17 J/cm
Polipropilen (PP)	0,899 - 0,920	26 - 41,4	0,95 -1,776	55,2	0,83- 1,73	21,4 -267 J/m

Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE)	0,910 - 0,925	4-78,6	0,055 -0,38	-	-	>854 J/m
Yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)	0,941-1	14,5- 38	0,413-1,490	-	0,41-1,07	26,7 J/m

3.2 Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin birçok üretim metodu bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin geometrik şekillerine, takviye matris malzemelerin tipine göre, fiziksel ve mekanik özelliklerin talep edilen değerlerine bağlı olarak değişebilmektedir. Çeşitli kompozit malzeme üretim metotları vardır. Bunlardan bazıları;

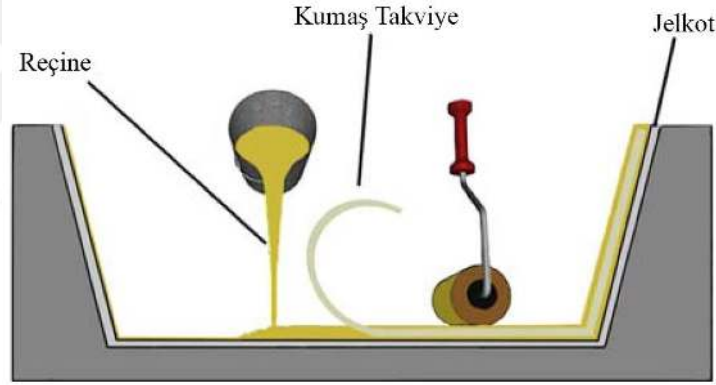
- Elle yatırma metodu
- Püskürtme metodu
- Vakum torbalama metodu
- Fiber sarma metodu
- Reçine transfer metodu
- Reçine infüzyon metodu
- Pultrüzyon metodu
- Basınçlı kalıplama metodu
- Enjeksiyon kalıplama metodu olarak bilinmektedirler.

Bu çalışmada elle yatırma yöntemi ile üretim yapıldığı için, aşağıda sadece elle yatırma yöntemi verilmiştir.

3.2.1 Elle yatırma metodu

Islak yatırma yöntemi olarak da bilinen elle yatırma yöntemi, endüstride kullanılan geleneksel yöntemlerden biridir. Her bir katmanın yalnızca elle işlendiği ve istenen kalınlığa kadar birçok katman istiflendiği çok basit bir işlemdir. Bu yöntem güvenilir olmasına rağmen, çok fazla emek gerektirir ve prosedür gelişmiş üretim yöntemlerinden daha fazla zaman gerektirmektedir. Kalitenin sağlanması çalışanın becerisine bağlıdır. Her türlü malzeme bu yöntem için uygundur, örneğin karbon veya cam fiberi ve her türlü formda (sürekli fiber, kesik fiber, dokuma, vb.) [65].

Öncelikle, polimer malzemelerin yüzey ile birbirine yapışmasını engellemek için kalıp yüzeyi ayırıcı anti-yapışkan madde ile işlenmektedir. Akabinde ürünün pürüzsüz bir yüzey elde etmek için kalıp levhasının altına ve üstüne ince bir plastik tabaka uygulanmaktadır. Kumaş takviye elemanları gerekli ölçülerde kesilmekte ve kalıbın yüzeyine yerleştirilmektedir. Böylece, daha önce de belirtildiği gibi, reçine diğer bileşenlerle karıştırılmakta ve eşit bir şekilde yaymak için bir yardımcı fırça kullanılarak kalıpta zaten konumlandırılmış olan takviye yüzeyine emdirilmektedir. Sonra diğer kumaşlar önceki polimer tabakasının üzerine yerleştirilmekte ve sıkışmış hava kabarcıklarını ve fazla polimeri de çıkarmak için bir rulo kullanılarak basınç uygulanmaktadır. Daha sonra kalıp kapatılarak ve tek bir kumaş elde etmek için basınç serbest bırakılmaktadır. Oda sıcaklığında kürlendikten sonra kalıp açılmakta ve dokuma kompozit kalıp yüzeyinden çıkarılmaktadır [66]. Elle yatırma metodunun şeması Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Elle yatırma metodu [66]

4. NANOKOMPOZİT MALZEMELER

4.1 Nanomalzemeler

Nanomalzemeler, birçok uygulama için yüksek talep gören oldukça ilgi çekici bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Tanecik boyutları 1 ila 100 nm aralığında olan malzemeler nanomalzeme olarak tanımlanmaktadır. 1914 yılında nanometre terimi ilk defa Richard Adolf Zsigmondy tarafından kullanılmıştır. Amerikalı fizikçi ve Nobel Ödülü sahibi Richard Feynman, 1959 yılında Amerikan Fizik Derneği'nin yıllık toplantısında yaptığı konuşmada nano-teknoloji kavramını ortaya atmıştır. Bu konuşma, nanoteknoloji hakkındaki ilk akademik konuşma olarak kabul edilmektedir [67]. Nanomalzemeler ulaşım, tarım, savunma, balistik koruma, tıp alanında vb. birçok alanda kullanılmaktadır.

4.2 Nanokompozitlerin sınıflandırılması

Nanokompozitler (NK), fazlardan birinde nanometre ölçeğinde katkı maddeleri bulunan çok fazlı malzemelerdir. Her bileşenin birleşmesi sonucunda beklenmedik özellikler sergilemeleri öngörülmektedir.

Matrislerine göre üç çeşit nanokompozit vardır: seramik matrisli nanokompozit SMNK, polimer matrisli nanokompozitler PMNK ve metal matrisli nanokompozitler MMNK. NK, saf veya geleneksel kompozit malzemelere kıyasla, mükemmel termal, mekanik, yanma geciktirici ve solvent direnci özellikleri nedeniyle son yıllarda ilgi görmüştür. Partikül boyutu ve dağılımı, yüzey özellikleri, geometrik şekil, dağılma durumu gibi faktörlerin kompozitin özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu iyi bilinmektedir. Nanopartiküllerin ticari olarak mevcut olması nedeniyle, polimer nanokompozitler daha popüler hale gelmektedir. Bu kompozitlerde, modül ve mukavemet gibi mekanik özellikler, su, gaz ve hidrokarbon geçirgenliği, boyutsal ve termal kararlılık, kimyasal direnç, yanma geciktirici özelliği ve optik özellikler, dielektrik, manyetik, elektriksel özellikler önemli ölçüde iyileştirilmiştir [68].

4.2.1 Metal nanokompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK'ler), diğer kompozitler gibi, ayrı fazların hiçbirinin sağlayamayacağı özellikleri sağlayacak şekilde dağılmış, fiziksel ve kimyasal olarak farklı en az iki fazdan oluşmaktadır. Genel olarak, metalik bir matris içinde yayılmış fiberli veya partiküllü bir faz olarak iki faz bulunmaktadır. Enerji iletim hatlarında sürekli bir Al₂O₃ fiber ile güçlendirilmiş Al matrisinden yapılan bir kompozit, kesici

takımlar ve petrol sondaj uçları kobalt (Co) partikül ve tungsten karbürden (WC) oluşmakta ve otomotiv, termal yönetim ve havacılık uygulamalarında kullanılan Al matrisinin SiC partikülü ile güçlendirilmesiyle yapılan bir kompozit yapılar gösterilen örneklerden bir kaçıdır. Bu nanokompozit MMNK, nano boyutlu katkı malzemesi ile sünek bir alaşım veya metal matristen oluşmaktadır. Bu malzemeler tokluk ve süneklik gibi seramik ve metal özelliklerinin yanı sıra yüksek modül ve mukavemete sahiptir. Sonuç olarak, bu nanokompozitler yüksek kullanım sıcaklıklarına ve kayma/basma mukavemetlerine sahip malzemelerin oluşturulması için son derece uygundur. Otomotiv ve havacılık endüstrilerinin yanı sıra yapısal malzeme üretimi de dahil olmak üzere çok sayıda disiplinde kullanım için önemli bir potansiyel sunmaktadırlar [68].

4.2.2 Polimer nanokompozitler

PMNK'ler, MMNK'ler ve SMNK'lere kıyasla en çok çalışılan malzemelerdir çünkü polimerler ucuzdur, işlenmesi ve işlevselleştirilmesi kolaydır ve yaygın uygulamaları vardır ancak daha düşük mekanik, termal ve elektriksel özelliklere sahiptirler. Nanokompozitlerin sentezlenmesinde yaygın olarak kullanılan polimerler elastomerler, termoplastikler, epoksi, kopolimerler ve hidrojenlerdir [69]. Polimer nanokompozitler, performans özelliklerini iyileştirmek için organik polimer matris içinde dağılmış inorganik nanopartiküller içeren yeni bir kompozit malzeme sınıfıdır. Katkı olarak kullanılan nano maddelerinin polimer matrisine eklenmesi, her iki malzemenin avantajlarını birleştirmektedir. Polimer nanokompozitler, elde edilen polimer nanokompozitlerin morfolojisine, nanomalzemelerin boyutuna, termal tepkisine ve polimer sınıfına göre sınıflandırılmaktadırlar. Polimer nanokompozitler manyetik verimlilik, elektriksel özellikler ve bariyer direnci gibi mükemmel özellikler sergilemektedirler. Polimer nanokompozitlerin önemli avantajları, artan sertlik, yanıcılığa karşı artan direnç, artan termal ve boyutsal kararlılık, iyi optik özellikler ve gelişmiş bariyer etkisinden kaynaklanmaktadır. Olağanüstü özellikleri ve potansiyel uygulamaları sayesinde polimer nanokompozitler medikal, elektrik, katalitik, sensörler ve çevresel alanlar gibi gelişmekte olan farklı alanlarda kullanılmaktadır [70]. Polimer nanokompozitler, yakıt tüketimi ve zehirli gaz emisyonu krizini çözebildikleri için günümüzde otomobil uygulamalarında çok daha fazla ilgi görmektedir ve bu da bileşenin ağırlığını azaltarak aracın genel ağırlığının

azaltılmasına yol açmaktadırlar. Ayrıca, polimer nanokompozitler sürtünmede azalma ve korozyon direncinde artış gibi avantajlar da sunmaktadır [71].

4.2.3 Seramik nanokompozitler

Hem oksit hem de oksit olmayan seramikler, yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerin bozulması, düşük kırılma tokluğu, yüksek sıcaklık şok direnci vb. gibi bazı özelliklerde yetersiz kalmaktadır. Nano ölçekli katkıların seramik matrise dahil edilmesi, bu eksikliklerin giderilmesinde faydalı olmaktadır. Bu seramik nanokompozitler üstün yüksek sıcaklık mekanik özelliklerine sahiptirler. Nano/nano kompozit, işlenebilirlik, plastisite vb. özelliklerde ek iyileştirme sağlayan nano ölçekte tanelere sahip nano katkılar ve matristen oluşmaktadır. Metal ve polimer nanokompozitlerde olduğu gibi, seramik nanokompozitlerde de nano ölçekli katkıların topaklanabilme problemleri oluşabilmektedir [69]. Seramik nanokompozitler metalik veya metalik olmayan elementlerle birlikte oksitler, karbürler ve nitrürler içermektedir. Geçiş metal oksitlerinin kaplamaları, faz kararlılıkları ve kırılma toklukları nedeniyle birkaç nanometre kalınlıkta bile diğer metalik veya organik oksitlerden daha iyi özellikler ortaya koymaktadır. Seramik nanokompozitler, korozyona karşı direnç, yüksek sıcaklıkta oksidasyon ve yüksek sıcaklıklı ortamlarda metallerden daha iyi aşınma direnci gibi dikkat çekici özellikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamaya uygulanmıştır [72].

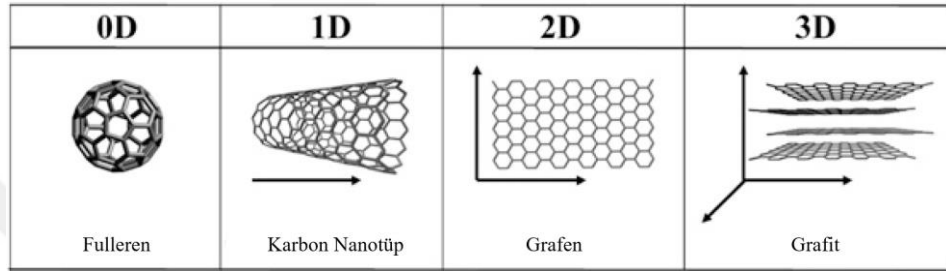
4.3 Nanopartiküller

Nobel ödüllü Richard P. Feynman tarafından 1959 yılında verilen "There's Plenty of Room at the Bottom" konferansında ortaya konulduğundan beri nanoteknoloji alanında devrim niteliğinde çeşitli gelişmeler kaydedilmiştir. Nanoteknoloji, nano ölçek düzeyinde çeşitli türlerde malzemeler üretmiştir. Nanopartiküller (NP'ler), en az 100 nm'den daha küçük bir boyuta sahip olan geniş bir malzeme sınıfını oluşturmaktadır [73].

4.4 Nanopartiküllerin Sınıflandırılması

Nanopartiküller temelde sıfır boyutlu nanoyapılar (0D), tek boyutlu (1D) nanoyapı, iki boyutlu (2D) nanoyapı, üç boyutlu (3D) nanoyapı olmak üzere dört farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. Sıfır boyutlu nanoyapılar, üç boyutun tümü nanometre aralıkta olarak kabul edilir, bunlara nanopartiküller veya iyi derecede ayrılmış nanotozlar örnek verilebilir. Tek boyutlu nanoyapılarda iki boyut nanometre aralığında ve üçüncü boyutun büyük olması, çubuk yapıya örnek olarak nanotüpler, nanoçubuklar

verilmektedir. İki boyutlu nanoyapılarda sadece bir boyut nanometre aralıkta iken diğer iki boyut büyük kalmakla birlikte, bu tür nanoyapılar düzlem benzeri yapılar sergilemektedir. Örnek olarak da nanofilmler, nanokaplamalar, nanokatmanlar vb. verilebilir. Üç boyutlu nanoyapılarda her üç boyut da nanometre boyut aralığının dışında kalarak örnek olarak nanoteller, nanotüpler, nanopartiküllerin farklı dağılımları verilmektedir [74]. Şekil 4.1’de 0D, 1D, 2D ve 3D karbon yapılarına örnek verilmiştir.



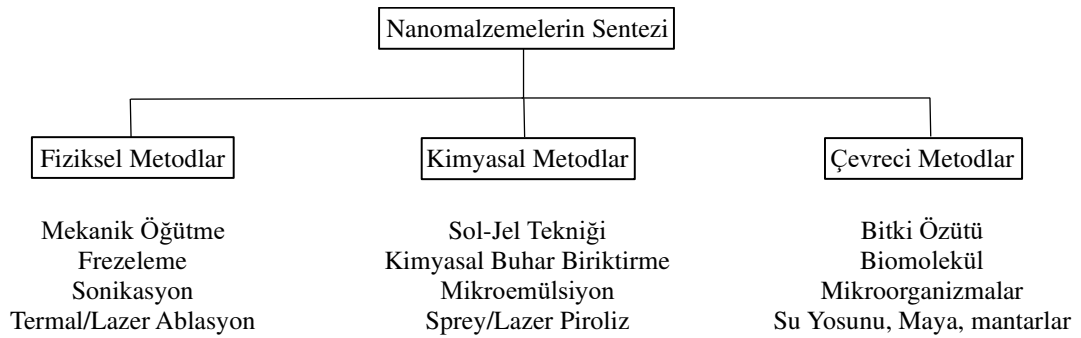
Şekil 4.1 0D, 1D, 2D, 3D karbon nanoyapılara örnek [75]

4.5 Nanomalzemelerin Özellikleri

Nanomalzemelerin fiziksel özellikleri optik, mekanik, hidrofiliklik, hidrofobiklik, süspansiyon, çökelme, termal özellikler, manyetik ve elektriksel özellikler açısından tanımlanmaktadır. Nanopartiküllerin optik özellikleri arasında renk, ışık penetrasyonu, yansıma, absorpsiyon ve ultraviyole (UV) absorpsiyon özellikleri yer almaktadır. Nanopartiküllerin mekanik özellikleri arasında elastisite, çekme mukavemeti, sertlik ve esneklik yer almaktadır. Bu mekanik özellikler, farklı alanlardaki nanomalzemelerde önemli bir rol oynamaktadır. Manyetik ve elektriksel özellikler iletkenlik, yarı iletkenlik ve rezistivite olarak tanımlanmaktadır. Bu özelliklere dayanarak, nanopartiküller modern elektronikte kullanılabilmektedir. Nanomalzemelerin hidrofiliklik, hidrofobiklik, süspansiyon, difüzyon ve termal iletkenlik gibi diğer bazı önemli özelliklere sahip olduğu gösterilmektedir. Nanopartiküllerde kimyasal özellikler önemli faktörlerdir. Nanomalzemelerin kimyasal özellikleri arasında stabilite ve hassasiyet, toksisite, korozyon ve anti-korozyon, oksidasyon, indirgeme, antifungal, antibakteriyel ve dezenfeksiyon yer almaktadır [76].

4.6 Nanomalzemelerin Sentezi

Nanomalzeme üretimi için istenilen özelliklere sahip yeni yapılar tasarlamak için yeni yollar gelişmektedirler. Nanopartiküller, üretilebilen ve canlı hücreler gibi doğal ortamda yer almaktadır. Nanopartiküllerin boyutu, şekli ve morfolojisi, nanopartiküllerin farklı özelliklerini ve işlevlerini göstermektedir. Bu özellikler sentez yöntemleri ile kontrol edilebilmektedir. Nano boyuttaki malzemelerin keşfi ve üretilmesi sonucu olağanüstü özelliklere sahip yeni malzemelerin önünü açmaktadır. Kütlesel malzemenin nano boyuta ölçeklendirilmesi, kütlesel malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirmektedir. Nanopartiküller, yüzey/hacim oranındaki artış nedeniyle kütlesel malzemenin farklı önemli özellikler göstermektedir. Nanomalzemeler genellikle, biri yukarıdan aşağıya yaklaşım, diğeri ise aşağıdan yukarıya yaklaşım olarak iki yöntemle üretilmektedir. Yukarıdan aşağıya yaklaşım, bir üst yapının atomik veya moleküler seviyeye indirgenmesini içeren bir yöntemdir. Bu yöntem eksiltme yöntemidir. Bu yöntem, bir kütlesel malzemenin mekanik veya kimyasal yöntemlerle ufalandırılmasını ve küçük yapılara ayrılmasını içermektedir. Mekanik öğütme, aşındırma, frezeleme yukarıdan aşağıya yaklaşımı içeren bazı tekniklerdir. Aşağıdan yukarıya yaklaşım, atomların veya moleküllerin bir nanoyapı oluşturmak için yapı birimi olarak kullanıldığı eklemeli bir yöntemdir. Aşağıdan yukarıya yaklaşımı içeren tekniklerden bazıları sol-jel tekniği, kimyasal buhar biriktirme, spreyl/lazer piroliz, mikroemülsiyon tekniği ve lazer ablasyonudur. Kimyasal sentez yöntemi aşağıdan yukarıya yaklaşımı içermektedir [77]. Nanomalzemelerin sentezinde kullanılan yöntemlerin şematik diyagramı Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2 Nanomalzeme sentezi yaklaşımlarının şematik diyagramı [77].

Ayrıca nanoteknoloji ve nanobilimin gelişmesine katkı sunan nano ölçekte ölçme ve inceleme yapan mikroskoplar ve yöntemler sektörde önemli bir etki bırakmıştır. Bu yöntemler, taramalı elektron mikroskobu, geçirimli elektron mikroskobu, taramalı sonda mikroskobu, saçılma yöntemleri, taramalı tünel mikroskobu, yakın alan taramalı optik mikroskop, atomik kuvvet mikroskobu gibi yöntemlerdir [78].

4.7 Nanomalzemelerde Katkı Malzemeleri

Nanomalzemelerin mekanik özelliklerine göre kullanım alanları değişmektedir. Kompozit malzemelere katkı olarak kullanımları geniş bir alana yayılmaktadır. Katkı malzemeleri olarak birçok nanopartikül kullanılmaktadır. Balistik performanslarının artırılması için kullanılan bazı nanopartiküller karbon nanotüpler, nanokiller, grafen ve bor karbürdür.

4.7.1 Karbon nanotüp

Karbon nanotüpler inanılmaz derecede hafif ve küçük olmalarına rağmen, çelikten yüz kat daha sağlam olduğu bilinmektedir. Delinmez bir yelekte karbon nanolifler, inanılmaz derecede hafif bir malzeme yapmak için birlikte dokunan karbon nanotüplerden oluşmaktadır. Karbon nanolifler, olağanüstü enerji tutma özelliğine sahiptir [79]. Literatürde yapılan deneyler ve simülasyonlara göre, CNT'lerin karbon fiberlerine göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir [80].

4.7.2 Nanokiller

Nanokil ince tabakalı, kristal bir bileşiktir. Bir nanokilin basit yapısal bileşeni bir tabaka olmakla birlikte, tipik olarak bir kitabın sayfaları gibi birbiri üzerine istiflenmektedir. Nanokil, kullanım kolaylığı, ekolojik kullanılabilirliği ve keşfedilen sağlam kimyası nedeniyle diğer nanopartiküllere göre değer kazanmıştır [81].

4.7.3 Grafen

Deneysel olarak gerçekleştirilen ilk iki boyutlu (2D) malzeme olan grafen, olağanüstü elektronik, termal ve mekanik özellikleri nedeniyle malzeme biliminde büyük ilgi görmüştür. Fabrikasyondaki basitliği ve maliyet etkinliği, 'harika' bir malzeme olarak çekiciliğine daha da katkıda bulunmaktadır. Grafen, köpükler, gerilebilir elektronikler ve kompozitler de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda malzeme uygulamalarında kullanılmıştır. Eşsiz elektronik özelliklerine ek olarak, grafen olağanüstü mekanik özelliklere sahip olmakla birlikte, bu da onu sadece bir atom kalınlığında üstün bir membran haline getirmektedir. Deneysel çalışmalar grafenin çeliğe kıyasla balistik

darbelere karşı üstün dayanıma sahip olduğunu ve taç yapraklarına benzeyen benzersiz kırılma dinamikleri sergilediğini göstermiştir [82].

