



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ARAMİD FİBER TAKVİYELİ
KOMPOZİTLERDE NANOPARTİKÜL
TAKVİYESİNİN MEKANİK VE BALİSTİK
ÖZELLİKLERE ETKİLERİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ
DOKTORA TEZİ

Serkan BATI

Danışman
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Ekim-2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Serkan BATI tarafından hazırlanan “Aramid Fiber Takviyeli Kompozitlerde Nanopartikül Takviyesinin Mekanik ve Balistik Özelliklere Etkilerinin Deneysel İncelenmesi” adlı tez çalışması 24/10/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Danışman

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Üye

Doç. Dr. Ahmet YARDIMEDEN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Tolga TOPKAYA

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.

*Bu tez çalışması Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından BTÜBAP-2021-Doktora-02 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all materials and results that are not original to this work.

Serkan BATI

Tarih:

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ARAMİD FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE NANOPARTİKÜL TAKVİYESİNİN MEKANİK VE BALİSTİK ÖZELLİKLERE ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Serkan BATI

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2022, 157 Sayfa

Jüri

Danışman Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Doç. Dr. Ahmet YARDİMEDEN

Dr. Öğr. Üyesi Tolga TOPKAYA

Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN

Dokuma kumaş takviyeli lamine kompozitler, düzlem içi yönlerdeki yüklere karşı mükemmel direnç sağlarlar. Ancak düzlem dışı yüklere maruz kaldıklarında delaminasyon hasarı nedeniyle kullanılamaz hale gelirler. Delaminasyon hasarı, matris ve takviye malzemeleri arasındaki zayıf ara yüzey bağlarının bir sonucu olarak ortaya çıkar ve malzemenin verimli kullanımını kısıtlayarak önemli bir yapısal sorun oluşturur. Bu çalışma, grafen nanoplatelet (GNP), karboksil (COOH) ile işlevselleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve bunların hibrit kombinasyonlarını kullanarak epoksi/aramid kompozitlerinin arayüzey bağlarını güçlendirerek mekanik ve balistik özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Mekanik özelliklerde meydana gelen değişimleri daha iyi anlamak için kompozitlerin çekme testi, kısa giriş tabakalar arası kayma (SBS) testi, tek kenar çentik bükme (SENB) testi, yarı statik penetrasyon testi (QSPT) ve Charpy darbe testi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kompozitlerin yüksek hızlı darbelere karşı davranışlarını incelemek için balistik testler yapılmıştır. Yapılan tüm testler sonucunda numuneler üzerinde meydana gelen hasarların makro görüntüleri alınarak incelenmiş, ayrıca çekme ve çentik darbe test numunelerinin kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlardan elde edilen verilere göre, farklı nanoparçacık türleri ve oranları ile modifiye edilen epoksi matrisli aramid fiber takviyeli kompozitlerin (AFTK'ların) mekanik özelliklerinde önemli gelişmeler olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aramid, Balistik, Charpy, Nanopartikül, QSPT, SBS, SENB, Tabakalı Kompozit.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF NANOPARTICLE REINFORCEMENT ON MECHANICAL AND BALLISTIC PROPERTIES OF ARAMID FIBER REINFORCED COMPOSITES

Serkan BATI

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2022, 157 Pages

Jury

Advisor Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Assoc. Prof. Dr. Ahmet YARDIMEDEN

Asst. Prof. Dr. Tolga TOPKAYA

Asst. Prof. Dr. Oktay ADIYAMAN

Woven fabric reinforced laminated composites provide excellent resistance to in-plane direction stresses. However, when exposed to out-of-plane loads, they become useless due to delamination damage. Delamination damage occurs as a result of poor interfacial bonding between the matrix and reinforcement materials and it creates a significant structural problem by restricting the material's efficient usage. This study aims to enhance the mechanical and ballistic properties of epoxy/aramid composites by strengthening their interfacial bonds by using graphene nanoplatelet (GNP), carboxyl (COOH) functionalized multi-walled carbon nanotube (MWCNT) and their hybrid combinations. Tensile test, short beam shear (SBS) test, single edge notch bending (SENB) test, quasi-static penetration test (QSPT), and Charpy impact test of the composites were carried out in this context to better understand the changes in mechanical behavior. In addition, ballistic tests were performed to examine the behavior of composites against high-speed impacts. As a result of all tests, the damages on the samples were examined by taking macro images, and scanning electron microscope (SEM) analyzes of the fracture surfaces of the tensile and notch impact test samples were carried out. According to the data obtained from the experimental results, it was determined that there were significant improvements in the mechanical properties of epoxy matrix aramid fiber reinforced composites (AFRCs) modified with different nanoparticle types and ratios.

Keywords: Aramid, Ballistic, Charpy, Nanoparticle, Laminated Composite, QSPT, SBS, SENB.

ÖNSÖZ

Kompozitlerin özelliği, son üründe gerekli olan mühendislik özelliklerinin dikkatli bir matris ve takviye seçimi ile elde edilebilir olmasıdır. Fiber takviyeli kompozitler; oluştukları bileşenlerin en iyi özelliklerini göstermelerinden, hafif ve kolay taşınabilir olmalarının yanı sıra üstün mekanik özellikler sergilemelerinden dolayı mühendislik malzemeleri içerisinde giderek artan bir pazar payına sahiptirler. Pazar payının artmasıyla beraber kompozitler üzerinde yapılan araştırma ve geliştirme faaliyetleri de buna paralel olarak artış göstermektedir. Günümüzde üretimde en fazla tercih edilen fiberler cam ve karbon bazlı fiberlerdir, ayrıca yüksek darbe dirençlerinden dolayı aramid fiberler de birçok alanda kullanılmaktadır. Her ne kadar bu malzemeler mükemmel mekanik özellikler sergileseler de kullanımlarını kısıtlayan bazı durumlar vardır. Özellikle tabakalı kompozitlerde matris malzemesi ve fiberler arasındaki bağların yeterince güçlü olmadığı durumlarda tabaka ayrılması gibi bazı istenmeyen kusurlar oluşur ve bu durum malzemenin kullanım ömrünü kısaltır.

Bu çalışmada, mükemmel balistik direncinin yanında çok iyi mekanik özelliklere sahip olan aramid fiberlerle üretilen kompozitlerin mekanik ve balistik performanslarını artırmak için karbon bazlı nanopartiküller kullanılmıştır. Daha önceki yapılan çalışmalarla ilgili literatür araştırması yapılmış, üretilen kompozitin üretim ve test aşamalarıyla ilgili bilgiler verilerek çalışmanın yöntemi anlatılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında bazı bulgulara ulaşılmış ve literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Ayrıca ileriki çalışmalarla ilgili önerilerde bulunulmuştur.

Öncelikle tezimde beraber çalışmaktan büyük keyif aldığım sayın danışman hocam Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK'e katkılarından dolayı teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Tezimin kalıp ve zımba hazırlama kısımlarında ve hatırlayamadığım diğer talaşlı imalat kısımlarında benden yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN'a, çentik darbe deneyleri için yardımcı olan sayın hocam Doç. Dr. Musa KILIÇ'a ve balistik testler için aracı olmaya çalışan sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Sarper ÖZTÜRK'e teşekkürü borç bilirim.

Üretim aşamalarında ve deneysel çalışmalarda sürekli yanımda bulunan ve her istediğimde yardımlarını esirgemeyen, sorunları çözebilmek için fikirlerine bolca danıştığım sevgili dostlarım ve iş arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. İsmail BAYAR ve Arş. Gör. Yunus ÖZDEMİR'e çok teşekkür ediyorum.

Balistik testleri gerçekleştirdiğimiz CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri A.Ş. şirketine ve özellikle balistik testin gerçekleşmesinde büyük yardımları dokunan Makine Mühendisleri Ahmet Onur KOÇOĞLU ve Mehmet Reşit DURMAZ'a teşekkürü borç bilirim.

BTÜBAP-2021-Doktora-02 nolu proje ile bu çalışmanın gerçekleşmesinde emeği geçen Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BATÜBAP) ve değerli çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Canım anneme, canım ablama, sevgili yeğenlerime ve her daim yanımda olan değerli dostlarıma, son olarak bana her daim ilgisiyle ve sevgisiyle destek olan, bana inanan, tez yazım sürecinde bana en büyük desteği sağlayan, sevgili eşim Arş. Gör. Zülal ARCA BATI'ya ve hayatıma anlam katan sevgili oğlum Rüzgar Miran BATI'ya çok teşekkür ederim.

Serkan BATI
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ VE LİTERATÜR.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç ve Hedefler	3
1.3. Literatür Çalışması.....	3
2. GENEL BİLGİLER.....	17
2.1. Kompozit Malzemeler	17
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	17
2.2.1. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler	18
2.2.2. Takviye edilme şekline göre kompozit malzemeler	28
2.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	30
2.3.1. El yatırma.....	31
2.3.2. Püskürtme (enjeksiyon kalıplama) yöntemi	32
2.3.3. Elyaf sarma yöntemi	32
2.3.4. Sıkıştırma kalıplama yöntemi	33
2.3.5. Vakum infüzyon yöntemi	33
2.3.6. Reçine transfer kalıplama	34
2.3.7. Pultrüzyon.....	34
2.4. Mekanik Testler Hakkında Teorik Bilgiler.....	35
2.4.1. Çentik darbe testi	35
2.4.2. Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testi.....	36
2.4.3. Kırılma tokluğu (SENB) testi	37
2.4.4. Yarı statik penetrasyon testi (QSPT)	38
2.5. Balistik Bilimi.....	40
2.5.1. Hedef balistiğinde kullanılan bazı malzemeler.....	44
2.5.2. Balistik test standartları	50
2.5.3. Tekstil malzemelerin balistik darbe davranışı	56
2.6. Balistik Performansı Etkileyen Faktörler	57
2.6.1. Mermi geometrisi, hızı, kütlesi ve eğiklik açısı.....	58
2.6.2. Malzemenin ve matrisin etkisi.....	61
2.6.3. Kumaşın dokusu	63
2.6.4. Kalınlık ve hedef malzemenin kavisli yapısının etkisi	65
2.6.5. Sürtünme.....	67

2.7. Karbon Esaslı Nano Takviye Elemanları.....	68
2.7.1. Grafen	69
2.7.2. Karbon nanotüp (CNT).....	71
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	73
3.1. Kullanılan Malzemeler	73
3.2. Üretim Aşaması	75
3.3. Numune Kesimi ve Mekanik Test Hazırlıkları.....	81
3.3.1. Çekme testi	83
3.3.2. SBS testi.....	84
3.3.3. SENB test düzeneği	85
3.3.4. Çentik darbe test düzeneği.....	86
3.3.5. QSPT düzeneği	87
3.4. Balistik Test	91
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	93
4.1. Mekanik Test Sonuçları	93
4.1.1. Çekme deneyi sonuçları.....	93
4.1.2. SBS test sonuçları	102
4.1.3. SENB test sonuçları	105
4.1.4. Çentik darbe test sonuçları.....	109
4.1.5. QSPT sonuçları	114
4.1.6. Mekanik testler genel değerlendirme.....	125
4.2. Balistik Test Sonuçları.....	126
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	138
KAYNAKLAR	140
ÖZGEÇMİŞ	158

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	18
Şekil 2.2. Polimer matrisli kompozitten üretilmiş tekerlekli sandalye	19
Şekil 2.3. Bir elyaf takviyeli kompozit ürünün şematik gösterimi	19
Şekil 2.4. Farklı takviye tiplerine göre MMK sistemlerinin şematik gösterimi	27
Şekil 2.5. Farklı takviye türleri	29
Şekil 2.6. Elle yatırma işleminin şematik gösterimi	31
Şekil 2.7. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi	32
Şekil 2.8. Elyaf sarma yönteminin şematik gösterimi	33
Şekil 2.9. Vakum infüzyon şematik gösterimi	34
Şekil 2.10. Reçine transfer kalıplama	34
Şekil 2.11. Pultrüzyon işlemi şematik gösterimi	35
Şekil 2.12. Darbe testleri şematik görünümü a) Izod darbe deneyi, b) Charpy darbe deneyi.....	36
Şekil 2.13. Destek aralığı kalınlık oranının bir fonksiyonu olarak tabakalar arası kayma testi numunelerinin tipik hasar modları	37
Şekil 2.14. Yarı statik bir zımba kesme testi fikstürünün şeması.....	39
Şekil 2.15. Metal hedeflerin kırılma modları	41
Şekil 2.16. Balistik çarpma sırasında 2D dokuma kumaş kompozit hedefin penetrasyon ve perforasyon aşamaları	42
Şekil 2.17. Washington DC’de kurşungeçirmez yeleğin test edilmesi, Eylül 1923.....	44
Şekil 2.18. ABD ordusu kaskının I. Dünya Savaşı’ndan en son başlık sistemine kadar değişen tasarımları ve malzemeleri.....	45
Şekil 2.19. Modern askeri vücut zırhlarının bir görünümü	46
Şekil 2.20. Ateşe dayanıklı Kevlar® ve Nomex® ile donanmış bir itfaiyeci	49
Şekil 2.21. Doğal yaşlandırma sonrası renk değiştiren aramid numuneler	49
Şekil 2.22. NIJ 0101.06 test mermileri ve atış hızları	52

Şekil 2.23. NIJ 0101.06 standardına uygun BFS ölçümü.....	54
Şekil 2.24. 53,77 ile 0,16 gr arasında değişen FSP mermi ailesi.....	55
Şekil 2.25. FSP’lerin mermi kovanına yerleştirilmesi.....	55
Şekil 2.26. Bir kompozit plakada birincil ve ikincil iplik bölgeleri	56
Şekil 2.27. Bir fiberin darbeden önce (i) ve darbeden sonraki (ii) (iii) (iv) biçimi	57
Şekil 2.28. Balistik performansı etkileyen faktörler	58
Şekil 2.29. Mermi geometrisi ve hedef kalınlığının enerji sönümleme üzerindeki etkisini gösteren bir çalışma.....	59
Şekil 2.30. a) Kevlar 29, b) Zylon AS ve c) Spectra 29 kumaşlara farklı hızlarda balistik darbenin etkileri	60
Şekil 2.31. Farklı açılarda merminin hasar mekanizmaları	61
Şekil 2.32. Bir tabakadan oluşan koninin derinliğine matrisin etkisi	63
Şekil 2.33. Yaygın örgü türleri, a) düz örgü. b) dimi örgü. c) 5 koşum saten dokuma ..	64
Şekil 2.34. 3D dokuma yapılar, (a) ortogonal, (b) kalınlık boyunca açılı kilidi, (c) katmandan katmana açılı kilidi ve (d) tamamen geçmeli	65
Şekil 2.35. Grafenden fulleren, nanotüp ve grafit oluşumunu gösteren şema.....	70
Şekil 2.36. (a) grafen, (b) grafen oksit, (c) indirgenmiş grafen oksit ve (d) grafen nanoplateletlerin şematik diyagramı	70
Şekil 2.37. SWCNT ve MWCNT genel yapısı.....	71
Şekil 2.38. GNP ve CNT’nin çatlak mekanizmalarına etkilerinin gösterimi	72
Şekil 3.1. Matris malzemesi olarak kullanılan ARC 152 epoksi reçine ve W152 sertleştirici	73
Şekil 3.2. Matris malzemesinde katkı maddesi olarak kullanılan nanopartiküller	74
Şekil 3.3. Balistik aramid kumaş ve örgü yapısının görüntüsü	75
Şekil 3.4. a) manyetik karıştırıcıda ve b) ultrasonik banyoda karıştırma işlemi	77
Şekil 3.5. Ultrasonik banyo ile 10 dakikada gaz alma işlemi.....	78
Şekil 3.6. Kürlenmiş saf epoksi; a) gaz alma işlemi yapılmamış, b) gaz alma işlemi yapılmış	78

Şekil 3.7. a) karışımın RTV-2 kalıba dökülmesi ve b) kürlenmiş çekme numuneleri ...	79
Şekil 3.8. Ultrasonik banyo esnasında kürlenmiş karışım.....	79
Şekil 3.9. Karışımın el yatırma yöntemiyle aramid katmanları arasına sürülmesi.....	80
Şekil 3.10. 300x300 mm ebatlarında üretilen balistik ve mekanik test plakaları.....	81
Şekil 3.11. Mekanik testler için kompozit plaka üzerine numunelerin yerleştirilmesi ve kesim bölgelerinin gösterilmesi	82
Şekil 3.12. Su jeti yardımıyla numunelerin kesilmesi	82
Şekil 3.13. Kesilen numunelere ait görüntüler	83
Şekil 3.14. Çekme cihazı ve dıtarların kaydedildiği bilgisayar.....	83
Şekil 3.15. Çekme deneyinin uygulanışı ve kırılma anı	84
Şekil 3.16. SBS test fıktürü ve şematik görünümü	84
Şekil 3.17. SENB test düzeneği ve uygulanışı	85
Şekil 3.18. Charpy çentik darbe test cihazı ve numunenin konumlandırılması	86
Şekil 3.19. Darbe test numunesi ölçüleri ve darbe yönü	87
Şekil 3.20. Düz, ojiv ve konik zımbalar	88
Şekil 3.21. Yarı statik penetrasyon test kalıbının hazırlanması.....	88
Şekil 3.22. QSPT sonucunda numunelerde meydana gelen tıkaç oluşumu.....	89
Şekil 3.23. QSPT fıktürünün şematik görünümü.....	90
Şekil 3.24. Zımba ilerlemesine bağlı olarak kuvvet–yer değiştirme grafiği	90
Şekil 3.25. Balistik test düzeneği.....	91
Şekil 3.26. Atış yerlerinin işaretlenme yöntemi ve işaretlenmiş numune	92
Şekil 3.27. Soldan sağa: 4 grain (0,26 g), 17 grain (1,10 g) ve 44 grain (2,85 g) FSP'ler	92
Şekil 4.1. GNP katkılı epoksi kompozitlerin kuvvet–uzama grafiği.....	93
Şekil 4.2. MWCNT katkılı epoksi kompozitlerin kuvvet–uzama grafiği.....	94
Şekil 4.3. GNP/MWCNT hibrit katkılı epoksi kompozitlerin kuvvet–uzama grafiği....	95

Şekil 4.4. Nanokompozit yüzeyleri a-b) GNP/epoksi, c-d) MWCNT/epoksi ve e-f) hibrit	96
Şekil 4.5. Nanokompozitlerin kırılma yüzeyleri a) saf epoksi, b) GNP, c) MWCNT ve d) hibrit	98
Şekil 4.6. AFTK’larda maksimum gerilme değerlerinin takviye cinsi ve oranına göre değişimi.....	99
Şekil 4.7. AFTK’ların kırılma yüzeyi SEM görüntüleri, a) Aramid, b) GNP, c) MWCNT ve d) hibrit	101
Şekil 4.8. Takviye nanopartiküllerin tabakalar arası kayma mukavemeti üzerindeki etkisi	102
Şekil 4.9. Çatlak ilerlemesi sırasında oluşan mekanizmalar, a) CNT, b) GNP	104
Şekil 4.10. SBS testi sonucu AFTK’larda meydana gelen deformasyon	105
Şekil 4.11. Takviye cinsi ve oranına bağlı olarak kritik stres yoğunluk faktörü (K_{IC}) değişimi	106
Şekil 4.12. Takviye cinsi ve oranına bağlı olarak kritik gerinim enerjisi salım hızı (G_{IC}) değişimi.....	107
Şekil 4.13. SENB test numunelerinin üst ve arka yüz hasar görüntüleri.....	108
Şekil 4.14. Darbe enerjisi ve darbe tokluğu değerlerinin takviye cinsi ve takviye oranına göre değişimi.....	109
Şekil 4.15. Darbe test numunelerinin hasar görüntüleri a) Aramid, b) GNP-1, c) GNP-2 ve d) GNP-3	111
Şekil 4.16. Darbe test numunelerinin hasar görüntüleri a) Aramid, b) MWCNT-1, c) MWCNT-2 ve d) MWCNT-3	112
Şekil 4.17. Darbe test numunelerinin hasar görüntüleri a) Aramid, b) Hibrit-1, c) Hibrit-2 ve d) Hibrit-3	113
Şekil 4.18. AFTK’ların darbe yüzeyi SEM görüntüleri a) saf epoksi, b) GNP-1, c) MWCNT-1, d) hibrit-1.....	114
Şekil 4.19. Konik zımbaya ait genel kuvvet–yer değiştirme grafiği	116
Şekil 4.20. Ojiv zımbaya ait genel kuvvet–yer değiştirme grafiği	116
Şekil 4.21. Konik ve ojiv zımbaların QSPT esnasındaki temas alanlarının şematik gösterimi	118
Şekil 4.22. Konik (üst) ve ojiv (alt) zımbaların deformasyon aşamaları.....	118

Şekil 4.23. Konik zımba ile yapılan deneylerin kuvvet–yer değiştirme eğrileri	120
Şekil 4.24. Ojiv zımba ile yapılan deneylerin kuvvet–yer değiştirme eğrileri	121
Şekil 4.25. PSS’nin malzemelere, zımbaya ve SPR oranlarına göre değişim grafikleri	122
Şekil 4.26. Farklı takviye oranlarına sahip AFTK’ların zımba geometrisine ve SPR oranına ait hasar mekanizmaları	124
Şekil 4.27. Mekanik test sonuçlarının değerlendirmesi.....	125
Şekil 4.28. Birinci hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	131
Şekil 4.29. İkinci hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	131
Şekil 4.30. Üçüncü hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	132
Şekil 4.31. Dördüncü hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	132
Şekil 4.32. Beşinci hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	133
Şekil 4.33. Altıncı hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	134
Şekil 4.34. Yedinci hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	134
Şekil 4.35. Sekizinci hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	135
Şekil 4.36. Dokuzuncu hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	135
Şekil 4.37. Onuncu hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	136
Şekil 4.38. On birinci hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri	136

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 2.1. Bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri.....	20
Tablo 2.2. Polyester reçinelerin mekanik özelliklerini karakterize etmek için kullanılan ASTM test metotları	21
Tablo 2.3. Cam fiber oranının polyester kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi ...	22
Tablo 2.4. Bazı termoplastik reçinelerin tipik özellikleri	23
Tablo 2.5. Termoplastik ve termosetlerin karakteristik olarak karşılaştırması	24
Tablo 2.6. Metalik matrisli malzemeler ve takviye malzemeleri	27
Tablo 2.7. Kompozitlerin üretim yöntemleri ve tipik uygulama alanları	30
Tablo 2.8. Balistikte kullanılan bazı malzemeler ve mekanik özellikleri	47
Tablo 2.9. Bazı ulusal ve uluslararası vücut zırh standartları	51
Tablo 2.10. Karbon nanomalzemelerin tipik özellikleri	69
Tablo 3.1. Nanopartiküllerin teknik özellikleri.....	74
Tablo 3.2. Hazırlanan kompozit malzemelerin adlandırılması	81
Tablo 4.1. Nanokompozitlerin çekme testinden edilen sonuçlar	97
Tablo 4.2. AFTK'ların çekme testinden hesaplanan sonuçlar	100
Tablo 4.3. Tabakalar arası kayma mukavemeti sonuçları.....	103
Tablo 4.4. Kritik stres yoğunluk faktörü ve kritik gerinim enerjisi salım hızı değişimleri.....	107
Tablo 4.5. Çentik darbe testinden elde edilen darbe enerjisi ve darbe tokluğu sonuçları.....	110
Tablo 4.6. Konik zımbada maksimum kuvvetin olduğu yer değiştirme değerleri	115
Tablo 4.7. Ojiv zımbada maksimum kuvvetin olduğu yer değiştirme değerleri	115
Tablo 4.8. Konik zımba kesme mukavemeti ve enerji değerleri değişimi.....	123
Tablo 4.9. Ojiv zımba kesme mukavemet ve enerji değerleri değişimi.....	123
Tablo 4.10. GNP'li AFTK'larda balistik test sonuçları	127

Tablo 4.11. MWCNT ve hibrit AFTK’larda balistik test sonuçları	128
Tablo 4.12. Mermi hızının küçükten büyüğe sıralanması ve kıyaslama için kullanılan hız grupları.....	130

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_{kesme}	: Kesme alanı, mm^2
D_m	: Zımba ve destek çaplarının ortalaması, mm
D_p	: Zımba çapı, mm
D_s	: Destek açıklığı çapı, mm
E	: Elastisite modülü, Pa
E_A	: Birim alanda sönmömlenen darbe enerjisi, $J.m^{-2}$
E_D	: Hasar bölgesindeki enerji, J
E_E	: Elastik enerji, J
E_F	: Sürtünme enerjisi, J
E_i	: Darbe enerjisi, J
E_T	: Toplam gerinim enerjisi, J
$f(x)$	: Geometrik faktör
F_{mak}	: Maksimum zımba kuvveti, N
G_{IC}	: Kritik gerinim enerjisi salım hızı, $J.m^{-2}$
$ILSS$	: Tabakalar arası kayma mukavemeti, MPa
K_{IC}	: Kritik stres yoğunluk faktörü, $MPa.m^{1/2}$
M_T	: Tokluk modülü, $J.m^{-3}$
P_m	: Elde edilen en yüksek kuvvet, N
PSS	: Zımba kesme gerilimi, MPa
T	: Çentik uzunluğu, mm
t	: Numune kalınlığı, mm
ν	: Poison oranı
V_{50}	: Balistik limit hızı
W	: Numune genişliği, mm
ϵ_f	: % uzama
σ_{ut}	: Maksimum gerilme, MPa

Kısaltmalar

1D	: Bir boyutlu
2D	: İki boyutlu
3D	: Üç boyutlu
ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
AFTK	: Aramid fiber takviyeli kompozit
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
ATH	: Alüminyum trihidrat
BFS	: Arka yüz darbe çöküntüsü
BNNP	: Bor nitrür nanoplatelet
BNNS	: Bor nitrür nanosheet
BNNT	: Bor nitrür nanotüp
CFTK	: Cam fiber takviyeli kompozit
CNT	: Karbon nanotüp
CSCF	: CNT ile büyütülmüş kısa karbon lifleri
CT	: Kompakt gerilim
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
DMTA	: Dinamik mekanik termal analiz
DSB	: Darbe sonrası bası
DSC	: Diferansiyel tarama kalorimetrisi
DWCNT	: Çift duvarlı karbon nanotüp
FMJ	: Tam metal kaplama
FSP	: Şarapnel benzetimli mermi
FT-IR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
FTK	: Fiber takviyeli kompozit
GNP	: Grafen nanoplatelet
GNS	: Grafen nanosheet
GO	: Grafen oksit
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
KFTK	: Karbon fiber takviyeli kompozit
KNF	: Karbon nanofiber
LDPE	: Düşük yoğunluklu polietilen
M-CNT	: Melaminle işlevselleştirilmiş karbon nanotüp

MGP	: Multi grafen platelet
MMK	: Metal matrisli kompozit
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nanotüp
PE	: Polietilen
PMK	: Polimer matrisli kompozit
PSU	: Polisülfon
QSPT	: Yarı statik penetrasyon testi
RNP	: Kauçuk nanopartikül
RTK	: Reçine transfer kalıplama
SBS	: Kısa kiriş tabakalar arası kayma
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SENB	: Tek kenar çentik bükme
SMK	: Seramik matrisli kompozit
SPR	: Destek açıklığı çapının zımba çapına oranı
STF	: Kesme gerilimi altında katılaştıran sıvı
SWCNT	: Tek duvarlı karbon nanotüp
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik analiz
UHMWPE	: Ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen
UV	: Ultraviyole
XPS	: X-ray fotoelektron spektroskopisi
XRD	: X-ışınları difraktometresi

1. GİRİŞ VE LİTERATÜR

1.1. Giriş

İnsan vücudunun sivri cisim ve muharebe mermisi gibi farklı tehditlerden korunması insanlık tarihine kadar uzanmaktadır. İnsanlar tarih boyunca yüksek hızlı darbelerden korunabilmek için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir (Abtew ve diğ., 2019). Eski çağlarda hayvan derisi, taş, çamur, ahşap ve metallerden oluşan koruyucu kalkanlar teknolojinin ilerlemesiyle beraber yerlerini hafif ve kolay taşınabilir olan polimerler, seramikler ve bunlardan meydana gelen kompozitlere bırakmışlardır (Rajole ve diğ., 2020).

Günümüzde, bıçak ya da silah gibi zarar verici etmenlere karşı kişisel ve ekipman koruması için yumuşak veya sert formda olan tekstil kumaşları yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tekstil kumaşlarından beklenen özellikler hafiflik, üstün mekanik özellikler, yüksek balistik/saplama direnci ve düşük maliyettir (Bilisik, 2017). Ancak, silah ve mühimmat teknolojisindeki gelişmeler, bu tür modern silahların muazzam etkilerine dayanabilecek daha kaliteli zırh malzemesi geliştirmek için malzeme mühendisleri ve araştırmacıların önünde büyük bir zorluk oluşturmaktadır (S. Naik ve diğ., 2020).

Yüksek sıkıştırma oranına sahip olan seramik zırhlar her ne kadar metalik zırhlara oranla çok daha hafif ve sağlam olsalar da bazı dezavantajları vardır. Yüksek sıcaklık ve yüksek basınç gerektiği için üretimler zordur, ayrıca üretimleri metallerle kıyaslandığında oldukça pahalıdır. Bir başka sıkıntısı ise kırılgan yapılarından dolayı birden fazla atışın gerçekleştiği durumlarda darbelere karşı dayanımlarının düşmesidir (Akella ve Naik, 2015).

Kompozitler mikroskobik ölçüde meydana geldiği bileşenlerin en iyi özelliklerini sergiledikleri için geleneksel malzemelere göre daha fazla avantaj sağlarlar. Yüksek mukavemet/ağırlık oranı, hareket kabiliyeti, çevresel etkilere karşı direnç göstermelerinin yanı sıra yüksek darbe direnci fiber takviyeli kompozit malzemelerin kullanımını yaygınlaştıran ana neden olarak önümüze çıkmaktadır. Bu alanda en yaygın olarak kullanılan malzemelerden birisi aramiddir. Aramidden elde edilen yumuşak yelekler ve seramik sert plakalar askeri personel ve kolluk kuvvetleri tarafından kullanılmaktadır. Bu malzemelerin mekanik özellikleri ve balistik performans/ağırlık oranı çok yüksektir, ancak bu malzemeler araştırmacılar tarafından hala geliştirilmeye çalışılmaktadır. Uygun

bir zırh tasarlamak için Aramid kompozit hedeflerin çarpma sırasında ve sonrasında davranışının anlaşılması kritik öneme sahiptir (S. Naik ve diğ., 2020).

Balistik bir çarpışma sırasında, genellikle düşük kütleli ve yüksek hızda itici bir nesne yapıya çarpar ve malzeme içinde gerilme dalgalarının yayılmasına neden olur (Pandya ve Naik, 2015). Çarpma anında, etkilenen alanın çevresinde anlık gerilmeler oluşur, ancak bu gerilmeler hemen yapının tüm bölümlerine iletilmez. Aslında yapının etkilenen bölgeden uzaktaki alanları, malzeme özelliklerine bağlı olarak, yayılan gerilim dalgaları onlara ulaşana kadar bozulmadan kalabilirler. Darbe yükünün nasıl uygulandığına bakılmaksızın, bu gerilim dalgalarının yayılması yalnızca hedef malzemesinin özelliklerine bağlıdır (Domun ve diğ., 2019).

Yüksek hızlı mermi ve benzeri etkilere sahip olan parçalara karşı koruma, fiber takviyeli kompozit (FTK) yapıların en önemli gereksinimlerinden biridir. Bu tür etkiler merminin kütesine, şekline, boyutuna ve hızına ayrıca hedef fiber takviyeli kompozitlerin geometrisine ve mekanik özelliklerine bağlı olarak girinti, kısmi penetrasyon ve perforasyon (delme) ile sonuçlanabilmektedir (Domun ve diğ., 2019).

Mevcut zırhların kullanıcıya ağırlığı ve rahatsızlığı artırmadan daha etkin bir şekilde geliştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle son yıllarda polimer bazlı kompozitlere nano ölçekli katkı maddelerinin küçük hacimli fraksiyonlarının eklenmesiyle bu malzemelerin mekanik özelliklerinde ve balistik özelliklerinde önemli bir artış elde edilebileceğine dair çok sayıda deneysel gözlem nedeniyle günümüzde araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedirler (Heikal ve diğ., 2018; Rafiq ve diğ., 2017; Reis ve diğ., 2013). Bu nano katkılar malzemeye kırılma sırasında ilave enerji dağıtma mekanizmaları sunarak kompozitlerin kırılma davranışını kontrol eder (Kostagiannakopoulou ve diğ., 2015).

Son dönemlerde karbon nanotüp (CNT) ve grafen nanoplatelet (GNP) takviyesiyle güçlendirilmiş fiber takviyeli kompozit malzemeler üzerinde birçok çalışma yürütülmektedir. CNT'ler benzersiz geometrileri ve özellikleri nedeniyle çok işlevli, çok boyutlu lamine kompozitlerin geliştirilmesinde büyük bir kullanım potansiyeline sahiptir. Nano takviyelerin, yüzey seviyesinde bağlar oluşturarak ve kırılmaya karşı direnç işlevi görerek matris ve lif etkileşim özelliklerini iyileştirdiği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir (Domun ve diğ., 2015; Jani ve diğ., 2021). CNT hiyerarşik kompozitlerin geliştirilmesindeki son gelişmeler çoğunlukla çok duvarlı karbon nanotüplere (MWCNT) odaklanmıştır (Ashrafi ve diğ., 2011). Karbon ailesinden bir başka nano katkı maddesi olan grafen, uygun miktarlarda ve yüzey modifikasyonlarında eklendiğinde, tabakalı

kompozit sistemlerin genel özelliklerini iyileştirmesine yardımcı olur (Sukanya ve Sundaram, 2022a). Bu yüzden grafen üzerine de birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir.

1.2. Amaç ve Hedefler

Zırhı kuşanan kişinin konforundan ödün vermeden zırhın mekanik ve balistik performansının geliştirilmesi çok önemlidir. Bu yüzden zırh malzemesinin hareketleri kısıtlayacak şekilde ne çok sert ne de kişinin taşıyacağı yükü artıracak şekilde ağırlaştırılmadan balistik performansının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmanın amacı grafen nanoplatelet (GNP) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ile modifiye edilen epoksi matrisin aramid fiber takviyeli kompozitlerin (AFTK'ların) mekanik ve balistik davranışlarının geliştirilmesidir. Bu çalışmanın hedefleri şu şekilde belirlenmiştir.

1. El yatırma yöntemiyle GNP ve MWCNT ile takviye edilmiş epoksi matrisli ve bunların karışımından oluşan hibrit epoksi matrisli AFTK'ler üretmek,
2. Elde edilen kompozitlerin çekme dayanımı, tek çentikli eğme testi ile Mod-I kırılma tokluğu, kısa kiriş kesme testi ile tabakalar arası kayma mukavemeti, çentik darbe testi ve yarı statik penetrasyon testi ile düşük hızlı darbe dayanımları gibi mekanik özelliklerdeki değişimleri araştırmak,
3. Kırılma yüzeylerini inceleyerek meydana gelen hasar mekanizmalarını ve takviyelerin bu mekanizmalara etkilerini incelemek,
4. Balistik test uygulayarak üretilen numunelerin yüksek hızlı darbelere karşı dayanımlarını ve deformasyon davranışlarını incelemektir.

1.3. Literatür Çalışması

Bir çalışmanın en önemli kısımlarından birisi daha önceki çalışmaları inceleyerek eksiklerini ya da tam olarak anlaşılamayan bazı yerlerin tespitini yapmaktır. Bu doğrultuda literatür taraması yaparak araştırmacı çalışmak istediği alanla ilgili en temel bilgileri edinir ve çalışmasının teorik zeminini oluşturur. Bu bağlamda daha önceden literatürde benzer çalışmalar sonucu elde edilen mekanik kazanımların balistik kazanımlara dönüştürülebilmesi için geniş bir literatür çalışması yapılmış olup aşağıda sunulmuştur.

Ashrafi ve diğ. (2011), tek duvarlı karbon nanotüpler (SWCNT) kullanarak nano-modifiye karbon fiber/epoksi laminatlar geliştirmişlerdir. Dağılımı ve epoksi reçine-nanotüp etkileşimini iyileştirmek için indirgenmiş SWCNT'ye dayalı bir işlevselleştirme tekniği kullanmışlardır. SWCNT içeren ve içermeyen laminatlar üzerinde darbe ve darbe sonrası bası (DSB) testleri yapmışlardır. Ayrıca laminatlar arası kırılma tokluğunu belirlemek için Mod I (çift konsol kiriş) ve Mod II (çentikli üç nokta eğme) testlerini gerçekleştirmişlerdir. Ağırlıkça %0,1 SWCNT ilave edilen numunelerin darbe hasarı alanında %5'lik bir azalma, DSB hasarında %3,5'lik bir artış, Mod I kırılma dayanıklılığında %13'lük bir artış ve Mod II kırılma tokluğunda %28'lik bir artış olduğunu tespit etmişlerdir.

Ayatollahi ve diğ. (2011), MWCNT/epoksi kompozitlerin kırılma tokluğu davranışlarını incelemişlerdir. Ayrıca tek kenar çentik bükme (SENB) testleriyle uygun kesme yükü sınır koşullarını belirlemek için birkaç sonlu elemanlar analizi yapmışlar ve kırılma yükünden kesme yüklemesi kırılma tokluğunu hesaplamak için bir denklem türetmişlerdir. Nanokompozitin kırılma tokluğundaki artışın yükleme tipine bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. MWCNT'nin mevcudiyetinin normal yüklemeye kıyasla kesme yüklemesi altında nanokompozitlerin kırılma dayanıklılığı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ağırlıkça %0,5 oranında takviye içeren nanokompozitlerde maksimum Mod I kırılma tokluğunu elde etmişlerdir. Ayrıca MWCNT takviyesinin, malzemenin mukavemetini ve Mod II kırılma dayanıklılığını sürekli olarak iyileştirdiğini ifade etmişlerdir.

S. Y. Yang ve diğ. (2011), epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri ve termal iletkenliği üzerinde sinerjik bir etki sergileyen üç boyutlu (3D) grafen tabanlı mimariler elde etmek için lifli bir boyutlu (1D) MWCNT'ler ve düzlemsel iki boyutlu (2D) multi grafen plateletleri (MGP) birleştirmişlerdir. Kıyaslama yapabilmek için saf epoksi dışında %1 oranlarında MWCNT/epoksi ve MGP/epoksi kompozitler üretmişlerdir. Ayrıca iki farklı yine ağırlıkça %1 oranında olacak şekilde MWCNT/MGP (1:9) ve işlevselleştirilmiş GD400-MWCNT/MGP (1:9) hibrit kompozitleri de üretmişlerdir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinden hibrit nano takviyelerin epoksi içerisinde tek başına MWCNT ve MGP'den daha iyi dağıldığını gözlemlemişlerdir. GD400-MWCNT/MGP kompozitin çekme mukavemeti, %0,9 gelişim gösteren MGP/epoksinin aksine %35,4 gelişim gösterdiğini belirtmişlerdir.

Montazeri ve Montazeri (2011), MWCNT ve epoksinin farklı fraksiyon karışımlarından ürettikleri kompozit malzemeye dinamik mekanik termal analiz (DMTA)

testleri yaparak malzemenin mekanik ve viskoelastik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Nanotüplerin epoksiye eklenmesinin viskoelastik ve mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Özellikle, ağırlıkça %0,5 oranında nanotüp kullanılan numunede viskoelastik özelliklerin daha fazla arttığını tespit etmişlerdir.

Theodore ve diğ. (2011), iki farklı yöntemle işlevselleştirilmiş MWCNT ile epoksi bazlı nanokompozitlerin morfolojik, termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırmışlardır. MWCNT'nin oksidasyon (MWCNT-COOH) ve doğrudan florlama (MWCNT-F) ile kimyasal işlevselleştirilmesini fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), Raman spektroskopisi ve termogravimetrik analiz (TGA) ile analiz etmişlerdir. Yerinde polimerizasyon kullanılarak, epoksi bazlı nanokompozitleri hazırlamak için ağırlıkça %1 MWCNT takviyesi kullanmışlardır. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında, MWCNT-COOH ile hazırlanan nanokompozitlerin nihai eğme mukavemetinde %25,5, eğme modülünde ise %54,8 artış olduğunu, MWCNT-F nanokompozitlerin mukavemet değerlerinde ise azalma olduğunu gözlemlemişlerdir.

Chatterjee ve diğ. (2012), ağırlıkça farklı oranlarda ve farklı tane boyutlarında GNP takviyeli epoksi matrisli kompozitler üretmişlerdir. Ayrıca bunlara ek olarak ağırlıkça takviye oranı sabit (%0,5) kalmak şartıyla farklı oranlarda GNP ve MWCNT takviyeli epoksi matrisli hibrit kompozitler de üretmişlerdir. Geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntülerini incelediklerinde nano takviyelerin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığını görmüşlerdir. Tane boyutunun etkilerine baktıklarında ise daha büyük boyutta (25 μm) olan GNP'ler ile desteklenen kompozitlerin daha dirençli olduklarını belirtmişlerdir. Karbon nanotüp oranının en yüksek olduğu (9:1) numunelerde kırılma tokluğunda %76'lık bir gelişim gözlemlemişlerdir. MWCNT/GNP oranının epoksi bazlı nano kompozitlerin özelliklerini önemli ölçüde etkileyen ve ilginç bir faktör olarak öne çıktığını belirten araştırmacılar, yüksek en boy oranına sahip olan karbon nanotüp ve yüksek yüzey alanına sahip olan grafen nanoplateletlerin olduğu hibrit karışımların sinerjistik etkisinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir.

W. Li, Dichiara, ve diğ. (2013), CNT ve GNP karışımının yanı sıra katalitik kimyasal buhar biriktirme tekniği ile hibritleştirdikleri CNT/GNP karışımıyla nanokompozit malzemeler üretmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre ağırlıkça %0,5 oranında hibrit karışım içeren kompozitin diğerlerine nazaran çok daha iyi mekanik özellikler gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Saf epoksiye göre bu kompozitlerin çekme modülünde %40'lık ve gerilme mukavemetinde %36'lık artış olduğunu ifade etmişlerdir.

X. Wang ve diğ. (2013), Hummer's metodunu kullanarak nano boyutta grafen oksit (GO) elde etmişlerdir. Daha sonrasında elde etmiş oldukları GO'ları epoksi reçine ile karıştırarak nanokompozit üretmişlerdir. Üretilen bu nanokompozitlere mekanik testler uygulamışlardır. Sonuçları incelediklerinde GO takviyesinin elde edilen malzemelerin kırılma tokluğunu geliştirmede bariz bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. GO boyutunun kırılma tokluğu üzerinde büyük bir etkisinin olduğunu, özellikle en küçük tane boyutunda ($0,70 \mu\text{m}$) saf epoksiye oranla malzemenin kırılma tokluğunu yaklaşık %75 oranında geliştiğini gözlemlemişler ve bu durumun da GO'nun iki boyutlu yapısının malzemede meydana gelen kırılma ilerlemesini önemli ölçüde bozmasına ve saptırmasına bağlamışlardır.

Tehrani ve diğ. (2013), MWCNT içeren ve içermeyen epoksi matrisi ile iki farklı karbon fiber takviyeli kompozitler (KFTK'lar) üretmişler ve ürettikleri kompozitlerin çekme dayanımını, sönümlleme performansını, darbe direncini ve darbe hasar ilerlemesini incelemişlerdir. Çekme testi yapılan takviyeli kompozitin uzama miktarının arttığını, çekme modülü ve çekme dayanımının ise neredeyse hiç etkilenmediğini gözlemlemişlerdir. Takviye içeren kompozitlerin darbe esnasında ortaya çıkan darbe şoklarını sönümlleme etkisi gösterdiğini dolayısıyla bir karbon fiber kompozitinin matrisine MWCNT takviyesinin, KFTK'ların tabakalar içi ve tabakalar arası mekanik performansı artırdığını ve daha iyi bir darbe direnci sağladığını vurgulamışlardır.

Rahmanian ve diğ. (2014), epoksi matris içerisine CNT ve kısa karbon fiberler ekleyerek yüksek performanslı çok ölçekli kompozitler üretmeyi amaçlamışlardır. Epoksi ve karbon lifleri arasındaki stres transferini iyileştirmek için, kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemiyle CNT ile büyütülmüş kısa karbon lifleri (CSCF) üretmişlerdir. Daha sonra epoksi matrisindeki CNT ve CSCF'nin sinerjistik etkilerini araştırmak için kompozitlerin mekanik testlerini gerçekleştirmişlerdir. Çok ölçekli kompozitler, CNT-epoksi veya CSCF-epoksi kompozitlere kıyasla elastisite ve tokluk modülünde, mukavemette ve darbe direncinde önemli gelişmeler sağladığını belirtmişlerdir.

Shokrieh ve diğ. (2014), GNP ve grafen nanosheetlerin (GNS'lerin) epoksi reçinenin kırılma tokluğu ve gerilme özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. GNP'leri kendi geliştirdikleri bir teknikle sentezlemişler ve ticari olarak temin ettikleri GNS'ler ile kıyaslamışlardır. GNP ve GNS partikülleri ile takviye edilmiş epoksi matrisin kritik gerilim yoğunluk faktörünü ve çekme özelliklerini ölçülmüşlerdir. Takviye içeriği, takviye boyutu ve dağılım durumunun etkisini incelenmişlerdir. GNP'lerin, GNS'lere kıyasla nanokompozitlerin hem kırılma dayanıklılığı hem de gerilme mukavemeti

üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Her iki katkı maddesinde de ağırlıkça %0,5 oranında maksimum kırılma tokluğu elde etmişlerdir. Bu oran için GNP'nin %39, GNS'nin ise %16 oranında kırılma tokluğunu iyileştirdiğini vurgulamışlardır.

Chandrasekaran ve diğ. (2014), ağırlıkça %0,05 ile %2 arasında değişen oranlarda üç farklı karbon nano takviyesinin epoksi bazlı nanokompozitlerin kırılma tokluğuna ve hasar mekanizmasına etkilerini incelemişlerdir. Kırılma tokluğu ölçümü için tek çentikli numunelere üç nokta eğme testi uygulanmışlardır. %0,5 oranında termal olarak indirgenmiş grafen oksit kullanılan numunelerde kırılma tokluğunun %40 oranında gelişme gösterdiğini, GNP ve MWCNT kullanılan numunelerde bu oranın sırasıyla %25 ve %8 olduğunu belirtmişlerdir.

Ulus ve diğ. (2014), bor nitrür nanoplatelet (BNNP) ve MWCNT kullanarak nanokompozit malzemeler üretmişlerdir. Nano malzemelerin kompozit üzerine etkilerini incelemek için ürettikleri BNNP/epoksi, MWCNT/epoksi ve hibrit (BNNP-MWCNT/epoksi) nanokompozitleri saf epoksi ile kıyaslamışlardır. Ayrıca üretilen nanokompozitler, SEM, TEM, TGA, FT-IR ve X-ışınları difraktometresi (XRD) analizleri ile karakterize etmişlerdir. Nanopartikül takviyesinin malzemenin sünekliğini artırdığını, kırılmadaki kuvvet ve gerilimin artmasının tokluğun artmasına sebep olduğunu ifade etmişlerdir. Bu nedenle, nanopartikül modifikasyonunun toklukta artış elde etmek için kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Y. J. Wan ve diğ. (2014), epoksi reçine içerisine GO ve silan ile fonksiyonel bir kimyasal işleme tabi tuttıkları GO'yu (silan-f-GO) katarak ürettikleri kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen malzemelere DMTA'nın yanı sıra mekanik özelliklerini belirlemek için çekme ve eğme testleri uygulamışlardır. Silan-f-GO tabakaları ile takviye edilmiş epoksi kompozitlerin depolama modülü, camı geçiş sıcaklığı, termal stabilite, çekme, eğme ve kırılma tokluğu özelliklerinin saf epoksi ve GO/epoksi kompozitlere kıyasla arttığını gözlemlemişlerdir.

Ahmadi-Moghadam ve Taheri (2014), epoksi reçinelerin kırılma tepkisini ve tokluğunu uygun maliyetli bir şekilde artırmayı amaçlamışlardır. GNP ve MWCNT ile güçlendirilmiş olan epoksi reçineye Mod I ve Mod II kırılma testleri uygulamışlardır. Elde edilen nanokompozitlerin Mod-I kırılma tokluklarında önemli bir gelişme, Mod II kırılma tokluklarında ise hafif azalmalar olduğunu gözlemlemişlerdir.

Borowski ve diğ. (2015), KFTK laminatlarda MWCNT kullanımının etkilerini belirlemek için deneysel araştırma ve sayısal modelleme yapılmışlardır. KFTK'ları,

karboksil ile işlevselleştirilmiş farklı ağırlık fraksiyonlarındaki MWCNT (COOH-MWCNT) ve epoksi matrisi ile güçlendirmişlerdir. Tek yönlü olan KFTP Kompozitlerin Mod I kırılma tokluğunu ölçmek için çift konsol giriş testleri yapmışlardır. Tabakalar arası kırılma tokluğu değerlerinde %17 ile %25 arasında artış gözlemlemişlerdir. FT-IR ve X-ray fotoelektron spektroskopisi (XPS) sonuçlarından epoksi reçine ve MWCNT'ler arasında kimyasal bir bağlanma olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca sonlu eleman simülasyonlarıyla deneysel sonuçların iyi bir uyum gösterdiğini ve MWCNT'lerin KFTK'nın tabakalar arası kırılma tokluğunu geliştirdiğini ifade etmişlerdir.

Cha ve diğ. (2017), epoksi reçine ve CNT arasındaki arayüz bağlantılarını kuvvetlendirmek için CNT'yi melamin ile işlevselleştirerek (M-CNT) işlevselleştirilmiş ve işlevselleştirilmemiş nanokompozitler üretmişlerdir. Mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için çeşitli ağırlık fraksiyonlarındaki CNT/epoksi ve M-CNT/epoksi nanokompozitlere çekme ve SENB testleri uygulanmışlardır. Ağırlıkça %2 M-CNT içeren nanokompozitin elastisite modülünde %64, maksimum gerilme mukavemetinde %22 ve kırılma tokluğunda ise %95'lik bir artış söz konusu olduğunu belirtmişlerdir.

Domun, Hadavinia, ve diğ. (2017), plazma işleminden geçirilmiş grafen nanoplakaları (fGNP) düşük oranlarda epoksi reçineye katarak nanokompozitlerin kırılma özelliklerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çeşitli mekanik testler uyguladıkları malzemelerin termal ve gerilme özelliklerinde herhangi bir azalmaya sebep olmadan kırılma tokluğunda büyük bir gelişme olduğunu gözlemlemişlerdir. Ağırlıkça %0,25 fGNP içeren nanokompozitin saf epoksiye oranla kırılma tokluğunda %51'lik artış olduğunu ifade etmişlerdir.

Domun, Paton, ve diğ. (2017), epoksi reçine içerisine takviye ettikleri işlevselleştirilmiş MWCNT, işlevselleştirilmiş GNP, bor nitrür nanosheets (BNNS) ve bor nitrür nanotüp (BNNT) takviye elemanlarının epoksi reçinenin kırılma tokluğu üzerine etkilerini araştırmışlardır. Tek başına MWCNT kullanılan deneyde kritik gerinim enerjisi salım hızının (G_{IC}) saf epoksiye göre %57 gelişim gösterdiğini, MWCNT ve BNNS eklenen numunede kırılma tokluğunun saf epoksiye göre %71,6 oranında, GNP ve BNNT hibrit karışımında ise kırılma tokluğunun saf epoksiye göre %91,9 oranında arttığını gözlemlemişlerdir.

Ladani ve diğ. (2018), epoksi polimerlere 1D karbon nanofiber (KNF), 2D GNP ve bunların hibrit kombinasyonlarını içeren takviye elemanları ilave ederek ürettikleri kompozit malzemelerin kırılma dayanımlarındaki gelişimleri incelemişlerdir. Ayrıca KNF ve GNP takviye elemanları tarafından oluşturulan farklı sertleştirme

mekanizmalarının katkılarını, kırılma enerjisinde gözlenen iyileşmelere neden olacak şekilde ölçmek için mekanik model sunmuşlardır. Takviye elemanlarının sahip olduğu içsel ve dışsal sertleşme mekanizmalarından dolayı ilave edildikleri kompozitlerin yarı statik kırılma enerjisini büyük ölçüde arttırdığını ve yorulma yüklerine karşı direncini geliştirdiğini belirtmişlerdir.

Quan ve diğ. (2018), MWCNT'yi epoksi reçineyle karıştırmış ve yığın epoksi/MWCNT kompozitin yanı sıra MWCNT/KFTK malzemeler üretmişlerdir. Ürettikleri kompozit malzemelere Mod I ve Mod II kırılma tokluğu testi uygulamışlardır. MWCNT'lerin yığın epoksi ve KFTK'lere dahil edilmesinin Mod I kırılma enerjisini orta derecede, Mod II kırılma enerjisini ise önemli ölçüde arttırdığını belirtmişlerdir. KFTK'ların ortalama Mod II kırılma enerjisinin %0,5 oranındaki MWCNT takviyesi sayesinde 2020 J.m^{-2} 'den 3406 J.m^{-2} 'ye yükseldiğini, %1'lik takviye oranında ise 5491 J.m^{-2} 'ye yükselttiğini ifade etmişlerdir.

Tan ve diğ. (2019), CVD yöntemiyle ürettikleri CNT'ler ile epoksi reçineyi farklı hacimsel fraksiyonlarda bir araya getirerek kompozit malzemeler üretmişlerdir. Ürettikleri bu kompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerini belirlemek için bazı testler uygulamışlardır. Uygun bileşim seçildiğinde kompozitin çekme mukavemetinin 410 MPa 'a, elastisite modülünün ise 30 GPa 'a kadar çıkabileceğini belirtmişlerdir.

Domun ve diğ. (2020), 1D ve 2D karbon nano takviyeler ve bunların hibrit kombinasyonları ile modifiye ettikleri epoksi reçineyi tek yönlü cam fiber kumaşlarla takviye ederek kompozit numuneler üretmişlerdir. Numunelere Mod I ve Mod II kırılma testleri uygulanmışlardır. Ayrıca fiber doğrultusu 0° ve 90° olan kompozitlere standart çekme testleri uygulanırken; $\pm 45^\circ$ olan kompozitlere düzlem içi kayma gerilmesi testi uygulamışlardır. Tüm testlerden elde ettikleri sonuçlara bağlı olarak karbon nano takviyelerinin kompozit malzemelerin mekanik dayanımını açık bir şekilde arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Her ve Zhang (2021), alüminyum alt tabaka üzerine ağırlıkça %0,3 ile %1 arasında değişen oranlarda GNP içeren epoksiyi bir eğirme kaplama işlemi ile alüminyum yüzeyine biriktirmişlerdir. Nano indentasyon yöntemiyle kompozit filmin sertliğini ve elastisite modülünü belirlemişlerdir. Buna ilaveten ürettikleri kaplamaların Mod II kırılma tokluğunu tespit etmişlerdir. Nanokompozit filmin sertliğinin, elastisite modülünün ve Mod II kırılma tokluğunun GNP içeriğinin artmasıyla arttığını gözlemlemişlerdir. Saf epoksi ile karşılaştırdıklarında, ağırlıkça %1 GNP içeren nanokompozit filmin sertlik, elastisite modülü ve Mod II kırılma tokluğunda sırasıyla

%71,8; %63,2 ve %44,4 oranlarında gelişmeler olduğunu belirtmişlerdir. SEM görüntülerinden GNP ve epoksi matris arasında iyi bir dağılım ve güçlü bir etkileşim olduğunu ve bu durumun da mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağladığını ifade etmişlerdir.

Namdev ve diğ. (2021), farklı oranlarda (%0,3; 0,5 ve 0,7) GNP içeren karbon fiber/epoksi kompozitleri el yatırma tekniği ile üretmişler ve GNP'nin mekanik ve fiziksel özelliklere etkilerini incelemişlerdir. %0,5 oranında GNP içeren kompozitlerin diğerlerine oranla daha yüksek çekme, eğme, kesme ve darbe mukavemeti ve ayrıca Rockwell sertliği sağladığını belirtmişlerdir. %0,5 GNP içeren kompozitin çekme mukavemetinin %11 ve eğme mukavemetinin ise %18 ile referans numunesinden daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca su emme testi yapılan numunelerde %0,5 GNP içeren kompozitte daha az boşluk olduğunu tespit etmişlerdir.

Shirodkar ve diğ. (2021), ağırlıkça %0,1 MWCNT, %0,5 GNP ve bunların bir hibrit kombinasyonu olan MWCNT/GNP (1:1) ile takviye edilmiş epoksi kompozitlerin kırılma tokluğunu araştırmışlardır. ASTM D5045 test prosedürüne göre hazırlanan kompakt gerilim (CT) numunelerin kritik stres yoğunluk faktörü (K_{IC}) ve kritik gerinim enerjisi salım hızı (G_{IC}) değerlerini hesaplamışlardır. Ağırlıkça %0,5 oranında MWCNT içeren epoksi numunelerin, kırılma tokluğunda ve kırılma enerjisinde sırasıyla yaklaşık %118 ve %311'lik gelişim olduğunu gözlemlemişlerdir. Saf epoksinin kırılma tokluğu ve kırılma enerjisine göre GNP/epoksi ve MWCNT-GNP/epoksi numunelerinde de önemli geliştirmeler olduğunu, ancak bu geliştirmelerin genel olarak MWCNT/epoksi numunelerinkinden daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerinden, MWCNT/epoksi kompozitlerde çatlak köprülenmesinin meydana geldiğini ve MWCNT kopmalarının olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, GNP/epoksi kompozitlerin kırılma yüzeylerinde ise bazı çatlak sapmalarının oluştuğunu ve buna bağlı olarak kırılma yüzeyindeki pürüzlülüğün arttığını belirtmişlerdir.

S. Wang, Xue, ve diğ. (2021), GNP ve kauçuk nanoparpartikül (RNP) takviyelerinin epoksi üzerindeki tamamlayıcı etkilerini araştırmışlardır. RNP gibi viskoelastik fazın eklenmesi, epoksinin sertleştirilmesinde olağanüstü verimlilik sağladığını ve ağırlıkça %1 RNP eklenmesi ile epoksinin K_{IC} ve G_{IC} değerlerinin sırasıyla %422 ve %872 oranlarında arttığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, RNP'lerin yumuşak ve viskoelastik fazda olduklarından, elastisite modülünü ve epoksi reçinenin mukavemetini sırasıyla %7 ve %8 oranlarında hafifçe düşürdüğünü ifade etmişlerdir.

Ayrıca saf epoksiye %1 RNP ve %1 GNP ilavesinin malzemenin elastisite modülünü 1,57 GPa'dan 2,32 GPa'a yükselttiğini belirtmişlerdir.

Z. Wang, Soutis, ve diğ. (2021), karbonfiber/epoksi kompozit içerisindeki GNP, MWCNT ve bunların hibrit kombinasyonlarının Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu üzerine etkisini araştırmışlardır. Topaklanmayı engellemek için iki farklı çözücü kullandıkları çalışmada, n-metil-2-pirolidon çözücü içinde dağıtılmış olan GNP/KFTK sisteminde Mod I tabakalar arası kırılma tokluğunun %146'lık bir artış sergilediğini gözlemlemişlerdir. Diğer çözücüye oranla daha az verimli ancak çevre dostu olan aseton ile karıştırılan %1 içerikli hibrit GNP/MWCNT kompozitin Mod I tabakalar arası kırılma tokluğunda ise %120'lik bir artışla sinerjik etki olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca GNP'lerle güçlendirilmiş KFTK üzerinde ince film sıcak pres tekniğinin uygulanmasını, homojen çok fazlı kompozitler üretmek için etkili ve umut verici bir çözüm olarak ifade etmişlerdir.

Ahmad ve diğ. (2022), %0,5 ile %5 arasında değişen GNP ve MWCNT ile takviye edilmiş cam fiber/epoksi kompozitlerin elektriksel iletkenlik ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Hem çekme mukavemetinde hem de eğme mukavemetinde en büyük gelişimin her iki partikül takviyesinde de ağırlıkça %0,5 takviye elemanının kullanıldığı kompozitlerden elde etmişlerdir. Her iki nanopartikül takviyesinde de %5 takviye elemanlı kompozitlerin en düşük sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca fraktografik analizlerden nanopartiküller ile epoksi arasında iyi bir arayüzey yapışmasının mevcut olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ejaz ve diğ. (2022), farklı konsantrasyonlardaki GNP'lerin ve işlevselleştirilmesinin yüksek viskoziteli yapısal yapıştırıcının (Araldite 2011) mekanik davranışı ve bindirme kesme bağlantı mukavemeti üzerindeki birleşik etkilerini araştırmışlardır. GNP'nin etkilerini daha iyi anlayabilmek için yapıştırıcıyı çekme numunesi kalıbına dökten araştırmacılar, ağırlıkça %1 GNP takviyeli epoksi yapıştırıcının elastik modülünde %39 ve çekme mukavemetinde %13'lük maksimum gelişme sağladığını tespit etmişlerdir. Ayrıca ağırlıkça %0,75 oranında işlevselleştirilmemiş GNP eklenmesiyle tek tesirli bağlantı için %36 ve çift tesirli bağlantı için %25 oranında maksimum çekme yükünde gelişim gözlemlemişlerdir.

Mahadevaswamy ve diğ. (2022), alüminyum trihidrat (ATH), MWCNT ve GNP'nin farklı kombinasyondaki takviye elemanlarıyla cam elyaf/epoksi kompozitler üretmişler ve ürettikleri kompozitlerin elektriksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çekme mukavemetinde ve akma mukavemetlerinde en büyük gelişimin

üç takviye elemanının (ATH, MWCNT ve GNP) beraber bulunduğu kompozitten, en büyük düşüşün ise MWCNT ve GNP takviye elemanlarının bulunduğu kompozitten elde edildiğini belirlemişlerdir. Çekme mukavemetinde olduğu gibi basma mukavemetinde de en büyük gelişimi üç takviye elemanının beraber bulunduğu kompozitten elde etmişlerdir. Bütün takviyeli kompozitlerin eğme mukavemetini referans numuneden daha düşük olarak bulmuşlardır. Çekme modüllerinde ise ATH takviye elemanlı cam fiber/epoksi kompozit dışında diğer kompozitlerde referans numuneye oranla düşüşler gözlemlenmiştir.

Mohammad ve diğ. (2022), kauçukla sertleştirilmiş epoksi matrise ağırlıkça %0,2-%1 oranlarında GNP katmışlardır. Ağırlıkça %0,6 GNP eklentisinin çekme mukavemetini ve çekme modülünü sırasıyla %70 ve %74 oranında optimal olarak iyileştirdiğini vurgulamışlardır. TGA analiziyle GNP'nin katmanlı yapısının ayrışma sürecini geciktirerek bariyer etkisini göz önüne serdiğini kanıtlamış ve epoksi bazlı reçinenin termal stabilitesini önemli ölçüde arttırdığını gözlemlenmiştir. Yapılan kırılma yüzey analizlerinde ise matris ve GNP takviye elemanı arasında iyi bir arayüzey etkileşimi olduğunu ifade etmişlerdir.

Namdev ve diğ. (2022), farklı ağırlık yüzdelerinde GNP ile modifiye ettikleri karbon fiber/epoksi kompozitlerin aşınma ve mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Araştırmada ağırlıkça %0,5 GNP takviyelerinin karbon fiber/epoksi kompozitin diğer kompozitlere göre daha yüksek çekme ve eğme mukavemeti gösterdiğini gözlemlenmiştir. Ayrıca kompozit içerisindeki GNP varlığının aşınmayı azalttığını vurgulanmıştır.

Seidel ve Shirodkar (2022), takviye elemanı olarak CNT ve GNP ile bunların farklı hibrit kombinasyonlarının (3:1, 1:1, 1:3) kullanıldığı epoksi nanokompozitlerin Mod I kırılma tokluğu testlerini gerçekleştirmişler ve kırılma başlangıcından tam kırılma gerçekleşene kadar olan süreci analiz etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre 3:1 oranındaki CNT/GNP epoksi nanokompozitin en yüksek K_{IC} değerine, GNP/epoksi nanokompozitin ise en yüksek G_{IC} değerine sahip olduğunu gözlemlenmiştir.

Yukarıda özetlenen literatür çalışmalarından görüldüğü gibi CNT ve GNP gibi karbon esaslı takviye elemanlarının malzemenin kırılma tokluğu, çekme mukavemeti gibi mekanik davranışları üzerinde büyük bir etkisinin olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmalar kırılma tokluğu ile balistik performans arasında önemli bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Balistik üzerine yapılan literatür çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

Pandya ve diğ. (2012), katkısız E-cam/epoksi ve katkısız epoksi malzemelerin balistik performansı üzerine nanopartikül (nanosilika ve MWCNT) takviyelerinin etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma neticesinde, takviye elemanlarının katkısız E-cam/epoksi ve katkısız epoksi malzemelerin balistik limit hızını (V_{50}) sırasıyla %6,3 ve %7,3 oranında, enerji emilimini ise sırasıyla %13 ve %15,2 oranında geliştirdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca hedefin çarpma noktası etrafındaki hasar büyüklüğünün nanopartikül ilavesiyle azaldığını belirtmişlerdir.