4.7.4 Bor karbür

Bor karbür, benzersiz özellikleri nedeniyle uzun yıllardır üzerinde çalışılan bir malzemedir. Düşük yoğunluğu ve yüksek sertliği onu birçok uygulama alanında kullanılmaya aday bir malzeme haline getirmektedir. Bu özellikler bor karbürün aşındırıcı toz olarak, kaplama malzemesi olarak ve nükleer reaktörlerde nötron koruyucu malzeme olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor karbürün bir diğer uygulama alanı, malzemenin mukavemetinin yanı sıra malzemenin dinamik mukavemetinin de büyük önem taşıdığı bir zırh malzemesi olarak balistik uygulamalardır [83]. Tablo 4.1’de B_4C ’e ait mekanik özellikler verilmektedir.

Tablo 4.1 B_4C ’e ait mekanik özellikler [36]

Yoğunluk (g/cm^3)	2,52
Basma Dayanımı (Mpa)	3000
Sertlik (Vickers)	5000-6000
Young Modülü (Gpa)	460
Termal İletkenlik (W/m.K)	29
Isıl genleşme katsayısı ($\times 10^{-6}/K$)	5

5. BALİSTİK KAVRAMI

Balistik alanı genel olarak iç balistik, dış balistik ve terminal balistik olmak üzere üç ayrı disipline ayrılmaktadır. Bazı durumlarda dördüncü disiplin olan ara balistik sınıfı da bulunmaktadır. İç balistik, merminin silah namlusundan çıkmadan önceki süreci incelemektedir. Ara balistik sınıfı bazı durumlarda iç balistik ile birlikte incelenmekle birlikte ancak son zamanlarda kendisi ayrı bir sınıf olarak değerlendirilmiştir. Ara balistik, merminin namlunun ağzından çıkarken ki ilk hareketiyle ilgilenmektedir. Dış balistik, merminin namluyu terk etmesinden hedefe çarpmasına kadar geçen süreci kapsamaktadır. Burada ara balistik ile örtüşme görülebilmektedir. Terminal balistik ise mermi hedefe ulaştığında meydana gelen olayların tüm yönlerini kapsamaktadır. Bu, mermi penetrasyon mekaniklerini, zırh arkası etkileri, parça yayılma modellerini ve bunlarla ilişkili ölümcül etkileri, patlama basıncını, ölümcül olmayan etkileri ve canlı dokular üzerindeki etkileri içermektedir. Bu son kısım, az öldürücü silahlara olan büyük ilgi nedeniyle giderek daha önemli hale gelmekte ve hatta kendi alanı olarak yaralanma balistiği adı altında ayrı bir disiplin haline gelmektedir [84].

5.1 Balistik Koruyucu Zırhlar

Balistik koruma, vücudun ve gözlerin çeşitli şekil, boyut ve çarpma hızlarına sahip mermilere karşı korunmasını içermektedir. Bu tür bir koruma genellikle askerler, polisler ve genel kolluk kuvvetleri için gerekli olmaktadır.

Tarihsel olarak, balistik koruma malzemeleri metallerden yapılmakta ve giymek için çok ağır olmaktadır. Ancak tekstil malzemeleri artık metallerle aynı seviyede balistik koruma sağlamakla birlikte nispeten düşük ağırlığa sahip olduğu için bu nedenle giyimde rahatlık sağlamaktadır. Askeri çatışmalar sırasında veya istenmeyen patlamalar sırasında meydana gelen kayıpların çoğu, patlamanın vücuda isabet etmesi sonucu uçuşan maddelerden kaynaklanmaktadır. Askeri çatışmalar sırasında kayıpların sadece %19'unun mermilerden, %59 gibi yüksek bir oranının parçalardan ve yaklaşık %22'sinin de diğer nedenlerden kaynaklandığı bildirilmektedir. Balistik darbeye bağlı kayıpların sayısı kask takılmasıyla %19, zırh giyilmesiyle %40 ve kaskla birlikte zırh giyilmesiyle %65 oranında azaltılabilmektedir. Bir malzemenin balistik koruması, enerjiyi lokal olarak absorbe etme kabiliyetine ve absorbe edilen enerjiyi dağıtma verimliliğine ve hızına bağlıdır [85].

Balistik koruyucu kompozitlerde kullanılan ana fiber türleri Para-Aramid ve UHMWPE fiberleridir. Ancak Cam fiber ve naylon 6,6 fiber de balistik koruma malzemelerinde kullanılmaktadır. Cam fiber kompozitler, birçok EOD (patlayıcı mühimmat imha) kıyafetine dahil edilen ön levhalarda, araç zırhlarında, bazı güvenlik güçlerini koruma uygulamalarında ve banka vezneleri gibi alanlardaki çözümlerde kullanılmaktadır. Fiber takviyesi genellikle düz dokuma bir kumaş şeklindedir. Düz dokuma naylon 6,6 kumaşlar çeşitli hükümetler tarafından ilk kompozit kaskların üretiminde kullanılmıştır. Örneğin 1970'lerden itibaren İngiliz silahlı kuvvetlerine verilenlerde fakat 21. yüzyılda naylon 6,6 balistik özellikleri aşıldığı için balistik koruyucu kompozitlerde nadiren kullanılmaktadır [86].

Balistik dirençli kumaşlarda kullanılan iki tipik aramid DuPont Kevlar ve Teijin Aramid Twaron'dur. DuPont, Kevlar 29 aramidini 1970'lerin başında yelekler ve kasklar için tanıtmıştır. Bu fiberin adı popüler medyada balistik dirençli malzeme ile eş anlamlı hale gelmektedir. Kevlar 129, 1980'lerin sonunda tanıtılmış ve daha fazla esneklik ve konfor için filament başına daha küçük denye olarak sunulmuştur. 9 mm FMJ tabanca mermisi gibi mermileri engellemek için tasarlanmıştır. Hem parça hem de mermi imha uygulamalarında askeri kullanım için en güncel Kevlar fiberleri KM2 ve KM2 Plus' tır. Kevlar markası askeri zırh uygulamalarında saygıdeğer bir rakip olmakla birlikte, ABD ordusunun "dış taktik yelek" vücut zırhında kullanım için tercih edilen tür olarak bilinmektedir. Teijin Aramid (eski adıyla Teijin Twaron) balistik dirençli giysiler için çeşitli Twaron türleri üretmektedir. İlk nesil olan Twaron Standard 1986 yılında piyasaya sürülmüştür. Twaron'un en yeni nesilleri CT mikrofilament aramid fiber ailesidir [87].

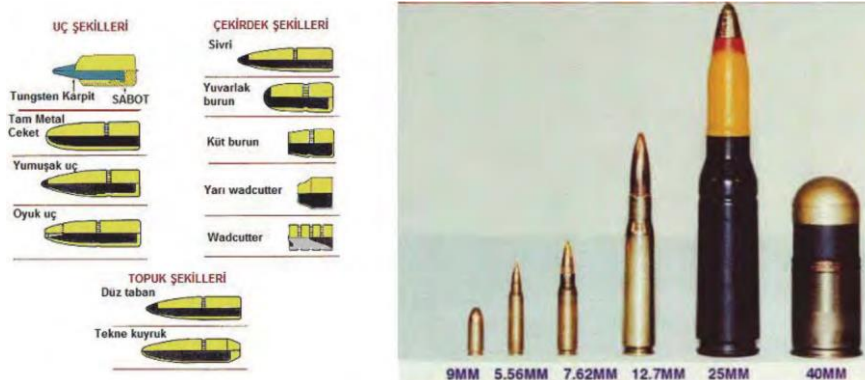
Zırhlarda metal malzemeler üzerine çok uzun süre çalışarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal malzemelerin tokluk, mukavemet ve sertlik gibi mekanik özellikleri balistik koruma açısından önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Fakat metallerin yoğunluklarını dikkate aldığımızda, diğer mühendislik malzemelerine göre daha yüksektir. Bu sebeple zırhta aradığımız hafiflik konusunda dezavantaja sahip olup zırhın kullanımında, ağır bir zırhın varlığı hızlı hareket etmesini engellenmektedir. Araçlarda kullandığında da aracın hareket kabiliyetini ciddi anlamda düşürmektedir. Bu anlamda, zırhların hafif olmasına ihtiyaç vardır [88].

Seramik zırhlar, patlama parçalarının tutulması ve mermi penetrasyonunun önlenmesi için kullanılmaktadırlar. Yüksek sertlik ve basınç dayanımı ile hafiflik avantajını bir araya getiren mermi direnci için geliştirilmiştir. Ordu tarafından kullanılmak üzere daha hafif koruma malzemelerine duyulan ihtiyaç, seramik zırh malzemelerinin kullanımına değer kazandırmıştır. Seramikler ağırlık azaltmada çeliğe ve darbe enerjisi emiliminde tüm metallere göre avantaj sağlamaktadır. Zırh uygulamaları için kullanılan en yaygın seramik malzemeler alümina, bor karbür, silisyum karbür ve titanyum diborüdüdür. Zırh yapılarında seramikler genellikle metal levhalarla desteklenir, aralarında kompozit bir katman bulunmakta veya bulunmamaktadır [89].

5.2 Balistik Test Standartları

Zırhların üretilmesi ve koruyuculuğuna dair onay için belirli test metotlarına ve standartlara ihtiyacı vardır. Bu testler, standartlara göre değişmekte ve standartlar da birçok ülkeye ve ülkedeki kurumlara göre değişmektedir. Standartlar ihtiyaçlara göre hazırlanarak belirli test metotlarını içermektedir. Kişisel zırhlarda balistik tehlikelere karşı koruyuculuk sağlanarak üretilebilmektedir.

Yaygın olarak kullanılan standartlar NIJ (The US National Institute of Justice) ve HOSDB (UK Home Office Scientific Development Branch) tarafından kabul edilen standartlardır. Bunun dışında NATO ve Türk Standartları Enstitüsü (TSE) tarafından da çeşitli askeri standartlar geliştirilmiştir. Tablo 5.1’de balistik koruyucular için kullanılan standartlar verilmiştir [90]. Şekil 5.1’de balistik koruyuculuk için kullanılan standartlarda çeşitli şekillerde mermiler, kalibreler kullanılmaktadır.



Şekil 5.1 Balistik deneylerde kullanılan mermiler a) Mermi tipleri b) Değişik kalibreye sahip mermiler [90]

Tablo 5.1 Balistik koruyucular için kullanılan standartlar [90]

Standart No	Standart Adı
TS 11164	Balistik koruyucu vücut zırhı
TS 13349	Askerî zırhlar - V ₅₀ 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 Personnel Body Armor
NIJ-STD-0101.06	Balistic Resistance of Personnel Body Armor
NIJ-STD-0108.04	Balistic Resistance of Protective Materials
STANAG 2920	Balistic Test Method for Personnel Armor
UK/SC/4697	The Balistic Testing of Fragment Protective Personnel Armors
PPAA STD-1989-05	Personel Protective Armor Association Testing Standards for Balistic Resistance of Personnel Body Armors
UL 752	Balistic Resistance Equipment
MIL-B-44194 A	Body Armor Fragmentation Protective Undergarment C.V. Crewmens
MIL-P-46199	Aluminium Oxide Ceramic (For Use In Armor Composite)
Pr EN ISO 14876-2	Protective Clothing-Body Armor-Part-2: Bullet Resistance Requirements and Methods

5.2.1 NIJ STD-0101.04 balistik standardı

Bu standart kapsamındaki kişisel vücut zırhları balistik performans seviyesine göre yedi tipe ayrılmaktadır. Bir merminin oluşturduğu balistik tehdit, diğer şeylerin yanı sıra, bileşimine, şekline, kalibresine, kütesine, geliş açısına ve çarpma hızına bağlıdır. Belirli bir kalibrede çok çeşitli mermi ve fişeklerin mevcut olması ve elle doldurulan mühimmatın varlığı nedeniyle, standart bir test mermisini yenen zırhlar aynı kalibrede diğer atışları yenmeyebilmektedir. Örneğin, 40 S&W test mermisinin tam nüfuz etmesini önleyen bir zırh, daha yüksek hızlı bir 40 S&W mermisini yenebilmekte veya yenmeyebilmektedir. Genel olarak, belirli bir kurşun mermiyi yenen bir zırh, farklı yapı veya konfigürasyona sahip aynı kalibreli diğer mermiler tarafından tam penetrasyona direnmeyebilmektedir. 2000 yılı itibarıyla, tüm görev vardiyası boyunca tam zamanlı giymeye uygun balistik dirençli vücut zırhları, tabanca tehditlerine karşı artan seviyelerde koruma sağlayan Seviye I, IIA, II ve IIIA sınıflandırmalarında kullanılmaktadır. İlk olarak 1975 yılında NIJ gösteri projesi sırasında piyasaya sürülen Seviye I vücut zırhı, her güvenlik memurunun sahip olması gereken minimum koruma seviyesidir. Düşük hızlı 9 mm ve 40 S&W mühimattan korunmak isteyen güvenlik memurları tipik olarak Seviye IIA vücut zırhı giymektedir. Yüksek hızlı 357 Magnum ve daha yüksek hızlı 9 mm mühimata karşı koruma için güvenlik memurları geleneksel olarak Seviye II vücut zırhını seçmektedir. Seviye IIIA vücut zırhı gizlenebilir vücut zırhlarında mevcut olan en yüksek koruma seviyesini sağlamakta ve

yüksek hızlı 9 mm ve 44 Magnum mühimmatına karşı koruma sağlamaktadır. Seviye IIIA zırh birçok durumda rutin kullanım için uygun olmakla ancak sıcak ve nemli iklimlerde bulunan departmanların memurları için Seviye IIIA zırh kullanımını dikkatle değerlendirmesi gerekebilmektedir. Yüksek güçlü tüfek mermilerine karşı koruma sağlayan Seviye III ve IV zırhlar açıkça sadece tehdidin bu tür bir korumayı gerektirdiği taktik durumlarda kullanılmak üzere tasarlanmaktadır. Balistik panel üzerindeki farklı konumlarda iki veya daha fazla NIJ balistik koruma seviyesi sağlayan bir zırh panelinin sınıflandırması, panel üzerindeki herhangi bir konumda sağlanan minimum balistik korumanın sınıflandırması olmaktadır. Tablo 5.2’de NIJ Standardı-0101.04 zırh tipine göre farklı sınıflandırmalar yapılmıştır [91].

Tablo 5.2 NIJ Standardı-0101.04 sınıflandırması [91]

Zırh Tipi	Test Tipi	Test Mermisi	Mermi Kütlesi	Mermi Hızı ($\pm 9,1$ m/s)	Maks. Arka Yüz Penetrasyon Derinliği
I	1	.22 caliber LR LRN	2.6 g	329 m/s	44 mm
	2	.380 ACP FMJ RN	6.2 g	322 m/s	44mm
IIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 g	341 m/s	44 mm
	2	40 S&W FMJ	11.7 g	322 m/s	44 mm
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 g	367 m/s	44 mm
	2	357 Mag JSP	10.2 g	436 m/s	44 mm
IIIA	1	9 mm FMJ RN	8.2 g	436 m/s	44 mm
	2	44 Mag SJHP	15.6 g	436 m/s	44 mm
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g	847 m/s	44 mm
IV	1	.30 caliber M2 AP	10.8 g	878 m/s	44 mm

Perforasyonsuz testte, mermi enerji kaybı kısmen kumaşa ve kısmen de destek malzemesine aktarılmaktadır. Destek malzemesi tarafından emilen enerji, malzeme üzerinde oluşan deliğin hacmi ile ilişkilidir. Genel olarak, deliğin şekli düzensiz olmakta birlikte bu değeri elde etmek zordur. Penetrasyon geometrisini spline eğri uydurma tekniği ile yeniden oluşturmakla, deliğin hacmini hesaplanması ile kilin enerji emilimi konusunda çalışmalar yapılabilir [92].

$$E_f = E_{pl} - E_c \quad (5.1)$$

Burada, “ E_f ” kumaşa aktarılan enerji; “ E_{pl} ” toplam mermi enerji kaybı; “ E_c ” destek kili değeridir.

5.2.1.2 Balistik limit hızı testi

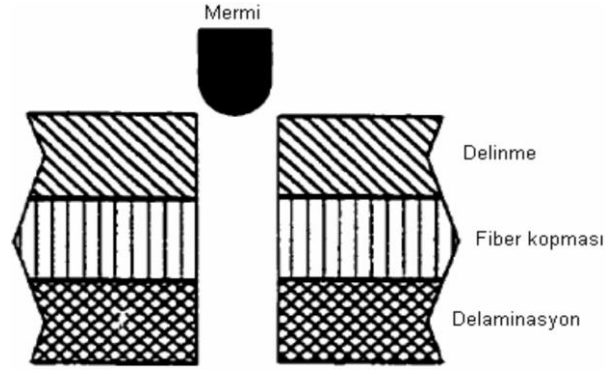
Bir zırh levhasının, balistik sınır değerini bulmak için en önemli değer V_{50} balistik limit hızıdır. V_{50} balistik limit hızı, %50 zırh levhasının delinme veya delinmeme olasılığını kabul edilmektedir. V_{50} hızında zırh levhasının delinme olasılığı %50 olarak kabul edilmektedir. V_{50} delme hızından düşük hızlar malzemede kısmi delinme, yüksek hızlarda ise malzemede delinme meydana getirmektedir. V_{50} hızını elde etmek için levhaya minimum dört mermi atışı yapılmaktadır. Bu atışlarda ikisi levhayı delen, diğer ikisi de levhayı delmeyen hız değerlerini oluşturmalıdır. Ayrıca bu dört hız dağılımında, levhayı en yüksek hızla delen merminin çarpma hızı ile levhayı delmeyen en düşük hızdaki merminin çarpma hızı arasındaki fark 18,29 m/s geçmeme şartı aranmaktadır. Bu sonucu veren dört mermi atışının mermi çarpma hızının aritmetik ortalaması alınmaktadır. Elde edilen değer zırh levhasının V_{50} balistik sınır değerini vermektedir [93].

5.3 Hasar Mekanizmaları

Balistik darbe deneylerinde, tabakalı kompozit malzemelerde genelde görülen hasar mekanizmaları; perforasyon, fiber kırılmaları, matris çatlama ve delaminasyon oluşmasıdır.

Darbenin başlangıç aşamasında tabakanın kalınlığı boyunca dayanımı, kompozite nüfuz eden mermi tarafında yenilmektedir. Kompozit malzeme mermi altında sıkıştırılmakta ve oluşan çukur kısmında kalınlık boyunca meydana gelen kesme gerilmelerinden dolayı deformasyon oluşmaktadır. Kalınlık boyunca meydana gelen sıkıştırma; malzemenin bu kısmında ezilme meydana getirirken, kalınlık boyunca oluşan kesme deformasyonu ise mermi ile birlikte ileri doğru hareket eden kesilmiş kısmın oluşmasına neden olmaktadır. Hareket eden bu kopmuş parça etkisi, balistik hızın oldukça üzerindeki hızlarda meydana gelmektedir. Fiber kırılmaları ise merminin fiberi kopma dayanımını aşana kadar zorlaması sonucunda ortaya çıkmaktadır [94].

Şekil 5.2'deki gibi, merminin numuneye çarpması sırasında meydana gelen hasar mekanizmalarının oluşumunun düzenli bir sıralaması olduğu görülmektedir.



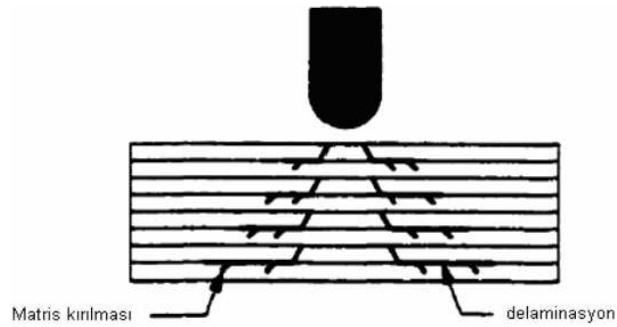
Şekil 5.2 Balistik darbe esnasında oluşan hasar mekanizmaları ve sırası[94]

Şekil 5.3'te, balistik darbe sırasında oluşan hasar mekanizmaları hakkında daha detaylı verilmiştir.



Şekil 5.3 Balistik darbe sırasında oluşan belli başlı hasar türleri [94]

Delaminasyon, tabakalı kompozit malzemeyi meydana getiren her bir katmanın ayrılması olarak tanımlanmaktadır. Ayrılma her bir katman arasında bulunan ve katmanlar arası yüzey adı verilen bölgedeki ince matris malzemesinde ve matris kırılmalarının birbiriyle kesiştiği noktalarda meydana gelmektedir. Şekil 5.4'te darbe sonucunda kompozit malzemede oluşan tipik matris kırılmalarını ve delaminasyon hasarı gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Balistik darbe sırasında oluşan tipik matris kırılmaları ve delaminasyon hasarı [94]

6. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında üretilen kompozit levhalar üzerinde balistik darbe testi yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Çalışmamızdaki amaç perforasyona uğramayan tabaka sayısını belirleyerek, belirli oranlarda bor karbür ekleyerek elde edeceğimiz tabakalı kompozit levhaların balistik direncini araştırmaktır. Bu anlamda referans noktamız katkısız olarak hazırladığımız kompozit levhaların balistik sonuçlarını esas alınarak, tabaka sayısı ile ilgili değişiklikler yapıp, üretim gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bu balistik performansın ve mekanik özelliklerin, bir zırh olarak tercih sebebini oluşturmak, alternatifini geliştirmek üzere bor karbür katkısının etkileri incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan kompozit levhaların üretimi Fibermak Composites firmasında yapılmıştır. Reçine ve cam fiber kumaşlar Fibermak Composites firmasından satın alınmıştır. Para-aramid (%100 Kevlar) kumaş, Kipaş Textile firmasından tedarik edilmiştir. Bor Karbür (B₄C) malzemesi, Boroptik Mühendislik, Ar-Ge, İmalat ve Ticaret A.Ş. firmasından satın alınmıştır.