Laurenzi ve diğ. (2013) MWCNT ile takviye edilmiş Kevlar 29 kompozit panellerin balistik darbeye karşı enerji emilim kapasitesini belirlemeyi amaçladıkları çalışmalarında, öncelikle MWCNT ile polimer arasındaki bağın iyileştirilmesi için MWCNT'ye fonksiyonel bir kimyasal işlem uygulamışlardır. MWCNT duvarlarında tesir eden (induced) morfolojiyi ve kimyasal modifikasyonları analiz etmek için SEM, Raman ve FT-IR spektroskopileri kullanmışlardır. Farklı kütle oranlarında epoksi içerisinde karıştırılmış olan MWCNT'lere Charpy darbe testleri ve 490 ila 950 m/s arasında değişen mermi hızında yüksek enerji çarpma testleri yapmışlardır. MWCNT varlığının polimerin tokluğunu, ağırlıkça %0,5'lik bir ekleme eşiğine kadar arttırdığını gözlemlemişlerdir. Özellikle fonksiyonel kimyasal işlem uygulanmış olan %0,5'lik MWCNT takviye elemanlı malzemenin enerji emilim kapasitesinde %56 oranında artış olduğunu ifade etmişlerdir. Nano takviyeli panellerin balistik davranışlarının takviyesizlere oranla geliştiğini vurgulamışlardır.

Pandya ve diğ. (2013), saf epoksi ve MWCNT ile takviye edilmiş epoksi malzemelerin balistik darbe davranışlarını deneysel olarak araştırmışlar ve analitik olarak formüle etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda balistik limit hızı ve çeşitli mekanizmalar tarafından emilen enerji ile ilgili karakteristikleri incelemişlerdir. Formüle ettikleri denklemlerde ise mermi ve hedef arasındaki gerçekleşen stres dalgası oluşumunu ve enerji dengesini hesaplamışlardır. Deneysel sonuçlardan epoksiye MWCNT takviye edilmesinin V_{50} balistik limit hızını %5 oranında ve darbe enerjisi emilimini ise %10 oranında artırdığını gözlemlemişlerdir. Analitik sonuçlara göre en büyük enerji emiliminin malzemedan parça kopması (shear plugging) esnasında gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca analitik sonuçlar ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu ifade etmişlerdir.

M. Rahman ve diğ. (2013), amino işlevli çok duvarlı karbon nanotüp (NH_2 -MWCNT) takviyesinin E-cam/epoksi kompozitlerin balistik performansına etkisini araştırmışlardır. Epoksi reçinesini modifiye etmek için %0,3 ve %0,5 takviyeli iki farklı

ağırlık yüzdesini kullanılmışlardır. MWCNT'leri, sonikasyon ve 3 merdaneli değirmen yöntemlerinin bir kombinasyonu yoluyla epoksi reçinesi içinde dağıtılmışlar ve kompozitleri üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitleri 120x120x5,25 mm boyutlarında kesilmişler ve balistik limit hızını belirlemek için farklı hızlarda bir gaz tabancası kurulumu kullanılarak küresel mermi darbelerine maruz bırakılmışlardır. Balistik limit hızının %0,3 katkı oranında %5 ile %6,5 arasında gelişim gösterdiğini gözlemlemişlerdir.

Gibson ve diğ. (2013), kompozit zırhlarda karbon nanotüp kullanımını araştırmışlardır. Deneylerde MWCNT'nin yanı sıra Kevlar 29, S2 cam dokuma ve öğütülmüş E-cam kullanılmışlardır. Farklı kombinasyonların kullanıldığı deneylerde, MWCNT ve öğütülmüş E-camdan geliştirilen panellerin V_{50} balistik limit hızı sonuçlarının diğerlerinden %6,57 daha yüksek olarak ölçüldüğünü belirtmişlerdir.

Pandya ve Naik (2015), amino ile işlevselleştirilmiş MWCNT takviye elemanı ile epoksi reçineden oluşan farklı kalınlıklarda kompozit malzemeler üretmişlerdir. Ürettikleri malzemelerin özelliklerini deneysel ve analitik bir model ile test etmişlerdir. MWCNT'lerin eklenmesiyle V_{50} balistik limit hızının %5'e ve emilen enerjinin %10'a kadar arttığını belirtmişlerdir. Kompozit kalınlığının artmasıyla balistik limit hızının arttığını ifade etmişlerdir. Ayrıca deneysel ve analitik balistik limit hızları arasında iyi bir benzerlik olduğunu belirtmişlerdir.

Hanif ve diğ. (2015), Twaron kumaş kullandıkları deneylerde, takviyesiz ve MWCNT takviyeli epoksi reçineyi vakum destekli el yatırma yöntemiyle kumaşa işlemişlerdir. Ürettikleri kompozitlerde, MWCNT takviyesinin kompozitin kırılma tokluğu ve balistik direnç özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Kırılma tokluğu için SENB metodunu kullanmışlardır. Balistik performansın belirlenmesi için ise kompozit panellere 9 mm tam metal kaplama (FMJ) mermi ile farklı çarpma hızlarında testler yapmışlardır. Kırılma tokluğu testi sonucuna göre %1 oranında MWCNT takviye ilave ettikleri panellerde gözle görülür bir gelişim gözlemlendiğini, ayrıca MWCNT takviyesinin panellerin balistik performansını da geliştirdiğini ifade etmişlerdir.

Domun ve diğ. (2019), GNS, CNT, hibrit BNNS/CNT ve BNNT/GNS gibi nano takviye elemanları ile cam fiber takviyeli kompozitler (CFTK'lar) üretmişlerdir. Ürettikleri kompozitlerde, nanopartikül ilavesinin kompozitin darbe dayanımı ve gerinimi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlardan nano takviye elemanı kullanarak ürettikleri panellerin darbe direncinde önemli gelişmeler olduğunu gözlemlemişlerdir. En yüksek mutlak absorbe edilen enerjinin epoksi matristen %16,8

daha yüksek olan 255,7 J ile BNNT/GNS ile takviye edilmiş CFTK panellerden elde edildiğini ifade etmişlerdir.

J. Naveen ve diğ. (2019a), Kevlar ve hindistan cevizi palmyesi kabuğu ile güçlendirilmiş epoksi kompozitlerde GNP takviyesinin balistik performans üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Dokuz ve on iki katmanlı olarak ürettikleri kompozitlerde farklı sayılarda Kevlar ve hindistan cevizi palmyesi kabuğu kullanılmışlardır. Balistik testleri 8 mm yarı küresel paslanmaz çelik bir mermi ile tek aşamalı bir gaz tabancası yardımıyla yapılmıştır. Kevlar/epoksi kompozitlerin enerji emiliminin ağırlıkça %0,25 GNP takviyesiyle 9 ve 12 katmanlı plakalar için sırasıyla %8,5 ve %12,88 oranında arttırabileceğini, ayrıca balistik limit hızının %4,28 ve 6,17 oranında geliştirebileceğini ifade etmişlerdir. Ancak hibrit plaklarda GNP takviyesinin enerji emilimini ve balistik limit hızını düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Cao ve diğ. (2020), kesme gerilimi altında katılacak sıvı (STF) ve karbon nanotüp-polistiren etil akrilat (CNT/PSt-EA) bazlı STF (C-STF) karışımlarının Kevlar kumaşa entegre edilmesiyle elde edilen kompozitlerin balistik davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları incelemede, CNT'nin polistiren etil akrilat bazlı STF'nin reolojik özelliğini arttırdığını ve bu sayede Kevlar kumaşa göre daha iyi bir balistik özelliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir. C-STF/Kevlar için optimum CNT ilavesinin %1 olduğunu tespit eden araştırmacılar aşırı CNT ilavesinin güçlendirme etkisini azalttığını vurgulamışlardır. Yaptıkları iplik çekme (yarn pull-out) testi sonuçlarından, STF'lerin CNT katkılanması ile iplikler arasındaki sürtünme katsayısının arttırdığını ve bu sayede kumaşın taşıma alanının arttırarak balistik performansını iyileştirildiğini belirtmişlerdir.

Dasgupta (2020), ön yüzeyinde bor karbür seramik bulunan CNT-UHMWPE (karbon nanotüp-ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen) kompozit paneller üretmiş ve ürettikleri panellerin balistik performansını araştırmıştır. CNT'nin kompozit zırhın balistik korumasındaki rolünü SEM, XRD, FT-IR ve diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ile analiz etmişlerdir. Deneysel sonuçlardan CNT ve UHMWPE arasında güçlü bir bağ oluştuğunu ve bu durumun kompozitin ön yüzeyinde yüksek enerji sönümlemesi nedeniyle daha düşük arka yüz darbe çöküntüsüne (BFS'ye) katkı sağladığını belirtmiştir.

Vignesh ve diğ. (2020), grafen nanopartiküllerini Kevlar elyaf katmanları arasına tabaka olarak yerleştirilmişler ve bu güçlendirilmiş malzeme üzerinde dinamik balistik etki analizi yapmışlardır. Yelek ve merminin eşdeğer gerilmelerine, toplam deformasyona ve maksimum asal gerilmeye bağlı olarak grafen laminatlarla

güçlendirilmiş yeleğin balistik performansında önemli bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Katiyar ve diğ. (2021), 4 ve 8 katmanlı Kevlar kumaşlara CNT ve GNP ile hibrit STF işlemişler ve balistik limit hızı, artık hız, enerji sönümlemesi gibi parametreleri araştırmışlardır. Maksimum enerji absorpsiyonunun 8 katmanlı GNP-STF hibrit kombinasyonundan sağlandığını tespit etmişlerdir. Ayrıca grafenin CNT'ye kıyasla balistik koruma için en iyi aday olduğunu belirtmişlerdir.

de Tomasi Tessari ve diğ. (2022), GNP içeren yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) filmler ile aramid kumaştan oluşan çok katmanlı panellerin performansını araştırmak için DMTA, balistik darbe ve Split-Hopkinson basınç barı testleri yapmışlardır. Yaptıkları balistik test sonucunda tüm kompozitlerin III-A seviyesinde koruma başarısı sağladığını belirtmişlerdir. En düşük deformasyonların %0,5 GNP ve HDPE ile %1 GNP kompozitlerden elde edildiğini gözlemlemişlerdir. DMTA testlerinden %0,5 GNP'nin en yüksek enerji dağılımını sergileyerek balistik sonuçları doğruladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca Split-Hopkinson basınç barı test sonucundan %0,5 GNP içeren kompozitin GNP'siz numunelere göre %32 daha fazla stres emme kapasitesine sahip olduğunu bulmuşlardır.

Sukanya ve Sundaram (2022b), MWCNT ve GNP ile takviye edilmiş Kevlar/epoksi kompozitlerin balistik performansı üzerindeki bireysel ve sinerjik etkilerini araştırılmışlardır. Bir gaz tabancası kullanarak 6 katmanlı kompozitlerin düşük hızlı darbe testlerini gerçekleştirirken 24 katmanlı kompozitlerin ise yüksek hızlı balistik darbe testlerini yapmışlardır. Düşük hızlı darbe testinde hibrit takviyeli kompozitin hedef en düşük çıkış hızına ve daha iyi enerji sönümleme kabiliyetine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek hızlı darbe testinde ise 430 ± 15 m/s hıza sahip olan merminin bütün hedefleri deldiğini, ancak fraktografik analizler incelendiğinde hibrit nano dolgu takviyeli kompozit hedefin dikkate alınan diğer koşullara kıyasla en düşük penetrasyon derinliğine ve daha yüksek hasar alanına sahip olduğunu ifade etmişlerdir.

Literatür çalışmalarından, GNP ve MWCNT gibi karbon bazlı nano takviye elemanlarının çeşitli kompozit malzemelerin balistik performansını artırmak için kullanılmaya başlandığını ve hala bu konu üzerine yoğun çalışmaların olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmalardan nanopartikül takviyesinin hem mekanik özellikler hem de balistik performans üzerine etkilerinin ayrıntılı olarak ele alınması gerektiği düşünüldüğünden bu çalışmada, aramid/epoksi kompozitlerin nanopartikül katkıları yardımıyla mekanik özellikleri ve balistik performansı deneysel olarak araştırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kompozit Malzemeler

İki veya daha fazla farklı türdeki malzemenin makro ölçüde bir araya gelmesiyle meydana gelen malzemelere kompozit malzeme denir. Kompoziti meydana getiren bileşenler, malzemeye gerekli mekanik mukavemet veya sertliği vermek üzere birlikte hareket ederler. Kompozitler sadece yapısal özellikleri için değil, aynı zamanda elektrik, termal, tribolojik ve çevresel uygulamalar için de kullanılmaktadırlar. Modern kompozit malzemeler, belirli bir uygulama aralığı için belirli bir özellik dengesi elde etmek için genellikle optimize edilirler. Kompozitlerin özelliği, son üründe gerekli olan mühendislik özelliklerinin, dikkatli bir matris ve takviye seçimi ile elde edilebilir olmasıdır.

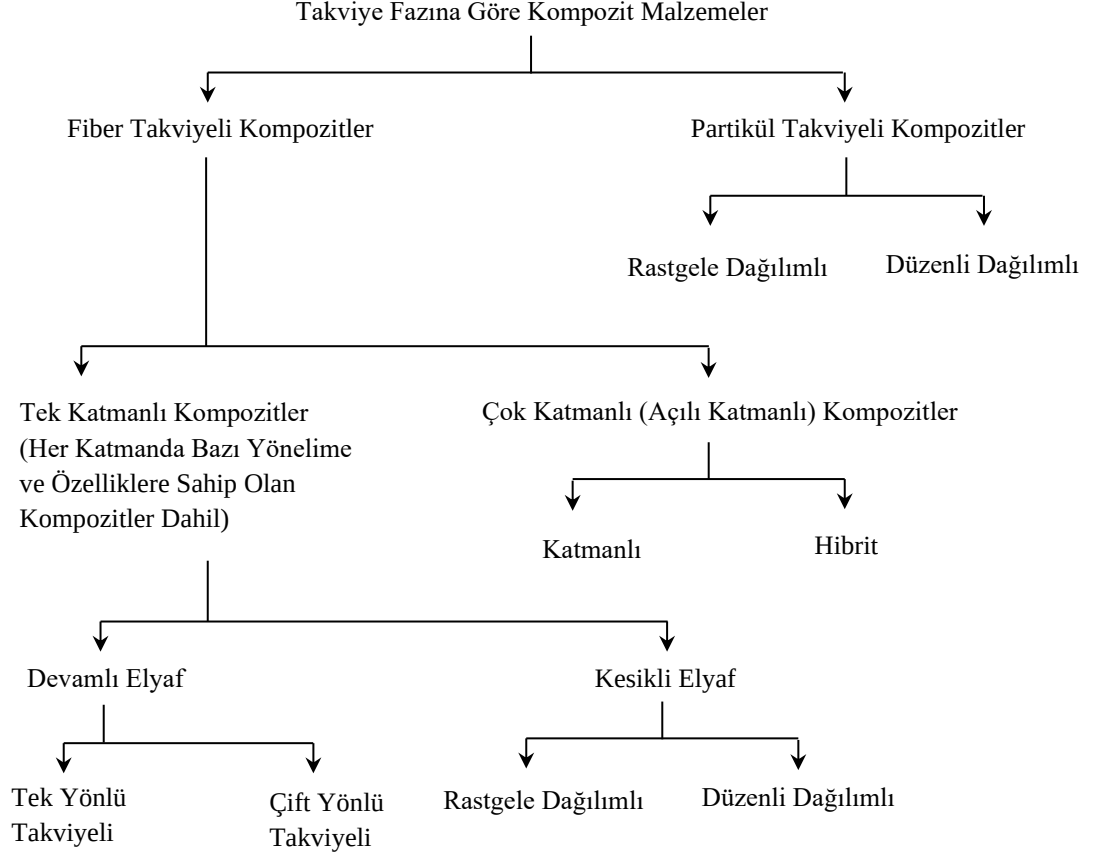
Kompozitler genellikle yapısal uygulamalarda kullanılırlar. Yapısal uygulamalarda kullanılan kompozitler şu özelliklere sahiptirler:

- Genellikle iki veya daha fazla fiziksel olarak farklı ve mekanik olarak ayrılabilir olan parçalardan oluşurlar.
- Ayrı malzemelerin, bileşenlerin kontrollü ve homojen dağılımını sağlayacak şekilde karıştırılmasıyla hazırlanırlar.

Kompozitlerin mekanik özellikleri, meydana geldiği bileşenlerden üstün olup, bazı durumlarda bileşenlerinin özelliklerinden benzersiz özellikler gösterirler. Bu durum cam fiber takviyeli kompozitlerde (CFTK) açıkça görülmektedir. Epoksi reçine nispeten zayıf, esnek ve kırılğan bir malzemedir, dolayısıyla tek başına çekme yüküne dayanımı yoktur. Aynı şekilde bir demet elyaf kendilerini bir arada tutan bir reçine olmadan çok fazla direnci yoktur. Bu iki malzeme bir araya geldiğinde, sertleştirilmiş reçine ve elyaf mükemmel tokluk özelliklerine sahip güçlü, sert bir kompozit malzeme ortaya çıkarırlar (Armstrong ve diğ., 2005).

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri farklı şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Bunlardan en yaygın olanı kompoziti meydana getiren takviye fazına ve matris fazına göre yapılan sınıflandırmalardır. Matris fazına göre kompozitler; polimer matrisli kompozitler (PMK), metal matrisli kompozitler (MMK) ve seramik matrisli kompozitler (SMK) olarak sınıflandırılır. En önemli sınıflandırma olan takviye fazına göre kompozitler ise Şekil 2.1’de verildiği fiber takviyeli ve partikül takviyeli olarak iki ana gruba ayrılırken, bu iki ana grup ise kendi içlerinde çeşitli alt gruplara ayrılırlar.



Şekil 2.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması (K. K. Kar, 2016)

2.2.1. Matris malzemesine göre kompozit malzemeler

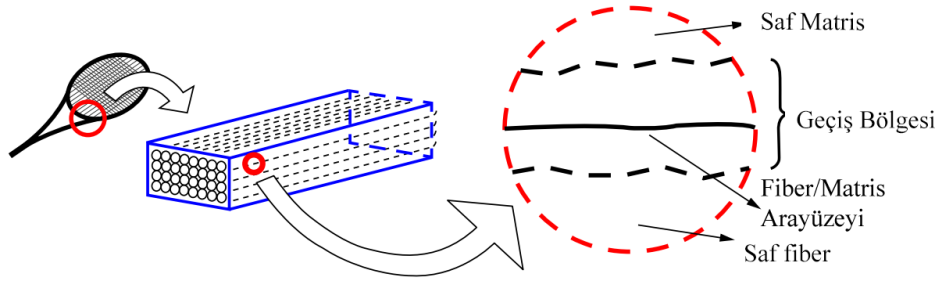
2.2.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler (PMK), geniş bir uygulama yelpazesine sahip önemli bir kompozit malzeme kategorisidir. PMK'larda, fiber ya da başka bir takviye malzemesi polimer matrisine gömülür. Doğru bir fiber ve matris seçimiyle özel gereksinimlere göre uyarlanabilen bu malzemeler, endüstride kullanım için büyük ilgi görmektedirler.

PMK'lar, hafif malzemelerdir, bunun yanı sıra takviye fiber malzemesinin doğrultusu boyunca yüksek sertlik ve mukavemet özellikleri gösterirler. Ayrıca boyutsal kararlılık, sıcaklık direnci, kimyasal direnç ve nispeten kolay işlenebilirlik sergilerler. PMK'lar birçok alanda, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde metal bileşenlerin yerini almaktadırlar (K. K. Kar, 2016). PMK'lar, kendileriyle aynı işi gören metal özdeşlerine oranla daha düşük sürtünme ve kendiliğinden yağlama gibi özelliklerinden dolayı tribolojik uygulamalar için giderek daha fazla kullanılmaktadırlar (Chand ve Naik, 2008; Häger ve diğ., 1993).



Şekil 2.2. Polimer matrisli kompozitten üretilmiş tekerlekli sandalye (Erden ve Ho, 2017)



Şekil 2.3. Bir elyaf takviyeli kompozit ürünün şematik gösterimi (Erden ve Ho, 2017)

Termosetler ve termoplastikler, gelişmiş PMK'lerin üretiminde kullanılan iki temel reçine türüdür.

Termoset Reçineler: Isı etkisiyle şekillendirilebilen ve bir daha ısıtılarak şekillendirmesi mümkün olmayan bir polimer türüdür. Global polimer pazarı binlerce milyon tonluk bir markete sahiptir ve termoset polimerler bu toplam üretimin %10'unu oluşturur (Vidil ve diğ., 2016). Termosetler, kimyasal olarak çapraz bağlanmış ağların mevcudiyetinden dolayı üstün termal ve mekanik özellikler ve üstün boyutsal kararlılık sergilerler. Bu yüzden kaplamalar, yapıştırıcılar, kompozitler, elektronik ambalajlar gibi farklı uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar (S. Ma ve Webster, 2018). En önemli

termoset reçineler arasında epoksi, polyester, poliüretan, poliamid, vinilester ve fenolik gösterilebilir. Bunların bazı özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Bazı termoset reçinelerin tipik özellikleri (K. K. Kar, 2016)

Reçine	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Yük Altında Eğilme Sıcaklığı (°C)	Sertleşme Büzülmesi (%)	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)
Epoksi	1,2–1,3	55–130	2,75–4,10	48	1–5	100–270
Polyester	1,1–1,43	34,5–103,5	2,1–3,45	60–205	5–12	70–120
Vinilester	1,12–1,32	73–81	3,0–3,5	93–135	5,4–10,3	102–150
Fenolik	1,00–1,25	30–50	3,6	165–175	0–0,01	260
Poliimid (PMR-15)	1,32	38,6	3,9	–	0–0,006	320–330
Poliüretan	1,1–1,5	1–69	0,069– 0,69	50–205	0,02	135

Günümüzde, gelişmiş kompozit endüstrisinde, termoset reçineler termoplastik reçinelerle kıyaslandığında piyasayı domine etmektedirler (K. K. Kar, 2016). Termoset reçineler çok düşük bir darbe direncine sahiptir ve kütleme/polimerizasyon işlemlerinden sonra yeniden şekillendirilemezler (Comas-Cardona ve diğ., 2005; Thakur ve diğ., 2017). Termosetler; otomotiv, havacılık, elektronik, inşaat ve ambalaj sanayilerinde yapısal malzemeler, yapıştırıcılar, kaplamalar veya yalıtım malzemeleri olarak yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Yüksek çapraz bağlanma yoğunluklarından dolayı, ısıyla sertleşen reçineler termal olarak kararlı, kimyasal olarak inert ve mekanik olarak serttir. Bununla birlikte, bu avantajlı özelliklere rağmen, termosetler kırılmandır ve mekanik arızaya eğilimlidirler (He ve diğ., 2017). Geri dönüşümü zor olan termoset bazlı kompozitlerin geri dönüşümü ile ilgili son yıllarda birçok çalışma yürütülmektedir (Chang ve diğ., 2018; Henry ve diğ., 2016; A. La Rosa ve diğ., 2016; A. D. La Rosa ve diğ., 2018; Mativenga ve diğ., 2016; Overcash ve diğ., 2018).

Epoksi; yapısal ve özel kompozit uygulamalarda diğer termoset reçinelerin ulaşamadığı eşsiz özellikler sunmasından dolayı yaygın olarak kullanılan termoset malzemelerdir (Miracle ve Donaldson, 2001). Solvent direnci, düşük büzülme, mükemmel elektrik yalıtımı, iyi mekanik özellikler ve tatmin edici yapışma gibi istenen özellikleri epoksi reçinelerden elde etmek mümkündür (Jiang ve diğ., 2015).

Epoksi reçinelerin uygulama alanları oldukça geniştir ve karbon fiber, cam fiber gibi takviyelerin kullanıldığı kompozit malzemelerin yanında kaplamalar ve yapıştırıcılarda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Her ne kadar polyester reçineler ve vinilester reçinelerden daha pahalı olsalar da, epoksi reçineler ile genellikle daha güçlü ve sıcaklığa daha dayanıklı kompozit parçalar üretilmektedir (Negoita ve diğ., 2016). Epoksi reçineler, sertleşme esnasında düşük büzülme (%1-5) ile nispeten düşük molekül ağırlığına sahiptir. Parçalar halinde sertleştirilebilir ve bu şekilde depolanabilirler. Sertleştirilmiş epoksi reçineler, iyi mekanik ve termal özelliklerinin yanında kimyasal etkilere ve korozyona karşı yüksek direnç gösterirler (K. K. Kar, 2016).

Polyester; mekanik özelliklerinin iyi olması, korozyon direnci, hafiflik ve düşük maliyetlerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Çekme dayanımları 34,5 MPa ile 103,5 MPa arasında değişmektedir. Camsı geçiş sıcaklıkları epoksi reçinelerden daha düşük olan 70 °C ile 120°C arasında değişmektedir (K. K. Kar, 2016). Polyester reçineler, yapısal bozulmaya karşı iyi bir UV dayanımına sahip olacak şekilde formüle edilebilir ve birçok dış mekan uygulamasında kullanılabilirler. Bazı renk bozulmaları ve bazı güç kayıpları görülse de çevresel etkilere 30 yılı aşkın sürelerde dayanabilirler (Barbero, 2017).

Mekanik özellikler polyester reçinelerin seçiminde kritik rol oynarlar. Tablo 2.2’de polyester reçinelerin mekanik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan test metotları listelenmiştir.

Tablo 2.2. Polyester reçinelerin mekanik özelliklerini karakterize etmek için kullanılan ASTM test metotları (Miracle ve Donaldson, 2001)

Özellik	Test Metodu
Çekme dayanımı, modülü ve % uzama	ASTM D638
Eğme dayanımı ve modülü	ASTM D790
Basma dayanımı, modülü ve kırılmada % sıkıştırma oranı	ASTM D695
Izod darbe deneyi	ASTM D256
Isıl bozunma	ASTM D648
Barcol Sertlik	ASTM D2583

Polyester reçinelerin fiziksel özellikleri, takviye malzemesi kullanılarak kontrol edilebilmektedir. Tablo 2.3’te cam fiber takviyesinin bazı polyester reçinelerin mekanik özelliklerine etkileri verilmiştir.

Tablo 2.3. Cam fiber oranının polyester kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi (K. K. Kar, 2016)

Malzeme	Cam Fiber Oranı (% Ağırlık)	Bükme Dayanımı (MPa)	Bükme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Basma Dayanımı (MPa)
Ortoftalik Polyester	30	170	5,5	140	4,8	-
	40	220	6,9	150	5,5	-
İzoftalik Polyester	30	190	5,5	150	8,27	-
	40	240	7,58	190	11,7	210
Bisfenol A Polyester	25	120	5,1	80	7,58	170
	35	150	8,27	100	10,3	170
	40	160	8,96	120	11,0	180
Klorendik Polyester	24	120	5,9	80	7,58	140
	34	160	6,89	120	9,65	120
	40	190	9,65	140	9,65	120
Vinilester Polyester	25	110	5,4	86,2	6,96	180
	35	260	9,52	153,4	10,8	230
	40	220	8,89	160	11,0	210

Poliüretan; ileri kompozit uygulamalarında kullanılan başka bir grup reçinedir. Poliüretanlar çok yönlü polimerlerdir ve çekme dayanımı (1-69 MPa), aşınma direnci ve yırtılma dayanımı (12–192 kN/m) için iyi performans gösterirler. Bu reçineler fiber takviyeli yapı köpükleri olarak kullanılırlar (K. K. Kar, 2016).

Fenolik ve amino reçineler; başka bir termoset reçineler grubudurlar. Bunlar düşük maliyetlidir ve iyi mekanik özelliklerle birlikte iyi elektriksel ve ısı yalıtım özelliklerine sahiptirler. Mika takviyeli fenolik reçinelerin dielektrik dayanımı 13,790 ila 15,760 V/m arasında değişmekte olup, gerilme dayanımı 38 ila 48 MPa arasındadır (K. K. Kar, 2016). Fenolik reçineler, bir katalizör varlığında fenol veya sübstitüe edilmiş fenolün bir aldehit, genellikle formaldehit ile reaksiyonu ile üretilen termoset reçinelerdir. Fenolik reçineli kompozitler üstün ateş direnci, mükemmel yüksek sıcaklık performansı, uzun süreli dayanıklılık ve hidrokarbon ve klorlu solventlere karşı direnç gösterirler (Miracle ve Donaldson, 2001). Amino reçineler ise formaldehitin amin grubu NH_2 içeren çeşitli bileşiklerle kontrollü reaksiyonuyla oluşturulurlar. Üreformaldehit ve melamin formaldehit bu kategorideki yaygın örneklerdir. Yangın durumunda, düşük duman ve ısı

salma özelliklerine sahiptirler. Bu nedenle, uçak iç kısımları bu malzemelerden yapılmaktadır (K. K. Kar, 2016).

Poliimid; kompozit endüstrisinde yüksek sıcaklık uygulamaları için kullanılan nispeten yeni malzemeler sınıfıdır. Poliimidlerin camsı geçiş sıcaklıkları 320 °C ile 330 °C arasındadır. Bu reçinelerin ısı kararlılığı ve alev direnci, epoksi reçinelerden daha iyidir. Poliimid bazlı kompozitler, olumsuz çevresel koşullarda mükemmel bir dayanıma sahiptir, ancak kırılma sırasında çok düşük bir uzamaya sahiptirler ve kırılındırlar (K. K. Kar, 2016).

Termoplastik Reçineler: Halen, termoplastik reçineler plastik matrisli kompozit endüstrisinin nispeten küçük bir bölümünü temsil etmektedir. Bu reçineler reaktif olmayan katı maddelerdir, yani işleme sırasında termoset reçinelerde olduğu gibi kimyasal reaksiyon oluşmaz. Nihai ürün, ısı ve basınç uygulanarak elde edilir. Termoset reçinelerden farklı olarak, termoplastik reçineler istenirse yeniden ısıtılabilir ve başka bir şekle dönüştürülebilir. Termoplastik reçinelerin yaygın örnekleri olarak polietilen, polistiren, naylon, polikarbonat, polisülfon, polifenilen sülfid, akrilonitril bütadien stiren (ABS) vb. gösterilebilir. Önemli termoplastik reçinelerin bazı özellikleri Tablo 2.4'te verilmiştir (K. K. Kar, 2016).

Tablo 2.4. Bazı termoplastik reçinelerin tipik özellikleri (K. K. Kar, 2016)

Reçine	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Çekme Modülü (GPa)	Yük Altında Eğilme Sıcaklığı (°C)	Sertleşme Büzülmesi (%)	Camsı Geçiş Sıcaklığı (°C)
Akrilonitril bütadien stiren (ABS)	0,88–3,5	24,1–73,1	0,78–6,1	65–220	–	105–109
Polisitren	1,02–1,18	17,9–60,7	0,3–3,35	62–98	0,002– 0,008	83–100
Naylon 6	1,12–1,14	41–166	2,6–3,2	68–85	0,003– 0,015	47
Polikarbonat	0,95–1,51	46,1–93,1	1,8–3,0	78–187	–	143–152
Polisülfon (PSU)	1,37–1,48	60–131	–	172–213	–	–
Polietilen, HDPE (cam dolgulu)	0,94–1,53	11–113	0,7–13,6	51,7–127	0,001– 0,003	–

Termoplastikler, birçok süpersonik uçak ve çoğu ticari uçak gereksinimi için çekici mekanik özelliklere sahiptirler. Ayrıca boyutsal kararlılık ve çekici dielektrik

özellikler sunarlar. İyi alev geciktirici ve aşınmaya dayanıklı özellikler sergilerler. Mevcut nesil termoplastik ve termosetlerin niteliksel olarak karşılaştırılması Tablo 2.5’te verilmiştir (Miracle ve Donaldson, 2001).

Tablo 2.5. Termoplastik ve termosetlerin karşılaştırması (Miracle ve Donaldson, 2001)

Karakteristik	Termoplastik	Termoset
Çekme özellikleri	Mükemmel	Mükemmel
Sertlik özellikleri	Mükemmel	Mükemmel
Basma özellikleri	İyi	Mükemmel
Darbe sonrası basma mukavemet	İyi ile mükemmel arası	Orta ile mükemmel arası
Civatalı bağlantı özellikleri	Orta	İyi
Yorulma dayanımı	İyi	Mükemmel
Darbe toleransı	Mükemmel	Orta ile mükemmel arası
Sağlamlık	Mükemmel	İyi ile mükemmel arası
Bakım kolaylığı	Orta ile kötü arası	İyi
Servis sıcaklığı	İyi	İyi
Dielektrik özellikleri	İyi ile mükemmel arası	Orta ile iyi arası
Çevresel zayıflık	Yoktur, ya da hidrolik akışkanlar	Nem
NBS duman test performansı	İyi ile mükemmel arası	Orta ile iyi arası
İşleme sıcaklığı, °C	343-427	121-315
İşleme basıncı, MPa	1,38-2,07	0,59-0,69
Yatırma karakteristiği	Zor	Kolay
İşlem sonrası birleştirme seçenekleri	Vida ile tutturma, yapıştırma, füzyon	Vida ile tutturma, yapıştırma
Üretim hırdası oranı	Düşük	Düşük
Ön hazırlık kolaylığı	Orta ile zayıf arası	İyi ile mükemmel arası
Uçucu olmayan prepreg	Mükemmel	Mükemmel
Prepreg raf ömrü ve çalışma süresi	Mükemmel	İyi
Sağlık/güvenlik	Mükemmel	Mükemmel

Termoplastik reçinelerin bileşimi, termoset reçinelerden farklıdır. Termoset reçineler, malzemeye sertlik sağlamak için birçok küçük molekülün çapraz bağlanmasına

dayanırken, termoplastik reçineler, malzemenin sertliğini ve mukavemetini sağlamak için moleküllerin boyutuna (uzunluğuna) bağlıdır (bu moleküller reaktif değildir). Mikro yapılarıdaki bu doğal farklılık nedeniyle, termoplastik reçineler, termoset reçinelere kıyasla avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Termoplastik reçinelerin avantajları aşağıda verilmiştir.

1. Raf ömrü sorunu yoktur. Termoplastik reçine, malzemenin sertleşmesinden endişe duymadan rafa sonsuz şekilde yerleştirilebilir.
2. İşleme döngüsü kısa olabilir. Preforö bir kalıba yerleştirildikten sonra, ısıtma ve soğutma adımları dakikalar içerisinde (termosetler için saatler sürer) yapılabilir.
3. Termoplastik kompozitler, termoset matris kompozitlere kıyasla daha yüksek süneklik ve kırılma tokluğuna sahiptir.
4. Termoplastik reçineler eritilebilir ve tekrar kullanılabilir, böylece geri dönüştürülebilir hale getirilir.
5. Termoplastik kompozitlerde kusurlar varsa, hasarı iyileştirmek için malzeme ısıtılabilir.

Termoplastik reçinenin dezavantajları ise şunlardır:

1. Termoplastik kompozitlerin preformları oldukça sert ve esnek olmayan bir yapıdadır. Bu yüzden kalıba hizalamak efor sarf ettirir.
2. Termoplastiklerin viskoziteleri termosetlerle kıyaslandığında oldukça yüksektir. Yüksek viskozite işlemede yüksek sıcaklık ve basınç gerektirir. Bu durum ayrıca kompozit malzemede boşluk problemine neden olmaktadır (Hoa, 2009).

Polietilen; birçok ürün uygulaması için yeterli dayanıma sahip, çok çeşitli sıcaklıklarda iyi esneklik ve mükemmel korozyon direnci olan yarı saydam bir termoplastik malzemelerdir. Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) olmak üzere iki çeşit polietilen vardır. LDPE dallanmış zincirli bir yapıya sahiptir ve HDPE düz zincirli bir yapıya sahiptir. LDPE 6,2 ile 17,2 MPa arasında bir gerilme direncine sahipken, HDPE 20 ila 37 MPa arasında değişen bir gerilme kuvvetiyle daha güçlüdür. Polietilenler çoğunlukla elektriksel yalıtım, kimyasal boru, ev eşyaları ve ambalajlamada kullanılır (K. K. Kar, 2016).

Polistiren; değiştirilmediği sürece nispeten kırılğan olan açık, kokusuz ve tatsız bir plastik malzemedir. Polistirenin darbe özellikleri, polibütadien kauçuğu ile kopolimerizasyon yoluyla iyileştirilebilir. İyi boyutsal stabiliteye ve düşük kürlenme

büzülmesine sahiptirler. Ancak organik çözücüler ve yağlar tarafından kimyasal saldırılara karşı hassastırlar. Çalışma sıcaklığı sınırları dahilinde yeterli gerilme dayanımına (17,9-60,7 MPa) sahiptirler (K. K. Kar, 2016).

Poliamidler (Naylonlar); ana zincir yapılarında tekrar eden bir amid grubunun varlığı ile karakterize edilen termoplastiklerdir. Yeterli gerilme mukavemeti (41-166 MPa), iyi tokluk (107 J/m) ve iyi kimyasal dirence sahiptirler. Tipik olarak yağlanmamış dişliler, hız göstergesi ve ön cam silecek dişlileri, anten montajları, paketleme ve birçok genel amaçlı uygulama için kullanılırlar (K. K. Kar, 2016).

Polikarbonatlar; yapılarında karbonat grubuna sahip başka bir termoplastik grubu oluştururlar. Polikarbonatların oda sıcaklığında gerilme mukavemeti nispeten yüksektir (yaklaşık 62 MPa) ve darbe mukavemeti de çok yüksektir (640-854 J/m). Yüksek ısı sapma sıcaklığına, iyi elektriksel yalıtım özelliklerine, iyi korozyon direncine ve yüksek boyutsal kararlılığa sahiptirler. Polikarbonatlar için tipik uygulamalar arasında güvenlik kalkanları, kameralar ve dişliler, uçak bileşenleri, kasklar, elektrik rölesi kapakları ve bilgisayar terminalleri bulunmaktadır (K. K. Kar, 2016).

2.2.1.2. Metal matrisli kompozitler

Metal matris kompozitlerin ortaya çıkışı eski uygarlıklara kadar uzanmaktadır. Bilinen ilk metal matrisli kompozit M.Ö 7000'lere ait olduğu düşünülen ve Türkiye'de bulunan bir bakır tıg olarak görülmektedir. Metallerin hizmet performansını arttırmak, özgül güçlerini ve özgül sertliklerini arttırmak ve metal matris kompozitlerinin uzay teknolojisi geliştirme araştırmalarının gerekliliklerini karşılamak için araştırmalar 1960'larda başlamıştır (Yi ve diğ., 2017a).

1957'de, Sovyet Sputnik uydusunun yeryüzünün atmosferine girmesi sırasında, dış çevresi tarafından elde edilen sıcaklık 1500 °C'yi aşmış ve o zaman bilinen herhangi bir kompozit ya da monolitik malzemenin sürdürülebilirlik sınırını geçmiştir. Böylece uygun bir malzemeye olan ihtiyaç ortaya çıkmış ve bilim adamları bir çözüm için metal matris kompozitler (MMK'lar) üzerinde deney yapmaya başlamıştır (K. K. Kar, 2016).

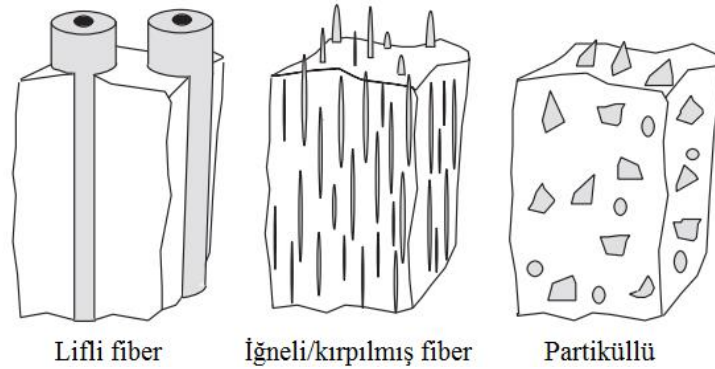
MMK kavramı, iki farklı malzemenin en iyi özelliklerini (seramik malzemenin modülü ve mukavemeti, metal malzemenin sünekliği ve tokluğu gibi) takviye edilmemiş metallere kıyasla daha üstün özelliklere sahip bir malzeme yapmak için kullanmasına dayanmaktadır.

MMK'ları oluşturmak için farklı matris malzemeler kullanılmaktadır. Bunlar alüminyum, bakır, titanyum, magnezyum ve alaşımlarıdır. Hafif olmalarından dolayı havacılık, uzay ve otomotiv motorları gibi uygulamalarda önemli gelişme potansiyelleri bu malzemelerin tercih edilme sebebidir (Miracle ve Donaldson, 2001). Bu matris malzemelerinde genellikle karbür, borür, nitrür ve oksit gibi takviye elemanları kullanılmaktadır. Tablo 2.6'da metal matris malzemesine göre kullanılan takviye elemanları verilmiştir.

Tablo 2.6. Metalik matrisli malzemeler ve takviye malzemeleri (Legzdins ve diğ., 1997)

<i>Matris malzemesi</i>		<i>Takviye malzemesi</i>			
		<i>Partikül</i>		<i>Kısa fiber</i>	
2xx	6xxx	SiC	AlN	SiC	Bor
3xx	7xxx	Al ₂ O ₃	TiB ₂	Al ₂ O ₃	TiB ₂
2xxx	8xxx	B ₄ C	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃ -SiO ₂	Tungsten
Bakır alaşımları		Karbon (Grafit)	TiC	Karbon (Grafit)	
		<i>İğnesel (Whisker)</i>		<i>Fiber</i>	
Titanyum alaşımları		SiC	B ₄ C	SiC	Bor
		Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄	Al ₂ O ₃	TiB ₂
Magnezyum alaşımları		Karbon (Grafit)		Al ₂ O ₃ -SiO ₂	Tungsten
				Karbon (Grafit)	

MMK tipleri, takviyenin (i) uzun hizalanmış lifler (yüksek takviye edici içeriğe izin verir), (ii) kısa lifler (bir dereceye kadar hizalama dereceli veya hizalanmamış), (iii) en azından yaklaşık olarak eşitlenmiş olan parçacıklar formunda olup olmadığına göre, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, genellikle alt bölümlere ayrılırlar (Hutchings ve diğ., 2000).



Şekil 2.4. Farklı takviye tiplerine göre MMK sistemlerinin şematik gösterimi (Hutchings ve diğ., 2000)

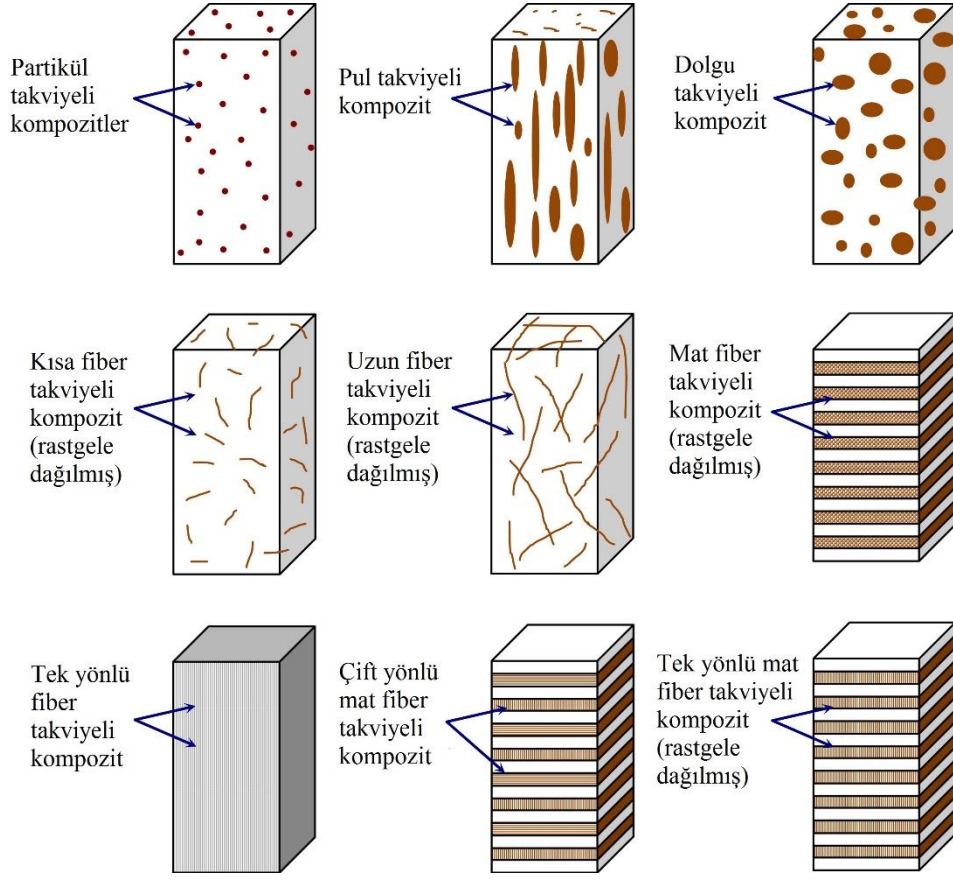
2.2.1.3. Seramik matrisli kompozitler

Elyaf takviyeli seramik matrisli kompozitler (SMK'lar) 1980'lerden bu yana yüksek sıcaklıkta yapısal malzemeler olma potansiyelleri nedeniyle büyük ilgi görmektedirler (Miracle ve Donaldson, 2001). Bu malzemeler, zorlu ortamlardaki uygulamalar için tasarlanmış kırılğan olmayan refrakter malzemelerdir (genellikle yüksek sıcaklıklar, yüksek stres seviyeleri ve aşındırıcı atmosferleri birleştirir). Diğer yapısal malzemelerle (çelikler, alüminyum veya titanyum alaşımlar ve ayrıca nikel bazlı süper alaşımlar veya monolitik seramikler gibi) karşılaştırıldığında, bunlar nispeten yeni malzemelerdir. Hala geliştirme aşamasındadırlar, ancak farklı olarak birkaç iyi kurulmuş ve gelecek vaat eden uygulamalarla yüksek teknoloji alanlarında kullanılmaktadırlar (Krenkel, 2008). Bu yeni kompozit sınıfı, havacılık ve enerji üretimi için türbin motorları için bileşenler üretmeyi ve uzay uygulamaları ve çeşitli endüstriyel kullanımlar için farklı bileşenler üretmeyi amaçlayan birçok araştırma programının konusu olmuşturlar (Miracle ve Donaldson, 2001).

SMK'larda, seramik üretimi için sadece gerekli olan nispeten yüksek sıcaklıklara önemli ölçüde zarar vermeden dayanabilen fiber takviyeler kullanılırlar. Dolayısıyla, organik, polimerik fiber malzemeler, 500 °C'nin altındaki sıcaklıklarda bozundukları için SMK'larda kullanılamazlar. Ayrıca, erime veya yumuşama noktaları 700 °C'nin altında olan geleneksel cam elyaflar da bu amaç için kullanılamazlar. Seramik malzemelerin güçlendirilmesi için olası adaylar polikristal veya şekilsiz inorganik fiberler veya karbon fiberlerdir (Krenkel, 2008).

2.2.2. Takviye edilme şekline göre kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler temel olarak matrislerden (polimerler, metaller ve seramikler) ve takviyelerden (sürekli lifler, kırılmış lifler ve partiküller) oluşur (Yi ve diğ., 2017b). Takviye, ısı iletkenliği, aşınma direnci gibi özellikleri değiştirerek kompozitlere yapısal bütünlük sağlamak için bir kompozitin matrisine yerleştirilen malzemelerdir. Takviye fiberler, PMK, SMK ve MMK'ların kilit bileşenleridir. Yaygın olarak kullanılan takviye örnekleri, Al_2O_3 , bor nitrür, SiC, tungsten karbür, karbon fiber, cam elyafı, metaller, organik materyaller ve benzerleridir. Takviye olarak kesintisiz veya süreksiz lifler veya partiküller kullanılabilir (K. K. Kar, 2016). Tasarım gerekliliklerine bağlı olarak, kullanımda değeri yüksek ticari bir kompozit parça üretmek için uygun bir takviye malzemesi seçmek gerekmektedir.



Şekil 2.5. Farklı takviye türleri (Nirmal ve diğ., 2015)

2.2.2.1. Fiber takviyeli (lifli) kompozit malzemeler

Fiber takviyeli kompozitlerde, cam, bor, grafit, karbon, silika, tungsten, Kevlar, berilyum elyafları takviye elemanı olarak kullanılır. Büyük lifler için kompozitler sürekli lif takviyeli kompozitler olarak bilinirken, küçük lifler için bunlar süreksiz lif takviyeli kompozitler olarak adlandırılırlar.

Matris ve elyaf arasındaki temas, matrisin çatlama direncinin artırılmasında inanılmaz derecede etkilidir. Matris, elyafları sabitler ve kuvvetleri elyaflara aktararak ekolojik yaralanmalara karşı savunmaya yardımcı olur. Lifli kompozitler, yüksek mukavemet sağlayabilmelerinden dolayı kompozit malzemelerin en önemli kategorisini oluştururlar ve genellikle tek katmanlı ve çok katmanlı kompozitler olarak sınıflandırılırlar.

2.2.2.2. Partikül takviyeli kompozit malzemeler

Partikül takviyeli kompozitler, bir matris malzemesi ile (polyester, vinilester vb.) farklı boyutlarda ya da aynı boyutlarda parçacıkların (kül, kemik tozu vb.) homojen bir

şekilde karışımından meydana gelirler. Parçacıklar herhangi bir şekle, boyuta veya konfigürasyona sahip olabilir. İyi bilinen tanecikli kompozitlerin örnekleri beton ve yonga levhadır. Partiküllü kompozitlerin birçok farklı formu vardır. Bunlar çok küçük parçacıklar (<0.25 mikron), doğranmış elyaflar (cam gibi), trombositler, içi boş küreler veya karbon nano tüpleri gibi yeni malzemeler olabilir. Her durumda, tanecikler istenen malzeme özelliklerini sağlar ve matris yapısal uygulamalar için gerekli olan bağlayıcı ortam görevi görürler.

Partikül takviyeli kompozitlerdeki parçacıklar ve matris malzemesi, mineral ve mineralize olmamış herhangi bir karışım olabilir. Karışımında kullanılan parçacıkların temel amacı, daha ucuz malzemelere ihtiyaç duyulması veya bazı özelliklerde önemli bir iyileşme ihtiyacıdır. Güçlendirici partikül takviye elemanları çekme, basma ve kayma dayanımı gibi mekanik özellikleri, geri büzülme oranını ve sertliğin artırılmasını sağlar.

2.2.2.3. Tabakalı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozitler, birbirine kaynaşmış minimum iki tamamen farklı malzemenin katmanlarının bir araya gelmesiyle oluşurlar. Bu kompozitler, mukavemet, tokluk, düşük ağırlık, erozyon direnci ve ısı yalıtımı gibi çeşitli özellikler ile karakterize edilirler. Bükülmüş metaller, tabakalı camlar ve tabakalı fiberler gibi çok sayıda tabakalı kompozit vardır.

2.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Günümüzde çok farklı kompozit üretim yöntemleri bulunmaktadır. Tablo 2.7’de en yaygın kullanılan üretim yöntemleri ve tipik uygulama alanları verilmiştir.

Tablo 2.7. Kompozitlerin üretim yöntemleri ve tipik uygulama alanları (K. K. Kar, 2016)

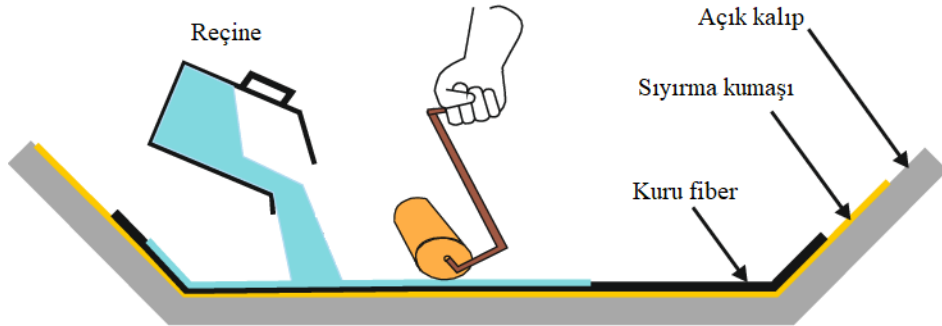
Yöntem	Açıklama	Tipik uygulamaları
El yatırma	Düşük maliyet	Maliyetin yüksek dayanım veya düşük ağırlıktan daha önemli olduğu büyük ticari parçalar
	Düşük mukavemetli parçalar	
	Büyük parçalar	
	Nispeten düşük maliyetli takım	
Vakum torbası	Elle yatırmaya benzer, ancak daha	Maliyetin yüksek dayanım veya düşük ağırlıktan daha önemli olduğu büyük ticari parçalar
	yüksek dayanıklılığa yol açan	
	gelişmiş sağlamlaştırma	

Tablo 2.7. Kompozitlerin üretim yöntemleri ve tipik uygulama alanları (devamı)

Yöntem	Açıklama	Tipik uygulamaları
Otoklav sertleştirme	Yüksek kalite Yüksek güç Nispeten yüksek takım maliyeti Otoklav ile boyut sınırlıdır	Yüksek performanslı askeri ve havacılık bileşenleri ve termal çekirdekler
Reçine transfer kalıplama	Yüksek kalite Yüksek güç Uyumlu metal takım Otoklavdan daha düşük maliyet	Askeri ve havacılık uygulamaları, Büyük hacimli ticari parçalar, Küçük muhafazalar ve klavyeler
Vakum destekli reçine transfer kalıplama	Yüksek maliyetli takım Yüksek kalite Karmaşık parçalar Düşük parça maliyeti	Donanma uygulamaları için yaygın olarak kullanılır, Büyük elektronik ekipman muhafazaları, operatör konsolları, vb.
Sıkıştırma kalıplama	Yüksek maliyetli takım Yüksek kalite Karmaşık parçalar Düşük parça maliyeti	Elektronik modül kapakları ve küçük elektronik ekipman muhafazaları

2.3.1. El yatırma

El yatırma, kompozit imalatında kullanılan en eski açık kalıp işlemidir. Bu süreç basittir ve düşük hacimli ve yoğun emek gerektiren bir süreçtir. Tekne gövdesi gibi büyük parçalar bu teknikle hazırlanabilir (K. K. Kar, 2016). Genellikle elle yapılırlar ve sadece yardımcı işleri tamamlamak için ekipman ve aletlere ihtiyaç duyulur (Şekil 2.6).

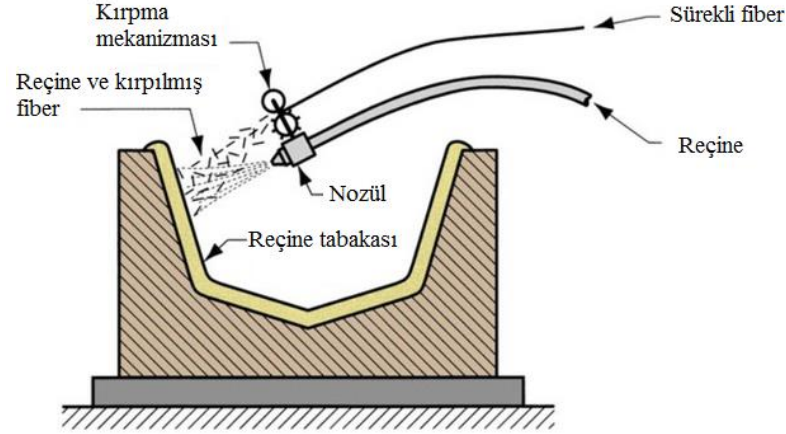
**Şekil 2.6.** Elle yatırma işleminin şematik gösterimi (Uzay ve Geren, 2020)

El yatırması basit, öğrenmesi kolay bir yöntemdir. Kullanılan ekipman basittir, düşük yatırım gerektirir ve hızlı bir şekilde başlatılır. Ürünün büyüklüğü ve şekli sınırlı

değildir. Bununla birlikte, el yatırma süreçleri düşük verimlilik, zayıf çalışma koşulları ve yüksek iş gücü yoğunluğu gibi sakıncalara sahiptir. Ürün kalitesi, çalışanın operasyonel becerisine büyük ölçüde dayanır ve kontrol edilmesi zordur. Ürün yapısı, diğer teknikler kullanılarak elde edilen ürünlerden daha düşüktür. Bununla birlikte, el yatırma işlemi, özellikle küçük miktarlarda ve büyük veya karmaşık şekilli cam fiber takviyeli polimer kompozit ürünleri için hala yeri doldurulamaz bir yöntemdir (Yi ve diğ., 2017a).

2.3.2. Püskürtme (enjeksiyon kalıplama) yöntemi

El yatırma yöntemine benzeyen bu uygulamada reçine kalıp içerisine bir sprej mekanizması ile sıkılır, buna eş zamanlı bir biçimde sprej tabancası üzerinde bulunan bir mekanizma ile kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine reçine ile birlikte püskürtülür. Enjeksiyon kalıplama, el yerleşiminin bir gelişimidir ve yarı mekanize bir elle yatırma yöntemidir.

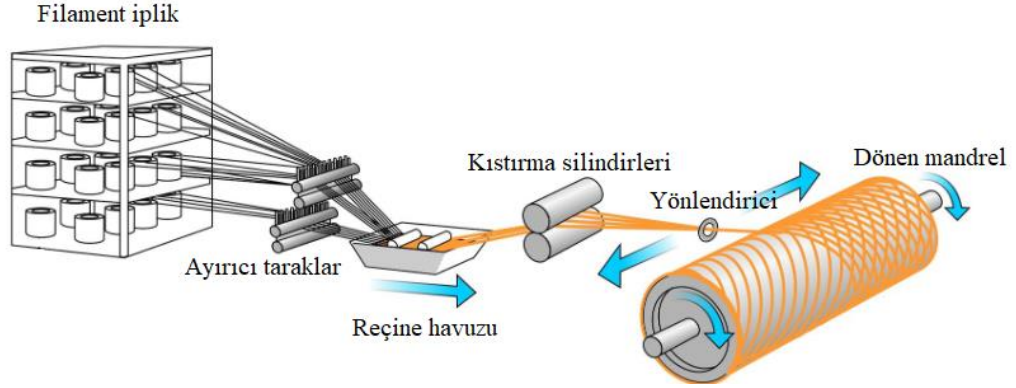


Şekil 2.7. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi (Phadke, 2018)

2.3.3. Elyaf sarma yöntemi

Reçine matrisli bir kompozit imalat tekniği olan elyaf sarma yönteminde, sürekli lifler, bir koloitle emdirildikten sonra oluşturulmuş bir forma göre bir dönen bir kalıp üzerine sarılır ve sonra belirli bir sıcaklıkta belirli şekillerde katılaşır (Yi ve diğ., 2017a). Geleneksel olarak, bu işlem basınçlı kaplar, roket motoru kılıfları, tanklar, kanallar, golf sopası milleri ve oltalar yapmak için kullanılır. Son zamanlarda, silindirik olmayan ve küresel olmayan kompozit parçalar da elyaf sarma teknolojisi ile üretilmektedir.

Poliesterler, vinil esterler, epoksiler ve fenolikler, elyaf sarma tekniğinde kullanılan tipik termoset reçineleridir (K. K. Kar, 2016).



Şekil 2.8. Elyaf sarma yönteminin şematik gösterimi (Supian ve diğ., 2018)

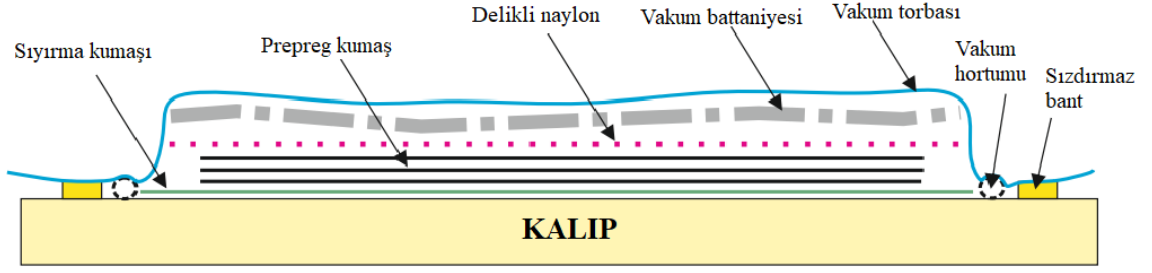
2.3.4. Sıkıştırma kalıplama yöntemi

Sıkıştırma kalıplamada, bir malzeme (toz, parçacıklar veya elyaflar) metal bir kalıba yerleştirilir ve sonra istenen bir ürünü vermek üzere belirli bir sıcaklık ve basınçta sertleştirilir. Sıkıştırma kalıplama sırasında, malzemeyi plastik veya erimiş yapmak için belirli bir sıcaklık ve basınç gereklidir, böylece malzemeler metal kalıbı doldurabilirler. Sertleşme, belirli koşullar altında gerçekleşir. Sıkıştırılmış malzemenin akışı esnasında hem reçine hem de takviye malzemesi akmaktadır, dolayısıyla daha yüksek bir kalıplama basıncı uygulanmaktadır. Hidrolik basınçlı makineler basıncı doğru bir şekilde kontrol altında tutarlar ve bu yüzden yüksek mukavemetli, yüksek hassasiyetli ve yüksek sıcaklık direncine sahip kalıplara ihtiyaç vardır (Yi ve diğ., 2017a).

2.3.5. Vakum infüzyon yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, basınç oluşturma ve bir depresyon şekillendirme tekniğidir. İşlem tasarım gerekliliklerine bağlı olarak ve çoğunlukla el ile güçlendirilmiş malzemeler ve reçineler (önceden karıştırılmış malzemeler dahil) belirtilen kalınlığa ulaşılan kadar bir kalıp üzerine yerleştirilir. İşlem, basınçlandırma veya boşaltma, ısıtma, katılaşma ve açma işlemleriyle tamamlanır. Vakum infüzyon yöntemiyle kalıplamada;

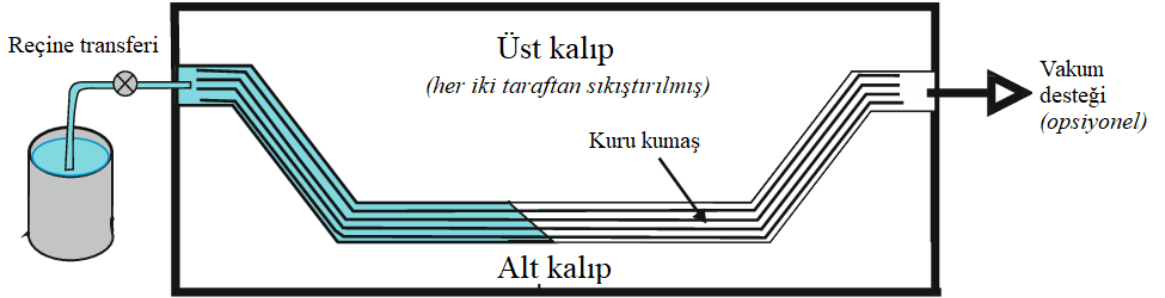
1. Polyester, epoksi ve fenolik reçinelerin kullanılabilir olması,
2. Üretilen kompozitlerin her iki tarafının pürüzsüz olması,
3. Elle şekillendirilen ürünlerden daha yüksek kalitede ürün elde edilmesi, bu tekniğin avantajlarıdır.



Şekil 2.9. Vakum infüzyon şematik gösterimi (Uzay ve Geren, 2020)

2.3.6. Reçine transfer kalıplama

Reçine transfer kalıplama (RTK), orta ve yüksek hacimli üretim için düşük basınçlı bir kapalı kalıplama işlemidir. Bu işlem temel olarak, kuru takviye yığınının kalıbın alt kısmına yerleştirilmesini içerir ve diğer yarısı alt kalıbın üzerine sıkıştırılır. Karmaşık şekiller için preformlar kullanılır. Kalıbı kapattıktan sonra, havayı stratejik olarak yerleştirilmiş deliklerden geçiren katalizör içeren düşük viskoziteli bir reçine pompalanır (K. K. Kar, 2016). Reçine havalandırma deliğinde görüldüğü zaman, bu, kalıp boşluğunun reçine dolu olduğu ve sertleşme aşamasının başladığı anlamına gelir. Reçine belirli bir güce ulaşana kadar ürünler çıkarılabilir. Diğer fiber takviyeli kompozitleri oluşturan işlemlerle karşılaştırıldığında, RTK birçok avantaja sahiptir (Yi ve diğ., 2017a).