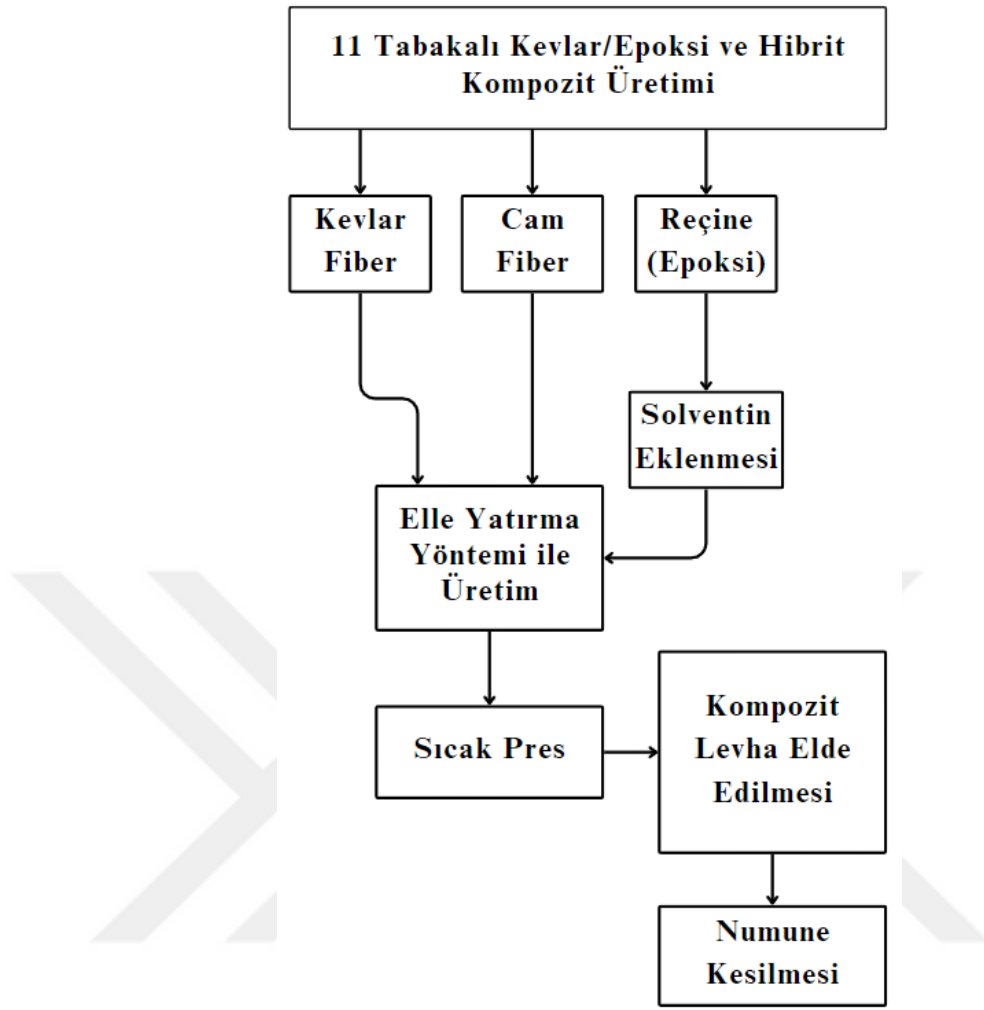
Çalışma 3 aşamada yapılmıştır. Önce 11 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha ve hibrit kompozit levhalar elde edilmiştir. 2. aşamada 20 tabakalı Kevlar/Epoksi elde edilmiştir. 3. aşamada ise 30 tabakalı Kevlar/Epoksi levhalar üretilmiştir.

6.1 11 Tabakalı Kevlar/Epoksi ve Hibrit Kompozit Üretimi

6.1.1 Kullanılan malzemeler

Birinci aşamada, 11 tabakalı katkısız Kevlar/Epoksi kompozit ve kevlar + cam fiber takviyeli kumaş kullanılarak üç farklı hibrit dizilimi gerçekleştirilmiştir. Balistik deneylerde tabaka sayısını optimize edebilmek öncelikle ilk olarak 11 tabakalı Kevlar kumaş ve cam fiber takviyeli kumaş farklı dizilimlerde ve kalınlıklarda kullanılmıştır. Üç farklı kalınlık ve tabaka sayısına bağlı kompozit levhalar üretilmiştir.

Tüm üretimler elle yatırma metodu ile gerçekleştirilmiştir (Bkz. Şekil 6.1). Reçine olarak epoksi (F-1564) ve sertleştirici olarak da F-3487 solvent kullanılmıştır. Kullanılan matris ve sertleştirici malzemelerin özellikleri Tablo 6.1’de görülmektedir.

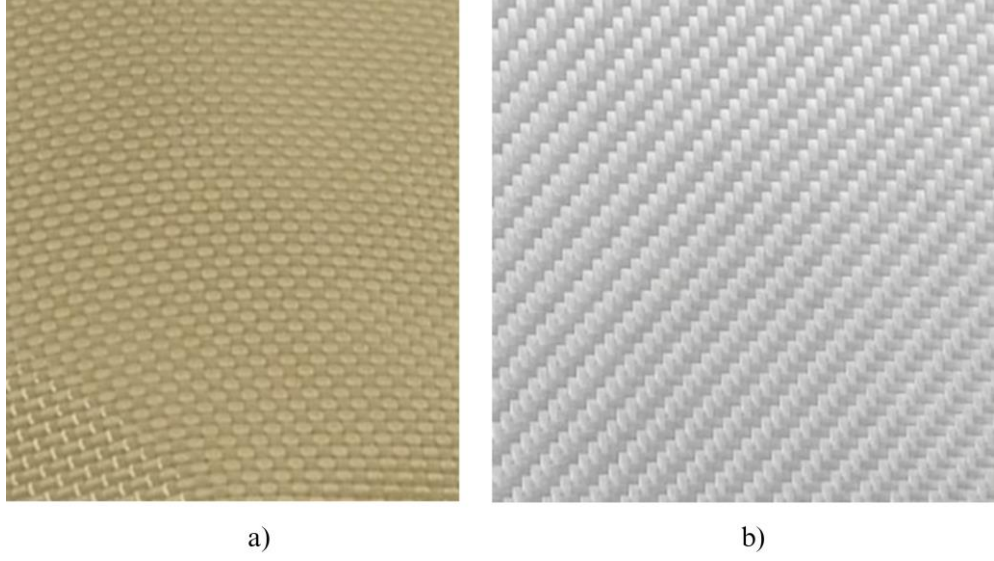


Şekil 6.1 11 tabakalı hibrit kompozit levha üretim şeması

Tablo 6.1 Kullanılan matris ve sertleştirici malzemelerin özellikleri

Malzeme Türü	Reçine	Sertleştirici (Solvent)
Ürün Adı	Epoksi	Epoksi Sertleştirici
Ticari Adı	F-1564	F-3487
Yoğunluk	1,15 gr/cm ³	1 gr/cm ³

Düz örgü dokuma tipinde Kevlar kumaş kullanılmıştır. Cam fiber takviyeli kumaş twill tipinde olarak kullanılmıştır. Kumaşların malzeme özellikleri Tablo 6.2’de belirtilmiştir. Şekil 6.2a’da kullanılan para-aramid kumaş ve Şekil 6.2b’de cam kumaş yapısı görülmektedir.



Şekil 6.2 Fiber kumaşların yapısı a) para-aramid kumaş b) cam kumaş

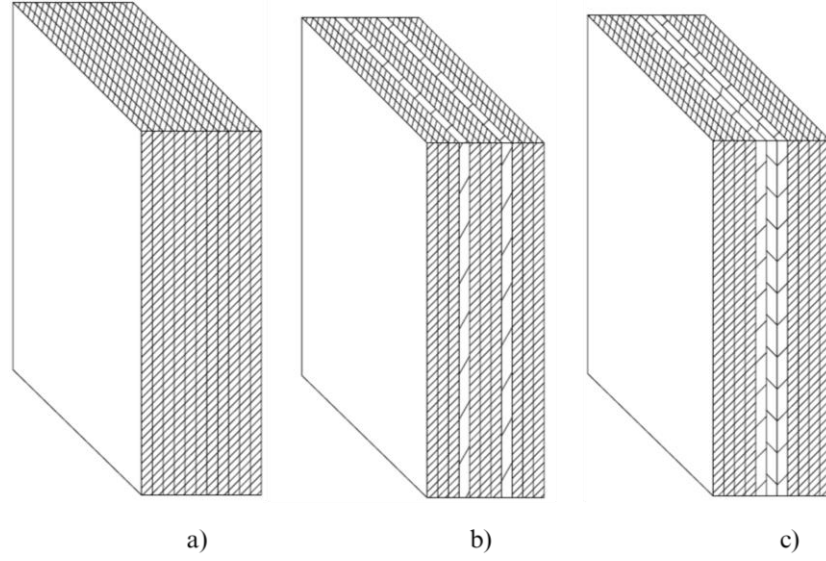
Tablo 6.2 Kullanılan fiber kumaş malzeme özellikleri

Fiber Kumaş	Para-Aramid (%100 Kevlar)	Cam
Dokuma Tipi	Düz örgü	Twill
Kalınlık (mm)	0,4	0,2
Alansal Ağırlık (gr/m ²)	396,43	390
Warp&Weft	Atkı ve çözgü 3140 DTEX Filament %100 Kevlar	-

101 cm enindeki Kevlar kumaş 500 mm x 500 mm boyutlarında kesilerek 11 tabakalı numune için 11 kat halinde kesilmiştir. Hibrit numuneler için cam fiber takviyeli kumaş toplamda 6 x (500 mm x 500 mm) boyutlarında kesilmiştir.

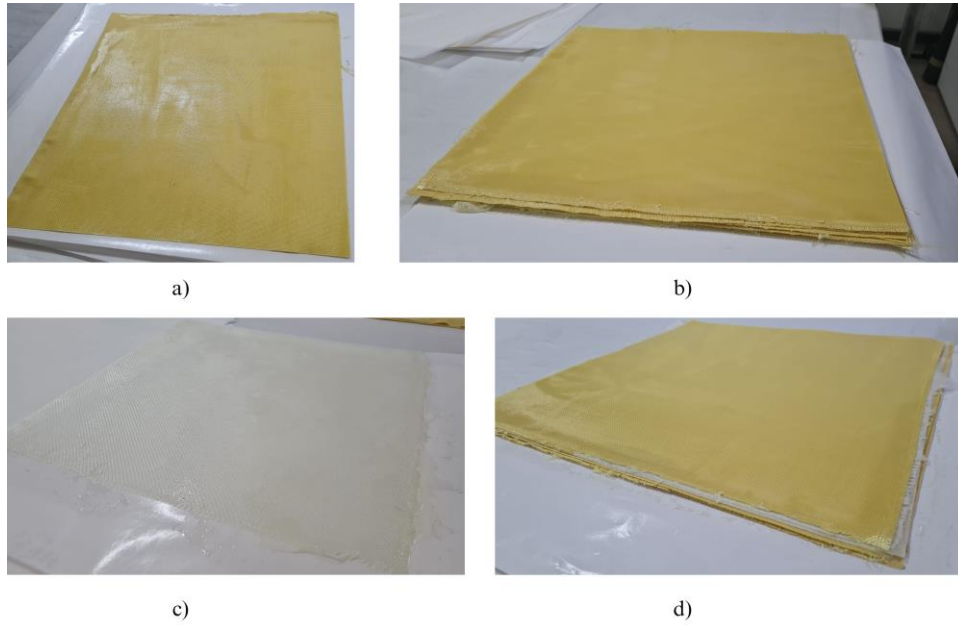
6.1.2 Levhaların üretimi

Bu bölümde 11 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha üretimi ve yine 11 tabakalı farklı dizilime sahip hibrit kompozit levhalar üretilmiştir (Şekil 6.3a). Hibrit kompozit üretiminde cam fiber takviyeli kumaş kullanılmıştır. 3 Kat Kevlar kumaş + 1 kat cam kumaş + 3 kat Kevlar kumaş + 1 kat cam kumaş + 3 kat Kevlar kumaş (Bkz. Şekil 6.3b) (3Kevlar/1Cam/3Kevlar/1Cam/3Kevlar), 4 kat Kevlar kumaş+ 3 kat cam kumaş+ 4 kat Kevlar kumaş (Bkz. Şekil 6.3c) (4Kevlar/3Cam/4Kevlar) dizilimine sahip kompozit levhalar üretilmiştir. Üretimi yapılan levhaların dizilimi Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 11 tabakalı kompozit levhaların geometrik gösterimi a) 11 katlı Kevlar kumaş kompozit levha b) 3K/1C/3K/1C/3K hibrit kompozit levha c) 4K/3C/4K hibrit kompozit levha

Üretimin gerçekleşmesi için 500 mm x 500 mm boyutlarında Kevlar ve Cam fiber kumaş kesimi gerçekleştirilmiştir. El ile yatırma metodu ile epoksi reçinenin her kumaşa emdirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Reçine emdirilen kumaşlar daha sonra jelleşme işlemi için oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır (Bkz. Şekil 6.4a ve Şekil 6.4c).



Şekil 6.4 Elle yatırma metodu ile hazırlanan numuneler a) epoksi emdirilmiş Kevlar kumaş b) Kevlar kumaşların 11 tabaka istiflenmesi c) epoksi emdirilmiş cam kumaş d) Kevlar kumaşların ve cam kumaşların istiflenmesi

Kumaşların jelleşme süresinden sonra, 11 tabakalı yarı mamul kumaşlar üst üste istiflenmiş (Bkz. Şekil 6.4b ve Şekil 6.4d), yanmaz film ile sarılmış ve hidrolik sıcak prese yerleştirilmiştir (Bkz. Şekil 6.5). İlk olarak, kumaşlar 10 bar'lık bir basınca maruz bırakılmıştır. Daha sonra sıcaklık oda sıcaklığından 125 °C'ye yükseltilmiştir ve 2 saat süresince bekletilmiştir. Isıtma elemanı kapatıldığında levhaların oda sıcaklığına ulaşmasına izin verilmiştir.



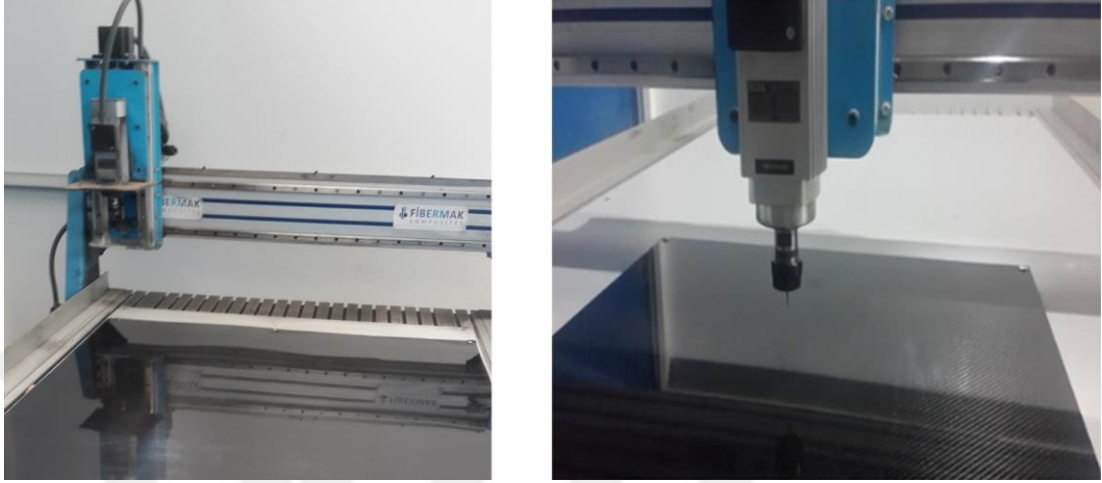
Şekil 6.5 Üretilen levhaların preslenmesi

11 tabakalı için levhalar üretim prosesleri sonucunda 4,5 mm kalınlığına ulaşmıştır (Bkz. Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Preslenen kompozit levha

Üretimi yapılan 11 tabakalı kompozit levhaları bilgisayar destekli lazer kesim CNC tezgahı yardımıyla numune boyutlarına göre kesilmiştir (Bkz. Şekil 6.7). Numune boyutları; balistik deneyi standart ölçülerine göre belirlenmiştir.

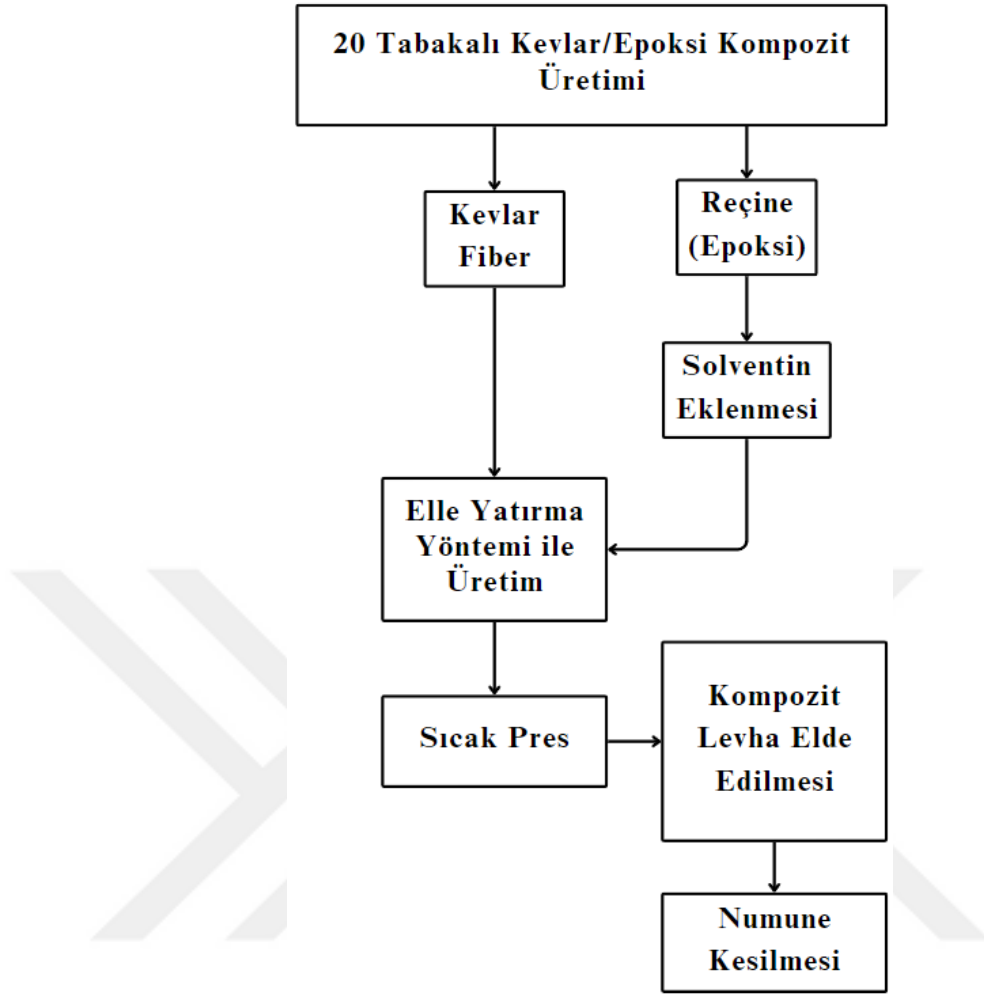


Şekil 6.7 Cnc tezgahı

6.2 20 Tabakalı Kevlar/Epoksi Kompozit Üretimi

6.2.1 Kullanılan malzemeler

İkinci aşamada, 11 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın balistik darbe sonucu; 20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha üretilmiştir. Bunun balistik darbe direnci deneysel olarak araştırılmıştır. Tüm üretimler elle yatırma metodu ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan epoksi ve Kevlar kumaş kullanılmıştır. Kullanılan Kevlar kumaş, epoksi ve sertleştirici 11 tabakalı kompozit numunelerde kullanılan ile aynı özelliklere sahip kumaştır. 20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit üretimi şeması Şekil 6.8’de görülmektedir.

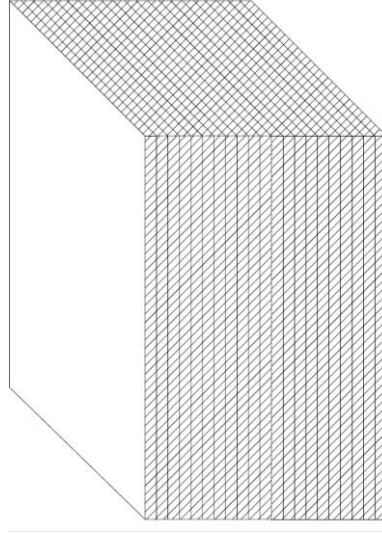


Şekil 6.8 20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha üretim şeması

20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhada 300 gr. epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksiye oranla %30 oranında (90 gr.) solvent kullanılmıştır.

6.2.2 Levhaların üretimi

101 cm enindeki Kevlar kumaştan; 500x500 mm² boyutlarında 20 adet kesim yapılmıştır (Bkz. Şekil 6.9). 20 tabakalı kompozit üretimi için yine her tabakaya reçine elle yatırma yöntemi ile sürülmüş ve jelleşme süresi için bekletilmiştir. Süre bitiminde 20 tabaka kumaş üst üste istiflenerek sıcak pres uygulamasına alınmıştır (11 tabakalıdaki işlemler uygulanmıştır). 20 tabakalı için levhalar üretim prosesleri sonucunda 7,7 mm kalınlığına ulaşmıştır.



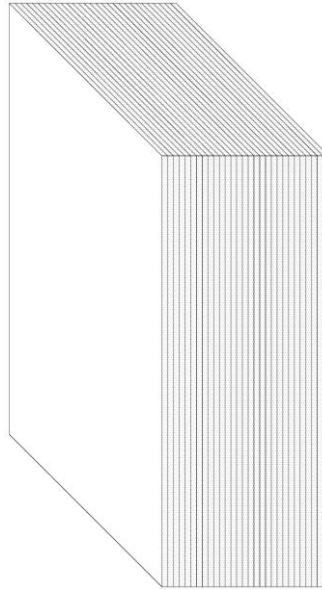
Şekil 6.9 20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha geometrik gösterimi

Daha sonra üretimi yapılan 20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın balistik test için kesimi gerçekleştirilmiştir.

6.3 30 Tabakalı B₄C Katkılı Kevlar/Epoksi Kompozit Üretimi

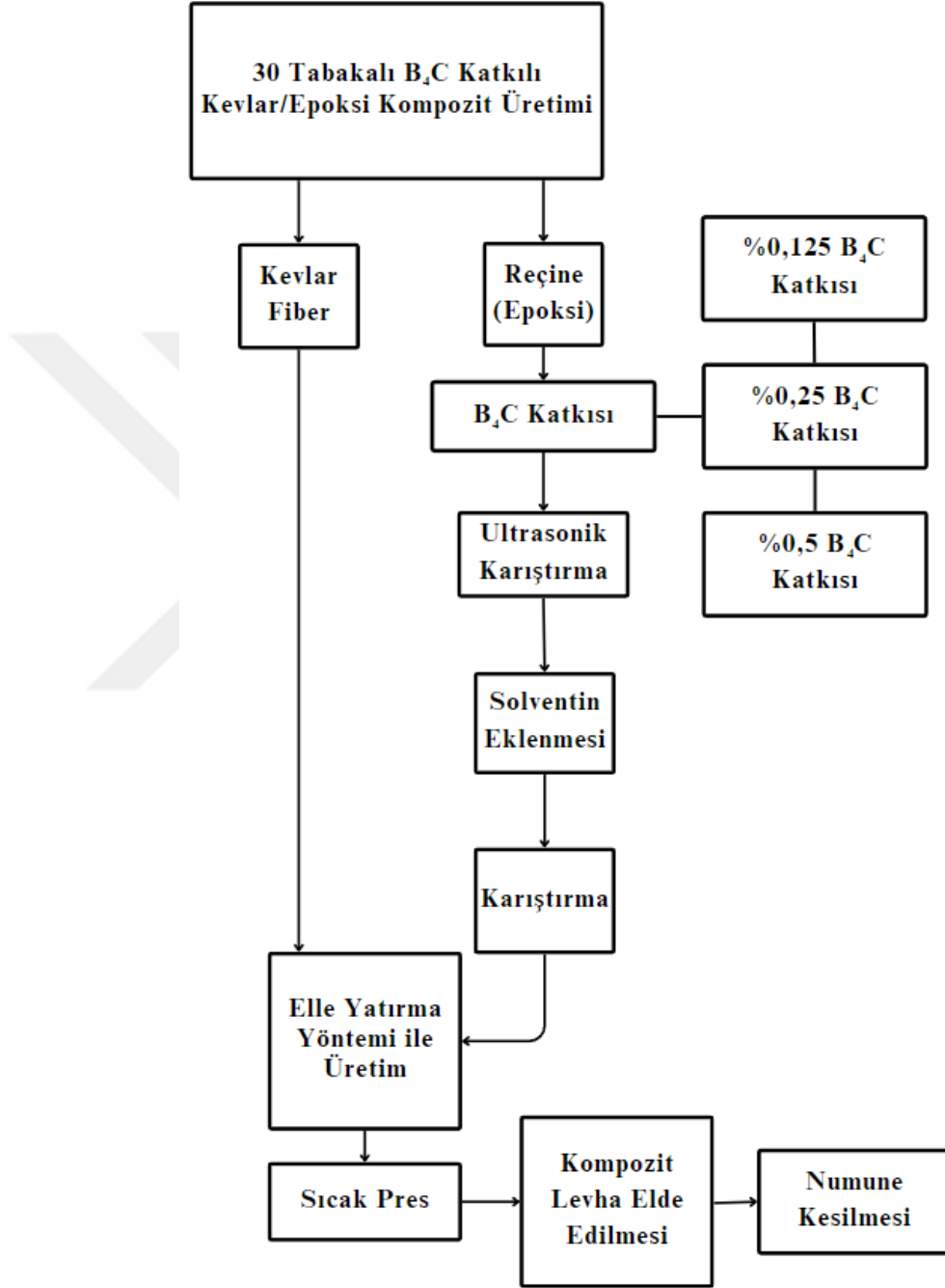
6.3.1 Kullanılan malzemeler

20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın balistik test sonucundan sonra 30 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha üretilmiştir. 30 tabakalı kompozit levhalarının geometrik şekli Şekil 6.10’da görülmektedir.



Şekil 6.10 30 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhalarının geometrik gösterimi

Bu üretime ek olarak, 3 farklı oranda (ağırlıkça) bor karbür (B_4C) katılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.11’de 30 tabakalı B_4C katkılı Kevlar/Epoksi kompozit üretimi şeması görülmektedir.



Şekil 6.11 30 tabakalı B_4C katkılı Kevlar/Epoksi kompozit levha üretim şeması

Balistik darbe performansını iyileştirmek için reçine ve kompozit levhayı güçlendirmek, mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla bor karbür katkı malzemesi kullanılmıştır.

Bor karbür malzemesi toz formunda B₄C olup 3,093 µm partikül boyutu çapında ve d50 dağılımında olan bir malzemedir. Nanopartikül katkı malzeme özellikleri Tablo 6.3’de belirtilmiştir.

Tablo 6.3 Kullanılan nanopartikül katkı malzeme Özellikleri

Nanopartikül Katkısı	B ₄ C
Partikül Boyutu Çapı (d50 dağılımına göre)	3,093 µm
Standardı	FEPA 1200
Saflık (%)	99,95
Yoğunluk (gr/cm ³)	2,52

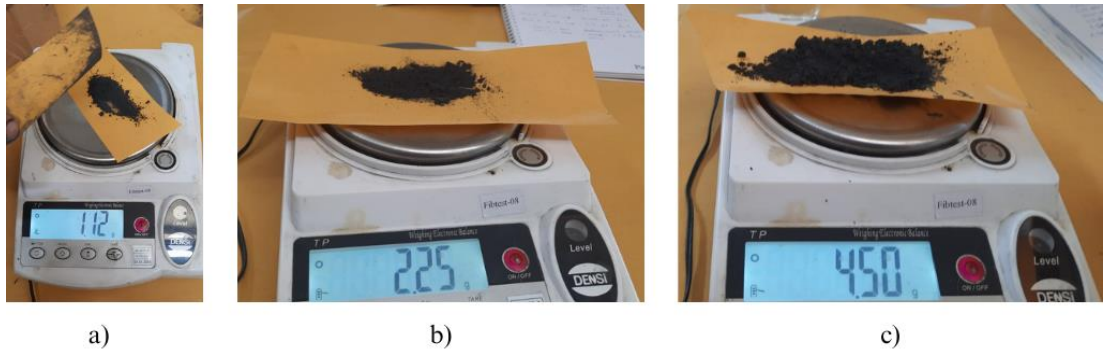
6.3.2 Levhaların üretimi

30 tabakalı kompozit levhaya takviye edilecek katkı malzemesi; reçine ağırlığına göre hesaplanarak elde edilmiştir. Reçine olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Epoksi reçineye (1,5 m² için 900 gr.) ağırlıkça %0,125, %0,25, %0,5 oranlarında B₄C ilave edilmiştir. Belirlenen bu oranlara Tablo 6.4’de yer verilmiştir

Tablo 6.4 30 tabakalı kompozit levhanın katkı oranları

30 Tabakalı Numune	Ağırlıkça Oranları		
B ₄ C Katkı Oranı (%)	0,125	0,25	0,5
Epoksi Reçine (gr.)	900		
Solvent (Sertleştirici) (gr.)	270		
B ₄ C Katkı Ağırlığı (gr)	1,125	2,25	4,5

Bor karbür katkı oranları 0,001 gr. hassasiyetine sahip terazide ölçümü yapılarak, epoksi reçineye karıştırılmıştır (Bkz. Şekil 6.12).



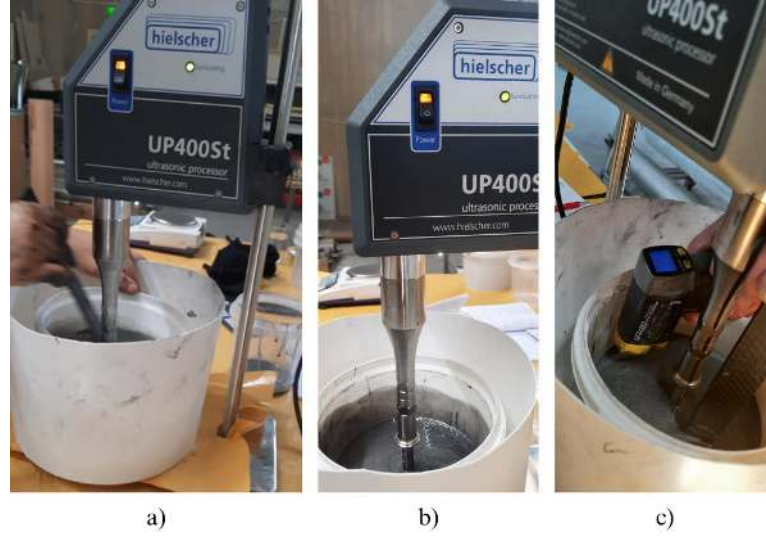
Şekil 6.12 30 tabakalı kompozit numunede bor karbür ağırlıkça katkı oranları a) Ağırlıkça %0,125 B₄C oranı b) Ağırlıkça %0,25 B₄C oranı c) Ağırlıkça %0,5 B₄C oranı

Çalışmada nanopartiküllerin belirli bir alanda topaklanma gerçekleştirmemesi ve bunu engelleyebilmek için ultrasonikasyon cihazı ile karışım yapılmıştır (Bkz. Şekil 6.13). Ultrasonikasyon yöntemi ile ses dalgalarının yaydığı titreşimle nanopartiküllerin malzeme içinde homojen dağılımını sağlayarak topaklanmasını önlemek amaçlanmaktadır. Bu aynı zamanda uygulanacak yükün her noktaya eşit yayılmasına olanak sağlamaktadır. Ultrasonik karıştırıcı Hielscher UP-400St tipinde olup DUBAP Mühendislik 21.005 projesi kapsamında temin edilmiştir.



Şekil 6.13 Ultrasonikasyon cihaz

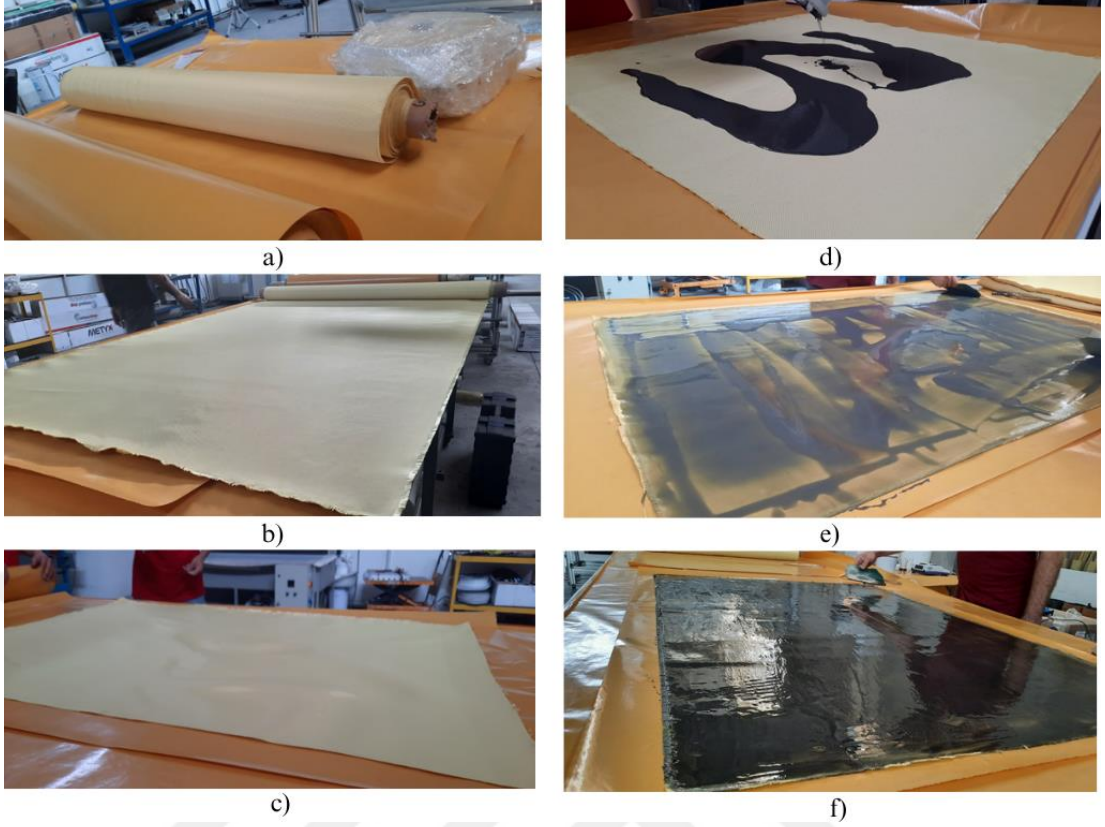
Nanopartiküllerin reçine ile homojen bir şekilde dağılımı çok önemlidir. Hazne içinde reçineye ilk olarak eklenen bor karbür partiküllerinin topaklanmasını engellemek için, tahta bir çubuk yardımıyla ile karıştırılmıştır (Bkz. Şekil 6.14a). Bor karbürün reçine yüzeyinden kaybolması görüldükten sonra ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır (Bkz. Şekil 6.13b).



Şekil 6.14 Epoksiye nanokatki sonrası karıştırma a) El ile karıştırılma işlemi b) Sonikasyon ile karıştırma c) Sonikasyondan sonra ısı kontrolü

Karıştırma esnasında oluşan ısının bor karbür yapısını deforme etmesini önlemek amacıyla karıştırma kabının etrafında buz parçalarından oluşan soğutucu bir havuz yapılmıştır. Karıştırma kabı bu havuzun içine yerleştirilerek ısı artışının artması önlenmiştir. Karıştırma yapılırken, dijital termometre ile üç dakikada bir sıcaklık kontrolü yapılarak, 50 °C altında tutulması sağlanmıştır (Bkz. Şekil 6.14c).

Karışım daha sonra, belirli boyutlarda kesilmiş Kevlar kumaşa elle yatırma yöntemi ile sürülmüştür. Kevlar kumaş (şekil 6.14.a) 500 mm x 500 mm boyutlarında hazırlanmıştır (Şekil 6.15b,c) Kesilen kumaşa bor karbür katkılı epoksi reçine dökülmüştür (Bkz. Şekil 6.15d). Homojen dağılım için her tarafa epoksi reçinenin eşit miktarda emdirilme işlemi gerçekleştirilmiştir (Bkz. Şekil 6.15e). Daha sonra reçine emdirilen kumaşlar kurumaya bırakılmıştır (Bkz. Şekil 6.15f).



Şekil 6.15 30 tabakalı kompozit levhanın takviye malzemesinin hazırlanışı a) fiber kumaşın seçimi b) Kumaşların kesim için hazırlanması c) Kumaş kesimi d) Bor karbür katkılı epoksi reçinenin kumaşa dökülmesi e) El ile yatırma metoduyla epoksi reçinenin kumaşa emdirilmesi f) Reçine emdirilmiş kompozitin kurumaya bırakılması

Daha sonra reçine emdirilmiş kumaşlar birleştirilerek tabakalar elde edilmiştir. Üst üste birleştirilen tabakalar sıcak prese yerleştirilmiştir (Bkz. Şekil 6.16).



Şekil 6.16 Pres ünitesi

Pres uygulanmadan önce üretilen levhalar yanmaz jelatin ile kaplanarak preslenen malzemenin eriyen dolgu malzemesinin dışarı akması engellenmiştir. Pres işleminde levhaların kürleşmesi ve dolgu malzemesinin tabaka yüzeylerine homojen dağılımın sağlamak için uygulanmaktadır. Levhalara oda sıcaklığından başlayarak 115 °C'ye kadar aşamalı olarak basınç uygulaması yapılmıştır. Kompozit levhanın içinde olan epoksi reçinenin 100 °C'de erimeye başladığı görüldükten sonra basınç değeri 200 bar'a yükseltilmiştir. Aynı zamanda ısıtıcı kapatılmıştır, bir saat beklemeye alınmıştır. Bu süreçte ünite 10 dakika arayla kontrol edilerek, basınç değerinin 200 Bar'ın altına düşmemesi sağlanmıştır. Kürleşme işlemi uygulandıktan sonra levhalar, pres ile birlikte soğumaya bırakılmıştır. Sıcaklık değeri kontrol edilerek 45 °C sıcaklık değerinin altına düştükten sonra pres ünitesinden çıkarılmıştır.

Üretimi yapılan 30 tabakalı bor karbür katkılı tabakalı kompozit levhaları bilgisayar destekli su jeti kesim ile numune boyutlarına göre kesilmiştir. Numune boyutları; balistik deney standart ölçülerine göre 300 mm x 300 mm'dir.

6.4 Üretimi Gerçekleştirilen Levhalar

Bu çalışmada 11 tabakalı Kevlar /epoksi, 11 tabakalı 3K/1C/3K/1C/3K dizilimli ve 11 tabakalı 4K/3C/4K dizilimli hibrit kompozit levhalar ile 20 tabakalı ve 30 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhalar üretilmiştir. Ayrıca 30 tabakalı Kevlar/Epoksi levhalara 3 farklı oranda bor karbür katılarak nanokatlı kompozit levhalar elde edilmiştir. Hazırlanan numunelerin özellikleri aşağıdaki Tablo 6.5'de belirtmiştir.

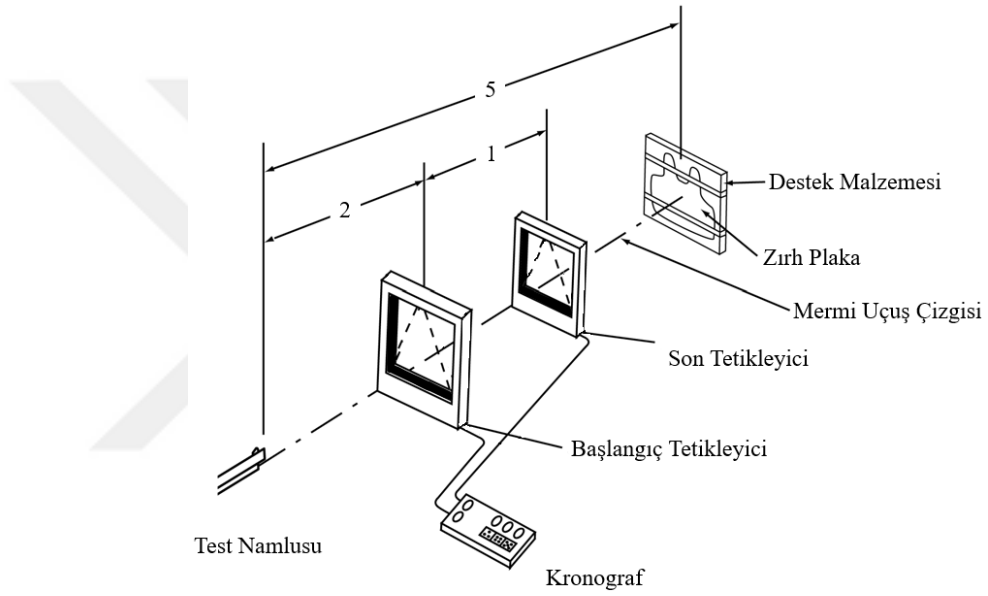
Tablo 6.5 Üretimi gerçekleştirilen numunelerin özellikleri

Numune	Tabaka Sayısı	Tabaka Ağırlığı (gr)	Tabaka Kalınlığı (mm)	Fiber Dizilim	Matris	B ₄ C %	Ağırlık (Gr)
1	11		4,5	11K	Epoksi	-	520,5
2	11		4,5	3K/1C/3K/1C/3K	Epoksi	-	531,2
3	11		4,5	4K/3C/4K	Epoksi	-	518
1	20		7,7	20K	Epoksi	-	901
1	30		12	30K	Epoksi	-	1642
2	30		12	30K	Epoksi	0,125	1516
3	30		12	30K	Epoksi	0,25	1550
4	30		12	30K	Epoksi	0,5	1532

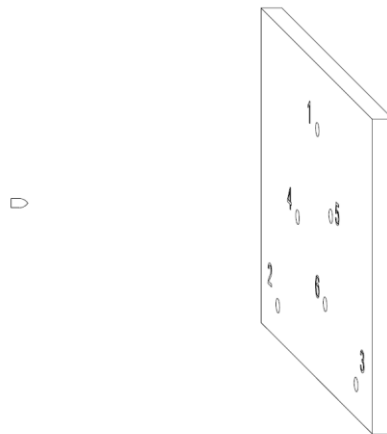
6.5 Balistik Darbe Deneyi

Numunelerde, NIJ 0101.04 standardı esas alınarak balistik darbe deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden 300 mm x 300 mm ölçülerinde numuneler hazırlanmıştır.

Balistik darbe deneyleri Afyon 8. Ana bakım Merkezi Komutanlığı'nda gerçekleştirilmiştir. Deney şeması Şekil 6.17'de ve balistik darbe deneyi numune atış yeri şeması Şekil 6.18'de belirtmiştir.



Şekil 6.17 Balistik darbe deneyi testi şeması [91]



Şekil 6.18 Balistik darbe deneyi numune atış yeri şeması

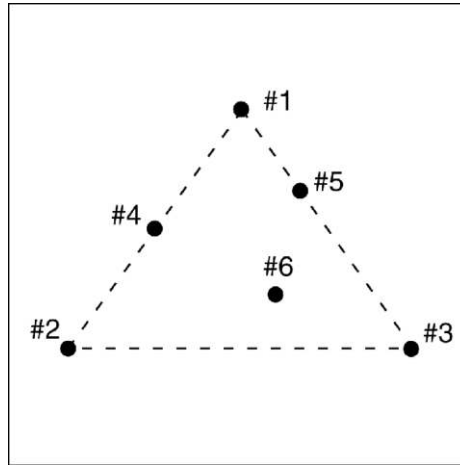
11 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit numune ve Kevlar/Cam/Epoksi hibrit dizilimli olan 3K/1C/3K/1C/3K ve 4K/3C/4K numunelerde, IIA, II, IIIA zırh tipi seviyelerinde balistik darbe deneyi gerçekleştirilmiştir.