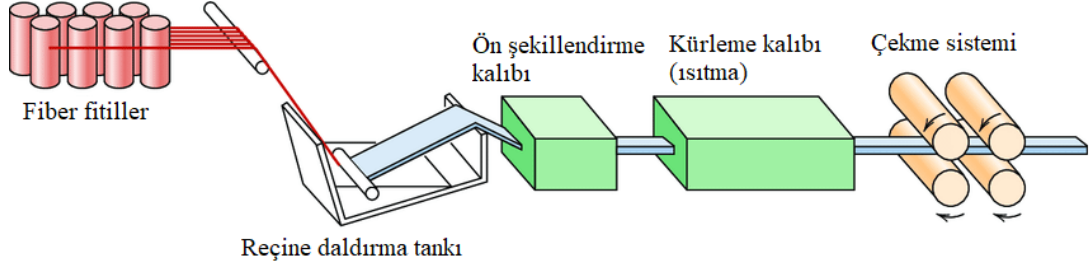


Şekil 2.10. Reçine transfer kalıplama (Uzay ve Geren, 2020)

2.3.7. Pultrüzyon

Pultrüzyon işlemi, genellikle sürekli elyafların, bir katalizörle karıştırılmış, reçine içeren bir banyodan çekilmesini içerir ve daha sonra ısıtılmış bir kalıp tarafından izlenen bir ön kalıplama tertibatından geçirilir. Fazla reçine uzaklaştırılır ve bileşen, performans fiktürlerinden geçerken kısmen önceden şekillendirilir. Ürünün kesit geometrisi ve bitişi, ısıtılmış bir kalıp tarafından belirlenir. İyi kalitede bir ürün için genellikle daha fazla sertleştirme gerekir (K. K. Kar, 2016). Çelik üretimine kıyasla, pultrüzyon daha fazla

esnekliğe sahiptir ve ekipmana daha az yatırım gerektirir ve daha fazla sayıda ürünün üretiminde kullanılır. Pultrusion profil yoğunluğu alüminyumdan daha düşüktür. Profil, yüksek özgül mukavemet, yüksek modül ve korozyon direnci, yüzey işlemlerine ihtiyaç duymaması, iyi yalıtım özellikleri, doğal ortamda uzun süreli kullanımda stabilite, yüksek verimlilik, yüksek mekanizasyon derecesi ve düşük üretim maliyeti avantajlarına sahiptir (Yi ve diğ., 2017a).



Şekil 2.11. Pultrüzyon işlemi şematik gösterimi (Callister ve Rethwisch, 2018)

2.4. Mekanik Testler Hakkında Teorik Bilgiler

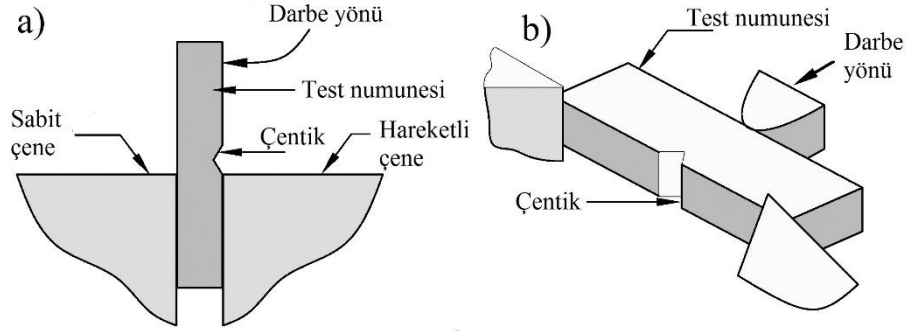
Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için en yaygın kullanılan deneyler çekme, basma ve eğme deneyidir. Çekme deneyinde kompozit malzeme tek eksende kopuncaya kadar çeki kuvvetine maruz kalırken, basma deneyinde bası kuvvetine maruz kalır. Eğme deneyinde ise kuvvet uygulanan en üst tabakada bası kuvvetleri oluşurken, en alt tabakada çekme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu yüzden çekme, eğme ve basma deneyi malzemelerin kullanım alanlarını belirlemede oldukça önemli bir yere sahiptir. Ancak çentik darbe, kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS), tek kenarlı çentik bükme (SENB) ve yarı statik penetrasyon testi (QSPT) gibi testler de özellikle tabakalı kompozitlerin özelliklerini belirlemede önemli olan test yöntemleridir.

2.4.1. Çentik darbe testi

Charpy darbe testi 1900 yılında Georges Augustin Albert Charpy (1865-1945) tarafından icat edilmiştir. Bir malzemenin göreceli tokluğunu hızlı ve ekonomik bir şekilde değerlendirmek için en yaygın kullanılan testlerden biri olarak kabul edilmektedir. Numune tarafından emilen enerji, sarkaç kolunun hareketindeki azalma ölçülerek kesin olarak belirlenir (Saba ve diğ., 2019).

Charpy ve Izod darbe testleri farklı yapıdaki malzemelerin darbe sönümlenme enerjilerini kıyaslamak için yaygın bir şekilde kullanılan test yöntemleridir. Her iki testte

birbirine benzemekle beraber farklı şekillerde uygulanırlar (Şekil 2.12). Charpy darbe testinde numune basit kiriş ile desteklenirken Izod darbe testinde ise konsol kiriş kullanılır. Ayrıca Izod darbe testi, Charpy darbe testinden çentiğin vurucuya bakacak şekilde konumlandırılması bakımından farklıdır. Bu nedenle Charpy testinde, test parçası iki dikey çubuk arasında yatay olarak tutulur, ancak Izod testinde numune bir çit direği gibi dik durur (Saba ve diğ., 2019).



Şekil 2.12. Darbe testleri şematik görünümü a) Izod darbe deneyi, b) Charpy darbe deneyi (Pham ve Hao, 2016)

2.4.2. Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testi

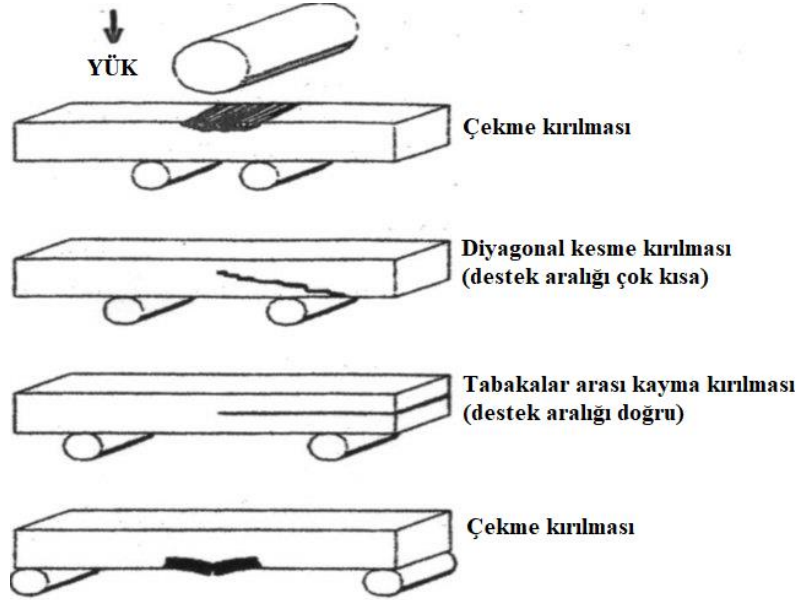
Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) testi yapılış biçimi olarak eğilme testine benzemektedir. Ancak eğilme testi fiber ile matris arasındaki ara yüzey mukavemetinden çok fiberin özelliklerine bağlıdır. Tabakalar arası mukavemet ise tabakaları meydana getiren fiberlerden bağımsız olmamak kaydıyla daha çok matris malzemesi ile fiberler arasındaki bağların dayanımıyla alakalıdır (R. Park ve Jang, 1998). ASTM D790 testine göre eğme testinde malzemenin kalınlığının en az 16 katı destek aralığında test yapılmaktadır. SBS testinde ise kalınlığın 4 katı destek aralığının olduğu bir uzunlukta benzer bir test gerçekleştirilir.

Eğme testinde malzemenin ortasından uygulanan yük en üst tabakada basma gerilmesi oluştururken en alt tabakada ise çekme gerilmesi meydana getirir. SBS testi ise benzer bir test gibi görünse de destek noktaları arasındaki mesafenin çok kısa olmasından dolayı merkezi yükün her iki tarafında, üst yüzeyin hemen altında büyük bir kayma (kesme) gerilmesi meydana getirir (Walter ve diğ., 2010).

Bu test sırasında, numuneler genellikle kırılmaya kadar 3 noktalı bir eğme konfigürasyonunda kesme, düzlem dışı eksenel ve basınç gerilmelerinin bir kombinasyonuna maruz kalır (Nasser ve diğ., 2020). Destek aralığının kısa olması eğme gerilmelerini minimize eder ve bu durum tabakalar arasında bir kesme kuvveti

oluşturarak düzlemde yatay bir kırılma meydana getirir (Y. Li ve diğ., 2017). Bu tür yükleme koşulları altında FTK'ların tepkisi hem matrisin tokluğuna hem de elyaf ile matris arasındaki yapışmanın kuvvetine bağlıdır (Nasser ve diğ., 2020). Ancak standartta geçen bilgiye göre numune genişliği/kalınlığı oranının 2'den büyük olması durumunda kayma gerilmesinde kayda değer değişiklikler gözlemlenebileceği belirtilmiştir (Adams ve Lewis, 1995).

Destek aralığının doğru ayarlanması tabakalar arası kayma mukavemeti testi için çok önemlidir. Aralığın doğru ayarlanamaması durumunda birbirleri üzerinde kayması gereken tabakalar farklı şekillerde yüklere maruz kalarak farklı deformasyonlara uğrarlar. Destek aralığına bağlı olarak tabakalar arası kayma testi numunelerinin tipik hasar modları Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13. Destek aralığı kalınlık oranının bir fonksiyonu olarak tabakalar arası kayma testi numunelerinin tipik hasar modları (Reed ve diğ., 2014)

2.4.3. Kırılma tokluğu (SENB) testi

Mühendisler için bir malzemenin kusursuz olduğundan tam olarak emin olmak hiçbir zaman doğru bir yaklaşım değildir. Bu yüzden tasarımlarında her zaman bir kusur olduğunu varsayarak kırılma mekaniği yaklaşımlarıyla malzemeleri test ederler. Bir malzemenin kırılmaya karşı direnci kırılma tokluğu olarak adlandırılır ve malzemenin yapısına, ortamdaki değişkenlere ve yükleme hızına göre malzemenin kırılma tokluğu değişebilmektedir. Kusurlar, çatlaklar, boşluklar, metalurjik kalıntılar, kaynak kusurları, tasarım süreksizlikleri veya bunların bazı kombinasyonları olarak ortaya çıkabilmektedir.

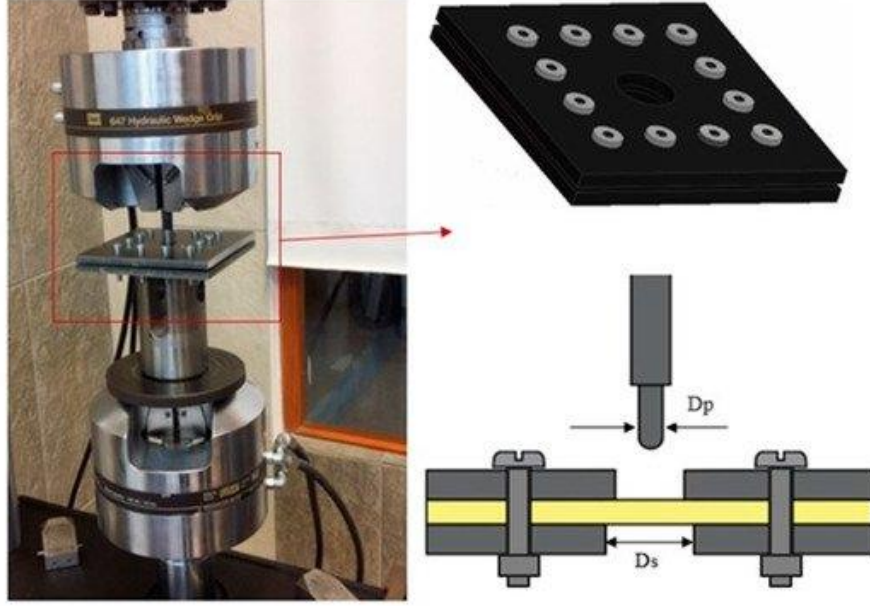
Kırılma tokluğu test yöntemleri, tek kenarlı çentikli bükme (SENB) ve kompakt gerilim (CT) olmak üzere iki test geometrisini kapsar.

SENB testi, plastiklerin tokluğunu kritik stres yoğunluk faktörü (K_{IC}) ve çatlak yüzeyinin birim alanı başına enerji veya kırılma başlangıcında kritik gerinim enerjisi salım hızı (G_{IC}) açısından karakterize etmek için yapılan bir mekanik test yöntemidir.

2.4.4. Yarı statik penetrasyon testi (QSPT)

Laminatlı kompozitler kullanım süreleri boyunca birçok etkiye maruz kalabilmektedirler. Ancak bu malzemeler, doğaları gereği yüksek ya da düşük hızlı darbeler sonucu bazı hasarlar alabilmekte ve bu hasarlar sebebiyle meydana gelen deformasyonları incelemek ve anlamak mühendislik çözümleri için kritik öneme sahiptir. Bu gibi etkileri daha iyi anlayabilmek için araştırmacılar düşük ve yüksek hızlı darbe testleri yapmaktadırlar ancak özellikle yüksek hızlı darbe testleri kolay ulaşabilir olmamalarının yanı sıra oldukça maliyetli olabilmektedirler.

Malzemelerin darbe şartları altında dayanımlarını ve hasar durumlarını anlayabilmek için yapılan düşük hızlı testlerden biriside yarı statik penetrasyon testidir (QSPT). Test bir kompozit yapının dinamik ve hız etkileri olmadan düzlem dışı yükler altındaki darbe davranışını ölçmeyi amaçlar. Bu testi öne çıkaran en önemli özellik yeni bir cihaza ihtiyaç duymadan universal bir test cihazında sadece kalıp hazırlayarak yapılabilmesi olmasıdır. Bu test prensip olarak farklı geometrilere sahip zımbalarla malzemenin iki destek kalıbı arasında delinmesi prensibine dayanmaktadır. Delme ve kesme işleminden farklı olarak destek açıklığı çapı, zımba çapının belirli bir katını ifade eder. Destek açıklığı çapının (D_s 'nin) zımba çapına (D_p 'ye) oranı (D_s/D_p) SPR (span to punch ratio) adı verilen bir oranı belirler. Bu orandan elde edilen katsayıya göre destek açıklığı oranı SPR 2 ya da SPR 6 gibi ifadelerle betimlenir. Test sonucunda balistik teste benzer şekilde deformasyon ve delaminasyon bölgeleri oluşur. Bu deformasyon ve delaminasyonlar hedef malzemenin çeşidine, zımba geometrisine ve destek açıklığı oranına vb. göre değişimler gösterir. Zımba geometrisi hedefe temas eden alanı ve temasın türünü belirlemektedir.



Şekil 2.14. Yarı statik bir zımba kesme testi fişürünün şeması (Pach ve diğ., 2020)

QSPT ile ilgili ilk çalışma Lee ve Sun tarafından düz geometriye sahip zımba ile grafit/epoksi tabakaya yapılmış olup bu çalışmada geliştirmiş oldukları test yönteminden elde edilen veriler ile daha sonra yaptıkları çalışmada yine grafit/epoksi tabakanın balistik limitini tahmin etmeye çalışmışlardır. Yapılan çalışmalar, dinamik darbe testleri yapılmadan balistik limitin tahmin edilebileceğini ortaya koymuştur (S.W. R. Lee ve Sun, 1993a, 1993b). Jenq ve diğ. (1994) cam/epoksi kompozitin dinamik darbe davranışını simüle etmek için yarım daire zımba ile yaptıkları statik penetrasyon test sonuçlarını kullanarak bir sonlu elemanlar kodu oluşturmuşlardır. Test sonuçları ile simülasyon tahmini arasında yaklaşık %24'lük bir fark bulmuşlardır. Gama ve Gillespie (2008), kompozit malzemelerin balistik davranışını tahmin etmek için yarı statik bir penetrasyon modeli geliştirmişlerdir. Balistik çarpmanın bir dizi yarı statik test gerçekleştirilerek modellenebileceği iddia etmişlerdir. Ayrıca destek açıklığı oranının değişmesiyle meydana gelen hasarın farklılık gösterdiğini vurgulamışlardır. Özellikle düşük destek açıklığında (SPR 1.1) malzeme hasarında kesme kuvvetlerinin dominant olduğunu büyük destek açıklıklarında (SPR 8) ise giderek eğme hasarının baskın olduğundan bahsetmişlerdir. Ayrıca yaptıkları QSPT testinin enerji absorpsiyonunun balistik testlerde absorbe edilen enerjinin %81'ine tekabül ettiğini tespit etmişlerdir.

Sutherland ve Guedes Soares (2012) yaptıkları çalışmada, CFTK'ların dinamik darbe davranışları hakkında değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Yarı statik testlerin düşük ila orta enerjilerde delaminasyonun başlangıcı ve dinamik kuvvet-sapma davranışı

hakkında iyi bir yaklaşım sergilediğini belirtmişlerdir. Dolayısıyla yarı statik testlerin ilk darbe hasar direncini tahmin etmek için geçerli bir yöntem olarak ifade etmişlerdir. Djele ve Karakuzu (2021) yaptıkları çalışmada, iki farklı fiber kompozite düşük hızlı darbe ve yarı statik test yapmışlar, sönümlenen enerji ve kuvvet–sapma eğrilerini incelemişlerdir. Yaptıkları yarı statik testler sonucunda, numunelerin belirli bir test hızında delinmesi için gereken enerji miktarının düşük hızlı darbe testi ile aynı seviyede olduğunu ve böylece malzemelerin delinmesi için gereken enerji miktarı, düşük hızlı darbe testi yerine uygun bir hızda yarı statik test yapılarak bulunabileceğini ifade etmişlerdir.

2.5. Balistik Bilimi

Balistik kelimesinin kökeni bir Roma kuşatma silahı olan balistadan ve Yunanca atmak fırlatmak anlamlarına gelen ballein kelimesinden gelmektedir (Moeng ve Boffard, 2017). Balistik bilimi bir merminin silahtan çıkıp, hedefe ulaşana kadar yaptığı hareketleri ve hedefte meydana getirdiği etkileri (enerjinin absorplanması, meydana gelen bozulma/deformasyon gibi) ortamdaki değişkenlere bağlı olarak inceleyen bilim dalıdır. Temel olarak üç kısımdan meydana gelir:

1. Merminin ateşlenmesinden namlu ağzına kadar olan etkileşimlerini inceleyen iç balistik,
2. Namlu ağzından hedefe ulaşana kadar etkileşimlerini inceleyen dış balistik,
3. Merminin hedef ile arasındaki etkileşimlerini inceleyen hedef ya da diğer adıyla terminal balistikdir.

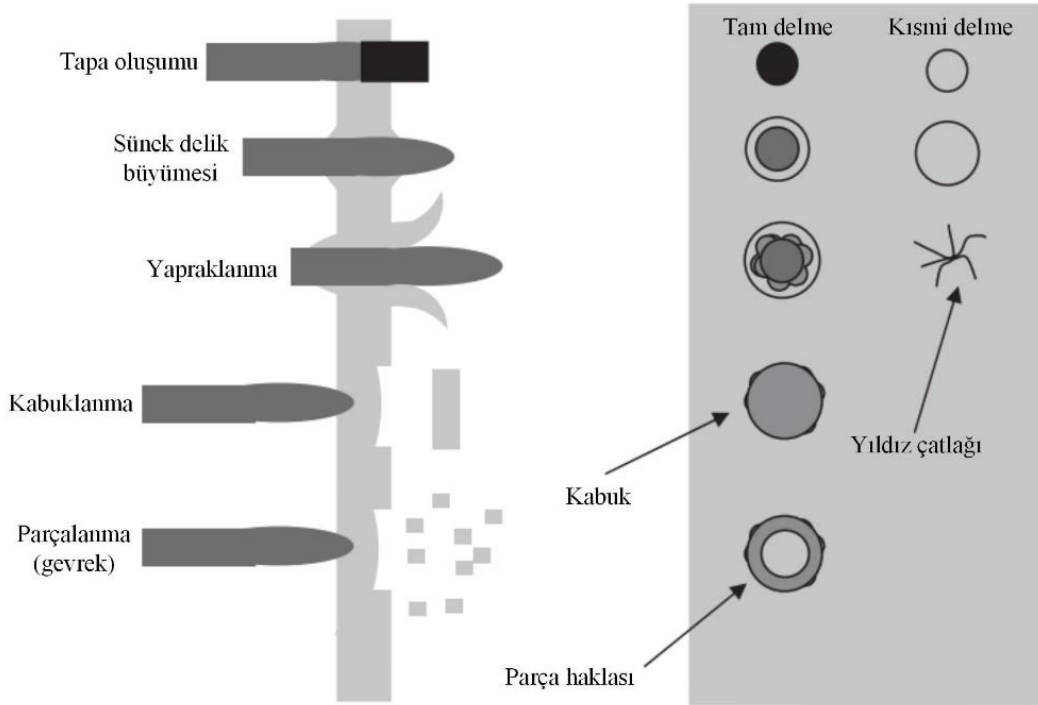
Bunların dışında;

1. Merminin isabet ettiği hedefin bir canlı olması durumunda yara balistiği,
2. Tüm bu balistik alt bilim dallarının ve adli balistik bilimi kullanılarak ateşli ya da ateşsiz silahlar tarafından yaralanmaları ve delil oluşturan balistik bulguları inceleyen adli balistik,
3. Merminin namluyu terk etmesinden önceki ve sonraki 1-2 milisaniyeyi inceleyen ara balistik olmak üzere üç farklı balistik bilimi daha vardır.

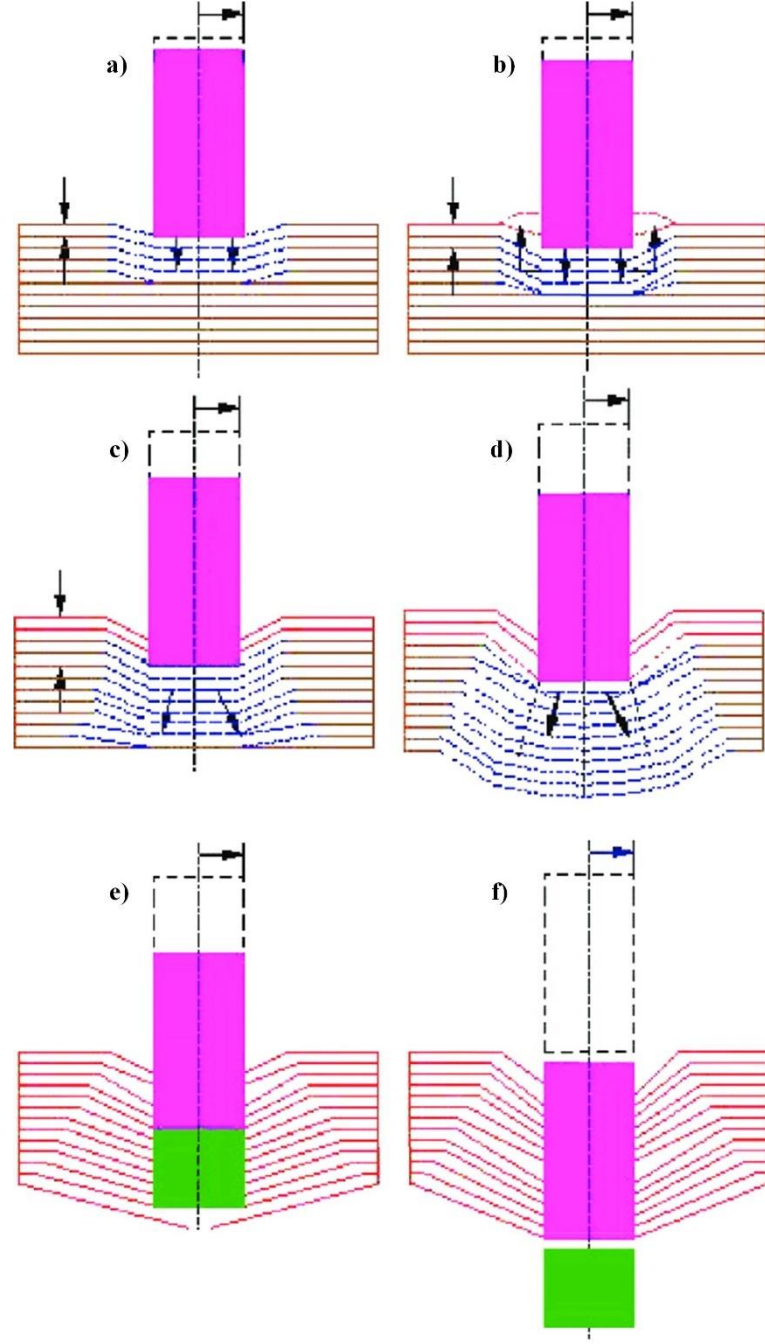
İç balistik, merminin silahın namlusundan çıkmasından önce silah, mermi ve sevk yükünün etkileşimi ile ilgilenir (Tam ve diğ., 2012). Bu yüzden iç balistik silahların gelişimi için gerekli bir analizdir. Herhangi bir silah sistemini verimli bir şekilde tasarlamak için, enerji kayıplarını en aza indirmek ve tasarım parametrelerini doğru bir şekilde tanımlamak için iç balistik iyi anlaşılmalıdır (Miner, 2013).

Dış balistik, merminin namluyu terk etmesinden hedefle çarpışmasına kadar geçen süreyi kapsar. Genel olarak, dış balistikçinin bilmesi gereken tek şey, iç balistikçiden gelen namlu çıkış hızı, uçuş ve dönüş hızları ve mermi tasarımcısının fiziksel özellikleridir (şekil ve kütle dağılımı). Dış balistikte, genellikle mermi dinamikleri ve stabilitesi, tahmin edilen uçuş yolu ve uçuş süresi ve çarpmanın açısı, hızı ve konumu ile ilgilenilir (Carlucci, 2007).

Hedef ya da terminal olarak adlandırılan balistik bilimi ise hedefe çarpan merminin hedefte oluşturduğu etkileri incelemektedir. Analizler ayrıca hasarın şekline ve darbenin neden olduğu artık gerilme alanının çatlak ilerlemesi üzerindeki etkisine odaklanmıştır (Giglio ve Manes, 2011). Hedef balistiği sadece merminin kişisel korunma zırhlarına etkilerini değil ayrıca bir binaya, bir helikoptere, bir askeri araca ya da tanka yani birçok farklı türdeki hedeflere yönelik patlayıcılardan kaynaklanan etkileri de incelemektedir. Zırh/zırh karşıtı etkileşimlerde yer alan fiziği anlamak, tüm tehdit yelpazesini anlamamanın anahtarıdır (Crouch, 2019). Bunun için balistik bir çarpma ve sonucunda oluşan deformasyonları anlamak oldukça önemlidir. Balistik bir çarpma sonucu metal hedefe isabet eden merminin oluşturabileceği kırılma modları Şekil 2.15'te, laminar bir kompozite isabet eden merminin oluşturabileceği darbe hasarı ise Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Metal hedeflerin kırılma modları (Carlucci, 2007)



Şekil 2.16. Balistik çarpma sırasında 2D dokuma kumaş kompozit hedefin penetrasyon ve perforasyon aşamaları (Akella ve Naik, 2015)

Metal hedefe isabet eden mermi; tapa oluşumu, sünek delik büyümesi, yapraklanma, kabuklanma ve parçalanma gibi kırılma modları oluşturur.

- Tapa oluşumu (plugging): oldukça sünek olan malzemelerde genellikle düz uç geometrisine sahip mermilerde oluşan bu durum, mermi çarpma hızının balistik sınıra çok yakın olduğunda meydana gelir. Tıkama olarak da bilinen perforasyon mekanizması, hedef malzemenin enine kesme özellikleri tarafından kontrol edilen bir olaydır.

- Sünek delik büyümesi (piercing): sünek malzemelerde normal bir geometriye sahip darbelerde gerçekleşir.
- Yapraklanma (petalling): radyal ve çevresel gerilmeler yüksek olduğunda ve mermi çarpma hızı balistik sınıra yakın olduğunda meydana gelir.
- Kabuklanma (scabbing): parçalanmaya benzer, ancak kırılma ağırlıklı olarak, yerel bir homojensizlikte bir çatlak başlatan büyük plaka deformasyonundan kaynaklanır.
- Parçalanma (spalling): basma gerilmesi çekme gerilmesinden daha güçlü olan malzemelerde gerçekleşen bir durumdur. Dökülme çok yaygındır ve plakanın arka yüzünden dalga yansımasının sonucudur (Carlucci, 2007).

Laminer bir kompozit plakanın darbe hasarı üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci aşama olan, sıkıştırma ve kesme gerilmesi dalgaları kalınlık yönü boyunca hareket eder. Kompozit hedefin katmanları, merminin hemen altında ve ayrıca  ekil 2.16.b'de gösterildiği gibi çevreleyen bölgede sıkıştırmaya maruz kalır. Merminin doğrudan isabet ettiği birinci bölge dışında kalan alana ikinci bölge denir. İkinci bölgedeki tabakaların sıkışması, düzlem içi yönlerde yayılan enine kayma dalgası nedeniyle. Katmanların sıkıştırılması, çevreleyen bölgede düzlem içi y n boyunca da gerilim üretir. Kesme dalgası, sıkıştırma dalgasını takip eder. Sıkıştırma ve kesme dalgaları kalınlık yönü boyunca hareket ettikçe, indüklenen gerinimler karşılık gelen göçme şekillerini a tığında, tabakalar sıkıştırma, gerilim veya kesme tıkanması altında göçebilir (Pandya ve Naik, 2015).

İkinci aşama kesme dalgaları,  ekil 2.16.c'deki gibi hedefin arka yüzüne ulaştığında ba lar. Birinci aşamada başarısız olan katman sayısına ve mermi ile mevcut kinetik enerjiye bağlı olarak,  ekil 2.16.d'de gösterildiği gibi hedefin arka yüzünde konik deformasyon meydana gelebilir. Katmanın kalınlığı ve merminin gelen darbe hızı, birinci aşamanın sonunda başarısız olan katmanların sayısını ve mermi ile mevcut kinetik enerjiyi etkiler. Birinci aşamada kırılmayan katmanlar, konik deformasyonun bir sonucu olarak gerilime maruz kalır ve indüklenen çekme gerinimi kırılma gerilimini a tığında  ekil 2.16.e'deki gibi kırılma gerçekleşir (Pandya ve Naik, 2015).

Hedef tamamen başarısız olduktan sonra bile, hedef ile hareketli mermi arasında sürtünme olabilir buna üçüncü aşama denir. Sürtünme nedeniyle bir miktar enerji emilebilir.    nc  aşama merminin ucu  ekil 2.16.f'de gösterildiği gibi hedefin arka

yüzüne ulaştığında sona erer. Bu aşamada, mermi bir miktar artık kinetik enerjiye sahipse, hedeften belirli bir artık hızla (residual velocity) çıkacaktır (Pandya ve Naik, 2015).

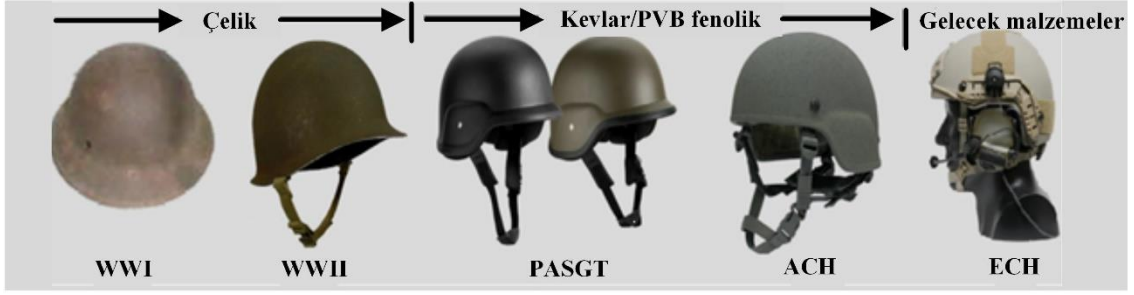
2.5.1. Hedef balistiğinde kullanılan bazı malzemeler

Patlayıcıların keşfi ile birlikte insanoğlu daha önce görülmemiş yüksek hızlarda şarapnel ya da mermi gibi cisimlere maruz kalmaya başladılar. Birinci ve ikinci dünya savaşı döneminde zırh çelikleri çok ağır olmaları ve esnek olmamalarından dolayı sadece yavaş hareket eden ağır zırhlı araçlarda kullanılıyordu. Personel koruması için gerekli teçhizat eksikliği yaşıyordu (A. Bhatnagar, 2016). Ancak daha sonrasında 1916 yılında kişisel korunma için bir vücut zırhı kullanıldı. Bu zırh çelikten yapılmıştı ve çok ağır olduğu için kullanışsızdı. 1919 yılından itibaren bazı yelek ve zırh tipi giysi tasarı için ABD patent ve Ticari Marka Bürosunda kayıtların olduğu bilinmektedir (El Messiry, 2019).

Modern çağda yüksek performanslı sentetik liflerin keşfiyle beraber hafif vücut zırhlarının geliştirilmesi büyük bir hız kazanmıştır (El Messiry, 2019). Savaşlarda kullanılan silahlar ve mühimmatlarla ilgili sürekli teknolojik gelişmeler yaşanmaktadır. Bu durum modern silahların muazzam etkilerine karşı kişisel korunma teçhizatının da sürekli bir gelişim içerisinde olmasını gerektirmektedir. Dolayısıyla araştırmacılar sürekli yeni yöntemler ve yeni malzemeler geliştirmeye devam etmektedirler.



Şekil 2.17. Washington DC’de kurşungeçirmez yeleğin test edilmesi, Eylül 1923 (El Messiry, 2019)



Şekil 2.18. ABD ordusu kaskının I. Dünya Savaşı'ndan en son başlık sistemine kadar değişen tasarımları ve malzemeleri (Kulkarni ve diğ., 2013)

Zırh uygulamaları için ağır zırh çelikleri yerine kompozit malzeme kullanılması yeni bir uygulama değildir. Kompozit malzemelerle ilgili çalışmalar uzun bir süredir devam etmektedir. Kompozitlerle ilgili çalışmalar özellikle II. Dünya Savaşın'dan sonraki dönemde yoğunlaşmıştır (Bajya ve diğ., 2021). Kompozit malzemeler yüksek mukavemet/ağırlık oranından dolayı birçok alanda kullanılmaktadırlar. Özellikle hareket kabiliyetini sınırlamaması ve yüksek darbe direnci sağlamasından dolayı kişisel korunmada önemli bir yer tutmaktadırlar.

Hafif vücut zırhlarında kullanılan kumaşların yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü olmaları gerekmektedir. Darbe esnasında merminin sahip olduğu kinetik enerji kumaş tabakaları tarafından emilirler. Darbe esnasında üretilen stres dalgalarının taşıdığı kinetik enerji fiber deformasyonu yoluyla ve fiber sürtünmesi yoluyla dağılır. Dağıtılmamış enerji, merminin tamamen nüfuz etmesini durdurana kadar her bir kumaş tabakası tarafından emilir (Hani ve diğ., 2012).

II. Dünya Savaşı esnasında bombaların ve şarapnel parçalarının meydana getirdiği hasarları azaltmak için E-Cam fiber/etil selülozdan meydana gelen çeşitli hafif zırhlar geliştirildi. Bunun yanı sıra Amerikan ordusu II. Dünya Savaşı esnasında naylon lifler kullanarak uçaksavar ceketi (flak jacket) olarak bilinen bir vücut zırhı üretti. Naylon para-aramidlere kıyasla neredeyse iki kat fazla enerji emiyordu ancak yeterli koruma sağlayamadığı için birçok askerin yaralanmasına ya da ölmesine sebep oldu (Abtew ve diğ., 2019).

1970'lerden sonra para-aramid (Kevlar®, Twaron® ve Technora®) ve ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) (Dyneema® ve Spectra®) gibi yüksek modüllü ve yüksek mukavemetli liflerin üretilmesiyle beraber balistik çalışmalarda yeni ufuklar açılmıştır. Aramidler uzun bir süredir hafif vücut zırhlarında kullanılmaktadır. Ait oldukları sınıfa bağlı olarak, farklı lifler farklı yapısal özelliklere sahiptir ve bu da bir kumaşa balistik bir darbe geldiğinde kumaşa farklı tepkilere yol açmaktadır (Tabiei ve

Nilakantan, 2008). Yakın zamanda çok düşük yoğunluğa sahip olması ve öncüllerinden daha yüksek çekme mukavemetine sahip olmasından dolayı UHMWPE aramidlerin yerini almak için en büyük aday konumundadır (Bajya ve diğ., 2021). Ancak UHMWPE 90°C üzerinde çalışmaya uygun değildir ve aramide oranla daha yüksek arka yüz deformasyon değerine sahiptir (Liang ve diğ., 2022). Bu yüzden aramid balistik koruyucu zırhların üretiminde hala kullanılmaya devam etmektedir.



Şekil 2.19. Modern askeri vücut zırhlarının bir görünümü (Crouch, 2019)

Araştırmacılar daha sonrasında Zylon® ve M5® gibi yüksek performanslı liflerde geliştirdiler. Ancak henüz balistik korumada yaygın olarak kullanılmamışlardır (Bajya ve diğ., 2021). Zylon® ile yapılan vücut zırhı, aramid elyaftan yapılan ürünlere göre daha hafif, daha rahat ve daha güçlüdür. Bununla birlikte, gerilme mukavemeti, yüksek ultraviyole (UV) ışınları gibi bazı aşırı çevresel koşullar altında azalmaktadır (L. Wang ve diğ., 2014). Ayrıca suya karşı hassas olması ve hidrolitik bozulmalarından dolayı ABD ordusu tarafından balistik bir malzeme olarak kabul görmemiştir (Bajya ve diğ., 2021). P. Cunniff ve diğ. (2002) tarafından yapılan bir çalışmaya göre M5® fiber ve Zylon® çeşitli zorlu koşullara maruz bırakılmıştır. 100 saatlik bir UV ışınına, ayrıca yüksek sıcaklık ve neme maruz bırakılan bu malzemelerden M5® fiber neredeyse tüm mukavemetini korurken Zylon® mukavemetini %20 ile %35 arasında kaybetmiştir.

Balistik uygulamalarında kullanılan bazı malzemeler ve mekanik özelliklerine ait bilgiler Tablo 2.8’de verilmiştir.

Tablo 2.8. Balistikte kullanılan bazı malzemeler ve mekanik özellikleri (Abtew ve diğ., 2019)

Fiber Tipi	Fiber Kategorisi	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kırılma Uzunluğu (%)
Cam	S-Cam	2,48	90	4400	5,7
	E-Cam	2,63	68.5	3500	4
Seramik fiber	Alumina (Nextel, 3 M)	250	152	1720	2
	Silicon Carbide	280	420	4000	0,6
Karbon fiber	Standart	1,77	33.5	3651	1,5
	Celion	1,8	230	4000	1,8
	Aksaca	1,78	240	4200	1,8
Para-Aramid	Technora, Teijin	1,39	70	3000	4,4
	Twaron, Teijin	1,45	121	3100	2
	Kevlar 29, DuPont	1,44	70	2965	4,2
	Kevlar 129, DuPont	1,44	96	3390	3,5
	Kevlar 49, DuPont	1,44	113	2965	2,6
	Kevlar KM2, DuPont	1,44	70	3300	4,0
UHMWPE	Spectra 900, Honeywell	0,97	73	2400	2,8
	Spectra 1000, Honeywell	0,97	103	2830	2,8
	Spectra 2000, Honeywell	0,97	124	3340	3
	Dyneema, Toyoba/DSM	0,97	87	2600	3,5
Aromatik polyester	Vectran	1,47	91	3200	3,0
	Zylon AS	1,54	180	5800	3,5
	Zylon HM	1,56	270	5800	2,5
	M5 (2001 sample)	1,70	271	3960	1,4
	M5		450	9500	2,5

2.5.1.1. Aramid Kumaş

"Aramid" terimi, ABD Federal Ticaret Komisyonu tarafından, amid bağlarının en az %85'inin doğrudan iki aromatik halkaya bağlı olduğu aromatik poliamid tipi lifler için tanımlanmıştır. Bu bağların ya para ya da meta olarak konfigürasyonu, polimeri sınıflandırmak için sıklıkla kullanılmaktadır (Seydibeyoglu ve diğ., 2017).

Para aramid (P-aramid) lifler, çelikten daha güçlüdür ve çok yüksek mukavemete sahiptirler. Tekrarlanan aşınma, esneme, gerilme sırasında çok az mukavemet kaybederler ve mükemmel bir boyutsal stabiliteye sahiptirler. Yüksek performanslı olmalarından dolayı uçak, tekne, otomobil ve spor ekipmanlarında ve ayrıca kolluk kuvvetleri tarafından anti balistik kıyafetlerde kullanılırlar. *Meta* aramid (M-aramid) liflerin ise mükemmel ısı dirençleri vardır. M-aramidler genel olarak yanmalara karşı ve elektriksel yalıtım amaçlı kullanılırlar (Horrocks ve Anand, 2000).

Aramid fiberler, aromatik poliamid ailesine aittir. Aromatik poliamidler ilk olarak 1960'ların başında Nomex® tarafından *meta*-aramid elyaflar olarak ticari amaçlı üretilmiştir. 1970'lerin başında Kevlar gibi *para*-aramid elyaflar geliştirilmiştir. Naylon gibi diğer polimer liflerle karşılaştırıldığında çok hafif olmalarından ve balistik özelliklerinin çok iyi olmasından dolayı aramid fiberler bir anda pazarın hakimi olmuştur.

Aramid fiberler yüksek performanslı insan yapımı liflerdir ve kimyasal yapılarında aromatik bir benzen halkası ve amid grubunun varlığı ile karakterize edilirler. Bu fiberler, genellikle esnek olmayan polimer zincirleri tarafından tanımlanan parçacıklara sahiptir. Bu parçacıklar sert hidrojen bağlarıyla bağlanır ve bu durum mekanik yüklere maruz kalındığında çok daha düşük bir moleküler ağırlıkla çok daha yüksek bir mukavemet ve modül elde etmesine yardımcı olur (N. Bhatnagar ve Asija, 2016; Mohammed ve diğ., 2021).

Aramid fiber, yüksek çekme mukavemeti ve yüksek çekme modülünden dolayı gelişmiş kompozitlerde kullanılan ilk organik fiberdir. Eşit ağırlıktaki çelik ve cam elyaftan çok daha iyi mekanik özelliklere sahiptir ve yüksek ısı-alev dirençlerinden dolayı bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda muhafaza edebilmektedir. Aramid fiberler, vücut zırhlarında, araç zırhlarında, askeri kasklarda, koruyucu eldivenlerde ve itfaiyeciler için yanmaz giysilerde (Şekil 2.20) yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Seydibeyoglu ve diğ., 2017).



Şekil 2.20. Ateşe dayanıklı Kevlar® ve Nomex® ile donanmış bir itfaiyeci (Rosengren ve diğ., 2014)

Aramid fiberler yaklaşık 500°C’de bozulmaya başlar. Aramid elyafın durağan olan özellikleri çok çeşitli uygulamalar için mükemmel çok yönlülük sunar. Ancak aramid lifleri UV ışığına, asitlere ve bazı tuzlara karşı hassastırlar. Aramid fiberleri UV ışınlarına karşı zayıf bir dirence sahiptirler (A. Bhatnagar, 2016). UV ışınlarına veya doğal yaşlandırmaya maruz kalan aramid lifler renk değiştirirler (Şekil 2.21) ve mukavemet kaybına uğrarlar. UV emiciler ve ışık perdeleyiciler genellikle üretim sırasında aramid liflerine dahil edilir ya da sonraki işlem adımlarında eklenerek performansı geliştirilmeye çalışılır (Wypych, 2020).



Şekil 2.21. Doğal yaşlandırma sonrası renk değiştiren aramid numuneler (Konarzewski ve diğ., 2019)

2.5.2. Balistik test standartları

Mühendislik malzemeleri darbe davranışı gibi çok önemli mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikler, liflerin mukavemeti, uzunluğu ve yönü, elastisite modülü ve lif matrisi arayüzey bağ kuvveti gibi çeşitli parametreler tarafından yönetilir (Kucclourya ve diğ., 2021).

Uçak, otomobil, gemi gibi yaşantımızı kolaylaştıran araçlar kullanım süreleri boyunca çeşitli hızlardaki ve çeşitli ağırlıklardaki şarapnel, taş, ya da benzeri parçalarla darbe alabilmektedirler. Özellikle havacılık ve uzay sektöründe laminat kompozitlerde meydana gelen hasarlar mukavemeti ciddi bir şekilde azalttığı için büyük bir endişe vermektedir (Balaganesan ve diğ., 2014). Bu araçlar servis ömürleri boyunca belki de hiçbir zaman bu etkilere maruz kalmayabilirler ancak mühendislik malzemeleri en zorlu şartlar göz önüne alınarak üretilmek zorundadır. Balistik test bu zorlu şartları oluşturduğu ve malzemenin davranışlarını incelediği için mühendislerin en çok başvurduğu yöntemlerden birisidir.

Darbe testleri düşük hız (büyük kütle), orta hız, yüksek/balistik hız (düşük kütle) ve hiper hız olmak üzere dört farklı kategoriye ayrılmaktadır. Düşük hızlı darbeler 10 m/s'nin altında bir hızda meydana gelir, ara darbeler 10 m/s ile 50 m/s arasında meydana gelir, balistik darbeler 50 m/s ile 1000 m/s arasında bir hız aralığına sahiptir ve hiper hızlı darbeler ise 2000 m/s ile 5000 m/s aralığındadır (Ismail ve diğ., 2019; Safri ve diğ., 2014). Bu kategoriler önemlidir. Çünkü hızın değişimi enerji aktarımı, enerjinin dağılımı ve hasar yayılma mekanizmalarında değişikliklere sebep olur (Safri ve diğ., 2014).

Balistik test genel olarak hedef malzemesine çeşitli hızlarda ve çeşitli geometrilerdeki mermilerin belirli standartlara uygun şekilde çarpmasıyla elde edilen sonuçların bütünüdür. Bunlar malzemedeki meydana gelen hasar mekanizmaları, darbe sonrası destek kil malzemesinde meydana gelen çöküntü, merminin kaybettiği kinetik enerji ya da zırh malzemesinin absorbe ettiği enerji ve son olarak da balistik limit hızı olarak karşımıza çıkabilmektedir. Bazı ulusal ve uluslararası balistik test standartları Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.9. Bazı ulusal ve uluslararası vücut zırh standartları

Standart No	Standart adı ve açıklaması
TS 11164, Türkiye	Balistik koruyucu vücut zırhı standardı (1993)
TS 13349, Türkiye	Askeri zırhlar için V50 balistik hız deneyi (2008)
NIJ 0101.04, ABD	Kişisel vücut zırhı balistik standardı (2001)
NIJ 0101.06, ABD	Kişisel vücut zırhı balistik standardı (2008)
HOSDB, Birleşik krallık	Birleşik krallık polisi için vücut zırhı standardı (2017)
Technische Richtlinie (TR), Almanya	Alman polis koruma sınıfı standardı (2008)
GA141-2010, Çin	Polisler için vücut zırh standardı (2010)
VPAM BSW, Avrupa	Balistik koruyucu yelek standardı (2006)
GOST R 50744-95, Rusya	Zırhlı giysiler için sınıflandırma ve genel teknik gereksinimler (2017)
MIL-STD-662F, ABD	Askeri standart, zırh için V50 balistik test standardı (1997)
MIL-PRF-46103, ABD	Bu spesifikasyon, hafif kompozit zırh için performans gereksinimlerini kapsar (1998)
STANAG 2920, NATO	Kişisel zırh malzemeleri ve savaş kıyafetleri için balistik test yöntemi (2003)

2.5.2.1. NIJ standartları

Balistik test için dünyada en geçerli olan standart Amerikan Ulusal Adalet Enstitüsü'nün (National Institute of Justice ya da kısaltılmış adıyla NIJ) hazırlamış olduğu standart testlerdir. Özellikle kişisel koruma ürünlerinin testinde eski bir standart olmasına rağmen NIJ 0101.04 ve onun yerine 2005 yılında geçerli olan NIJ 0101.06 standart testleri uygulanır. Bu standart kapsamında balistik performans IIA, II, IIIA, III ve IV olmak üzere beş farklı seviye ayrılmıştır (Şekil 2.22). Bu seviyelerden IIA, II ve IIIA esnek zırh balistik koruyucular için korunma seviyesi olarak tanımlanmıştır. III ve IV seviyeleri ise sert zırh balistik koruyucular için koruma seviyesi olarak tanımlanmıştır.

Esnek zırh balistik koruyucular, adından da anlaşılacağı üzere yumuşak ve esnektirler. Genellikle Kevlar ya da Twaron gibi balistik kumaşlardan üretilirler. Birçok formda üretilebilirler ancak genellikle koruyucu yelekler olarak kullanılırlar.

Sert zırh balistik koruyucular ise balistik çelik veya seramikten yapılırlar ve yumuşak balistik koruyuculara nazaran ağır ve uzun süreli kullanım esnasında rahatsız edici olabilirler.

	LEVEL IIA		LEVEL II	
Test mermisi	9 mm FMJ RA	40 S&W FMJ	9 mm FMJ RA	.357 Mag JSP
Ağırlık	124 g	180 g	124 g	158 g
Hız	341 m/s	322 m/s	367 m/s	436 m/s

	LEVEL IIIA		LEVEL III	LEVEL IV
Test mermisi	.357 Sig FN	.44 Mag SJHP	7.62 mm NATO FMJ	.30 Cal M2 AP
Ağırlık	125 g	240 g	147 g	166 g
Hız	436 m/s	436 m/s	847 m/s	878 m/s

Şekil 2.22. NIJ 0101.06 test mermileri ve atış hızları (R. Yahaya ve diğ., 2021)

Level IIA (9 mm; .40 S&W) Testi; yeni ve giyilmemiş bir yelek için 9 mm tam metal kaplama (Full Metal Jacket, FMJ) yuvarlak uçlu (Round-Nose, RN) mermi kullanılarak yapılır. Bu mermi 124 g ağırlığındadır ve $373 \pm 9,1$ m/s hızında test edilir. Ayrıca aynı test 0.40 S&W FMJ mermi ile de yapılır. Bu merminin ağırlığı 180 g ve hızı $352 \pm 9,1$ m/s olarak belirlenmiştir.

Şartlara bağlı olarak uygun durumdaki bir yelek için aynı test 9 mm FMJ yuvarlak uçlu mermi ile $355 \pm 9,1$ m/s hızında ya da .40 S&W FMJ mermi ile $325 \pm 9,1$ m/s hızında da yapılabilir.

Level II (9 mm; .357 Magnum) Testi; yeni ve giyilmemiş bir yelek için 9 mm FMJ yuvarlak uçlu mermi kullanılarak yapılır. Bu testte mermi 124 g ağırlığındadır ve $398 \pm 9,1$ m/s hızında test edilir. Ayrıca aynı test .357 (38 kalibre) Magnum ceketli yumuşak nokta (Jacketed Soft Point, JSP) mermi ile de yapılır. Bu merminin ağırlığı 158 g ve hızı $436 \pm 9,1$ m/s olarak belirlenmiştir.

Şartlara bağlı olarak uygun durumdaki bir yelek için aynı test 9 mm FMJ yuvarlak uçlu mermi ile $379 \pm 9,1$ m/s hızında ya da .357 Magnum ceketli yumuşak nokta mermi ile $408 \pm 9,1$ m/s hızında da yapılabilir.

Level IIIA (.357 SIG; .44 Magnum) Testi; yeni ve giyilmemiş bir yelek için .357 SIG FMJ düz uçlu mermi ile yapılır. Mermi ağırlığı 125 g ve test hızı ise $448 \pm 9,1$ m/s olarak belirlenmiştir. Ayrıca aynı test, 44 Magnum yarı gömlekli oyuk uçlu (Semi Jacketed Hollow Point, SJHP) mermi ile de yapılır. Bu merminin ağırlığı 240 g ve hızı $436 \pm 9,1$ m/s olarak belirlenmiştir.

Aynı test şartlara bağlı olarak uygun durumdaki bir yelek için .357 SIG mermi ile $430 \pm 9,1$ m/s hızında ya da .357 Magnum yarı gömlekli oyuk uçlu mermi ile $408 \pm 9,1$ m/s hızında da yapılabilir.

Level III (Tüfek) Testi; bu test sert koruyucu ya da plakalar için belirlenmiştir. Bu testte 7,62 mm FMJ çelik kaplama (ABD ordusunda ve NATO standardında M80 olarak geçer) mermi kullanılır. Mermi ağırlığı 147 g ve test hızı ise $847 \pm 9,1$ m/s olarak belirlenmiştir.

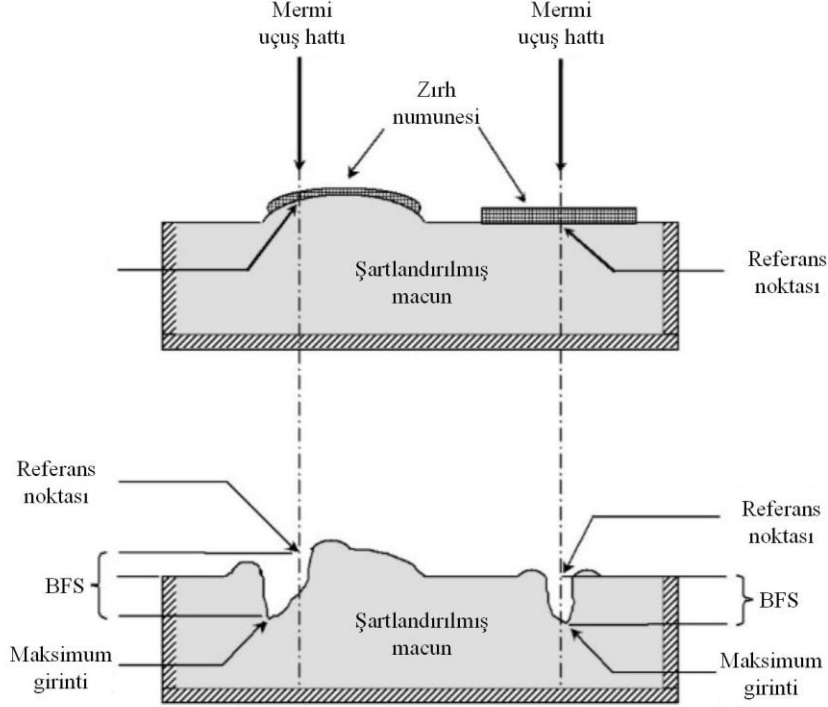
Ayrıca bu test ile yeni veya uygun durumdaki esnek yelekler de test edilebilir. Testte 7,62 mm FMJ çelik kaplama mermi kullanılır. Mermi ağırlığı 147 g ve test hızı ise $847 \pm 9,1$ m/s olarak belirlenmiştir.

Level IV (Zırh delici mermi) Testi; bu test te aynı şekilde sert koruyucu ya da plakalar için belirlenmiştir. Bu testte .30 kalibre zırh delici mermi (Armor Piercing, AP) kullanılır. ABD ordusu bu mermiyi M2 AP olarak isimlendirmiştir. 166 g ağırlığındaki mermi ile $878 \pm 9,1$ m/s hızında test yapılır.

Ayrıca bu test ile yeni veya uygun durumdaki esnek yelekler de test edilebilir. Testte .30 AP mermi kullanılır. Mermi ağırlığı 166 g ve test hızı ise $878 \pm 9,1$ m/s olarak belirlenmiştir.

Balistik test sırasında zırhın arkasına şartlandırılmış macun adı verilen özel olarak hazırlanan bir madde yerleştirilir (Şekil 2.23). Destek malzemesindeki travma derinliği, merminin gövde yoluyla iç organlara ciddi şekilde zarar verme olasılığını en aza indirerek kullanıcının yaralanmadan korunmasını sağlamada önemli bir rol oynar (Mudzi ve diğ., 2022). Hazırlanmış olan zırh numunesi kurşunu geçirmese dahi bu şartlandırılmış macunda meydana getireceği çökme 44 mm derinliği geçmemelidir. Eğer 44 mm'den daha fazla bir derinlik olursa dokunun deformasyonu cildin eşiğini aşar ve penetran bir yara oluşur. Bu durumda numune balistik koruma sağlayamamış demektir. Bu tür yaralanmalar genellikle hayati tehlike oluşturmaz, ancak akciğer kontüzyonları meydana

getirebilir (Wilhelm ve Bir, 2008). Arka yüz darbe çöküntüsü (BFS), ciddi iç yaralanmalara neden olabilen zırh arkası künt travma olasılığı nedeniyle önemli bir performans ölçümüdür.



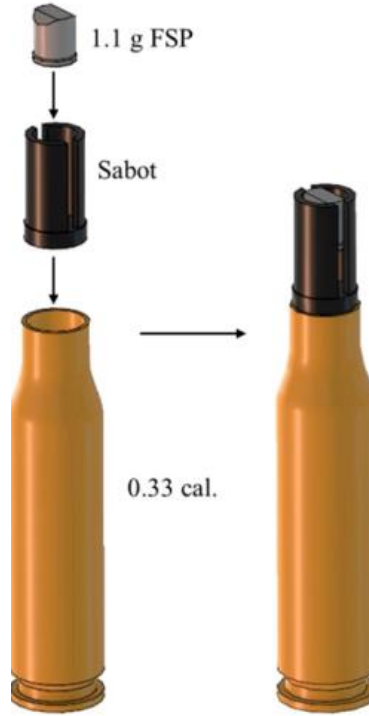
Şekil 2.23. NIJ 0101.06 standardına uygun BFS ölçümü (Pîrvu ve Deleanu, 2021)

2.5.2.2. STANAG 2920

STANAG 2920 NATO tarafından zırh malzemeleri ve savaş giysileri için hazırlanmış bir balistik test standardıdır. NATO genelindeki askeri şartnamelerde yaygın olarak anılır, ancak askeri kişisel koruyucu ekipman için yetkili test standardı olmanın aksine, diğer test protokollerini tamamlamak için kullanılır (Carr ve Lewis, 2014). Bu testte FSP denilen şarapnel benzetimli mermi kullanılır ve zırh malzemelerinin balistik performansı ölçülür. Balistik performans genellikle bir malzemenin balistik limit hızı ile belirlenir. Balistik limit hızı, kompozit bir yapı tasarlamak ve onu koruyucu bir yapı olarak etkin bir şekilde kullanmak için dinamik hasar davranışını anlamak için önemli bir parametredir. Zırhların etkinliğini değerlendirmek için yaygın olarak tanınan bir kriterdir (Karahan ve diğ., 2015). STANAG 2920 tüm balistik zırhlar için geçerli bir test yöntemi değildir örneğin seramik kompozit zırhlar STANAG 2920 ile test edilmezler (Carr ve Lewis, 2014).



Şekil 2.24. 53,77 ile 0,16 gr arasında değişen FSP mermi ailesi (A. Bhatnagar, 2016)

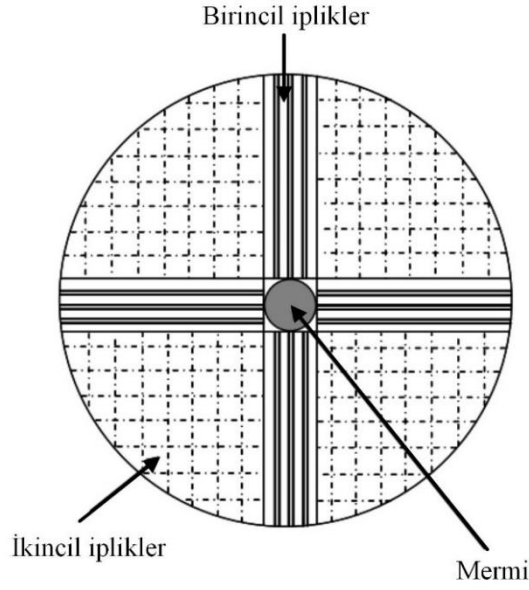


Şekil 2.25. FSP'lerin mermi kovanına yerleştirilmesi (Üstün ve diğ., 2022)

Balistik limit hızı (V_{50}) bir merminin balistik bir malzemeyi delmesinin %50 olasılıkla olduğu hızı ifade etmektedir. V_{50} balistik limit hızı malzemeyi tam penetrasyon (tam delme) ile delen en düşük 3 mermi hızı ile kısmi penetrasyonun (delme olmayan) meydana geldiği en yüksek 3 mermi hızının aritmetik ortalaması alınarak belirlenmektedir. Ortalama almak için kullanılan hızların en yükseği ile en düşüğü arasındaki farkın en fazla 45,7 m/s olması istenmektedir (Showalter ve diğ., 2008).

2.5.3. Tekstil malzemelerin balistik darbe davranışı

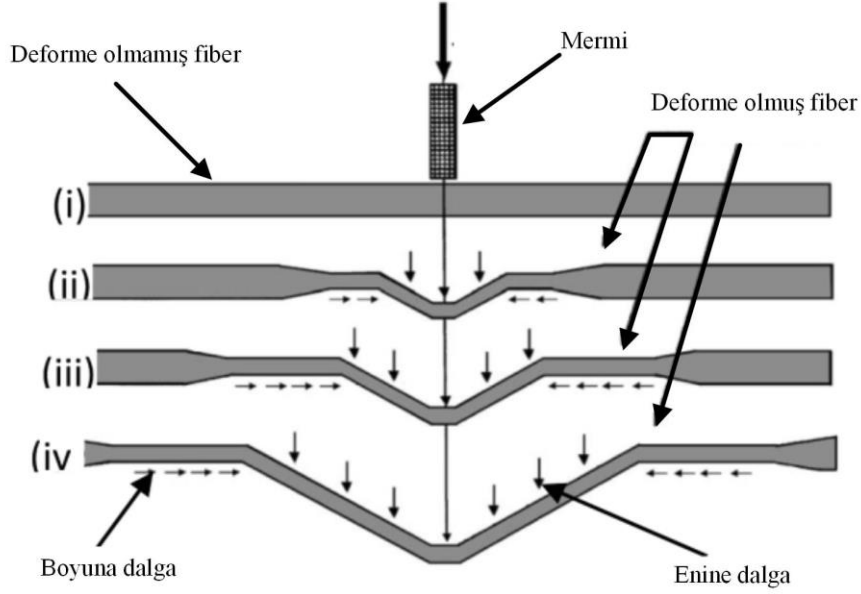
Dokuma kumaşlardan yapılan yumuşak vücut zırhı performansının artırılması, balistik darbe işlemi sırasında balistik darbe tepkisi ve dalga yayılımının tam olarak anlaşılmasını gerektirir. Mermi kumaşa çarptığında kumaşta iki türlü bir tepki görülür. Merminin doğrudan temas ettiği bölgedeki ipliklere birincil iplikler denirken, doğrudan temas halinde olmayan ancak birincil ipliklerle etkileşime girdikleri için daha az etkilenen ipliklere ise ikincil iplikler denir (Şekil 2.26).



Şekil 2.26. Bir kompozit plakada birincil ve ikincil iplik bölgeleri (García-Castillo ve diğ., 2007)

Bir darbenin muhtemel enerji soğurma mekanizmaları; hedefin arka yüzünde koni oluşumu, ikincil ipliklerin deformasyonu, birincil ipliklerde/liflerde gerilim, delaminasyon, matris çatlaması, kesme tıkanması ve mermi ile hedef arasındaki sürtünmedir.

Kumaşların çeşitli darbe davranışlarını anlamak için tek bir elyafın enine darbe davranışı üzerinde araştırmaya başlamak gerekir. Tek bir iplik mermi darbesine maruz kaldığında, Şekil 2.27’de gösterildiği gibi iplikte zamanla koni şeklinde enine bir sapma oluşur. Bunun sebebi ipliğin mermi ile birlikte gitmeye zorlanmasıdır. Ancak bu enine zorlama esnasında boyuna dalgalar da oluşarak ipliğin çekme gerilmesine maruz kalmasına sebep olur. İçeri doğru akan malzeme, iplikteki gerilim kopma gerilimine ulaşana kadar ilerleyen enine sapmayı beslemeye devam eder (Abtew ve diğ., 2019).



Şekil 2.27. Bir fiberin darbeden önce (i) ve darbeden sonraki (ii) (iii) (iv) biçimi (Abtew ve diğ., 2019)

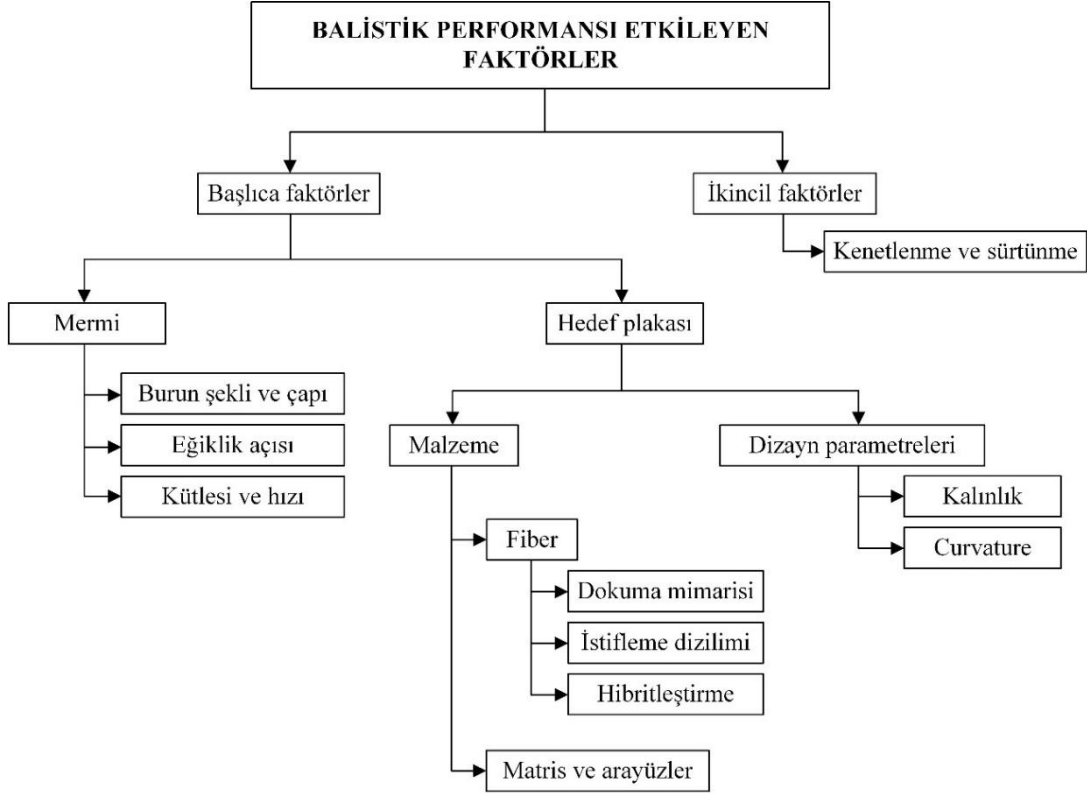
Oluşan konik bölgedeki merminin temas ettiği bölge dışında kalan alanlar ikincil ipliklerin olduğu bölgedir. Bu iplikler deforme olur ve bir miktar enerji emilimine neden olurlar (N. K. Naik ve diğ., 2006). 3D kumaşlarda daha fazla iplik ikincil iplik olarak rol aldığı için enerji sönmülmesinde 2D kumaşlara göre daha etkindirler. Bu durum daha geniş bir kumaş esnemesine ve daha gelişmiş bir enerji emilim kabiliyetine yol açar (Y. Chu ve Chen, 2018).

2.6. Balistik Performansı Etkileyen Faktörler

Balistik penetrasyon direnci ve ilgili mekanizma, birçok eşzamanlı faktörün bir kombinasyonudur. Bu nedenle, balistik çarpmada kontrol parametresi olarak herhangi bir faktörün seçilmesi veya ilk önce araştırmadaki diğer parametrelerin etkisini açıkça belirtmeden tek bir parametrenin rolünü araştırmak mümkün değildir (Dimeski ve diğ., 2015).

Balistik özellik ağırlıklı olarak emilen potansiyel enerji miktarıyla araştırılır, merminin hızını ve girinti derinliğini kontrol eder. Kompozitlerde doğal ve sentetik liflerin hibridizasyonu, çeşitli üretim teknikleri, düşük ve yüksek gerilimli liflerin kombinasyonu ve dokuma mimarileri gibi balistik performansı büyük ölçüde artıran birçok faktör vardır (S. Kar ve diğ., 2022).

Dewangan ve Panigrahi (2021), fiber takviyeli kompozitlerin balistik performansını etkileyen faktörleri Şekil 2.28’de verildiği gibi genel olarak ikiye ayırmışlardır. Bunlardan birincisi balistik performansın en çok etkilendiği doğrudan mermi ve hedef plakasıyla alakalı olan başlıca faktörler, diğeri ise balistik performansı daha az etkileyen kumaşın mermiye kenetlenmesi ve sürtünmesiyle oluşan ikincil faktörlerdir.



Şekil 2.28. Balistik performansı etkileyen faktörler (Dewangan ve Panigrahi, 2021)

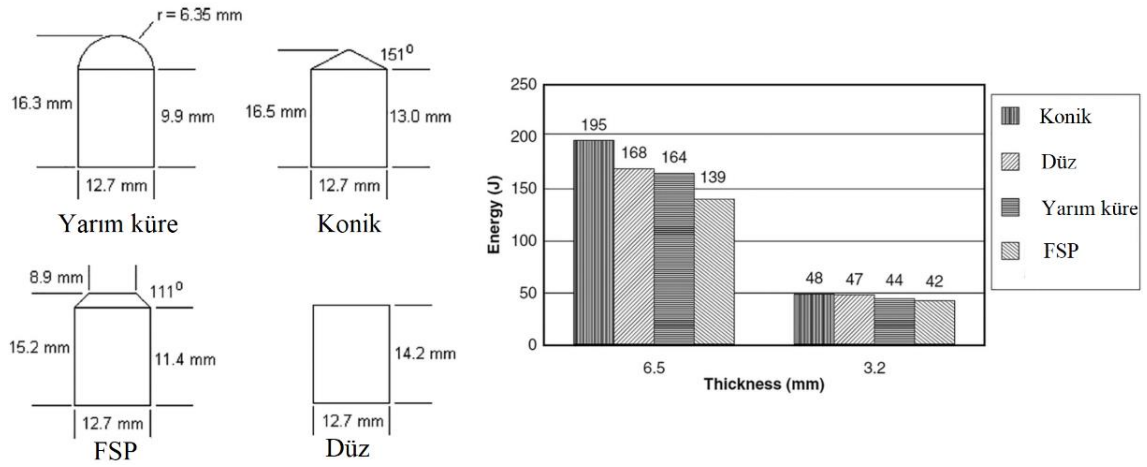
Cheeseman ve Bogetti (2003), balistik performansın dokuma kumaşa ait iplik malzeme özelliklerinden, mimari tasarımından, birden fazla kat kombinasyonundan ve katmanlar arasındaki sürtünmesinden büyük ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda, merminin çarpma şekli ve hızının da balistik performan üzerinde önemli etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir.

2.6.1. Mermi geometrisi, hızı, kütlesi ve eğiklik açısı

Mermi şekli ve ateşleme sistemiyle çok eski bir teknoloji olmasına rağmen hala üzerinde çalışılan bir konu olmaya ve balistik bilimiyle uğraşanları ilgilendirmeye devam etmektedir. Mermi geometrisinin etkilerini deneysel olarak incelemek artık eskisi kadar

ilgi çekici görünmese de hala bazı deneysel çalışmalar yürütölmeye devam etmektedir (Guo ve Chen, 2016; Guo ve diğ., 2017; Hudspeth ve diğ., 2017).

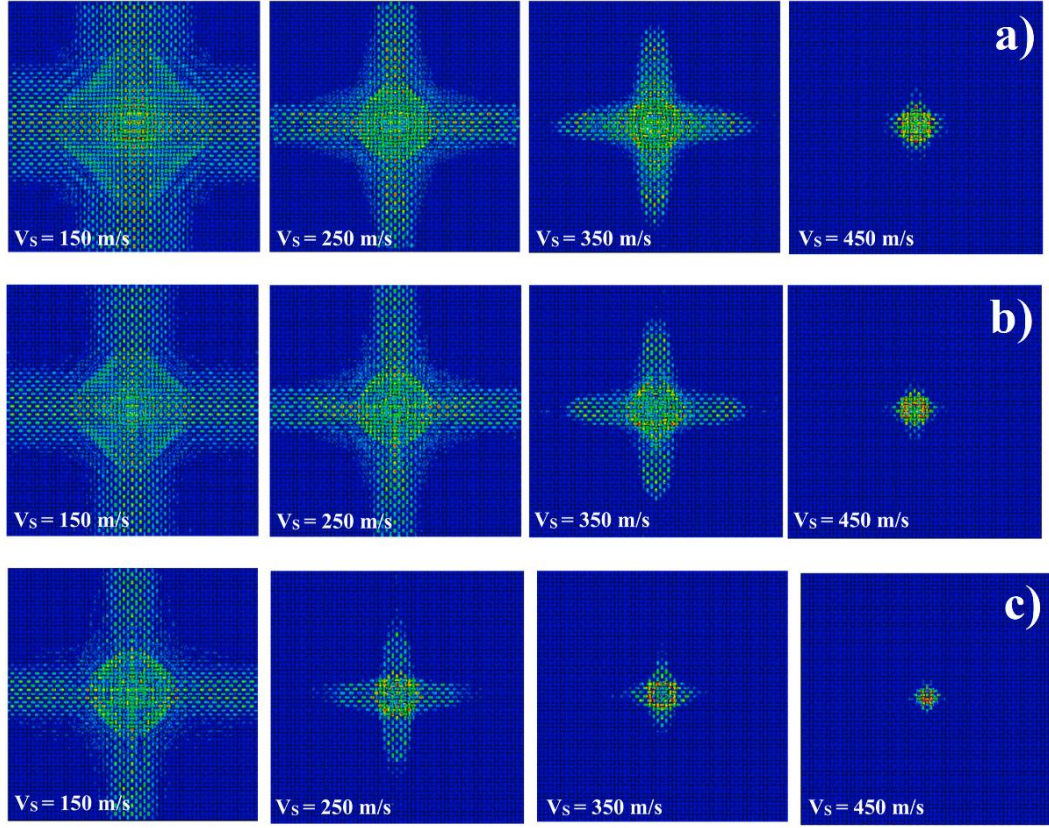
Farklı mermi türleriyle yapılan deneysel testler çok fazla insan gücü gerektirdiğinden ve çok fazla zaman aldığından dolayı ekonomik değildir (Bandaru ve Ahmad, 2015). Her ne kadar geometri ile ilgili yapılan çalışmalar azalsa da özellikle uçak ve uzay araçları gibi yüksek hızda darbelere maruz kalabilen hava araçlarında farklı geometrilerin test edilmesi elzemdir. Bu yüzden son yıllarda özellikle teknolojinin gelişmesiyle araştırmacılar bilgisayar modellemeleriyle daha fazla çalışma yapabilmek fırsatı bulmuşlardır.



Şekil 2.29. Mermi geometrisi ve hedef kalınlığının enerji sönümleme üzerindeki etkisini gösteren bir çalışma (Dewangan ve Panigrahi, 2021)

Merminin ya da şarapnelin geometrisi dışında kütlesi ve hızı da çok önemlidir. Kütlesi artan parçanın aynı hızdaki başka bir parçaya oranla sahip olduğu enerji daha fazladır ve bu darbeye maruz kalan hedefi çok daha fazla zorlayan bir durum haline gelir. Ancak daha düşük darbe hızlarında kumaş enine sapmak için daha fazla zamana sahiptir ve bu durum enerji emilimine daha fazla kumaş alanını dahil ederek artan enerji dağılımına yol açar (Tabiei ve Nilakantan, 2008). Ingle ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, sonlu elemanlar yöntemiyle Kevlar 29, Zylon AS ve Spectra 1000 kumaşlara farklı hızlarda (150, 250, 350 ve 450 m/s) balistik testler uygulamışlardır. Düşük darbe hızında (150 m/s) daha fazla sayıda ikincil ipliğin enerji sönümlemeye dahil olduğunu ve bu sebeple düşük hızlarda enerji sönümleme kapasitesinin daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Enerji sönümleme işlemine dahil olan iplik sayısının darbe hızının artmasıyla azaldığını ifade etmişlerdir. Kumaşlar farklı olsa da 450 m/s darbe hızında benzer darbe hasarları gözlemlemişlerdir (Şekil 2.30). Daha yüksek hızlar ve daha keskin

geometriye sahip mermiler, kumaşları ve uyumlu laminatları kopmaya kadar uzatmak yerine doğrudan kesme eğiliminde olurlar (Dewangan ve Panigrahi, 2021). Bu bilgilere ilaveten P. M. Cunniff (1992) yaptığı çalışmada, katman sayısının artmasıyla beraber mermi geometrisinin önemini yitirdiğini belirtmiştir.

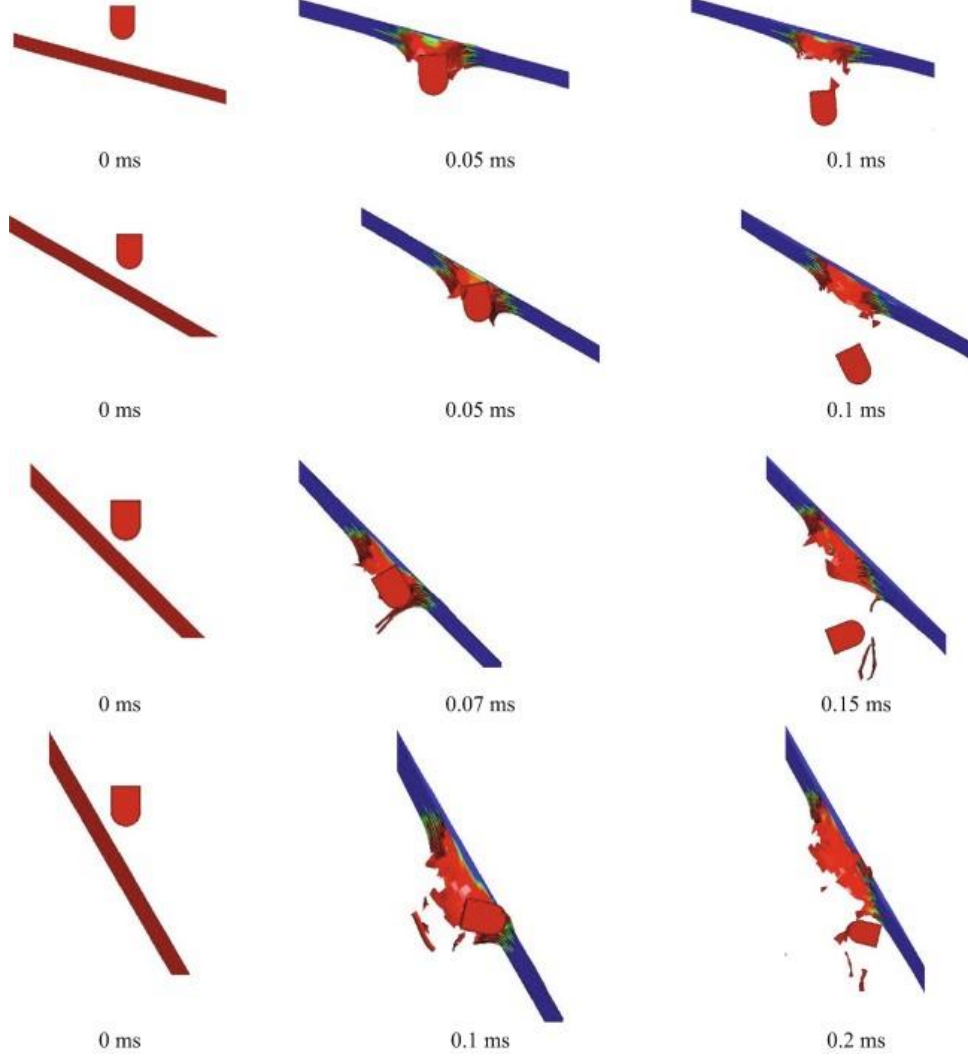


Şekil 2.30. a) Kevlar 29, b) Zylon AS ve c) Spectra 29 kumaşlara farklı hızlarda balistik darbenin etkileri (Ingle ve diğ., 2022)

Genel olarak çoğu çalışmada merminin normal doğrultuda geldiği durumlar incelenir, ancak gerçekte mermi çoğu zaman normal doğrultuda gelmemektedir. Bu yüzden farklı açılarda gelen merminin etkilerini incelemek gerekir. Bu konuda genel olarak çarpma açısı ve çarpma hızının değiştirilerek çalışmalar yapılırken ayrıca hedef levhanın kalınlığı, katman sayısı ve farklı takviyelerle yapılan çalışmalarda mevcuttur.

Goda (2022) yaptığı çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanmış ve iki farklı geometride (düz ve konik) çarpma açısının etkilerini incelemiştir. Çarpma açısı büyüdükçe merminin laminant tarafından daha fazla dirence maruz kaldığını tespit etmiştir. Benzer şekilde Karthick ve Ramajeyathilagam (2021), LS-DYNA programı ile eğiklik açısının etkisini inceleyen bir çalışma yapmış ve darbe açısının artmasıyla laminatın enerji emme kapasitesinin arttığını belirtmiştir. Deng ve diğ. (2022) yaptıkları

numerik çalışmada, 2A12 alüminyum plakalara düşük ve yüksek açılarda atışlar yapmışlar ve hedef tarafından emilen enerjinin başlangıçta azaldığını, 15° 'de minimuma ulaştığını ve daha sonra çarpma açısı ile emilen enerjinin arttığını vurgulamıştır.



Şekil 2.31. Farklı açılarda merminin hasar mekanizmaları (Karthick ve Ramajeyathilagam, 2021)

2.6.2. Malzemenin ve matrisin etkisi

Balistik testlerde en önemli parametrelerden bir diğeri de malzemedir. Her malzemenin kendine has fiziksel ve mekanik özellikleri vardır ve bunların bir bütünü olarak malzeme darbe davranışı sergilemektedir. Ingle ve diğ. (2021), benzer tokluk değerlerine sahip malzemelerin balistik enerji sönmüleme kapasitesinin her zaman aynı olmadığı sonucuna varılabileceğini söylemişlerdir.

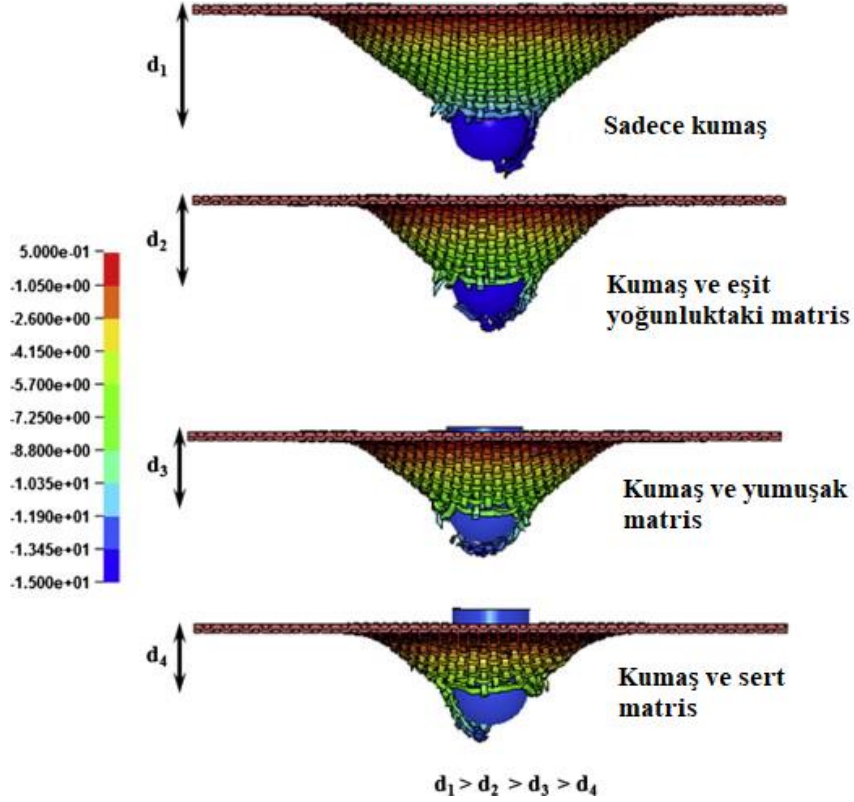
Balistik hedefin katman sayısını genişletmek balistik performansı artıracaktır fakat bu durum hedef malzemenin ağırlığını artıracaktır. Bunlara gerek kalmadan balistik

performansı artıracak yöntemler mevcuttur bunlardan biri de hibridizasyondur. Kevların cam, karbon, grafit, kenaf ve bazalt ayrıca bunların farklı istifleme sırasının enerji sönümleme kapasitesini artırdığıyla ilgili çok sayıda araştırma mevcuttur (Tabiei ve Nilakantan, 2008).

Sayer ve diğ. (2010), farklı darbe yüzeyine sahip karbon-cam ve cam-karbon'un düşük hızlı darbeye maruz kalma hasar profilini incelemiştir. Cam-karbon numunelerinin karbon-cam numunesinden daha iyi enerji sönümleme potansiyeline sahip olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, cam-karbon ile karşılaştırıldığında, karbon-cam'ın neredeyse üçte bir oranında daha yüksek penetrasyon eşiğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca Z. Y. Li ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, ön yüz olarak Kevlar kullandıkları UHMWPE/Kevlar kompozitlerde en yüksek enerji sönümleme kapasitesinin ve balistik limit hızının sağlandığını tespit etmişlerdir. Ön yüz olarak karbon kullandıkları karbon/Kevlar hibrit kompozitlerde de balistik limit hızını ve enerji sönümlemenin daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca en düşük enerji sönümleme değerlerini ise ön yüzde UHMWPE katmanları olan karbon/UHMWPE hibrit kompozitten elde etmişlerdir. Balistik penetrasyon hasar morfolojisi, hibrit laminatların lif kombinasyonları ve laminat istifleme dizileri değişse de ön hasar morfolojisinin tüm hibrit şema için hemen hemen aynı kaldığını ancak arka yüzdeki hasar morfolojisinin değiştiğini belirtmişlerdir.

Kompozit malzemelerde matrisin etkisi arayüz bağlantılarından çok fazla etkilenir. Kompozit bir malzemede matris sistemleri, donatıların korunmasına, ayarlanmasına ve dengelenmesine yardımcı olur ve hatta bir fiberden başlayarak diğerine yük aktarımına yardımcı olur. Balistik koruma için hem termoset hem de termoplastik matrisler kullanılabilir. Termoset matrisler, kumaşı olağanüstü mekanik ve termal özelliklere sahip sert bir levhaya dönüştürmek için yaygın olarak kullanılırlar. Termoplastik matrisler ise nihai malzemenin balistik kırılma tokluğunu geliştirirler. Gopinath ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada, ipliğe mükemmel bağlanan matris malzemesinin deformasyon öncesi sınır değere kadar ipliğin tam gerilmesini önlediğini tespit etmişlerdir. Matris ve iplik arasındaki yapışma ne kadar zayıfsa, ipliklerin bozulmadan önce o kadar fazla esneyebileceğini vurgulamışlardır. Bununla birlikte matrisin iplik üzerinde bağlantı ve sınırlama etkisinin ağır bastığını ve maksimum sapmayı azaltarak vücut zırhının performansını iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Bir tabakadan oluşan kompozit malzemede matris malzemesinin saptmaya (koni derinliğine) etkisi Şekil 2.32'de gösterilmiştir.



Şekil 2.32. Bir tabakadan oluşan koninin derinliğine matrisin etkisi (Gopinath ve diğ., 2012)

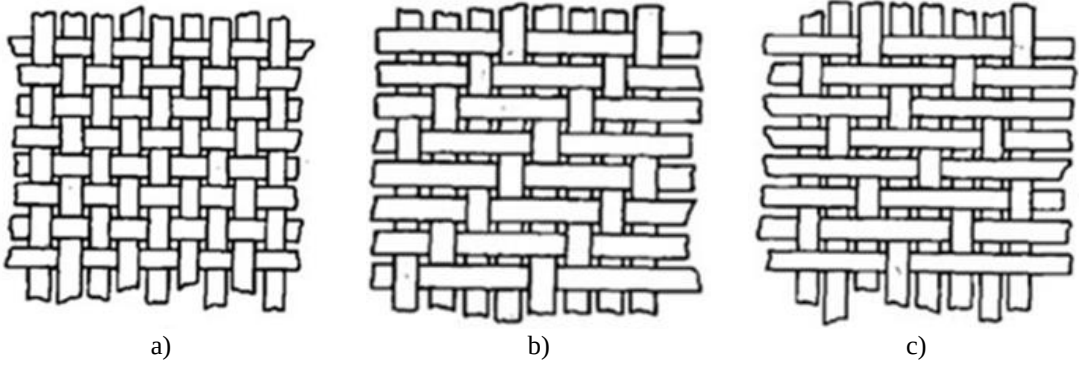
Yalnızca bir tabaka kumaştan üretilen kompozitin esnekliği, daha fazla enerji emmesine izin vermesine rağmen, oluşan koninin derinliği personel korumalarda etkili olamayacak kadar derin olabilir. Bu yüzden kumaşa uygun matris malzemesi kullanılmalı ve matris ile fiber arasındaki arayüzey bağlantısı geliştirilmelidir. Matris ve fiber arasındaki arayüzey ne kadar zayıfsa, fiberler bozulmadan önce o kadar fazla esneyecektir. Diğer taraftan matris malzemesinin sertliği merminin kinetik enerjisini etkileyecek ve kompozit yüzeydeki koni oluşumunda önemli bir rol oynayacaktır. Matris malzemesi ne kadar sert ise merminin kinetik enerjisini daha fazla emecek ve koni oluşumunu azaltacaktır (Gopinath ve diğ., 2012).

2.6.3. Kumaşın dokusu

Genel olarak tekstil malzemesinin balistik darbe performansları çeşitli parametrelerden etkilenir. Çeşitli mekanizmalar arasında kumaş mimarisi, dokuma yapısı, dokuma ve iplik yoğunluğu, kumaş kalınlığı, kumaş kıvrımı ve kumaş türleri gibi tekstil malzeme özellikleri önemli faktörlerden bazılarıdır (Abteew ve diğ., 2019). Kumaş hibridizasyonuna ek olarak, dokuma deseninin yapısal modifikasyonu, iplik oryantasyonu ve 3D yapı, darbe enerjisi emme kapasitesini büyük ölçüde etkiler. Yüksek

mukavemetleri ve sertlikleri birden fazla yöne yayıldığından, 2D veya 3D tasarımlı kumaşlar hava taşımacılığı, otomotiv ve diğer endüstrilerde kolaylıkla kullanılırken, hibrit 2D ve 3D kumaşlar kurşun geçirmez bileşen imalatında daha yaygın olarak kullanılmaktadır (S. Kar ve diğ., 2022).

Özellikle 2D kumaşlar balistik araştırmalarda çok fazla karşımıza çıkmaktadır. Bunun sebebi kolay üretilir ve kolay elde edilebilir olmasıdır. İki tür ipliğin, yani malzemenin uzunluğu boyunca uzanan iplikler (çözü) ve önceden tanımlanmış dama tahtası desenine göre kenardan kenara (atkı) uzanan iplikler birbirine geçirilerek üretilir. Şekil 2.33'te gösterilen düz (plain) dokuma, dimi (twill) dokuma ve saten dokuma temel dokuma türleridir (Dewangan ve Panigrahi, 2021).

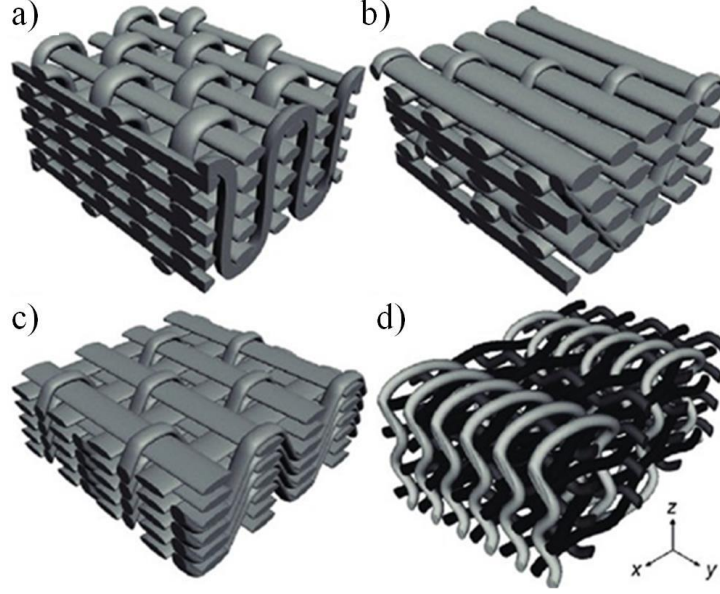


Şekil 2.33. Yaygın örgü türleri, a) düz örgü. b) dimi örgü. c) 5 koşum saten dokuma (Bloom, 2015)

Düz kumaş, belirli bir iplik numarası ve dokuma yoğunluğu için sepet, dimi ve saten dokuma ile karşılaştırıldığında en yüksek kıvrım oranına sahiptir. Birçok çalışma, düz dokumanın enerji emiliminde diğer kumaş dokumalardan daha iyi performans gösterdiğini tespit etmiştir (Cavallaro, 2016; P. M. Cunniff, 1992; Y. Yang ve Chen, 2019; Y. Zhou ve Chen, 2015). C. K. Chu ve Chen (2010) ve Y. Zhou ve Chen (2015) yaptıkları sonlu eleman simülasyonu sonuçlarında, dimi ve saten dokumaya kıyasla düz dokuma için %30'a kadar enerji sönümlemesi elde etmişlerdir. Bu tür sonuçlar, enerji emilimi üzerindeki iplik kıvrım etkisinin yalnızca belirli bir dokuma modeli için anlamlı olduğunu göstermiştir.

Bandaru ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, Kevlar/polipropilen 2D ve 3D kompozitlerin düşük hızlı darbe ve mekanik tepkilerini incelemişlerdir. Merminin geometrisini ve kütlesini sabitlediklerinde, 3D dokuma kompozitin, 2D düz dokuma kompozit ile karşılaştırıldığında daha iyi enerji absorpsiyonuna sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun sebebi olarak ise 3D dokumaların sahip olduğu z yönlü

ipliklerin çarpma esnasında laminatın yapısal bütünlüğünü korumasından ve elyaf kırılması, elyaf çatlaması ve delaminasyon yoluyla daha iyi direnç sağlamasından dolayı olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2.34. 3D dokuma yapılar, (a) ortogonal, (b) kalınlık boyunca açılı kilidi, (c) katmandan katmana açılı kilidi ve (d) tamamen geçmeli (Sahbaz Karaduman ve diğ., 2017)

2.6.4. Kalınlık ve hedef malzemenin kavisli yapısının etkisi

Kalın kompozitler, ince kompozitlere göre dışarıdan uygulanan yüklere karşı daha iyi performans gösterdiğinden, kompozit kalınlığı önemlidir. Ancak koruma sağlayan bir malzemenin gereğinden kalın olması hareketliliği kısıtlayan bazı problemlere yol açabilmektedir. İnce kompozitlere kıyasla kompozit kalınlığının geometrik faktörü de hayati bir rol oynar, çünkü kalın kompozit harici uygulanan bir yüke karşı daha iyi bir performansa sahiptir. Bu nedenle kompozit kalınlığı, etkin baskın hasar yöntemini değiştirdiği ve kontrol ettiği ve böylece toplam enerji absorpsiyonu ve hasarlı alanı etkilediği için temel faktörlerden biridir.

Kompozit kalınlığının artmasıyla, indüklenen gerilme ve deformasyon tepkisi kalınlık boyunca değişmektedir. Reddy ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, laminat kalınlığının ve hızın enerji absorpsiyonu üzerindeki etkisini hem kalınlığa hem de hıza bağlı olan etkileşim süresi cinsinden açıklamışlardır. Darbeli laminatların enine kesitini incelediklerinde, daha düşük ve daha yüksek kalınlıktaki laminatların kırılma mekanizmalarının farklı olduğunu ve kalınlık arttıkça hasar alanının arttığını gözlemlemişlerdir. Yüksek kalınlıktaki laminatların ağırlıklı olarak çekme kırılması ve

delaminasyon yoluyla bozulduğunu, düşük kalınlıktaki laminatlarda ise liflerin kesilmesi nedeniyle hasara uğradığını belirtmişlerdir. Ayrıca merminin de hedefle etkileşimi sırasında plastik deformasyona uğradığını ve bu deformasyonun çarpma hızından çok hedef kalınlığına bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

Balistik performansla ilgili araştırmaların çoğu düz laminatlar üzerinde yapılmıştır. Bununla birlikte, düz laminatlardan üretimi sırasında bir kaska verilen eğrilik, liflerin gerilmesine ve kısalmasına neden olur. Bu nedenle, bir kaskın yüksek hızlı darbeye balistik tepkisi, düz panel laminantından farklı olabilir. Yapılan çalışmalar bir eğrilik yarıçapını azaltmanın bir kaskın balistik darbe direncini artırdığını göstermektedir. Bununla birlikte, eğrilik yarıçapı ile değişen bir kaskın balistik darbe direncini karşılaştıran doğrudan bir çalışma henüz yapılmamıştır. Bu nedenle hem düz laminatlar hem de gerçek kask, yeni bir malzemeden üretildiğinde balistik darbe tepkileri açısından test edilmelidir (Kulkarni ve diğ., 2013).

Van Hoof ve diğ. (2001) yaptıkları numerik çalışmada, bir merminin neden olduğu bir kask üzerindeki arka yüz deformasyonunun, aynı malzemeden imal edilmiş düz bir paneldekinden daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Tham ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada, AUTODYN-3D programını kullanarak deneysel sonuçları simülasyon sonuçlarıyla kıyaslamışlardır. Yaptıkları simülasyonlardan kaskın bir levhanından daha yüksek bir balistik dirence sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Usta ve diğ. (2016), LS-DYNA programını kullanarak yaptıkları çalışmada, yüksek hızlı mermi darbelerinde düz ve silindirik kompozit panellerin darbe davranışlarını iki farklı kalınlık için araştırmışlardır. Panelleri; sönmölen enerji, temas kuvveti, reaksiyon kuvveti, arka düzlem yer değiştirme ve artık hız açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan 4 katlı düz ve silindirik panellerin sönmölen enerjilerinin hemen hemen aynı olduğunu, 8 katlı silindirik panelin ise 8 katlı düz panele göre daha fazla enerji sönmölediğini gözlemlemişlerdir. Pasquali ve Gaudenzi (2017) yaptıkları çalışmada, ince dokuma kumaşa sahip E-cam/epoksi kompozit hedeflerinin yüksek hızlı darbe direnci üzerinde eğrilik yarıçapının etkilerini tahmin etmeyi amaçlayan analitik bir formülasyon sunmuşlardır. Küçük eğrilik yarıçapına sahip kompozitlerde birincil ve ikinci iplikler arasında darbe esnasında sıkışma meydana geldiğini ve bu durumun mermiden hedefe enerji transferini yönlendirerek balistik limit hızını artırdığını vurgulamışlardır.

2.6.5. Sürtünme

Sürtünme katsayısı mermi ile hedef arasındaki darbe enerjisini sönmleme eğilimi gösteren bir başka parametredir. Koni oluşumu, birincil iplik gerilimi, ikincil iplikte meydana gelen deformasyon ve delaminasyon, matriste meydana gelen çatlama, kayma kırılması veya gerilmesi gibi mekanizmalar ile darbe enerjisinin büyük bir kısmını sönmleyen hedef malzeme ayrıca mermi hareketine karşı sürtünme direnci de göstererek kalan darbe enerjisinin bir kısmını da sürtünme ile kaybeder. Mermi, sürtünme direncini aşmak için yeterli kinetik enerjiye sahip değilse, mermi hedefin içinde kalır (Abtew ve diğ., 2019).

İplikler arası sürtünme, dokuma kumaşların balistik enerji absorpsiyonunda önemli bir rol oynar. Son on yılda, iplikler arası sürtünmenin balistik enerji absorpsiyonu üzerindeki etkisi üzerine birkaç çalışma rapor edilmiştir. Dokuma kumaşın balistik enerji absorpsiyonunun optimum sürtünme katsayısı değerine kadar arttığı ve bunun ötesinde azaldığı bildirilmiştir. Bununla birlikte, iplik malzemesi özelliklerinin bu optimum sürtünme değerini nasıl etkilediğine dair temel bir anlayış hala zor. Farklı iplikler arası sürtünme seviyelerine maruz kaldığında, farklı balistik enerji absorpsiyon modları üzerindeki iplik malzeme özelliklerinin etkisi de anlaşılamamıştır (Ingle ve diğ., 2021).

Das ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, iplikler arası sürtünme katsayısının kumaş yapısının kırılma mekanizması ve enerji dağıtım karakteristiği üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Birkaç sayısal simülasyona dayanarak, daha yüksek iplikler arası sürtünmenin her zaman daha iyi balistik performans vermeyebileceği gözlemlemişlerdir. İplikler arası sürtünmenin, balistik performansı sınırlayıcı bir değere kadar iyileştirdiğini, bu eşik değerin ötesinde artan sürtünmenin, enerji kaybı ve arıza mekanizmasını olumsuz etkileyebileceğini söylemişlerdir.

Youqi Wang ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, elyaflar arası sürtünme katsayısının kumaş balistik performansı üzerindeki etkisini dijital element yaklaşımı kullanılarak simüle etmişlerdir. Simülasyon sonuçlarından, fiberler arası sürtünme katsayısının kritik bir değere kadar arttırılmasının balistik performansı geliştirdiğini görmüşlerdir. Kritik değerin ötesinde, elyaflar arası sürtünme katsayısı arttıkça balistik performansın azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca fiberler arası sürtünmenin balistik perforasyon mekanizmalarını da değiştirdiğini ifade etmişlerdir.

Ying Wang ve diğ. (2016), dokuma kumaşların balistik darbe davranışını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak ayrıntılı olarak analiz etmişlerdir. İplik yüzeyindeki gerilmelerin büyüklüğünün, kumaşta kesişen iplikler arasındaki sürtünme katsayısına

duyarlı olduğunu ve iplikler arasındaki artan sürtünmenin mermi-kumaş temas bölgesinin kenarındaki gerilimi azalttığını belirtmişlerdir. İplikler arası sürtünmeye sahip kumaşın iplikler arasında daha düşük sürtünmeye sahip kumaşlara kıyasla, çarpan merminin kumaşa daha uzun süre nüfuz etmesine neden olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca iplikler arası sürtünmesi daha yüksek olan dokuma kumaşların emdiği enerjinin iplikler arası sürtünmesi daha düşük olan kumaşlara göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

2.7. Karbon Esaslı Nano Takviye Elemanları

Epoksi reçineler yüksek gerilme mukavemeti, yüksek sertlik, olağanüstü elektrik performansı ve mükemmel kimyasal direnç gibi yüksek performansı nedeniyle yapıştırıcılar, kaplama, yarı iletken kapsülleme, donanım bileşenleri, elektronik devre kartı malzemeleri, havacılık ve kompozit matrisleri için en bilinen ve yaygın olarak kullanılan termoset reçinedir (Liu ve diğ., 2018).

Bilindiği gibi epoksi reçineler kırılgan ve sert yapıya sahiptirler. Bu kırılgan ve sert yapısını güçlendirmek için genellikle doğal veya sentetik fiberlerle desteklenirler ya da grafen, CNT, GO ve grafit nanoplatelet gibi nano malzemelerle modifiye edilirler (Kucclourya ve diğ., 2021).

1985'te fullerenin (diğer adıyla C60 ya da buckyballs) keşfi, 1991'de karbon nanotüplerin ve 2004'te grafenin tanımlanmasına yol açan araştırma faaliyetlerini hızlandırmıştır (Liu ve diğ., 2018). Fullerenlerin keşfi, esas olarak grafit ve elmasla sınırlı olan karbon allotroplarının sayısını büyük ölçüde genişletmiştir. Yeni karbon formlarının benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri, birçok bilim insanına teknolojik uygulamalarını tahmin etme konusunda ilham vermiştir (Z. Yang ve diğ., 2015). Fulleren, içi boş bir küre, elipsoid, tüp ve diğer birçok şekil biçimindeki bir karbon molekülüdür. Buckyball olarak da adlandırılan küresel fullerenler, futbolda kullanılan toplara benzer. Silindirik fullerenler ayrıca karbon nanotüpler olarak da adlandırılır (Liu ve diğ., 2018).

Bazı karbon nanomalzemelerinin çekme mukavemeti, elastiklik modülü, kopma uzaması, yoğunluk, elektriksel iletkenlik, oda sıcaklığında termal iletkenlik, havadaki termal kararlılık, tipik çap, spesifik yüzey alanı özelliklerine ait bilgiler Tablo 2.10'da verilmiştir.

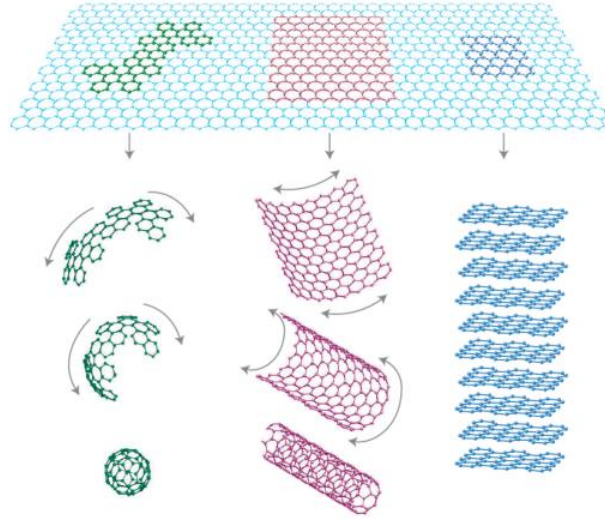
Tablo 2.10 Karbon nanomalzemelerin tipik özellikleri (Bilisik ve Akter, 2022)

Özellik	Fulleren	SWCNT	DWCNT	MWCNT	Grafen	Karbon nanofiber
Çekme mukavemeti (GPa)	-	50-500	23-63	10-60	130	3-7
Elastiklik modülü (TPa)	-	1	-	0,3-1	1	0,5
Kopma uzaması (%)	-	5,8	28	-	20	0,5-2,5
Yoğunluk (g/cm ³)	1,7	1,3-1,5	1,5	1,8-2,0		2,25
Elektriksel iletkenlik (s/m)	10 ⁻³	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	6 x 10 ⁵	10 ³
Oda sıcaklığında termal iletkenlik (W/mK)	0,4	6000	3000	2000	5000	1900
Termal kararlılık (havada)	600	>700	>700	>700	450-650	
Tipik çap (nm)	0,7	1	5	20		50-500
Spesifik yüzey alanı (m ² /g)	42-85	10-20	10-20	10-20	2675	50

2.7.1. Grafen

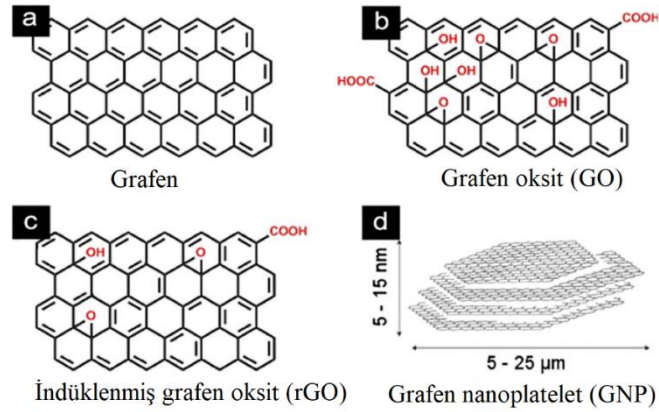
Grafen, sp² hibrit orbitalleri ile altıgen bir petek içerisinde kovalent bağlarla bağlanmış iki boyutlu tek bir atomik katmandan oluşan bir karbon nanomalzemedir. 2004 yılında, Manchester Üniversitesi'nden Geim ve Novoselov, grafitin tekrar tekrar soyulması yoluyla yapışkan bant yöntemini kullanarak tek katmanlı grafen hazırladılar ve bir Si/SiO₂ substratı üzerine biriktirdiler. Grafenin üretimi ve fiziksel karakterizasyonu konusundaki öncü çalışmaları nedeniyle Geim ve Novoselov 2010 Nobel Fizik Ödülü'nü kazandılar (Tjong, 2012).

Atomik olarak mükemmel bir yapıya sahip olan grafen, bilinen en güçlü, en sert ve en iletken malzemedir (Kucclourya ve diğ., 2021; Mazilova ve diğ., 2019; S. Wan ve diğ., 2020). Bundan dolayı bilinen malzemelerden daha iyi özelliklere sahip malzemelerin üretilmesine olanak sağlayabilmektedir. Bir petek kristal kafes içinde birbirine bağlanmış tek bir karbon atomu tabakası olan grafen, karbon dünyasındaki temel yapıdır. Şekil 2.35'te gösterildiği gibi, grafen tüm farklı boyutlara sahip karbon maddeleri için 2 boyutlu bir yapı bloğudur. Saf bir kompozite az miktarda grafen ilavesi kompozit malzemenin arayüzey özelliklerini geliştirir. Sadece arayüzey bağlantılarını geliştirmekle kalmaz ayrıca kompozitlerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini de artırır (Bilisik ve Akter, 2022).



Şekil 2.35. Grafenden fulleren, nanotüp ve grafit oluşumunu gösteren şema (Z. Yang ve diğ., 2015)

Grafen, bir atomun her bir tepe noktasını oluşturduğu iki boyutlu, atomik ölçekli, altıgen bir kafes biçiminde bir karbon allotropudur. Grafen nanoplateletler olarak da adlandırılan GNP, birlikte istiflenmiş birden fazla grafen tabakasından oluşur (Şekil 2.36).



Şekil 2.36. (a) grafen, (b) grafen oksit, (c) indirgenmiş grafen oksit ve (d) grafen nanoplateletlerin şematik diyagramı (Ali ve diğ., 2021)

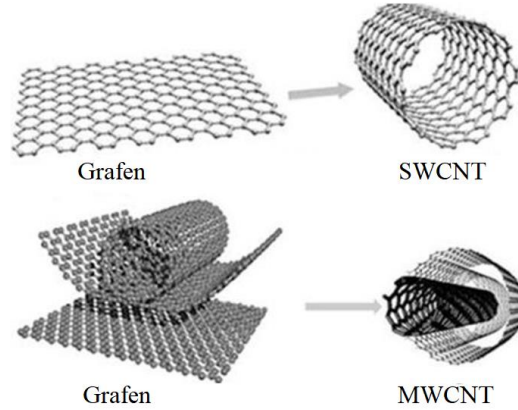
Grafen, çapları mikrometreden 100 mikrometreye kadar değişen, 1-15 nanometre kalınlığındaki küçük yığınlarından oluşur (Kalantari ve diğ., 2016; Liu ve diğ., 2018). Grafen kadar kullanılan bir diğer yapı olan GO, grafenin oksitlenmesiyle elde edilir. GO ve grafen arasındaki benzerlik, altıgen bir karbon yapısının varlığıdır, farkları ise hidroksil (OH), alkoksi (COC), karbonil (CO), karboksilik asit (COOH) ve diğer oksijen bazlı fonksiyonel grupların varlığıdır (Ali ve diğ., 2021).

2.7.2. Karbon nanotüp (CNT)

CNT, karbonun temsili bir tek boyutlu yapı allotropudur. 1991'deki keşfinden bu yana CNT, olağanüstü özellikleri ve çok çeşitli alanlardaki potansiyel uygulamaları nedeniyle hem akademi hem de endüstride büyük ilgi görerek nanomalzemelerde bir süperstar olmuştur. Web of Science'ın araştırma sonucuna göre, CNT'lerle ilgili 37.000'den fazla makale ve 2000 patent yayınlanmıştır (Z. Yang ve diğ., 2015).

Son on yılda CNT'ler olağanüstü mekanik özellikleri, yüksek termal iletkenlikleri ve özel elektronik özellikleri nedeniyle bilim insanları tarafından büyük bir ilgi görmektedirler. Grafenin bazal düzlemindeki sp^2 karbon-karbon bağı, doğadaki en katı ve en güçlü bağıdır. CNT, silindirik ve neredeyse hatasız yapılarında bu bağların ideal bir düzenine sahiptir ve bu nedenle maksimum teorik gerilme sertliğine ve mukavemetine yaklaşır. Deneyler ve atomistik simülasyonlar, CNT'nin gerçekten son derece yüksek bir rakam olan 1 TPa'dan daha yüksek olan elastisite modülüne ve karbon liflerinin birkaç GPa olan mukavemetinden önemli ölçüde daha yüksek olan 100 GPa civarında bir mukavemete sahip olduğunu doğrulamıştır. CNT ayrıca %20-30 arasında değişen bir elastik sınıra ve yaklaşık $1,75 \text{ g/cm}^3$ 'lük çok düşük bir yoğunluğa sahiptir (Pantano, 2012).

Karbon nanotüpler tek duvarlı nanotüpler (SWCNT) ve çok duvarlı nanotüpler (MWCNT) olmak üzere iki ana tipe ayrılırlar (Şekil 2.37).

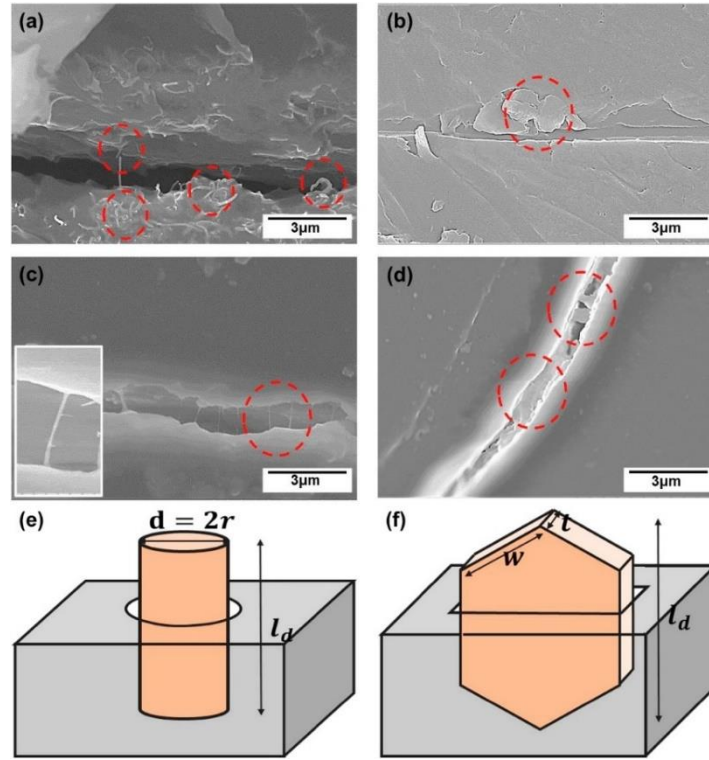


Şekil 2.37. SWCNT ve MWCNT genel yapısı (Agrawal ve Rai, 2015)

DWCNT olarak bilinen çift duvarlı karbon nanotüp esasında ayrı bir grup değil MWCNT diye adlandırılan gruba dahildir. MWCNT'ler sert, katı, çubuk benzeri yapılardır, oysa SWCNT'ler esnektir (Dabrowska, 2019; Liu ve diğ., 2018).

CNT'nin olağanüstü mekanik özellikleri ve geniş en boy oranı gibi özelliklerinden yararlanmanın yolu, CNT'leri kompozit malzemeler oluşturmak için bir matrise dahil

etmektir. Bunun için en iyi adaylar, kuşkusuz, güçleri, toklukları, düşük ağırlıkları ve kolay işlenebilmeleri sayesinde çok çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılan polimerlerdir. CNT ile zenginleştirilmiş polimer kompozitlerin birçok uygulama örneği vardır. Bunlar; havacılık ve uzay yapıları, spor malzemeleri, otomotiv bileşenleri, tıbbi cihazlar, optik bariyerler, fotovoltaiik cihazlar, iletken plastikler, yüksek elektrostatik yayımlı malzemeler, plastiklerin verimli elektrostatik boyanması, kompozit aynalar, yüksek termal yayımlı plastikler, biyomalzeme cihazları, gerinim sensörleri, hasar algılama, gaz sensörleri, optoelektronik, şeffaf elektronikler ve elektromekanik tahrik sistemleridir (Pantano, 2012).



Şekil 2.38. GNP ve CNT'nin çatlak mekanizmalarına etkilerinin gösterimi (Cha ve diğ., 2019)

Partikülün dağılımı, boyutu ve takviye fiber ile matris arasındaki arayüzey bağları elde edilen kompozitin genel özellikleri için çok önemlidir. Ancak GNP ve CNT ile üretilen kompozitlerde en büyük zorluk bunların dispersiyon kalitesidir. GNP ve CNT'nin Van der Waals etkileşimleri, onları topaklanmaya zorlayarak, kompozit parçaya harici bir kuvvet uygulandığında yerel stresin gelişmesine katkıda bulunur (Qin ve diğ., 2015). Bu zorlukların üstesinden gelmek için ultrasonikasyon, yüksek kesmeli karıştırma, yüzey aktif maddeler, zayıf asitlerin kullanıldığı kimyasal işlemler ve işlevselleştirme uygulanmaktadır (Liu ve diğ., 2018).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde; üretilen kompozitlerde kullanılan malzemeler ve üretim yöntemleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mekanik testler için gerekli olan kesim işlemi ve test hazırlıkları anlatılmıştır. Yapılan testlere, standartlarına ve hangi cihaz ile nasıl yapıldığına dair bilgilere değinilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçların analizi için faydalanılan teçhizatlar hakkında bilgilere yer verilmiştir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Epoksi reçineler, yapısal ve özel kompozit uygulamalarında diğer termoset reçinelerin ulaşamadığı eşsiz özellikler sunmasından dolayı yaygın olarak kullanılan termoset malzemelerdir. Solvent direnci, düşük büzülme, mükemmel elektrik yalıtımı, iyi mekanik özellikler ve tatmin edici yapışma gibi istenen özellikleri epoksi reçinelerden elde etmek mümkündür.

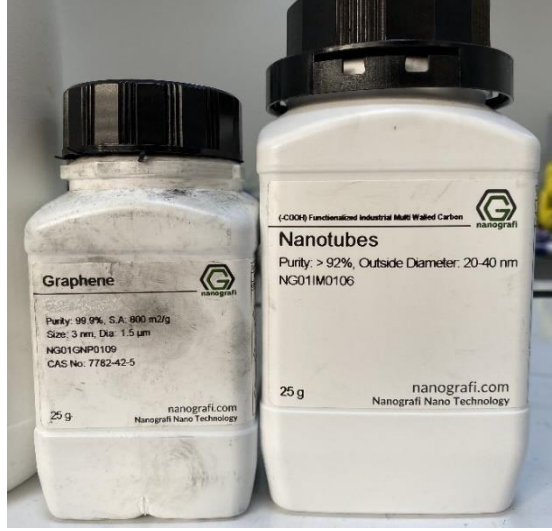
Her ne kadar polyester reçineler ve vinilester reçinelerden daha pahalı olsalar da epoksi reçineler ile genellikle daha güçlü ve sıcaklığa daha dayanıklı kompozit parçalar üretilmektedir. Epoksi reçineler, sertleşme esnasında düşük büzülme (%1-5) ile nispeten düşük molekül ağırlığına sahiptir. Parçalar halinde sertleştirilebilir ve bu şekilde depolanabilirler. Sertleştirilmiş epoksi reçineler, iyi mekanik ve termal özelliklerinin yanında kimyasal etkilere ve korozyona karşı yüksek direnç gösterirler. Tüm bu sebeplerden dolayı üretilen kompozit malzemelerde epoksi reçine tercih edilmiştir.

Deneylerde, matris malzemesi olarak ARC Epoxy firmasından ticari olarak temin edilen ARC 152 tipi epoksi reçine ve epoksi reçinenin sertleşmesi için W152 sertleştirici (ağırlıkça 4:1 oranında) kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Matris malzemesi olarak kullanılan ARC 152 epoksi reçine ve W152 sertleştirici

Epoksi reçineyi modifiye etmek için CAS numarası 7782-42-5 olan grafen nano platelet (GNP) ve CAS numarası 308068-56-6 olan karboksil ile işlevselleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) katkı maddeleri, Nanografi Nano Teknoloji A.Ş. firmasından ticari olarak temin edilmiştir. Temin edilen nano malzemelerin görüntüleri Şekil 3.2’de, teknik özellikleri ise Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Matris malzemesinde katkı maddesi olarak kullanılan nanopartiküller

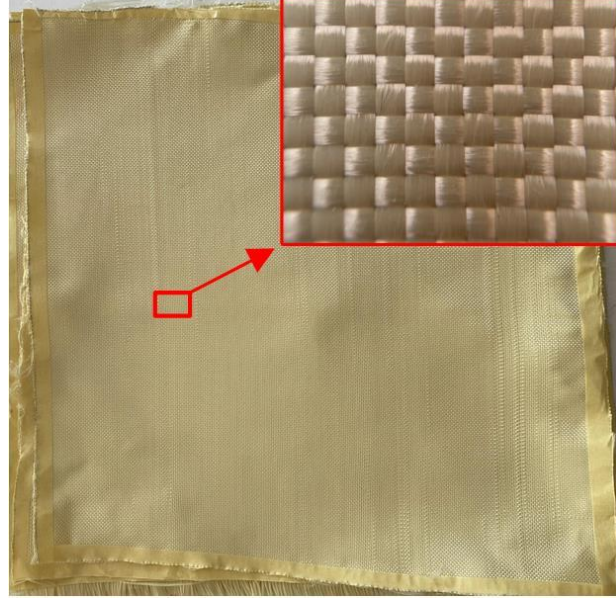
Tablo 3.1. Nanopartiküllerin teknik özellikleri

(-COOH) İşlevselleştirilmiş Çok Duvarlı Karbon Nanotüp (COOH-MWCNT)								
Saflık (%)	COOH Oranı (ağ. %)	Dış Çap (nm)	İç Çap (nm)	Uzunluk (µm)	Tap Yoğunluk (g/cm ³)	Gerçek Yoğunluk (g/cm ³)	Spesifik Yüzey Alanı (m ² /g)	Kül Oranı (ağ. %)
92	1,5	20-40	-10	10-35	0,15	2,2	120	9
Grafen Nanoplatelets (GNP)								
Saflık (%)	Kalınlık (nm)		Çap (µm)		Spesifik yüzey alanı (m ² /g)			
99,9	3		1,5		800			

Deneylerde fiber takviye elemanı olarak 200 g/m² plain örgü tipi balistik aramid kumaş kullanılmıştır (Şekil 3.3). Aramid kumaşlar ISO 9001: 2008 sertifikalı Carbomid firmasından ticari olarak temin edilmiştir. Balistik aramid fiberin teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.

1. Plain (bez ayağı) örgü tipinde,
2. 200 g/m² ağırlığında 0,3 mm kalınlığında,

3. 8000 (N/5cm) maksimum çözgü kuvveti (ISO EN ISO 13934-1),
4. 8500 (N/5cm) maksimum atkı kuvveti (ISO EN ISO 13934-1),
5. İplik Twaron aramid 930 Dtex-Type 2040.



Şekil 3.3. Balistik aramid kumaş ve örgü yapısının görüntüsü

3.2. Üretim Aşaması

İlk aşamada matris malzemesine nanopartikül katkısının etkilerini ve olası üretim hatalarını engellemek amacıyla RTV-2 silikon kalıp içerisine matris malzemeleri dökülerek ASTM D638 standardına uygun nanokompozit çekme numuneleri üretilmiştir. Yaklaşık 70 gr olarak hazırlanan karışımlardan üçer adet çekme numunesi elde edilmiştir. Sonrasında yapılan çekme testi verileri incelenmiş ve üretimde herhangi bir sıkıntı olmadığı görülmüş, aynı şekilde farklı ağırlık oranlarında üretilen matris malzemeleri aramid fibere el yatırma yöntemi ile emdirilmiştir. 12 katmanlı 300 mm x 300 mm boyutlarında aramid fiber takviyeli kompozitlerden (AFTK'lardan) ikişer adet üretim yapmak için ise 500 g epoksi reçineye ihtiyaç olduğu hesaplanmıştır.

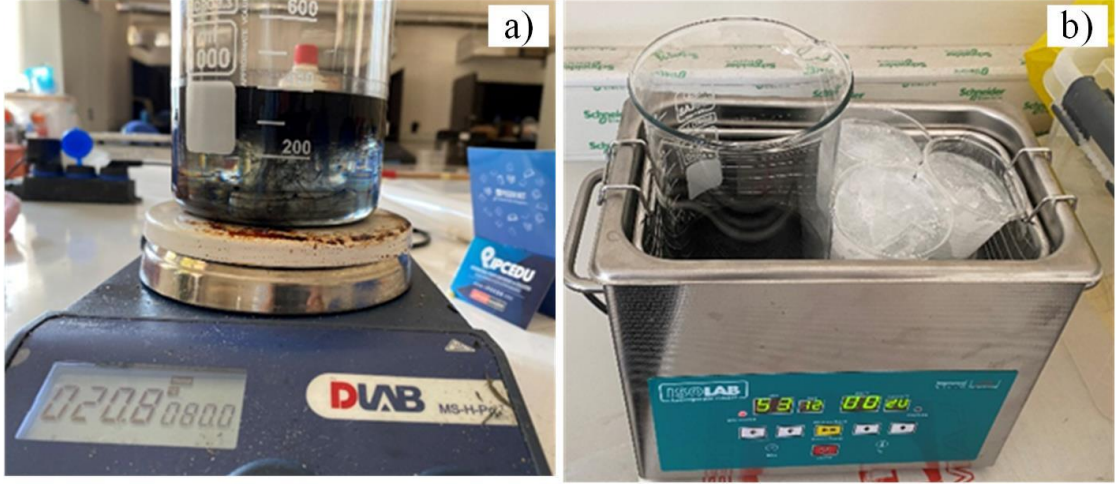
Epoksi reçineler, yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip olmalarından dolayı oldukça kırılgan bir yapıya sahiptirler. Epoksi reçineleri modifiye etmek için içerisine katkı maddeleri ilave edilmektedir. Epoksi içerisinde yüksek oranlarda katkı maddesi ilave etmek viskoziteyi artırmakta ve üretimi zorlaştırmaktadır. Ayrıca katkı maddesi boyutunun büyük olması malzeme içerisinde kusur olasılığını artırmaktadır. Diğer taraftan grafenin hacim oranıyla tokluk arasında lineer bir ilişki olmasına rağmen yüksek

oranlar grafenin topaklanmasına neden olabilir ve malzemenin mekanik özelliklerinde dramatik düşüşlere sebebiyet verir (Kucclourya ve diğ., 2021). Bu sorunları önlemek için düşük oranlarda ve nano boyuttaki katkı maddeleri ile çalışma yapmak gerekmektedir (Mirjalili, 2011). Bu yüzden epoksi reçine içerisine ilave edilecek nanopartikül oranları ağırlıkça %0,1, %0,2 ve %0,3 olacak şekilde belirlenmiştir.

GNP ve MWCNT partikülleri arasında meydana gelen düşük enerjili Wan der Waals etkileşimleri bu malzemelerin epoksi reçine içerisinde topaklanmalarına sebep olmaktadır. Bu topaklanma, malzemeye dışardan bir kuvvet uygulandığında meydana gelen gerilmenin gelişmesini sağlar ve malzemenin beklenenden daha düşük bir gerilme altında bozulmasına sebep olur (Qin ve diğ., 2015). Bu bağları engellemek ve bu katkı maddelerinin epoksi reçine içerisinde daha iyi çözünebilmeleri için araştırmacılar farklı yöntemlere başvurmuşlardır. Bunlar; üç merdaneli haddeleme (M. M. Rahman ve diğ., 2012), sonikasyon (Liao ve diğ., 2004; Song ve Youn, 2005) ve karıştırma hızı 10.000 dev/dak gibi yüksek değerlere çıkabilen kayma gerilmeli karıştırma (Athanasopoulos ve diğ., 2012) ya da bunların beraber kullanıldıkları çeşitli karıştırma yöntemleridir. Sonikasyon ve kayma gerilmeli karıştırma genellikle viskozitesi reçineye oranla daha düşük olan bir çözücü içinde gerçekleştirilir. N-Methyl-2-pyrrolidone ve Siklopentanon çok iyi çözücüler olmasına karşın bu çözücülerin epoksi içerisinden uzaklaştırılması yüksek kaynama noktasına (205°C ve 131°C) sahip olmalarından dolayı zordur. Bu iki çözücüye oranla asetonun 56°C olan kaynama noktası oldukça düşüktür (Pullicino ve diğ., 2017). Ayrıca asetonun temini kolaydır ve diğerlerine göre nispeten daha ucuz bir malzemedir. Bu nedenle yapılan çalışmada çözücü olarak aseton kullanılmıştır.