Numunelerde; IIA zırh tipi seviyesinde 8 gr. ağırlığında 9 mm FMJ RN mermi kullanılmıştır. II zırh tipi seviyesinde 8 gr. ağırlığında 9 mm FMJ RN mermi kullanılmıştır. IIIA sınıfı için ise 8,2 gr. ağırlığında 9 mm FMJ RN mermi kullanılmıştır.

20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhada ise IIIA zırh tipi seviyesinde balistik darbe deneyi gerçekleştirilmiştir.

30 tabakalı katkısız Kevlar/Epoksi ve ağırlıkça %0,125, %0,25 B₄C katkılı nanokatlı kompozit levhalarda IIIA zırh tipi seviyesinde balistik darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir.

NIJ 0101.04 standardının referans doküman değerlerinde, numunelerde delinme olmaması ve maksimum penetrasyon derinliğinin 44 mm olması gerektiği belirtilmektedir. Ayrıca mermi hızları Tablo 5.2’de belirtilen zırh tipine ait mermi hızları değerlerinin olması gerektiği belirtilmiştir. Hedef numune yerleri ve atış sıralaması #1, #2, #3, #4, #5, #6 olacak şekilde altı adet atış yapılmıştır (Bkz. Şekil 6.19).



Şekil 6.19 Hedef mermi atış yerleri şeması [91]

Tablo 6.6’da hedef numuneler görülmektedir. Altı adet kompozit levha numunesi mevcuttur.

Tablo 6.6 Balistik darbe deneyi hedef numuneleri

Tabaka Sayısı	Numune No	Fiber Dizilim	Matris	B ₄ C %	Zırh Tipi	Atış No
11	1	11K	Epoksi	-	IIIA	1
					IIIA	2
					II	3
					II	4
					IIIA	5
					II	6
					IIA	7
	2	3K/1C/3K/1C/3K	Epoksi		IIIA	1
					IIIA	2
					IIA	3
					IIA	4
					IIIA	5
					IIA	6
	3	4K/3C/4K	Epoksi		IIIA	1
					IIIA	2
					IIA	3
					II	4
					IIIA	5
20	1	20K	Epoksi		IIIA	1
30	1	30K	Epoksi	-	IIIA	1
					IIIA	2
					IIIA	3
					IIIA	4
					IIIA	5
					IIIA	6
	2	30K	Epoksi	0,125	IIIA	1
					IIIA	2
					IIIA	3
					IIIA	4
					IIIA	5
					IIIA	6
	3	30K	Epoksi	0,25	IIIA	1
					IIIA	2
					IIIA	3
					IIIA	4
					IIIA	5
					IIIA	6
	4	30K	Epoksi	0,5	IIIA	1
					IIIA	2
					IIIA	3
					IIIA	4
					IIIA	5
					IIIA	6

Balistik darbe testinde perforasyon (delinme) testi, bir merminin veya kurşunun çarpma işlemi sırasında bir test hedefinden tamamen geçmesi olarak tanımlanır.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, her 3 aşamada hazırlanan kompozit levhalar üzerinde gerçekleştirilen balistik test sonuçları verilmiştir.

7.1 Balistik Darbe Deneyi Sonuçları

Bu tez çalışmasında katkısız kompozit levhaların balistik test sonuçları esas alınarak tabaka sayısı artırılmıştır. Önce üretilen 11 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit numune ve Kevlar/Cam/Epoksi ve 3K/1C/3K/1C/3K ve 4K/3C/4K dizilimli numuneler teste tabi tutulmuştur. Daha sonra tabaka sayısı arttırılarak 20 tabakalı Kevlar/Epoksi numunesine balistik darbe deneyi yapılmıştır. Ardından 30 tabakalı B₄C katkısız ve ağırlıkça %0,125, %0,25, %0,5 B₄C katkılı kompozit levhaların balistik darbe testleri gerçekleştirilmiştir.

7.1.1 11 Tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın balistik darbe deneyi sonuçları

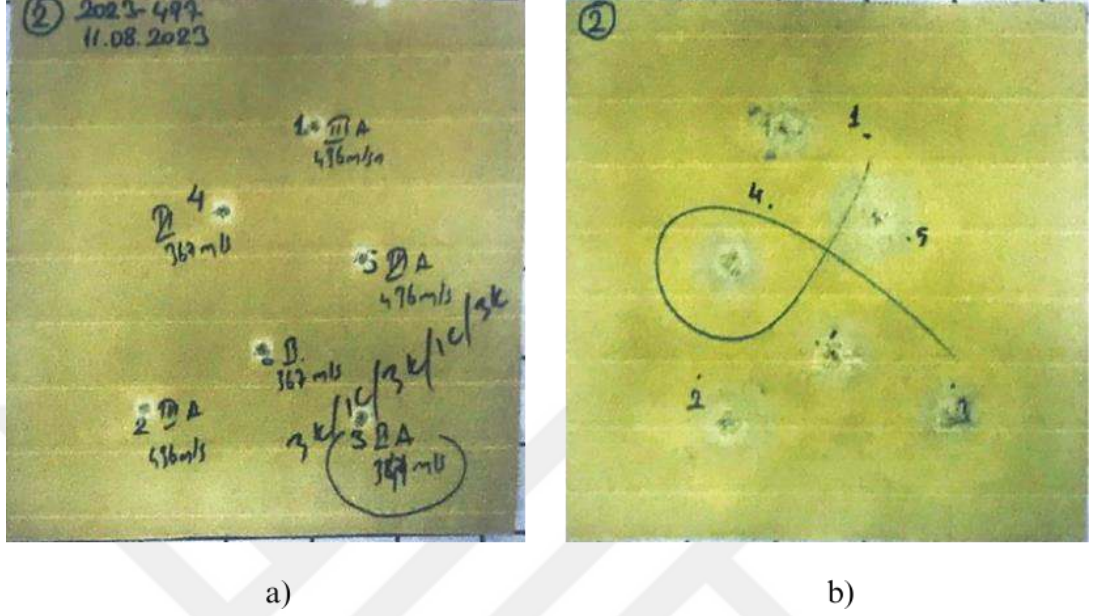
11 tabakalı kompozit levhaların balistik darbe deneyi; ortam sıcaklığı 21,9 °C ve bağıl nem değeri %48,0 olan ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca farklı zırh tipi sınıflarında deneyler gerçekleştirilmiştir.

11 tabakalı Kevlar/Epoksi levha zırh tipi IIIA ve II seviyesinde yapılan hızlarda delinme gerçekleşmiştir. Sadece 7. atış nolu IIA zırh tipinde yapılan atışta delinme gerçekleşmemiştir. 7. atış nolu deney sonucunda, yapılan ölçümde 12,11 mm penetrasyon derinliği değeri elde edilmiştir. Yapılan atışlar sonrası elde edilen sonuçları Tablo 7.1’de belirtilmiştir.

Tablo 7.1 Kevlar/Epoksi levhanın balistik darbe deney sonuçları

	Zırh Tipi	Atış No	Kullanılan Mermi Tipi	Mermi Hızı (m/s)	Perforasyon	Penetrasyon Derinliği (mm)
11 Tabakalı 11K	IIIA	1	9mm FMJ RN	429	Delindi	-
	IIIA	2	9mm FMJ RN	432	Delindi	-
	II	3	9mm FMJ RN	360	Delindi	-
	II	4	9mm FMJ RN	363	Delindi	-
	IIIA	5	9mm FMJ RN	433	Delindi	-
	II	6	9mm FMJ RN	363	Delindi	-
	IIA	7	9mm FMJ RN	344	Delinmedi	12,11

Şekil 7.2’de 3K/1C/3K/1C/3K dizilimli kompozit levhanın balistik darbe sonrası kompozit levhada arka yüzey ve ön yüzeyde meydana gelen hasarlar görülmektedir.



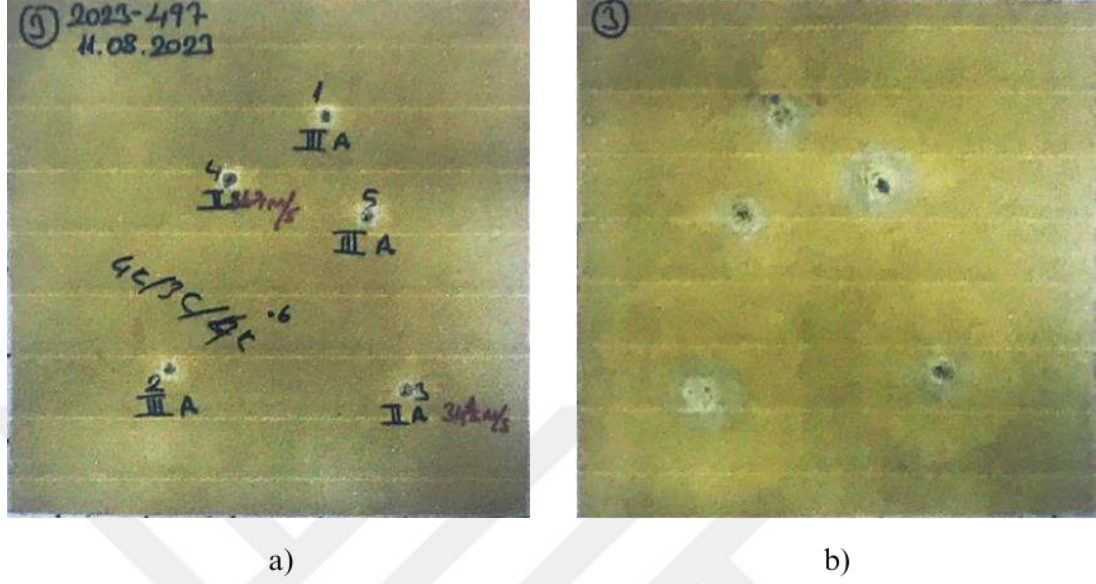
Şekil 7.2 3K/1C/3K/1C/3K numune atış yapılmış kompozit levha a) Ön yüz b) Arka yüz

4K/3C/4K dizilimli levhada IIIA, IIA seviyesinde yapılan atışlarda levhalarda tamamen delinme meydana gelmiştir. Deney sonuçları Tablo 7.3’te belirtmiştir.

Tablo 7.3 4K/3C/4K dizilimli levhanın balistik deney sonuçları

	Zırh Tipi	Atış No	Kullanılan Mermi Tipi	Mermi Hızı (m/s)	Perforasyon	Penetrasyon Derinliği (mm)
11 Tabakalı 4K/3C/4K	IIIA	1	9mm FMJ RN	433	Delindi	-
	IIIA	2	9mm FMJ RN	436	Delindi	-
	IIA	3	9mm FMJ RN	348	Delindi	-
	II	4	9mm FMJ RN	363	Delindi	-
	IIIA	5	9mm FMJ RN	434	Delindi	-

Şekil 7.3'te 4K/3C/4K dizilimli levhada balistik darbe deneyi sonrası hasarlar görülmektedir.



Şekil 7.3 4K/3C/4K numune atış yapılmış kompozit levha a) Ön yüz b) Arka yüz

11 tabakalı kompozit levhalarda, IIA seviyede atış yapılan saf Kevlar/Epoksi levha delinmeyerek hibritlere göre daha başarılı sonuç elde etmiştir. IIIA seviyesinde tüm numuneler delinmiştir.

7.1.2 20 Tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın balistik darbe deneyi sonuçları

20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha; IIIA seviyesindeki hız ile balistik teste tabii tutulmuştur. Balistik darbe deneyi ortam sıcaklığı 20,7 °C ve ortamın bağıl nemi %40,9'dur. Bu test sonrası levha tam delinme ile sonuçlanmıştır. Tam perforasyon olduğu için tabaka sayısı arttırılarak 30 tabakaya çıkarılmıştır.

7.1.3 30 Tabakalı Kevlar/Epoksi ve B₄C katkılı Kevlar/Epoksi kompozit levhada balistik darbe deney sonuçları

30 tabakalı katkısız kevlar +epoksi ve ağırlıkça %0,125, %0,25, %0,5 B₄C katkılı kompozit levhaların balistik darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerinde ortam sıcaklığı 20,7 °C ve bağıl nem oranı ise %40,9 olarak ölçülmüştür. 30 tabakalı tüm kompozit levhalarda IIIA zırh tipi sınıfına göre balistik darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir.

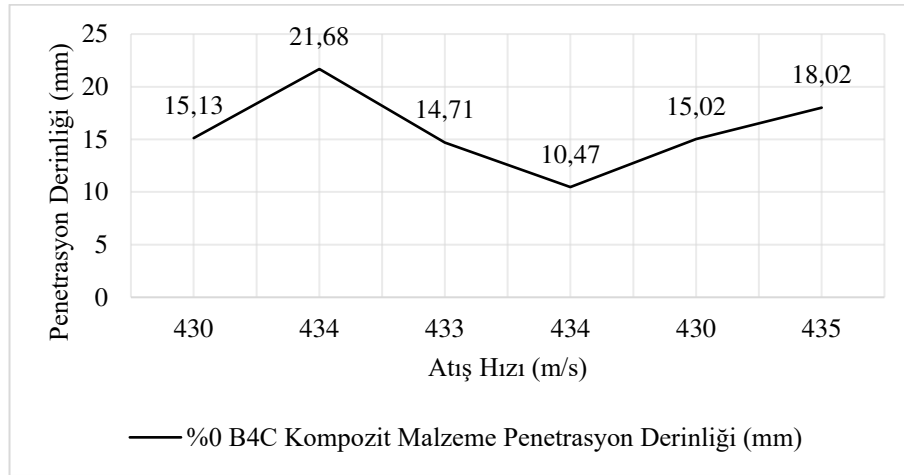
7.1.3.1 %0 B₄C Kevlar/Epoksi levhada balistik deney sonuçları

%0 B₄C Kevlar/Epoksi’ de balistik darbe deneyleri sonrasında delinme meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonuçları Tablo 7.4’te belirtmiştir.

Tablo 7.4 %0 B₄C kompozit levha balistik deney sonuçları

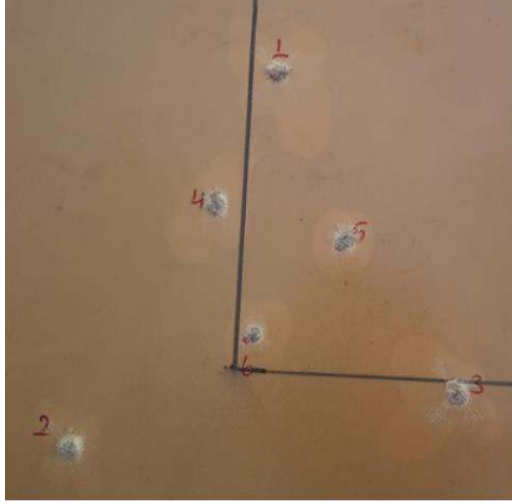
	Zırh Tipi	Atış No	Kullanılan Mermi Tipi	Mermi Hızı (m/s)	Perforasyon	Penetrasyon Derinliği (mm)
30 Tabakalı	IIIA	1	9mm FMJ RN	430	Delinmedi	15,13
30K	IIIA	2	9mm FMJ RN	434	Delinmedi	21,68
%0 B ₄ C	IIIA	3	9mm FMJ RN	433	Delinmedi	14,71
	IIIA	4	9mm FMJ RN	434	Delinmedi	10,47
	IIIA	5	9mm FMJ RN	430	Delinmedi	15,02
	IIIA	6	9mm FMJ RN	435	Delinmedi	18,02
				432,7		15,84

%0 B₄C Kevlar/Epoksi levhasının balistik darbe deneyin ortalama olarak 432 m/s hızda ortalama penetrasyon derinliği 15,84 mm olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla elde edilen derinlik, standarttaki (maksimum penetrasyon derinliği 44 mm) değeri aşmadığı için başarılı olarak sonuçlanmıştır. Şekil 7.4’te katkısız Kevlar/Epoksi için atış hızı ve penetrasyon derinliği arasındaki ilişki verilmiştir. Bu deneydeki maksimum penetrasyon derinliği değeri 434 m/s hızında 21,68 mm olarak gerçekleşmiştir. En düşük penetrasyon derinliği ise 434 m/s hızında 10,47 mm olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 7.4 % 0 B₄C kompozit levha penetrasyon derinliği grafiği

%0 B₄C Kevlar/Epoksi levhasının balistik deney sonrası levhanın ön yüzünde ve arka yüzünde meydana gelen hasarlar Şekil 7.5’te verilmiştir.

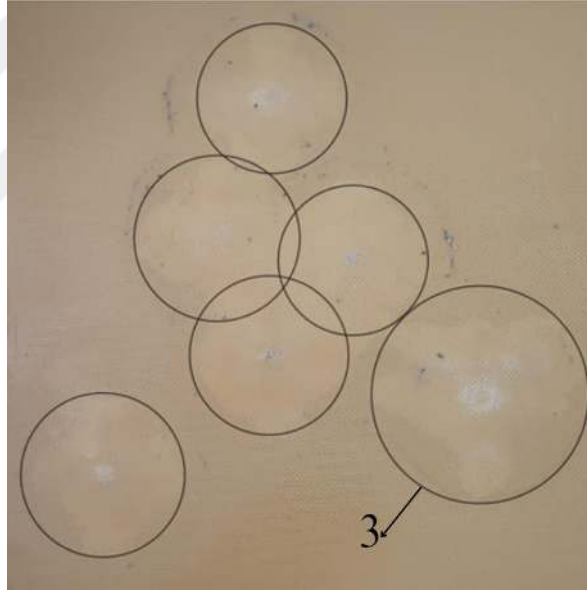


a)



b)

Şekil 7.5 %0 B₄C atış yapılmış kompozit levha a) Ön yüz b) Arka yüz



Şekil 7.6 %0 B₄C kompozit levha balistik deney sonrası oluşan delaminasyon alanı

%0 B₄C Kevlar/Epoksi levhasının arka taraf incelendiğinde 3.Atış'ın meydana getirdiği deformasyon sonucunda, en büyük delaminasyon alanının oluştuğu tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 7.6).

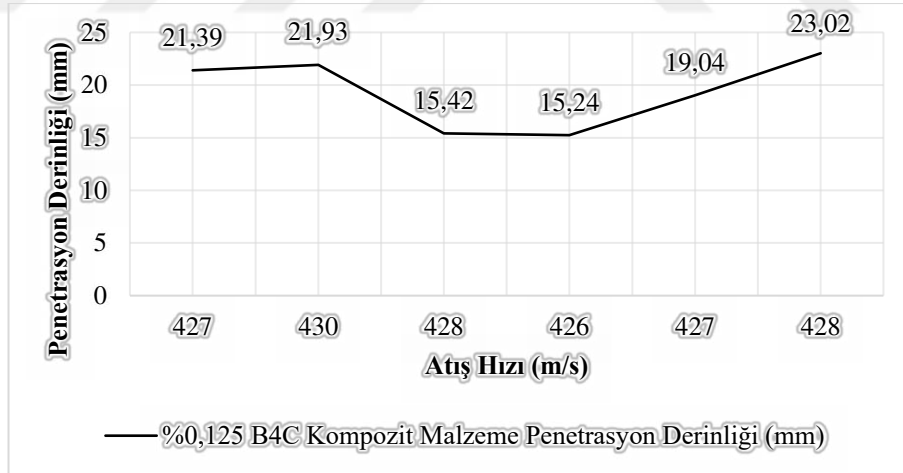
7.1.3.2 %0,125 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhanın balistik deney sonuçları

%0,125 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhanın balistik darbe deneyleri sonrasında delinme meydana gelmemiştir. Deney sonuçları Tablo 7.5'de belirtmiştir.

Tablo 7.5 %0,125 B₄C kompozit levha balistik deney sonuçları

	Zırh Tipi	Atış No	Kullanılan Mermi Tipi	Mermi Hızı (m/s)	Perforasyon	Penetrasyon Derinliği (mm)
30 Tabakalı %0,125 B ₄ C	IIIA	1	9mm FMJ	427	Delinmedi	21,39
	IIIA	2	9mm FMJ	430	Delinmedi	21,93
	IIIA	3	9mm FMJ	428	Delinmedi	15,42
	IIIA	4	9mm FMJ	426	Delinmedi	15,24
	IIIA	5	9mm FMJ	427	Delinmedi	19,04
	IIIA	6	9mm FMJ	428	Delinmedi	23,02
				427,7		19,34

%0,125 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhanın balistik darbe deneyin ortalama olarak 427,7 m/s hızda, ortalama penetrasyon derinliği ise 19,34 mm olarak hesaplanmıştır. NIJ 0101.04 standart değeri olan 44 mm aşılmadığı için başarılı olarak sonuçlanmıştır (Bkz. Tablo 7.5). Şekil 7.8’de %0,125 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi için atış hızı ve penetrasyon derinliği arasındaki ilişki verilmiştir. Bu deneydeki maksimum penetrasyon derinliği değeri 428 m/s hızında 23,02 mm olarak gerçekleşmiştir. En düşük penetrasyon derinliği ise 426 m/s hızında 15,24 mm olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 7.7 % 0,125 B₄C kompozit levha penetrasyon derinliği grafiği

Şekil 7.8’de balistik darbe deneyi sonrası hasarlar görülmektedir.