Nanopartiküller öncelikle asetonla hassas terazide tartılmışlardır. Epoksi miktarına göre 3:1 oranında aseton katılmıştır. Daha sonra atmosfere açık ortamda nanopartikül/aseton karışımı 120 W güce sahip ISOLAB 621.05.003 ultrasonik banyo yardımıyla buz/su karışımı içerisinde 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Burada buz kullanılmasının sebebi ultrasonik karıştırıcının çalışmaya başladıktan bir süre sonra suyu ısıtması ve asetonun karıştırma tamamlanmadan önce uçmasına sebep olmasıdır.

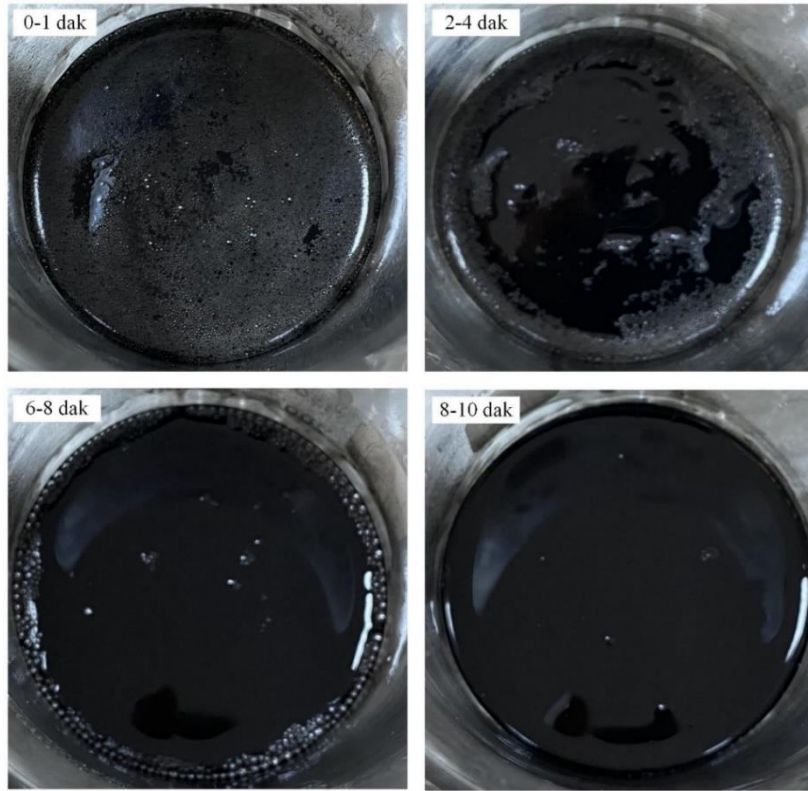
Nanopartikül/aseton karışımının ultrasonik karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra yine hassas terazide tartılan epoksi reçine karışımının içerisine dökülmüştür. Burada aseton nispeten daha düşük bir yoğunluğa sahip olduğu için epoksi reçine üzerinde nanopartiküllerle beraber yüzmeye başlamıştır (Şekil 3.4.a). Daha sonra Dlab MS-H-PRO marka manyetik karıştırıcıda ısı vermeden 400 dev/dak hızda yaklaşık 15 dakika karıştırma işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.4. a) manyetik karıştırıcıda ve b) ultrasonik banyoda karıştırma işlemi

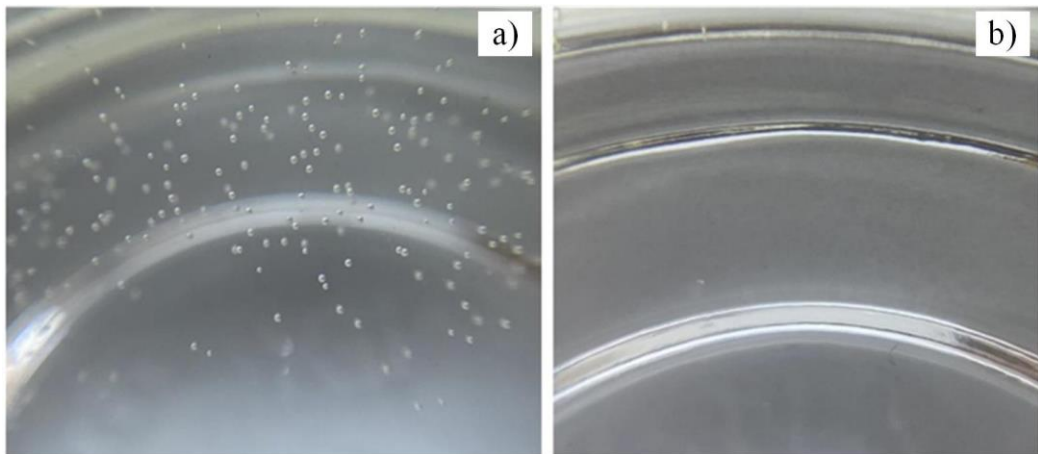
Manyetik karıştırıcıda yeterince karışan epoksi/aseton/nanopartikül karışımı homojen bir karışım elde edebilmek için 1 saat boyunca yine ultrasonik banyoda buz/su içerisinde karıştırılmıştır (Şekil 3.4.b). Bu işlemlerden sonra manyetik karıştırıcı yardımıyla asetonun uçması için karışım 60 °C sıcaklıkta 1-1,5 saat süre ile 400 rpm hızda karıştırılmış ve aseton tamamen karışımdan buharlaştırılarak uzaklaştırılmıştır. Asetonun karışımdan tam olarak uzaklaştırıldığı hassas terazide kontrol edilmiştir. Eğer karışımdan aseton yeterince uzaklaştırılmazsa sertleştirici konulduğu halde epoksi istenilen ölçüde kürlenemez.

Yaklaşık 60 °C sıcaklığa sahip olan epoksi/nanopartikül karışımına sertleştirici eklenmeden önce karışımın sıcaklığı 25-30 °C arası bir sıcaklığa düşene kadar beklenilmiştir. Karışımın bu sıcaklık aralığına kadar düşürülmesinin nedeni sertleştirici eklenen karışımın çalışma süresini arttırmaktır. Sıcaklığı düşen epoksi-nanopartikül karışımı hassas terazide tartılarak 4:1 oranında sertleştirici eklenmiştir ve bu sefer manyetik karıştırıcıda ısıtma işlemi yapılmadan 10 dakika boyunca 400 dev/dak hızında karıştırılmıştır. Bu aşamada epoksi-sertleştirici karışımında birçok mini baloncuklar oluşmuştur. Bu baloncukların malzemenin mekanik özelliklerini etkilememesi için gaz alma (degassing) işlemi yapılır. Gaz alma işlemi için genellikle vakumlu kaplar kullanılmaktadır ancak yaptığımız araştırmada bu işlemin ultrasonik karıştırıcı yardımıyla da yapılabileceği anlaşılmıştır. Karışımların gaz alma işlemi ultrasonik karıştırıcıda gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 10 dakikada karışımdaki neredeyse tüm hava baloncukları elimize edilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Ultrasonik banyo ile 10 dakikada gaz alma işlemi

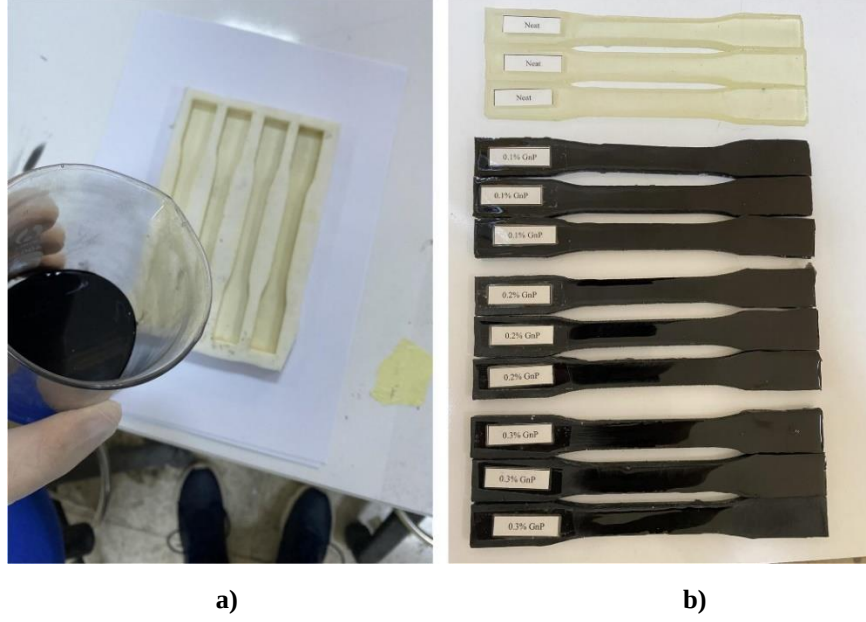
Epoksi/nanopartikül/sertleştirici ve/veya epoksi/sertleştirici karışımlarına gaz alma işlemi yapılmadığı zaman kürlenmiş epoksi matris malzemesi içerisinde mini ve hatta bazen büyük ölçüde hava baloncukları kalabilmektedir. Bu durum Şekil 3.6’da açıkça görülmektedir ve malzemenin mukavemetini ciddi oranda düşürmektedir.



Şekil 3.6. Kürlenmiş saf epoksi; a) gaz alma işlemi yapılmamış, b) gaz alma işlemi yapılmış

Hava kabarcıkları alınan saf epoksi ve epoksi-nanopartikül karışımları RTV-2 silikon kalıba dökülmüş ve 1 gün boyunca kürlenmesi için oda sıcaklığında muhafaza

edilmiştir (Şekil 3.7.a). Kürlenmiş saf epoksi malzeme ile nanopartikül takviyeli epoksi kompozitler kalıptan çıkartılmış ve içerisindeki nanopartikül oranına göre etiketlenmiştir (Şekil 3.7.b).



Şekil 3.7. a) karışımın RTV-2 kalıba dökülmesi ve b) kürlenmiş çekme numuneleri

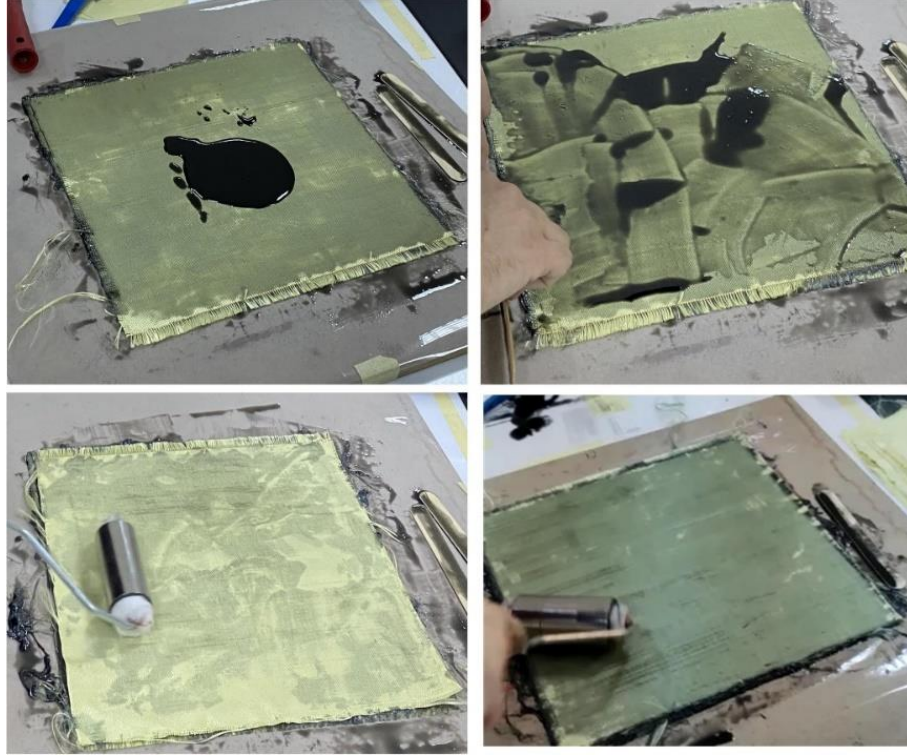
Aramid tabakalar arasına dökülecek olan epoksi-nanopartikül matris malzemesi 500 g olarak hazırlanmaktadır. Bu karışımın sertleştirici katıldıktan sonra ultrasonik banyoda sıcaklığının kontrolü zor olduğu için ultrasonik banyo işlemi iptal edilmiştir. Sebebi 1 kez ultrasonik karıştırıcı işlemi sırasında sıcaklığının artması sonucunda malzemenin kürlenmesi ve dökülemeyecek kıvama gelmesidir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Ultrasonik banyo esnasında kürlenmiş karışım

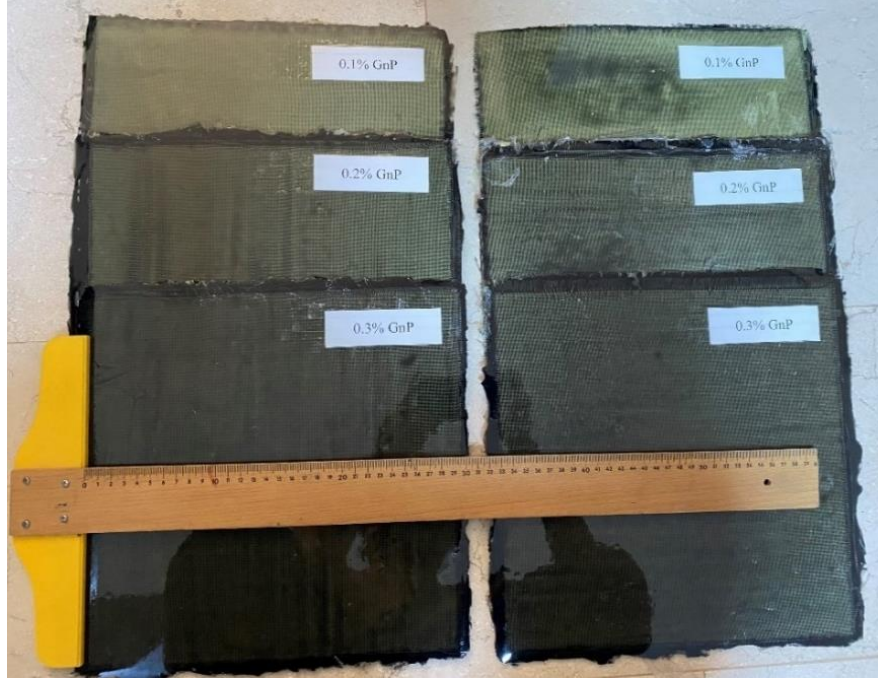
Aramid katmanlar arasına eşit ağırlıkta epoksi/sertleştirici ve/veya epoksi/nanopartikül/sertleştirici olarak hazırlanan matris karışımının dökülmesi için terazi kullanılmıştır.

Düz bir zemine serilen sıyırma naylonu üzerine bir tabaka aramid kumaş konulmuş ve üzerine matris karışımı dökülmüştür. Karışım tahta çubuk ile aramid kumaş yüzeye dağıtılmış ve üzerine ikinci bir tabaka aramid kumaş daha konulmuştur. Aramid tabaka üzerinde ağır bir metal silindir gezdirilmiş ve aramid kumaş katmanları arasındaki matris karışımının dağıtılması ve fiber katmanların ıslatılması sağlanmıştır. Islanan katmana tekrar matris karışımı dökülmüş ve üzerine aramid kumaş konularak ağır bir metal silindir gezdirilmiştir. Bu işlem aramid katman sayısı 12 olana kadar devam etmiş ve tüm katmanların ıslatılması sağlanmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Karışımın el yatırma yöntemiyle aramid katmanları arasına sürülmesi

Islanan 12. aramid kumaş katmanı üzerine ilk tabakanın altına serildiği gibi sıyırma naylonu serilmiş ve üzerine numune boyutlarında bir ağırlık konulmuştur. Matris malzemesinin kurlenmesi için 2 gün beklenişmiştir. İki günlük süre sonunda sıyırma naylonlarından çıkartılan kompozitler üzerine etiketler yapıştırılmıştır (Şekil 3.10). Hazırlanan tüm AFTK'ların matris içerisindeki takviyeye göre adlandırılması Tablo 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.10. 300x300 mm ebatlarında üretilen balistik ve mekanik test plakaları

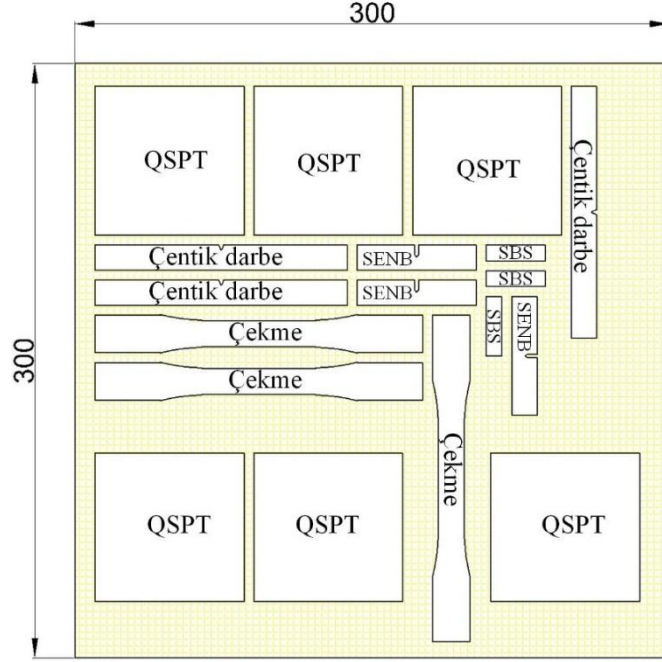
Tablo 3.2. Hazırlanan kompozit malzemelerin adlandırılması

Ana Takviye Kumaş	Matris Takviyesi	GNP Oranı (ağırlıkça %)	MWCNT Oranı (ağırlıkça %)	Adlandırma
Aramid	-	-	-	Aramid
Aramid	GNP	0,1	-	GNP-1
Aramid	GNP	0,2	-	GNP-2
Aramid	GNP	0,3	-	GNP-3
Aramid	MWCNT	-	0,1	MWCNT-1
Aramid	MWCNT	-	0,2	MWCNT-2
Aramid	MWCNT	-	0,3	MWCNT-3
Aramid	GNP+MWCNT	0,05	0,05	Hibrit-1
Aramid	GNP+MWCNT	0,10	0,10	Hibrit-2
Aramid	GNP+MWCNT	0,15	0,15	Hibrit-3

3.3. Numune Kesimi ve Mekanik Test Hazırlıkları

Epoksi malzeme ile farklı nanopartikül cinsi ve ağırlık oranına sahip epoksi kompozitler, üretim aşamasında ASTM D638 standardına uygun bir şekilde üretildikleri için ekstra bir işlem yapılmamıştır. Ancak 300 mm x 300 mm boyutlarında 12 katman olarak üretilen AFTK ile farklı nanopartikül cinsi ve ağırlık oranlarındaki AFTK'ların mekanik testlerini yapmak için standartlara uygun olarak kesilmesi gerekmektedir. Bu yüzden öncelikle çizim programı vasıtasıyla kompozit plaka boyutlarında çizilen kare

parça üzerine standartlara uygun mekanik test numuneleri yerleştirilmiştir ve kesim bölgeleri belirlenmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Mekanik testler için kompozit plaka üzerine numunelerin yerleştirilmesi ve kesim bölgelerinin gösterilmesi

Çizilen kare parça üzerine 3 adet ASTM D638 çekme numunesi, 3 adet ASTM D5045 tek kenarda çentik bükme yöntemi (SENB) ile Mod I kırılma tokluğu numunesi, 3 adet ASTM D2344 kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) numunesi, 3 adet ASTM D6110 çentik darbe (Charpy) numunesi ve 6 adet yarı statik penetrasyon test (QSPT) numunesi yerleştirilmiştir. Intermac Primus 402 su jeti cihazı kullanılarak kompozit plakalardan numuneler kesilmiştir (Şekil 3.12). Kesilen numunelerine ait bazı görüntüler Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.12. Su jeti yardımıyla numunelerin kesilmesi



Şekil 3.13. Kesilen numunelere ait görüntüler

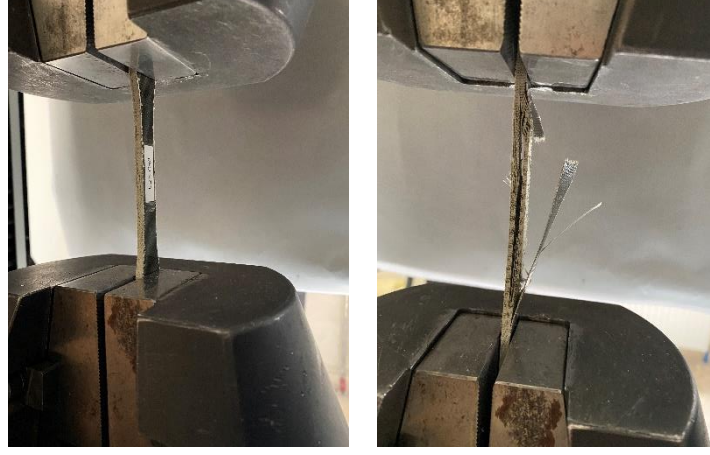
3.3.1. Çekme testi

Epoksi malzemesinin çekme mukavemetinde, nanopartikül takviye elemanları kullanılması ile meydana gelen değişimi anlamak için ASTM D638 standardına uygun bir şekilde üretilen saf epoksi ile nanopartikül takviyeli nanokompozit malzemeler çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme deneyleri Shimadzu marka AG-IC universal test cihazında 1 mm/dak hızda 5 kN yük hücresinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Çekme cihazı ve dataların kaydedildiği bilgisayar

Matris malzemelerinde olduğu gibi AFTK ve nanopartikül takviyeli AFTK’larda ASTM D638 standardına uygun bir şekilde kesilmiş ve Shimadzu marka AG-IC universal test cihazında 1 mm/dak hızda çekme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.15).

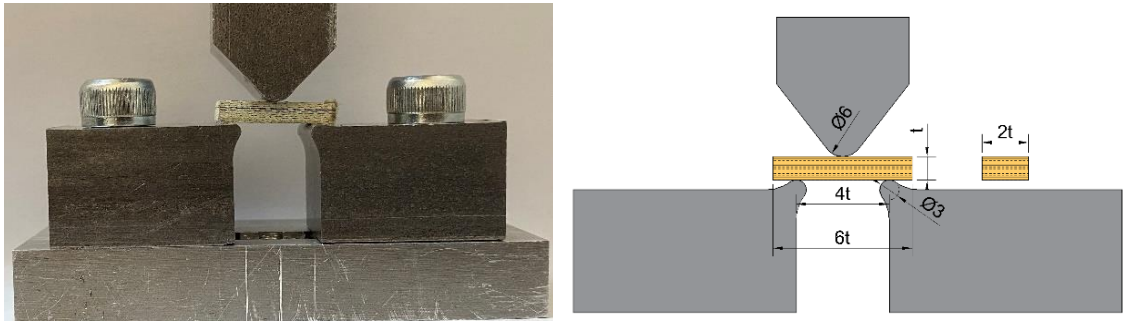


Şekil 3.15. Çekme deneyinin uygulanışı ve kırılma anı

Çekme testi sonucu hasara uğrayan AFTK numunelerin kırılma yüzeyleri makro ve SEM görüntüleri alınarak analiz edilmiştir.

3.3.2. SBS testi

Kısa kiriş tabakalar arası kayma (SBS) deneyi için bir fikstür yapılmış olup 3 mm çapındaki destekler frezede işlenerek elde edilmiştir. Elde edile destekler universal test cihazının çeneleri değiştirilerek cihaza bağlanmıştır. Universal test cihazına sabitlenen destekler üzerine ASTM D2344 standardına (genişliği, uzunluğu ve destek aralığı numune kalınlığının sırasıyla 2, 6 ve 4 katı olmalı) göre hazırlanan kompozit numune yerleştirilmiş (Şekil 3.16) ve 1 mm/dak hızda SBS testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.16. SBS test fikstürü ve şematik görünümü

Elde edilen SBS test sonuç bilgilerine göre komozitlerin tabakalar arası kayma mukavemeti hesaplanmıştır. Kayma mukavemeti hesabı için denklem 3.1’de verilen eşlik kullanılmıştır.

$$ILSS = 0,75 \frac{P_m}{tW} \quad (3.1)$$

Burada;

$ILSS$: Tabakalar arası kayma mukavemeti (MPa),

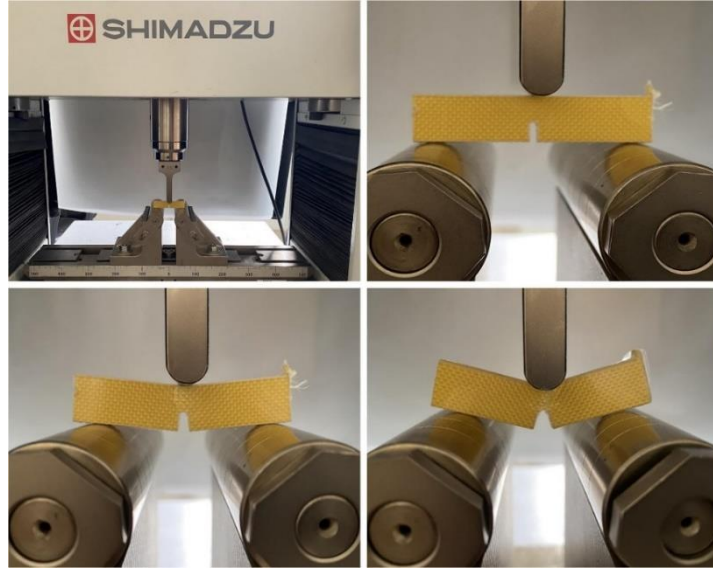
P_m : Elde edilen en yüksek kuvvet (N),

t : Numune kalınlığı (mm) ve

W : Numune genişliğidir (mm).

3.3.3. SENB test düzeneği

Tek kenar çentik bükme (SENB) testi için ASTM D5045 standardına göre numunenin bir kenarına çentik açılmış ve 3 nokta eğme test düzeneğinde 1 mm/dak (H. Zhou ve diğ., 2017) hızda testleri yapılarak Mod-I kırılma tokluğu hesaplanmıştır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. SENB test düzeneği ve uygulaması

Test sonucu elde edilen veriler kullanılarak kompozit malzemelerin Mod I kırılma tokluğu hesaplanmıştır. Hesaplamalar için denklem 3.2-3.4’te verilen eşitlikler kullanılmıştır.

$$K_{IC} = \left(\frac{P_m}{tW^{1/2}} \right) f(x) \quad (3.2)$$

$$f(x) = 6x^{1/2} \frac{[1,99 - x(1-x)(2,15 - 3,93x + 2,7x^2)]}{(1+2x)(1-x)^{3/2}} \quad (3.3)$$

Burada; $0 < x < 1$ dir.

K_{IC} : Kritik stres yoğunluk faktörü ($\text{Pa.m}^{1/2}$)

P_m : Elde edilen en yüksek kuvvet (N),

t : Numune kalınlığı (mm),

W : Numune genişliği (mm),

x : T/W ,

$f(x)$: Geometrik faktör ve

T : Çentik uzunluğudur (mm).

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (3.4)$$

Burada;

G_{IC} : Kritik gerinim enerjisi salım hızı (J.m^{-2})

E : Çekme testinden elde edilen elastisite modülü (Pa) ve

ν : Poisson oranıdır.

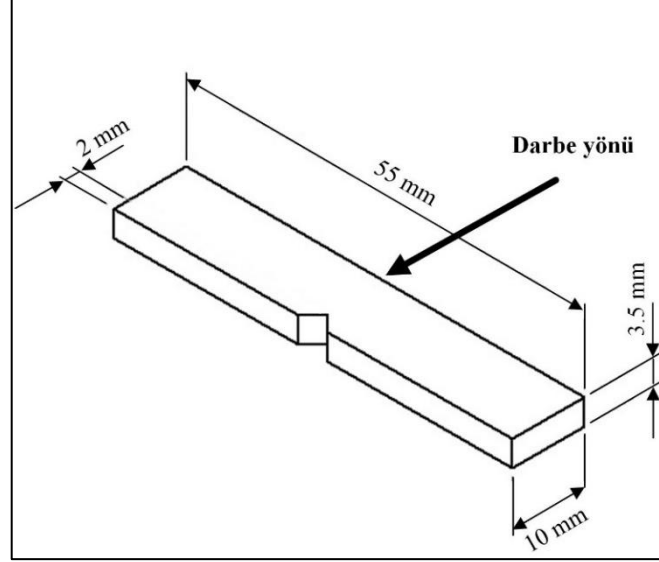
3.3.4. Çentik darbe test düzeneği

GNP ve MWCNT ile modifiye edilmiş epoksi matrisli aramid kompozitlerin darbe enerjisi oda şartlarında Şekil 3.18'de gösterilen 150 J çekiç enerjisine sahip Instron Wolpert PW30 darbe ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. V şeklinde çentikler açılan numunelere ASTM D6110 standardına uygun olarak testler uygulanmıştır.



Şekil 3.18. Charpy çentik darbe test cihazı ve numunenin konumlandırılması

Test numunelerine ait ölçüler Şekil 3.19’da görülmektedir. Test sonucunda elde edilen darbe enerjisi test cihazı üzerinden okunmuştur. Darbe tokluğunun hesaplanması için denklem 3.5’te verilen eşitlik kullanılmıştır.



Şekil 3.19. Darbe test numunesi ölçüleri ve darbe yönü

$$E_A = \frac{E_i}{t(W - T)} \quad (3.5)$$

Burada;

E_A : Birim alanda sönmömlenen darbe enerjisi ($J.m^{-2}$),

E_i : Darbe enerjisi (J),

t : Numune kalınlığı (mm),

W : Numune genişliği (mm),

T : Çentik uzunluğudur (mm).

Darbe testi sonucu kırılma toklukları hesaplanan numunelerdeki darbe hasarlarını incelemek için kırılan numunelerden makro ve SEM görüntöleri alınmış ve kırılma yüzeylerinin analizi yapılmıştır.

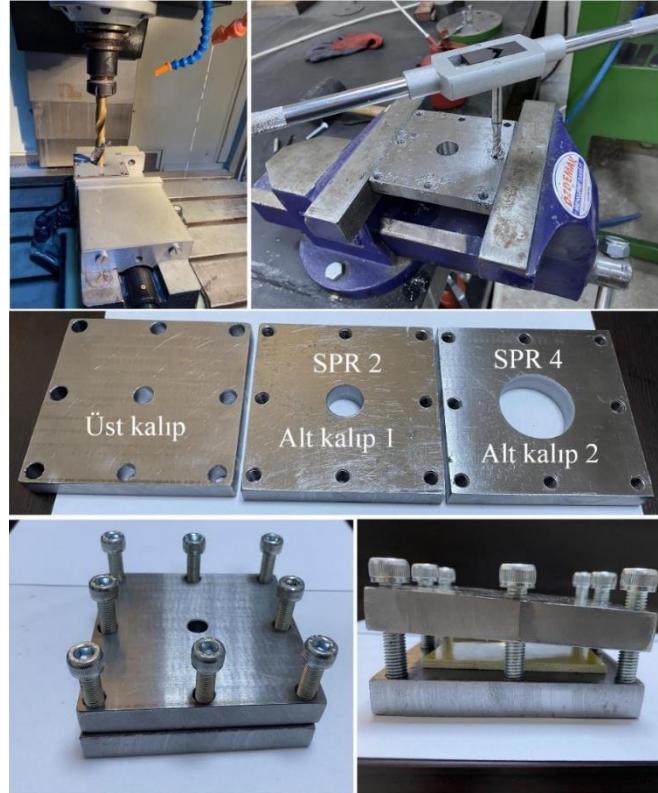
3.3.5. QSPT düzeneğı

Yarı statik penetrasyon testi (QSPT) için farklı geometrilerde zımba hazırlanmıştır. Sertliği 64 ± 2 HRC olan 3 adet düz zımba ticari olarak temin edilmiş olup daha sonra 2 tanesi CNC tornada ojiv ve konik olacak şekilde işlenmiştir. Elde edilen zımbalar Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20. Düz, ojiv ve konik zımbalar

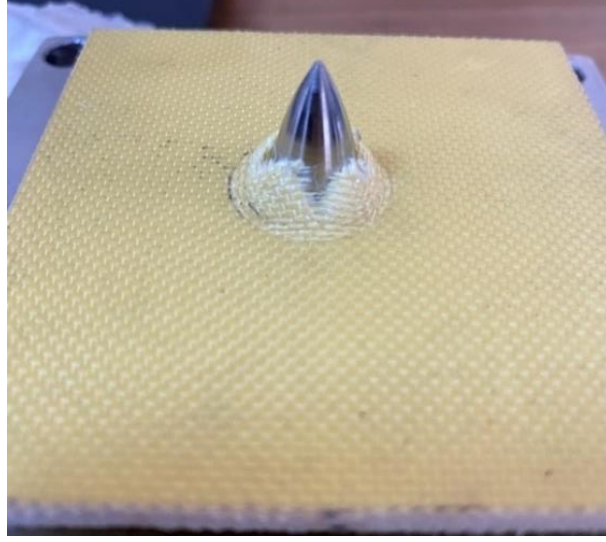
QSPT kalıbını hazırlamak için önceki çalışmalardan (Bulut ve diğ., 2016; R Yahaya ve diğ., 2015) faydalanılmıştır. Üst kalıbın deliği zımba ile aynı çapta olup 10 mm rayba ile işlenmiştir. Alt kalıptan ise 2 adet hazırlanmış olup birinin SPR (D_s/D_p) oranı 2 diğ.erin ise 4 olacak şekilde 20 mm ve 40 mm çapında delikler açılmıştır. Ayrıca iki kalıp arasında kompozit plakanın deney sırasında kaymadan sabit bir şekilde kalabilmesi için 8 adet M8 vida deliği açılmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. Yarı statik penetrasyon test kalıbının hazırlanması

QSPT, 250 kN kapasiteli universal test cihazında ASTM D732 standardına uygun bir şekilde 1,25 mm/dak hızda gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyin amacı SPR oranının ve farklı türdeki zımbaların numunenin hasar oluşum mekanizmalarına etkilerinin yanı sıra penetrasyon kuvvetleri ile yer değiştirme ilişkisini incelemektir.

Deney sonucunda malzemeler tam olarak delinmiş ve bu delinmenin sonucunda numunenin arka tarafında bir tıkaç oluşmuştur (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. QSPT sonucunda numunelerde meydana gelen tıkaç oluşumu

Numunelerin zımba kesme gerilimi (PSS), denklem 3.6’da verilen maksimum zımba kuvvetinin (F_{mak}) kesme alanına (A_{kesme}) bölünmesiyle hesaplanmıştır (Jordan ve diğ., 2014).

$$PSS = \frac{F_{mak}}{A_{kesme}} = \frac{F_{mak}}{\pi D_m t} \quad (3.6)$$

Burada;

F_{mak} : Maksimum zımba kuvveti, N

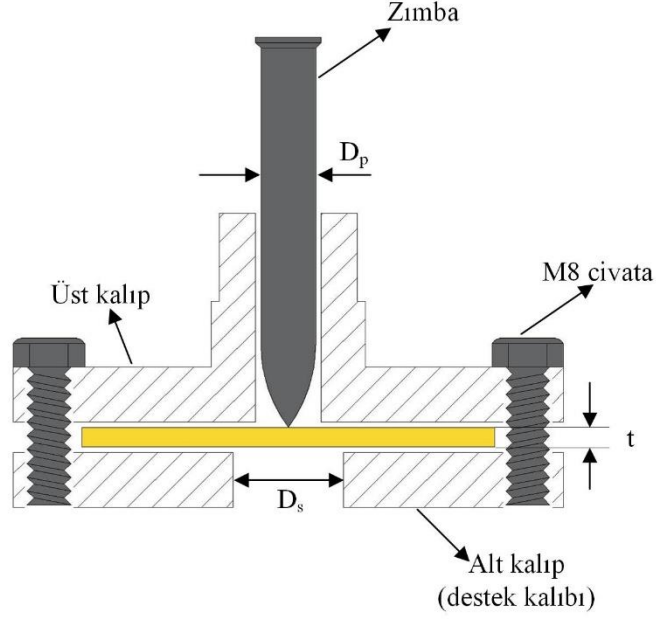
A_{kesme} : Kesme alanı, mm²

t : Numune kalınlığı (mm) ve

D_m : ortalama çaptır (denklem 3.7). Zımba (D_p) ve destek çaplarının (D_s) ortalaması alınarak hesaplanır.

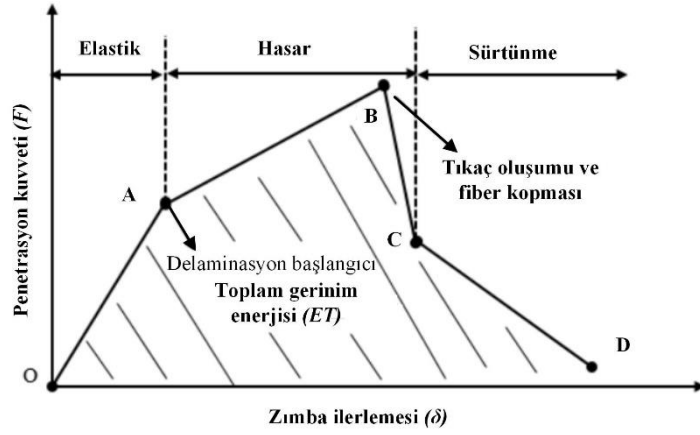
$$D_m = \frac{D_p + D_s}{2} \quad (3.7)$$

Zımba ve destek açıklığı çapları ile ilgili görsel, Şekil 3.23’teki QSPT fıkstüründe gösterilmiştir.



Şekil 3.23. QSPT fikstürünün şematik görünümü

Delinme işlemi esnasında kompozit malzeme tarafından absorbe edilen enerji kuvvet–yer değiştirme grafiğinin (Şekil 3.24) altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilir. Bu alan üç aşamadan meydana gelmektedir ve denklem 3.8-3.11’de verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.24. Zımba ilerlemesine bağlı olarak kuvvet–yer değiştirme grafiği (Bulut ve diğ., 2016)

$$E_E = \int_0^{\delta_A} F(\delta) d\delta \quad (3.8)$$

$$E_D = \int_{\delta_A}^{\delta_C} F(\delta) d\delta \quad (3.9)$$

$$E_F = \int_{\delta_C}^{\delta_D} F(\delta) d\delta \quad (3.10)$$

$$E_T = E_E + E_D + E_F \quad (3.11)$$

Burada; E_T , E_E , E_D ve E_F sırasıyla toplam gerinim enerjisi, elastik enerji, hasar bölgesindeki enerji ve sürtünme enerjisidir.

3.4. Balistik Test

Çalışmada kullanılan V_{50} balistik limit hızı testi STANAG 2920 test standardına uygun bir şekilde CES İleri Kompozit ve Savunma Teknolojileri AŞ’de bulunan balistik test merkezinde (Şekil 3.25) gerçekleştirilmiştir. Test 22,4 °C oda koşullarında %43,5 bağıl nemde yapılmıştır.

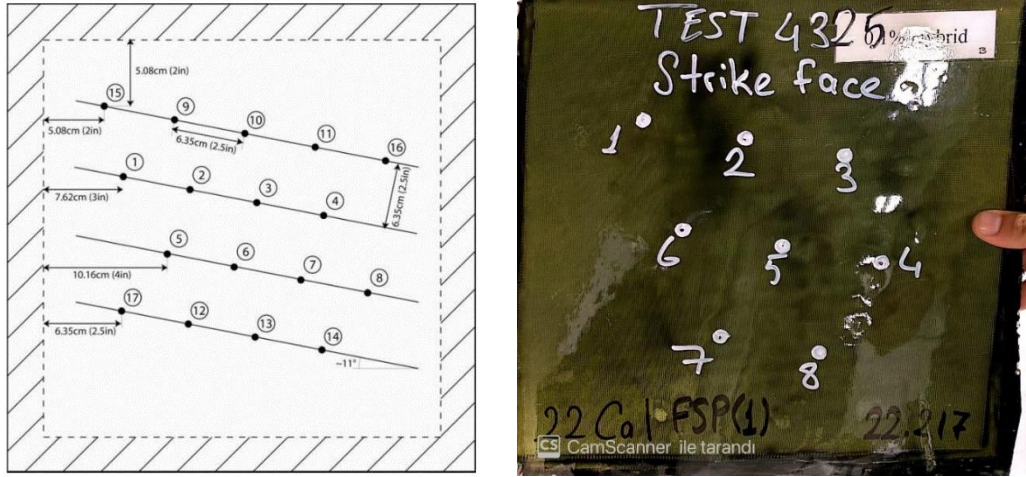


Şekil 3.25. Balistik test düzeneği

Testte kullanılan cihaz şarapnel benzetimli mermileri (FSP’leri) ve tabanca kalibreli mermileri atabilmeyi sağlayan özel bir test cihazıdır. Test cihazı ile hedef arası mesafe 5 metre olup hedef arkasında 2024 T3 alüminyum şahit plaka 150 mm uzakta konumlandırılmıştır. Testlerde FSP’lerin hızları, çift sensörlü bir hızölçer cihaz ile

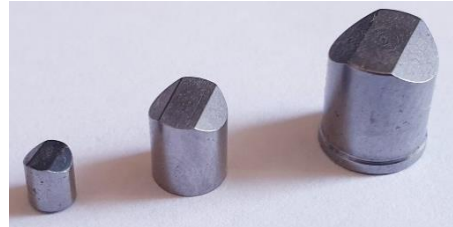
kontrol edilmiştir. Bu cihazın iki sensörünün orta noktası hedeften 2,5 m mesafede konumlandırılmıştır.

Balistik test uygulanacak olan kompozit plakanın atış yapılacak yerleri standarda uygun bir şekilde işaretlenmiştir (Şekil 3.26). Standarda göre atışlar arası mesafe 65 mm ya da mühimmatın çekirdek çapının 10 katı (55,6 mm) karşılaştırılır ve büyük olan değer atışlar arası mesafe olarak kullanılır. Testlerde kullanılan FSP'nin çapı 5,56 mm olduğu için atışlar arası mesafe 65 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.26. Atış yerlerinin işaretlenme yöntemi ve işaretlenmiş numune

V_{50} balistik limit hızı deneyinde merminin farklı hızlarda atılması gerekmektedir. Mevcut sistemde FSP'lerin istenilen hızlarda atılabilmesi için mermi kovani içerisindeki barutların miktarı hassas terazide tartılarak hız ayarlanmaktadır. Testte 17 grain (1,10 g) şarapnel benzetimli merminin (Şekil 3.27) 5,56 mm x 45 mm tip mühimmat kovanına daha önceden belirlenen miktarda barut yerleştirilmiştir.



Şekil 3.27. Soldan sağa: 4 grain (0,26 g), 17 grain (1,10 g) ve 44 grain (2,85 g) FSP'ler (Anonim, 2020)

Deney sırasında işaretlenen bölgelere silah namlusu üzerinde bulunan lazer dürbünü yardımıyla konumlandırma işlemi yapılmış ve daha sonra atışlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar makro görüntülerle karşılaştırılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Mekanik Test Sonuçları

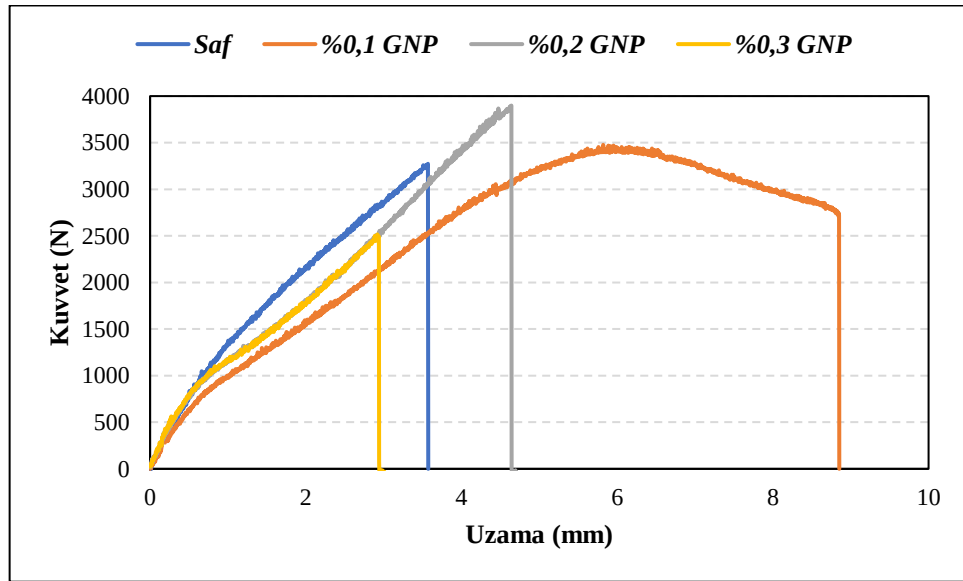
Bu bölümde numunelere yapılan testlerin sonuçları grafik ve tablolar halinde verilerek açıklanmış ve ayrıca elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla kıyaslanmıştır.

4.1.1. Çekme deneyi sonuçları

Çekme deneyi iki kısımdan oluşmaktadır. Öncelikle epoksi matris içerisine katılan GNP ve MWCNT'nin etkilerini anlayabilmek için saf epoksi, GNP/epoksi, MWCNT/epoksi ve hibrit/epoksi nanokompozit numunelere çekme testleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. İkinci kısımda ise nano takviye elemanlarının AFTK'ların çekme dayanımı üzerine etkilerini görebilmek için GNP ve MWCNT ile modifiye edilmiş epoksilerle hazırlanan AFTK'lara çekme testi yapılmış ve sonuçları incelenmiştir.

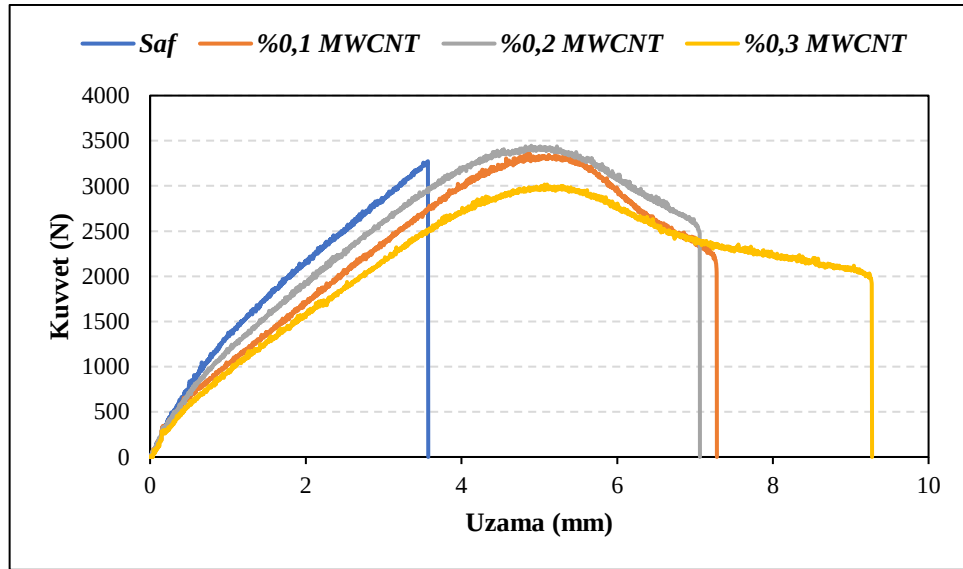
4.1.1.1. Epoksi nanokompozit çekme test sonuçları

Epoksi reçine içerisine katılan nanopartiküllerin testleri ASTM D638 Tip-I standardına uygun olarak yapılmıştır. Farklı takviye oranına sahip GNP, MWCNT ve hibrit epoksi nanokompozitlerin kuvvet—uzama grafikleri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.1. GNP katkılı epoksi kompozitlerin kuvvet—uzama grafiği

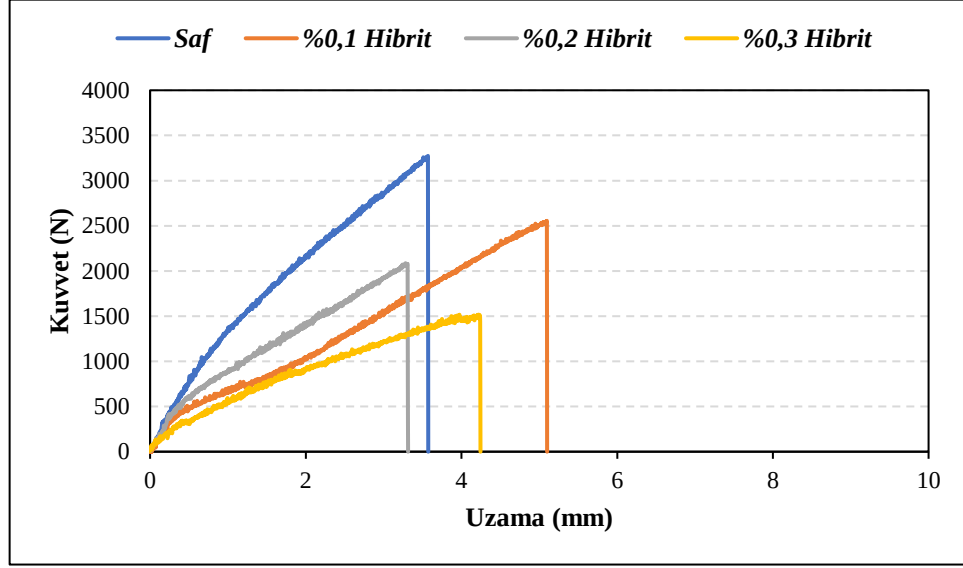
Şekil 4.1'deki grafik incelendiğinde, saf epoksiye nazaran %0,1 ve %0,2 GNP içeren nanokompozitlerin çekme mukavemetinin ve uzama değerlerinin dolayısıyla da tokluklarının arttığı açıkça görülmektedir. Ancak %0,3 GNP içeren nanokompozitin saf epoksiye oranla daha düşük kuvvet ve uzamada koptuğu görülmektedir. Bunun temel sebebinin matris malzemesi içerisinde GNP'lerin topaklanması olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde Kilic ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, GNP'lerin epoksi matrisi içerisinde topaklandıklarını SEM analizinde gözlemlemişlerdir. GNP oranının artmasıyla topaklanmanın arttığını ve bu durumun çekme mukavemeti ve elastisite modülündeki düşüşe sebebiyet verdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca Çelik ve diğ. (2019), epoksi matrisine %0,3 GNP ilavesinin topaklanma bölgesinde boşluklar oluşturarak deformasyona sebebiyet verdiğini geçirimli elektron mikroskobu ile gözlemlemişler ve bu durumun da çekme mukavemetinde düşüşe sebebiyet verdiğini vurgulamışlardır.



Şekil 4.2. MWCNT katkılı epoksi kompozitlerin kuvvet-uzama grafiği

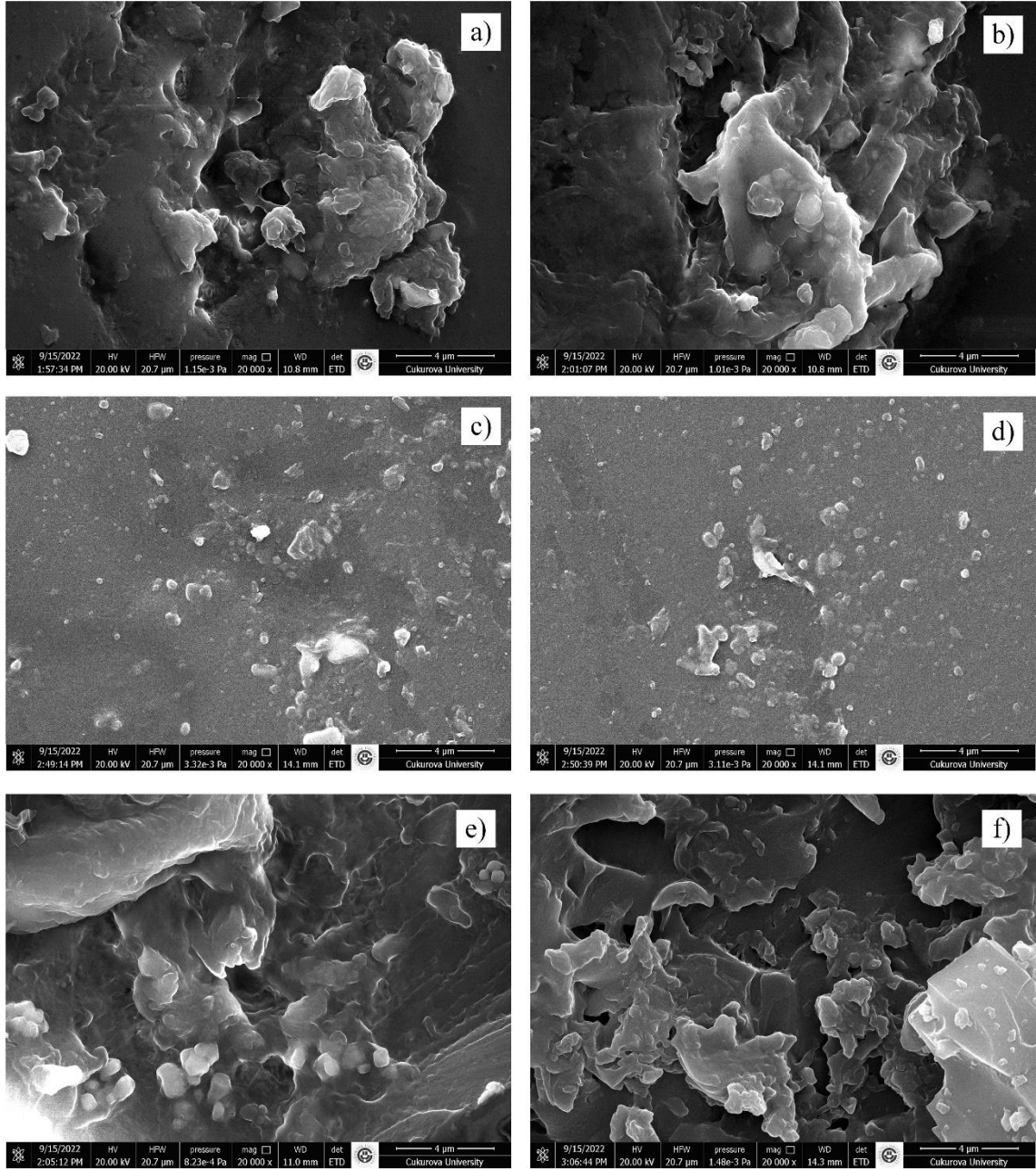
Şekil 4.2.'yi incelediğimizde ise GNP'ye benzer şekilde %0,1 ve %0,2 MWCNT içeren nanokompozitlerin çekme kuvvetlerinde ve uzamalarında gelişimle beraber tokluklarında artış gözlemlenmiştir. %0,3'lük GNP'nin aksine %0,3'lük MWCNT nanokompozitin maksimum gerilme kuvveti düşerken, maksimum uzama değerinde ciddi bir artış görülmüştür. Bu durum her ne kadar MWCNT ve GNP yapıları birbirinden farklı olsa da epoksi içerisindeki MWCNT dağılımının, GNP dağılımına kıyasla daha homojen bir şekilde gerçekleştiğini ve epoksi reçineyle daha iyi bağlar kurduğunu göstermektedir. Bunun temel sebebi kullanılan MWCNT'nin karboksil ile işlevselleştirilmesi olabilir.

Benzer şekilde J. H. Lee ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada, silan ve karboksil ile işlevselleştirdikleri MWCNT'lerin normal MWCNT'ye oranla daha yüksek çekme mukavemeti ve elastisite modülü sergilediklerini belirtmişlerdir. Ayrıca Luo ve diğ. (2012), CNT'lerin dağılımını iyileştirmek ve CNT'ler ile polimerler arasındaki arayüzey bağını geliştirmek için CNT'lerin işlevselleştirilmesinin yararlı bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 4.3. GNP/MWCNT hibrit katkılı epoksi kompozitlerin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.3'ü incelediğimizde ise GNP ve MWCNT nanokompozitlerin aksine aynı ağırlık oranlarında GNP ve MWCNT ilave edilerek üretilen hibrit nanokompozitlerin maksimum kopma yüklerinde ciddi bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni MWCNT ve GNP'nin ultrasonik karıştırmaya rağmen ciddi topaklanma sorunları sergilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Her iki takviye malzemesi de epoksi katılana dek aseton içerisinde ayrı ayrı çözündürülmesine ve farklı GNP:MWCNT oranlarında (1:3, 1:5, 1:9, 3:1, 5:1 ve 9:1) denenmesine rağmen topaklanma sorunu aşılammıştır. Bu durumun Van der Waals etkileşiminden dolayı topaklanma oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim bu durum Şekil 4.4'te, %0,2 nanopartikül içeren epoksi kompozitlerin farklı yüzeylerinden çekilen SEM görüntüleri incelendiğinde açıkça görülmektedir. GNP nanopartikül içeren ve hibrit nanopartikül içeren nanokompozitlerde topaklanma açık bir şekilde görülürken, MWCNT içeren nanokompozitte bazı küçük topaklanma bölgeleri dışında herhangi bir topaklanma belirtisi görülmemiştir.



Şekil 4.4. Nanokompozit yüzeyleri a-b) GNP/epoksi, c-d) MWCNT/epoksi ve e-f) hibrit

Nanopartikül takviyeli epoksi kompozitlerin çekme deneyi sonucu elde edilen kuvvet–uzama verilerine bağlı olarak hesaplanan maksimum gerilme (σ_{ut}), % uzama (ϵ_f), tokluk modülü (M_T), elastisite modülü (E) değerleri ve bu değerlerin referans numunesine (saf epoksiye) göre değişimleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

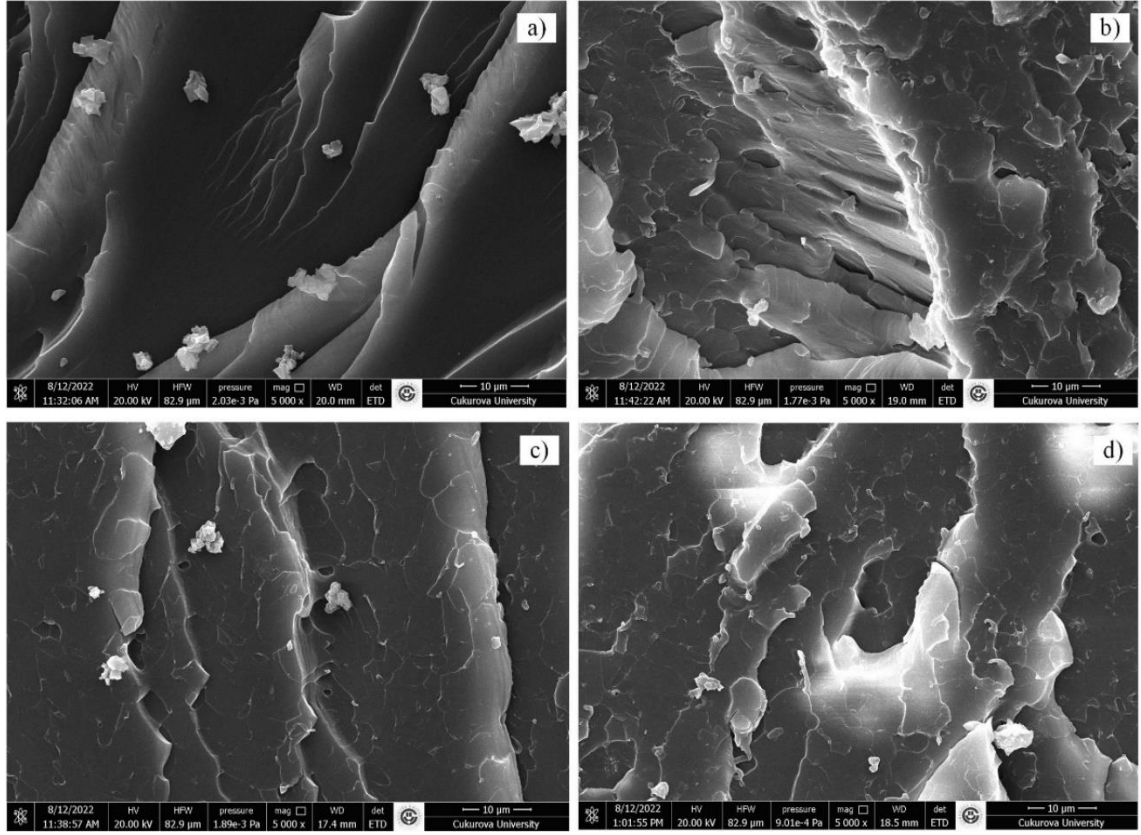
Tablo 4.1. Nanokompozitlerin çekme testinden edilen sonuçlar

<i>Numune</i>	σ_{ut} [MPa]	$\pm\%$	ϵ_f [%]	$\pm\%$	M_T [kJ.m ⁻³]	$\pm\%$	E [MPa]	$\pm\%$
<i>Epoksi</i>	35,97		3,40		707,50	0	808,89	
<i>GNP-1</i>	38,20	6,21	8,43	147,77	2249,14	217,90	701,28	-13,30
<i>GNP-2</i>	42,84	19,09	4,48	31,57	1014,36	43,37	867,19	7,21
<i>GNP-3</i>	27,64	-23,15	2,87	-15,79	438,03	-38,09	862,69	6,65
<i>MWCNT-1</i>	37,35	3,82	6,93	103,78	1713,34	142,17	741,51	-8,33
<i>MWCNT-2</i>	37,86	5,25	6,73	97,68	1780,75	151,70	780,28	-3,53
<i>MWCNT-3</i>	33,14	-7,88	8,83	159,56	2040,95	188,47	693,04	-14,32
<i>Hibrit-1</i>	28,07	-21,96	4,86	42,74	718,96	1,62	583,05	-27,92
<i>Hibrit-2</i>	22,92	-36,28	3,16	-7,25	416,42	-41,14	600,19	-25,79
<i>Hibrit-3</i>	16,66	-53,70	4,04	18,78	402,17	-43,16	325,82	-59,72

Tablo 4.1'deki veriler incelendiğinde, maksimum çekme mukavemetindeki en büyük gelişimin %0,2 GNP içeren nanokompozitte %19,09 ile gerçekleştiği görülmektedir. Tokluk modülleri incelendiğinde ise özellikle MWCNT içeren nanokompozitlerde %142,17 ile %188,47 arasında bir gelişim gözlemlenmiştir. Ancak en büyük gelişim %217,9 ile %0,1 GNP nanokompozitte gerçekleşmiştir. Tokluktaki gelişimin aksine MWCNT içeren nanokompozitlerin elastisite modülleri %3,53 ile %14,32 arasında düşüş göstermiştir. Teorik olarak homojen bir şekilde dağılmış olan MWCNT katkısının malzemenin mekanik özelliklerini geliştirdiği bilinen bir durumdur (Qin ve diğ., 2015). Ancak MWCNT'lerin epoksi içerisinde dağılımı, arayüzey etkileşimi ve diğer birçok problem bazı mekanik özelliklerin düşmesine sebep olabilmektedir. Du ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmada, MWCNT ve polimerler arasında bazı temel sorunlar olduğundan bahsetmiş ve bunların MWCNT'lerin kendi içerisinde homojen bir yapıya sahip olamama (morfolojik, elektriksel iletkenlik vb.), polimer içerisinde homojen bir şekilde dağılmama, MWCNT ve polimer arasındaki arayüzey etkileşimleri ve MWCNT'lerin birbiriyle temas etmelerinden dolayı olduğunu belirtmişlerdir. M. M. Rahman ve diğ. (2012), CNT'lerin polimer içinde etkin dağılımının hala bir zorluk teşkil ettiğini ve deneysel mekanik özelliklerin hala teorik değerlerin çok altında olduğunu söylemişlerdir.

MWCNT katkılı nanokompozitlerin aksine GNP nanokompozitlerin elastisite modüllerinde genel olarak gelişim gözlemlenmiştir. %0,1 GNP içeren nanokompozit dışında diğer GNP katkılı kompozitlerin elastisite modülleri saf epoksiye göre daha yüksek olmuştur. Elde edilen sonuçlar GNP çalışan Tüzemen ve diğ. (2021) ve GO çalışan Z. Li, Wang, ve diğ. (2013) tarafından yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir.

%0,2 nanopartikül içeren epoksi kompozit numunelerin çekme testi sonrasında kırılma yüzeylerinde meydana gelen deformasyonlar Şekil 4.5'te verilmiştir.



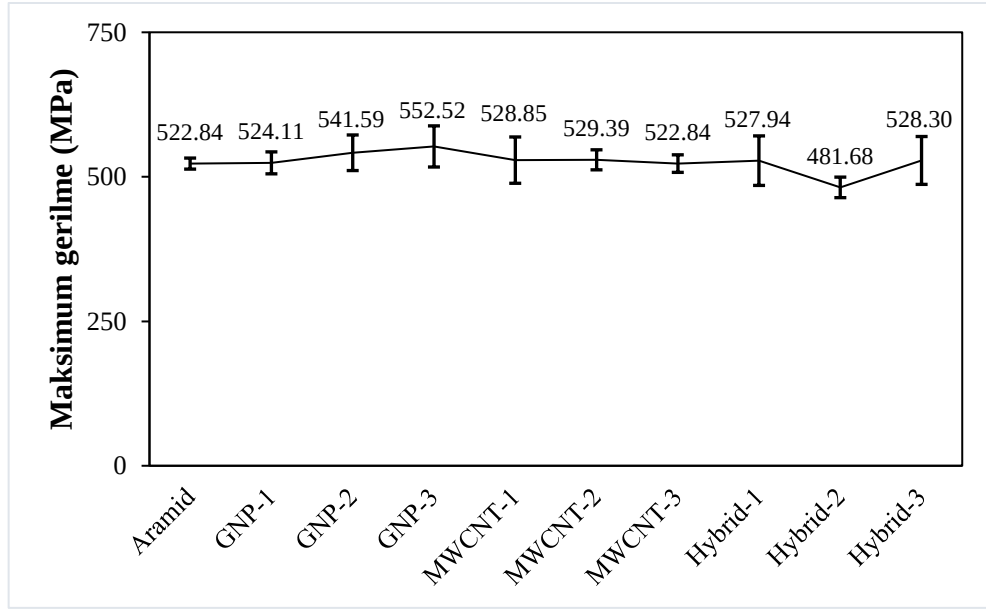
Şekil 4.5. Nanokompozitlerin kırılma yüzeyleri a) saf epoksi, b) GNP, c) MWCNT ve d) hibrit

Şekil 4.5.a'da saf epoksi matris malzemesi tipik gevrek kırılma davranışı göstermiş ve kırılma çizgileri arasındaki yüzeyler pürüzsüz bir şekildedir. Ancak Şekil 4.5.b, c ve d'de görünen diğer yüzeyleri incelediğimizde nehir hatları (river lines) arasında bazı bölgelerde pul benzeri tanecikli yapıların yanı sıra ağaç dalı benzeri beyaz çizgiler göze çarpmaktadır. Ayrıca nanopartikül içeren diğer numunelerin kırılma bölgelerinde plastik deformasyon sebebiyle büyük beyaz alanlar meydana gelmiştir. Bu durum epoksi matris ile nanopartiküller arasında kuvvetli arayüz bağlantılarının

oluşturduğunu göstermektedir. Benzer şekilde Xue ve diğ. (2019), yaptıkları çalışmada kırılma yüzeyinden çektikleri SEM görüntülerinde GO içeren numunelerde saf epoksiden farklı olarak stresle beyazlaşmış bölgelerden ve nehir hatları arasındaki düzlemlerde pulsu yapılardan bahsetmişler ve GO oranının artmasıyla bu yapıların daha yoğun görüldüğünü belirtmişlerdir.

4.1.1.2. AFTK çekme test sonuçları

GNP ve MWCNT ile modifiye edilmiş epoksilerle hazırlanan AFTK numuneler çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme testi sonucu hesaplanan maksimum gerilmeler Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Ayrıca her numunenin maksimum gerilme (σ_{ut}), % uzama (ϵ_f), tokluk modülü (M_T), elastisite modülü (E) değerleri hesaplanmış ve bu değerlerin referans numunesine (Aramid) göre değişimleri Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.6. AFTK'larda maksimum gerilme değerlerinin takviye cinsi ve oranına göre değişimi

Çekme testi sonuçları incelendiğinde, uygulanan nanopartikül takviyelerinin AFTK malzemeler üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Y. Li ve diğ. (2017) benzer bir şekilde sürekli KFTK'ların düzlem içi mekanik özelliklerinin zaten mükemmel olduğuna vurgu yapmış ve nanopartikül takviyesinin bu özellikleri önemli ölçüde etkilemesinin beklenmemesi gerektiğinden bahsetmiştir. GNP ve MWCNT gibi nanopartikül takviyelerinin esasında kompozitin düzlem dışı mekanik özellikleri geliştirdiğini vurgulamışlardır.

Tablo 4.2. AFTK'ların çekme testinden hesaplanan sonuçlar

Numune	σ_{ut} [MPa]	$\pm\%$	ϵ_f [%]	$\pm\%$	M_T [MJ.m ⁻³]	$\pm\%$	E [GPa]	$\pm\%$
<i>Aramid</i>	522,84	-	7,90	-	187,70	-	7,45	-
<i>GNP-1</i>	524,11	0,24	7,77	-1,68	200,40	6,76	6,91	-7,32
<i>GNP-2</i>	541,59	3,59	8,27	4,64	210,03	11,89	6,37	-14,50
<i>GNP-3</i>	552,52	5,68	7,92	0,22	212,00	12,94	6,76	-9,28
<i>MWCNT-1</i>	528,85	1,15	7,14	-9,69	185,66	-1,09	7,23	-3,02
<i>MWCNT-2</i>	529,39	1,25	7,20	8,86	187,07	-0,34	7,30	-2,12
<i>MWCNT-3</i>	522,84	0	7,90	0	175,83	-6,32	7,14	-4,16
<i>Hibrit-1</i>	527,94	0,98	7,60	-3,80	189,20	0,80	6,97	-6,56
<i>Hibrit-2</i>	481,68	-7,87	6,47	-18,12	157,69	-15,99	6,91	-7,32
<i>Hibrit-3</i>	528,30	1,04	7,27	-8,01	183,68	-2,15	6,99	-6,18

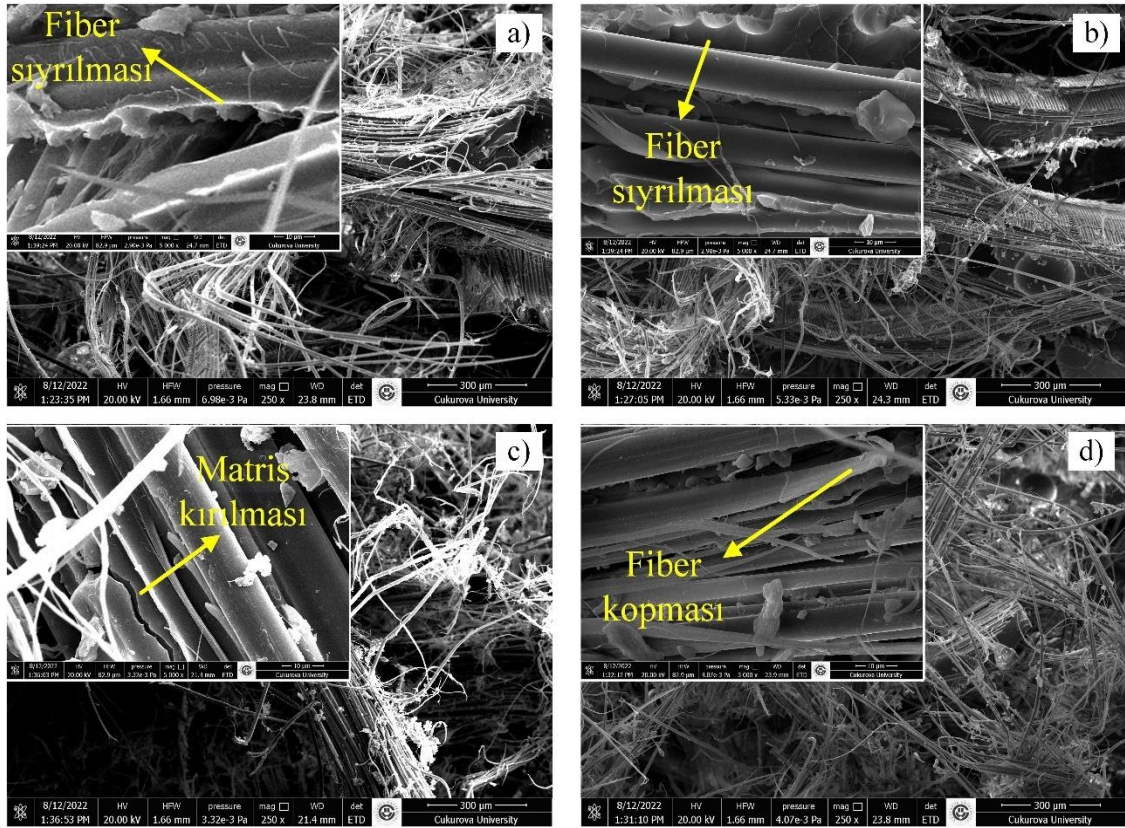
Tablo 4.2'deki veriler incelendiğinde, maksimum çekme mukavemetinde en büyük gelişme %5,68'lik oranla %0,3 GNP içeren AFTK'da, en büyük düşüş ise %7,87 ile %0,2'lik hibrit nanopartikül içeren kompozitte görülmüştür. Hibrit nanokompozitlerden elde edilen sonuçlara nazaran hibrit matrisli kompozitlerin çekme yüklerinde ciddi bir düşüş gözlemlenmemiştir. Bu durum bize aramid lifleri ve hibrit matris arasında topaklanmaya rağmen arayüzey bağ yapılarının oluşabildiğini ve topaklanma sorununu elimine ettiğini göstermektedir. Netice olarak AFTK'ların düzlem içi mekanik özelliklerinin topaklanmadan çokta etkilenmediği söylenebilir.

AFTK'ların % uzama davranışları incelendiğinde, özellikle %0,2 MWCNT numunesinde %8,86'lık bir gelişme gözlenirken, %0,2 hibrit numunesinde %18,12 ile ciddi bir düşüş görülmüştür. %0,2'lik GNP ve %0,2'lik MWCNT numuneleri dışında uzamalarda ya düşüş ya da dikkate değer olmayan gelişme kaydedilmiştir.

AFTK'ların tokluk değerleri incelendiğinde ise GNP numuneleri dışında diğer kompozitlerde bir gelişim gözlemlenmemiştir. Maksimum gelişim %12,94 ile %0,3'lük GNP numunesinde gerçekleşirken en büyük düşüş %15,99 ile %0,2 hibrit numunesinde gerçekleşmiştir. Ayrıca %0,3 MWCNT numunesinde diğer numunelerin aksine ne uzamada ne de maksimum mukavemette bir gelişim gözlemlenmezken tokluğun ve elastisite modülünün düştüğü görülmüştür.

AFTK'ların elastisite modüllerinde ise genel olarak tüm malzemelerde düşüş gözlemlenmiştir. Bu durumu GNP ve MWCNT katkılarının AFTK kompozitlerin elastisite modüllerini düşürdüğüne yorabiliriz. En büyük düşüş %14,50 ile %0,2 GNP içeren numunede gözlemlenirken, en az düşüş %2,12 ile %0,2 MWCNT içeren numunede gerçekleşmiştir. Benzer şekilde Chen ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada ağırlıkça %0,5 oranında GO katkılı karbon fiber/epoksi kompozitte referans numunesine oranla elastisite modülünde düşüş gözlemlenmiştir. Ancak silanizasyon işlemi uyguladıklarında aynı orandaki SGO ile hem maksimum çekme mukavemetinde hem de elastisite modülünde gelişim gözlemlenmiştir.

Çekme deneyi sonucu %0,3 takviyeli AFTK'larda meydana gelen kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.7'de verilmiştir.



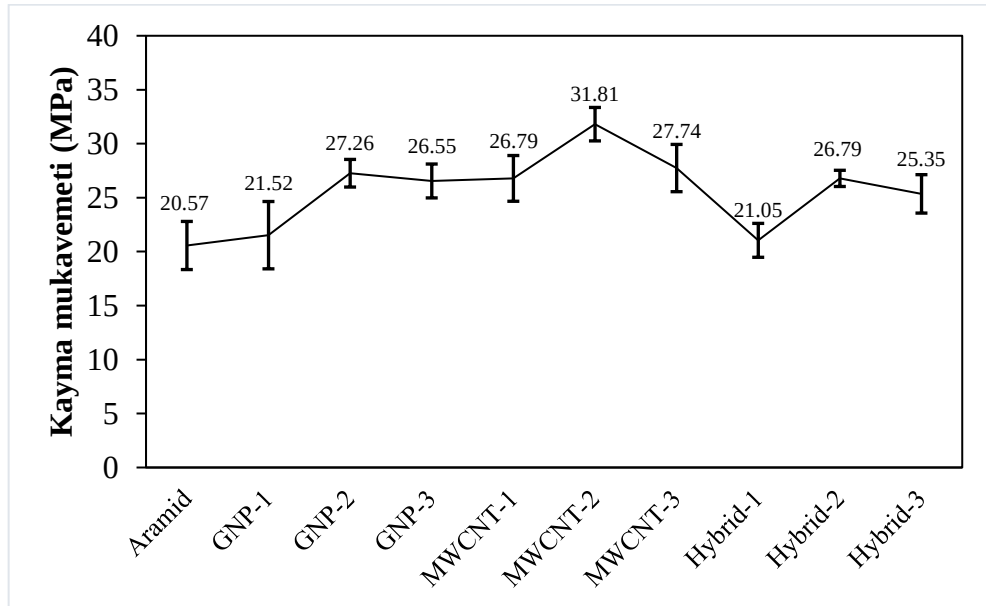
Şekil 4.7. AFTK'ların kırılma yüzeyi SEM görüntüleri, a) Aramid, b) GNP, c) MWCNT ve d) hibrit

Şekil 4.7'deki kırılma yüzeyine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, hasarların fiber kırılması, matris çatlaması ve fiber sıyrılması şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 5000X büyütmede epoksi matrisi ile fiberler arasında iyi bir yapışma olduğu görülmüştür.

4.1.2. SBS test sonuçları

Bilindiği gibi tabakalı kompozit malzemeler anizotropik bir yapıya sahiptir ve bu malzemeler kompozit malzeme sınıfı içerisinde önemli bir yer kaplamaktadır. Tabakalı kompozitler farklı yükler altında ayrışma ya da diğer adıyla delaminasyon hasarına uğrayabilirler. Düşük tabakalar arası kayma mukavemetine sahip olan malzemelerin delaminasyona eğilimli olduğu ve bu yüzden çevresel bozulmalara karşı direncinin düşük olduğu bilinmektedir (Y. Li ve diğ., 2017). Özellikle epoksi ve aramid fiber arasındaki zayıf bağlar aramid fiberlerin farklı alanlarda kullanımını kısıtlayan bir engel olarak önümüze çıkmaktadır (Konada ve diğ., 2020). Diğer taraftan epoksi reçineler yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahiptir ve bu durum bu malzemenin gevrek davranış sergilemesine sebep olur. Epoksi reçine içerisine katılan nano malzemeler mikro çatlaklarda zorlanmalara (CNT bridging, CNT pull-out) sebep olarak ya da mikro çatlakların ilerleme yönlerini değiştirerek (GNP) malzemelerin çatlak başlatma ve ilerleme davranışlarını değiştirebilir ve kırılma tokluğunu artmasına sebep olabilirler (NajiMehri ve diğ., 2022). Bu yüzden kompozitlerin kısa kriş tabakalar arası kayma (SBS) testi önemli mekanik özelliklerden olup bu özelliğin nanopartikül takviyesine bağlı olarak nasıl değiştiğini analiz etmek önemlidir.

AFTK'larda kullanılan nanopartikül cinsi ve oranına bağlı olarak SBS testinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.8'de grafik olarak, Tablo 4.3'te ise hem değer hem de referans numunesine göre gelişim oranı olarak verilmiştir.



Şekil 4.8. Takviye nanopartiküllerin tabakalar arası kayma mukavemeti üzerindeki etkisi

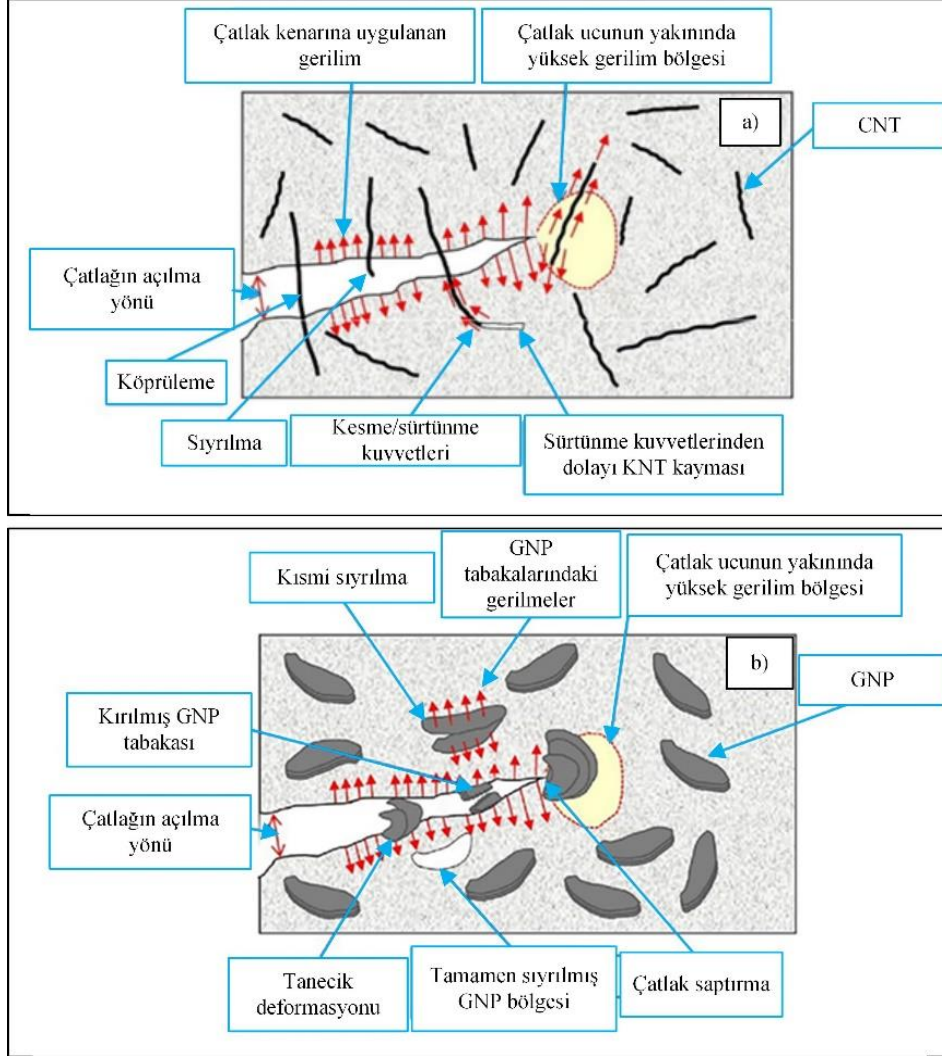
Tablo 4.3. Tabakalar arası kayma mukavemeti sonuçları

Numune	ILSS [MPa]	±%
<i>Aramid</i>	20,57 (±2,23)	
<i>GNP-1</i>	21,52 (±3,12)	4,65
<i>GNP-2</i>	27,26 (±1,28)	32,56
<i>GNP-3</i>	26,55 (±1,57)	29,07
<i>MWCNT-1</i>	26,79 (±2,12)	30,23
<i>MWCNT-2</i>	31,81 (±1,55)	54,65
<i>MWCNT-3</i>	27,74 (±2,19)	34,88
<i>Hibrit-1</i>	21,05 (±1,57)	2,33
<i>Hibrit-2</i>	26,79 (±0,75)	30,23
<i>Hibrit-3</i>	25,35 (±1,78)	23,26

Sonuçlar incelendiğinde; %0,2 MWCNT içeren AFTK'nın tabakalar arası kayma mukavemetinde referans numunesine oranla %54,65'lik bir gelişim görülmüştür. %0,1'lik GNP ve %0,1'lik hibrit matris içeren kompozitlerde sırasıyla %4,65 ve %2,32'lik gelişimler gözlemlenirken geriye kalan tüm kompozitlerde referans numunesine oranla %23 ile %32,55 arasında değişen gelişim gözlemlenmiştir. Bu durum tabakalar arası kayma mukavemeti üzerinde GNP ve MWCNT'nin büyük bir etkisinin olduğunu göstermektedir. GNP ve MWCNT katkıları aramid fiber ve matris malzemesinin arayüz bağlantılarını geliştirmiştir. Ayrıca GNP ve MWCNT'nin sahip olduğu köprüleme, sıyrılma, çatlak tutulması ve çatlak yön değiştirmesi gibi bazı nano ölçekteki mekanizmalar tabakalar arası kayma mukavemetini artırmıştır. Bir çatlak ilerlemesi sırasında CNT ve GNP takviyelerinin nano ölçekteki mukavemet artırma mekanizmaları Şekil 4.9'da verilmiştir.

Özellikle MWCNT katkısının %30,23 ile %54,65 arasında değişen mukavemet gelişimi, GNP'de %4,65 ile %32,56 arasında kalmıştır. Benzer şekilde Sukanya ve Sundaram (2022b) yaptıkları çalışmada AFTK'ların CNT katkısının tabakalar arası kayma mukavemetini artırdığını belirtmişlerdir. Aynı şekilde yine Sukanya ve Sundaram (2022a) tarafından yapılan bir başka çalışmada GNP'nin de AFTK kompozitlerin tabakalar arası mukavemetini geliştirdiğini tespit etmişlerdir. Ali Charfi ve diğ. (2020)

ise düşük konsantrasyonlarda GNP'nin tabakalar arası kayma mukavemetini artırdığından bahsetmişlerdir.

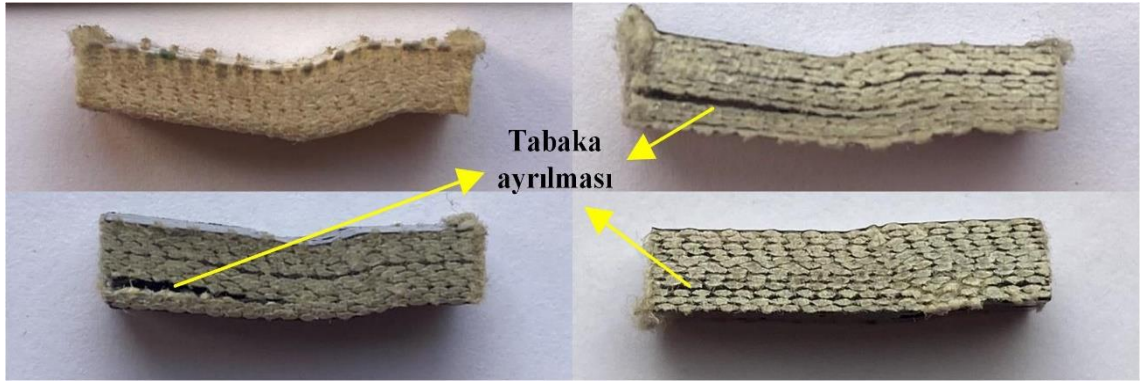


Şekil 4.9. Çatlak ilerlemesi sırasında oluşan mekanizmalar, a) CNT, b) GNP (NajiMehr ve diğ., 2022)

GNP ve MWCNT arasındaki mukavemet farkının temel sebebi nanopartiküller arasındaki yapısal farklardan kaynaklanmaktadır. Deneylerde kullanılan MWCNT karboksilik asit (COOH) ile işlevselleştirilmiş bir malzemedir. MWCNT'nin işlevselleştirilmiş olması nanopartikül ile epoksi arasındaki bağları daha sağlam yapmıştır. Theodore ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada, arayüzey etkileşimi ve dağılımındaki iyileştirmenin, yüzey modifikasyonuna bağlı olduğundan bahsetmişler ve oksitlenmiş MWCNT ile güçlendirilmiş epoksi sistem için mekanik özelliklerde iyileşme olduğunu vurgulamışlardır.

Hibrit matrisli AFTK numunelerde ise referans numunesine oranla %0,1'lik numunede %2,33 oranında gelişim gözlenirken, %0,2 ve %0,3'lük hibrit matrisli numunelerde bu oran sırasıyla %30,23 ve %23,26 oranlarında gelişim göstermiştir. %0,1'lik numunede bu kadar düşük bir kayma mukavemetinin olmasının sebebi topaklanma ya da yeterli kırılma mekanizmalarının oluşamamasından dolayı olabilir. Elde edilen sonuçlar matris malzemesi ile fiberler arasında arayüzey bağlantılarının GNP ve MWCNT katkılarıyla geliştiğini göstermektedir. Zaten nanokompozitlerin SEM analizleri, nanopartikül takviyelerinin saf epoksiye nazaran kırılma yüzeylerinde çeşitli kırılma mekanizmalarının oluştuğunu göstermektedir.

SBS testi sonucu numunelerde meydana gelen hasarlar Şekil 4.10'da verilmiştir. Kayma mukavemetinin etkisiyle tabakalar delaminasyon hasarına uğrayarak birbirinden ayrılmışlardır.



Şekil 4.10. SBS testi sonucu AFTK'larda meydana gelen deformasyon

4.1.3. SENB test sonuçları

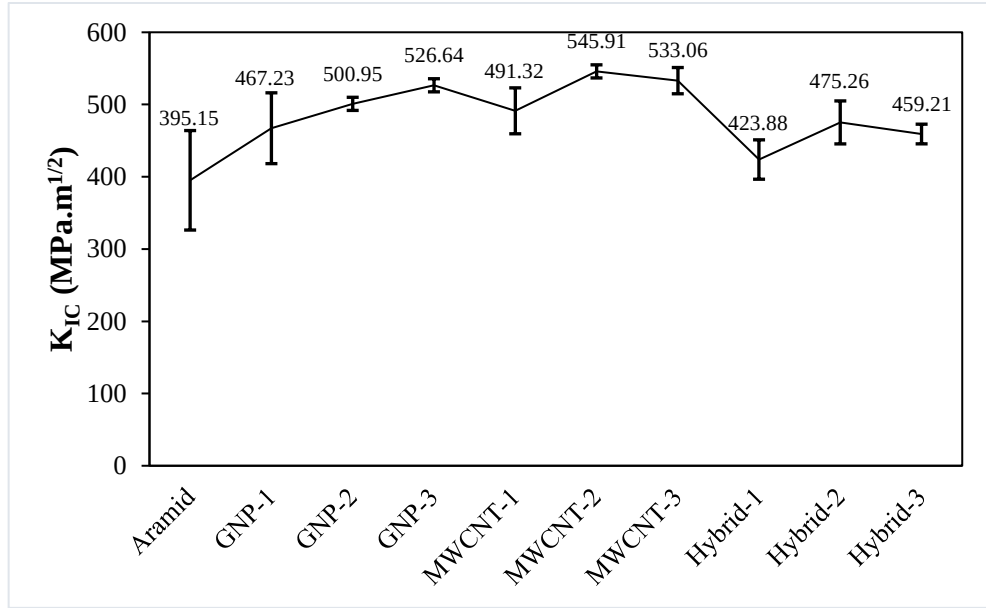
Tek kenar çentikli eğme (SENB) test sonucu malzemenin kırılma tokluğu, kritik stres yoğunluk faktörü (K_{IC}) ve kritik gerinim enerjisi salım hızı (G_{IC}) değerleri ile hesaplanır. Kırılma tokluğu malzemenin çatlak yayılmasına karşı direncini tanımlar.

Kritik gerinim enerjisi salım hızı (G_{IC}), yeni oluşturulan bir kırılma yüzey alanının birim başına kırılma işlemi sırasında harcanan enerjiyi ifade eder. G_{IC} miktarı kırılma enerjisidir ve uygulanan yüklerden ve cismin geometrisinden bağımsız malzeme özellikleri olarak kabul edilir (S. J. Park ve Seo, 2011) Kritik gerinim enerjisi salım hızı G_{IC} büyüyen bir çatlağın ucunda meydana gelen plastik deformasyon miktarıyla orantılı olan bir malzeme özelliğidir. Bununla birlikte, malzemelerin kırılma tokluğu daha çok,

$\text{Pa.m}^{1/2}$ birimine sahip olan kritik stres yoğunluğu faktörü K_{IC} ile tanımlanır (Mouritz, 2012).

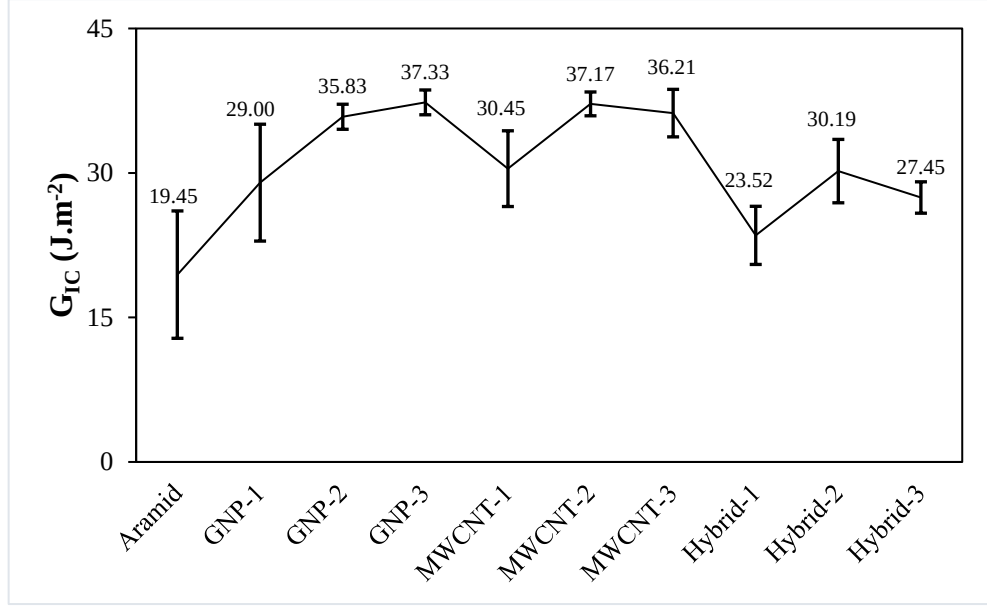
Bilindiği gibi GNP'ler disk benzeri şekle sahiptirler ve epoksi içerisinde rastgele dağılım göstermektedirler. Bu durumdan dolayı bir çatlak ilerlemeye başlayıp bir GNP ile karşılaştığında yolundan sapma eğilimi gösterecektir. Bu sapmadan ötürü çatlak ilk kırılma düzleminden çıkmaya başlayıp daha uzun bir yolda ilerler ve uzantısı daha yüksek kırılma enerjisi gerektirir (Ahmadi-Moghadam ve Taheri, 2014; Shadlou ve diğ., 2013). Bu durum, Faber ve Evans (1983a, 1983b) tarafından kanıtlanmıştır.

GNP ve MWCNT katkılı matrislerin AFTK'larda kırılma tokluğunu nasıl etkilediğini tespit etmek için SENB testleri yapılmıştır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de K_{IC} ve G_{IC} değerlerinin nanopartikül oranına bağlı değişimi grafik olarak, Tablo 4.4'te ise hem değer hem de referans numunesine göre gelişim oranı olarak verilmiştir.



Şekil 4.11. Takviye cinsi ve oranına bağlı olarak kritik stres yoğunluk faktörü (K_{IC}) değişimi

Kritik stres yoğunluk faktörü (K_{IC}) değerleri incelendiğinde referans numunesine göre en düşük gelişim %7,27 ile %0,1'lik hibrit matrisli AFTK numunesinden elde edilmiştir. Saf epoksi içerisinde çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engelleyecek herhangi bir mekanizma olmamasından (Tang ve diğ., 2012) dolayı referans numunesi en düşük kırılma tokluğu değerine sahiptir. Ayrıca %0,1'lik hibrit matrisli kompozit içerisinde çatlak oluşum ve ilerleme mekanizmasını önleyici iki farklı GNP ve MWCNT gibi katkı olmasına rağmen kırılma tokluğunun düşük olmasını malzeme içerisinde meydana gelen topaklanma sorununa ya da homojen bir karışım elde edilememesine bağlayabiliriz.



Şekil 4.12. Takviye cinsi ve oranına bağlı olarak kritik gerinim enerjisi salım hızı (G_{IC}) değişimi

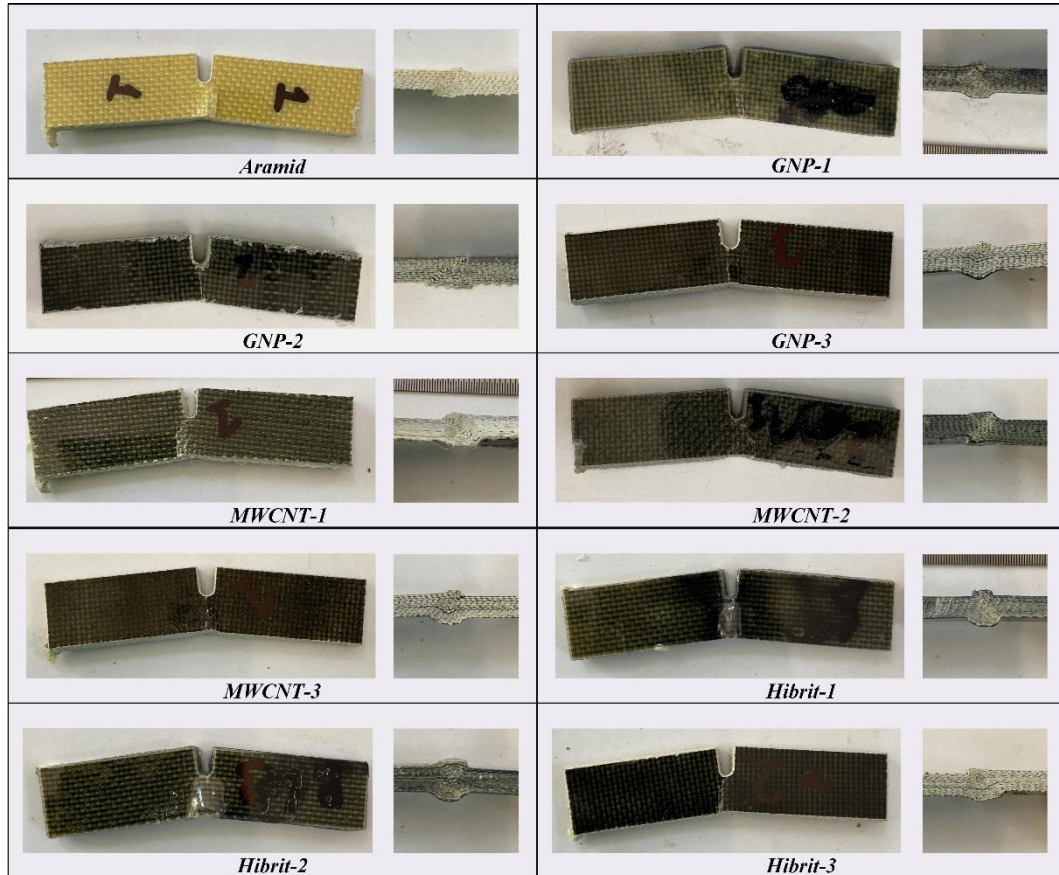
Tablo 4.4. Kritik stres yoğunluk faktörü ve kritik gerinim enerjisi salım hızı değişimleri

Numune	K_{IC} [MPa.m ^{1/2}]	±%	G_{IC} [J.m ⁻²]	±%
Aramid	395,15 (±68,84)		19,45 (±6,61)	
GNP-1	467,23 (±49,02)	18,24	29,00 (±6,07)	49,10
GNP-2	500,95 (±9,08)	26,78	35,83 (±1,30)	84,27
GNP-3	526,64 (±9,08)	33,28	37,33 (±1,29)	91,95
MWCNT-1	491,32 (±31,79)	24,34	30,45 (±3,93)	56,57
MWCNT-2	545,91 (±9,08)	38,15	37,17 (±1,24)	91,15
MWCNT-3	533,06 (±18,17)	34,90	36,21 (±2,47)	86,22
Hibrit-1	423,88 (±27,25)	7,27	23,52 (±3,02)	20,95
Hibrit-2	475,26 (±29,74)	20,28	30,19 (±3,29)	55,27
Hibrit-3	459,21 (±13,62)	16,21	27,45 (±1,63)	41,17

Her ne kadar hibrit matrisli AFTK numunelerde sinerjistik bir etki görülmesine de çekme deney sonuçlarına nazaran bu testte bir gelişme olduğu aşikardır. %0,2 ve %0,3 hibrit matrisli kompozitlerde kırılma tokluğu sırasıyla %20,28 ve %16,21 oranlarında gelişim göstermiştir. Diğer numuneleri incelediğimizde ise kırılma tokluğundaki en büyük gelişim %38,15 ile %0,2'lik MWCNT takviyesinde gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra %0,3'lük GNP ve %0,3'lük MWCNT takviyelerinde de sırasıyla %33,28 ve

%34,90'luk gelişim gözlemlenmiştir. MWCNT takviyesi malzeme içerisinde köprüleme mekanizmaları oluşturarak kırılmayı zorlaştırıcı ve dolayısıyla mukavemeti artırıcı rol oynamıştır. GNP takviyesi ise MWCNT'ye benzer bir şekilde köprüleme mekanizmasının yanı sıra kırılma esnasında çatlak sapmasına neden olarak malzemenin kırılma tokluğunu artırıcı bir rol üstlenmiştir.

Kritik gerinim enerjisi salım hızı (G_{IC}) değerleri incelendiğinde ise en düşük gelişim %20,95 ile yine %0,1'lik hibrit matrisli AFTK numuneden elde edilmiştir. Bu durum bize her ne kadar doğru bir karışım elde edilemese de hibrit karışımın kırılma işlemi sırasında birim alana harcanan enerjiyi artırdığını göstermektedir. %0,2 ve %0,3 hibrit katkıların olduğu kompozitlerde ise bu oran sırasıyla %55,27 ve %41,17 olmuştur. En büyük gelişim %0,3'lük GNP ve %0,2'lik MWCNT katkıların olduğu kompozitlerde sırasıyla %91,95 ve %91,15 ile gerçekleşmiştir. Ayrıca %0,2'lik GNP ve %0,3'lük MWCNT katkılarında bu oran sırasıyla %84,27 ve %86,22 olmuştur. Bu durum bize GNP ve MWCNT katkıların malzemenin kritik kırılma enerjisi salınım hızı üzerinde çok büyük etkisinin olduğunu göstermektedir. SENB testi sonucu numunelerde meydana gelen hasarlar Şekil 4.13'te verilmiştir.

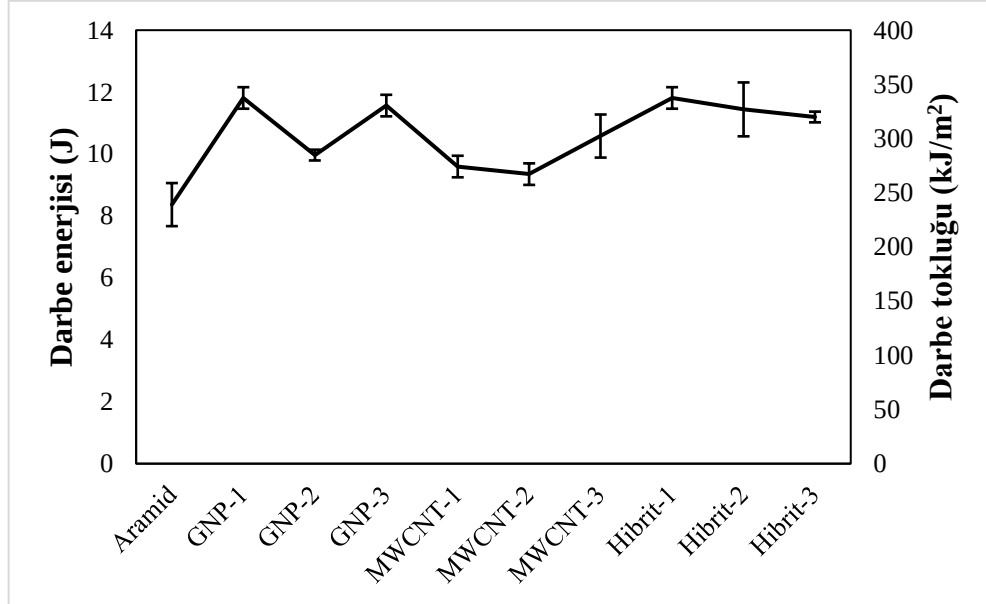


Şekil 4.13. SENB test numunelerinin üst ve arka yüz hasar görüntüleri

Şekil 4.13'teki SENB test numunelerinin hasar görüntülerini incelediğimizde, üst yüzeyde şişme ve kayma hasarının meydana geldiğini, arka yüzeyde ise basma kuvvetinin etkisiyle ezilme hasarının oluştuğunu görmekteyiz. Arka yüzey hasarı referans numuneye oranla takviyeli kompozitlerde daha büyük olmuştur. Bu durum nano takviyelerin hasar enerjisini dağıtarak daha büyük enerji sönümlediğini göstermektedir.

4.1.4. Çentik darbe test sonuçları

Çentik darbe deneyi malzemelerin darbe dayanımlarını ve bu darbe sonucu meydana gelen hasar mekanizmalarını inceleyen bir deney türüdür. AFTK'lar darbe dayanımları iyi olan malzemelerdir, ancak GNP ve MWCNT gibi takviye elemanlarıyla darbe dayanımlarını artırmak mümkündür. AFTK'ların çentik darbe testleri ASTM D256 standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Çentik darbe testi yapılan AFTK'ların darbe enerjisine bağlı darbe tokluğu, denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmış ve grafiğe dökülmüştür. AFTK'ların takviye cinsine ve takviye oranına bağlı darbe enerjisi ve darbe tokluğu değişimi Şekil 4.14'te, darbe tokluğu değerlerinin referans numunesine göre değişimi ise Tablo 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Darbe enerjisi ve darbe tokluğu değerlerinin takviye cinsi ve takviye oranına göre değişimi

Çentik darbe deneyi sonuçları diğer testlere nazaran daha büyük gelişmelerin olduğunu göstermektedir. En büyük gelişim %41,18 ile %0,1'lik GNP ve hibrit matrisli AFTK numunelerinde gerçekleşmiştir. En az gelişim ise %11,76 ile %0,2'lik MWCNT

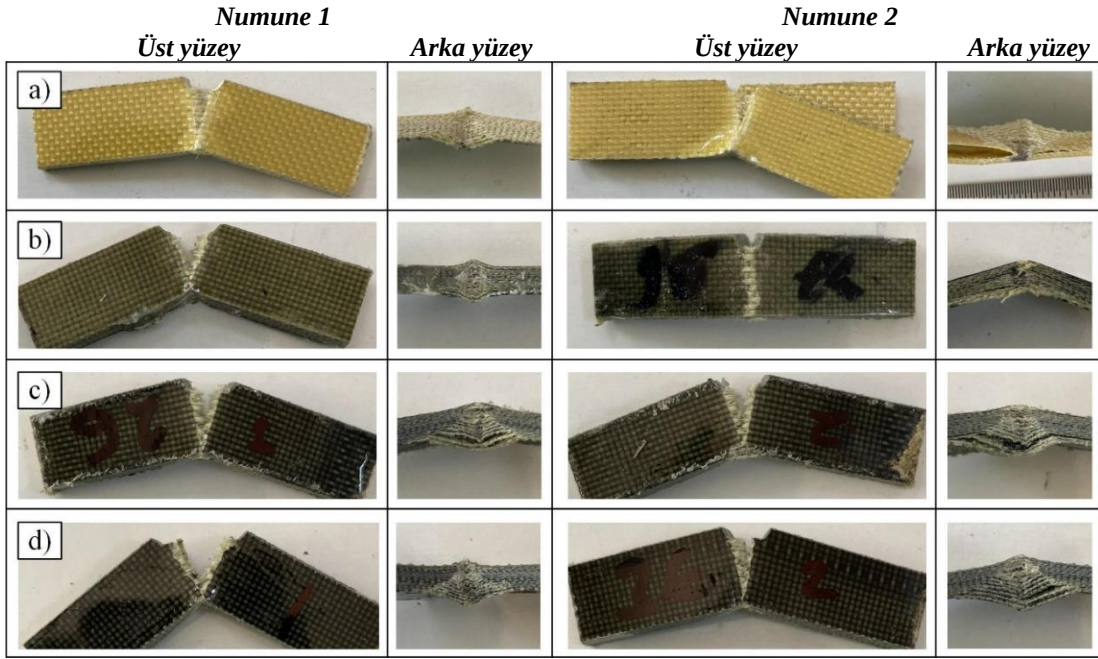
matrisli kompozit numunesinden elde edilmiştir. Özellikle %0,2'lik karışımlar dikkate alındığında hibrit matrisli kompozit numunenin sinerjistik etki gösterdiği söylenebilir. Ayrıca MWCNT'li numunelerinin tamamında darbe dayanımının GNP'li numunelere nazaran daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun GNP ve MWCNT arasındaki yapısal farktan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 4.5. Çentik darbe testinden elde edilen darbe enerjisi ve darbe tokluğu sonuçları

Numune	Darbe Enerjisi			Darbe Tokluğu [kJ.m ⁻²]	Gelişim [%]
	[J]				
	Deney 1	Deney 2	Ort.		
Aramid	9	8	8,5	239,03	0
GNP-1	12,50	11,50	12	337,46	41,18
GNP-2	10,25	10	10,125	284,73	19,12
GNP-3	11,50	12	11,75	330,43	38,24
MWCNT-1	9,50	10	9,75	274,18	14,71
MWCNT-2	9,25	9,75	9,5	267,15	11,76
MWCNT-3	11,25	10,25	10,75	302,31	26,47
Hibrit-1	11,50	12,50	12	337,46	41,18
Hibrit-2	12,25	11	11,625	326,91	36,76
Hibrit-3	10,75	12	11,375	319,88	33,82

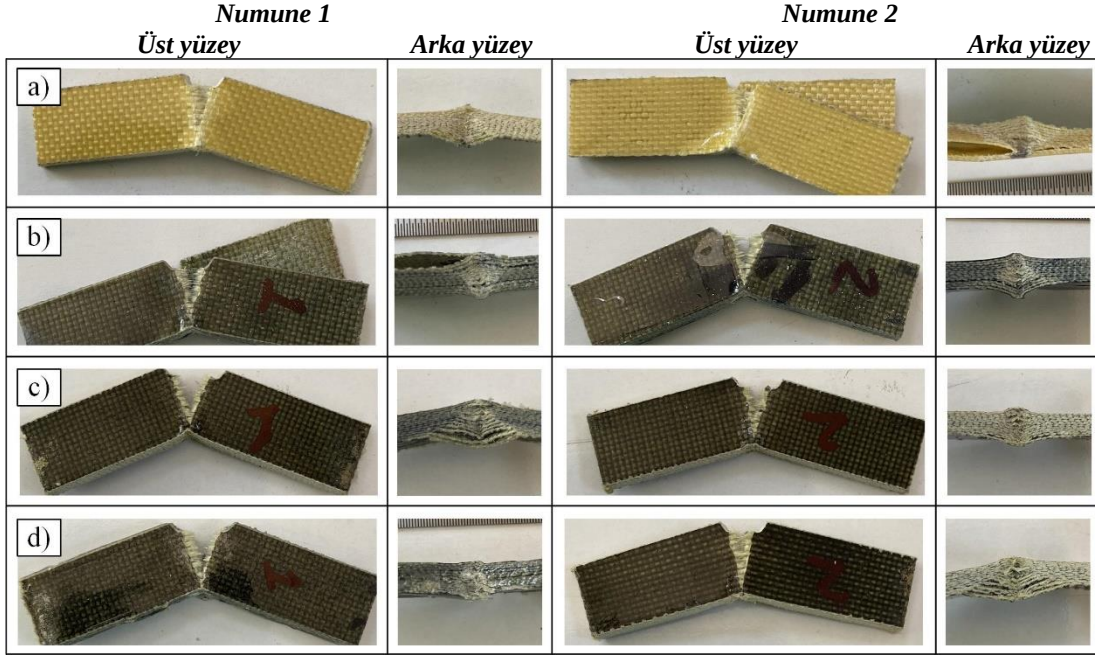
Nanopartiküllerin AFTK'ların darbe mukavemetini geliştirmesinde birden fazla faktörün etkili olabileceği düşünülmektedir. Bunlardan biri nanopartikül takviyesinin epoksi matris ile aramid fiber arasındaki arayüz bağlantılarını geliştirebileceğidir. Bu durum zaten kısa kiriş tabakalar arası kayma mukavemeti test sonuçlarıyla da desteklenmektedir. Benzer şekilde farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar farklı nanopartikül takviye kullanımının fiber ve matris malzemesi arasında arayüzey bağlantılarının geliştirdiğini doğrulamaktadır (Alsaadi ve diğ., 2021; Deka ve Maji, 2012; L. Ma ve diğ., 2020; Qi ve diğ., 2021). Bir diğeri ise nanopartiküllerin kırılma mekanizmalarını etkileyerek darbe sönümleme enerjisini artırması olabilir. Bu durum zaten takviye elemanlarının genel bir özelliğidir diyebiliriz.

Darbe testi uygulanan GNP, MWCNT ve hibrit matrisli AFTK numunelerin makro görüntüleri Şekil 4.15–4.17’de verilmiştir. Darbe hasarının referans numunesine oranla değişiminin daha rahat görünebilmesi için tüm şekillere referans numunesi eklenmiştir. Şekil 4.15–4.17.a’da verilen referans numunelerini incelediğimizde; en az hasara uğrayan birinci referans numunesi, tabaka ayrılması hasarına uğramamıştır. En fazla hasara uğrayan ikinci referans numunesinde tabaka ayrılması göze çarpmaktadır. Bir numaralı referans numunesi tabaka ayrılması hasarına uğramadığı için daha fazla enerji sönümlenmiştir.



Şekil 4.15. Darbe test numunelerinin hasar görüntüleri a) Aramid, b) GNP-1, c) GNP-2 ve d) GNP-3

Şekil 4.15’te verilen GNP ile modifiye edilmiş AFTK numunelerin darbe hasarlarını incelediğimizde; %0,1 GNP ile modifiye edilmiş ikinci numunenin tam olarak yırtılmadığı, ancak büküldüğü görülmektedir. Bu durum iki numune arasındaki enerji farkını açıklamaktadır. %0,2 GNP ile modifiye edilmiş numunelerde çok benzer hasarlar meydana gelmiş ve darbe sönümlene enerjileri birbirine çok yakın olmuştur. %0,3 GNP ile modifiye edilmiş numunelerden birincisi neredeyse tamamen koparken ikinci numune tam olarak diğer numuneler gibi davranmıştır. Darbenin olduğu arka yüzeyleri incelediğimizde ise tüm numunelerde belirli bir delaminasyonla birlikte tabaka ayrılmaları göze çarpmaktadır.

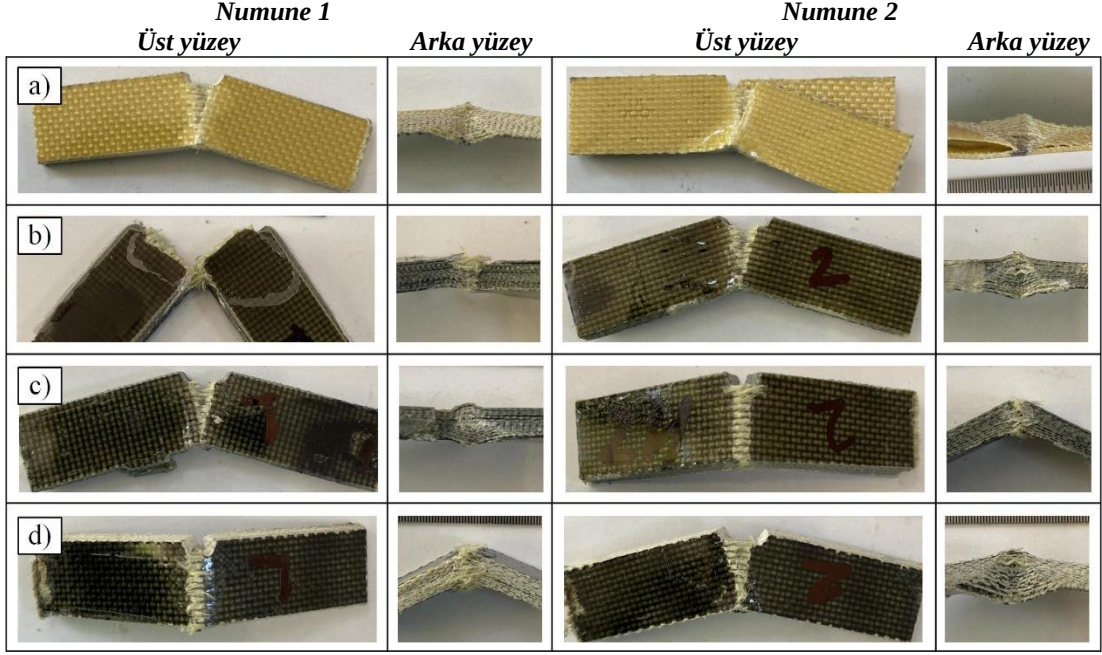


Şekil 4.16. Darbe test numunelerinin hasar görüntüleri a) Aramid, b) MWCNT-1, c) MWCNT-2 ve d) MWCNT-3

Şekil 4.16’da verilen MWCNT ile modifiye edilmiş AFTK numunelerin darbe hasarlarını incelediğimizde; %0,1 MWCNT ile modifiye edilmiş birinci numunede, ikinci referans numunesine benzer şekilde tabaka ayrılması meydana gelmiştir. Yine aynı şekilde birinci numune, ikinci numuneye oranla daha az enerji sönümleyebilmiştir. %0,2 MWCNT ile modifiye edilmiş numuneleri incelediğimizde ise %0,1’lik numunelere benzer bir hasara uğradıkları ancak arka yüzlerinde belirli bir fark olduğu görülmektedir. Birinci numunenin arka yüzeyi ikinci numunenin arka yüzeyine oranla daha fazla tabaka ayrılmasına ve daha büyük bir alanda delaminasyona uğramıştır, ancak darbe sönümleme enerjisi daha düşük olmuştur. Bu da malzemenin çok daha kolay hasara uğrayarak daha az enerji sönümlendiğini göstermektedir. %0,3 MWCNT ile modifiye edilmiş numuneleri incelediğimizde ise her iki numunenin de benzer şekilde kırıldığı ancak arka yüzlerinde meydana gelen darbe hasarının farklı olduğu görülmektedir. Birinci numunede çok fazla delaminasyon görülmezken ikinci numunede delaminasyon ve tabaka ayrılması net şekilde görülmektedir. Bu durum ikinci numunenin darbe sönümleme enerjisini düşürmüştür.

Şekil 4.17’de verilen GNP ve MWCNT ile modifiye edilmiş %0,1 hibrit kompozitleri incelediğimizde ise birinci numunenin neredeyse tamamen koptuğu, ayrıca arka yüzey hasarının çok az olduğu görülmektedir. İkinci numune ise normal bir şekilde kırılmış ve arka yüzeyde darbe sonrası büyük bir delaminasyon bölgesiyle beraber

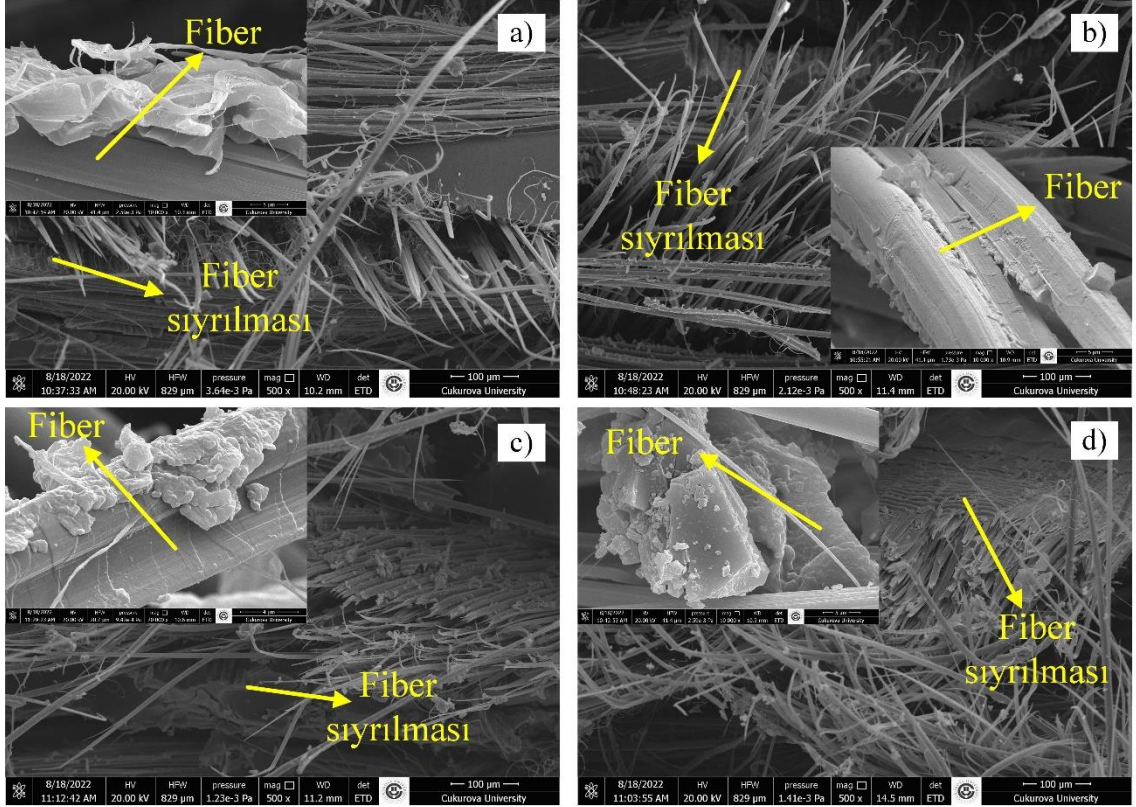
katmanlar birbirinden ayrılmıştır. Bu durum ikinci numunenin birinci numuneye oranla daha az darbe sönümlemesine neden olmuştur. %0,2'lik hibrit numuneleri incelediğimizde, birinci numune normal bir şekilde kırılırken ikinci numune bükülmüştür. Bu durum ikinci numunenin daha az enerji sönümlemesine sebep olmuştur. %0,3'lük hibrit numuneleri incelediğimizde ise birinci numunenin yine benzer şekilde bükülerek daha az enerji sönümlediği görülmüştür.



Şekil 4.17. Darbe test numunelerinin hasar görüntüleri a) Aramid, b) Hibrit-1, c) Hibrit-2 ve d) Hibrit-3

Genel olarak GNP ve MWCNT katkısı AFTK'ların düşük hızda darbe sönümleme özelliğini geliştirmiştir. Diğer testlere nazaran hibrit numunelerde referans numunesine göre %33,82 ile %41,18 arasında değişen gelişim gözlenmiştir.

Çentik darbe deneyi sonucu %0,1 takviyeli AFTK'larda meydana gelen kırılma yüzeyinden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.18'de verilmiştir. Çentik darbe testi sonucunda elde edilen kırılma yüzey görüntülerini incelediğimizde, fiber sıyrılmaları ve kırılmış fiberler açıkça görülmektedir. Ayrıca sıyrılmış fiberler üzerinden alınan ayrıntılı görüntülerde (Şekil 4.18.a) saf epoksi matristen sıyrılan aramid fiber üzerindeki pürüzsüz yapı göze çarpmaktadır. GNP, MWCNT ve hibrit matrisli kompozitlerde matristen sıyrılan fiberler üzerindeki matris kalıntılarının korunduğu net bir şekilde görülmektedir. Bu durum nanopartikül takviyelerinin aramid fiberlerle iyi bir arayüzey bağı kurarak darbe enerjisini referans numunesine oranla daha iyi sönümlediğini göstermektedir.



Şekil 4.18. AFTK'ların darbe yüzeyi SEM görüntüleri a) saf epoksi, b) GNP-1, c) MWCNT-1, d) hibrit-1

Abbandanak ve diğ. (2020), aramid/cam hibrit kompozitlerin eğme testi sonucundaki kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerini incelemişler ve ağırlıkça %0,1 GNP içeren kompozit numunelerin fiberleri üzerindeki pürüzlülüğe dikkat çekmişlerdir. Araştırmacılar bu durumun fiber/matris arasındaki güçlü arayüzey bağlantısının açık bir göstergesi olduğunu ve bunun matristen fiberlere önemli miktarda yük aktarımına yol açtığını belirtmişlerdir.

4.1.5. QSPT sonuçları

QSPT, iki farklı destek/zımba oranında ($SPR = 2$ ve 4) ve iki farklı geometriye (konik ve oğiv) sahip zımba ile yapılmıştır. Konik ve oğiv zımbalarla yapılan testlerden elde edilen maksimum kuvvet ve bu yüklerin meydana geldiği andaki yer değiştirme değerleri Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'de verilen sonuçlar incelendiğinde, zımba geometrisinin ve SPR oranının etkileri açık bir şekilde görülmektedir. Konik ve oğiv geometriye sahip olan zımbalarla yapılan testlerde en belirgin fark maksimum kuvvetlerin farklı bölgelerde oluşmasıdır.

Tablo 4.6. Konik zimbada maksimum kuvvetin oluştuğu yer değiştirme değerleri

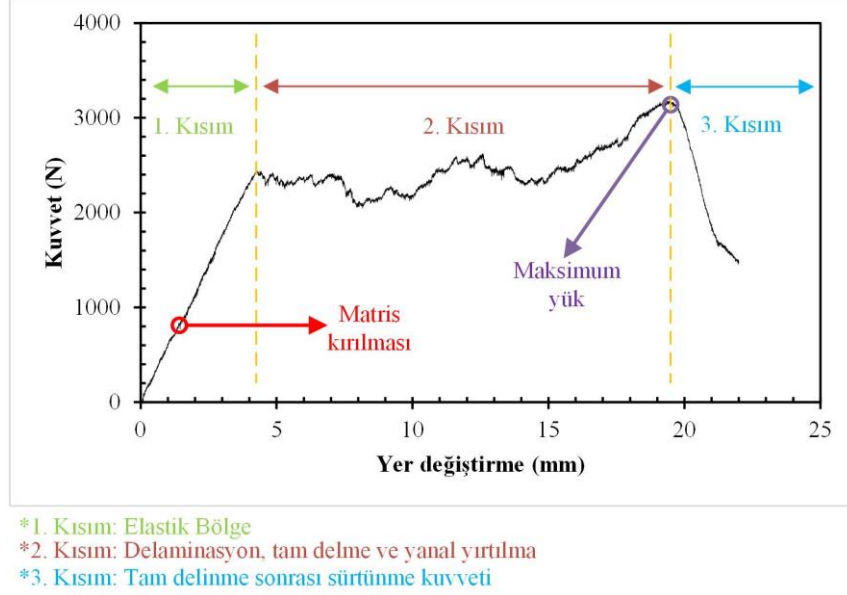
<i>Numune</i>	<i>SPR 2</i>		<i>SPR 4</i>	
	<i>Maksimum Kuvvet [kN]</i>	<i>Yer Değiştirme [mm]</i>	<i>Maksimum Kuvvet [kN]</i>	<i>Yer Değiştirme [mm]</i>
<i>Aramid</i>	2,54	12,08	2,20	4,99
<i>GNP-1</i>	2,69	10,77	2,22	17,20
<i>GNP-2</i>	2,66	10,71	3,88	18,36
<i>GNP-3</i>	2,74	19,70	2,35	17,34
<i>MWCNT-1</i>	2,59	18,60	2,38	17,76
<i>MWCNT-2</i>	2,58	14,65	3,17	17,76
<i>MWCNT-3</i>	2,28	18,22	3,40	19,16
<i>Hibrit-1</i>	2,93	18,48	2,40	18,17
<i>Hibrit-2</i>	2,65	16,40	3,37	17,89
<i>Hibrit-3</i>	2,70	19,32	3,20	19,50

Tablo 4.7. Ojiv zimbada maksimum kuvvetin oluştuğu yer değiştirme değerleri

<i>Numune</i>	<i>SPR 2</i>		<i>SPR 4</i>	
	<i>Maksimum Kuvvet [kN]</i>	<i>Yer Değiştirme [mm]</i>	<i>Maksimum Kuvvet [kN]</i>	<i>Yer Değiştirme [mm]</i>
<i>Aramid</i>	3,24	4,39	2,96	5,46
<i>GNP-1</i>	3,22	4,94	3,23	5,38
<i>GNP-2</i>	3,88	5,41	2,85	5,24
<i>GNP-3</i>	3,13	4,59	3,37	5,29
<i>MWCNT-1</i>	4,08	4,10	2,86	6,65
<i>MWCNT-2</i>	3,48	4,57	3,54	4,69
<i>MWCNT-3</i>	3,43	4,62	3,97	5,15
<i>Hibrit-1</i>	3,58	4,63	3,87	5,14
<i>Hibrit-2</i>	3,38	4,68	3,30	4,66
<i>Hibrit-3</i>	3,67	4,73	2,89	4,62

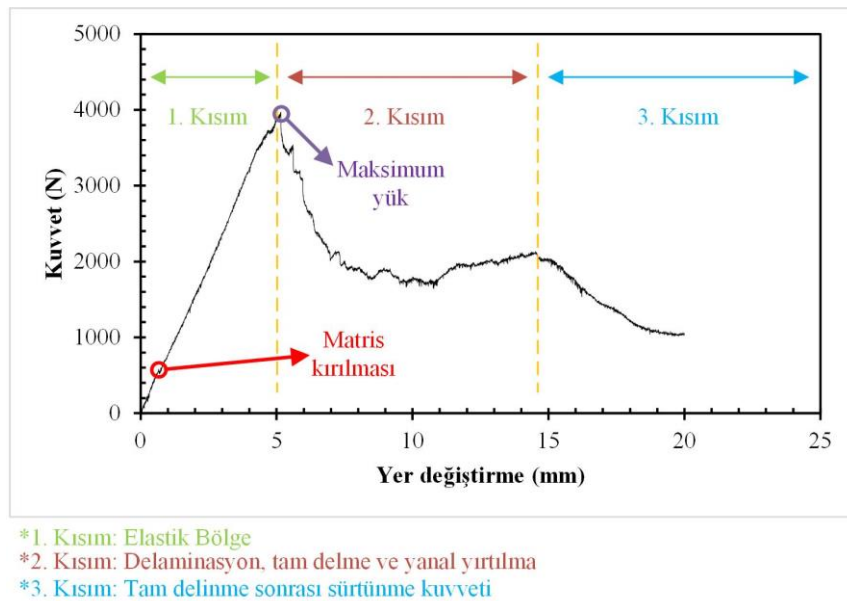
Genel olarak konik zimbada referans numunesi hariç kuvvet–yer değiştirme grafikleri için maksimum kuvvetlere 10,71 mm ile 19,70 mm aralığındaki deplasman değerlerinde ulaşılmıştır. Ancak genel olarak maksimum kuvvetler 17 mm ile 19 mm

arasında yoğunlaşmıştır. Maksimum seviyeden sonra kuvvet düşmeye başlamıştır. Bu durum Şekil 4.19'daki konik zımba ile yapılan deneylerin genel kuvvet-yer değiştirme grafiğinde açıkça görülmektedir.