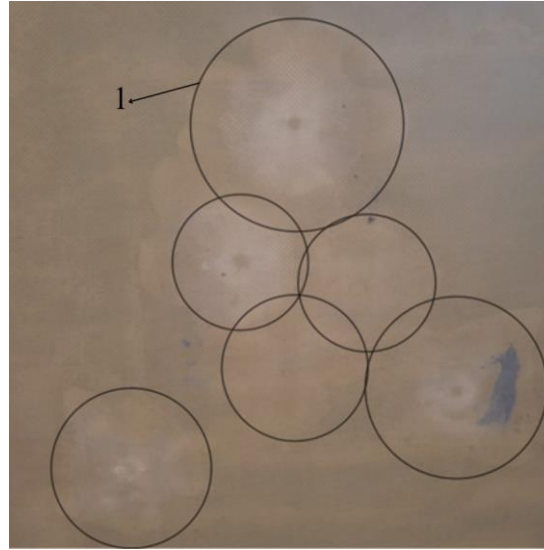


a)

b)

Şekil 7.8 %0,125 B₄C atış yapılmış kompozit levha a) Ön yüz b) Arka yüz

%0,125 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhanın arka taraf incelendiğinde 1.Atış'ın meydana getirdiği deformasyon sonucunda, en büyük delaminasyon alanının oluştuğu tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 7.9).



Şekil 7.9 %0,125 B₄C kompozit levha balistik deney sonrası oluşan delaminasyon alanı

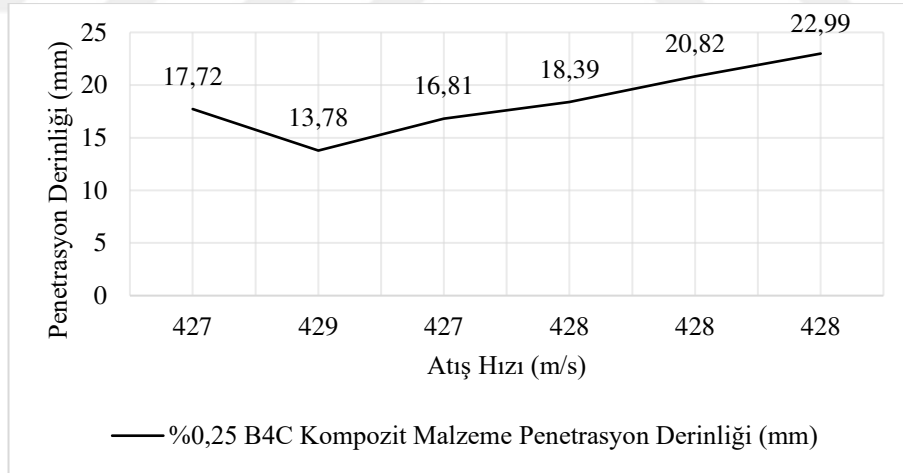
7.1.3.3 %0,25 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhanın balistik deney sonuçları

%0,25 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhada balistik darbe deneyleri sonrasında delinme meydana gelmemiştir. Deney sonuçları Tablo 7.6'da belirtmiştir.

Tablo 7.6 %0,25 B₄C kompozit levha balistik deney sonuçları

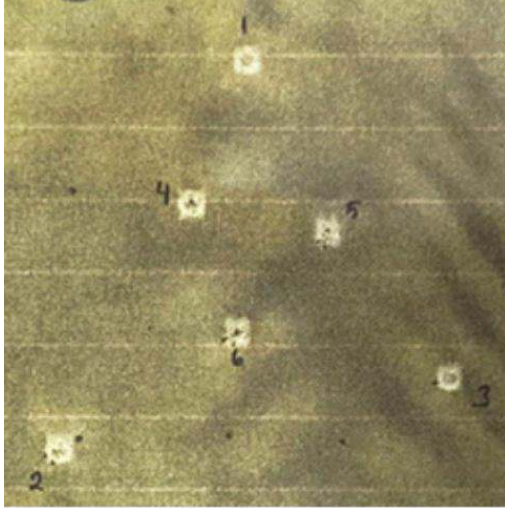
	Zırh Tipi	Atış No	Kullanılan Mermi Tipi	Mermi Hızı m/s	Perforasyon	Penetrasyon Derinliği mm
30 Tabakalı %0,25 B ₄ C	IIIA	1	9mm FMJ RN	427	Delinmedi	17,72
	IIIA	2	9mm FMJ RN	429	Delinmedi	13,78
	IIIA	3	9mm FMJ RN	427	Delinmedi	16,81
	IIIA	4	9mm FMJ RN	428	Delinmedi	18,39
	IIIA	5	9mm FMJ RN	428	Delinmedi	20,82
	IIIA	6	9mm FMJ RN	428	Delinmedi	22,99
				427,8		18,42

%0,25 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhada balistik darbe deneyin ortalama olarak 427,8 m/s hızda ve ortalama penetrasyon derinliği 18,42 mm olarak ölçülmüştür. NIJ 0101.04 standart değeri olan 44 mm aşılmadığı için başarılı olarak sonuçlanmıştır. Şekil 7.10'da %0,25 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi için atış hızı ve penetrasyon derinliği arasındaki ilişki verilmiştir. Bu deneydeki maksimum penetrasyon derinliği değeri 428 m/s hızında 22,99 mm olarak gerçekleşmiştir. En düşük penetrasyon derinliği ise 429 m/s hızında 13,78 mm olarak gerçekleşmiştir.

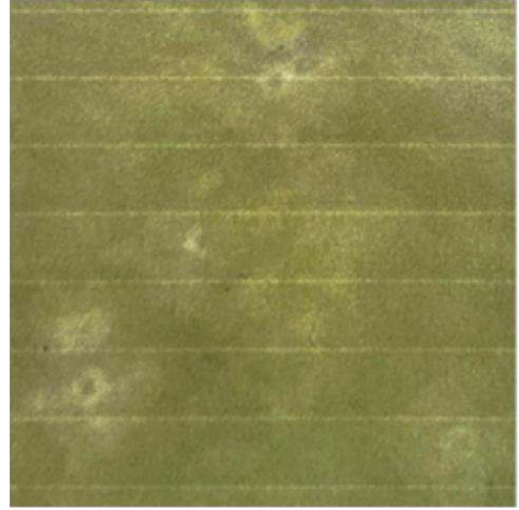


Şekil 7.10 % 0,25 B₄C kompozit levha penetrasyon derinliği grafiği

%0,25 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhanın Şekil 7.11'de balistik darbe deneyi sonrası hasarları görülmektedir.



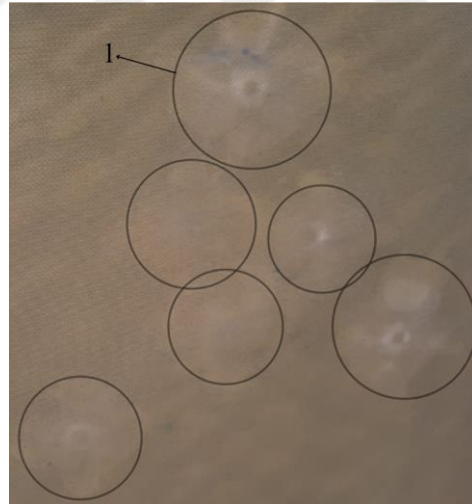
a)



b)

Şekil 7.11 %0,25 B₄C atış yapılmış kompozit levha a) Ön yüz b) Arka yüz

%0,25 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhada arka tarafında 1. Atışta meydana gelen deformasyon sonucunda, en büyük delaminasyon alanının oluştuğu tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 7.12).



Şekil 7.12 %0,25 B₄C kompozit levha balistik deney sonrası oluşan delaminasyon alanı

7.1.3.4 %0,5 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhanın balistik deney sonuçları

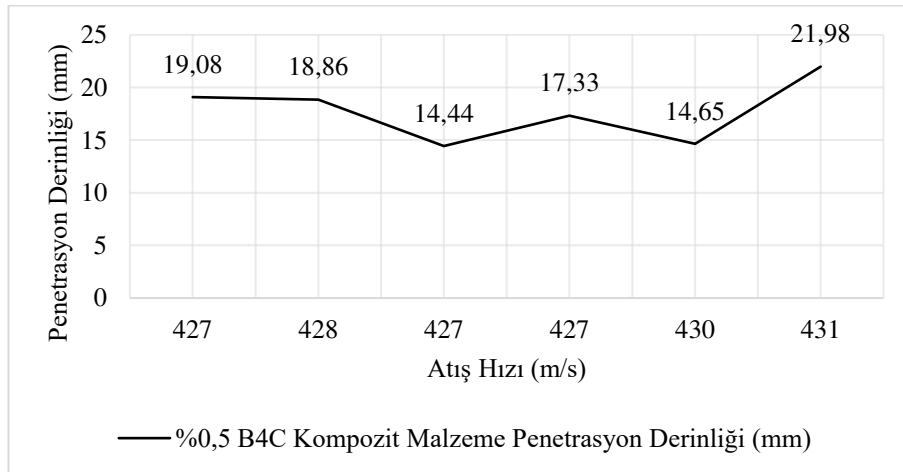
%0,5 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhada balistik darbe deneyleri sonrasında delinme meydana gelmemiştir. Deney sonuçları Tablo 7.7’de belirtmiştir.

Tablo 7.7 30 tabakalı numune 4 balistik deney sonuçları

	Zırh Tipi	Atış No	Kullanılan Mermi Tipi	Mermi Hızı m/s	Perforasyon	Penetrasyon Derinliği mm
30 Tabakalı %0,5 B ₄ C	IIIA	1	9mm FMJ RN	427	Delinmedi	19,08
	IIIA	2	9mm FMJ RN	428	Delinmedi	18,86
	IIIA	3	9mm FMJ RN	427	Delinmedi	14,44
	IIIA	4	9mm FMJ RN	427	Delinmedi	17,33
	IIIA	5	9mm FMJ RN	430	Delinmedi	14,65
	IIIA	6	9mm FMJ RN	431	Delinmedi	21,98
				428,3		17,72

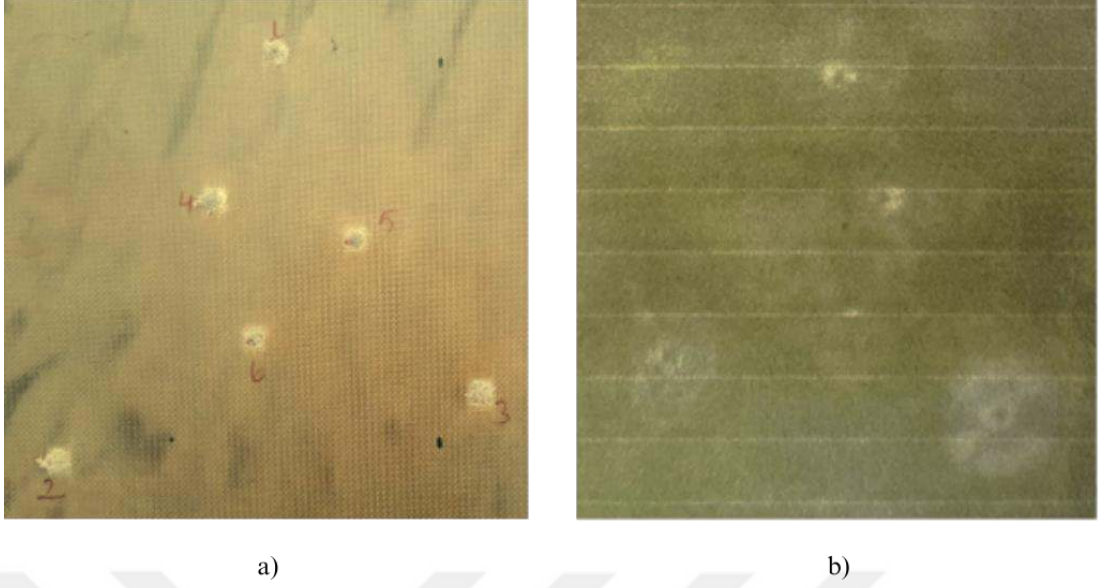
%0,5 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhada balistik darbe deneyin ortalama olarak 428,3 m/s hızda, ortalama penetrasyon derinliğinin ise 17,72 mm olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, NIJ 0101.04 standardın değeri olan 44 mm aşılmadığı için başarılı olarak sonuçlanmıştır.

Şekil 7.13'te %0,5 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi için atış hızı ve penetrasyon derinliği arasındaki ilişki verilmiştir. Bu deneydeki maksimum penetrasyon derinliği değeri 431 m/s hızında 21,98 mm olarak gerçekleşmiştir. En düşük penetrasyon derinliği ise 427 m/s hızında 14,44 mm olarak gerçekleşmiştir.

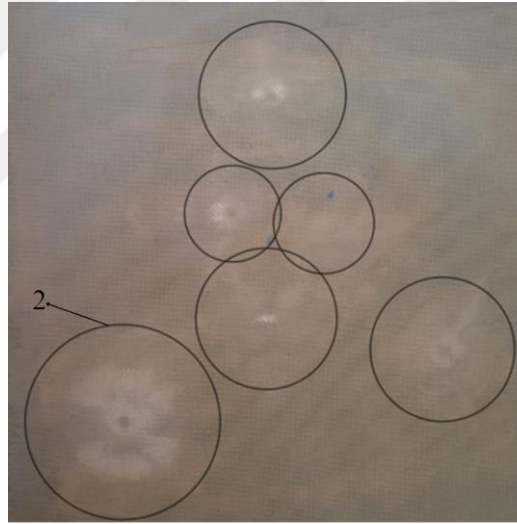


Şekil 7.13 % 0,5 B₄C kompozit levha penetrasyon derinliği grafiği

%0,5 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhanın Şekil 7.14'te balistik darbe deneyi sonrası hasarları görülmektedir.



Şekil 7.14 %0,5 B₄C atış yapılmış kompozit levha a) Ön yüz b) Arka yüz



Şekil 7.15 %0,5 B₄C kompozit levha balistik deney sonrası oluşan delaminasyon alanı

%0,5 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi levhada yapılan atış sonrası hedef numunenin arka tarafta 2. Atışta oluşan deformasyonun, en büyük delaminasyon alanı oluşturduğu gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 7.15).

7.1.4 Balistik test sonuçlarının karşılaştırılması

Tüm numunelerin balistik darbe deneyi sonuçları Tablo 7.8’de verilmektedir. 11 tabakalı, 20 tabakalı ve 30 tabakalı numunelerin perforasyon ve penetrasyon derinlikleri değerleri paylaşılmıştır.

Tablo 7.8 Balistik darbe deneyi sonuçları

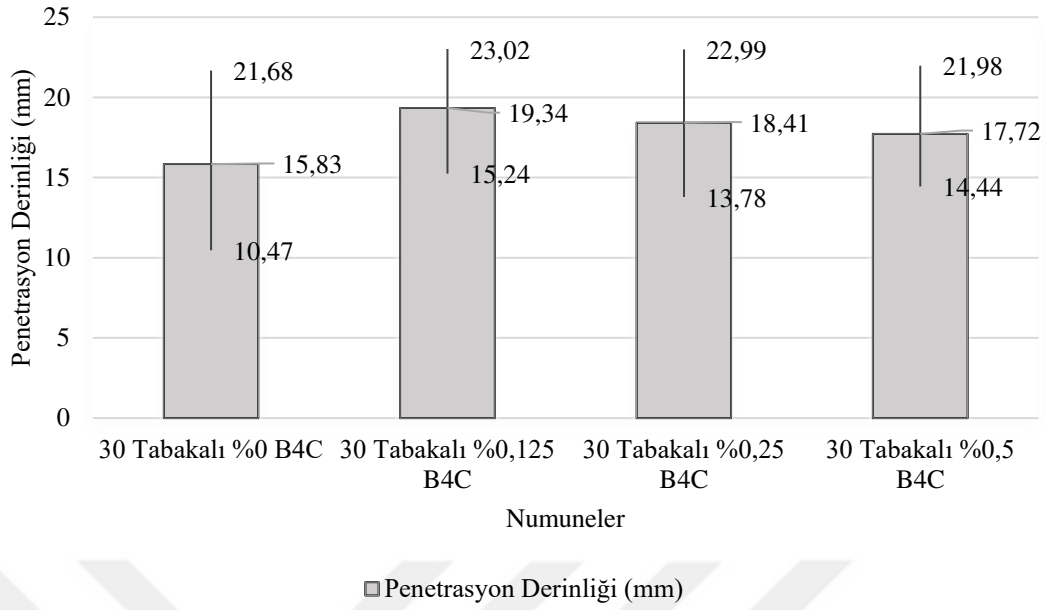
Tabaka Sayısı	Num. No	Fiber Dizilim	Matris	B4C (%)	Zırh Tipi	Atış No	Kullanılan Mermi Tipi	Mermi Hızı (m/s)	Perforasyon	Penetrasyon Derinliği (mm)
11	1	11K	Epoksi	-	IIIA	1	9mm FMJ	429	Delindi	-
					IIIA	2	9mm FMJ	432	Delindi	-
					II	3	9mm FMJ	360	Delindi	-
					II	4	9mm FMJ	363	Delindi	-
					IIIA	5	9mm FMJ	433	Delindi	-
					II	6	9mm FMJ	363	Delindi	-
					IIA	7	9mm FMJ	344	Delinmedi	12,11
	2	3K/1C/3K/1C/3K	Epoksi	-	IIIA	1	9mm FMJ	438	Delindi	-
					IIIA	2	9mm FMJ	431	Delindi	-
					IIA	3	9mm FMJ	342	Delindi	-
					IIA	4	9mm FMJ	342	Delindi	-
					IIIA	5	9mm FMJ	435	Delindi	-
					IIA	6	9mm FMJ	348	Delindi	-
	3	4K/3C/4K	Epoksi	-	IIIA	1	9mm FMJ	433	Delindi	-
					IIIA	2	9mm FMJ	436	Delindi	-
					IIA	3	9mm FMJ	348	Delindi	-
					II	4	9mm FMJ	363	Delindi	-
					IIIA	5	9mm FMJ	434	Delindi	-
20	1	20K	Epoksi	-	IIIA	1	9mm FMJ	436	Delindi	-
30	1	30K	Epoksi	-	IIIA	1	9mm FMJ	430	Delinmedi	15,13
					IIIA	2	9mm FMJ	434	Delinmedi	21,68
					IIIA	3	9mm FMJ	433	Delinmedi	14,71
					IIIA	4	9mm FMJ	434	Delinmedi	10,47
					IIIA	5	9mm FMJ	430	Delinmedi	15,02
					IIIA	6	9mm FMJ	435	Delinmedi	18,02
	2	30K	Epoksi	0,125	IIIA	1	9mm FMJ	427	Delinmedi	21,39
					IIIA	2	9mm FMJ	430	Delinmedi	21,93
					IIIA	3	9mm FMJ	428	Delinmedi	15,42
					IIIA	4	9mm FMJ	426	Delinmedi	15,24
					IIIA	5	9mm FMJ	427	Delinmedi	19,04
					IIIA	6	9mm FMJ	428	Delinmedi	23,02
	3	30K	Epoksi	0,25	IIIA	1	9mm FMJ	427	Delinmedi	17,72
					IIIA	2	9mm FMJ	429	Delinmedi	13,78
					IIIA	3	9mm FMJ	427	Delinmedi	16,81
					IIIA	4	9mm FMJ	428	Delinmedi	18,39
					IIIA	5	9mm FMJ	428	Delinmedi	20,82
					IIIA	6	9mm FMJ	428	Delinmedi	22,99
	4	30K	Epoksi	0,5	IIIA	1	9mm FMJ	427	Delinmedi	19,08
					IIIA	2	9mm FMJ	428	Delinmedi	18,86
					IIIA	3	9mm FMJ	427	Delinmedi	14,44
					IIIA	4	9mm FMJ	427	Delinmedi	17,33
					IIIA	5	9mm FMJ	430	Delinmedi	14,65
					IIIA	6	9mm FMJ	431	Delinmedi	21,98

11 tabakalı Kevlar/Epoksi levhada; IIA seviyesinde yapılan testin dışında diğer hız ve seviyede yapılan testler sonucunda levhalarda delinme gerçekleşmiştir. Balistik çarpma sırasında hedef mermiden hedefe meydana gelen enerji aktarımı, Kevlar/Epoksi'nin yoğunluğuna, çekme mukavemetine, sertliğine, tokluğuna, kopma gerilimine, gerinim-gerilme ilişkisine ve kırılma tokluğuna bağlıdır [95]. Dolayısıyla bu çalışmada da her üç seviyedeki atışlar sonucunda balistik darbe sırasında fiber-matris hasarlarının oluştuğu, matris çatlaması ve fiber kırılmaları meydana geldiği de tespit edilmiştir. Aynı zamanda katmanlar arasında oluşan kayma gerilmesi nedeniyle delaminasyon meydana gelmiştir[95].

Bu çalışmada hedef levhaların atış seviyesine göre arka yüzünde meydana gelen hasar bölgeleri incelenerek, balistik direnç gözlemlenmiştir. IIIA ve IIA seviyesinde yapılan atışlar sonrasında 3K/1G/3K/1G/3K dizilimli hibrit kompozit levhada etkilenen hasar bölgesinin (matriks çatlamalarının), diğer hibrit levhanın etkilenen bölgesine göre daha az olduğu gözlemlenmiştir. Her üç levhada da çarpma sonrası gerilme dalgası yayılımından dolayı [10] arka yüzeyde etkilenen hasar bölgesinin, ön yüzdeki hasar bölgelerine göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Delinen tüm levhalarda matris çatlamaları ve fiber kırılmaları meydana gelmiştir.

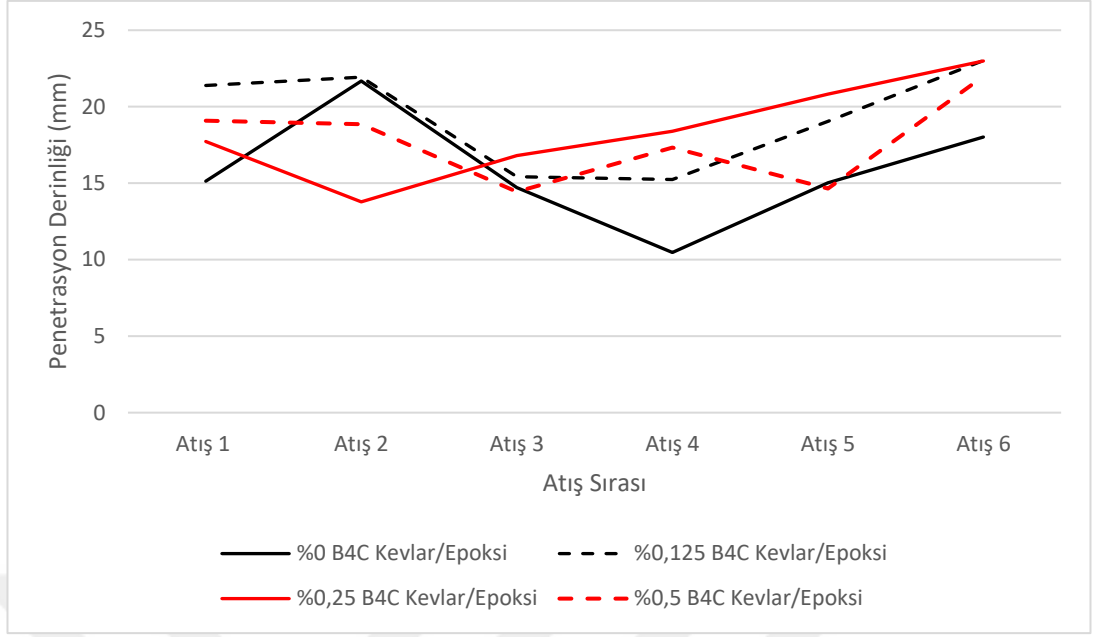
20 tabakalı Kevlar/Epoksi levhada, III A seviyesinde tam delinme gerçekleştiği için başarısız sonuçlanmıştır.

30 tabakalı Kevlar/Epoksi ve B₄C katkılı Kevlar /Epoksi levhalarda IIIA seviyesinde yapılan deneylerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Tüm deneylerin penetrasyon derinliği Şekil 7.16'da verilmiştir.



Şekil 7.16 30 tabakalı kompozit levhalarda balistik darbe deneyi penetrasyon derinliği sonuçları

Şekil 7.16’da 30 tabakalı numunelerin ortalama penetrasyon değerleriyle ve minimum-maksimum penetrasyon aralığını değerlendirdiğimizde, en yüksek penetrasyon derinliği ortalamasına sahip 19,34 mm olarak %0,125 B₄C nano katkıli kompozit malzemedir. Ağırlıkça %0,125 B₄C katkıli olan kompozit malzemenin, katkısız olan kompozit malzemeye göre penetrasyon derinliği artarken, B₄C katkı oranının artışı ile de penetrasyon derinliğinin düşüşü görülmektedir. En düşük penetrasyon derinliği ortalaması 15,83 mm ile nano katkısız olan malzeme olduğu görülmüştür. Fakat penetrasyon derinlik aralıkları incelendiğinde, yüksek penetrasyon aralığına sahip numune olduğu da görülmüştür. %0 B₄C katkıli numunenin diğer numunelere göre en düşük penetrasyon derinliğine sahip fakat numune üzerindeki atışlardan sonra oluşan penetrasyon derinlikleri incelendiğinde en yüksek penetrasyon derinlik aralığına sahip olduğu görülmüştür. %0,5 B₄C katkıli numunede ise %0,125, %0,25 katkıli numunelere göre penetrasyon derinliği aralığının en düşük olduğu görülmüştür. Chagas [24] yaptığı çalışmada B₄C katkı oranlarının artması ile balistik performansta en yüksek oranda toplanmadan kaynaklı düşüş olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada ise b₄c katkı oranının artması ile penetrasyon derinliğinde olumlu iyileşmeler elde edilmiştir.



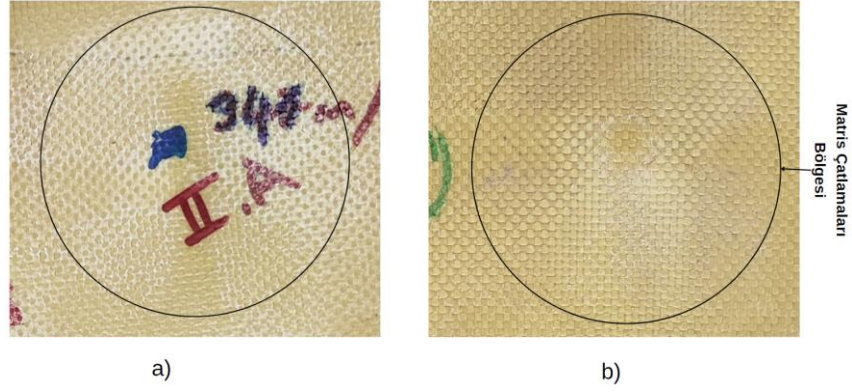
Şekil 7.17 Atış sıralaması penetrasyon derinliği ilişkisi grafiği

Atış sıralamasının penetrasyon derinliğiyle ilişkisi incelendiğinde 6. atış itibariyle penetrasyon derinliğinde artış gözlemlenmiştir. Bunun hedef numunenin önceki darbelerde oluşan deformasyonun diğer bölgeleri de etkileyerek oluşan deformasyonu arttırdığını düşünülmektedir (Bkz. Şekil 7.17).

7.2 Hasar Mekanizmaları Açısından Değerlendirme

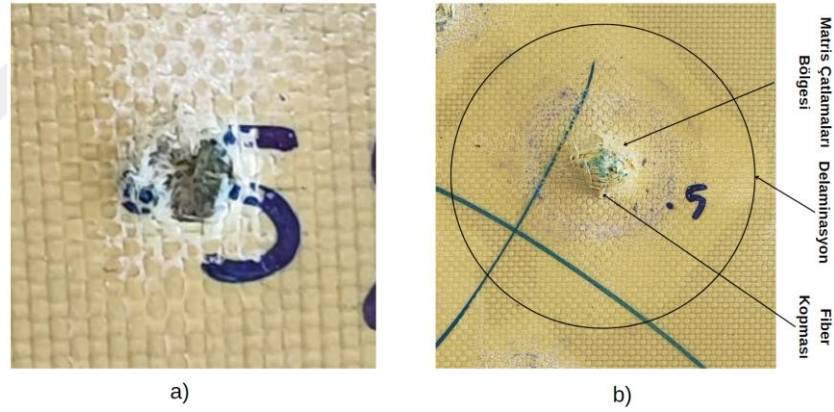
Çalışmamızda 11 tabakalı, 20 tabakalı ve 30 tabakalı numunelere balistik darbe deneyleri uygulandıktan sonra hasar tipleri açısından değerlendirilme yapılmıştır.

11 tabakalı Kevlar/Epoksi levha üzerinde yapılan IIA seviye testi dışında, diğer hız ve seviyelerde yapılan testler sonucunda levhalarda perforasyon meydana gelmiştir. Şekil 7.18b’de Kevlar/Epoksi levhanın IIA seviyesinde etkilenen bölgede perforasyon oluşmamış, ancak matris çatlamları ile bombeleşme meydana gelmiştir.



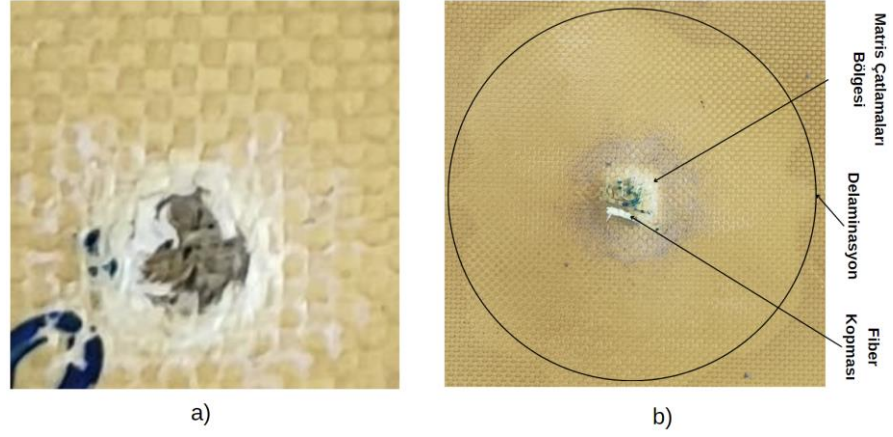
Şekil 7.18 11 tabakalı Kevlar/Epoksi levhası IIA seviyesi hasar görüntüsü a) ön yüz b) arka yüz

11 tabakalı 4K/3C/4K dizilimli levhanın ön yüzeyinde merminin yarattığı deformasyon görülmektedir (Bkz. Şekil 7.19). Arka yüzeyde oluşan delaminasyona sebep olan matris çatlakları ile birlikte fiber kırılmaları meydana gelmiştir (Bkz. Şekil 7.19b).



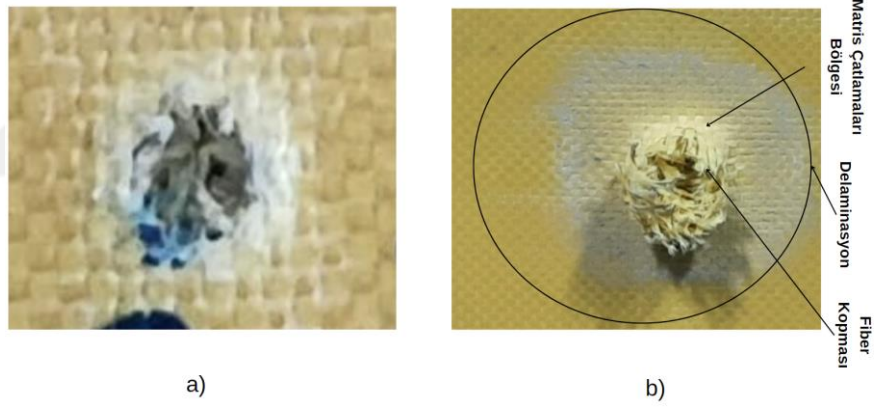
Şekil 7.19 11 tabakalı 4K/3C/4K dizilimli levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü a) ön yüz b) arka yüz

11 tabakalı 3K/1C/3K/1C/3K dizilimli levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsünde, perforasyon esnasında da ön tarafta delaminasyon meydana gelmiştir (Bkz. Şekil 7.20b). Arka yüz incelendiğinde delaminasyon, matris çatlakları ve fiber kırılmaları meydana gelmiştir (Bkz. Şekil 7.20b).



Şekil 7.20 11 tabakalı 3K/1C/3K/1C/3K dizimli levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü a) ön yüz b) arka yüz

11 tabakalı Kevlar/Epoksi levha IIIA seviyesinde ön tarafta delaminasyon oluşmuştur (Bkz. Şekil 7.21a). Arka yüzde ise delaminasyon, matris çatlakları ve fiber kırılmaları meydana gelmiştir (Bkz. Şekil 7.21b).



Şekil 7.21 Şekil 7.21 11 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü a) ön yüz b) arka yüz

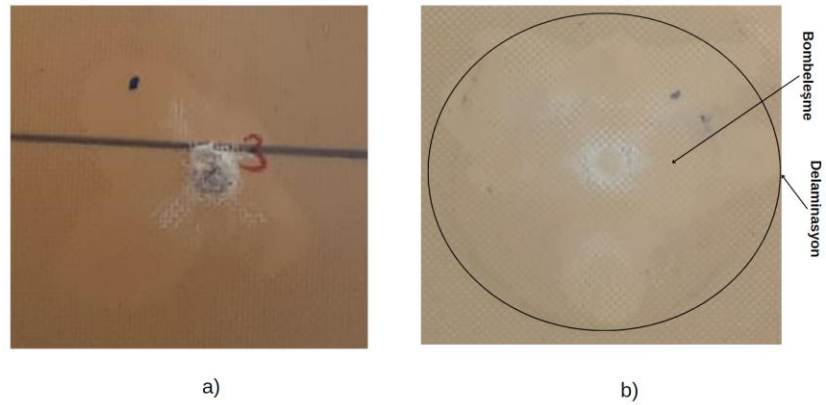
11 tabakalı 11K ve 11 tabakalı hibridizasyon işlemi uygulanan 3K/1C/3K/1C/3K ve 4K/3C/4K numunelerinde dizilim ve katman sayısına bağlı olarak deformasyon değişiklikleri tespit edilmiştir.

20 tabakalı Kevlar/Epoksi balistik darbe deneyinde perforasyon oluşmuştur. 20 tabakalı levhada matris çatlakları, delaminasyon ve fiber kopmaları meydana gelmiştir (Bkz. Şekil 7.22).



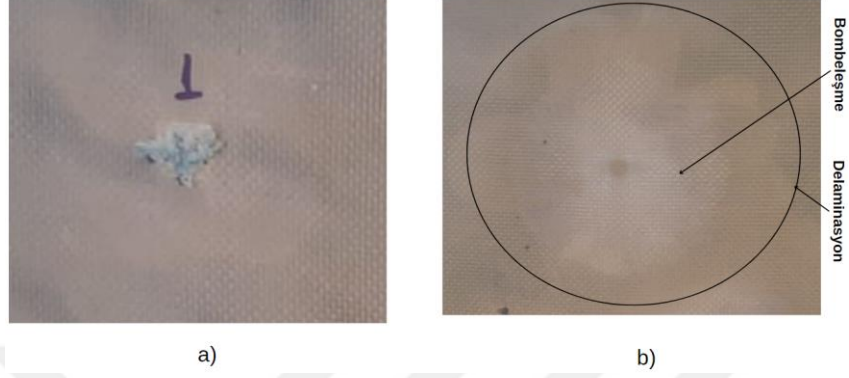
Şekil 7.22 20 Tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü a) ön yüz b) arka yüz

30 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit numunelere sırasıyla, %0, %0,125, %0,25 ve %0,5 oranlarında B₄C katkısının deformasyon değişiklikleri gözlemlenmiştir. B₄C oranının artmasıyla birlikte, belirli atışlarda delaminasyonun büyüdüğü gözlemlenmiştir. %0 B₄C Kevlar/Epoksi kompozit levhada arka yüzeyde delaminasyon ve bombeleşme ile ön yüzde fiber kırılmaları, matris çatlakları ve delaminasyon görülmektedir (Bkz. Şekil 7.23).



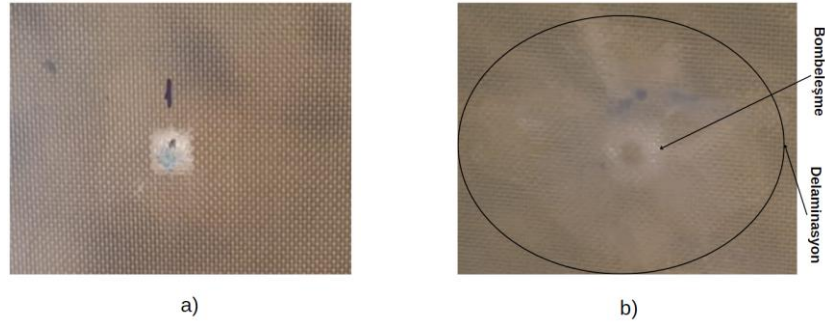
Şekil 7.23 30 tabakalı %0 B₄C Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü a) ön yüz b) arka yüz

30 tabakalı %0,125 B₄C Kevlar/Epoksi kompozit levhada arka yüzeyde delaminasyon ve bombeleşme ile ön yüzde fiber kırılmaları, matris çatlakları ve delaminasyon görülmektedir (Bkz. Şekil 7.24).



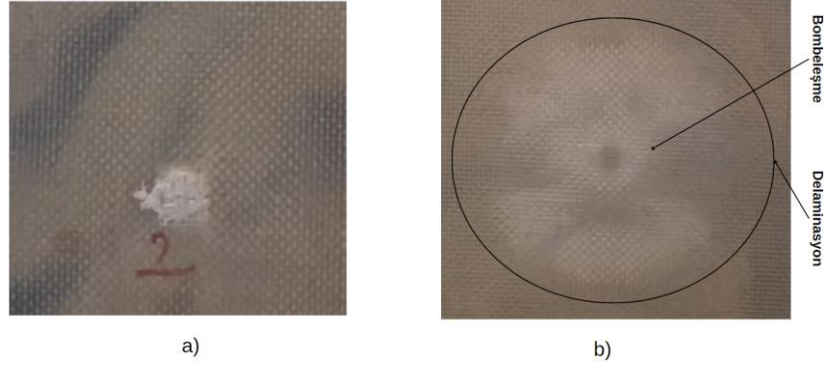
Şekil 7.24 30 tabakalı %0,125 B₄C Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü a) ön yüz b) arka yüz

30 tabakalı %0,25 B₄C Kevlar/Epoksi kompozit levhada arka yüzeyde delaminasyon ve bombeleşme ile ön yüzde fiber kırılmaları, matris çatlakları ve delaminasyon görülmektedir (Bkz. Şekil 7.25).



Şekil 7.25 30 tabakalı %0,25 B₄C Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü a) ön yüz b) arka yüz

30 tabakalı %0,5 B₄C Kevlar/Epoksi kompozit levhada arka yüzeyde delaminasyon ve bombeleşme ile ön yüzde fiber kırılmaları, matris çatlakları ve delaminasyon görülmektedir (Bkz. Şekil 7.26).



Şekil 7.26 30 tabakalı %0,5 B4C Kevlar/Epoksi kompozit levhanın IIIA seviyesi hasar görüntüsü a) ön yüz b) arka yüz

Bu çalışmada balistik darbe deneylerinde, kompozit levhalarda yoğun olarak delaminasyon, matris çatlamları ve fiber kırılmaları görülmüştür. Delinmeyen kompozit levhalarda arka yüzeylerde bombeleşme, ön yüzeylerde ise fiber kırılmaları, delaminasyon ve matris çatlamları hasar tipleri görülmüştür.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı kalınlıklarda/tabakalarda üretilmiş kompozit levhaların balistik dirençleri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. I. aşamada 11 tabakalı Kevlar/Epoksi levhalar üretilmiştir. Ayrıca Kevlar/Epoksi, Cam fiber takviyeli epoksi tabakalar ile iki farklı dizilimle hibrit olarak da üretilmişlerdir. 3K/1C/3K/1C/3K ve 4K/3C/4K dizilimine sahip olarak üretilen hibrit kompozit levhalarda balistik teste tabi tutulmuşlardır. II. aşamada 20 tabakalı Kevlar/Epoksi levhalar üretilmiştir. III. aşamada ise 30 tabakalı Kevlar/Epoksi levhalar üretilmiştir. Ayrıca 30 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhaya %0,05, %0,125, %0,25 oranlarında B₄C eklenerek, B₄C katkılı Kevlar/Epoksi nanokompozitler üretilmiştir. Tüm üretimler elle yatırma yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen tüm levhaların standarda göre kesimi gerçekleştirildikten sonra balistik dirençlerini araştırmak için NIJ 0101.04 standardına göre balistik teste tabi tutulmuşlardır. Yapılan balistik testte levhalarda FMJ RN 9x19 mm çapında mermiler kullanılmıştır.

8.1 Sonuçlar

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- 11 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha IIIA ve II seviyesinde delinmiştir.
- 11 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levha IIA seviyesinde delinmemiş ve 12.11 mm penetrasyon derinliği elde edilmiştir. Elde edilen penetrasyon derinliği NIJ 0101.04 standartlarında belirtilen değerin altında başarılı olarak gerçekleşmiştir.
- 11 tabakalı 3K/1C/3K/1C/3K dizilimli hibrit kompozit levha ve 11 tabakalı 4K/3C/4K dizilimli hibrit kompozit levha tüm seviyelerdeki hızlarda delinmiştir.
- 11 tabakalı delinen tüm levhalarda matris çatlamaları ve fiber kırılmaları meydana gelmiştir.
- 20 tabakalı Kevlar/Epoksi kompozit levhaya IIIA seviyesinde yapılan atışta delinme gerçekleşmiştir.
- 30 tabakalı Kevlar/Epoksi Kompozit levhada IIIA seviyesinde yapılan atışta delinme gerçekleşmemiştir. Elde edilen çöküntü miktarı NIJ standartlarında belirtilen değerin altında gerçekleştirilmiştir. 432,7 m/s ortalama hızda, 15,84 mm ortalama mm ortalama penetrasyon derinliği elde edilmiştir. Elde edilen

penetrasyon derinliği NIJ 0101.04 standartlarında belirtilen değerin altında gerçekleşmiştir.

- 30 tabakalı %0,125 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi kompozit levhada IIIA seviyesinde yapılan atışlarda delinme gerçekleşmemiştir. Ortalama 427,7 m/s hızda ve 19,34 mm penetrasyon derinliği elde edilmiştir. Elde edilen penetrasyon derinliği NIJ 0101.04 standartlarında belirtilen değerin altında başarılı olarak gerçekleşmiştir.
- 30 tabakalı %0,25 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi kompozit levhada IIIA seviyesinde yapılan atışlarda delinme gerçekleşmemiştir. Ortalama 427,8 m/s hızda ve 18,42 mm penetrasyon derinliği elde edilmiştir. Elde edilen penetrasyon derinliği NIJ 0101.04 standartlarında belirtilen değerin altında başarılı olarak gerçekleşmiştir.
- 30 tabakalı %0,5 B₄C katkılı Kevlar/Epoksi kompozit levhada IIIA seviyesinde yapılan atışlarda delinme gerçekleşmemiştir. Ortalama 428,3 m/s hızda ve 17,72 mm penetrasyon derinliği elde edilmiştir. Elde edilen penetrasyon derinliği NIJ 0101.04 standartlarında belirtilen değerin altında başarılı olarak gerçekleşmiştir.

8.2 Öneriler

- Yapılan çalışmada hibrit kompozitlerde cam fiber ve Kevlar kumaşın yeri ve kat sayıları değıştirilerek çalışma genişletilebilir.
- Yapılan alışmada B₄C oranı artırılarak Kevlar/Epoksi kompozit levhadaki balistik direnç karşılaştırılması genişletilebilir.
- Yapılan bu çalışmadaki sonuçların balistik alanda yapılacak çalışmalara katkı sunacağı kanaatindeyiz.

KAYNAKLAR

- [1] P. J. Hazell, *Armour: Materials, theory, and design*. 2015. doi: 10.1201/b18683.
- [2] A. Prakash, M. Fasil, and N. Anandavalli, "Ballistic performance of optimised light weight composite armour," *Forces in Mechanics*, vol. 12, p. 100216, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.FINMEC.2023.100216.
- [3] S. Wu, P. Sikdar, and G. S. Bhat, "Recent progress in developing ballistic and anti-impact materials: Nanotechnology and main approaches," *Defence Technology*, vol. 21, pp. 33–61, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.DT.2022.06.007.
- [4] "https://tr.wikipedia.org/wiki/Bor_karb%C3%BCr."
- [5] K. S. Pandya, J. R. Pothnis, G. Ravikumar, and N. K. Naik, "Ballistic impact behavior of hybrid composites," *Mater Des*, vol. 44, pp. 128–135, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.MATDES.2012.07.044.
- [6] R. Yahaya, S. M. Sapuan, M. Jawaidd, Z. Leman, and E. S. Zainudin, "Measurement of ballistic impact properties of woven kenaf–aramid hybrid composites," *Measurement*, vol. 77, pp. 335–343, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2015.09.016.
- [7] E. Palta, M. Gutowski, and H. Fang, "A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic impacts," *Int J Solids Struct*, vol. 136–137, pp. 279–294, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.IJSOLSTR.2017.12.021.
- [8] V. Mahesh, S. Joladarashi, and S. M. Kulkarni, "Comparative study on ballistic impact response of neat fabric, compliant, hybrid compliant and stiff composite," *Thin-Walled Structures*, vol. 165, p. 107986, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.TWS.2021.107986.
- [9] L. Peng et al., "Investigations of the ballistic response of hybrid composite laminated structures," *Compos Struct*, vol. 282, p. 115019, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.115019.
- [10] P. Karthick and K. Ramajeyathilagam, "Numerical study on ballistic impact behavior of hybrid composites," *Mater Today Proc*, vol. 59, pp. 995–1003, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.02.270.
- [11] A. Nugroho, Triastuti, S. Sufiandi, and A. Z. Syahrial, "Energy absorption of densified veneer-aramid hybrid composites subjected to ballistic impact," *Heliyon*, vol. 8, no. 8, p. e10271, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.HELİYON.2022.E10271.
- [12] P. Sathyaseelan, K. Raja, M. Arun Prasad, and J. Manivannan, "Experimental investigation on the ballistic impact properties of areca/kenaf fiber- reinforced hybrid epoxy composite plates," *Mater Today Proc*, vol. 68, pp. 2195–2198, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.08.432.
- [13] Z. yong Li, Y. song Xue, B. zhong Sun, and B. hong Gu, "Ballistic penetration damages of hybrid plain-woven laminates with carbon, Kevlar and UHMWPE fibers in different stacking sequences," *Defence Technology*, vol. 26, pp. 23–38, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.DT.2022.07.006.
- [14] A. Kumar Sah, R. Kumar Pathak, and S. Patel, "Design and analysis of hybrid composite panels under ballistic impact," *Mater Today Proc*, vol. 87, pp. 104–109, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.02.031.

- [15] R. Kumar Pathak, S. Patel, and V. Kumar Gupta, "Novel hybrid design of composite armour under ballistic impact," *Mater Today Proc*, vol. 87, pp. 55–60, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.09.178.
- [16] J. Xu et al., "Hybridization effects on ballistic impact behavior of carbon/ aramid fiber reinforced hybrid composite," *Int J Impact Eng*, vol. 181, p. 104750, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2023.104750.
- [17] C. Y. Tham, V. B. C. Tan, and H. P. Lee, "Ballistic impact of a KEVLAR® helmet: Experiment and simulations," *Int J Impact Eng*, vol. 35, no. 5, pp. 304–318, May 2008, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2007.03.008.
- [18] A. K. Bandaru, V. V. Chavan, S. Ahmad, R. Alagirusamy, and N. Bhatnagar, "Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors," *Int J Impact Eng*, vol. 89, pp. 1–13, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2015.10.014.
- [19] T. L. Chu, C. Ha-Minh, and A. Imad, "A numerical investigation of the influence of yarn mechanical and physical properties on the ballistic impact behavior of a Kevlar KM2® woven fabric," *Compos B Eng*, vol. 95, pp. 144–154, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2016.03.018.
- [20] I. Rubio, M. Rodríguez-Millán, M. Marco, A. Olmedo, and J. A. Loya, "Ballistic performance of aramid composite combat helmet for protection against small projectiles" *Compos Struct*, vol. 226, p. 111153, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.111153.
- [21] J. Pinkos, Z. Stempień, and A. Smędra, "Experimental analysis of ballistic trauma in a human body protected with 30 layer packages made of biaxial and triaxial Kevlar® 29 fabrics," *Defence Technology*, vol. 21, pp. 73–87, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.DT.2022.07.004.
- [22] R. Stopforth and S. Adali, "Experimental study of bullet-proofing capabilities of Kevlar, of different weights and number of layers, with 9 mm projectiles," *Defence Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 186–192, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.DT.2018.08.006.
- [23] Y. J. Xu, H. Zhang, and G. Y. Huang, "Ballistic performance of B4C/STF/Twaron composite fabric," *Compos Struct*, vol. 279, p. 114754, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.114754.
- [24] N. P. da S. Chagas et al., "Ballistic performance of boron carbide nanoparticles reinforced ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE)," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 17, pp. 1799–1811, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.JMRT.2022.01.104.
- [25] X. Huang et al., "Hypervelocity impact damage behavior of B4C/Al composite for MMOD shielding application," *Mater Des*, vol. 186, p. 108323, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.MATDES.2019.108323.
- [26] Y. Zhang, H. Dong, K. Liang, and Y. Huang, "Impact simulation and ballistic analysis of B4C composite armour based on target plate tests," *Ceram Int*, vol. 47, no. 7, pp. 10035–10049, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2020.12.150.
- [27] S. Suresh Kumar, P. A. Shankar, and K. Lalith Kumar, "Failure investigation on high velocity impact deformation of boron carbide (B4C) reinforced fiber metal

laminates of titanium / glass fiber reinforced polymer,” Defence Technology, vol. 18, no. 6, pp. 963–975, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.DT.2021.04.006.

[28] Z. Zhou, G. Wu, L. Jiang, R. Li, and Z. Xu, “Analysis of morphology and microstructure of B₄C/2024Al composites after 7.62 mm ballistic impact,” Mater Des, vol. 63, pp. 658–663, Nov. 2014, doi: 10.1016/J.MATDES.2014.06.042.

[29] C. Lo, H. Li, G. Toussaint, and J. D. Hogan, “On the evaluation of mechanical properties and ballistic performance of two variants of boron carbide,” Int J Impact Eng, vol. 152, p. 103846, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.IJIMPENG.2021.103846.

[30] A. Sharma, S. Srinivasan K V, M. Dixit, A. K. Gupta, and R. Sujith, “Ballistic performance of functionally graded boron carbide reinforced Al – Zn – Mg – Cu alloy,” Journal of Materials Research and Technology, vol. 18, pp. 4042–4059, May 2022, doi: 10.1016/J.JMRT.2022.04.059.

[31] W. Yiding et al., “Breaking behavior and stress distribution of T12A hard steel core penetrating ceramic/aluminum alloy lightweight composite armor,” Mater Today Commun, vol. 37, p. 107115, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.MTCOMM.2023.107115.

[32] Y. Wu et al., “Research on the anti-penetration behavior and failure mode analysis of different ceramics,” Ceram Int, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2023.08.300.

[33] Z. L. Chao et al., “The microstructure and ballistic performance of B₄C/AA2024 functionally graded composites with wide range B₄C volume fraction,” Compos B Eng, vol. 161, pp. 627–638, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2018.12.147.

[34] Z. L. Chao et al., “Ballistic behavior and microstructure evolution of B₄C/AA2024 composites,” Ceram Int, vol. 45, no. 16, pp. 20539–20544, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2019.07.033.

[35] H. Wang, J. Wang, K. Tang, X. Chen, and Y. Li, “Investigation on the Damage Mode and Anti-penetration Performance of B₄C/UHMWPE Composite Targets for Different Incident Velocities and Angles,” J Phys Conf Ser, vol. 1855, no. 1, p. 12010, Mar. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1855/1/012010.

[36] Metin Gül, “Bor karbür (B₄C) ve grafen nano partikül (GNP) takviyeli alüminyum (AA7075) matrisli kompozit zırh tasarımı ve balistik özelliklerinin incelenmesi,” Millî Savunma Üniversitesi, Ankara, 2022.

[37] A. K. Kaw, Mechanics of composite materials, second edition. 2005.

[38] I. M. Daniel and Ori. Ishai, “Engineering Mechanics Of Composite Materials Second Edition Ori Ishai,” dp, 2018.

[39] Ahmet Aran, “Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler,” İstanbul, MK. 575, 1990.

[40] P. K. Mallick, Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design, third edition. 2007.

[41] T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, “Glass fiber-reinforced polymer composites – a review,” Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 33, no. 13, pp. 1258–1275, Apr. 2014, doi: 10.1177/0731684414530790.

[42] S. T P, S. Satheeshkumar, and N. Jesuarockiam, “Glass fiber-reinforced polymer composites - A review,” Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 33, pp. 1258–1275, Jun. 2014, doi: 10.1177/0731684414530790.

- [43] M. Ertekin, "Aramid fibers," *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, pp. 153–167, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-08-101871-2.00007-2.
- [44] C. Arvinte, A. V. Sandu, D. D. Burduhos Nergis, M.-A. Bernevig, and C. Bejinariu, "Technical requirements and materials used in firefighters gloves manufacturing," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 572, p. 012070, Aug. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/572/1/012070.
- [45] M. Ismail, M. T. Hameed Sultan, A. Hamdan, and A. Md. Shah, "Kenaf Kevlar hybrid composites," *Bioresources*, Jan. 2018.
- [46] P. S, S. KM, N. Kundachira Subramani, and S. S, "Fiber Reinforced Composites-A Review," *Journal of Material Science & Engineering*, vol. 06, Jan. 2017, doi: 10.4172/2169-0022.1000341.
- [47] S. Al Zahmi, S. Alhammad, A. ElHassan, and W. Ahmed, "Carbon Fiber/PLA Recycled Composite," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 11, 2022, doi: 10.3390/polym14112194.
- [48] Y. Liu, B. Zwingmann, and M. Schlaich, "Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures—A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 7, pp. 2078–2099, Oct. 2015, doi: 10.3390/polym7101501.
- [49] "https://theconstructor.org/building/building-material/advanced-composite-materials-acms/1604/."
- [50] A. Isa, N. Nosbi, M. Che Ismail, H. Md Akil, W. F. F. Wan Ali, and M. F. Omar, "A Review on Recycling of Carbon Fibres: Methods to Reinforce and Expected Fibre Composite Degradations," *Materials*, vol. 15, no. 14, 2022, doi: 10.3390/ma15144991.
- [51] J. F. Kadla, S. Kubo, R. A. Venditti, R. D. Gilbert, A. L. Compere, and W. Griffith, "Lignin-based carbon fibers for composite fiber applications," *Carbon N Y*, vol. 40, no. 15, pp. 2913–2920, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0008-6223(02)00248-8.
- [52] L. Han, H. Cai, X. Chen, C. Zheng, and W. Guo, "Study of UHMWPE fiber surface modification and the properties of uhmwpe/epoxy composite," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: 10.3390/polym12030521.
- [53] S. L. Wu et al., "Nascent disentangled UHMWPE: Origin, synthesis, processing, performances and applications," *Eur Polym J*, vol. 184, p. 111799, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2022.111799.
- [54] A. R. Horrocks and S. C. Anand, *Handbook of Technical Textiles: Second Edition*, vol. 1. 2015. doi: 10.1016/C2015-0-01011-5.
- [55] Y. He, Y. Jiao, J. Q. Zhou, D. Zhang, H. Lei, and L. Chen, "Influence of projectile physical state on ballistic energy absorption capacity of UHMWPE laminate: Experiment and simulation," *Compos Struct*, vol. 326, p. 117607, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2023.117607.
- [56] A. R. Bhat, R. Kumar, and P. K. S. Mural, "Natural fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review of Tribo-Mechanical properties," *Tribol Int*, vol. 189, p. 108978, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.TRIBOINT.2023.108978.
- [57] S. Doddamani, S. M. Kulkarni, S. Joladarashi, M. K. T S, and A. K. Gurjar, "Analysis of light weight natural fiber composites against ballistic impact: A review,"

International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, vol. 6, no. 3, pp. 450–468, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.IJLMM.2023.01.003.

[58] A. K. Sharma, R. Bhandari, A. Aherwar, and R. Rimašauskiene, “Matrix materials used in composites: A comprehensive study,” *Mater Today Proc*, vol. 21, pp. 1559–1562, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2019.11.086.

[59] T. Akbari, A. Ansari, and M. Rahimi Pishbijari, “Influence of aluminum alloys on protection performance of metal matrix composite armor reinforced with ceramic particles under ballistic impact,” *Ceram Int*, vol. 49, no. 19, pp. 30937–30950, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2023.07.046.

[60] J. J. Schuldies and R. Nageswaran, “Ceramic matrix composites for ballistic protection of vehicles and personnel,” *Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites*, pp. 235–243, Jan. 2010, doi: 10.1533/9781845698034.2.235.

[61] J. Sun et al., “A review on additive manufacturing of ceramic matrix composites,” *J Mater Sci Technol*, vol. 138, pp. 1–16, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.JMST.2022.06.039.

[62] A. Kumar Sharma, R. Bhandari, C. Sharma, S. Krishna Dhakad, and C. Pinca-Bretotean, “Polymer matrix composites: A state of art review,” *Mater Today Proc*, vol. 57, pp. 2330–2333, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.12.592.

[63] M. Biron, *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, Second Edition. 2012. doi: 10.1016/C2011-0-05605-3.

[64] M. Gupta, R. Srivastava, and H. Bisaria, “Potential of Jute Fibre Reinforced Polymer Composites: A review,” *International Journal of Fiber and Textile Research*, vol. 5, pp. 30–38, Aug. 2015.

[65] K. Balasubramanian, M. T. H. Sultan, and N. Rajeswari, “Manufacturing techniques of composites for aerospace applications,” *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, pp. 55–67, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-08-102131-6.00004-9.

[66] M. Raji, H. Abdellaoui, H. Essabir, C. A. Kakou, R. Bouhfid, and A. El Kacem Qaiss, “Prediction of the cyclic durability of woven-hybrid composites,” *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, pp. 27–62, Jan. 2019, doi: 10.1016/B978-0-08-102290-0.00003-9.

[67] N. Baig, I. Kammakakam, and W. Falath, “Nanomaterials: A review of synthesis, properties, recent progress, and challenges,” *Mater Adv*, vol. 2, Feb. 2021, doi: 10.1039/D0MA00807A.

[68] N. H. Al-Mutairi, A. H. Mehdi, and B. J. Kadhim, “Nanocomposites Materials Definitions, Types and Some of Their Applications: A Review,” *European Journal of Research Development and Sustainability*, vol. 3, no. 2, pp. 102–108, 2022.

[69] M. Uddin, D. P.S., and R. Asmatulu, “Synthesis, Characterization, and Applications of Polymer based Biomaterials,” 2019, p. 39.

[70] I. Khan et al., “Polymer nanocomposites: an overview,” *Smart Polymer Nanocomposites: Design, Synthesis, Functionalization, Properties, and Applications*, pp. 167–184, Jan. 2023, doi: 10.1016/B978-0-323-91611-0.00017-7.

- [71] V. Lakshmi, A. S. Karun, and T. P. D. Rajan, "Polymeric nanocomposites," *Nanotechnology in the Automotive Industry*, pp. 37–63, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-323-90524-4.00003-7.
- [72] A. M. Kamalan Kirubaharan and P. Kuppusami, "Corrosion behavior of ceramic nanocomposite coatings at nanoscale," *Corrosion Protection at the Nanoscale*, pp. 295–314, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-819359-4.00016-7.
- [73] I. Khan, K. Saeed, and I. Khan, "Nanoparticles: Properties, applications and toxicities," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 12, no. 7, pp. 908–931, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.ARABJC.2017.05.011.
- [74] E. Mohamed, "Nanotechnology: Future of Environmental Air Pollution Control," *Environmental Management and Sustainable Development*, vol. 6, p. 429, Oct. 2017, doi: 10.5296/emsd.v6i2.12047.
- [75] F. Machado, S. Fagan, I. Zanella da Silva, and M. Andrade, "Carbon Nanoadsorbents," 2015.
- [76] V. Singh, P. Yadav, and V. Mishra, "Recent Advances on Classification, Properties, Synthesis, and Characterization of Nanomaterials," 2020, pp. 83–97. doi: 10.1002/9781119576785.ch3.
- [77] P. Aarthye and M. Sureshkumar, "Green synthesis of nanomaterials: An overview," *Mater Today Proc*, vol. 47, pp. 907–913, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.04.564.
- [78] H. Ateş and E. Bahçeci, "Nano Malzemeler İçin Üretim Yöntemleri," *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 483–499, 2015, [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/7467/98323>
- [79] P. Soorya Prabha, I. G. Ragavi, R. Rajesh, and M. Pradeep Kumar, "FEA analysis of ballistic impact on carbon nanotube bulletproof vest," *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 3937–3940, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.02.424.
- [80] M. PUL, "Karbon Nanotüp (CNT) ve Nano Grafen (G) Takviyeli Al 2024 Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretilerek Aşınma ve İşlenebilme Özelliklerinin İncelenmesi," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 11, no. 1, pp. 370–382, 2019, doi: 10.29137/umagd.493868.
- [81] M. Shettar, C. S. S. Kowshik, M. Manjunath, and P. Hiremath, "Experimental investigation on mechanical and wear properties of nanoclay–epoxy composites," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 9108–9116, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.JMRT.2020.06.058.
- [82] A. Moura, B. Ipaves, D. S. Galvao, and P. A. da Silva Autreto, "Ballistic properties of highly stretchable graphene kirigami pyramid," *Comput Mater Sci*, vol. 232, p. 112558, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.COMMATSCI.2023.112558.
- [83] H. C. Çekil and M. Özdemir, "The behaviour of Boron Carbide under shock compression conditions: MD simulation results," *Comput Mater Sci*, vol. 201, p. 110872, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.COMMATSCI.2021.110872.
- [84] D. E. Carlucci and S. S. Jacobson, *Ballistics Theory and Design of Guns and Ammunition*, Third Edition. 2018.
- [85] G. Song, *Improving Comfort in Clothing*. 2011. doi: 10.1533/9780857090645.

- [86] D. J. Carr and C. Crawford, "High performance fabrics and 3D materials," in *Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications: Second Edition*, 2016, pp. 41–53. doi: 10.1016/B978-0-08-100406-7.00002-7.
- [87] G. A. T. Webster, "Nonwoven and crossplied ballistic materials," *Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications: Second Edition*, pp. 55–85, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-08-100406-7.00003-9.
- [88] O. R. Yıldırım, B. Ögel, and M. Übeyli, "Metal zırh malzemelerin balistik performanslarının araştırılması." [Online]. Available: <https://app.trdizin.gov.tr/publication/project/detail/T1RjM01EQTO>
- [89] M. Yang and P. Qiao, "High energy absorbing materials for blast resistant design," *Blast Protection of Civil Infrastructures and Vehicles Using Composites*, pp. 88–119, Jan. 2010, doi: 10.1533/9781845698034.1.88.
- [90] F. Bozdoğan, S. Üngün, E. Temel, and G. Mengüç, "Balistik Koruma Amaçlı Kullanılan Tekstil Materyalleri, Özellikleri ve Balistik Performans Testleri," *Tekstil ve Mühendis*, vol. 22, no. 98, pp. 84–103, 2015, doi: 10.7216/130075992015229808.
- [91] National Institute of Justice, "Ballistic Resistance of Personal Body Armor, NIJ Standard-0101.04," Sep. 2000.
- [92] X. Chen and Y. Chu, "Failure mechanisms and engineering of ballistic materials," 2016, pp. 263–304. doi: 10.1016/B978-1-78242-461-1.00009-1.
- [93] M. Erdem and M. Türker, "7039 Alüminyum Alaşımının Kaynak Öncesi ve Sonrası Mekanik ve Balistik Özelliklerinin Araştırılması," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 26, no. 1, p. 0, 2013, [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6687/88711>
- [94] M. Turan, "Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı," *Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendis ve Makina Cilt:48 Sayı:575*, 2007.
- [95] Pekbey, Y., Aslantaş, K., Yumak, N., "Ballistic impact response of Kevlar Composites with filled epoxy matrix, *Steel and Composite Structures*, 24 (2017), pp. 191-200. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2017.24.2.191>.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad

ATEŞ, Ferhat

Web sayfası

-

(Research Gate, Academia, vs.)

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Dicle Üniversitesi	2024
Lisans	Kocaeli Üniversitesi	2021
Lise	Bilecik Anadolu Lisesi	2011

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2022-2023	Şimşek Alüminyum A.Ş.	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce, Orta Düzey

Yayınlar

1. ATEŞ, F., ÖRÇEN, G., “Balistik Alanında Kullanılan Nano-Katkılı Tabakalı Kompozit Levhaların Performanslarının Araştırılması”, Dicle Üniversitesi 1.Uluslararası Fen Bilimleri Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu (DUFEBLAS), 2023, sf. 460-468
2. ÖRÇEN, G., ATEŞ, F., “Ballistic impact response of hybrid composite plates “, EJT (European Journal of Technique),2024./ Kabul tarihi:12.01.2024 (yayım sürecinde)

Özel İlgiler

Astronomi, Uzay

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Ferhat ATEŞ		
Öğrenci No	21818010		
Ana Bilim Dalı	Makine Mühendisliği		
Program Türü	Proje ☐	Yüksek Lisans ☒	Doktora ☐
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN		
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	-		
Tez Başlığı	Tabakalı Kompozit Levhaların Balistik Performanslarının İncelenmesi		
RAPOR BİLGİLERİ			
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası		
Sayfa Sayısı	113		
Raporlama Tarihi	12.02.2024		
Benzerlik Oranı (%)	9		

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 113 sayfalık kısmına ilişkin, 12/02/2024 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından turnitin isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç
☒Kaynaklar hariç
☐Alıntılar hariç/dâhil
☐Diğer (Açıklayınız)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Benzerlik oranım üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir, gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Ferhat ATEŞ

Tarih: 12.02.2024

İmza:

Danışman Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN

İmza:

Tarih: 12.02.2024

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı: Prof. Dr. Sedat BİNGÖL

İmza:

Tarih: 12.02.2024