Şekil 4.19. Konik zımbaya ait genel kuvvet-yer değiştirme grafiği

Ojiv zımbanın kuvvet-yer değiştirme grafiklerinde ise maksimum kuvvetlere 4,1 mm ile 6,65 mm aralığındaki deplasman değerlerinde ulaşılmış ve bu maksimum seviyeden sonra kuvvet düşmeye başlamıştır. Bu durum Şekil 4.20'deki ojiv zımba ile yapılan deneylerin genel kuvvet-yer değiştirme grafiğinde açıkça görülmektedir.



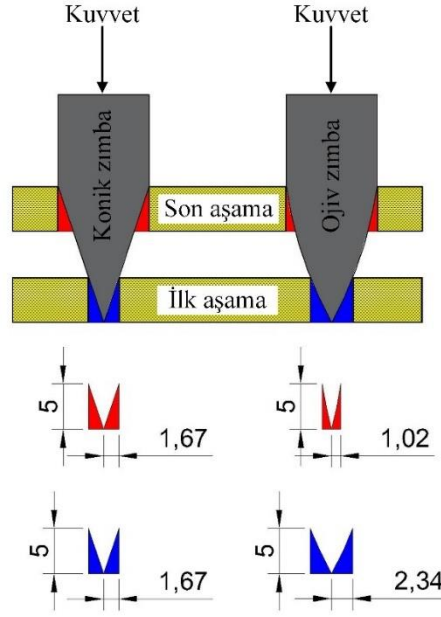
Şekil 4.20. Ojiv zımbaya ait genel kuvvet-yer değiştirme grafiği

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de, QSPT’den elde edilen verilerle çizilen kuvvet–yer değiştirme grafikleri incelenirse; her iki zımbada da birinci kısımda malzeme esnekliğini korumuş ve kuvvet lineer bir şekilde artmıştır. Birinci kısım bittiğinde zımbanın delici ucu numunelerin arka kısmını delerek çıkmış ve bu ilk delme gerçekleşince kuvvet düşmüştür. Daha sonrasında ikinci kısımda fiber kırılmaları, delaminasyon ve yanal yırtılmalar gerçekleşmeye başlamış ve bu durum kuvvetin bir yukarı bir aşağı dalgalanmasına sebep olmuştur. Daha sonrasında üçüncü kısımda malzeme zımba çapı kadar delindikten yani sap bölgesine ulaştıktan sonra sadece zımba ve kumaş arasındaki sürtünme kuvvetinin etkisine maruz kalmıştır.

Genel olarak baktığımızda ojiv zımbada maksimum kuvvetin olduğu yer değiştirmelerin konik zımbanın aksine düşük deplasman değerlerinden elde edildiği tespit edilmiştir. Daha önce yapılan farklı çalışmalara baktığımızda literatürde benzer sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir. Naresh ve diğ. (2018), konik zımba ile 12 mm ve 14 mm civarındaki deplasman değerlerinde maksimum kuvvete ulaşıldığını, ojiv zımbaya benzer bir geometriye sahip olan eliptik zımbada ise maksimum kuvvetlere 5 mm civarlarındaki deplasman değerlerinde ulaşıldığını belirtmişlerdir. Sadeghi ve Pol (2019) yaptıkları çalışmada, konik zımbada daha ileri deplasman değerlerinde (17,95 mm ve 16,68 mm) maksimum kuvvete ulaşırlarken, ojiv zımbada ise daha düşük değerlerde (9,93 mm ve 10,39 mm) maksimum kuvvete ulaşmışlardır. Benzer şekilde Taghizadeh ve diğ. (2019) konik zımbada yaklaşık 17 mm ve ojiv zımbada ise yaklaşık 10 mm deplasman değerinde maksimum kuvvetlere ulaşmışlardır.

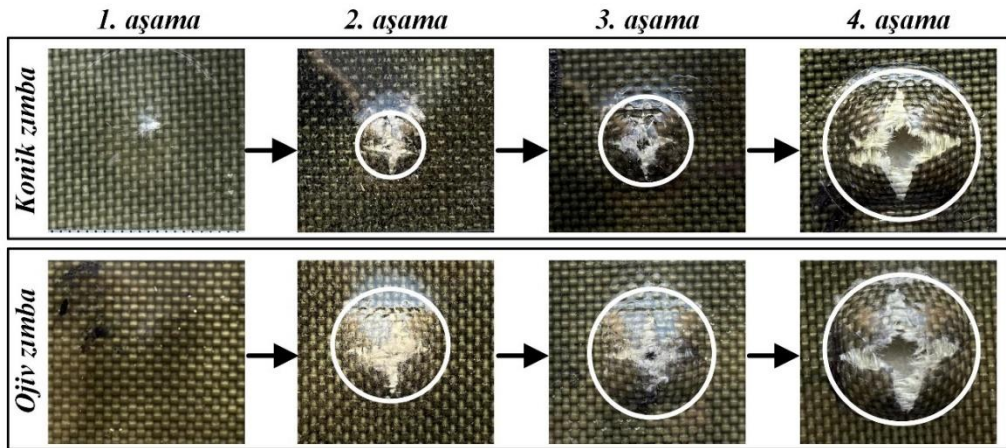
Ojiv zımbada, elastik bölgeden çıkıp ilk delmenin gerçekleştiği esnada maksimum kuvvet meydana gelmiştir. Bunun temel sebebi, ojiv geometriye sahip olan zımbanın daha fazla temas alanına sahip olmasından dolayı öncelikle malzemeyi ezmesi, hatta kısmen delmeye başlaması ve daha sonrasında ilerleme devam ettikçe malzemeyi tam manasıyla yanal yönlerden yırtmasıdır. Bu yüzden ojiv zımba ile yapılan deneylerde konik zımbaya kıyasla daha büyük kuvvetler meydana gelmiştir. Konik zımbada ise tam aksine maksimum kuvvet delmenin tamamlandığı esnada meydana gelmiştir. Konik zımbada ise temas alanının daha az olması ve geometrinin delmeye daha yatkın olması, malzemeyi öncelikle çok büyük kuvvetlere maruz kalmadan delmiş ve sonrasında zımbanın sırt bölgelerine doğru ilerlemenin devam etmesiyle birlikte malzemeyi enine yırtmaya başlamıştır. Dolayısıyla en büyük kuvvetler delmenin tamamlandığı esnada oluşmuştur. Bu durum Şekil 4.21’de zımbalara ait verilen geometrik çizimin ve Şekil 4.22’de her iki

zımba ile delinen AFTK numunelerin delme aşamalarının analizi ile açıklığa kavuşturulabilir.



Şekil 4.21. Konik ve ojiv zımbaların QSPT esnasındaki temas alanlarının şematik gösterimi

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi 5 mm kalınlığındaki bir plakaya batan zımbaların ilk aşamadaki mavi renk ile gösterilen ilk temas alanlarını hesapladığımızda, ojiv zımbanın temas alanı konik zımbanın temas alanına oranı yaklaşık olarak 1,4 olarak ölçülmüştür. Yine aynı şekilde son aşamadaki kırmızı renk ile gösterilen temas alanlarını hesapladığımızda ise bu sefer ojiv zımbanın temas alanının konik zımbanın temas alanına oranı yaklaşık olarak 0,61 olarak ölçülmüştür. Yani son kısımda ojiv zımbanın temas alanı azalmıştır. Bu sebepten dolayı konik zımba daha fazla dirençle karşılaşmakta ve tam penetrasyonun yaşandığı bölgede daha fazla kuvvet meydana gelmektedir.



Şekil 4.22. Konik (üst) ve ojiv (alt) zımbaların deformasyon aşamaları

Şekil 4.22'deki dört aşamadan oluşan gerçek deformasyon alanlarına baktığımızda; ojiv zımbanın dördüncü aşamada eşitlenene kadar konik zımbadan daha fazla alanla temas halinde olduğu için daha fazla alanı hasara uğrattığı ve enine yırtılmaların daha önce gerçekleştiği net bir şekilde görülmektedir.

Ojiv zımbanın kullanıldığı deneylerde nanopartikül takviyesinin etkilerini incelediğimizde ise SPR 2 oranında iki istisna hariç (%0,1 GNP ve %0,3 GNP) maksimum kuvvetin nanopartikül takviyeleriyle arttığı görülmüştür. Ancak takviye oranının artmasıyla lineer bir artış gözlemlenememiştir. SPR 4 oranında ise yine aynı şekilde bazı istisnalar dışında (%0,2 GNP, %0,1 MWCNT ve %0,3 Hibrit) genel olarak maksimum kuvvetin arttığı görülmektedir. MWCNT katkısı dışında nanopartikül oranının artmasıyla maksimum kuvvette lineer bir artıştan söz etmek mümkün değildir.

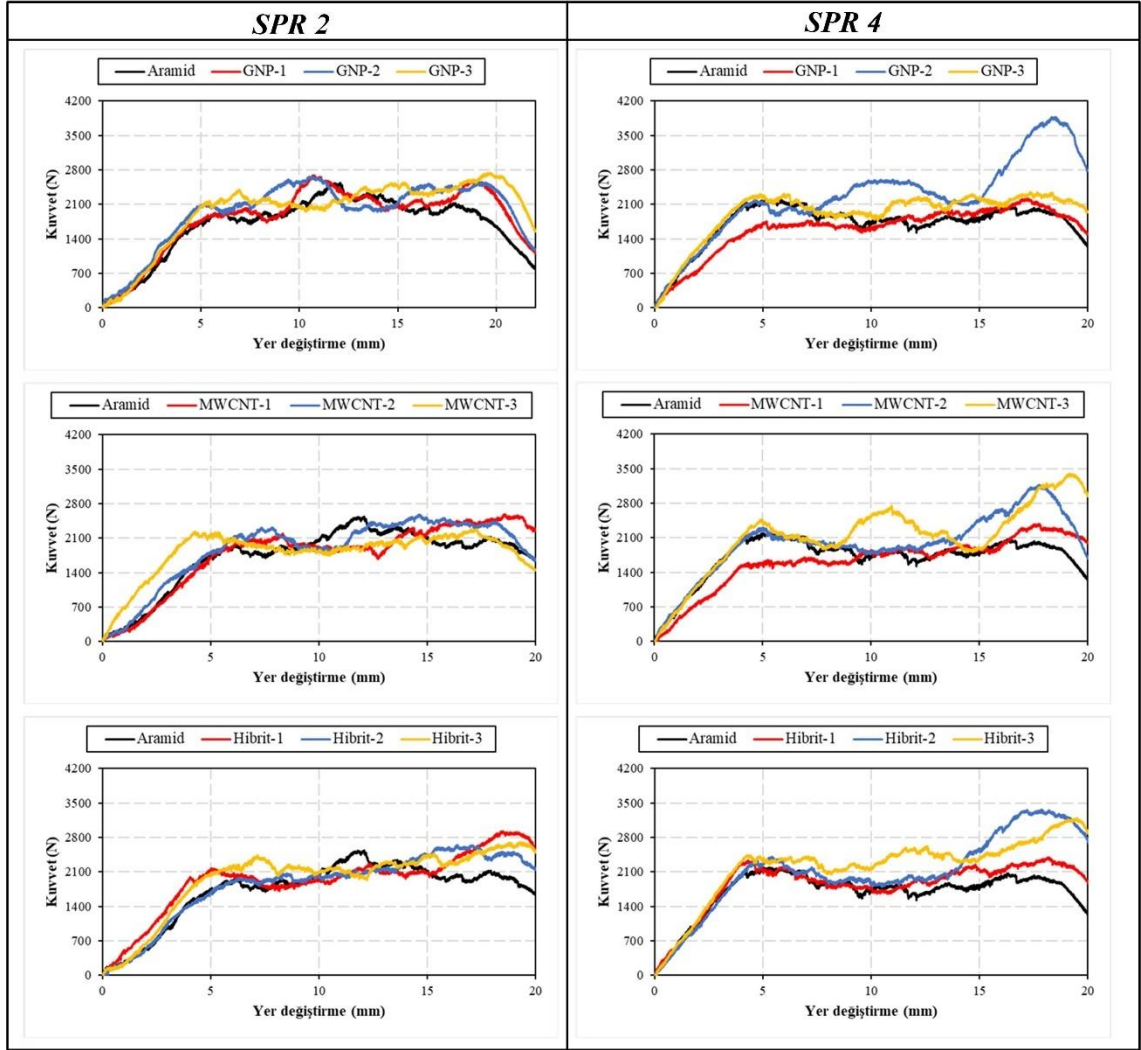
Ojiv zımbanın kullanıldığı deneylerde SPR oranının artmasıyla maksimum kuvvet bazı durumlarda düşmüş bazı durumlarda da daha yüksek olmuştur. Normal şartlarda SPR oranının artmasıyla malzemenin daha geniş bir alanda esnek bir davranış göstererek kuvvetleri düşürmesi beklenebilirdi ancak nanopartikül takviyeleri malzemeyi gevrekletirmiştir. Saf epoksinin kullanıldığı aramid numunelerinde hem ojiv hem de konik zımbalarda SPR oranının artmasıyla maksimum kuvvetin düştüğü görülmüştür. Bu durum malzemenin GNP ve MWCNT takviyeleriyle gevreklediğini göstermektedir.

Konik zımbanın kullanıldığı deneylerde ise nanopartikül takviyelerinin etkilerini incelediğimizde; SPR 2 oranında bir istisna hariç (%0,3 MWCNT) maksimum kuvvetin arttığı gözlemlenmiştir, ancak bu artış ojiv zımbada olduğu gibi lineer bir şekilde olmamıştır. SPR 4 oranında ise bazı istisnalar hariç (%0,2 GNP, %0,1 MWCNT ve %0,3 hibrit) yine nanopartikül takviyesiyle maksimum kuvvette artış gözlemlenmiştir. Konik zımbada, ojiv zımbaya benzer şekilde SPR oranının artmasıyla maksimum kuvvette belirli bir düşüşten ya da yükselmeden bahsetmek mümkün değildir.

QSPT'si yapılan AFTK'ların kuvvet–yer değiştirme grafikleri konik zımba için Şekil 4.23'de, ovij zımba için Şekil 4.24'de verilmiştir.

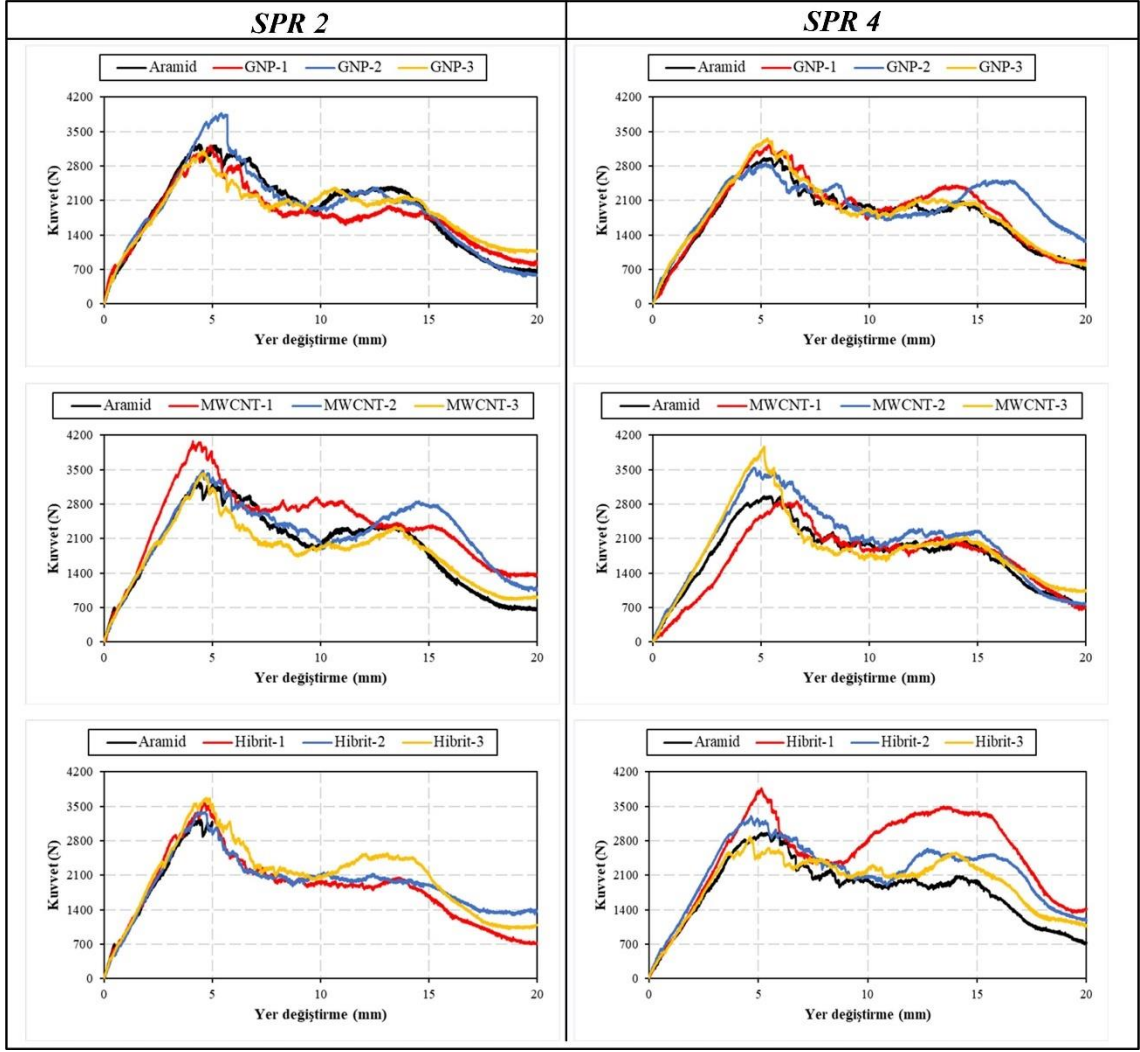
Şekil 4.23'de, konik zımbanın kuvvet–yer değiştirme grafiklerini incelediğimizde; kuvvetin elastik bölgenin bitimine kadar lineer bir artış sergilediği söylenebilir. Zımbanın numunenin diğer tarafından çıkmasıyla birlikte kuvvette ufak bir düşüş olmuş ve daha sonrasında ilerlemenin artmasıyla birlikte yanal yırtılmalar başlamıştır. Zımba önce kumaşı esnetmiş ve yırtılmanın gerçekleşmesiyle beraber kuvvet düşmüş daha sonra yine aynı şekilde yanal yırtılmalar devam etmiş ve bu davranış sürekli kuvveti bir arttırıp bir düşürerek devam etmiştir. Numunede yanal yırtılma

tamamlandıktan sonra zımba sadece sürtünme kuvvetine maruz kalır ve kuvvet artık dramatik bir şekilde düşüş eğilimi gösterir.



Şekil 4.23. Konik zımba ile yapılan deneylerin kuvvet–yer değiştirme eğrileri

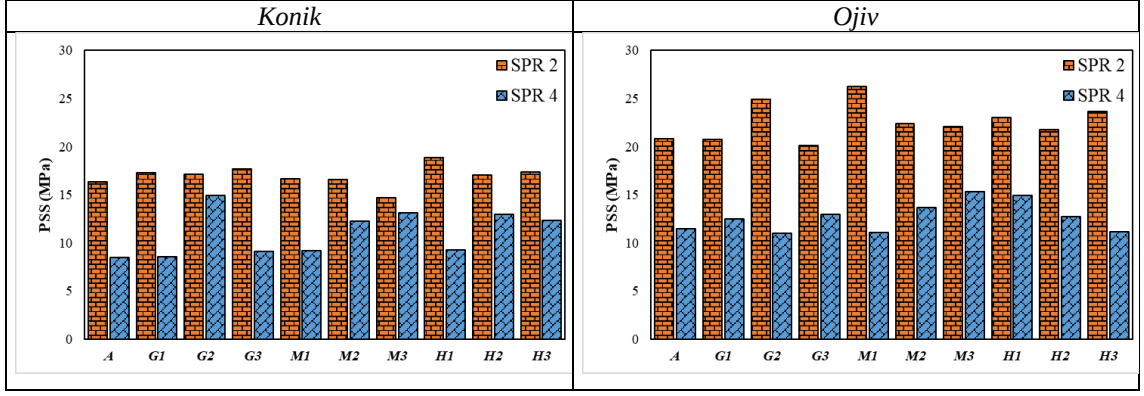
Şekil 4.24’deki ojiv zımbanın kullanıldığı deneylerde kuvvet–yer değiştirme grafiklerini incelediğimizde ise elastik bölgenin bitimine kadar kuvvetin kademeli olarak arttığı görülmektedir. Konik zımbanın aksine maksimum kuvvet bu bölgede oluşmuş ve daha sonrasında yanıl yırtılmaların gerçekleştiği bölgelerde ufak artışlar olsa da kuvvet sürekli düşüş eğilimine girmiştir. Sonunda zımbanın en büyük yanıl yırtılmayı gerçekleştirdiği bölgede tekrar bir artış eğilimi gösteren kuvvet, yanıl yırtılmanın tamamlanmasıyla beraber sadece sürtünme kuvvetine maruz kalmış ve dramatik bir şekilde düşüş eğilimi göstermiştir.



Şekil 4.24. Ojiv zımba ile yapılan deneylerin kuvvet–yer değiştirme eğrileri

Genel olarak maksimum kuvvetleri incelediğimizde, zımba geometrisinin maksimum kuvvetlere doğrudan bir etkisi olduğunu söyleyebilmek mümkündür. Ojiv zımbayla yapılan testlerde konik zımbaya göre daha yüksek maksimum kuvvetler elde edilmiştir. Bu da daha önceden bahsedildiği gibi ojiv zımbanın daha fazla temas alanına sahip olmasından dolayı daha fazla fiberi delmeye ve yırtmaya çalışmasından kaynaklanmaktadır.

QSPT’si yapılan AFTK’ların zımba kesme gerilimi (PSS) ve enerjileri, denklem 3.6–3.11’de verilen eşitliklerle hesaplanmıştır. AFTK’ların SPR oranına, takviye cinsine ve takviye oranına bağlı PSS grafiği Şekil 4.25’te, PSS ve enerji değerlerinin referans numunesine göre değişimi ise konik zımba için Tablo 4.8’de, ovij zımba için Tablo 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.25. PSS'nin malzemelere, zımbaya ve SPR oranlarına göre değişim grafikleri

Zımba kesme gerilimi (PSS), malzemenin delaminasyona uğraması için gerekli olan kritik değeri ifade ettiği için oldukça önemli bir veridir. PSS incelendiğinde; kuvvette meydana gelen değişimlerin aksine SPR oranının artmasıyla beraber PSS gerilmelerinde düşüşler göze çarpmaktadır. Bu durum SPR oranının PSS üzerinde ciddi bir etkisi olduğunu göstermektedir. Yani destek oranının artmasıyla malzeme daha kolay delinebilir/kesilebilir hale gelmektedir. Şekil 4.25'deki grafikleri incelediğimizde hem ojiv hem de konik zımba için bu durum aynı şeyi ifade etmektedir. Maksimum kuvvetlerde olduğu gibi zımba geometrisi malzemenin delaminasyona uğraması için gerekli olan kritik değeri ciddi manada etkilemektedir. SPR oranının artması her iki delme operasyonunu da ciddi oranda kolaylaştırmıştır. Ancak ojiv geometriye sahip olan zımbanın kritik değeri özellikle SPR 2 oranında konik zımbaya oranla daha yüksektir. Bunun sebebi konik zımba geometrisinin delme işlemi için daha kolay bir geometriye sahip olmasıdır.

Tablo 4.8'deki delme için gerekli olan enerji değerlerini incelediğimizde konik zımba için SPR 2 oranında genel olarak tüm AFTK'ların referans numuneye göre gelişim gösterdiği görülmektedir. En büyük gelişim %14,30 ile %0,2 GNP takviyeli AFTK'da gerçekleşmiştir. En düşük gelişim ise %3,34 ile %0,1 MWCNT ile modifiye edilmiş kompozitte gerçekleşmiştir. SPR 4 oranında ise malzemelerin destek oranı arttığı için daha esnek davranması delinmesi için gerekli olan enerjiyi iki istisna dışında (%0,1 GNP ve %0,1 MWCNT) artırmıştır. Özellikle en büyük gelişim yine %0,2 GNP ile modifiye edilmiş AFTK'da gerçekleşmiştir. Ayrıca sinerjistik bir etki görülmesi de %0,2 ve %0,3 hibrit takviyeli kompozitlerde bu oran sırasıyla %24,35 ve %29,68 olmuştur.

Tablo 4.8. Konik zımba kesme mukavemeti ve enerji değerleri değişimi

<i>Numune</i>	<i>SPR 2</i>				<i>SPR 4</i>			
	<i>PSS [MPa]</i>	$\pm\%$	<i>Enerji [J]</i>	$\pm\%$	<i>PS [MPa]</i>	$\pm\%$	<i>Enerji [J]</i>	$\pm\%$
<i>Aramid</i>	16,33		34,45		8,47		34,15	
<i>GNP-1</i>	17,28	5,85	36,99	7,35	8,56	1,07	32,11	-5,95
<i>GNP-2</i>	17,13	4,92	39,38	14,30	14,95	76,51	45,17	32,30
<i>GNP-3</i>	17,63	8,00	38,95	13,06	9,07	7,12	35,31	3,41
<i>MWCNT-1</i>	16,63	1,85	35,60	3,34	9,19	8,54	32,53	-4,72
<i>MWCNT-2</i>	16,58	1,54	37,43	8,65	12,24	44,48	39,95	16,99
<i>MWCNT-3</i>	14,67	-10,15	36,30	5,37	13,11	54,80	42,70	25,05
<i>Hibrit-1</i>	18,84	15,38	38,47	11,66	9,25	9,25	36,99	8,32
<i>Hibrit-2</i>	17,03	4,31	36,81	6,84	12,99	53,38	42,46	24,35
<i>Hibrit-3</i>	17,38	6,46	39,13	13,58	12,33	45,55	44,28	29,68

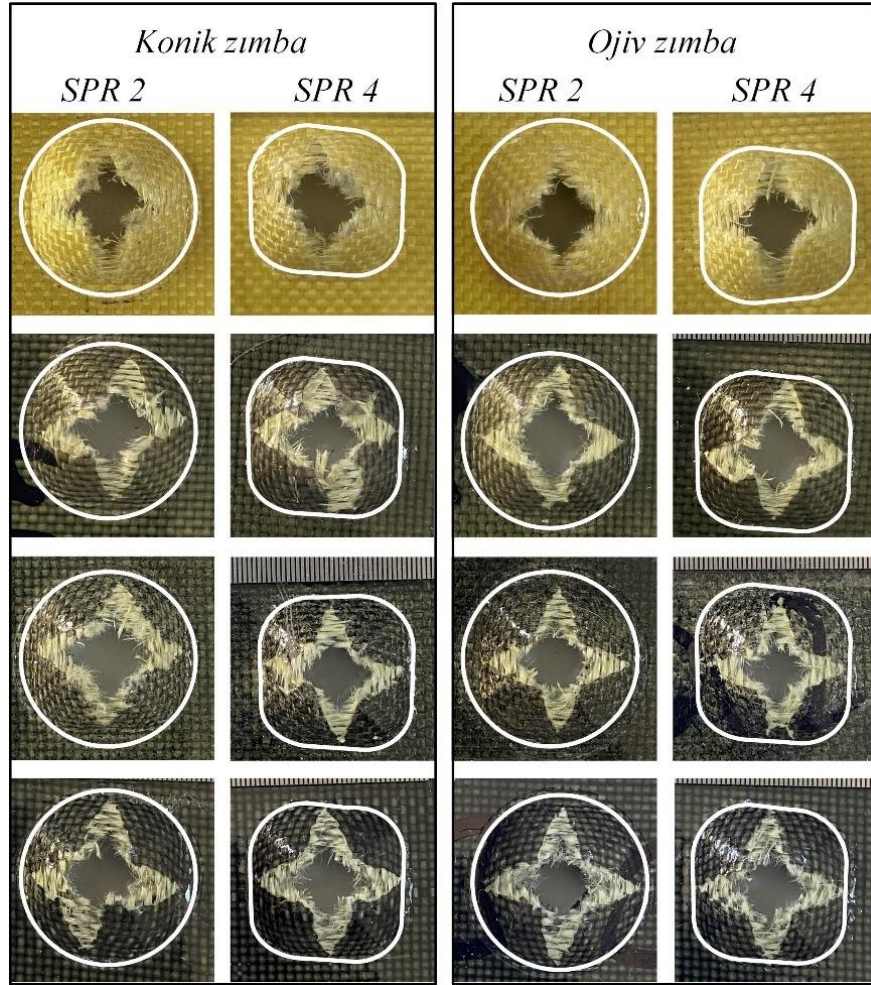
Tablo 4.9. Ojiv zımba kesme mukavemet ve enerji değerleri değişimi

<i>Numune</i>	<i>SPR 2</i>				<i>SPR 4</i>			
	<i>PSS [MPa]</i>	$\pm\%$	<i>Enerji [J]</i>	$\pm\%$	<i>PSS [MPa]</i>	$\pm\%$	<i>Enerji [J]</i>	$\pm\%$
<i>Aramid</i>	20,85		38,43		11,42		35,58	
<i>GNP-1</i>	20,70	-0,72	35,61	-7,33	12,48	9,23	33,81	-4,98
<i>GNP-2</i>	24,92	19,52	38,54	0,28	11,00	-3,69	40,02	12,48
<i>GNP-3</i>	20,10	-3,61	37,68	-1,95	12,99	13,72	37,39	5,08
<i>MWCNT-1</i>	26,22	25,78	47,31	23,11	11,03	-3,43	33,81	-4,98
<i>MWCNT-2</i>	22,41	7,47	43,82	14,03	13,65	19,53	40,55	13,97
<i>MWCNT-3</i>	22,05	5,78	36,73	-4,42	15,31	34,04	37,93	6,62
<i>Hibrit-1</i>	23,01	10,36	36,36	-5,37	14,92	30,61	50,57	42,13
<i>Hibrit-2</i>	21,75	4,34	38,61	0,47	12,75	11,61	43,38	21,94
<i>Hibrit-3</i>	23,61	13,25	41,23	7,29	11,15	-2,37	38,93	9,43

Tablo 4.9'daki delme için gerekli olan enerji değerlerini incelediğimizde ojiv zımba için SPR 2 oranında AFTK'ların referans numuneye göre çok fazla gelişim olduğu

söylenemez. Çok büyük düşüşler görülme de %0,1 GNP takviyeli AFTK'da bu düşüş %7,33 olarak hesaplanmıştır. En büyük gelişim ise %0,1 MWCNT takviyeli kompozitte gerçekleşmiştir. SPR 4 oranında delme için gerekli olan enerjileri incelediğimizde ojiv zimbaya benzer şekilde %0,1 GNP ve %0,1 MWCNT takviyeli AFTK'larda düşüş gözlemlenmiştir. Diğer tüm AFTK'larda destek oranı arttığı için malzemeler daha esnek davranmış ve referans numuneye oranla gelişim olmuştur. Özellikle % 0,1 hibrit içeren AFTK'da %42,13 oranında artış ile sinerjistik etki görülmüştür. Ayrıca %0,2 hibrit takviyeli kompozitte bu oran %21,94 olmuştur.

Konik ve ojiv zimbalar ile test edilen AFTK'ların SPR 2 ve SPR 4 destek oranlarında meydana getirmiş oldukları kovan hasarının görüntüleri Şekil 4.26'da görülmektedir. Yapılan inceleme neticesinde meydana gelen hasarların neredeyse birebir aynı oldukları, ancak destek aralığının SPR 2'den SPR 4'e yükseltilmesiyle hasar bölgesinin küçüldüğü görülmüştür.

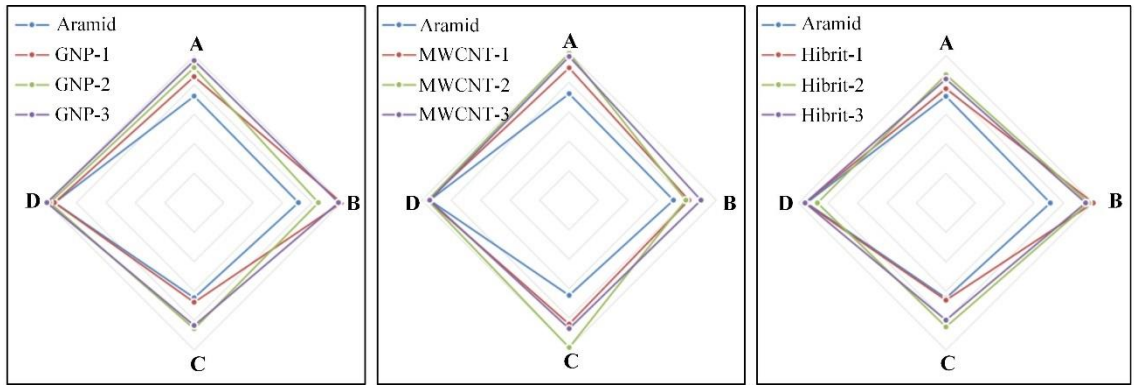


Şekil 4.26. Farklı takviye oranlarına sahip AFTK'ların zimba geometrisine ve SPR oranına ait hasar mekanizmaları

Destek aralığının SPR 2 oranında olduğu numunelerde malzeme hasara uğrarken alt destek kalıbı AFTK'nın esnekliğini sınırlandırır ve destek açıklığı oranında hasara uğramasına neden olarak daire şeklinde bir hasar meydana getirir. Ancak SPR 4 oranında malzeme alt destek kalıbında herhangi bir sınırlandırma ile karşılaşmadığı için daha esnek bir şekilde hasara uğrar ve yanal yırtılmaların etkisiyle köşeleri yuvarlatılmış bir kareye benzer bir şekilde hasar meydana getirir.

4.1.6. Mekanik testler genel değerlendirme

Tüm mekanik testleri genel olarak değerlendirebilmek için mekanik testlere ait radar ya da diğer adıyla örümcek ağı grafiklerinden yararlanmak gerekmektedir. Bu tür grafiklerden yararlanılarak değerlendirmeler daha kolay yapılmaktadır. Mekanik testleri yapılan AFTK'ların örümcek ağı grafiği çiziminde, mekanik testler gruplandırılmıştır. Her bir gruptaki mekanik deneyin maksimum değeri 100 olacak şekilde bir katsayı belirlenmiş ve o mekanik deneyin diğer test sonuçları bu değerle çarpılarak Şekil 4.27'deki örümcek ağı grafiği elde edilmiştir.



A: SENB testi, B: Çentik darbe testi, C: SBS testi ve D: Çekme testi

Şekil 4.27. Mekanik test sonuçlarının değerlendirilmesi

Tüm grafiklerin ortak noktası şeklin merkezinde bulunan mavi ile çizilmiş modifiye edilmemiş AFTK'nın durumudur. Grafiklerde görülen tüm parametrelerde referans numune olan AFTK düzlem içi kuvvetlere maruz kaldığı çekme testi dışında düzlem dışı kuvvetlere maruz kaldığı SENB, SBS ve çentik darbe testlerinde en zayıf malzeme olarak önümüze çıkmaktadır. Bu da yapılan tüm mekanik testlerin ortak bir sonucuna bizi ulaştırmaktadır: MWCNT ve GNP ile modifiye edilmiş bir epoksi reçine ile üretilen AFTK'ların düzlem dışı mekanik özelliklerinde ciddi gelişmeler olmuştur.

4.2. Balistik Test Sonuçları

V_{50} balistik limit hızı deneyi birbirine yakın 6 atıştan 3 tane tam delme ve 3 tane de kısmi delme hızının aritmetik ortalaması alınarak hesaplanan bir balistik test düzeneğini temsil eder. Standarda göre bu 6 atıştan en yükseği ve en düşüğü arasında maksimum 40 m/s fark olmalıdır. Ancak hesabın yapılabilmesi için farklı denemeler yapmak gerekmektedir. Genellikle 6 atıştan daha fazlası (8 ya da 10) yapılır ve 40 m/s aralığının yakalanabilmesi için daha fazla atışın yapılması elzemdir.

Yapılan balistik testte tüm numunelerde 200 ile 300 m/s arasında kısmi delme gerçekleşmiş olmasına rağmen bu hızlara inmek mevcut sistemde çok mümkün olmamıştır. İlk deneme atışından sonra duruma göre barut artırarak ya da düşürerek numunelerin balistik limit hızı belirlenmeye çalışılmış ancak çok az barut eklenmesine ya da çıkarılmasına rağmen mermi hızında büyük değişimler olmuştur. 200 m/s hızlara inilen bazı durumlarda mermi kovanı terk etmemiş ve namluya sıkışmıştır.

Örneğin aramid numunesinde üçüncü atışta 288,7 m/s hıza inilmiş sonrasında dördüncü atışta çok az miktarda barut eklenmesine rağmen 402,4 m/s hıza çıkılmıştır. Daha sonrasında yine çok az barut çıkarıldığında beşinci atışta hız 231,7 m/s olmuştur. Yüksek hızlı atışlarda balistik limit hızını belirlemek ve bu 6 atışı 40 m/s aralığında tutmak çok daha kolayken nispeten düşük kabul edilebilecek 200-300 m/s arasındaki hızlarda bu aralığı tutturmak bu konuda çok tecrübeli personele sahip olunmasına rağmen bir türlü mümkün olmamıştır.

İlk testlerde kullanılan AFTK, %0,2 GNP içeren ve %0,1 hibrit içeren AFTK'lara onar atış yapılmasına rağmen, V_{50} balistik limit hızının belirlenmesi mümkün olmamıştır. Test standardı gereği her atış noktası arasında minimum 65 mm aralık olması gerektiği için numune üzerinde en fazla onar atış yapılabilmektedir. Ancak yapılan testlerde balistik limit hızını belirleyecek aralık tutturulamadığı için uzman personelle birlikte V_{50} balistik limit hızı testinin sonlandırılmasına ve kalan testlere mümkün olan en düşük hızlarda dörder atışla devam edilmesine karar verilmiştir.

Balistik testleri yapılan numunelerin, atış no, atış hızı ve penetrasyon durumu Tablo 4.10 ve 4.11'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Ayrıca tabloda tam delmenin gerçekleştiği en düşük hız kırmızı renk ile işaretlenirken, kısmi penetrasyon elde edilen en yüksek hız ise mavi renk ile işaretlenmiştir.

Tablo 4.10. GNP'li AFTK'larda balistik test sonuçları

Numune	Atış No	Hız [m/s]	Penetrasyon	Numune	Atış No	Hız [m/s]	Penetrasyon
Aramid	1	311,5	TD	%0,1 GNP	1	312,1	TD
	2	345,0	TD		2	298,3 ^B	TD
	3	288,7	TD		3	369,7	TD
	4	402,4	TD		4	292,1 ^A	KD
	5	231,7 ^A	KD		5	-	-
	6	337,4	TD		6	-	-
	7	334,1	TD		7	-	-
	8	317,9	TD		8	-	-
	9	276,0 ^B	TD		9	-	-
	10	381,6	TD		10	-	-
Numune	Atış No	Hız [m/s]	Penetrasyon	Numune	Atış No	Hız (m/s)	Penetrasyon
%0,2 GNP	1	220,6	KD	%0,3 GNP	1	304,7 ^B	TD
	2	223,8	KD		2	256,7 ^A	KD
	3	188,5	KD		3	375,4	TD
	4	202,5	KD		4	311,8	TD
	5	109,1	KD		5	-	-
	6	362,9	TD		6	-	-
	7	268,8 ^A	KD		7	-	-
	8	307,3 ^B	TD		8	-	-
	9	241,8	KD		9	-	-
	10	377,6	TD		10	-	-
NOT:							
*A: kısmi delmenin gerçekleştiği en yüksek hız							
**B: tam delmenin gerçekleştiği en düşük hız							
KD: kısmi delme							
TD: tam delme							

Tablo 4.10'u incelediğimizde, AFTK plakaya ilk testlerden biri olması sebebiyle on başarılı atış yapılmış ve test dokuz tam delme ve bir kısmi penetrasyon ile sonuçlanmıştır. Yapılan testte en düşük tam delme hızı 307,3 m/s olurken en yüksek kısmi delme hızı 231,7 m/s olmuştur. %0,1 GNP içeren AFTK'ya dört başarılı atış yapılırken kısmi penetrasyon hızı 292,1 m/s ve en yüksek tam delme hızı ise 298,3 m/s olmuştur. Bu iki hızın birbirine çok yakın olması balistik limit hıza yakın bir değerde atış yapıldığını gösterse de bu konuda tam bir netlik mevcut değildir. %0,2 GNP içeren plakada yine on başarılı atış yapılmış, bu testte düşük hızlar özellikle test edilmiş ve on atıştan üç tanesi tam penetrasyon ile gerçekleşmiştir. En yüksek kısmi penetrasyon hızı 268,8 m/s iken en düşük tam delme hızı 307,3 m/s olmuştur. İki hız arasında yaklaşık 50 m/s fark olması

balistik limit hızı hakkında herhangi bir fikir elde etmeyi olanaksız kılmıştır. %0,3 GNP içeren plakada yine dört başarılı atış yapılmış ve üç tam delme, bir kısmi penetrasyon ile sonuçlanmıştır. En düşük tam penetrasyon hızı 304,7 m/s olurken kısmi penetrasyon hızı 256,7 m/s olmuştur. İki hız arasında 50 m/s fark olması bu numunenin balistik limit hızı hakkında herhangi bir fikir vermemektedir.

Tablo 4.11. MWCNT ve hibrit AFTK'larda balistik test sonuçları

<i>Numune</i>	<i>Atış No</i>	<i>Hız [m/s]</i>	<i>Penetrasyon</i>	<i>Numune</i>	<i>Atış No</i>	<i>Hız [m/s]</i>	<i>Penetrasyon</i>
<i>%0,1 MWCNT</i>	1	263,2 ^B	TD	<i>%0,2 MWCNT</i>	1	222,2	KD
	2	255,1 ^A	KD		2	232,6 ^A	KD
	3	290,8	TD		3	288,2 ^B	TD
	4	332,9	TD		4	371,3	TD
	5	-	-		5	354,6	TD
<i>Numune</i>	<i>Atış No</i>	<i>Hız [m/s]</i>	<i>Penetrasyon</i>	<i>Numune</i>	<i>Atış No</i>	<i>Hız [m/s]</i>	<i>Penetrasyon</i>
<i>%0,3 MWCNT</i>	1	327,3 ^B	TD	<i>%0,1 Hibrit</i>	1	480,2	TD
	2	406,2	TD		2	385,0	TD
	3	193,1	KD		3	517,3	TD
	4	225,8 ^A	KD		4	427,3	TD
	5	-	-		5	561,9	TD
	6	-	-		6	444,4	TD
	7	-	-		7	409,7	TD
	8	-	-		8	473,7	TD
	9	-	-		9	332,7 ^B	TD
	10	-	-		10	344,3	TD
<i>Numune</i>	<i>Atış No</i>	<i>Hız [m/s]</i>	<i>Penetrasyon</i>	<i>Numune</i>	<i>Atış No</i>	<i>Hız [m/s]</i>	<i>Penetrasyon</i>
<i>%0,2 Hibrit</i>	1	313,0 ^B	TD	<i>%0,3 Hibrit</i>	1	262,3 ^A	KD
	2	347,1	TD		2	363,5 ^B	TD
	3	319,6	TD		3	239,5	KD
	4	254,6 ^A	KD		4	245,8	KD

NOT:
 *A: kısmi delmenin gerçekleştiği en yüksek hız
 **B: tam delmenin gerçekleştiği en düşük hız
 KD: kısmi delme
 TD: tam delme

Tablo 4.11'i incelediğimizde, %0,1 MWCNT içeren AFTK kompozit plakaya dört başarılı atış yapılmış ve üç tam penetrasyon, bir kısmi penetrasyon gerçekleşmiştir. En düşük tam penetrasyon hızı 263,2 m/s olurken 255,1 m/s hızda ise kısmi penetrasyon

olmuştur. Her iki hız arasında yaklaşık 8 m/s fark olması balistik limit hızın bu aralıkta olabileceğine işaret etmektedir. %0,2 MWCNT içeren plakaya beş başarılı atış yapılmış ve üç tam penetrasyon iki kısmi penetrasyon gerçekleşmiştir. En düşük tam penetrasyon 288,2 m/s hızda gerçekleşirken en yüksek kısmi penetrasyon ise 232,6 m/s hızda gerçekleşmiştir. İki hız arasında yaklaşık 56 m/s fark olması balistik limit hızı için herhangi bir fikir vermemektedir. %0,3 MWCNT içeren plakaya yapılan testte ise dört başarılı atış yapılmış ve iki tam penetrasyon 2 kısmi penetrasyon gerçekleşmiştir. En düşük tam penetrasyon 327,3 m/s hızda elde edilirken en yüksek kısmi penetrasyon ise 225,8 m/s hızda gerçekleşmiştir. Bu durum yine balistik limit hızı hakkında herhangi bir fikir vermemektedir.

Tablo 4.11'deki hibrit numunelere yapılan atışları incelediğimizde ise %0,1 hibrit AFTK plakaya on başarılı atış yapıldığı ve en düşük 332,7 m/s hıza inildiği görülmektedir. Bunun temel sebebi ilk test edilen numune olmasıdır. %0,2 hibrit takviyeli plakaya dört başarılı atış yapılırken bir kısmi penetrasyon ve üç tam penetrasyon gerçekleşmiştir. En düşük tam penetrasyon 313 m/s hızda, kısmi penetrasyon ise 254,6 m/s hızda gerçekleşmiştir. Yaklaşık 60 m/s hız farkı balistik limit hakkında bir fikir vermemektedir. %0,3 hibrit takviyeli plakaya dört başarılı atış gerçekleştirilirken bir tam penetrasyon ve üç kısmi penetrasyon gerçekleşmiştir. En yüksek kısmi penetrasyon 262,3 m/s hızda gerçekleşirken tam penetrasyon 363,5 m/s hızda gerçekleşmiştir.

Tüm deney sonucunda elde edilen balistik hızların AFTK'larda oluşturduğu deformasyona etkisini incelemek için testlerin hızları küçükten büyüğe sıralanmıştır ve birbirine yakın hızlar gruplandırılmıştır. Bu hız gruplarında numunelerden hassas kumpas ile ölçüm alınmış ve arka yüz deformasyonlarının (fıçı oluşumu) genişlikleri ölçülmüştür. Kesit görüntüsü alınan numunelerin deformasyon özellikleri birbirleriyle kıyaslanmıştır. Elde edilen arka yüz ve kesit görüntülere ait sayısal bilgiler Tablo 4.12'de, arka yüzeyde oluşan deformasyon görüntüleri ise Şekil 4.28-4.38'de verilmiştir.

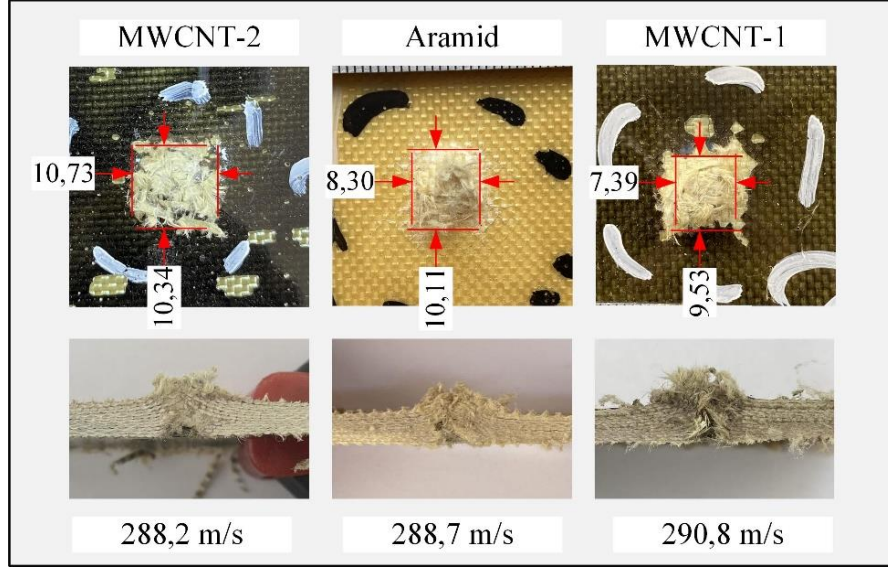
Tablo 4.12. Mermi hızının küçükten büyüğe sıralanması ve kıyaslama için kullanılan hız grupları

Hız Grubu	Mermi Hızı [m/s]	Numune	Atış No	Hasar Ölçüleri [mm-mm]	Hasar Alanı [mm ²]
	~~262,3~~	Hibrit	~~1~~	~~KD~~	-
*	263,2	MWCNT-1	1	10,53-9,56	100,67
	~~268,8~~	GNP-2	~~7~~	~~KD~~	-
*	276	Aramid	9	8,3-10	83,00
1. Grup	288,2	MWCNT-2	3	10,73-10,34	110,94
	288,7	Aramid	3	10,11-8,30	83,91
	290,8	MWCNT-1	3	7,39-9,53	70,43
	~~292,1~~	~~GNP-1~~	~~4~~	~~KD~~	-
*	298,3	GNP-1	2		
2. Grup	304,7	GNP-3	1	7,44-8,71	64,80
	307,3	GNP-2	8	8,28-8,44	69,88
3. Grup	311,5	Aramid	1	10,94-13,52	147,91
	311,8	GNP-3	4	7,86-8,03	63,12
	312,1	GNP-1	1	9,94-9,87	98,11
	313	Hibrit-2	1	10,13-8,73	88,43
4. Grup	317,9	Aramid	8	11,28-12,79	144,27
	319,6	Hibrit-2	3	9,75-10,91	106,37
*	327,3	MWCNT-3	1	14,00-11,00	154,00
5. Grup	332,7	Hibrit-1	9	10,93-10,98	120,01
	332,9	MWCNT-1	4	10,55-12,73	134,30
	334,1	Aramid	7	10,91-14,50	158,20
	337,4	Aramid	6	12,81-12,36	158,33
6. Grup	344,3	Hibrit-1	10	12,50-11,81	147,63
	345	Aramid	2	13,80-13,88	191,54
	347,1	Hibrit-2	2	12,81-12,90	165,25
*	354,6	MWCNT-2	5	12,60-10,84	136,58
7. Grup	362,9	GNP-2	6	11,84-13,44	159,13
	363,5	Hibrit-3	2	9,83-11,63	114,32
8. Grup	369,7	GNP-1	3	11,72-14,46	169,47
	371,3	MWCNT-2	4	13,00-12,56	163,28
9. Grup	375,4	GNP-3	3	10,41-12,42	129,29
	377,6	GNP-2	10	12,3-12,71	156,33
10. Grup	381,6	Aramid	10	12,38-15,90	196,84
	385	Hibrit-1	2	12-11,73	140,76
11. Grup	402,4	Aramid	4	13,29-15,78	209,72
	406,2	MWCNT-3	2	15,70-14,00	219,8
	409,7	Hibrit-1	7	13,19-13,36	176,22

NOT:

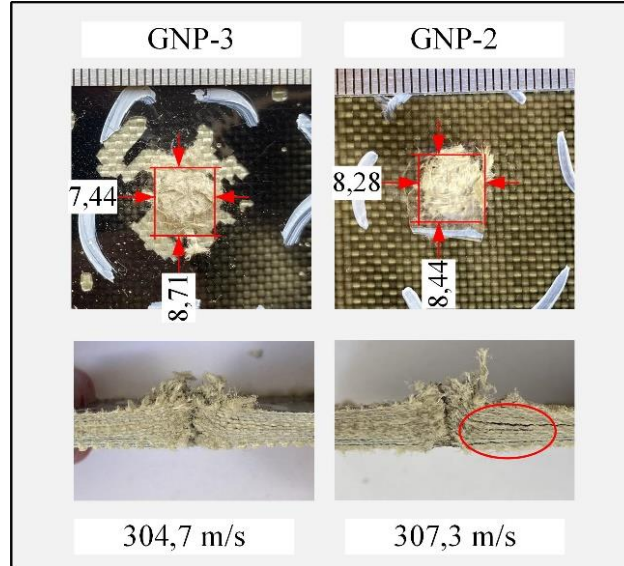
* Yıldız işareti olanlar diğer gruplarla ciddi hız farkları olduğu için gruplara dahil edilmemiştir

* Üzeri çizili olanlar kısmi delme olduğu için gruplarda yer verilmemiştir



Şekil 4.28. Birinci hız grubunda bulunan AFTK'ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri

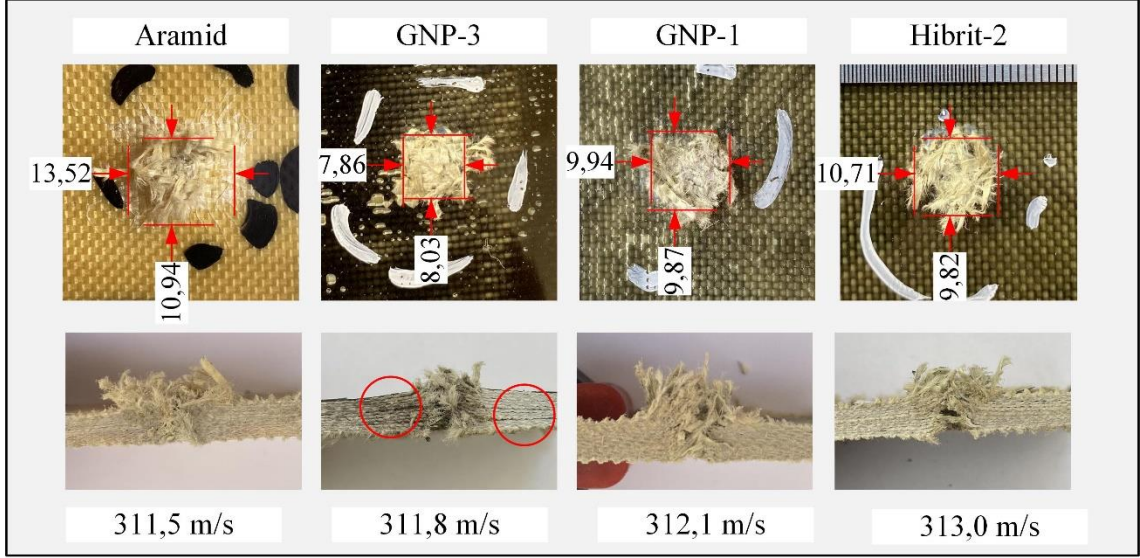
Şekil 4.28'de verilen birinci hız grubunda görülen hasarları incelediğimizde, en düşük hasarın $70,43 \text{ mm}^2$ ile %0,1 MWCNT takviyeli AFTK'da gerçekleştiği görülürken en yüksek hasarın ise $100,67 \text{ mm}^2$ ile %0,2 MWCNT içeren kompozitte gerçekleştiği görülmektedir. Ancak kesit görüntüleri incelediğimizde %0,2 MWCNT içeren kompozitin nanopartikül içermeyen aramide göre daha az hasar aldığı söylenebilir. MWCNT katkısı AFTK'ların daha az hasar almasına katkı sunmuştur.



Şekil 4.29. İkinci hız grubunda bulunan AFTK'ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri

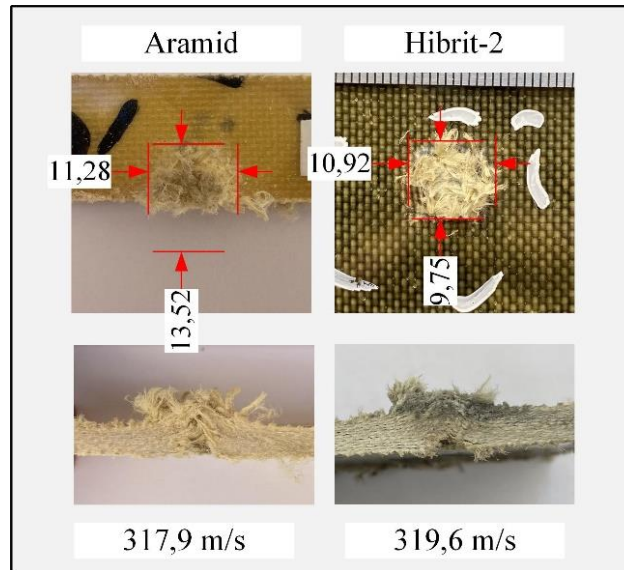
Şekil 4.29'da verilen ikinci hız grubunda görülen hasarları incelediğimizde, en düşük hasarın $64,80 \text{ mm}^2$ ile %0,3 GNP takviyeli AFTK'da gerçekleştiği, %0,2 GNP

takviyeli kompozitte ise bu hasarın $69,88 \text{ mm}^2$ alana yayıldığı görülmüştür. Bu durum bize GNP oranının artmasıyla AFTK'ların darbe hasarının azaldığını göstermektedir.



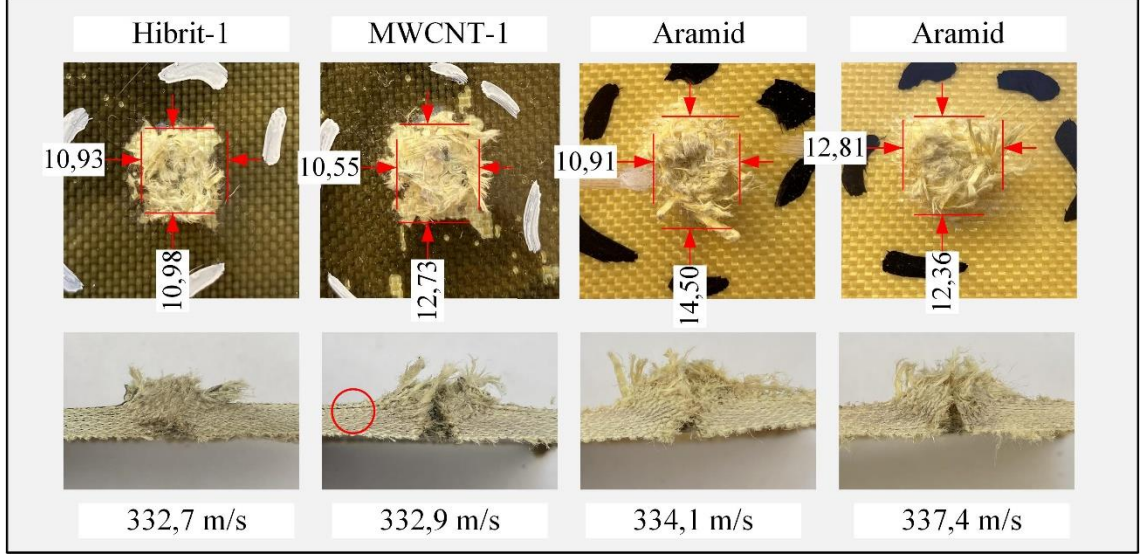
Şekil 4.30. Üçüncü hız grubunda bulunan AFTK'ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri

Şekil 4.30'da verilen üçüncü hız grubunda görülen hasarları incelediğimizde, en düşük hasar $63,12 \text{ mm}^2$ ile %0,3 GNP takviyeli AFTK kompozitten, en büyük hasar ise $147,91 \text{ mm}^2$ ile takviyesiz AFTK plakadan elde edilmiştir. %0,1 GNP takviyeli kompozit ve %0,2 hibrit takviyeli kompozitte elde edilen darbe hasarı sırasıyla $98,11 \text{ mm}^2$ ve $88,43 \text{ mm}^2$ olmuştur. GNP'li kompozitlerde genellikle delaminasyon hasarları meydana gelmiştir.



Şekil 4.31. Dördüncü hız grubunda bulunan AFTK'ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri

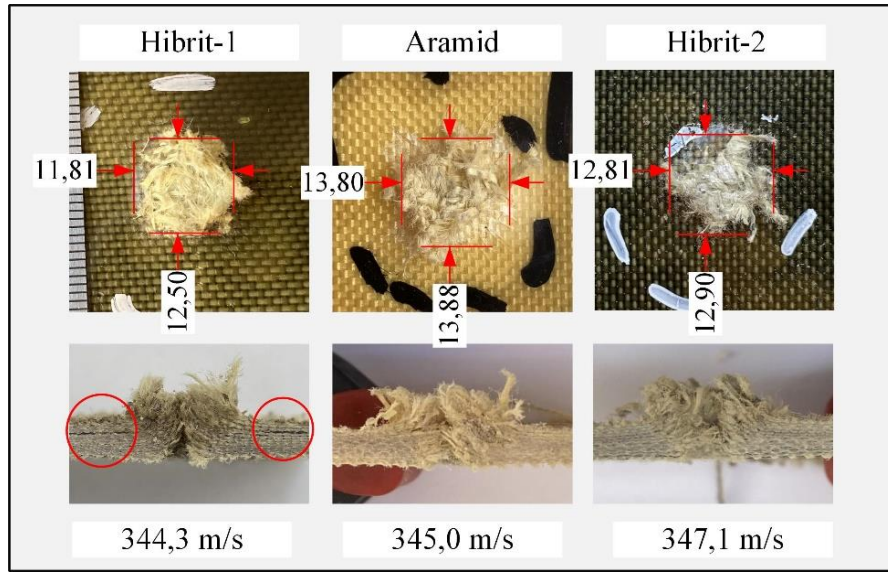
Şekil 4.31’de verilen dördüncü hız grubunda görülen hasarları incelediğimizde en düşük hasar $144,27 \text{ mm}^2$ ile takviyesiz AFTK’dan elde edilmiştir. %0,2 hibrit içeren kompozitte ise bu hasar $106,37 \text{ mm}^2$ olmuştur. Bu durum mekanik testlerin aksine hibrit takviyenin balistik testte daha başarılı olduğunu göstermiştir.



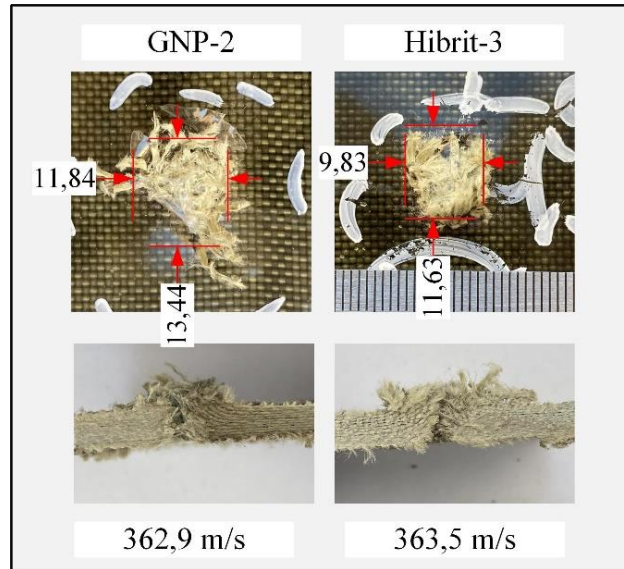
Şekil 4.32. Beşinci hız grubunda bulunan AFTK’ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri

Şekil 4.32’deki beşinci hız grubuna ait en düşük hasar alanı $120,01 \text{ mm}^2$ ile %0,1 hibrit AFTK’dan elde edilmiştir. En büyük hasar ise $158,33 \text{ mm}^2$ ile $337,4 \text{ m/s}$ hızla test edilen nanopartikül takviyesiz aramid numune görülmüştür. Ayrıca %0,1 MWCNT takviyeli ve $334,1 \text{ m/s}$ hızda test edilen nanopartikül takviyesiz aramid numunesinde bu değer sırasıyla $134,30 \text{ mm}^2$ ve $158,20 \text{ mm}^2$ olmuştur. Özellikle %0,1’lik hibrit ve %0,1’lik MWCNT’li kompozit numuneler neredeyse aynı hızlarda test edilmelerine rağmen arada ciddi bir hasar farkı oluşmuştur. Bu da hibrit takviyenin balistik testte başarılı olduğunu göstermektedir. %0,1 MWCNT takviyeli kompozitte delaminasyon hasarı görülmüştür.

Şekil 4.33’te verilen altıncı hız grubunda; en düşük hasarın $147,63 \text{ mm}^2$ ile %0,1 hibrit AFTK’da görüldüğü, en büyük hasarın ise $191,54 \text{ mm}^2$ ile nanopartikül takviyesiz aramid numuneden elde edildiği görülmektedir. Ayrıca %0,2 hibrit AFTK’da $165,25 \text{ mm}^2$ darbe hasarı ölçülmüştür. Hibrit AFTK’lar nanopartikül takviyesiz kompozite göre daha az hasara uğramışlardır. %0,1 hibrit takviyeli kompozitte delaminasyon hasarı gözlemlenmiştir.

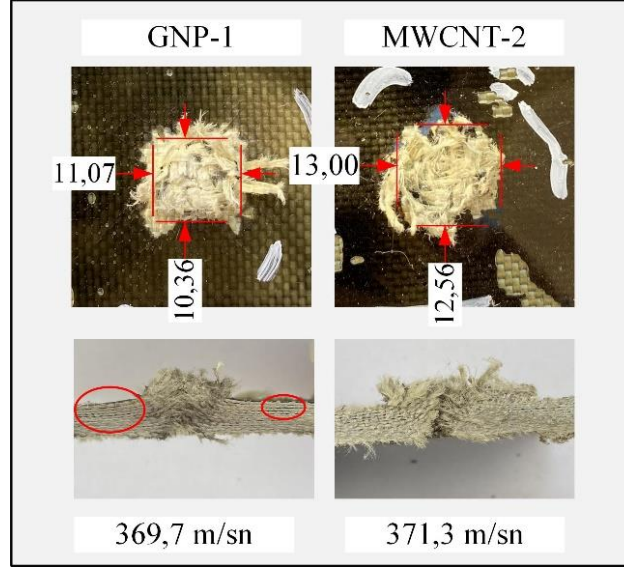


Şekil 4.33. Altıncı hız grubunda bulunan AFTK'ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri



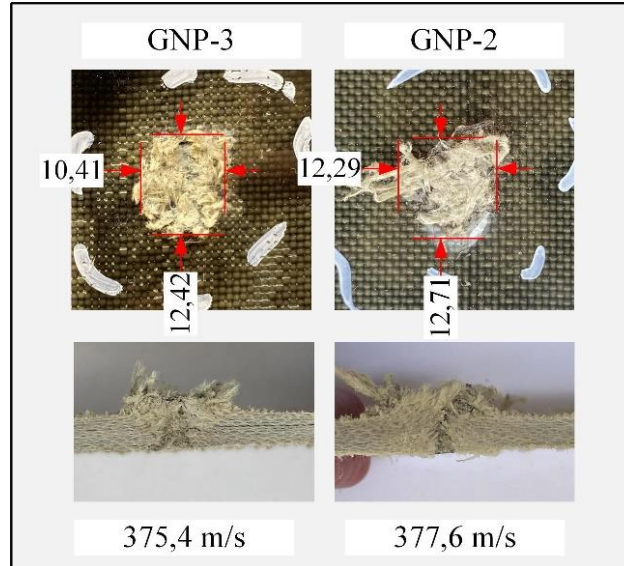
Şekil 4.34. Yedinci hız grubunda bulunan AFTK'ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri

Şekil 4.34'teki yedinci hız grubunda; %0,2 GNPlı ve %0,3 hibrit AFTK'ların hasar alanları sırasıyla $159,13 \text{ mm}^2$ ve $114,32 \text{ mm}^2$ olmuştur. Ayrıca $354,6 \text{ m/s}$ hızda test edilen ancak arada hız farkı olduğu için dahil edilmeyen %0,2 MWCNT'li kompozitin darbe alanı $136,58 \text{ mm}^2$ ölçülmüştür. Bu durum bize hibrit AFTK'ların darbe hasarını %0,2 GNP ve MWCNT içeren kompozitlerden daha iyi azalttığını göstermektedir.



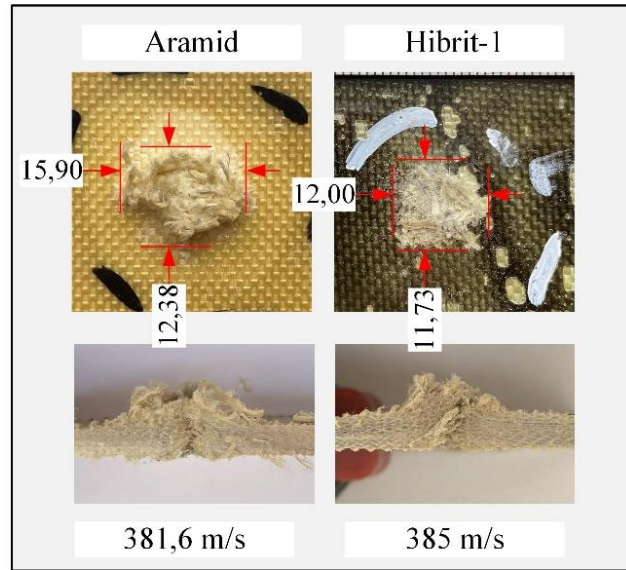
Şekil 4.35. Sekizinci hız grubunda bulunan AFTK'ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri

Şekil 4.35'te görülen %0,1 GNP'li ve %0,2 MWCNT'li kompozitlerin darbe hasar alanları sırasıyla 169,47 mm² ve 163,28 mm² olarak ölçülmüştür. %0,2 MWCNT'li kompozit nispeten daha büyük bir hızda test edilmesine rağmen %0,1 GNP'li kompozitten daha az darbe hasarına uğramıştır. %0,1 GNP içeren kompozitte delaminasyon hasarı görülmüştür.



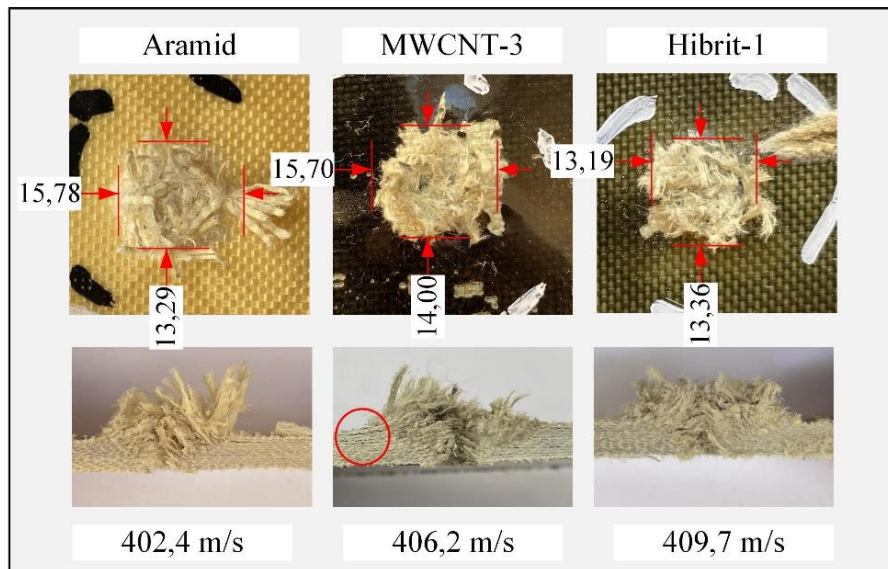
Şekil 4.36. Dokuzuncu hız grubunda bulunan AFTK'ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri

Şekil 4.36'da dokuzuncu hız grubunda bulunan %0,3 GNP ve %0,2 GNP'li AFTK'ların darbe hasar alanları sırasıyla 129,29 mm² ve 156,33 mm² olarak ölçülmüştür. GNP oranının artması darbe hasarını azaltmıştır.



Şekil 4.37. Onuncu hız grubunda bulunan AFTK'ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri

Onuncu hız grubunda, 344,3-347 m/s aralığında balistik teste tabi tutulan kompozitlerin darbe hasarları Şekil 4.37'de görölmektedir. %0,1 hibrit AFTK numunesinin darbe hasar alanı 140,76 mm² olurken takviyesiz AFTK'da bu alan 196,84 mm² olmuştur. Daha önceki yorumlarda da bahsedildiği gibi hibrit takviyesi balistik darbe hasarını ciddi oranda azaltmıştır.



Şekil 4.38. On birinci hız grubunda bulunan AFTK'ların arka yüz hasarları ve kesit görüntüleri

Son olarak on birinci hız grubuna ait olan AFTK kompozitlerin darbe hasarları Şekil 4.38'de görölmektedir. Darbe hasar alanlarını incelediğimizde, en düşük hasarın 176,22 mm² ile yine %0,1 hibrit takviyeli kompozitten elde edildiği görölmektedir.

Ayrıca aramid ve %0,2 MWCNT'li AFTK kompozitlerde darbe hasar alanı sırasıyla 209,72 mm² ve 219,8 mm² olduğu görülmüştür ve %0,2 MWCNT içeren kompozitte delaminasyon hasarı gözlemlenmiştir.

Genel olarak balistik testi değerlendirdiğimizde tam penetrasyonun gerçekleştiği kompozitlerde nanopartikül takviyesinin darbe hasarını takviyesiz kompozite göre azalttığı görülmektedir. J. Naveen ve diğ. (2019b), GNP katkısının malzemenin arayüz bağlantılarını geliştirerek darbe hasarının yayılmasını önlediğini ve bunun aslında istenmeyen bir durum olduğundan bahsetmişlerdir. Nanopartikül takviyeleri AFTK'ların arayüz bağlantılarını geliştirmiş ve darbe hasarının yayılmasını önlemiştir. Aslında darbe hasarının yayılması mermiyi geçirmeyen zırhlardan beklenen bir özelliktir. NIJ 0101.06 testine göre zırh arkasındaki macunda meydana gelen 44 mm derinliği aşan BFS'lerin künt travmalara sebebiyet vererek iç organlara hasar ve hatta ölüme sebebiyet verebileceği belirtilmiştir.

%0,1 GNP içeren AFTK'nın 292,8 m/s hızdaki mermiyi durdurduğu ve bu yönden nispeten daha düşük hızlarda (290,8 ve 288,2 m/s) mermiyi geçiren ağırlıkça %0,1 ve %0,2 MWCNT içeren kompozitlerden ve 288,7 m/s hızda mermiyi geçiren takviyesiz aramid kompozitten daha başarılı olduğu söylenebilir. J. Naveen ve diğ. (2019b), %0,25 GNP katkılı aramid epoksi kompozitin balistik performansının takviyesiz kompozite oranla daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Domun ve diğ. (2019), cam fiber/epoksi kompozite kattıkları CNT ve GNP ile saf epoksi matrisli kompozite göre balistik performansın geliştiğini belirtmişlerdir.

Yapılan literatür taramasında 10 katmanlı ve hatta 12 katmanlı üretilen zırhlarda 400 m/s balistik limit hızının belirlendiği bazı çalışmalar mevcuttur. Bu kadar düşük hızların nedenini epoksi reçinenin malzemenin esnemesini azaltarak ve darbe hasarının dar bir bölgede gerçekleşmesine neden olarak daha düşük hızlarda delinmesine sebebiyet vermiş olabileceğidir. Ancak balistik limit hızlarının belirlenememiş olması kesin bir yargıya varmamızı engellemiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, epoksi matrise GNP ve COOH ile işlevselleştirilmiş MWCNT katkı maddeleri ve bu katkıların hibrit bir kombinasyonu eklenerek aramid/epoksi kompozitlerin düzlem dışı ve darbe dayanımının artırılması amaçlanmıştır. Sonuçlar, nano katkı maddeleri ve matris arasında iyi bir bağ ile homojen bir dağılım sağlanırsa malzemenin mekanik özellikleri üzerinde önemli gelişmelerin sağlanabileceğini göstermiştir. Mekanik ve balistik testlerden elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak incelenecek olursa;

- Çekme testinin sonuçlarına göre, düzlem içi gerilmelere maruz kaldığı durumlarda nano takviyelerin AFTK malzemenin mukavemeti üzerinde çok etkili olmadığı gözlemlenmiştir. Aksine malzemenin düzlem dışı gerilmelere maruz kaldığı diğer durumlarda nano takviyeler ile ciddi gelişmeler elde edilmiştir.
- Özellikle en büyük gelişim tabakalar arası kayma mukavemetinin belirlendiği SBS testlerinde elde edilmiştir. Bu durum kullanılan nanopartiküller ile epoksi matris ve aramid takviye arasında iyi bir arayüzey etkileşimi olduğunu göstermektedir. Bu testte en büyük gelişim %54,65 ile ağırlıkça %0,2 MWCNT'li numuneden elde edilmiştir.
- SENB test sonuçları, üretilen tüm numunelerde kırılma tokluğunda referans numuneye oranla gelişim olduğunu göstermektedir. En büyük gelişim %38,15 ile ağırlıkça %0,2 MWCNT'li numuneden elde edilmiştir.
- Çentik darbe testleri, üretilen numunelerin referans numuneye oranla düşük hızlı darbe hasarına daha dirençli olduğunu göstermektedir. En büyük gelişim %41,18 ile ağırlıkça %0,1 GNP ve %0,1 hibrit AFTK numunelerde gerçekleşmiştir.
- QSPT sonuçlarını incelediğimizde, ojiv ve konik zımbanın farklı hasar ve farklı maksimum kuvvet davranışları gösterdiği tespit edilmiştir. Yapılan testte numunelerin maksimum enerji sönümleme kapasiteleri konik zımbada SPR 2 ve SPR 4 destek açıklıklarında sırasıyla %14,3 ve %32,3 ile %0,2 GNP'li kompozitten elde edilmiştir. Ojiv zımbada SPR 2 destek açıklığında maksimum enerji sönümleme kapasitesi %23,11 ile ağırlıkça %0,1 MWCNT içeren numunede gerçekleşirken, SPR 4 destek açıklığında ise bu değer %42,13 ile ağırlıkça %0,1 hibrit içeren numunede gerçekleşmiştir.
- Balistik test sonuçları, nanopartikül takviyelerinin tam penetrasyon hasarına uğrayan kompozitleri gevrekletirerek darbe hasar alanını nanopartikül takviyesiz

aramid numuneye oranla azalttığını göstermektedir. Ayrıca her ne kadar V_{50} balistik limit testi tam olarak doğrulanamasa da %0,1 GNP içeren kompozitin takviyesiz kompozite oranla mermiyi geçirmemekte daha başarılı olduğu söylenebilir.

Sonuçların bu kadar değişkenlik göstermesi her ne kadar düşük ağırlık fraksiyonları seçilerek homojen bir dağılım hedeflense de doğru bir dağılım ile bazı bölgelerde topaklanmanın önlenemediğini göstermektedir. Bu durum GNP ve MWCNT ile çalışacak olan araştırmacılar için ağırlıkça çok daha düşük fraksiyonlarda ya da aseton dışında farklı dağıtıcılarla çalışmalarını önermektedir. GNP ve MWCNT takviyelerinin epoksi reçine içerisine homojen bir şekilde dağıtılması her ne kadar iyi sonuçlar elde edilebilse de hala bir sorun teşkil etmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbandanak, S. N. H., Azghan, M. A., Zamani, A., Fallahnejad, M., Eslami-Farsani, R. and Siadati, H., 2020, Effect of graphene on the interfacial and mechanical properties of hybrid glass/Kevlar fiber metal laminates, *Journal of Industrial Textiles*, 51 (2), 2576S-2593S.
- Abtew, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C. and Cristian, I., 2019, Ballistic impact mechanisms—a review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses, *Composite Structures*, 223, 110966.
- Adams, D. and Lewis, E., 1995, Current status of composite material shear test methods, *SAMPE J.*, 31 (1), 32-41.
- Agrawal, S. G. and Rai, M. K., 2015, Performance analysis of multi walled carbon nanotube (MWCNT) bundle as VLSI interconnects, *Doctoral Dissertation*, Thapar University, India.
- Ahmad, M. A. A., Jamir, M. R. M., Majid, M. S. A., Refaai, M. R. A., Meng, C. E. and Bakar, M. A., 2022, Damage self-sensing and strain monitoring of glass-reinforced epoxy composite impregnated with graphene nanoplatelet and multiwalled carbon nanotubes, *Nanotechnology Reviews*, 11 (1), 1977-1990.
- Ahmadi-Moghadam, B. and Taheri, F., 2014, Fracture and toughening mechanisms of GNP-based nanocomposites in modes I and II fracture, *Engineering Fracture Mechanics*, 131, 329-339.
- Akella, K. and Naik, N. K., 2015, Composite armour—A review, *Journal of the Indian Institute of Science*, 95 (3), 297-312.
- Ali, A. M., Omar, M. Z., Hashim, H., Salleh, M. S. and Mohamed, I. F., 2021, Recent development in graphene-reinforced aluminium matrix composite: A review, *Reviews on Advanced Materials Science*, 60 (1), 801-817.
- Ali Charfi, M., Mathieu, R., Chatelain, J. F., Ouellet-Plamondon, C. and Lebrun, G., 2020, Effect of graphene additive on flexural and interlaminar shear strength properties of carbon fiber-reinforced polymer composite, *Journal of Composites Science*, 4 (4), 162.
- Alsaadi, M., Younus, B., Erklig, A., Bulut, M., Bozkurt, O. and Sulaiman, B., 2021, Effect of graphene nano-platelets on mechanical and impact characteristics of carbon/Kevlar reinforced epoxy hybrid nanocomposites, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235 (23), 7139-7151.
- Anonim, 2020, NATO fragment simulating projectiles (FSPs), <https://armamentresearch.com/nato-fragment-simulating-projectiles-fsps/> [Ziyaret Tarihi: 4 Ağustos 2022].
- Armstrong, K., Bevan, L. and Cole, W., 2005, Care and repair of advanced composites, *SAE International: London*.

- Ashrafi, B., Guan, J., Mirjalili, V., Zhang, Y., Chun, L., Hubert, P., Simard, B., Kingston, C. T., Bourne, O. and Johnston, A., 2011, Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 71 (13), 1569-1578.
- Athanasopoulos, N., Baltopoulos, A., Matzakou, M., Vavouliotis, A. and Kostopoulos, V., 2012, Electrical conductivity of polyurethane/MWCNT nanocomposite foams, *Polymer Composites*, 33 (8), 1302-1312.
- Ayatollahi, M. R., Shadlou, S. and Shokrieh, M. M., 2011, Fracture toughness of epoxy/multi-walled carbon nanotube nano-composites under bending and shear loading conditions, *Materials & Design*, 32 (4), 2115-2124.
- Bajya, M., Majumdar, A., Butola, B. S., Arora, S. and Bhattacharjee, D., 2021, Ballistic performance and failure modes of woven and unidirectional fabric based soft armour panels, *Composite structures*, 255, 112941.
- Balaganesan, G., Velmurugan, R., Srinivasan, M., Gupta, N. and Kanny, K., 2014, Energy absorption and ballistic limit of nanocomposite laminates subjected to impact loading, *International Journal of Impact Engineering*, 74, 57-66.
- Bandaru, A. K. and Ahmad, S., 2015, Effect of projectile geometry on the deformation behavior of Kevlar composite armors under ballistic impact, *International Journal of Applied Mechanics*, 7 (3), 1550039.
- Bandaru, A. K., Chavan, V. V., Ahmad, S., Alagirusamy, R. and Bhatnagar, N., 2016, Low velocity impact response of 2D and 3D Kevlar/polypropylene composites, *International Journal of Impact Engineering*, 93, 136-143.
- Barbero, E. J., 2017, *Introduction to composite materials design*, CRC press, Boca Raton.
- Bhatnagar, A., 2016, *Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications*, Woodhead Publishing, Sawston, UK.
- Bhatnagar, N. and Asija, N., 2016, Durability of high-performance ballistic composites. In: *Lightweight ballistic composites*, Elsevier, 231-283.
- Bilisik, K., 2017, Two-dimensional (2D) fabrics and three-dimensional (3D) preforms for ballistic and stabbing protection: A review, *Textile Research Journal*, 87 (18), 2275-2304.
- Bilisik, K. and Akter, M., 2022, Graphene nanocomposites: A review on processes, properties, and applications, *Journal of Industrial Textiles*, 51 (3_suppl), 3718S-3766S.
- Bloom, L. D., 2015, On the relationship between layup time, material properties and mould geometry in the manufacture of composite components, *Doctoral Dissertation*, University of Bristol, UK.
- Borowski, E., Soliman, E., Kandil, U. F. and Taha, M. R., 2015, Interlaminar fracture toughness of CFRP laminates incorporating multi-walled carbon nanotubes, *Polymers*, 7 (6), 1020-1045.

- Bulut, M., Erklığ, A. and Yeter, E., 2016, Hybridization effects on quasi-static penetration resistance in fiber reinforced hybrid composite laminates, *Composites Part B: Engineering*, 98, 9-22.
- Callister, W. D. and Rethwisch, D. G., 2018, *Materials science and engineering: an introduction*, Wiley, New York.
- Cao, S., Pang, H., Zhao, C., Xuan, S. and Gong, X., 2020, The CNT/PSt-EA/Kevlar composite with excellent ballistic performance, *Composites Part B: Engineering*, 185, 107793.
- Carlucci, D. E., 2007, *Ballistics: theory and design of guns and ammunition*, CRC Press, Boca Raton.
- Carr, D. and Lewis, E., 2014, Ballistic-protective clothing and body armour, In: *Protective clothing: managing thermal stress*, Woodhead Publishing, 146-170.
- Cavallaro, P. V., 2016, Effects of weave styles and crimp gradients in woven Kevlar/epoxy composites, *Experimental Mechanics*, 56 (4), 617-635.
- Cha, J., Jun, G. H., Park, J. K., Kim, J. C., Ryu, H. J. and Hong, S. H., 2017, Improvement of modulus, strength and fracture toughness of CNT/epoxy nanocomposites through the functionalization of carbon nanotubes, *Composites Part B: Engineering*, 129, 169-179.
- Cha, J., Kim, J., Ryu, S. and Hong, S. H., 2019, Comparison to mechanical properties of epoxy nanocomposites reinforced by functionalized carbon nanotubes and graphene nanoplatelets, *Composites Part B: Engineering*, 162, 283-288.
- Chand, N. and Naik, A., 2008, Development and high stress abrasive wear behavior of milled carbon fiber-reinforced epoxy gradient composites, *Polymer Composites*, 29 (7), 736-744.
- Chandrasekaran, S., Sato, N., Tölle, F., Mülhaupt, R., Fiedler, B. and Schulte, K., 2014, Fracture toughness and failure mechanism of graphene based epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 97, 90-99.
- Chang, G., Wang, C., Du, M., Liu, S. and Yang, L., 2018, Metal-coordination crosslinked N-polyindoles as recyclable high-performance thermosets and nondestructive detection for their tensile strength and glass transition temperature, *Chemical Communications*, 54 (23), 2906-2909.
- Chatterjee, S., Nafezarefi, F., Tai, N., Schlagenhauf, L., Nüesch, F. and Chu, B., 2012, Size and synergy effects of nanofiller hybrids including graphene nanoplatelets and carbon nanotubes in mechanical properties of epoxy composites, *Carbon*, 50 (15), 5380-5386.
- Cheeseman, B. A. and Bogetti, T. A., 2003, Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates, *Composite Structures*, 61 (1-2), 161-173.
- Chen, L., Jin, H., Xu, Z., Shan, M., Tian, X., Yang, C., Wang, Z. and Cheng, B., 2014, A design of gradient interphase reinforced by silanized graphene oxide and its effect

- on carbon fiber/epoxy interface, *Materials Chemistry and Physics*, 145 (1), 186-196.
- Chu, C. K. and Chen, Y. L., 2010, Ballistic-proof effects of various woven constructions, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 18 (6), 83.
- Chu, Y. and Chen, X., 2018, Finite element modelling effects of inter-yarn friction on the single-layer high-performance fabrics subject to ballistic impact, *Mechanics of Materials*, 126, 99-110.
- Comas-Cardona, S., Groenenboom, P., Binetruy, C. and Krawczak, P., 2005, A generic mixed FE-SPH method to address hydro-mechanical coupling in liquid composite moulding processes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36 (7), 1004-1010.
- Crouch, I. G., 2019, Body armour—new materials, new systems, *Defence Technology*, 15 (3), 241-253.
- Cunniff, P., Vetter, E. and Sikkema, D., 2002, High performance “M5” fiber for ballistics structural composites, In *Proceedings of the 23rd Army Science Conference*, Orlando, FL, USA, 2–5 December 2002.
- Cunniff, P. M., 1992, An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact, *Textile Research Journal*, 62 (9), 495-509.
- Çelik, Y. H., Kilickap, E. and Koçyiğit, N., 2019, Evaluation of drilling performances of nanocomposites reinforced with graphene and graphene oxide, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100 (9), 2371-2385.
- Dabrowska, A., 2019, Nanocarbon/epoxy composites: Preparation, properties, and applications, *Nanocarbon and its Composites* (pp. 421-448), Woodhead Publishing.
- Das, S., Jagan, S., Shaw, A. and Pal, A., 2015, Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact, *Composite Structures*, 120, 129-140.
- Dasgupta, K., 2020, Role of carbon nanotubes in the ballistic properties of boron carbide/carbon nanotube/ultrahigh molecular weight polyethylene composite armor, *Ceramics International*, 46 (4), 4137-4141.
- de Tomasi Tessari, B., Vargas, N., Dias, R. R., Pereira, I. M., Beltrami, L. V. R., Lavoratti, A., Poletto, M. and Zattera, A. J., 2022, Influence of the addition of graphene nanoplatelets on the ballistic properties of HDPE/aramid multi-laminar composites, *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 61 (4), 363-373.
- Deka, B. K. and Maji, T. K., 2012, Effect of silica nanopowder on the properties of wood flour/polymer composite, *Polymer Engineering & Science*, 52 (7), 1516-1523.
- Deng, Y., Jia, H. and Li, J., 2022, Numerical investigation of 2A12 aluminum alloy thin targets impacted under oblique angles by blunt-nosed high-strength projectiles, *Materials Today Communications*, 30, 103118.

- Dewangan, M. K. and Panigrahi, S. K., 2021, Factors influencing the ballistic impact mechanisms of textile composite materials: a review, *Polymers for Advanced Technologies*, 32 (5), 1901-1923.
- Dimeski, D., Srebrenkoska, V. and Mirceska, N., 2015, Ballistic impact resistance mechanism of woven fabrics and their composites, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4 (12), 107-112.
- Djele, A. and Karakuzu, R., 2021, An experimental study on quasi-static indentation, low-velocity impact and damage behaviors of laminated composites at high temperatures, *Polymers and Polymer Composites*, 29 (9_suppl), S969-S977.
- Domun, N., Hadavinia, H., Zhang, T., Liaghat, G., Vahid, S., Spacie, C., Paton, K. R. and Sainsbury, T., 2017, Improving the fracture toughness properties of epoxy using graphene nanoplatelets at low filler content, *Nanocomposites*, 3 (3), 85-96.
- Domun, N., Hadavinia, H., Zhang, T., Sainsbury, T., Liaghat, G. and Vahid, S., 2015, Improving the fracture toughness and the strength of epoxy using nanomaterials—a review of the current status, *Nanoscale*, 7 (23), 10294-10329.
- Domun, N., Kaboglu, C., Paton, K. R., Dear, J. P., Liu, J., Blackman, B. R., Liaghat, G. and Hadavinia, H., 2019, Ballistic impact behaviour of glass fibre reinforced polymer composite with 1D/2D nanomodified epoxy matrices, *Composites Part B: Engineering*, 167, 497-506.
- Domun, N., Paton, K., Hadavinia, H., Sainsbury, T., Zhang, T. and Mohamud, H., 2017, Enhancement of fracture toughness of epoxy nanocomposites by combining nanotubes and nanosheets as fillers, *Materials*, 10 (10), 1179.
- Domun, N., Paton, K. R., Blackman, B. R. K., Kaboglu, C., Vahid, S., Zhang, T., Dear, J. P., Kinloch, A. J. and Hadavinia, H., 2020, On the extent of fracture toughness transfer from 1D/2D nanomodified epoxy matrices to glass fibre composites, *Journal of Materials Science*, 55 (11), 4717-4733.
- Du, J., Bai, J. and Cheng, H., 2007, The present status and key problems of carbon nanotube based polymer composites, *Express Polymer Letters*, 1 (5), 253-273.
- Ejaz, H., Mubashar, A., Uddin, E., Ali, Z. and Arif, N., 2022, Effect of functionalised and non-functionalised GNPs addition on strength properties of high viscous epoxy adhesive and lap shear joints, *Polymer Testing*, 113, 107680.
- El Messiry, M., 2019, *Protective armor engineering design*, Apple Academic Publisher, Cambridge.
- Erden, S. and Ho, K., 2017, Fiber reinforced composites, In: *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, Woodhead Publishing, 51-79.
- Faber, K. T. and Evans, A. G., 1983a, Crack deflection processes—I. Theory, *Acta metallurgica*, 31 (4), 565-576.
- Faber, K. T. and Evans, A. G., 1983b, Crack deflection processes—II. Experiment, *Acta Metallurgica*, 31 (4), 577-584.

- Gama, B. A. and Gillespie, J. W., 2008, Punch shear based penetration model of ballistic impact of thick-section composites, *Composite Structures*, 86 (4), 356-369.
- García-Castillo, S. K., Sánchez-Sáez, S., López-Puente, J., Barbero, E. and Navarro, C., 2007, Impact behaviour of composite panel subjected to in-plane load, 6th International Conference on Composite Materials (ICCM-16), Kyoto, Japan, Jul 8-13.
- Gibson, J., McKee, J., Freihofer, G., Raghavan, S. and Gou, J., 2013, Enhancement in ballistic performance of composite hard armor through carbon nanotubes, *International Journal of Smart and Nano Materials*, 4 (4), 212-228.
- Giglio, M. and Manes, A., 2011, Terminal ballistic effect on the crack growth assessment of a helicopter rotor drive, *Engineering Fracture Mechanics*, 78 (8), 1542-1554.
- Goda, I., 2022, Ballistic resistance and energy dissipation of woven-fabric composite targets: Insights on the effects of projectile shape and obliquity angle, *Defence Technology*, In press.
- Gopinath, G., Zheng, J. Q. and Batra, R. C., 2012, Effect of matrix on ballistic performance of soft body armor, *Composite Structures*, 94 (9), 2690-2696.
- Guo, Z. and Chen, W., 2016, Dynamic reverse ballistics penetration of Kevlar® fabric with different indenter geometries. Paper presented at the Proceedings of the American Society for Composites: Thirty-First Technical Conference, September 19-22, Williamsburg, VA.
- Guo, Z., Zheng, J. and Chen, W., 2017, Reverse ballistics penetration of Kevlar® fabric with different indenters at different loading rates, *Textile Research Journal*, 87 (10), 1165-1176.
- Häger, A. M. and Davies, M., 1993, Short-fiber reinforced, high temperature resistant polymers for a wide field of tribological applications, *Advances in Composite Tribology*, Elsevier, Amsterdam.
- Hani, A., Roslan, A., Mariatti, J. and Maziah, M., 2012, Body armor technology: a review of materials, construction techniques and enhancement of ballistic energy absorption, In: *Advanced Materials Research*, 488–489, 806–812.
- Hanif, W. W., Risby, M. and Noor, M. M., 2015, Influence of carbon nanotube inclusion on the fracture toughness and ballistic resistance of twaron/epoxy composite panels, *Procedia Engineering*, 114, 118-123.
- He, S., Petkovich, N. D., Liu, K., Qian, Y., Macosko, C. W. and Stein, A., 2017, Unsaturated polyester resin toughening with very low loadings of GO derivatives, *Polymer*, 110, 149-157.
- Heikal, M., Abdel-Gawwad, H. A. and Ababneh, F. A., 2018, Positive impact performance of hybrid effect of nano-clay and silica nano-particles on composite cements, *Construction and Building Materials*, 190, 508-516.

- Henry, L., Schneller, A., Doerfler, J., Mueller, W. M., Aymonier, C. and Horn, S., 2016, Semi-continuous flow recycling method for carbon fibre reinforced thermoset polymers by near-and supercritical solvolysis, *Polymer Degradation and Stability*, 133, 264-274.
- Her, S.-C. and Zhang, K. C., 2021, Mode II fracture analysis of GNP/epoxy nanocomposite film on a substrate, *Polymers*, 13 (16).
- Hoa, S. V., 2009, *Principles of the manufacturing of composite materials*, DEStech Publications, Inc, Lancaster, PA, USA.
- Horrocks, A. R. and Anand, S. C., 2000, *Handbook of technical textiles*, Woodhead Publishing, Cambridge.
- Hudspeth, M., Chu, J.-m., Jewell, E., Lim, B., Ytuarte, E., Tsutsui, W., Horner, S., Zheng, J. and Chen, W., 2017, Effect of projectile nose geometry on the critical velocity and failure of yarn subjected to transverse impact, *Textile Research Journal*, 87 (8), 953-972.
- Hutchings, I., Wilson, S., Alpas, A. and Clyne, T., 2000, *Comprehensive composite materials*, vol. 3, University of Cambridge, UK, 501.
- Ingle, S., Yerramalli, C. S., Guha, A. and Mishra, S., 2021, Effect of material properties on ballistic energy absorption of woven fabrics subjected to different levels of inter-yarn friction, *Composite Structures*, 266, 113824.
- Ingle, S., Yerramalli, C. S., Guha, A. and Mishra, S., 2022, Numerical investigation on hybridization of woven fabric armour to enhance ballistic protection, *Mechanics of Materials*, 170, 104324.
- Ismail, M. F., Sultan, M. T. H., Hamdan, A., Shah, A. U. M. and Jawaid, M., 2019, Low velocity impact behaviour and post-impact characteristics of kenaf/glass hybrid composites with various weight ratios, *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (3), 2662-2673.
- Jani, S. P., Kumar, A. S., Khan, M. A., Sajith, S. and Saravanan, A., 2021, Influence of natural filler on mechanical properties of hemp/Kevlar hybrid green composite and analysis of change in material behavior using acoustic emission, *Journal of Natural Fibers*, 18 (11), 1580-1591.
- Jenq, S., Jing, H.-S. and Chung, C., 1994, Predicting the ballistic limit for plain woven glass/epoxy composite laminate, *International Journal of Impact Engineering*, 15 (4), 451-464.
- Jiang, J., Cheng, Y., Liu, Y., Wang, Q., He, Y. and Wang, B., 2015, Intergrowth charring for flame-retardant glass fabric-reinforced epoxy resin composites, *Journal of Materials Chemistry A*, 3 (8), 4284-4290.
- Jordan, J. B., Naito, C. J. and Haque, B. Z., 2014, Quasi-static, low-velocity impact and ballistic impact behavior of plain weave E-glass/phenolic composites, *Journal of Composite Materials*, 48 (20), 2505-2516.

- Kalantari, M., Dong, C. and Davies, I. J., 2016, Multi-objective analysis for optimal and robust design of unidirectional glass/carbon fibre reinforced hybrid epoxy composites under flexural loading, *Composites Part B: Engineering*, 84, 130-139.
- Kar, K. K., 2016, *Composite materials: processing, applications, characterizations*, Springer, Berlin Heidelberg, Germany.
- Kar, S., Pattnaik, S. and Sutar, M. K., 2022, Ballistic performance of green woven fabrics – A short review, *Materials Today: Proceedings*, 62, 5965-5970.
- Karahan, M., Jabbar, A. and Karahan, N., 2015, Ballistic impact behavior of the aramid and ultra-high molecular weight polyethylene composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34 (1), 37-48.
- Karthick, P. and Ramajeyathilagam, K., 2021, Numerical study of influence of target thickness and projectile incidence angle on ballistic resistance of the GFRP composites, *Materials Today: Proceedings*, 47, 992-999.
- Katiyar, A., Nandi, T. and Katiyar, P., 2021, Energy absorption of graphene and CNT infused hybrid shear thickening fluid embedded textile fabrics, *Journal of Polymer Research*, 28 (9), 334.
- Kilic, U., Daghash, S. M. and Ozbulut, O. E., 2018, Mechanical characterization of polymer nanocomposites reinforced with graphene nanoplatelets, In: *International congress on polymers in concrete (ICPIC 2018)*, 689-695.
- Konada, N. K., Suman, K., Bammidi, R. and Kumar, B., 2020, Investigation on mechanical, thermal and bonding properties of MWCNTs reinforced aramid/epoxy composite, *Nano Hybrids and Composites*, 30, 27-40.
- Konarzewski, V. H. C., Spiekemann, F. L. and Santana, R. M. C., 2019, Natural ageing of polyaramide fiber from ballistic armor, *Polímeros*, 29, 1-7.
- Kostagiannakopoulou, C., Loutas, T., Sotiriadis, G., Markou, A. and Kostopoulos, V., 2015, On the interlaminar fracture toughness of carbon fiber composites enhanced with graphene nano-species, *Composites Science and Technology*, 118, 217-225.
- Krenkel, W., 2008, *Ceramic matrix composites: fiber reinforced ceramics and their applications*, John Wiley & Sons, New York.
- Kuclourya, T., Mudliar, S., Jain, M. K. and Thamba, N. B., 2021, A review on graphene reinforced composites for ballistic applications, *International Conference on Design, Automation, and Control (ICDAC 2020)*, Vellore, India.
- Kulkarni, S. G., Gao, X. L., Horner, S. E., Zheng, J. Q. and David, N. V., 2013, Ballistic helmets – their design, materials, and performance against traumatic brain injury, *Composite Structures*, 101, 313-331.
- La Rosa, A., Banatao, D., Pastine, S., Latteri, A. and Cicala, G., 2016, Recycling treatment of carbon fibre/epoxy composites: Materials recovery and characterization and environmental impacts through life cycle assessment, *Composites Part B: Engineering*, 104, 17-25.

- La Rosa, A. D., Blanco, I., Banatao, D. R., Pastine, S. J., Björklund, A. and Cicala, G., 2018, Innovative chemical process for recycling thermosets cured with recyclamines® by converting bio-epoxy composites in reusable thermoplastic—an LCA study, *Materials*, 11 (3), 353.
- Ladani, R. B., Bhasin, M., Wu, S., Ravindran, A. R., Ghorbani, K., Zhang, J., Kinloch, A. J., Mouritz, A. P. and Wang, C. H., 2018, Fracture and fatigue behaviour of epoxy nanocomposites containing 1-D and 2-D nanoscale carbon fillers, *Engineering Fracture Mechanics*, 203, 102-114.
- Laurenzi, S., Pastore, R., Giannini, G. and Marchetti, M., 2013, Experimental study of impact resistance in multi-walled carbon nanotube reinforced epoxy, *Composite Structures*, 99, 62-68.
- Lee, J. H., Rhee, K. Y. and Park, S. J., 2010, The tensile and thermal properties of modified CNT-reinforced basalt/epoxy composites, *Materials Science and Engineering: A*, 527 (26), 6838-6843.
- Lee, S. W. R. and Sun, C. T., 1993a, Dynamic penetration of graphite/epoxy laminates impacted by a blunt-ended projectile, *Composites Science and Technology*, 49 (4), 369-380.
- Lee, S. W. R. and Sun, C. T., 1993b, A quasi-static penetration model for composite laminates, *Journal of Composite Materials*, 27 (3), 251-271.
- Legzdins, C. F., Samarasekera, I. V. and Meech, J. A., 1997, MMCX—An expert system for metal matrix composite selection and design, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 36 (3), 177-202.
- Li, W., Dichiaro, A. and Bai, J., 2013, Carbon nanotube–graphene nanoplatelet hybrids as high-performance multifunctional reinforcements in epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 74, 221-227.
- Li, Y., Zhang, H., Huang, Z., Bilotti, E. and Peijs, T., 2017, Graphite nanoplatelet modified epoxy resin for carbon fibre reinforced plastics with enhanced properties, *Journal of Nanomaterials*, 2017.
- Li, Z., Wang, R. G., Young, R. J., Deng, L. B., Yang, F., Hao, L., Jiao, W. C. and Liu, W. B., 2013, Control of the functionality of graphene oxide for its in epoxy nanocomposites application, *Polymer*, 54 (23), 6437-6446.
- Li, Z. Y., Xue, Y. S., Sun, B. Z. and Gu, B. H., 2022, Ballistic penetration damages of hybrid plain-woven laminates with carbon, Kevlar and UHMWPE fibers in different stacking sequences, *Defence Technology*, In Press.
- Liang, Y., Chen, X. and Soutis, C., 2022, Review on manufacture of military composite helmet, *Applied Composite Materials*, 29 (1), 305-323.
- Liao, Y. H., Marietta-Tondin, O., Liang, Z., Zhang, C. and Wang, B., 2004, Investigation of the dispersion process of SWNTs/SC-15 epoxy resin nanocomposites, *Materials Science and Engineering: A*, 385 (1), 175-181.

- Liu, S., Chevali, V. S., Xu, Z., Hui, D. and Wang, H., 2018, A review of extending performance of epoxy resins using carbon nanomaterials, *Composites Part B: Engineering*, 136, 197-214.
- Luo, Y., Zhao, Y., Cai, J., Duan, Y. and Du, S., 2012, Effect of amino-functionalization on the interfacial adhesion of multi-walled carbon nanotubes/epoxy nanocomposites, *Materials & Design*, 33, 405-412.
- Ma, L., Zhang, J. and Teng, C., 2020, Covalent functionalization of aramid fibers with zinc oxide nano-interphase for improved UV resistance and interfacial strength in composites, *Composites Science and Technology*, 188, 107996.
- Ma, S. and Webster, D. C., 2018, Degradable thermosets based on labile bonds or linkages: A review, *Progress in Polymer Science*, 76, 65-110.
- Mahadevaswamy, M. B., Aradhya, R., Bhattacharya, S. and Jagannathan, S. R., 2022, Effect of hybrid carbon nanofillers at percolation on electrical and mechanical properties of glass fiber reinforced epoxy, *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (26), e52439.
- Mativenga, P. T., Shuaib, N. A., Howarth, J., Pestalozzi, F. and Woidasky, J., 2016, High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite, *CIRP Annals*, 65 (1), 45-48.
- Mazilova, T. I., Sadanov, E. V. and Mikhailovskij, I. M., 2019, Tensile strength of graphene nanoribbons: An experimental approach, *Materials Letters*, 242, 17-19.
- Miner, R., 2013, Computational interior ballistics modeling, Master of Science Thesis, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico.
- Miracle, D. B. and Donaldson, S. L., 2001, *ASM Handbook – Volume 21: Composites*, ASM International, Materials Park, USA.
- Mirjalili, V., 2011, Aspects of the fracture toughness of carbon nanotube modified epoxy polymer composites, Doctor of Philosophy thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada.
- Moeng, M. S. and Boffard, K. D., 2017, Ballistics in trauma, In: *Penetrating Trauma*, Berlin, 177-183.
- Mohammad, N. A., Ahmad, S. H., Chen, R. S. and Mohammad, N. E. N. A., 2022, Mechanical performance and thermal stability of modified epoxy nanocomposite with low loading of graphene platelets, *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (12), 51812.
- Mohammed, M., Al-Zubaidi, S., Bahrain, S. H. K. and Sapuan, S., 2021, 1 - State-of-the-art review on recent advances and perspectives of ballistic composite materials, *Composite Solutions for Ballistics*, 3-54.
- Montazeri, A. and Montazeri, N., 2011, Viscoelastic and mechanical properties of multi walled carbon nanotube/epoxy composites with different nanotube content, *Materials & Design*, 32 (4), 2301-2307.

- Mouritz, A. P., 2012, Introduction to aerospace materials, Woodhead Publishing, Cambridge.
- Mudzi, P., Wu, R., Firouzi, D., Ching, C. Y., Farncombe, T. H. and Ravi Selvaganapathy, P., 2022, Use of patterned thermoplastic hot film to create flexible ballistic composite laminates from UHMWPE fabric, *Materials & Design*, 214, 110403.
- Naik, N. K., Shrirao, P. and Reddy, B. C. K., 2006, Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation, *International Journal of Impact Engineering*, 32 (9), 1521-1552.
- Naik, S., Dandagwhal, R. and Loharkar, P. K., 2020, A review on various aspects of Kevlar composites used in ballistic applications, *Materials Today: Proceedings*, 21, 1366-1374.
- NajiMehri, H., Shariati, M., Zamani, P., da Silva, L. F. M. and Ghahremani-Moghadam, D., 2022, Investigating on the influence of multi-walled carbon nanotube and graphene nanoplatelet additives on residual strength of bonded joints subjected to partial fatigue loading, *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (18), 52069.
- Namdev, A., Telang, A. and Purohit, R., 2021, Effect of graphene nano platelets on mechanical and physical properties of carbon fibre/epoxy hybrid composites, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-14.
- Namdev, A., Telang, A. and Purohit, R., 2022, Experimental investigation on mechanical and wear properties of GNP/carbon fiber/epoxy hybrid composites, *Materials Research Express*, 9 (2), 025303.
- Naresh, K., Rajalakshmi, K., Vasudevan, A., Senthil Kumaran, S., Velmurugan, R. and Shankar, K., 2018, Effect of nanoclay and different impactor shapes on glass/epoxy composites subjected to quasi-static punch shear loading, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 4 (3), 345-357.
- Nasser, J., Zhang, L. and Sodano, H., 2020, Aramid nanofiber interlayer for improved interlaminar properties of carbon fiber/epoxy composites, *Composites Part B: Engineering*, 197, 108130.
- Naveen, J., Jawaid, M., Zainudin, E., Sultan, M. T. and Yahaya, R., 2019a, Effect of graphene nanoplatelets on the ballistic performance of hybrid kevlar/cocos nucifera sheath-reinforced epoxy composites, *Textile Research Journal*, 89 (21-22), 4349-4362.
- Naveen, J., Jawaid, M., Zainudin, E. S., Sultan, M. T. H. and Yahaya, R., 2019b, Improved interlaminar shear behaviour of a new hybrid Kevlar/Cocos nucifera sheath composites with graphene nanoplatelets modified epoxy matrix, *Fibers and Polymers*, 20 (8), 1749-1753.
- Negoita, C., Cristache, N. and Bodor, M., 2016, The epoxy resin-history and perspectives, *Materiale Plastice*, 53 (3), 564-571.

- Nirmal, U., Hashim, J. and Megat Ahmad, M. M. H., 2015, A review on tribological performance of natural fibre polymeric composites, *Tribology International*, 83, 77-104.
- Overcash, M., Twomey, J., Asmatulu, E., Vozzola, E. and Griffing, E., 2018, Thermoset composite recycling—Driving forces, development, and evolution of new opportunities, *Journal of Composite Materials*, 52 (8), 1033-1043.
- Pach, J., Frączek, N. and Kaczmar, J., 2020, The effects of hybridisation of composites consisting of aramid, carbon, and hemp fibres in a quasi-static penetration test, *Materials*, 13 (20), 4686.
- Pandya, K. S., Akella, K., Joshi, M. and Naik, N. K., 2012, Ballistic impact behavior of carbon nanotube and nanosilica dispersed resin and composites, *Journal of Applied Physics*, 112 (11), 113522.
- Pandya, K. S. and Naik, N. K., 2015, Analytical and experimental studies on ballistic impact behavior of carbon nanotube dispersed resin, *International Journal of Impact Engineering*, 76, 49-59.
- Pandya, K. S., Pothnis, J. R., Ravikumar, G. and Naik, N. K., 2013, Ballistic impact behavior of hybrid composites, *Materials & Design*, 44, 128-135.
- Pantano, A., 2012, Carbon nanotube based composites: Processing, properties, modelling and application, Smithers Rapra Publishing, USA.
- Park, R. and Jang, J., 1998, The effects of hybridization on the mechanical performance of aramid/polyethylene intraply fabric composites, *Composites Science and Technology*, 58 (10), 1621-1628.
- Park, S. J. and Seo, M. K., 2011, Interface science and composites, Academic Press, Amsterdam.
- Pasquali, M. and Gaudenzi, P., 2017, Effects of curvature on high-velocity impact resistance of thin woven fabric composite targets, *Composite Structures*, 160, 349-365.
- Phadke, N. L., 2018, , Introduction to contact molding – wet lay-up, [Ziyaret Tarihi: 15.12.2018]
- Pham, T. M. and Hao, H., 2016, Review of concrete structures strengthened with FRP against impact loading, *Structures*, 7, 59-70.
- Pîrvu, C. and Deleanu, L., 2021, Failure investigation of layered LFT SB1plus package after ballistic tests for level IIA, *Polymers*, 13 (17), 2912.
- Pullicino, E., Zou, W., Gresil, M. and Soutis, C., 2017, The effect of shear mixing speed and time on the mechanical properties of GNP/epoxy composites, *Applied Composite Materials*, 24 (2), 301-311.
- Qi, X., Wu, X., Gong, Y., Ning, H., Liu, F., Zou, R., Zhou, S., Song, Z., Xiang, C. and Hu, N., 2021, Interlaminar mechanical properties of nano-and short-aramid fiber

- reinforced glass fiber-aluminum laminates: a comparative study, *Journal of Materials Science*, 56 (21), 12198-12211.
- Qin, W., Vautard, F., Drzal, L. T. and Yu, J., 2015, Mechanical and electrical properties of carbon fiber composites with incorporation of graphene nanoplatelets at the fiber–matrix interphase, *Composites Part B: Engineering*, 69, 335-341.
- Quan, D., Urdániz, J. L. and Ivanković, A., 2018, Enhancing mode-I and mode-II fracture toughness of epoxy and carbon fibre reinforced epoxy composites using multi-walled carbon nanotubes, *Materials & Design*, 143, 81-92.
- Rafiq, A., Merah, N., Boukhili, R. and Al-Qadhi, M., 2017, Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay composite, *Polymer Testing*, 57, 1-11.
- Rahman, M., Hosur, M., Zainuddin, S., Vaidya, U., Tauhid, A., Kumar, A., Trovillion, J. and Jeelani, S., 2013, Effects of amino-functionalized MWCNTs on ballistic impact performance of E-glass/epoxy composites using a spherical projectile, *International Journal of Impact Engineering*, 57, 108-118.
- Rahman, M. M., Zainuddin, S., Hosur, M. V., Malone, J. E., Salam, M. B. A., Kumar, A. and Jeelani, S., 2012, Improvements in mechanical and thermo-mechanical properties of e-glass/epoxy composites using amino functionalized MWCNTs, *Composite Structures*, 94 (8), 2397-2406.
- Rahmanian, S., Suraya, A., Shazed, M., Zahari, R. and Zainudin, E., 2014, Mechanical characterization of epoxy composite with multiscale reinforcements: carbon nanotubes and short carbon fibers, *Materials & Design*, 60, 34-40.
- Rajole, S., Ravishankar, K. and Kulkarni, S., 2020, Performance study of jute-epoxy composites/sandwiches under normal ballistic impact, *Defence Technology*, 16 (4), 947-955.
- Reddy, P. R. S., Reddy, T. S., Madhu, V., Gogia, A. K. and Rao, K. V., 2015, Behavior of E-glass composite laminates under ballistic impact, *Materials & Design*, 84, 79-86.
- Reed, R., Madhukar, M., Thaicharoenporn, B. and Martovetsky, N., 2014, Low-temperature mechanical properties of glass/epoxy laminates, 1574, 109-116.
- Reis, P. N. B., Ferreira, J. A. M., Zhang, Z. Y., Benameur, T. and Richardson, M. O. W., 2013, Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix, *Composites Part B: Engineering*, 46, 7-14.
- Rosengren, K., Hsiao-Wecksler, E. and Horn, G., 2014, Fighting fires without falling: effects of equipment design and fatigue on firefighter's balance and gait, *Ecological Psychology*, 26, 167-175.
- Saba, N., Jawaid, M. and Sultan, M. T. H., 2019, 1 - An overview of mechanical and physical testing of composite materials. In M. Jawaid, M. Thariq, and N. Saba (Eds.), *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (pp. 1-12): Woodhead Publishing, Cambridge.

- Sadeghi, M. and Pol, M. H., 2019, Investigation of behaviors of glass/epoxy laminate composites reinforced with carbon nanotubes under quasi-static punch shear loading, *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 21 (4), 1535-1556.
- Safri, S., Sultan, M., Yidris, N. and Mustapha, F., 2014, Low velocity and high velocity impact test on composite materials—a review, *The International Journal of Engineering and Science*, 3 (9), 50-60.
- Sahbaz Karaduman, N., Karaduman, Y., Özdemir, H. and Ozdemir, G., 2017, Textile reinforced structural composites for advanced applications, In: *Textiles for Advanced Applications*; Intech Open: London, UK, 87-133.
- Sayer, M., Bektaş, N. B. and Sayman, O., 2010, An experimental investigation on the impact behavior of hybrid composite plates, *Composite Structures*, 92 (5), 1256-1262.
- Seidel, G. D. and Shirodkar, N., 2022, Exploring possible synergy between carbon-based nanofiller reinforcements with regards to fracture toughness enhancement in dual filler epoxy nanocomposites, Paper presented at the AIAA SCITECH 2022 Forum.
- Seydibeyoglu, M. O., Mohanty, A. K. and Misra, M., 2017, *Fiber technology for fiber-reinforced composites*, Woodhead Publishing, Cambridge.
- Shadlou, S., Alishahi, E. and Ayatollahi, M., 2013, Fracture behavior of epoxy nanocomposites reinforced with different carbon nano-reinforcements, *Composite Structures*, 95, 577-581.
- Shirodkar, N., Cheng, S. and Seidel, G. D., 2021, Enhancement of Mode I fracture toughness properties of epoxy reinforced with graphene nanoplatelets and carbon nanotubes, *Composites Part B: Engineering*, 224, 109177.
- Shokrieh, M., Ghoreishi, S., Esmkhani, M. and Zhao, Z., 2014, Effects of graphene nanoplatelets and graphene nanosheets on fracture toughness of epoxy nanocomposites, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 37 (10), 1116-1123.
- Showalter, D. D., Gooch, W. A., Burkins, M. S. and Koch, R. S., 2008, Ballistic testing of SSAB ultra-high-hardness steel for armor applications, *Proceedings of the 24th international ballistic symposium*, New Orleans, LA, 634-642.
- Song, Y. S. and Youn, J. R., 2005, Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites, *Carbon*, 43 (7), 1378-1385.
- Sukanya, N. M. and Sundaram, S. K., 2022a, Low-velocity impact studies on Kevlar/epoxy composites reinforced with carboxyl functionalized graphene, *Materials Today: Proceedings*.
- Sukanya, N. M. and Sundaram, S. K., 2022b, Ballistic performance of synergistically toughened Kevlar/epoxy composite targets reinforced with multiwalled carbon nanotubes/graphene nanofillers, *Polymer Composites*, 43 (2), 782-797.

- Supian, A., Sapuan, S., Zuhri, M., Zainudin, E. and Ya, H. H., 2018, Hybrid reinforced thermoset polymer composite in energy absorption tube application: A review, *Defence Technology*, 14 (4), 291-305.
- Sutherland, L. S. and Guedes Soares, C., 2012, The use of quasi-static testing to obtain the low-velocity impact damage resistance of marine GRP laminates, *Composites Part B: Engineering*, 43 (3), 1459-1467.
- Tabiei, A. and Nilakantan, G., 2008, Ballistic impact of dry woven fabric composites: a review, *Applied Mechanics Reviews*, 61 (1), 01080111-01080113.
- Taghizadeh, S. A., Liaghat, G., Niknejad, A. and Pedram, E., 2019, Experimental study on quasi-static penetration process of cylindrical indenters with different nose shapes into the hybrid composite panels, *Journal of Composite Materials*, 53 (1), 107-123.
- Tam, D. K. Y., Ruan, S., Gao, P. and Yu, T., 2012, 10 - High-performance ballistic protection using polymer nanocomposites. In E. Sparks (Ed.), *Advances in Military Textiles and Personal Equipment* (pp. 213-237): Woodhead Publishing.
- Tan, W., Stallard, J. C., Smail, F. R., Boies, A. M. and Fleck, N. A., 2019, The mechanical and electrical properties of direct-spun carbon nanotube mat-epoxy composites, *Carbon*, 150, 489-504.
- Tang, L.-C., Zhang, H., Sprenger, S., Ye, L. and Zhang, Z., 2012, Fracture mechanisms of epoxy-based ternary composites filled with rigid-soft particles, *Composites Science and Technology*, 72 (5), 558-565.
- Tehrani, M., Boroujeni, A., Hartman, T., Haugh, T., Case, S. and Al-Haik, M., 2013, Mechanical characterization and impact damage assessment of a woven carbon fiber reinforced carbon nanotube-epoxy composite, *Composites Science and Technology*, 75, 42-48.
- Thakur, V. K., Thakur, M. K. and Gupta, R. K., 2017, *Hybrid polymer composite materials: processing*, Woodhead Publishing, Cambridge.
- Tham, C. Y., Tan, V. B. C. and Lee, H. P., 2008, Ballistic impact of a KEVLAR® helmet: Experiment and simulations, *International Journal of Impact Engineering*, 35 (5), 304-318.
- Theodore, M., Hosur, M., Thomas, J. and Jeelani, S., 2011, Influence of functionalization on properties of MWCNT-epoxy nanocomposites, *Materials Science and Engineering: A*, 528 (3), 1192-1200.
- Tjong, S. C., 2012, *Polymer composites with carbonaceous nanofillers: properties and applications*, John Wiley & Sons, Weinheim.
- Tüzemen, M. Ç., Khakzad, F. and Salamci, E., 2021, Investigation of tensile properties of glass fiber/epoxy nanocomposites laminates enhanced with graphene nanoparticles, *Fibers and Polymers*, 22 (5), 1441-1448.

- Ulus, H., Üstün, T., Eskizeybek, V., Şahin, Ö. S., Avcı, A. and Ekrem, M., 2014, Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties, *Applied Surface Science*, 318, 37-42.
- Usta, F., Mullaoglu, F., Türkmen, H. S., Balkan, D., Mecitoglu, Z., Kurtaran, H. and Akay, E., 2016, Effects of thickness and curvature on impact behaviour of composite panels, *Procedia Engineering*, 167, 216-222.
- Uzay, Ç. and Geren, N., 2020, Advanced technologies for fiber reinforced polymer composite manufacturing, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (4), 245-257.
- Üstün, H. S., Toksoy, A. K. and Tanoğlu, M., 2022, Investigation of hybridization effect on ballistic performance of multi-layered fiber reinforced composite structures, *Journal of Composite Materials*, 56 (15), 2411-2431.
- Van Hoof, J., Cronin, D., Worswick, M., Williams, K. and Nandlall, D., 2001, Numerical head and composite helmet models to predict blunt trauma, In :19th International Symposium of Ballistics, Interlaken, Switzerland.
- Vidil, T., Tournilhac, F., Musso, S., Robisson, A. and Leibler, L., 2016, Control of reactions and network structures of epoxy thermosets, *Progress in Polymer Science*, 62, 126-179.
- Vignesh, S., Surendran, R., Sekar, T. and Rajeswari, B., 2020, Ballistic impact analysis of graphene nanosheets reinforced kevlar-29, *Materials Today: Proceedings*.
- Walter, T., Subhash, G., Sankar, B. and Yen, C., 2010, Monotonic and cyclic short beam shear response of 3D woven composites, *Composites Science and Technology*, 70 (15), 2190-2197.
- Wan, S., Jiang, L. and Cheng, Q., 2020, Design principles of high-performance graphene films: Interfaces and alignment, *Matter*, 3 (3), 696-707.
- Wan, Y. J., Gong, L. X., Tang, L. C., Wu, L. B. and Jiang, J. X., 2014, Mechanical properties of epoxy composites filled with silane-functionalized graphene oxide, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 79-89.
- Wang, L., Kanesalingam, S., Nayak, R. and Padhye, R., 2014, Recent trends in ballistic protection, *Textiles and Light Industrial Science and Technology*, 3, 37-47.
- Wang, S., Xue, H., Guo, S., Cao, M., Cong, F., Araby, S. and Meng, Q., 2021, Graphene/nanorubber reinforced electrically conductive epoxy composites with enhanced toughness, *Journal of Applied Polymer Science*, 138 (14), 50163.
- Wang, X., Jin, J. and Song, M., 2013, An investigation of the mechanism of graphene toughening epoxy, *Carbon*, 65, 324-333.
- Wang, Y., Chen, X., Young, R. and Kinloch, I., 2016, Finite element analysis of effect of inter-yarn friction on ballistic impact response of woven fabrics, *Composite structures*, 135, 8-16.

- Wang, Y., Miao, Y., Huang, L., Swenson, D., Yen, C.-F., Yu, J. and Zheng, J. Q., 2016, Effect of the inter-fiber friction on fiber damage propagation and ballistic limit of 2-D woven fabrics under a fully confined boundary condition, *International Journal of Impact Engineering*, 97, 66-78.
- Wang, Z., Soutis, C. and Gresil, M., 2021, Fracture toughness of hybrid carbon fibre/epoxy enhanced by graphene and carbon nanotubes, *Applied Composite Materials*, 28 (4), 1111-1125.
- Wilhelm, M. and Bir, C., 2008, Injuries to law enforcement officers: The backface signature injury, *Forensic Science International*, 174 (1), 6-11.
- Wypych, G., 2020, *Handbook of UV degradation and stabilization*, Elsevier Science: Amsterdam, Netherland.
- Xue, G., Zhang, B., Sun, M., Zhang, X., Li, J., Wang, L. and Song, C., 2019, Morphology, thermal and mechanical properties of epoxy adhesives containing well-dispersed graphene oxide, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 88, 11-18.
- Yahaya, R., Hidayah, N., Norhayaty, Z., Nor Hafizah, M. J., Sapuan, S. M. and Ilyas, R. A., 2021, 3 - Levels of ballistic protection and testing. In Y. Nawab, S. M. Sapuan, and K. Shaker (Eds.), *Composite Solutions for Ballistics* (pp. 77-108): Woodhead Publishing.
- Yahaya, R., Sapuan, S., Jawaaid, M., Leman, Z. and Zainudin, E., 2015, Effect of layering sequence and chemical treatment on the mechanical properties of woven kenaf–aramid hybrid laminated composites, *Materials & Design*, 67, 173-179.
- Yang, S. Y., Lin, W. N., Huang, Y. L., Tien, H. W., Wang, J. Y., Ma, C. C. M., Li, S. M. and Wang, Y. S., 2011, Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites, *Carbon*, 49 (3), 793-803.
- Yang, Y. and Chen, X., 2019, Influence of fabric architecture on energy absorption efficiency of soft armour panel under ballistic impact, *Composite structures*, 224, 111015.
- Yang, Z., Ren, J., Zhang, Z., Chen, X., Guan, G., Qiu, L., Zhang, Y and Peng, H., 2015, Recent advancement of nanostructured carbon for energy applications, *Chemical reviews*, 115 (11), 5159-5223.
- Yi, X. S., Du, S. and Zhang, L., 2017a, *Composite materials engineering, Volume 2: Different Types of Composite Materials*, Springer, Beijing, China.
- Yi, X. S., Du, S. and Zhang, L., 2017b, *Composite materials engineering, Volume 1: Fundamentals of Composite Materials*, Springer, Beijing, China.
- Zhou, H., Du, X., Liu, H. Y., Zhou, H., Zhang, Y. and Mai, Y.-W., 2017, Delamination toughening of carbon fiber/epoxy laminates by hierarchical carbon nanotube-short carbon fiber interleaves, *Composites Science and Technology*, 140, 46-53.

- Zhou, Y. and Chen, X., 2015, A numerical investigation into the influence of fabric construction on ballistic performance, *Composites Part B: Engineering*, 76, 209-217.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Serkan BATI
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	: Gaziantep Üniversitesi	2012
Yüksek Lisans	: Batman Üniversitesi	2017
Doktora	: Batman Üniversitesi	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2012-2012	ORALSAN Makina Takım San. Tic. A.Ş.	Üretim ve Planlama
2013-	Batman Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Konstrüksiyon ve İmalat

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR