



T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

NANO PARÇACIK TAKVİYELİ TABAKALI KOMPOZİT
MALZEMELERİN MOD II KIRILMA MEKANİĞİ

Yüksek Lisans Tezi

Coşkun YILDIZ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Fatih DARICIK

ALANYA

2022

Coşkun YILDIZ

NANO PARÇACIK TAKVİYELİ TABAKALI KOMPOZİT
MALZEMELERİN MOD II KIRILMA MEKANİĞİ

2022

T.C.
ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NANO PARÇACIK TAKVİYELİ TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN
MOD II KIRILMA MEKANİĞİ

Yüksek Lisans Tezi

Coşkun YILDIZ

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Program Adı: Nanobilim ve Nanomühendislik

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Fatih DARICIK

ALANYA

(2022)

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Coşkun YILDIZ

TEŞEKKÜR SAYFASI

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında sabır ve nezaketiyle çalışmalarımı yönlendiren, hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Fatih DARICIK' a ve çalışmama her konuda sabırla yardımcı olan eşime, kızıma ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması süresince;

Çukurova Üniversitesi Arş. Gör. İsmail AKTİTİZ'e ve laboratuvar imkânlarından yararlandığım Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü çalışanlarına yardımları için teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

NANO PARÇACIK TAKVİYELİ TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN MOD II KIRILMA MEKANİĞİ

Coşkun YILDIZ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,

Haziran, 2022 (76 Sayfa)

Polimer matrisli ve sürekli lif takviyeli tabakalı kompozitler ileri mühendislik uygulamalarında yaygın kullanıma sahiptir. Tabakalı kompozit malzemeler düzlemsel yüklere karşı oldukça dayanıklıyken düzlem dışı etkilere karşı dayanımları azdır. Özellikle düzlem dışı darbe ile katmanlar arasında tabaka ayrışmaları (delaminasyonlar) oluşmaktadır. Yine düzlem dışı yükler ile delaminasyonlar gelişmekte ve malzemenin hasarı meydana gelebilmektedir. Eğme yükleri nedeniyle tabakalar arasında oluşan kayma gerilmeleri delaminasyonların ilerlemesine ve malzemenin kırılmasına (mod II kırılması) neden olmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerde mod II kırılma direncini artırmak için malzemeyi düzlemine dik bileşenler ile takviye eden yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler ise malzemenin sürekli lif yapısına zarar vererek düzlemsel mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle son yıllarda tabakalı kompozit malzemeleri nano parçacıklar ile takviye ederek mod II kırılma direncini artırmaya yönelik çalışmalar ilgi çekici hale gelmiştir. Tabakalar arasındaki polimer matris bakımından zengin hacimlerin kırılma direncini artırmak yapılan çalışmaların ana motivasyonudur. Nano parçacık ilavesi ile takviye lif ve polimer matris arasındaki yapışma kuvvetini artırmak da hedeflenmektedir. Bu projede epoksi matrisi karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş E-cam lifi takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin mod II kırılma davranışları araştırılmıştır. Farklı ebatlardaki karbon nanotüpler ağırlıkça farklı oranlarda kullanılarak epoksi matris takviye edilmiştir. Güçlendirilmiş matris malzeme ile üretilen kompozit malzemelerde karbon nanotüplerin mod II kırılma tokluğuna ve çatlak gelişimine etkisi incelenmiştir. Karbon nanotüplerin epoksi matrisin kırılma yüzeylerinde ve epoksi ile E-cam lifi ara yüzünde neden olduğu etkiler gözlemlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Mod II Kırılma Tokluğu, Karbon Nano Tüp (KNT), E-cam lifi, Kompozit malzemeler, Epoksi.

ABSTRACT

MOD II FRAGRANCE MECHANICS OF NANOPARTICLE REINFORCED LAMINATED COMPOSITE MATERIALS

Coşkun YILDIZ

Department of Metallurgy and Materials Engineering
Graduate School of Alanya Alaaddin Keykubat University,

June, 2022

Continuous fiber-reinforced polymer laminated composites are widely used in advanced engineering applications. While laminated composite materials are highly resistant to in-plane loads, they are less resistant to out-of-plane effects. Especially with out-of-plane impact, layer separations (delaminations) occur between layers. Out-of-plane loads also cause propagation of delamination and failure of the material. The interlaminar shear stresses that are the result of bending load, are the main reason for the delamination growth and the interlaminar fracture (mod II fracture). To increase the mode II interlaminar fracture resistance, some methods reinforce the material with a third component perpendicular to its plane. These methods, on the other hand, can negatively affect the in-plane mechanical properties by damaging the continuous fibers in the composite material. For this reason, investigations to increase the mode II interlaminar fracture resistance by reinforcing laminated composite materials with nanoparticles have become interesting in recent years. Increasing the fracture resistance of polymer matrix-rich volumes between layers is the main motivation of these researches. In these studies, it is also aimed to increase the adhesion force between the reinforcement fiber and the polymer matrix by adding nanoparticles.

In this project, the mode II interlaminar fracture behavior of carbon nanotube modified E-glass/epoxy laminated composite materials will be investigated. The epoxy matrix will be reinforced by using three different types of carbon nanotubes at five different weight ratios. The effects of sizes and weight ratios of the carbon nanotubes on mod II fracture toughness and crack propagation in the carbon nanotube modified composite materials will be examined. The effects of carbon nanotubes on the fracture surfaces of the epoxy matrix and the epoxy and E-glass fiber interface will be observed.

Keywords: Mode II Fracture Toughness, Carbon Nano Tube (CNT), E-glass fiber, Composite materials, Epoxy.

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-------------------------------------|
| İÇ KAPAK SAYFASI | |
| JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI | Error! Bookmark not defined. |
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ..... | i |
| TEŞEKKÜR SAYFASI..... | ii |
| ÖZET..... | iii |
| ABSTRACT..... | iv |
| İÇİNDEKİLER | v |
| TABLolar LİSTESİ | vii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | viii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | x |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. LİTERATÜR..... | 3 |
| 2.1 Tabakalı Kompozit Malzemelerde Tabakalar Arası Mod II Kırılması..... | 3 |
| 2.2 Tabakalı Kompozit Malzemelerde Mod II Kırılma Direncinin İyileştirilmesi | 7 |
| 2.3 Mod II Kırılması Test Metotlarının Gelişimi | 23 |
| 2.3.1. Kompliyans kalibrasyon yöntemi (CCM) | 25 |
| 2.3.2. Uygunluğa dayalı kiriş yöntemi (CBBM) | 28 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM..... | 32 |
| 3.1 Tabakalı Kompozit Malzeme İmalatı | 32 |
| 3.2 Mod II Kırılma Testleri..... | 36 |
| 3.3 Hasara Uğramış ENF Numunelerinin Eğilme Testleri | 39 |
| 3.4 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri | 40 |
| 4. BULGULAR | 42 |
| 4.1 E-cam lifi/epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin Mod II Tabakalar Arası Kırılma Analizleri..... | 42 |
| 4.1.1. Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kırılma davranışı | 45 |
| 4.1.2. TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kırılma davranışı | 46 |
| 4.1.3. TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kırılma davranışı | 48 |
| 4.1.4. TİP 3 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kırılma davranışı | 49 |
| 4.2. ENF Numunelerinin Arta Kalan Eğilme Dayanımları..... | 50 |

| | |
|---|----|
| 4.2.1. Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin eğilme davranışı | 51 |
| 4.2.2. TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin eğilme davranışı..... | 52 |
| 4.2.3. TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin eğilme davranışı..... | 54 |
| 4.2.4. TİP 3 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin eğilme davranışı..... | 55 |
| 4.3. Tabakalar Arası Kırılma Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri | 57 |
| 5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER | 65 |
| 6. KAYNAKLAR..... | 67 |
| ÖZGEÇMİŞ | 76 |

TABLULAR LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Tablo 3.1 E-cam lifi ve epoksi reçinenin teknik özellikleri. | 33 |
| Tablo 3.2 Karbon nano tüp partiküllerin teknik özellikleri ve boyutları. | 34 |
| Tablo 4.1 Mod II tabakalar arası kırılma ve eğilme test adetleri. | 43 |
| Tablo 4.2 Mod II kırılma testleri için $P_{cr}-\delta_{cr}$, $P_{max}-\delta_{max}$ ve G_{IIc} değerleri. | 44 |
| Tablo 4.3 Üç nokta eğme testleri için P_{max} , δ_{max} ve σ_{max} değerleri..... | 51 |



ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1 Kırılma modları; (a) Mod I, ayrılma kırılması (b) Mod II, kesme kırılması (c) Mod III, yırtma kırılması | 2 |
| Şekil 2.1 Mod II testlerinin şematik gösterimi | 24 |
| Şekil 2.2 Mod II testlerinin şematik gösterimi | 24 |
| Şekil 3.1a) Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan sarf malzemeler, b) vakum torbalama tekniği ile tabakalı kompozit levha üretimi. | 33 |
| Şekil 3.2 Çok duvarlı karbon nanotüp ve karboksilik asit (COOH) ile karbon nanotüpün fonksiyonlaştırılması. | 33 |
| Şekil 3.3 Manyetik karıştırma ve ultrasonik banyo. | 36 |
| Şekil 3.4 Su jeti ile kesim. | 36 |
| Şekil 3.5 Yapay delaminasyonlu mod II test numunesi. | 37 |
| Şekil 3.6 Mod II tabakalar arası kırılma testi düzeneği..... | 38 |
| Şekil 3.7 Uygunluk ve maksimum yük noktası belirleme grafiği | 39 |
| Şekil 3.8 FEI marka Quanta 650 Field Emission SEM model taramalı elektron mikroskobu. | 41 |
| Şekil 4.1 ENF numunesinin üniversal test cihazına yerleşimi. | 42 |
| Şekil 4.2 ENF numunesinin $P_{max}-\delta_{max}$ noktasındaki durumu..... | 44 |
| Şekil 4.3 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin $P-\delta$ grafiği..... | 45 |
| Şekil 4.4 Katkısız E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerde tabakalar arası çatlak gelişiminin gözle takibi. | 46 |
| Şekil 4.5 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait $P-\delta$ grafikleri..... | 47 |
| Şekil 4.6 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait G_{IIc} değerleri. | 47 |
| Şekil 4.7 TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerde tabakalar arası çatlak gelişimi. | 48 |
| Şekil 4.8 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait $P-\delta$ değerleri. | 48 |
| Şekil 4.9 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait G_{IIc} değerleri. | 49 |
| Şekil 4.10 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 3 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait $P-\delta$ değerleri. | 50 |
| Şekil 4.11 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 3 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait G_{IIc} değerleri. | 50 |
| Şekil 4.12 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin deformasyonu. .. | 52 |
| Şekil 4.13 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin $P-\delta$ grafiği..... | 52 |
| Şekil 4.14 TİP1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi malzemelerin 3-nokta eğme testine göre $P-\delta$ grafiği. | 53 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.15 TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin deformasyonu..... | 53 |
| Şekil 4.16 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 1 karbon nano tüp katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait σ_{max} değerleri..... | 54 |
| Şekil 4.17 TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi malzemelerin 3-nokta eğme testine göre $P-\delta$ grafiği..... | 55 |
| Şekil 4.18 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 2 karbon nano tüp katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait σ_{max} değerleri..... | 55 |
| Şekil 4.19 TİP 3 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi malzemelerin 3-nokta eğme testine göre $P-\delta$ grafiği..... | 56 |
| Şekil 4.20 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 3 karbon nano tüp katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait σ_{max} değerleri..... | 56 |
| Şekil 4.21 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kırılma yüzeyi..... | 57 |
| Şekil 4.22 Statik yük altında kırılan katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin matris bakımından zengin tabakalar arası kırılma yüzeyi..... | 57 |
| Şekil 4.23 TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/ epoksi tabakalı kompozitin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri..... | 58 |
| Şekil 4.24 TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/ epoksi tabakalı kompozitin matris bakımından zengin bölgelerde oluşan oluklu lif yatak görüntüleri..... | 59 |
| Şekil 4.25 TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/ epoksi tabakalı kompozitin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri..... | 60 |
| Şekil 4.26 TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/ epoksi tabakalı kompozitte görülen hasar mekanizmalarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri..... | 60 |
| Şekil 4.27 TİP 2 karbon nano tüp partiküllerin epoksi üzerinde dağılımı..... | 61 |
| Şekil 4.28 TİP 3 KNT katkılı E-cam lifi/ epoksi tabakalı kompozitin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri..... | 61 |
| Şekil 4.29 TİP 3 karbon nano tüp partiküllerin E-cam lifi üzerinde dağılımı..... | 62 |
| Şekil 4.30 TİP 3 KNT'lerin dışarı çekilmesi sonucu oluşan boşluklar..... | 63 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

| | |
|------------|---|
| a | Çatlak uzunluğu, mm |
| a_0 | Tabakalar arası yapay çatlak uzunluğu, mm |
| A | Kırılma yüzey alanı, mm ² |
| A_1 | MCC metoduna göre düzeltme faktörü |
| B | Yorulma yükü altında çatlak ilerlemesi için malzeme sabiti |
| C | Kompliyans, mm/N |
| E_1 | 1 yönünde elastisite modülü, GPa |
| E_2 | 2 yönünde elastisite modülü, GPa |
| G | Birim şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı, kJ/mm ² |
| G_I | Mod I yüklemesi altında birim şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı, kJ/mm ² |
| G_{II} | Mod II yüklemesi altında birim şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı, kJ/mm ² |
| $G_{I/II}$ | Karışık mod yüklemesi altında birim şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı, kJ/mm ² |
| G_c | Tabakalar arası kırılma tokluğu, kJ/mm ² |
| G_{Ic} | Mod I yüklemesi altında tabakalar arası kırılma tokluğu, kJ/mm ² |
| G_{IIc} | Mod II yüklemesi altında tabakalar arası kırılma tokluğu, kJ/mm ² |
| G_{Ip} | Kararlı çatlak gelişimi için gerekli birim şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı, kJ/mm ² |
| G_{max} | Yorulma çevrimleri altında maksimum şekil değiştirme enerjisi yayılma hızı, kJ/mm ² |
| G_T | Toplam birim şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı, kJ/mm ² |
| G_{12} | Normali 1 ekseni olan düzlemde 2 ekseni boyunca kayma modülü, GPa |
| h | Numune kalınlığı, mm |
| H | Kırılma yüzeyleri oluşturmak için yapılması gerekli iş, Nmm |
| I | Atalet momenti, mm ⁴ |
| K_{II} | Mod II yüklemesi altında gerilme yığılma faktörü, Pa√m |
| L | Numune uzunluğu, mm |
| m | Yorulma yükü altında çatlak ilerlemesi için malzeme sabiti |

| | |
|----------------|--|
| m_a | Hava ortamındaki kompozit numune ağırlığı, gr |
| m_s | Yoğunluk ölçümü için matrisi yakılarak uçurulmuş cam liflerin ağırlığı, gr |
| m_w | Su içerisindeki kompozit numune ağırlığı, gr |
| n | CC metoduna göre düzeltme faktörü |
| P | Kuvvet, N |
| P_{cr} | Tabakalar arası çatlağı birim alan kadar ilerletmek için gerekli kuvvet, N |
| P_{max} | Her bir çevrimdeki maksimum kuvvet, N |
| R | Yük uygulama noktaları arası minimum açıklığın maksimum açıklığa oranı |
| S_1 | 1 yönündeki çekme dayanımı, MPa |
| S_2 | 2 yönündeki çekme dayanımı, MPa |
| t | Sonlu elemanın kalınlığı, mm |
| u | Yük uygulama noktaları arası açıklık, mm |
| U | Statik yüke maruz malzemede elastik deformasyon için yapılan iş, Nmm |
| V_f | Hacimsel lif oranı, % |
| γ_{12} | Kayma birim şekil değişimi |
| δ | Üç nokta eğme testinde yük uygulama noktalarının yer değiştirmesi, mm |
| δ_{cr} | Birim kırılma yüzeyi elde edildiği andaki yük uygulama noktalarının yer değiştirmesi, mm |
| δ_{min} | Yük uygulama noktalarının minimum yer değiştirmesi, mm |
| δ_{max} | Yük uygulama noktalarının maksimum yer değiştirmesi, mm |
| ϵ_1 | 1 yönündeki birim şekil değişimi |
| ϵ_2 | 2 yönündeki birim şekil değişimi |
| μ | Kayma modülü, GPa |
| v | y yönündeki yer değiştirme, mm |
| v_i | y eksenini boyunca i. düğümdeki yer değiştirme, mm |
| ν_{12} | Major Poisson oranı |
| ρ_c | Tabakalı kompozit malzemenin yoğunluğu, gr/cm ³ |
| ρ_f | E-cam lifinin yoğunluğu, gr/cm ³ |

| | |
|-------------|--------------------------------------|
| σ_x | x yönündeki aksenal gerilme, MPa |
| σ_y | y yönündeki aksenal gerilme, MPa |
| τ_{xy} | xy düzlemindeki kayma gerilmesi, MPa |
| τ_{yz} | yz düzlemindeki kayma gerilmesi, MPa |
| τ_{xz} | xz düzlemindeki kayma gerilmesi, MPa |

Kısaltmalar

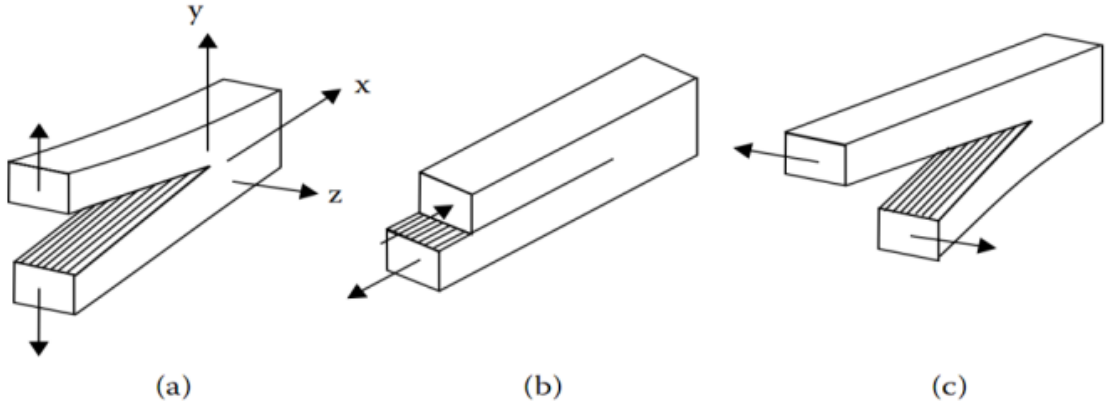
| | |
|-------|--------------------------------|
| CFRP | Karbon fiber takviyeli polimer |
| KNT | Karbon nanotüp |
| TDKNT | Tek duvarlı karbon nanotüp |
| ÇDKNT | Çoğul duvarlı karbon nanotüp |
| ENF | Uç çentikli eğilme |
| DCB | Çift konsol kiriş |
| SEM | Taramalı elektron mikroskobu |

1. GİRİŞ

Sürekli lif takviyeli tabakalı kompozit malzemeler, hafif bileşenlerle birlikte istenen mekanik ve fiziksel özelliklerin tasarlanabilmeleri nedeniyle son yıllarda mühendislik uygulamalarında popülerlik kazanmıştır. Bu malzemeler genellikle bir matrise gömülü cam, grafit, bor veya diğer liflerden oluşmaktadır. Tabakalı kompozit malzemeler mühendislere yüksek özgül dayanım ve yüksek elastisite modülü sunmakta ve bu sayede mühendislik uygulamalarında genel mühendislik malzemelerinin yerine yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte genel mühendislik malzemeleri izotropik mekanik özelliklere sahipken tabakalı kompozit malzemeler ortotropik davranış göstermektedir. Tabakalı kompozit malzemelerin mekanik ve hasar davranışlarının hesaplanması ve modellenmesi izotropik malzemelere göre daha karmaşıktır. Ayrıca tabakalı kompozit malzemeler heterojendir ve çeşitli doğal kusurlara sahiptir. Tabakalı kompozit malzemelerde hasar türü ve kırılma mekaniği yükleme türüne göre değişmektedir ve bileşenlerin (lif/matris) özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Lif takviyeli tabakaların yerleşim sırası ve liflerin serim açısı da hasar mekanizmalarını etkilemektedir. Çatlak genellikle giderek daha fazla uygulanan bir yük ile ilerler. Katastrofik hasardan kısa bir süre önce makroskopik bir kırık oluşturmak üzere birleşir (Emmanuel,2018).

Fiber takviyeli kompozitler matris ve liflerden oluşur. Burada matris, lifleri bir arada tutar ve malzeme boyunca yük aktarımı sağlar. Lifler ise yük taşıma kapasitesine sahip yapılardır. Kompozit malzemeler izotropik malzemelere göre dayanım ve hasar mekanizmaları bakımından oldukça karmaşık yapıdadır. Kompozit malzemelerin dayanımı takviye lif açısı, tabakaların dizilim sırası, yük çeşidi, çevresel faktörler gibi birçok etkene bağlıdır. Kompozit malzemelerde hasar mekanizmaları liflerin kopması, matriste mikro çatlakların oluşması, fiber ve matris arasındaki bağların ayrılması ve delaminasyon şeklinde olur. Tabakalı kompozitlerde en sık karşılaşılan hasar tiplerinden birisi delaminasyondur (Irina vd. , 2015).

Delaminasyon hasarının oluşumu ve malzemenin bu hasar ile kırılması, malzemeye etkileyen yüklere göre farklı biçimlerde gelişebilir. Tabakalı kompozit malzemenin maruz kaldığı yükleme türüne göre açılma modu (Mod I), kayma modu (Mod II), yırtılma modu (Mod III) veya bu kırılma modlarının bileşkeleri delaminasyon çatlağının gelişimine neden olabilir.



Şekil 1.1 Kırılma modları; (a) Mod I, ayrılma kırılması (b) Mod II, kesme kırılması (c) Mod III, yırtma kırılması (Mirjalili vd. ,2014)

Delaminasyon direnci, yapısal uygulamalar için kompozit malzemelerin önemli bir özelliğidir. Delaminasyon, kompozit malzemeleri havacılık ve yapısal uygulamalar için daha az kullanışlı hale getiren çatlakların başlaması ve yayılması nedeniyle oluşur. Katmanlar arası çatlakların deneysel olarak başlaması ve yayılmasının araştırılması için farklı yayılma yükleme modları (I, II veya III) kullanılmaktadır. Mod I yüklemesi altında delaminasyon büyümesi, çift konsol kırıli (DCB) numunelerle gerçekleştirilir. Buna karşılık, Mod II (Uç Çentikli Eğilme) testi 0,5-1 mm/dk hızda hareket eden çapraz kafa ile basit mesnetli kırılin eğilmesi ile yapılmaktadır (Argüelles vd. , 2010; Dahlen vd. ,1994).

Tabakalı kompozit malzemeler düzlemsel yüklere karşı oldukça dayanıklıyken düzlem dışı etkilere karşı dayanımları azdır. Özellikle düzlem dışı darbe ile katmanlar arasında tabaka ayrışmaları (delaminasyonlar) oluşmaktadır. Yine düzlem dışı yükler ile delaminasyonlar gelişmekte ve malzemenin hasarı meydana gelebilmektedir. Eğme yükleri nedeniyle tabakalar arasında oluşan kayma gerilmeleri delaminasyonların ilerlemesine ve malzemenin kırılmasına (mod II kırılması) neden olmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerde mod II kırılma direncini artırmak için malzemeyi düzlemine dik bileşenler ile takviye eden yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler ise malzemenin sürekli lif yapısına zarar vererek düzlemsel mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle son yıllarda tabakalı kompozit malzemeleri nano parçacıklar ile takviye ederek mod II kırılma direncini artırmaya yönelik çalışmalar ilgi çekici hale gelmiştir. Tabakalar arasındaki polimer matris bakımından zengin hacimleri kırılma direncini artırmak yapılan çalışmaların ana motivasyonudur. Nano parçacık ilavesi ile takviye lif ve polimer matris arasındaki yapışma kuvvetini artırmak da hedeflenmektedir.

2. LİTERATÜR

2.1 Tabakalı Kompozit Malzemelerde Tabakalar Arası Mod II Kırılması

Kırılma mekaniği, kırılma olayını mekaniğin temel prensiplerini kullanarak makro ve mikro açılardan inceleyen bilim dalıdır (Yayla, 2007). Bir malzemenin veya yapının içerisinde bulunan kusurların ve çatlakların o malzemedeki dayanım kaybına etkisi kırılma mekaniğinin konularındandır. Kırılma mekaniği analizlerinin amacı belirgin bir kusur veya çatlak içeren malzemede çatlak gelişiminin başlangıcını hesaplayabilmektir (Carlsson vd. , 2014).

Tabakalı kompozit malzemeler endüstriyel uygulamalarda sıklıkla plak, kabuk veya levha formunda kullanılmaktadır. Kompozit levhalar kullanım alanlarında eğme yüklerine maruz kalmaktadır. Eğme yükü ise kompozit malzemede olası mikro boşlukları ve tabakalar arası çatlakları kayma kırılmasına zorlamaktadır. Kompozit malzemede tabakalar arasında ilerleyen ve gözle görünmeyen çatlaklar malzemenin hasarına ve kullanılamaz hale gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle son otuz yılda tabakalı kompozit malzemelerin mod II kırılma karakteristiği üzerine birçok çalışma yapılmıştır.

Kompozitlerin test edilmesi için mod II kırılma numunesi olarak Uç Çentikli Eğilme (ENF) numunesi ilk olarak Russell ve Street tarafından tanıtılmıştır (Russell & Street, 1982,1985). Mod II ENF test numunesinin temel amacı, kritik gerinim enerjisi yayılım oranını belirlemektir. Delaminasyonların kırılma mekaniği genellikle gerinim enerjisi yayılım hızına dayanır ve kırılma işi kırılma tokluğu olarak ifade edilir. Sonuç olarak, döngüsel yükleme sırasında statik tabakalar arası kırılma tokluğunun yanı sıra çatlak yayılma oranını ölçmek için birçok yeni kırılma testi geliştirilmiştir. Bu tür testlerin ve standart test prosedürlerinin çoğu, lif yönü boyunca katlar arasında bir delaminasyonun yayıldığı tek yönlü $[0]_n$ tabakalarla sınırlıdır. Çok yönlü katmanlara sahip tabakalı kompozitlerde, çatlak komşu katmanlar arasında dallanma eğilimi gösterebilir ve bu da kırılma analizinde eş düzlemlili varsayımı geçersiz kılar (Nicholls & Galagher 1983; Robinson & Song 1992; Shi vd. ,1993).

Tabakalar arasında sert reçine filmleri (ara yapraklar) bulunan kompozitler, çatlak yolu seçimine bağlı olarak (yani, çatlakın sert ara katmanda kohezif olarak mı yoksa film-kompozit ara yüzeyinde yapışkan olarak mı yayılıyorsa) kendine özgü delaminasyon direnci davranışı sergileyebilir (Özdil & Carlsson, 1992).

Dokuma kumaş kompozitlerde bir delaminasyon çatlağı gelişim esnasında matris ve birbirine geçen ipliklerle etkileşime girecek ve bunun sonucunda değişen büyüme direncine maruz kalacaktır (Alif vd. , 1997). Kalınlık doğrultusunda takviye içeren kompozitlerde ise geniş lif köprüsü alanları ile karşılaşabilir, bu mekanizma lineer elastik kırılma mekaniğine dayalı çatlak gelişimini gösteren eğriler ile uyumlu değildir (Cox vd. , 1997).

Cam/epoksi kompozitlerde, fiber çekmeleri, genellikle görsel inceleme ile incelenebilen, tabakalar arası kırılma hasarının yaygın türleridir (Laffan vd. , 2012; Bullegas vd. , 2016) . Cam/epoksi tabakaların toplam enerji yayılım hızı, eksenel yüklemde hasarın başlamasını ve yayılmasını tespit etmeye yardımcı olan önemli bir parametredir (Laffan vd. , 2012) .

Karbon lifi/PEI ve cam lifi/PEI tabakalı kompozit malzemelerin mod I ve mod II yüklemeleri altında kırılma tokluklarının ortam sıcaklığının artması ile düştüğü, delaminasyon gelişimi için gerekli şekil değiştirme enerjisi yayılım hızının ise arttığı görülmüştür. Sıcaklık artışıyla birlikte PEI matris ve karbon lifi arasındaki adezyon kuvvetinin azalması ile çatlak ucunun dallara ayrılması, liflerin saçaklanıp köprü oluşturması gibi birçok farklı etken ortaya çıkmıştır (Kim vd. , 2004) .

Cam lifi/epoksi tabakalı kompozitlerde mod II tabakalar arası çatlak gelişimi belirli bir yere kadar kararlı bir şekilde daha sonra ise katastrofik olarak gerçekleşmektedir. Ön çatlak içeren ENF numunelerinde eğme yükü çatlak başlangıcına kadar doğrusal olarak artmakta ancak çatlak ilerlemesi ile $P-\delta$ eğrisi yatay asimptota paralel olmaktadır. Çatlağın ilk 7 mm' lik ilerlemesinde kararlı çatlak gelişimi görülmektedir (Anyfantis vd. , 2010). Benzer sonuçlara Gliszczynski vd. (2021) tarafından yapılan deneysel ve nümerik araştırmalarla da ulaşılmıştır. Ön çatlak içeren numuneler, ENF testi sırasında kararlı bir çatlak gelişimi göstermiş ve nümerik analiz sonuçları deneysel G_{IIc} değerleri ile uyum sağlamıştır.

Desai vd. (2020) Tek yönlü cam/epoksi kompozitler için toplam enerji yayılım oranlarını, Kompakt Gerilim Kesme (CTS) ve Dört Noktalı Eğilme (FPB) Karışık Mod (I/II) kırılma numunelerini kullanarak değerlendirmişlerdir. Deneysel çalışma için tek yönlü cam elyaf tabakalar kullanılmıştır. Toplam enerji yayılım hızının, CTS ve FPB Karışık Mod (I/II) kırılma numuneleri için yükleme açısına ve çatlak konumlarına bağlı olduğu görülmüştür. Toplam enerji yayılım hızının, tek yönlü cam/epoksi kompozitler için yükleme açısı ve enerjinin türüne bağlı olduğu görülmüştür. Mod II yüklemesinde

bir çatlağı başlatmak için gereken enerjinin mod I durumuna göre oldukça yüksek olduğu görülmüştür.

Benzeggagh & Kenane (1996) tek yönlü E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzeme için mod I, mod II ve karışık mod (mod I&II) tabakalar arası kırılma tokluğunu deneysel olarak incelemiştir. Deneysel sonuçlar ve araştırmacıların sunduğu yarı deneysel eşitlikler ile hesaplanan kritik şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı (G_c) değerleri uyumluluk göstermiştir.

Kompozit katmanların lif serim açıları da mod II tabakalar arası kırılma tokluğuna etki etmektedir. Dokuma cam elyaf /polyesterden oluşturulan tabakalı kompozitlerde en yüksek G_{IIc} değeri 45 derece lif serim açısına sahip ardışık tabakalar arasında görülürken en düşük G_{IIc} değeri 0/90 lif serim açısına sahip ardışık tabakalar arasında görülmüştür. En yüksek çatlak gelişim direnci (G_{IIp}) ise 30 derecelik lif serim açısına sahip ardışık tabakalar arasında görülmüştür (Triki ve diğ. 2016). Ancak tek yönlü E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozitlerde çatlak ilerleme yönü ile lif yönü arasındaki açı arttıkça G_{IIc} değeri azalmaktadır. 0//0 ara yüzünde görülen G_{IIc} değeri 0//90 ara yüzündeki G_{IIc} değerinin iki katıdır. Bununla birlikte tek yönlü E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozitlerde G_{IIp} değeri delaminasyonlu ardışık tabakaların lif serim açısından bağımsız olup neredeyse bütün lif serim açılarında (0,15,45,60,90) eşit olarak gözlenmiştir (Salamat-Talab vd. , 2021).

Shetty vd. , (2000) açılı katlı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemeden hazırladıkları ve 0//0, +45//-45, +60//-60 ve 90//90 açılı, tabaka ara yüzlerinde ön çatlak bulunan çift konsol giriş numunelerin mod I yüklemesi altında kırılma tokluğunu araştırmışlardır. En düşük kırılma tokluğu 0//0 ara yüzünde delaminasyon bulunan numunelerde görülürken en yüksek kırılma tokluğu ise 90//90 ara yüzünde delaminasyon bulunan numunelerde görülmüştür.

Tek yönlü lif takviyeli karbon/epoksi tabakalı kompozitlerde lif serim açıları mod II tabakalar arası kırılma tokluğunu etkilememektedir. Ara yüzünde delaminasyon bulunan ardışık tabakaların lif serim açıları arasındaki fark 0'dan 90 dereceye kadar arttırıldığında G_{IIc} değerlerinde açık bir fark görülmemiştir (Liu vd. , 2020). Dokuma kumaş takviyeli karbon/epoksi tabakalı kompozitlerde lif serim açıları mod II tabakalar arası kırılma tokluğunu etkilemektedir. Delaminasyon yoluna bir açıyla yönlendirilmiş lifler, daha pürüzlü kırılma yüzeyleri ve lokal olarak açılma modu ile karışık bir kırılma türü oluşturmuştur. Dolayısıyla çatlak gelişimine paralel liflere kıyasla açılı liflerin delaminasyon direncini arttırdıkları gözlenmiştir. 90//45 ara yüzey fiber oryantasyon

sapmasını içeren konfigürasyonların, dikkate alınan tüm yerleşim konfigürasyonları arasında en büyük G_{IIc} değerine sahip olduğu görülmüştür (Ramji vd. , 2021).

Grafit /epoksi tabakalı kompozitlerde lif serim açıları mod II tabakalar arası kırılma tokluğunu etkilemektedir. Chou (1998) grafit/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kırılma ara yüzündeki lif yerleşim açılarının mod I ve mod II yüklemeleri altında kırılmaya etkisini incelemiştir. Chou (1998)'ya göre kırılma ara yüzündeki lifler ile delaminasyon ilerleme yönü arasındaki açı arttıkça her iki yükleme durumu için de kırılma tokluğu artmaktadır.

Davidson vd. (1996) açılı katlı grafit lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelerde farklı açılara sahip lif takviyeli tabakaların dizilim sırasının G_{Ic} ve G_{IIc} üzerine etkisini deneysel ve nümerik olarak analiz etmişlerdir. Davidson vd. , (1996) nümerik analizleri Sonlu Elemanlar Metodu tabanlı *Sanal Çatlak Kapatma Tekniği (Virtual Crack Closure Technique-VCCT)* kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Davidson vd. (1996)'ne göre açılı tabakaların dizilim sırası, delaminasyon çatlak ucundaki G_{Ic} ve G_{IIc} değerlerini numune genişliği boyunca değiştirir ve düzensiz çatlak gelişimi meydana gelir. Dış yükler altındaki açılı katlı ve çapraz katlı tabakalı kompozit malzemelerde her bir tabakanın eğilme rijitliği farklı olduğu için delaminasyon çatlak ucunda eğilme-eğilme veya eğilme-dönme kuvvet çiftleri oluşmaktadır. Bu kuvvet çiftleri çatlak ucundaki G_c değerini malzeme genişliği boyunca değiştirmekte ve çatlak ucunun çarpılmasına neden olmaktadır. Bu durum de Morais vd. , (2002); Pereira & de Morais, (2004); Prombut vd. , (2006) , Sebaey vd. , (2011) tarafından mod I kırılması için, Pereira (2004) ve de Morais (2004) tarafından mod II kırılması için deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır.

Karbon lifi/epoksi tabakalı kompozitlerde matris çeşidi de tabakalar arası kırılma tokluğuna etki etmektedir. Bonhomme vd. (2013) yaptıkları çalışmada, aynı AS4 karbon lifi ve iki farklı matris (epoksi) tipine sahip iki kompozit için I, II ve I/II modlarındaki delaminasyon davranışını incelemişlerdir. Modifiye 8552 epoksi matrisi, kritik enerji yayılım hızı 3501-6 matris kompozitlerinden daha yüksek olduğu için mod I ve karışık mod I/II'de en iyi davranışı göstermiştir. Mod II'de, 3501-6 epoksi matris tabakalar için en iyi performansa ulaşmıştır. G_{II}/G_c mod oranı arttıkça kritik enerji G_c ve saçılımın da arttığı bulunmuştur. Her iki numuneden elde edilen farklar genellikle %10'dan düşük olduğundan, deneysel ve sayısal sonuçlar iyi bir uyum göstermiştir. Çalışma sonucunda delaminasyon uzunluğu arttıkça, toplam enerji yayılım hızının arttığı gözlemlenmiştir.

2.2 Tabakalı Kompozit Malzemelerde Mod II Kırılma Direncinin İyileştirilmesi

Karakteristik bir malzeme özelliği olarak tabakalar arası kırılma tokluğunu ve tabakalar arası kırılma mekaniğini araştıran çalışmaların bir kısmı yukarıda özetlenmiştir. Bu çalışmalarda delaminasyon başlangıcını ve gelişimini etkileyen faktörler incelenmiş ve sonuçları literatüre sunulmuştur. Bu literatür bilgisi ışığında tabakalı kompozit malzemelerin hasar toleranslarının iyileştirilmesi, bu malzeme grubunun hasar mekanizmalarının tanımlanması kadar önemlidir. Tabakalı kompozit malzemelerde delaminasyon oluşumu ve gelişimi sürekli formdaki liflerden çok matris malzemenin ve matris ile lif ara yüzünün mekanik özelliklerine bağlıdır (Bashar vd. , 2013; Mirjalili vd. , 2014). Çünkü lifleri bir arada tutan, tabakaları birbirine bağlayan matris malzemelerin mekanik dayanımları azdır ve birçoğu da kırılımandır. Matris malzemelerin bu olumsuzluklarını gidermek için nano veya mikro boyutlu partiküller matrise katılarak mekanik özelliklerde iyileşme sağlanabilir. Birçok araştırmacı silika, uçucu kül, nano kil, nano kauçuk vb. partiküller ile polimer matrisi takviye ederek mekanik dayanımlarını artırmıştır (Kishore & Santra, 2005; Uddin & Sun, 2008; Manjunatha vd. , 2010; Tang vd. , 2013; Azeez vd. , 2013; Rama & Ra, 2009, 2010, 2011). Bazı araştırmacılar da epoksi reçine içerisine karbon nano tüp partiküller katarak epoksinin mekanik özelliklerini iyileştirmeyi başarmıştır (Gojny vd. , 2005; Chen vd. , 2008; Hadavand vd. , 2013; Ulus vd. , 2014).

Mekanik özellikleri yüksek partiküller kullanılarak matris malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi aynı etkinin tabakalı kompozit malzemelerde de elde edilebileceğini akla getirmiştir. Matrisine bor karbür, silisyum karbür, alümina, turmalin, çoğul duvarlı karbon nano tüp, nano grafen, nano kil vb. partiküller katılarak üretilmiş tabakalı kompozit malzemelerin elastik özelliklerinin ve mekanik dayanımlarının daha iyi olduğunu ortaya koyan birçok çalışma son yıllarda literatüre sunulmuştur (Manjunatha vd. , 2010; Zhou vd. , 2012; Shen vd. , 2013; Zhang vd. , 2013; Subagia vd. , 2014; Sayer 2014). Nano partikül katkıların tabakalar arası kırılma mekaniğine etkisi incelendiğinde; partiküllerin kendi iç boşluklarını matris malzeme ile doldurarak ve kırılan yüzeyler arasında köprü oluşturarak çatlak gelişimini engellediği, takviye liflere tutunarak lif/matris ara yüzeyinde adezyonu artırdığı ve liflerin soyulmasına neden olduğu görülmüştür.

Cam lifi/epoksi tabakalı kompozitlere nano parçacıklar takviye ederek kırılma tokluğu dayanımını arttırmak mümkündür. Rathore vd. , (2016), gerekli karbon nano tüp (KNT)' ün optimum içeriğine odaklanarak çoğul duvarlı karbon nano tüp (ÇDKNT) dolgulu cam/epoksi kompozitlerin mekanik performansını incelemiştir. Epoksi, KNT' nin sonikasyon yoluyla etkili bir şekilde dağıtılmasıyla homojenleştirilmiştir. Toplam ağırlıkça %0,1 ÇDKNT numuneleri, eğilme mukavemeti ve eğilme modülünde % 32.8 ve % 11.5 artış göstermiştir. Bu, ağırlıkça % 0.1 ÇDKNT' nin polimer matrisinde en iyi dağılıma sahip olduğunu gösteren taramalı elektron mikroskopu görüntüleri ile doğrulanmıştır.

Venkatesan vd. , (2019), epoksi kompozitlerde ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde dolgu maddesi olarak KNT ilavesinin etkisini incelemiştir. Reçinedeki KNT yüzdesini % 1, % 3 ve % 5 olarak değiştirmişler ve imal edilmiş kompozitleri darbe testlerine tabi tutmuşlardır. Elde edilen sonuçlar, epoksi reçinesine % 1 KNT eklendiğinde darbe mukavemetinde büyük bir artış gösteren KNT dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitleri desteklediği görülmüştür. KNT' nin düzgün bir şekilde dağılmadığı takdirde aglomeralar oluşturduğu gözlenmiştir.

Karışık mod (mod I/II) yükleme koşulları altında cam lifi/epoksi tabakaların G_{IIc} 'na küçük miktarlarda nanokil eklenmesinin etkisi incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, literatür modellerine dayalı olarak bileşik yükleme altında delaminasyon kırılması tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Matrise küçük miktarlarda nanokil eklenmesi, tüm yükleme modu oranları için G_{IIc} 'de önemli gelişmeler sağlamış ve $G_{II}/G = %44$ mod oranıyla nanokil ile takviye edilmiş cam lifi/epoksi için yaklaşık %39'a ulaşmıştır. G_c

nin deneysel değerleri, G_{II}/G oranı ile yaklaşık olarak lineer artış göstermiştir. Deneysel sonuçlar ile lineer kırılma kriterleri arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir (Silva vd. , 2013).

Glisidiloksipropil ($C_9H_{20}O_5Si$) ile fonksiyonlaştırılmış karbon nano tüp ve karbon nano fiber partiküllerin S2 cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin doğrudan matrisine ilave edilmesi halinde statik yük altında mod I ve mod II tabakalar arası kırılma tokluğunda belirgin bir iyileştirme olmadığını ancak bu partiküller ile elde edilen epoksi katmanın liflerin arasına yerleştirilmesi ile kırılma tokluğunun artırılabilceği görülmüştür (Zhu vd. , 2012).

Polycaprolactone (PCL) ve Polyamide 6 (PA6) nano lifleri cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemeye tokluğu artırılmış ara katman eklemek için ve ayrıca aynı malzemede matris malzemenin tamamını takviye etmek için kullanılmaktadır. Daelemans vd. , (2016) bu şekilde üretilen kompozit malzemelerin kırılma tokluğunda lif köprülemesi sayesinde artış elde etmişlerdir. Mod II yüklemesi durumunda tabakalar, mikro çatlakların kaymasından dolayı tipik saçak oluşumunun yanı sıra cam elyaf-epoksi bağının çözülmesini göstermiştir. Mod II yüklemeleri altındaki kırılma mekanizması daha karmaşıktır ve tabakalar arası bölgede çatlak ucunun önünde çekme (Mod I) mikro çatlak oluşumu, ardından mikro çatlak birleşmesi ve kesme gerilmeleri nedeniyle saçaklanma oluşumundan oluşmaktadır. Mikro çatlakların birleşmesi, sırayla makroskopik delaminasyon ilerlemesine neden olmaktadır. Bu nedenle, Mod II katmanlar arası kırılma tokluğu ΔG_{IIc} 'deki gelişme, katmanlar arası geçişlerde olduğu kadar katmanlar arası bölgede oluşan mikro çatlaklarda nano lif köprüleme bölgelerinin gelişiminin bir birleşiminden oluşmuştur. Ek olarak, Mod II yüklemeleri altında mikro çatlak başlangıcı, tabakalar arası bölgede gerilme mikro çatlaklarının oluşumu tarafından yönetildiğinden, nano-sertleştirilmiş ara tabakada bu mikro çatlakları oluşturmak için gereken enerjideki artış, nano-sertleştirilmiş epoksinin kendisinin kırılma tokluğundaki artışa benzer olduğu görülmüştür (Daelemans vd. , 2016). Ancak amine (NH_2) ile fonksiyonlaştırılmış karbon nano tüp ilave edilmiş E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin statik yük altında mod I ve mod II tabakalar arası kırılma tokluğunun katkısız kompozit malzemeye göre azaldığı görülmüştür. Araştırmacılar karbon nano tüp partiküller nedeniyle matris ve lif ara yüzündeki adhezyon azalmakta ve dolayısıyla lif köprülerinin etkisi de azalarak kırılma tokluğunun düşüş gösterdiğini gözlemlenmişlerdir (Seyhan vd. , 2008).

Karbon lifi/epoksi tabakalı kompozitlerin kırılma tokluğu dayanımı KNT takviye edilerek arttırılabilmektedir. Karbon lif/epoksi kompozit malzemeye sarmal çok duvarlı karbon nanotüpün kırılma mukavemeti, mikro yapısı ve elektriksel ve termal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ali vd. , (2021) yaptıkları çalışmada, uyguladıkları dispersiyon tekniğinin, epoksi ve sarmal çoğul duvarlı karbon nano tüp (ŞÇDKNT) arasında güçlü bir ara yüzey bağ etkileşimi olan kompozit tabakalar oluşturabileceklerini ve böylece özelliklerini iyileştirebileceklerini doğrulamışlardır. Mod I kırılma tokluğu analizinde ağırlıkça %0,2 takviyeli kompozit malzemede tabakalar arası kırılma tokluğunda %39.15, ağırlıkça %0,4 takviyeli kompozit malzemede tabakalar arası kırılma tokluğunda %115,05 iyileşme olduğu görülmüştür. Mod II tabakalar arası kırılma tokluğu analizinde ise, sırasıyla ağırlıkça % 0,2'de %50.88 ve % 0,4'te %190 artış göstermiştir.

Karbon lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelerde katmanlar arasına karbon nanolifler sokarak malzemenin tabakalar arası kırılma tokluğu arttırılmaya çalışılmıştır. Hibrit kompozitlerin sırasıyla mod I ve mod II tabakalar arası kırılma tokluğunu belirlemek için DCB ve ENF testleri uygulanmıştır. Mod I deformasyonu hibrit tabakalar için tabakalar arası kırılma tokluğu, 20 g/m² CNF alan yoğunluğu ile en büyük değere ulaşmıştır. Kırılma tokluğu karbon lifi/epoksi nano lif içermeyen malzemelere kıyasla % 50 artmıştır. CFRP/ CNF hibrit malzemelerde mod II tabakalar arası kırılma tokluğu, yaklaşık 20 g/m² (100-150 lm kalınlık) CNF alan yoğunluğunda optimal bir değere ulaşmış ve katkısız CFRP tabakalardan iki ila üç kat daha yüksek hale gelmiştir (Arai vd. , 2008).

ÇDKNT ile takviye edilmiş karbon lifi/epoksi tabakalı kompozitler üzerindeki sonuçları, tek duvarlı karbon nano tüp (TDKNT)'ün tabakalı kompozitlerin mekanik performansını arttırmada daha etkili olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada, TDKNT' nin ağırlıkça % 0,1 artırılması darbe mukavemetinden sonra basma dayanımında % 3,5 artış, mod I kırılma tokluğunda %13 artış ve mod II tabakalar arası kırılma tokluğunda ise %28 artış olduğu görülmüştür. Taramalı elektron mikroskopunda da TDKNT mod I' de çatlak köprüleme (çekme ve soyulma) ve mod II' de daha büyük testere dişi hasar mekanizmalarının oluşumu yoluyla kırılma tokluğunun artmasına katkı sağladığı görülmüştür (Ashrafi vd. , 2011).

ÇDKNT ve grafen nanoplatelet (GSMH) katkılı polifenilen-sülfid (PPS) örtüleri ile takviye edilmiş havacılık sınıfı CFRP' nin mod I ve mod II kırılma enerjilerini ve mekanizmaları incelenmiştir. PPS (Polyphenylene-sulfide) örtülerinin ana sertleştirme

mekanizması, kırılma işlemi sırasında PPS lif köprülemesi meydana gelmiş ve bu da tabakaların mod I ve mod II kırılma enerjisinde önemli artışlara neden olmuştur. Örtüler üzerine ÇDKNT'lerin eklenmesi, kırılma işlemi sırasında PPS elyafları ve epoksi arasında ek etkileşimler, yani ÇDKNT çekme ve kırılma gibi hasar mekanizmaları oluşturarak PPS elyaf/epoksi yapışmasını iyileştirmiştir. Bu, nispeten düşük bir ÇDKNT içeriğinde tabakaların kırılma tokluğunu daha da geliştirmiştir. Buna karşılık, GNP'lerin örtülere dahil edilmesi, PPS elyaf/epoksi yapışmasını azaltarak kırılma performansı üzerinde zararlı etkilere neden olmuştur (Quan vd. , 2020).

Tek yönlü CFRP tabakalı kompozitin katmanlar arası özellikleri üzerinde KNT örtü ara yapraklarının olası etkileri araştırılmıştır. Farklı bileşim KNT örtüleri ile serpiştirilmiş tek yönlü karbon lifi/epoksi matris kompozit örnekleri, sıcak pres yöntemi kullanılarak hazırlanmış ve mod I ve mod II ile ölçülen tabakalar arası kırılma tokluğu (IFT) için ve kısa kiriş kesme (SBS) testi ile değerlendirilen tabakalar arası kesme mukavemeti (ILSS) için test edilmiştir. Çatlak yayılma modu, elektron mikroskobu ile fraktografi analizi ve Raman spektroskopisi ile reçine/KNT uzamsal ayrımcılığı yoluyla belirlenmiştir, bu da tabakalar arası takviye ile tabakalar arası bölgede yapışkan/yapışkan hasar modu arasındaki denge arasında açık bir korelasyon göstermiştir. KNT örtülerinin tam reçine infiltrasyonuna sahip kompozitler, mod II tabakalar arası kırılma tokluğunda (% 88) 1500 J/m²'ye büyük bir artış, görünür tabakalar arası kesme mukavemetinde hafif bir artış (% 6,5), ancak mod I tabakalar arası kırılma tokluğunda (-%21) bir azalma sağlamıştır. Sonuçlar, tabakalar arası sızma, tabakalar arası geçişler ve karbon fiber köprülerin oluşumunun, tabakalar arası takviye için önemli olduğunu göstermiştir (Ou vd. , 2020).

CVD (kimyasal buhar biriktirme) uygulanan KNT'lerin karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çekme ve tek lif parçalanma testleri, kimyasal buhar biriktirme (CVD) yoluyla çoğul duvarlı karbon nano tüplerle kaplanmış tek T650 karbon lifleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ÇDKNT'lerin bir polimer matrisi içine gömülmüş bir elyafın çekme ve ara yüzey özellikleri üzerinde ne gibi bir etkiye sahip olduğunu belirlemek amacıyla ticari olarak boyutlandırılmış ve boyutlandırılmamış elyaflar ile karşılaştırılmıştır. Parça mukavemeti, 25,4 mm çekme numuneleri kullanılarak hesaplanan elyaf mukavemetlerinin Weibull dağılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Parçalanma sonuçları, ticari olarak boyutlandırılmış liflerin en yüksek ara yüzey kesme mukavemetine sahip olduğunu, boyutlandırılmamış liflerin ise en düşük olduğunu göstermiştir. Rastgele

yönlendirilmiş ÇDKNT ve hizalanmış ÇDKNT kaplı lifler, işlenmemiş, boyutlandırılmamış liflere göre ara yüzey kesme mukavemetinde % 71 ve % 11'lik bir artış göstermiştir. Bu artışın hem matrisin elyafa yapışmasında hem de nanotüplerin varlığından dolayı fazlar arası kayma akma mukavemetinde bir artışa bağlı olduğu görülmüştür. Rastgele yönlendirilmiş ÇDKNT durumu için gözlemlenen fazlar arası kesme mukavemetindeki artış, ÇDKNT'lerin ara fazındaki ana çekme gerilimi yönü ile hizalanmasından kaynaklanmıştır (Sager vd. , 2009).

Çoğul duvarlı karbon nanotüplerin tabakalı kompozitlerin delaminasyon özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. ÇDKNT'lerin tabakalı kompozitlerin delaminasyon özelliklerini geliştirmedeki potansiyelini doğrulamak için mod I ve mod II testleri yapılmıştır. ÇDKNT ile takviye edilmiş polimerler, mekanik özelliklerde iyileşme göstermiştir. Öte yandan, tabakalı kompozitler, ÇDKNT'lerin eklenmesinin bir sonucu olarak delaminasyon özelliklerinde büyük gelişme göstermiştir. Polimer esaslı numunelerin morfolojisi tabakalı kompozitlerle karşılaştırıldığında, delamine kompozitlerin yüzeyinde daha fazla tokluk özelliği olduğu sonucuna varılmıştır. Kırılma yüzeyinin morfolojisi ayrıca, karbon liflerin bir ağ gibi davrandığı ve ÇDKNT'lerin serbestçe hareket etmesini ve yeniden toplanmasını önlediği için ÇDKNT'lerin daha iyi dağıldığını göstermiştir (Mirjalili vd. , 2014).

Hibrit karbon fiber takviyeli polimerlerin kırılma enerjisi araştırılmıştır. Tek yönlü CFRP tabakaların epoksi matrisi için katkı maddeleri olarak ÇDKNT'lerin kullanımı ele alınmıştır. Üç farklı KNT fraksiyonu kullanılmış (ağırlıkça %0,1, 0,5 ve %1) ve saf epoksi ile karşılaştırılmıştır. Mod I' de, ağırlıkça %1'lik düşük fraksiyonda bile KNT'lerin varlığı, tabakalı kompozitlerin kırılma enerjisinde önemli bir artışa (yaklaşık %60) yol açmıştır. Bu yaklaşım, malzeme içinde çatlak başlangıcı ve yayılması için gerekli olana ek olarak ekstra enerji gerektiren SEM araştırması ile teyit edilen fiber köprüleme ve fiber çekme hasar mekanizmaları ile yakından bağlantılı olduğu görülmüştür. Ek olarak, tabakalı kompozitlerin mod II kırılma davranışı incelenmiş ve %0,5 ve %1 KNT'lerle katkılı CFRP'lerin kırılma enerjisinde sırasıyla yaklaşık %45 ve %75 bir artış görülmüştür. Büyük en boy oranlarından dolayı karbon nanotüplerin önemli bir sertleştirme etkisine sahip oldukları varsayılmıştır, çünkü bunları matristen çıkarmak ve nano ölçekte bir bükülme desenini takiben çatlak yayılımını başlatmak için ekstra enerjiye ihtiyaç duyulduğu görülmüştür (Karapappas vd. , 2009).

Ağırlıkça % 0,3 ila ağırlıkça % 1,0 arasında değişen çeşitli ÇDKNT yüklemelerine sahip bir dizi nano kompozit film üretilmiş ve ultrasonik sonikasyon ve sıcak presleme işlemleri yoluyla bir Al substratı üzerine kaplanmıştır. ÇDKNT'lerin gerilme özellikleri ve mod II ara yüzey kırılma tokluğu üzerindeki etkileri sırasıyla gerilme testi ve üç noktalı eğilme testi kullanılarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, nano kompozitin ağırlıkça %1,0 ÇDKNT' lere sahip nihai mukavemet ve mod II kırılma enerjisinin, katkısız numuneye kıyasla sırasıyla % 21 ve % 54 oranında iyileştirildiğini göstermiştir. Hem nihai mukavemet hem de mod II kırılma enerjisinin iyileştirilmesi esas olarak epoksi içindeki çatlak yayılımına karşı direncin artmasına bağlı olduğu görülmüştür. ÇDKNT'ler, çatlak yayılımını değiştirmek için gömülü çatlak tutucular olarak işlev görmüştür. ÇDKNT'lerin eklenmesiyle nano kompozitin sertliğinin artırılması da kırılma enerjisinin iyileştirilmesine yardımcı olmuştur (Her vd. , 2020).

Karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin tabakalar arası kırılma tokluğunu iyileştirmenin alternatif yolları da bulunmaktadır. Kalınlık yönü boyunca karbon fiber tabakalı kompozitlere güçlü ve ince KNT kayışları dikilerek tabakalar arası kırılma performansını güçlendirmek için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. KNT kayışlarının tabakalar arası kırılma üzerindeki etkisi tokluk, düzlem içi çekme özellikleri ve ayrıca eğilme performansı incelenmiştir. Tabakalı kompozitlerin tabakalar arası kırılma tokluğunun, KNT kayışı ve P-KNT kayışı dikişinden sonra etkili bir şekilde artırılabilirdiği ve P-KNT kayışı dikişinin, G_{Ic} ve G_{IIc} ' yi sırasıyla% 62,5 ve% 94,3 oranında arttırdığı bulunmuştur (Li vd. , 2021).

Yapılan bir başka çalışmada, mod II yüklemesi altında naylon 6,6 ile iç içe geçmiş tek yönlü karbon/epoksi tabakalı kompozitlerin yorulma davranışı incelenmiştir. Bu amaçla, bir karbon / epoksi tabakalı kompozitin orta tabakaları arasına 50 µm naylon 6,6 nanofibröz paspas yerleştirilmiş ve daha sonra farklı G_{Iin} / G_{IIc} oranları altında delaminasyon büyümesinin ve çatlak yayılma hızının (da / dN) başlangıcını araştırmak için ENF numunelerine yarı statik ve döngüsel yükler uygulanmıştır. Sonuçlar, yarı statik yükleme testlerinde mod II kırılma tokluğunun yaklaşık % 161 arttığını göstermiştir. Ek olarak, yorulma testi sonuçları, çatlak yayılımının numune modifiye edildiğinde nanofiberlerin neden olduğu kompozit tabakalar arasındaki köprüleme nedeniyle 14-27 kat daha yavaş olduğunu kanıtlamıştır (Mohammadi vd. , 2020).

Karbon lifi/epoksi tabakalı kompozitlerin tabakalar arası kırılma tokluğunu arttırmak için KNT' den farklı takviyelerde kullanılmaktadır. Karbon lifi/epoksi tabakalı kompozitlere karbon aerojel ilavesinin mekanik özellikler ve delaminasyon

direnci üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Epoksi matrisine aerogelin eklenmesi, mod II delaminasyon kırılma enerjisinde önemli bir artışa yol açmıştır. Ağırlıkça % 0,1 aerogel içeren CFRP tabaka için G_{IIc} 'de yaklaşık % 60'luk bir artış elde edilmiştir ve aerogel içeriğinin artırılması, mod II kırılma enerjisinde daha fazla artışa yol açmıştır (Hsieh vd. , 2016)

Karbon fiber kumaş takviyeli epoksi tabakalı kompozitlerin (CF/EP) toklaştırma katkısı olarak ipek fibroin nanoliflerinin (nSF) etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Tabakalı kompozitler, nSF takviyesinin ağırlıkça %0,1'inde mod II kırılma tokluğunda % 30'a varan iyileşme göstermiştir. nSF modifiye CF/EP kırık lifin kırılma yüzeyi ve sünek benzeri matris çatlakları, mod II katmanlar arası kırılma tokluğunu arttırmanın nedenleri olan matris reçinesi ve karbon fiberler arasında iyi bir yapışma göstermiştir (Vu vd. , 2016).

Endüstriyel reçine sistemlerine benzer epoksi reçine formülasyonları ve reaktif sıvı kauçuk ve silika nanoparçacıkları ile modifikasyonlar, reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi ile üretilen karbon fiber takviyeli tabakalı kompozitler incelenmiştir. Nanosilika ilavesinin, kauçuk modifikasyonu ile kazanılan sünekliği azalttığı ve darbeden sonra basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. En yüksek seviyede nanosilika içeren hibrit dökme reçine en iyi performansı göstermiştir ve en yüksek tokluk ve modülü sergilemiştir (Sprenger vd. , 2014).

Nano-dikişli karbon/epoksi nano prepreg kompozitlerin uç çentikli eğilme yöntemini takip eden mod II tabakalar arası kırılma tokluğu özellikleri incelenmiştir. Nano-dikişli ve dikişli kompozitlerin kırılma tokluğu (G_{IIc}), kontrol numunesine kıyasla sırasıyla 3,4 kat ve 2,7 kat artış göstermiştir. Nano dikiş, nano ve baz kompozitlere göre tüm karbon/epoksi kompozitlerinin mod II tokluğunu artırmıştır. Özellikle prepreg karbon dikiş lifi ve saten prepreg dokuma kumaş olmak üzere kumaş deseninin yanı sıra dikiş lifi tipinin de etkili olduğu görülmüştür (Bilisik vd. , 2019).

Nano dikişli karbon/epoksi kompozitlerin kırılma tokluğu (mod II) özellikleri araştırılmıştır. Nano-dikişli ve dikişli kompozitlerin mod II kırılma tokluğu, kontrol numunesine göre birkaç kat iyileşme sergilemiştir. Bu nedenle, tabana eklenen nano dikiş, kırılma tokluğu özelliklerini geliştirmiştir. Karbon dikiş ipliği, elyaf sertliği ve sağlam filamentleri ve reçine yapışma özellikleri nedeniyle para-aramid göz önüne alındığında kırılma tokluğunu arttırmak için yeterli olduğu görülmüştür. Nano-dikişli kompozitin mod II davranışının temel mekanizması, bir makaslama tüyü biçimi olarak ara katman matris hasarının baskın olması olarak görülmüştür. ÇDKNT' ler muhtemelen

matris plastik deformasyon bölgesi civarındaki gerilme bölgesini azaltmışlardır. Aynı zamanda, nano dikiş, çatlak büyümesi sırasında dikiş bölgesi etrafındaki tabaka ayrılmasını önlemiştir (Bilisik vd. , 2019).

Yokozeke vd. (2009) yaptıkları çalışmada (cup-stake carbon nano tube) CSKNT-disperse reçine kullanılarak CFRP' nin tabakalar arası kırılma tokluğunun iyileştirilmesine odaklanmışlardır. Katkısız kontrol numunelerine ek olarak ara katman teknikleri kullanılarak beş tip numune hazırlanmış ve DCB ve ENF testleri yapılmıştır. Değerlendirilen sonuçlar, tabakalar arası kırılma tokluğunun CSKNT-disperse reçine (%300'e kadar) kullanılarak geliştirilebileceğini göstermiştir. CSKNT ile dağılmış epoksi kullanımı, kırılma tokluğunun iyileşmesiyle sonuçlanmış ve CSKNT (AR10) ile dağılmış filmlerin yerleştirilmesi, mod I ve mod II kırılma direncini en çok artıran numune tipi olmuştur. Kırılma yüzeylerinin SEM gözlemleri, yüksek ölçülen tokluğa sahip numunelerin kontrol numunesine kıyasla pürüzlü yüzeylere sahip olduğunu göstermiştir. CSKNT' nin geleneksel CFRP' ye takviye edilmesinin, çatlak sapmasına bağlı olarak kırılma yüzeyinde artış oluşturduğu ve bunun da tabakalar arası kırılma tokluğunun artmasına neden olabileceği düşünülmektedir.

Karbon lifi /epoksi tabakalı kompozitlerin tabakalar arası kırılma tokuluğunu etkileyen başka etmenlerde bulunmaktadır. Karbon lifi/epoksiden oluşan kompozitin statik ve dinamik mod II katmanlar arası kırılma tokluğu (G_{IIc}) üzerindeki kür döngüsünün etkisi incelenmiştir. Çatlak gelişimi için gerekli enerji miktarının (G_{II}) kürlenme koşullarına bağlı olduğunu ancak G_{IIc} değerinin kürlenme koşullarına bağlı olmadığı görülmüştür. Sertleşme döngüsü süresi, yüksek ısıtma hızları ve sertleştirme sıcaklıkları kullanılarak önemli ölçüde azaltılırken, çatlak yolu G_{IIc} ' de azalma olmadan sertleştirilmiş ara katman içinde kalmıştır. Bu gözlem, T800SC/3900-2 B prepregler için kürlenme döngüsünü kısaltmak için bir fırsat olduğunu, ancak tabakalar arası kırılma özelliklerini koruduğunu göstermiştir (Chen vd. , 2020).

Wong vd. ,(2020) dış mekân uygulamalarında kullanılan kompozit yapılar için nem hasarının tabakalar arası kırılma tokluğu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, 70°C / % 85 bağıl nemde (RH) şartlandırılmış karbon/epoksi kompozitlerin mod II delaminasyonunun karakterizasyonuna odaklanmışlardır. Çeşitli nem emme seviyelerinde yaşlandırılmış numuneler için uç çentikli eğme testi yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, mod II kırılma tokluğunun maksimum % 23'lük bir azalma ile nem içeriği ile birlikte bozulduğunu ortaya koymuştur.

Polivinil butiral (PVB) ve pirolitik karbon (PyC) nanolif katkılı fenolik esaslı kompozit tabakaların kırılma tokluğu davranışı araştırılmıştır. Elektrospun nanolifler kompozit tabakalar arasına yerleştirilmiş, ardından mod II ENF testi ile kırılma tokluğu incelenmiştir. PyC nano partiküllerinin PVB'ye dahil edilmesi, PVB nanoliflerinin etkisini arttırmıştır. Hibrit nano partiküllerin uygulanması G_{Ic} 'yi maksimum yük sırasıyla yaklaşık % 24 ve % 28'e kadar arttırmıştır (Taheri vd. , 2020).

Karbon lifi/epoksiden oluşan tabakalı kompozit malzemelere grafen takviye ederek tabakalar arası mod II kırılma tokluğunu arttırmak mümkündür. Tek yönlü prepreg karbon lifi/epoksi tabakalı kompozitlere takviye olarak 300 ve 500 m²/g olmak üzere iki farklı spesifik yüzey alanına sahip (grafen nanoplatelet) GNP' ler kullanılmış ve katmanlar arası kırılma toklukları araştırılmıştır. Matrisin ek takviyesi, kalenderleme işlemi, üç merdaneli değirmen ile uygulanmıştır. Sırasıyla mod I ve mod II kırılma enerjisini incelemek için DCB ve ENF testleri yapılmıştır. Kompozitlerin kırılma analizi, C500 GNP 'de ağırlıkça % 0,5 yükleme için G_{Ic} ' de % 25 ve G_{IIc} 'de % 33'lük dikkate değer bir iyileşme göstermiştir. Bu geliştirmenin kaynağı, nano partiküller ve CFRP arasındaki daha iyi yapışma ve birleşme tarafından getirilen ek hasar mekanizmalarından kaynaklanabilir çatlak yayılma işlemi sırasında grafen nanoplateletlerinden, matris içindeki takviye maddeleri ile hasara karşı daha dirençli olan nano-geliştirilmiş kompozit arasında daha güçlü bir yük transferine neden olmuştur. GNP'lerin daha yüksek (specific surface area)SSA'sı, nano-geliştirilmiş kompozitlerin kırılma özelliklerinde önemli artışlar gösterirken, GNP'lerin daha düşük SSA'sı daha az iyileştirme ile sonuçlanmıştır. Düşük SSA sayesinde, C300 grafen plateletleri nano-dolgu maddeleri arasında karşılık gelen daha yüksek bir polimer matris kalınlığına sahip olmuştur, bu da çatlağın başlatılmasını ve yayılmasını zorlaştırmıştır. GNP'lerin zayıf dağılma durumu ve matris (SEM) içindeki aglomeraların oluşumu ile birlikte, etkili en boy oranı azalmış ve dolayısıyla CFRP kompozitinin kırılma özellikleri olumsuz yönde etkilenmiştir (Zafeiropoulo vd. , 2020).

Çoğul duvarlı karbon nanotüpler ve grafen oksitin (GO) hibrit bir kombinasyonunu kullanarak tek yönlü karbon fiber/epoksi (CF/E) tabakalı kompozitlerin mod I ve mod II katmanlar arası kırılma tokluğunu (G_{Ic} ve G_{IIc}) iyileştirilmeye çalışılmıştır. Püskürtme ÇDKNT'ler, GO ve ÇDKNT'ler/GO hibrit ile üretilen CF/E tabakalı kompozitlerin G_{Ic} ve G_{IIc} ' sini değerlendirmek için DCB ve ENF testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar katkısız CF/E'ye kıyasla ağırlıkça % 0,25 ÇDKNT/GO hibrit içeriğine sahip CF/E tabakalı kompozitlerde G_{Ic} ve G_{IIc} üzerinde %

17 ve % 14 iyileştirme olduğunu göstermiştir. Ayrıca, ÇDKNT/GO-CF/E tabakalı kompozitler için tabakalar arası kesme mukavemeti değeri artmıştır. ÇDKNT'ler ve GO arasındaki sinerjik bir etki, önceden emprenye edilmiş CF/E tabakalı kompozitlerin tabakalar arası mekanik özelliklerinin iyileştirilmesiyle sonuçlanmıştır (Gonzalez vd. , 2017).

Karbon fiber takviyeli plastik malzemelerin tabakalar arası kırılma tokluğunu ve kalınlık boyunca iletkenliğini artırmak için iletken bir termoplastik malzeme geliştirilmiştir. Bir poliamid 12 dokunmamış kumaş, bir heksan, su ve grafit parçacıkları çözeltisi içinde grafen/grafit parçacıkları ile kaplanmıştır. Ortaya çıkan tabakalı kompozit, mod I ve mod II kırılma tokluğunda sırasıyla % 42 ve % 141'e kadar önemli bir artış ve hacim direncinde 100 MΩm' den 402 Ωm'ye bir azalma ile sonuçlanmıştır (Barjahteh vd. , 2017).

Dokuma karbon kumaş/epoksi tabakalı kompozite grafen nanoplate ve karbon siyahları eklenerek kırılma tokluğunu arttırmak mümkündür. Dokuma karbon kumaş kompozitlerinin ağırlıkça % 2 GnPs bazlı epoksi, ağırlıkça % 2 CBs bazlı epoksi ve saf epoksi yapıştırıcı tabakası ile tek bindirmeli kesme yapışmalı birleşim yerlerinin mod I, mod II' deki kırılma tokluğunu ve kesme dayanımı araştırılmıştır. GnPs dolgulu epoksi reçinesi ve CBs dolgulu epoksi reçineli yapıştırıcılar ile yapıştırıcıyla birleştirilmiş dokuma karbon kumaş kompozit bağlantıların, saf epoksi reçine yapıştırıcıyla birleştirilmiş kompozit numuneye kıyasla mod I, mod II ve kesme mukavemetini daha iyi verdiğini göstermektedir. Mod I değerinin, çekme gerilimi altında çatlakların keskin bir şekilde yayılmasından dolayı mod II değerinden daha düşük olduğu gözlenmiştir (Srivastava vd. , 2018).

Karbon lifi/epoksinin içerisine katılan grafenin en-boy oranının ve spesifik yüzey alanının kırılma özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Mod I kırılma tokluğu katkısız malzemeye kıyasla % 61 artarken mod II kırılma tokluğu % 25 artış göstermiştir. Kırılma özelliklerinin bu artışı, optik mikroskopi ile kanıtlandığı gibi, çatlak yayılması sırasında GNP' lerden (graphene nano-platelets) eklenen ek sertleştirme mekanizmalarından kaynaklanmıştır. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerin tabakalar arası kırılma özelliklerinde optimum güçlendirme sonuçlarını elde etmek için grafenlerin hem en-boy oranının hem de spesifik yüzey alanının yüksek değerlere sahip olması gerektiği sonucuna ulaşmışlardır (Kostagiannakopoulou vd. , 2021).

Düşük darbe direnci ve yüksek çentik hassasiyeti, karbon fiber takviyeli plastiklerin (CFRP) önemli dezavantajlarıdır. Ancak kompozit malzemelere karbon

nano parçacıklarının (CNP) eklenmesi, ek enerji tüketen mekanizmalar yoluyla bu açığı azaltır. Birkaç katmanlı grafen (FLG) modifikasyonunun CFRP üzerindeki etkisini, farklı katman kalınlıkları ultra ince kat ($28\mu\text{m}$, $30\text{g}/\text{m}^2$) ila kalın kat ($220\mu\text{m}$, $240\text{g}/\text{m}^2$) ile araştırılmıştır. Mod I ve mod II katmanlar arası enerji salım oranları, FLG modifikasyonu ile önemli ölçüde artmıştır. FLG modifikasyonu ayrıca ultra-ince katlı tabakalar için nihai çentik mukavemetini arttırmış, böylece uygulamaları için sınırlayıcı faktör olan yüksek çentik hassasiyetini azaltmıştır. Düşük hızlı darbe hasarı durumunda, kalın katmanlı tabakaların modifikasyonu basınç dayanımını iyileştirmiştir. FLG modifikasyonu, basınç dayanımında önemli bir iyileşmeye yol açmıştır. CNP seçimi, prepreg reçine/CNP nano kompozitlerinin kırılma tokluğu göz önüne alınarak yapılmıştır. Parçacık yüklemesi ve tipi, $25\ \mu\text{m}$ yaprak boyutu ve ağırlıkça % 0,05 ile FLG için seçilmiştir (Körbelin vd. , 2021).

Cam lifi/epoksi' ye 3D katmanlı grafen partikül eklenmesiyle oluşan tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası sertleşmesi ve güçlendirilmesi incelenmiştir. Mod I ve II tabakalar arası kırılma enerjileri sırasıyla $1620\ \text{J} / \text{m}^2$ ve $2540\ \text{J} / \text{m}^2$ 'ye ulaşmış ve katkısız cam lifi / epoksiye göre % 70 ve % 206 iyileşme ve tabakalar arası kesme mukavemetinde % 36 artış sağlamıştır. Mod I yüklemesinde, katmanlı grafen partikülün neden olduğu çatlak ucu sapmasının birleşme mekanizmaları nedeniyle G_{Ic} artmış ve katmanlı grafen mikro yapısı tarafından kontrol edilen çatlak tutucu ve çatlak büyümesi olarak işlev gören grafen, daha geniş etkili yüzey alanlarına sahip çok düzlemsel kırıklara neden olmuştur. Mod II yüklemesi altında, ana toklaşma mekanizması hem kontrol hem de serpiştirilmiş cam lifi /epoksi de görülen matris kesme kırılmalarından (saçaklanmalarından) kaynaklanmaktadır; ancak ikincisi daha yüksek birçok yönlü kesme saçaklanma yoğunluğuna sahiptir, dolayısıyla çok daha gelişmiş kırılma enerjisi G_{IIc} ' ye katkı sağlamaktadır (Jia vd. , 2015).

Delaminasyon testlerindeki çatlak büyüme davranışındaki farklılık, elyaf köprüleme ve yuvalanma ile dokuma kumaşların tesadüfi desenlerine bağlanmaktadır (Triki vd. , 2016). Dokuma malzemelerin ELS testi için literatürde rapor edilenlerle uyumlu olan daha yüksek mod II kırılma tokluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Mod II kırılma enerjisi hızı, farklı hasar mekanizmalarına sahip oldukları için mod I' den daha yüksek olarak belirlenmiştir. Dokuma kumaş tabakalar çok daha yüksek G_{IIc} değerleri göstermiştir. Mod II delaminasyonunda meydana gelen başlıca hasar mekanizmaları, kesme sırasında fiber/matris ara yüzeyinin ayrılması ve takviye edici fiberler arasında matris reçinesinin kırılması olarak belirlenmiştir. Dokunmuş

kumaşlardan yapılan kompozitlerin, doğal pürüzlülüğe, reçine açısından zengin bölgelere, ipliklerin dalgalı deseni nedeniyle geniş kırılma yüzey alanına ve çoklu çatlak cepheleri delaminasyonuna sahip olduğu görülmüştür (Triki vd. , 2016).

Dadian vd. (2020) epoksi reçineyi sertleştirmek için sıvı kauçuk olarak CTBN (carboxyl-terminated butadiene acrylonitrile)'yi farklı miktarlarda kullanarak oluşan kompozit malzemenin Young modülü, maksimum gerilme, mod I ve mod II kırılma tokluğu değerlerindeki değişimleri tespit etmişlerdir. Sonuçlar, epoksiye CTBN eklemenin, Young modülü ve maksimum kesme gerilimi azalttığını, ancak tokluk, çatlak büyümesine karşı direnç ve sonuç olarak mod I ve mod II kırılma tokluğunun arttığını gözlemlemişlerdir.

Prasad vd. , (2019) yaptıkları çalışmada, nano TiO_2 ilavesiyle matris modifikasyonunun keten elyaf takviyeli epoksi kompozitler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. TiO_2 ağırlık yüzdesi 0 , 0,3 , 0,4 ve 0,5 olarak değiştirilmiştir. Matris modifikasyonu, kompozitin delaminasyon direncinin iyileşmesiyle sonuçlanmıştır. Nano TiO_2 ağırlıkça %0,4 ilavesiyle G_{Ic} değerini % 52 iyileştirmiş ve ağırlıkça % 0,5 ilavesiyle G_{IIc} değerinde % 73 iyileşme sağlamıştır. FTIR sonuçları ayrıca epoksi, TiO_2 nanoparçacıkları ve keten lifleri arasında bağ oluşumunu desteklemiştir.

Akinyede vd. , (2009) nano boyuttaki saf alumina ve fonksiyonlaştırılmış alumina partikülleri ayrı ayrı epoksi içerisine ve liflerin üzerine uygulayarak E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzeme üretmiş ve bu malzemenin statik yük altında kırılma tokluğunu araştırmışlardır. Araştırmacılar malzemenin kırılma tokluğunun fonksiyonlaştırılmış alumina nano partikül ilave edilerek yaklaşık % 75 artırılacağı sonucuna varmışlardır.

Tabakalı yapıların üretimi, işletimi veya bakımı sırasında düzlem dışı darbe yüklemelerine karşı oldukça hassastır ve bu durum delaminasyonun başlamasına ve yapısal performanslarında önemli düşüslere yol açabilmektedir. Delaminasyon kaynaklı kırılma, genellikle, birleşik sıkıştırma ve bükme altında delamine katmanların lokal burkulması ile ilişkilidir. Hasar mekanizmasının karmaşıklığı, iç içe geçmiş ve dalgalı fiber çekme mikro yapıları nedeniyle dokuma tabakalarda daha da şiddetlenmiştir (Tang vd. , 2003). Dokuma tabakalar, birbirine geçen dokumaların yerel burkulma ve bükülmeyi tetiklediği daha düşük düzlem içi mukavemetleri nedeniyle alt tabakanın membran tipi hasarlarına karşı da hassas olduğu görülmüştür. Delaminasyon eğilimleri, boşluklar ve reçine bakımından zengin bölgeler gibi lokal özelliklerden kaynaklanabilmektedir. Bu kısıtlamalar, tipik olarak, birden fazla yük yoluna sahip aşırı

derecede sınırlı tasarımların olmasına yol açmıştır. Ancak tabaka ara yüzey bölgelerinin sertleştirilmesi uygulanabilir bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Malzeme bileşenlerini değiştirerek Katmanlar Arası Kırılma Tokluğunu (ILFT) ve delaminasyon direncini iyileştirmeye yönelik araştırma çabaları, yıllar içinde önemli ilerlemeler göstermiştir. Matris kimyasındaki modifikasyonlar, fiber yüzey işlemleri, daha sert fiberlerle birleştirme, serpiştirme ve kalınlık boyunca takviyelerin tümü ILFT, delaminasyon büyüme direnci ve hasar tolerans kapasitesinde iyileşmeler göstermiştir (Nash vd. , (2016); Ramirez vd. ,(2015); Daelemans vd. , (2015)). Termoplastik ara yaprakları kullanan toklaştırma yöntemleri, mod I ve mod II' de, yani G_{Ic} ve G_{IIc} ' de tabakalar arası kırılma tokluğunu geliştiren tok ve sünek ara yaprak katmanının kullanılmasına izin verebileceğini göstermiştir (Yasae vd. , (2017); Ramji vd. , (2020)).

Grafit, elmas ve fulleren gibi diğer karbon malzemelerden farklı olan karbon nanotüpler en boy oranı 1000'den daha büyük olabilen tek boyutlu karbonlardır. Nanometre ölçeğinde çaplara sahip sarılmış grafit olarak düşünülebilirler (Iijima, (1991); Bethune vd., (1993); Dresselhaus, (1995); Thostenson vd., (2001)). Silindirik nanotüp, genellikle, fulleren yapısından oluşan bir yarım küre ile kapatılmış en az bir uca sahiptir. KNT üretim sürecine bağlı olarak, TDKNT'ler ve ÇDKNT'ler olmak üzere iki tip KNT vardır. KNT' lerin kimyasal bağı tamamen sp^2 karbon-karbon bağlarından oluşur. Elmasta bulunan sp^3 bağlarından daha güçlü olan bu bağ yapısı, KNT' lere son derece yüksek mekanik özellikler sağlar (Yakobson vd. , (2001); Qian vd. , (2002); Reich vd. ,(2004)).

Nayak vd. , (2021) hakkında çok sınırlı bilgi bulunan bir malzeme sistemi olan ÇDKNT' ler kullanarak reçinenin modifikasyonu ile birlikte 3D E-cam kumaşın çevre dostu bazalt kumaşla ikame edilmesi olasılığını araştırmışlardır. Çalışma, iki kompozit setinin mekanik özelliklerinin karşılaştırmasını incelemiştir. İlk set 3D ortogonal olarak dokunmuş E-cam takviyeli epoksi kompozitler, bazalt takviyeli epoksi kompozitler ve hibrit 3D E-cam ortogonal dokuma/bazalt takviyeli epoksi kompozitleri içerirken, ikinci kompozit seti ilkiyle aynı ancak ÇDKNT' ler ile modifiye edilmiş reçine ile hazırlanmıştır. Tüm kompozitler elle yatırma ve sıkıştırma kalıplama teknikleri ile üretilmiştir. Mekanik testler, standartlara göre değerlendirilen çekme, eğilme ve düşük hızlı darbe dayanımını içermektedir. Sonuçlar, reçine modifikasyonunun kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde herhangi bir olumlu sonuç vermediğini göstermiştir. En yüksek çekme (364,4 MPa) ve eğilme mukavemeti (345,3 MPa) 3D E-cam kompozitler

için elde edilmiştir, bunu bazalt kompozitler ve hibrit 3D E-cam/bazalt kompozitler izlemiştir, en yüksek darbe ise 198,42 kJ/m²'lik güç, hibrit 3D E cam/bazalt kompozitler tarafından sergilenmiştir. SEM mikrografları, modifiye reçine ile hazırlanan kompozitlerin nispeten düşük performansının başlıca nedenlerinden biri olarak görülen modifiye matris ve fiber arasındaki bağın koptuğunu göstermiştir. Sonuçlar, bazalt lifleri ile hibridizasyonun reçine modifikasyonuna göre çok daha güvenli, daha uygun maliyetli ve çevre dostu bir seçenek olduğunu göstermiştir.

Hızalanmış KNT sayfasını tek yönlü CFRP sistemine tanıtarak mod II tabakalar arası kırılma tokluğunun önemli ölçüde iyileştiğini (~% 70), mod I kırılma tokluğunun ise hafifçe azaldığını görmüşlerdir. Bu azalmanın sebebini, epoksinin kalın KNT filmine kısmi emdirilmesi ve mikro ölçekli fiber köprüleme için bir bariyer görevi gören bir ara tabaka oluşturan tabakaya bağlamışlardır (Nguyen vd. , 2017).

Nanofibröz kompozitler yapmak için nanopartikül, nanotüp ve çubukların yanı sıra nanofiberlerin bir formu olarak nanomalzemeler kullanmışlardır. Nanomalzemeler, kompozit işlemiden önce karıştırma veya ultrason, püskürtme ve transfer baskı gibi çeşitli teknikler kullanılarak reçineye eklenmişlerdir. Nanopreg karbon/epoksi kompozitinin, Garcia vd.(2008) 'nin kontrol örneğine kıyasla mod II için üç kat ve mod I için ortalama iki kat artış gösterdiği bulunmuştur. Bunun nedeni reçine/nanotüplerin/filamentlerin karmaşık kümülatif etkileşimi olabilir. Bu etkileşimler muhtemelen köprüleme, çekme, sürtünme ve çubuk kayması olabilir. Başka bir araştırma çalışması, nano kompozitin, katkısız numuneye kıyasla kırılma tokluğunda (mod II) bir buçuk kat artış gösterdiğini bildirmiştir (Garcia vd. , 2008).

Guenon vd. (1989) 3D ortogonal karbon/epoksi kompozitin, klasik tabakalı kompozitlere kıyasla olağanüstü derecede daha iyi kırılma tokluğu performansı sergilediğini göstermiştir.

Sürekli lif takviyeli kompozit katmanların birleştirilmesi ile oluşan tabakalı kompozit malzemelerde tabakalar arası dayanım sürekli liflere kıyasla oldukça düşüktür. Tabakalı kompozit malzemelerde tabakalar arası dayanımı iyileştirmek adına nano parçacıkların kullanılması son yirmi yılda ilgi çeken bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu çalışmada cam lifi ile takviye edilmiş polimer matris ile üretilmiş tabakalı kompozit malzemenin mod II kırılma karakteristiği tayin edilmiştir. Sonrasında nano parçacıklar ile polimer matrisin güçlendirilmesi ve nano parçacık takviyeli tabakalı kompozit malzemenin mod II kırılma karakteristiğindeki değişimlerin irdelenmesi amaçlanmıştır. Yapılacak çalışma deneysel olarak gerçekleştirilecek olup katkısız ve

nano parçacık katkı malzemelere ait mod II kırılma tokluğu, çatlak gelişim karakteristiği ve kırılma yüzeyi morfolojisi araştırılmıştır. Yapılması planlanan araştırmalar sonucunda tabakalı kompozit malzemenin mod II kırılma tokluğunun kayda değer ölçüde artırılması hedeflenmektedir. Beklenen iyileştirmenin nedenlerinin hem malzemenin eğilme özellikleri hem de kırılma yüzeyi analizleri ile ortaya konulması da hedeflenmektedir.

Bu tez projesinde katkısız ve KNT E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin mod II kırılma davranışı üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilecektir. Tabakalar arası yapay çatlak içeren tabakalı kompozit malzemelerde yer değiştirme kontrollü eğme testleri yapılacaktır. Kırılma yüzeylerinde yapılacak mikrografik incelemeler ile KNT' ün neden olduğu hasar mekanizması değişimleri de tez projesi kapsamında incelenecektir.

2.3 Mod II Kırılması Test Metotlarının Gelişimi

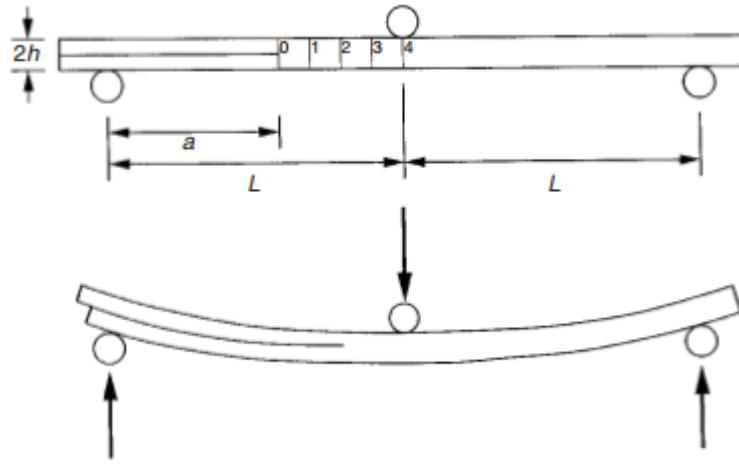
Malzemenin mekanik davranışlarına etki eden faktörlerden biri de üretim, montaj veya kullanım sırasında meydana gelen çatlak oluşumlarıdır. Tabakalı kompozitlerin kırılma davranışlarına, deformasyon hızı, çatlak uzunluğu ve çatlak geometrisi doğrudan etki eder.

Kırılma mekaniği çatlağın ilerleyip ilerlemeyeceğini, kritik çatlak uzunluğunu, çatlağı ilerletmek için gereken minimum enerjiyi, verilen bir çatlağın kritik uzunluğa ne kadar zaman sonra ulaşacağını, çatlağın kararsız bir şekilde hızlı mı yoksa yavaş bir şekilde mi ilerleyeceğini ve yavaş ve kararlı bir şekilde ilerleyecekse hangi hızda ilerleyeceğini tahmin etmekte yardımcı olur (Balcioğlu vd. , 2020; Tiber vd. , 2019).

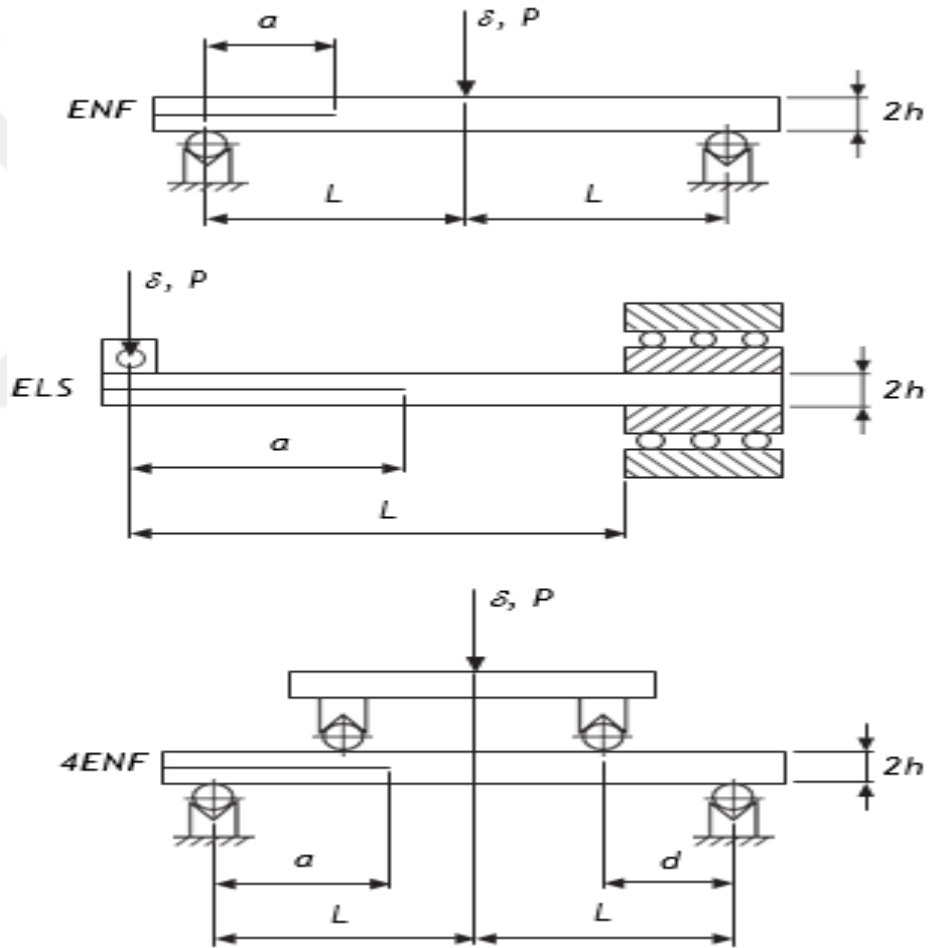
Malzemenin, tabakalar arası çatlağın başlamasına karşı göstermiş olduğu direnç malzeme özelliği kabul edilir ve tabakalar arası kırılma tokluğu olarak adlandırılan bu özellik, kritik şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı (G_c) ile ifade edilir (O'Brien vd. , 1998; Kenane vd. , 2011).

Mod II' deki kompozitlerin tabakalar arası kırılma karakterizasyonu, düşük hız darbesi gibi enine yükleme altında özel bir uygunluk kazanmıştır. Şimdiye kadar, mod II' de kritik gerinim enerjisi yayılım oranını ölçmek için standartlaştırılmış bir test yoktur ve basitlikleri nedeniyle ENF ve ELS testleri standardizasyon için başlıca adaylar haline gelmiştir. Bununla birlikte, klasik veri azaltma şemalarını izleyerek R- eğrilerini elde etmek için temel olan yayılma sırasında çatlak izleme ile ilgili ortak bir zorluk sunarlar. Bu zorlukların üstesinden gelmek için numune uyumuna dayalı yeni bir veri azaltma planı önerilmiştir. Yöntem, yayılma sırasında çatlak uzunluğu ölçümü gerektirmez ve oldukça kapsamlı (Fracture Process Zone) FPZ'nin ölçülen kritik gerinim enerjisi yayılım hızı üzerindeki etkilerini hesaba katmıştır. ENF ve ELS testlerinin sayısal simülasyonları, kompozitlerin mod II eğrilerini elde etmek için önerilen yöntemin yeterliliğini ve uygunluğunu göstermiştir. Basitliği nedeniyle ENF testi standardizasyon için önerilmektedir (de Moura vd. , 2006).

G_{IIC} ' yi ölçmek için kullanılan üç temel deneysel test vardır. En yaygın kullanılanı, ahşap kırılma karakterizasyonu için geliştirilmiş uç çentikli eğilmedir (ENF) (Barrett vd. , 1977). Test, üç noktalı eğilme yüklemesi altında önceden çatlamış bir numuneden oluşur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Mod II testlerinin şematik gösterimi (Hodgkinson. , 2000)



Şekil 2.2 Mod II testlerinin şematik gösterimi (de Moura vd. , 2006)

Kararsız çatlak yayılımı, ENF testinin dezavantajlarından birini oluşturur. Diğer bir olasılık, konsol giriş geometrisine dayanan uçtan yüklenen bölünmüş (ELS) testidir (Şekil 2.2). ELS testi deneyler sırasında ENF testine göre daha fazla karmaşıklık içermesine rağmen, çatlakın kararlı bir şekilde yayıldığı daha geniş bir çatlak uzunluğu

aralığı sağlar. Aslında, ENF testi kararlı çatlak yayılımı elde etmek için $a_0/L > 0.7$ gerektirir (Carlsson vd. , 1986). Oysa ELS testinde $a_0/L > 0.55$ yeterlidir (Wang vd. , 1996). Bununla birlikte, bu testlerin her ikisi de deneysel test sırasında çatlak uzunluğu ölçümü ile ilgili ortak bir zorluk sunar. Bu güçlükleri gidermek için literatürde farklı yöntemler önerilmiştir.

Kageyama vd. , (1991), mod II çatlak büyümesinin deneysel karakterizasyonu için stabilize uç çentikli eğilme (SENF) testi önermiştir. ENF numunesinin çatlak yüzeyleri arasındaki bağıl kaymanın doğrudan ölçümü için özel bir yer değiştirme ölçer geliştirmişlerdir. Test, kararlı çatlak ilerlemesini garanti eden sabit çatlak kesme yer değiştirme hızı altında gerçekleştirilmiştir.

Yoshihara vd. , (2000), mod II R-eğrisini elde etmek için çatlak kesme yer değiştirme yönteminin (CSD) kullanılmasını tavsiye etmişlerdir, çünkü çatlak uzunluğu örtülü olarak CSD' ye dâhil edilmiştir.

Tanaka vd. , (1995), ENF testinde stabilize çatlak yayılma aralığını genişletmek için testin kontrollü CSD koşulu altında yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır. CSD yöntemi, mod II tokluğunun çatlak uzunluğu izleme olmadan ölçümünü sağlamasına rağmen, bu yöntem servo valf kontrollü bir test makinesi gerektirdiğinden ve test prosedürü, yükleme noktası yer değiştirme koşulunda olduğundan daha karmaşıktır. Alternatif olarak, mod II R-eğrisini değerlendirmek için dört noktalı uç çentikli eğme testi (4ENF) kullanılabilir. Bu test, çatlak izleme gerektirmez, ancak daha karmaşık bir kurulum içerir ve daha büyük sürtünme etkileri gözlemlenmiştir (Schuecker vd. , 2000). Aşağıda, bu deneysel testler için kullanılan klasik veri azaltma şemalarının bir özeti sunulmuştur.

2.3.1. Kompliyan kalibrasyon yöntemi (CCM)

En çok kullanılan metot kompliyan kalibrasyon yöntemidir. Test sırasında yük, uygulanan yer değiştirme ve çatlak uzunluğu ($P-\delta-a$) değerleri, Irwin-Kies denklemi kullanılarak kritik gerinim enerjisi yayılım oranını hesaplamak için kullanılmaktadır (Kanninen & Popelar, 1985).

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad 2.1$$

burada B , numune genişliği ve $C = \delta/P$ kompliyansdır. ENF ve ELS testlerinde kompliyans (C) ile ölçülen çatlak uzunluğu a arasında genellikle kübik bir ilişki olduğu varsayılır (Davies vd. , 2001).

$$C = D + ma^3 \quad 2.2$$

burada D ve m sabitlerdir. Buradan G_{IIc} elde edilir.

$$G_{IIc} = \frac{3P^2ma^2}{2B} \quad 2.3$$

4ENF testi için kompliyans (C) ile ölçülen çatlak uzunluğu a arasında doğrusal bir ilişki (Yoshihara, 2004) kullanılmaktadır.

$$C = D + m \quad 2.4$$

D ve m ilgili katsayılarıdır. Denklem 2.2 ve 2.4'te verilen $C = f(a)$ bağıntılarının, kiriş teorisi yaklaşımına dayandığına dikkat edilmelidir.

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2B}m \quad 2.5$$

Üç test, çatlak uzunluğunun bir fonksiyonu olarak uygunluğun kalibrasyonunu gerektirir. Bu, yayılma sırasında çatlak uzunluğunun ölçülmesiyle veya alternatif olarak, kübik (Denklem 2.2) ve doğrusal (Denklem 2.4) fonksiyonlarla geriletelen kompliyans-çatlak uzunluğu ilişkisini kurmak için farklı başlangıç çatlak uzunluklarına sahip birkaç numuneyi dikkate alarak yapılabilmektedir.

Kiriş teorisi

Kiriş teorisi yöntemleri de mod II testlerinde G_{IIc} 'yi elde etmek için sıklıkla kullanılmaktadır. ENF testi durumunda Wang & Williams (1992), Düzeltilmiş Kiriş Teorisini (CBT) önermiştir.

$$G_{IIc} = \frac{9(a+0,42\Delta l)^2 P^2}{16B^2 h^3 E_1} \quad 2.6$$

burada E_1 aksenal modüldür ve Δl kesme deformasyonunu hesaba katan bir çatlak uzunluğu düzeltmesidir.

$$\Delta l = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}}} \left[3 - 2 \left(\frac{\tau}{1+\tau} \right)^2 \right] \quad 2.7$$

ile

$$\tau = 1.18 \frac{\sqrt{E_1 E_3}}{G_{13}} \quad 2.8$$

burada E_2 ve G_{13} sırasıyla enine ve kesme modülleridir. ELS durumunda benzer bir ifade önerilmiştir.

$$G_{IIc} = \frac{9(a + 0,49\Delta l)^2 P^2}{4B^2 h^3 E_1} \quad 2.9$$

4ENF testi için kiriş teorisi aşağıdaki denklem ile bulunur (Silva, 2006).

$$C = \frac{d}{24E_1 I} (18da - 20d^2 + 60L^2 - 6dL) \quad 2.10$$

burada I , alanın ikinci momentidir ve d , her destek ile en yakın yükleme aktüatörü arasındaki mesafeyi temsil eder (Şekil 2.1). Denklem (2.1) kullanılarak G_{IIc} aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 d^2}{16E_1 B^2 h^3} \quad 2.11$$

Özetle, kiriş teorisinin ENF ve ELS testlerine uygulanması, 4ENF testinde oluşmayan çatlak uzunluğunu içerir. Ancak 4ENF testinin uygulanması daha karmaşıktır. Ayrıca sürtünme etkileri (Shuecker & Davidson, 2000) ve sistem uyumu (Davidson & Sun, 2005) sonuçları etkileyebilir. 4ENF testinin bu dezavantajları nedeniyle, ENF ve ELS testleri, mod II' deki kompozitlerin kırılma karakterizasyonuna en uygun olarak ortaya çıkmaktadır.

2.3.2. Uygunluğa dayalı kiriş yöntemi (CBBM)

Klasik veri indirgeme şemalarıyla ilgili zorlukların üstesinden gelmek için yeni bir yöntem önerilmiştir. Yöntem, çatlak eşdeğeri kavramına dayanmaktadır ve yalnızca numune uyumuna bağlıdır. Yöntemin ENF ve ELS testlerine uygulanması aşağıda açıklanmıştır.

ENF testi

Malzeme mukavemeti analizinin ardından, eğilme ve kesme etkileri dahil olmak üzere numunenin gerinim enerjisi şu şekildedir:

$$U = \int_0^{2L} \frac{M_f^2}{2E_f I} dx + \int_0^{2L} \int_{-h}^h \frac{\tau^2}{2G_{13}} B dy dx \quad 2.12$$

burada M_f eğilme momentidir ve

$$\tau = \frac{3V_i}{2A_i} \left(1 - \frac{y^2}{c_i^2}\right) \quad 2.13$$

burada A_i , c_i ve V_i sırasıyla kesit alanını, kirişin yarı kalınlığını ve i segmentinin enine yükünü ($0 \leq x \leq a$, $a \leq x \leq L$ veya $L \leq x \leq 2L$) temsil eder. Castigliano teoreminden, bir çatlak uzunluğu a için yükleme noktasındaki yer değiştirme aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\delta = \frac{dU}{dP} = \frac{3(a^3 + 2L^3)}{8E_f B h^3} + \frac{3PL}{10G_{13} B h} \quad 2.14$$

Numunenin eğilme modülü, P - δ ilişkisi üzerinde temel bir rol oynadığından, ilk uyum C_0 ve ilk çatlak uzunluğu a_0 kullanılarak Denklem 2.15'ten hesaplanabilir.

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3} \left(C_0 - \frac{3L}{10G_{13}Bh} \right)^{-1} \quad 2.15$$

Bu prosedür, farklı numuneler arasındaki malzeme özelliklerinin değişkenliğini ve kiriş teorisine dahil olmayan çeşitli etkileri, örneğin çatlak ucuna yakın gerilme konsantrasyonunu ve iki kol arasındaki teması dikkate almaktadır. Aslında, bu olgular numune davranışını ve sonuç olarak elastik rejimde bile P - δ eğrisini etkilemektedir. Bu metodolojiyi kullanarak etkileri hesaplanan eğilme modülü aracılığıyla açıklanır. Öte

yandan, yayılma sırasında, malzemelerin farklı şekillerde, örneğin mikro çatlama, elyaf köprüleme ve elastik olmayan işlemlerle özellik bozulmasına maruz kaldığı çatlak ucunun (kırılma işlem bölgesi) önünde bir bölge olduğu bilinmektedir. Bu olgular malzeme uyumluluğunu etkiler ve mod II testlerinde dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak, çatlak yayılımı sırasında, FPZ etkisini içerecek şekilde uyum denkleminde gerçek çatlak uzunluğunun düzeltilmesi göz önünde bulundurulur.

$$C = \frac{3(a+\Delta a_{FPZ})^3+2L^3}{8E_f B h^3} + \frac{3L}{10G_{13} B h} \quad 2.16$$

ve sonuç olarak,

$$a_{eq} = a + \Delta a_{FPZ} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3} \quad 2.17$$

burada C_{corr} tarafından verilir.

$$C_{corr} = C - \frac{3L}{10G_{13} B h} \quad 2.18$$

Buradan G_{IIc} aşağıdaki formül ile elde edilebilir.

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3} \quad 2.19$$

Bu veri azaltma şeması birçok avantaj sunmaktadır. Bu metodolojiyi kullanarak çatlak ölçümü yapmaya gerek yoktur. Deneysel olarak, sadece uygulanan yük ve yer değiştirme değerlerini kaydetmek yeterlidir. Bu nedenle, yöntem uygunluğa dayalı giriş yöntemi (CBBM) olarak belirlenmiştir. Bu prosedürü kullanarak, mod II testlerinde telaffuz edilen FPZ etkileri tokluk ölçümüne dâhil edilir. Ayrıca, eğilme modülü ilk uyum ve ilk çatlak uzunluğundan hesaplanır, böylece numune değişkenliğinin sonuçlar üzerindeki etkisi en aza indirilir. Bu yaklaşımda ihtiyaç duyulan malzeme özelliği

G_{I3} 'tür. Bununla birlikte, ölçülen G_{IIc} üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu doğrulanmıştır, bu da ölçümü yapmak için gereksiz hale getiren tipik bir değerin kullanılabileceği anlamına gelir (de Moura vd. , 2006).

ELS testi

ENF testi için tarif edilene benzer bir prosedürün ardından, uygulanan P - δ ilişkisi

$$\delta = \frac{dU}{dP} = \frac{P(3a^3 + L^3)}{2E_1 B h^3} + \frac{3PL}{5G_{I3} B h} \quad 2.20$$

kenetlenmede kök dönme etkilerini ve kiriş teorisinde yer almayan çatlak ucu gerilmeleri veya gerinimlerinin ayrıntılarını dahil etmek için etkin bir kiriş uzunluğu elde edilebilir.

$$C_0 - \frac{3a_0^3}{2Bh^3E_1} = \frac{L_{ef}^3}{2Bh^3E_1} + \frac{3L_{ef}}{5G_{I3}Bh} \quad 2.21$$

FPZ etkisini hesaba katmak için gerçek çatlak uzunluğuna (Δa_{FPZ}) bir düzeltme düşünülmelidir. Denklem 2.20'den çatlak yayılımı sırasındaki uygunluk (C) şu şekilde ifade edilebilir.

$$C - \frac{3(a + \Delta a_{FPZ})^3}{2Bh^3E_1} = \frac{L_{ef}^3}{2Bh^3E_1} + \frac{3L_{ef}}{5G_{I3}Bh} \quad 2.22$$

2.21 ve 2.22 Denklemlerini birleştirerek eşdeğer çatlak uzunluğu şu şekilde verilebilir:

$$a_{eq} = a + \Delta a_{FPZ} = [(C - C_0) \frac{2Bh^3E_1}{3} + a_0^3]^{1/3} \quad 2.23$$

Buradan G_{IIc} aşağıdaki formül ile elde edilebilir.

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{4E_1 B^2 h^3} \quad 2.24$$

Bu prosedürün ardından G_{IIc} , yayılma sırasında çatlak ölçümü yapılmadan elde edilebilir ve bu da önemli bir avantaj olarak düşünülebilir. Denklem 2.24 sadece çatlak büyümesi sırasında uygulanan yüke ve yer değiştirmeye bağlıdır. Ek olarak, kök dönüşünün kenetlenme noktasındaki etkisi ve çatlak ucundaki tekillik etkileri, ilk uyum C_0 ile açıklanabilir. Yayılma sırasında, FPZ'nin kompliyans üzerindeki etkisi de bu metodoloji kullanılarak dahil edilmiştir. Bu durumda (ELS testi) boyuna modülün ölçülmesi gereklidir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Tabakalı Kompozit Malzeme İmalatı

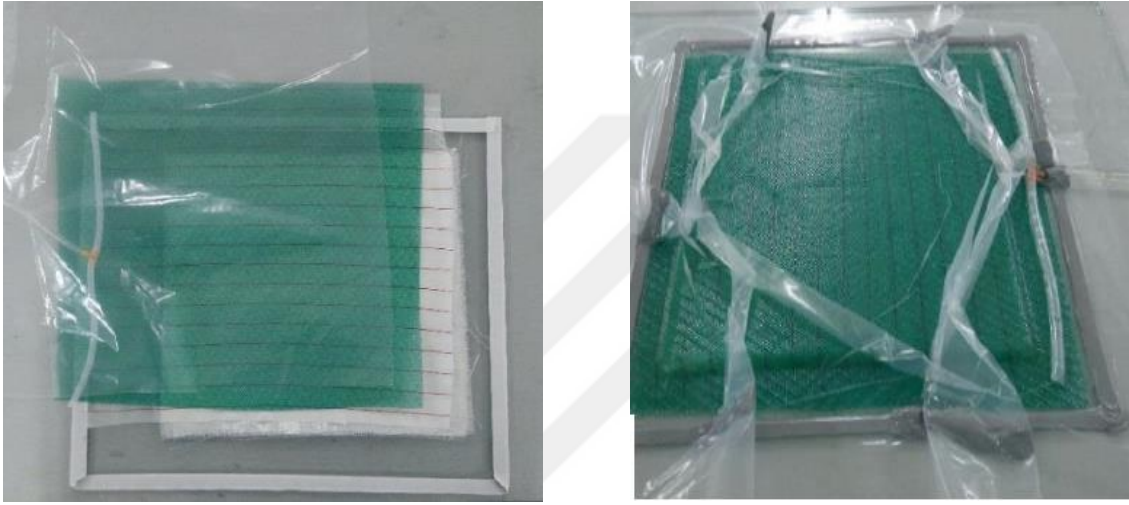
Kompozit malzemelerin üretiminde çok çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları ciddi yatırım maliyetleri gerektirmektedir. Örneğin lif sargılama yöntemi ile kompozit malzeme üretimi, otoklav kullanılarak kompozit malzeme üretimi ya da pultrüzyon uygulaması ile üretim alt yapısı gerektiren ve teknik olarak da uygulanmaları daha zor olan üretim yöntemleridir. Ancak, az bir yatırım maliyeti ile de kompozit malzemeler üretilir. Bu yöntemlerden birisi de Vakum Torbalama Tekniği' dir. Vakum torbalama yöntemi ile basit bir laboratuvar ortamında kompozit malzemeler kolaylıkla üretilmektedir.

Vakum torbalama tekniği esas itibari ile lifli kompozit kumaş malzemesinin bir kalıp içerisine elle yatırılması ve reçinenin kalıp içerisine elle dağıtılması sürecinden sonra devreye alınan bir uygulamadır. Kompozit üretimlerinde basınç hem pozitif hem de negatif olarak uygulanabilmektedir. Pozitif basınç uygulaması otoklav gibi ekipmanlar gerektiğinden uygulaması daha fazla yatırım maliyeti gerektirmektedir. Negatif basınç uygulaması vakum torbalama tekniğinde kullanıldığından ciddi yatırım maliyetleri gerektirmez. Vakum uygulaması ile fazla reçinenin dışarı çekilerek kompozit yapı içerisindeki lif-reçine oranının daha yüksek olması sağlanmaktadır. Ayrıca, vakum uygulaması sayesinde reçinenin bütün katmanlar içerisine tam olarak nüfuziyeti sağlanabilmekte ve bu sayede bütün bölgelerin reçineyle ıslatılmış olması garanti edilmektedir (Turgut vd. , 2007).

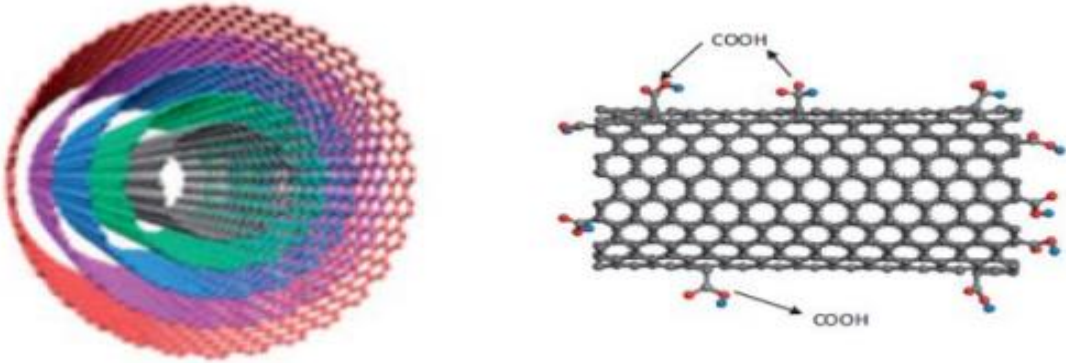
Bu çalışmada ilk olarak tek yönlü E-cam lifi kumaş ve epoksi kullanılarak tabakalı kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Takviye elemanı olarak kullanılan E-cam lifi kumaş 10 ilmek/inch sıklığında iplikler (atkılar) kullanılarak birbirine tutturulan ve 300 gr/cm² ağırlığa sahip olan cam filamentlerden oluşmaktadır. Matris malzeme olarak ise Hexion marka diglisidil bisphenol A (DGBA) tipi MGS L160 epoksi ve H160 epoksi sertleştirici kullanılmıştır. Katkısız ve KNT katkılı E-cam lifi tabakalı kompozit malzeme üretmek için kullanılacak bileşenlerin özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 E-cam lifi ve epoksi reçinenin teknik özellikleri.

| Malzeme Özelliği | Birim | Epoksi L160 | E-cam Lifi |
|-------------------|-------------------|-------------|-------------|
| Yoğunluk | g/cm ³ | 1,80 – 1,20 | 2,48 – 2,60 |
| Elastisite Modülü | GPa | 3,20 – 3,50 | 81,50 |
| Çekme Dayanımı | MPa | 70 – 80 | 2306 |
| % Uzama | - | 5,00 – 6,50 | 2,97 |
| Basma Dayanımı | MPa | 80 – 100 | - |



Şekil 3.1a) Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan sarf malzemeler, b) vakum torbalama tekniği ile tabakalı kompozit levha üretimi.



Şekil 3.2 Çok duvarlı karbon nanotüp (McCrary-Dennis & Okoli, 2012) ve karboksilik asit (COOH) ile karbon nanotüpün fonksiyonlaştırılması (Rao vd. , 2015).

E-cam lifi ve epoksi kullanılarak katkısız ve nano partikül katkılı tabakalı kompozit malzeme elde etmek için vakum torbalama tekniği kullanılmıştır. Vakum torbalama tekniğine göre cam zemin üzerinde kompozit levhanın üretileceği alan vakum sızdırmazlık bandı ile çevrelenmiştir. Levha üretimi için kalıp olarak kullanılacak bu alana sıvı kalıp ayırıcı sürülerek kuruması beklenmiştir. Devamında kalıp içerisine tek yönlü E-cam lifi kumaşlar tek tek yerleştirilmiştir. Her bir kumaş yerleştirildikten sonra hacimce 100 birim epoksi ve 30 birim sertleştirici karıştırılarak hazırlanmış reçine sistemi silikon fırça yardımıyla kumaş yüzeylerine sürülmüştür. Toplamda 16 kat tek yönlü E-cam lifi kullanılmış olup orta ara yüzde (8. arayüz) yapay delaminasyon oluşturulmuştur. Yapay delaminasyon için kalıp ayırıcı ile kaplanmış 12 µm kalınlığında Polietilen tereftalat (PET) film kullanılmıştır. Reçine ile ıslatılan kumaşların üzerine soyma kumaşı ve soyma kumaşının da üzerine reçine akış filesi serilmiştir. Kalıp üzerine atmosfer basıncını uygulamak için vakum pompası yardımıyla vakum naylonu ile kapatılan hacim içerisindeki hava alınmıştır. Vakumlanan hacmin sızdırmazlığı vakum saati ile kontrol edilecek ve tabakalı kompozit malzeme 1 atm basınç altında ve oda sıcaklığında kütleme işlemi yapılmıştır.

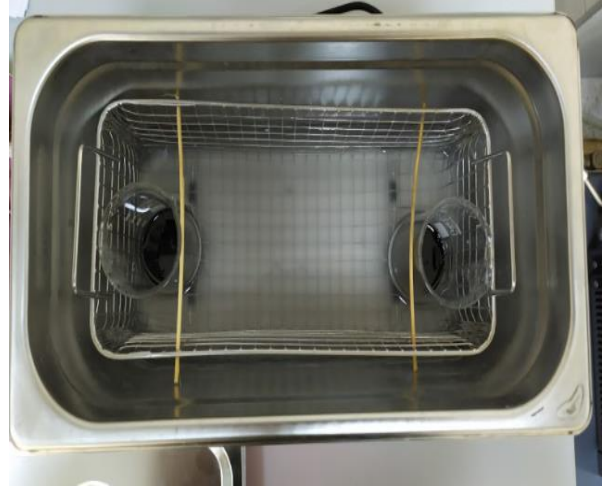
Tablo 3.2 Karbon nano tüp partiküllerin teknik özellikleri ve boyutları (Ur1-1).

| Teknik Özellik | Birim | TİP 1 | TİP 2 | TİP 3 |
|-------------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| Dış Çap | nm | 10 – 20 | 30 – 50 | 10 - 20 |
| İç Çap | nm | 5 – 10 | 5 – 12 | 5 – 10 |
| Uzunluk | µm | 10 – 30 | 10 – 20 | 0,50 - 2 |
| Safılık | % | > 95 | > 95 | > 95 |
| Özgül Yüzey Alan | m ² /g | > 200 | > 60 | > 200 |
| Gerçek Yoğunluk | g/cm ³ | ≈ 2,1 | ≈ 2,1 | ≈ 2,1 |
| Yığın Yoğunluğu | g/cm ³ | 0,22 | 0,22 | 0,22 |

Çoğul duvarlı karbon nano tüplerin ise yüzeyleri COOH ile fonksiyonlaştırılmıştır vedeneysel çalışmalar için çap ve uzunlukları farklı olan üç ayrı tip seçilmiştir. Çoğulduvarlı karbon nano tüp ve fonksiyonlaştırılmış karbon nano tüplerin şematik gösterimi Şekil 3.2’ de verilmiştir. Deneylerde kullanılan COOH ile fonksiyonlaştırılmış karbon nano tüplerin boyutları ve teknik özellikleri ise Tablo 3.2’ de verilmiştir. Karbon nano tüplerin yüzeylerinde bulunan karboksil grupları epoksi ile kovalent bağlar oluşturarak nano tüp ve epoksi ara yüzeyinin dayanımını artırır

(Eskizeybek,2012). Nano partiküller hassas terazi ile tartılarak epoksi içerisine ağırlıkça farklı oranlarda eklenmiştir. Nano partikül ve reçine cam beher içerisinde ısıtıcılı manyetik karıştırıcı ile 30 dk boyunca harmanlanarak ön karıştırma yapılmıştır (Şekil 3.3). Ön karıştırma işlemi 40 °C sıcaklıkta 45 rpm dönüş hızıyla yapılmıştır. İşlem yapılırken uygulanan ısı sayesinde reçinenin akmaya karşı gösterdiği direnç azalmış, düşük karıştırma devri ile de nano boyutlu partiküllerin hasara uğramasının öüne geçilmiştir. Elde edilen karışım sonikatör ile homojenleştirilmiştir.

KNT katkılı tabakalı kompozitleri üretmek için ise nano parçacıklar belirlenen ağırlıkça oranlar dahilinde epoksi reçine içerisine eklenmiş ve manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Elde edilen nano partikül ve epoksi karışımı 6 saat boyunca ultrasonik banyo ile sonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Bu sayede epoksi içerisinde topaklanması muhtemel parçacıkların homojen dağılımı sağlanmıştır. Ultrasonikasyon işlemi nano partiküllerin bir sıvı içerisinde homojen dağılımını sağlamak için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde ultrasonik ses dalgaları yayıldığı ortamdaki moleküler yapıyı seyrelterek ilerler ve ortamı oluşturan moleküler yapıyı titreşime zorlar. Bu esnada topaklanmış nano partiküller ayrılır ve aynı zamanda seyrelen epoksinin boşluklu yapıya sahip nano partiküllerin içerisine nüfuz etmesi kolaylaşır. Ultrasonikasyon işlemi çok uzun süre veya yüksek güç ile uygulanırsa karbon nano tüp partiküller hasar görebilir. Sonikasyon işlemi esnasında banyo içerisinde bulunan suyun sıcaklığı kontrol edilerek epoksi için gerekli güvenli sıcaklık değeri (>45 °C) takip edilmiştir. Ultrasonikasyon işlemi ile elde edilen nano partikül ve epoksi karışımına sertleştirici ilave edilerek reçine sistemi elde edilmiştir. Elde edilecek nano partikül katkılı reçine sistemi vakum infüzyon tekniği kullanılarak tek yönlü E-cam lifi kumaşa uygulanmıştır. Ancak bu teknikte tabakalı kompozit malzemeyi oluşturan kumaşlar reçine tarafından en üst katmandan en alt katmana doğru ıslatılırken, nano partiküllerin lifler tarafında kalabilme ve tabakalı kompozit malzeme içerisinde homojen dağılmayacağı riski ön görülmüştür. Bu nedenle hem katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit levha hem de nano partikül katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit levhaların üretimi vakum torbalama yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Üretilen malzemelerden test numuneleri elde etmek için su jeti ile kesim tekniği kullanılmıştır. Numunelerdeki kalınlık değişimleri 0,1 mm'yi geçmemesine dikkat edilmiştir.



Şekil 3.3 Manyetik karıştırma ve ultrasonik banyo.



Şekil 3.4 Su jeti ile kesim.

Elde edilen kompozit levhalardan su jeti ile kesim yapılarak Şekil 3.5’de verilen ölçülerde yapay delaminasyonlu mod II kırılma test numuneleri (End Notched Flexure, ENF) üretilmiştir. ENF numunesi tipik olarak 137,5 mm uzunluğunda (L_0), 25 mm genişliğinde (w) ve 4,4 mm kalınlığında ($2h$) üretilmiştir.

3.2 Mod II Kırılma Testleri

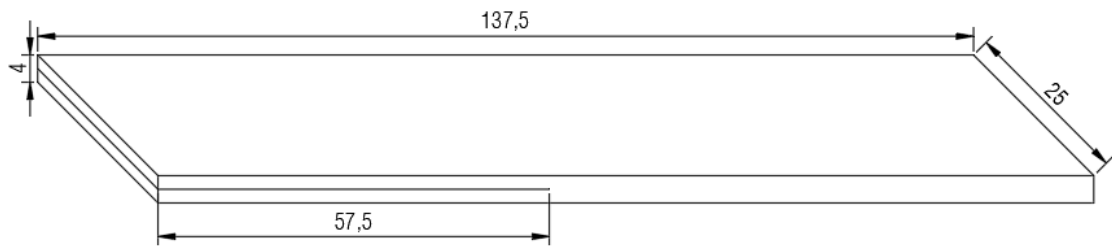
Yapılan testlerde *American Society for Testing and Materials* (ASTM) tarafından yayınlanan test metotları uygulanmıştır. Tabakalı kompozit malzemelerin statik yükleme altında mod II kırılma toklukları “*ASTM D7905 - 14 Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*” metoduna göre belirlenmiştir. Testleri gerçekleştirmek için $[0_{16}]$ dizilime sahip tabakalı kompozit levhalar üretilmiştir. Tabakalı kompozit malzeme içerisinde yapay delaminasyon

oluşturmak için kalınlığı 12 μ olan Polietilen tereftalat (PET) film kullanılmıştır. PET film üzerine kalıp ayırıcı sürülmüş ve kuruduktan sonra tabakalı kompozit malzemenin orta ara yüzüne yerleştirilmiştir.

Test numuneleri *ASTM D7905 - 14* metodunun tavsiye ettiği ölçülerde su jeti makinesiyle kesilmiştir. Kesim sonucunda, toplam yapay çatlak uzunluğu 57,5 mm ve ölçüleri ($L \times w \times h$) 137,5x25x4,4 mm olan uç çentikli eğilme numuneleri elde edilmiştir (Şekil 3.5). Yük uygulama noktalarından yapay çatlak ucuna (ao) kadar olan mesafe ise 25 mm'dir. Numune, destekler arasın mesafe ($2L$) 100 mm ve delaminasyonun olmadığı kenardan 5 mm mesafe olacak şekilde üç nokta eğme test aparatına yerleştirilmiştir. Yükleme ve destek silindirlerinin çapı yaklaşık 5 mm' dir. Testlere başlamadan önce her bir numunenin genişliği ve kalınlığı ölçülmüştür.

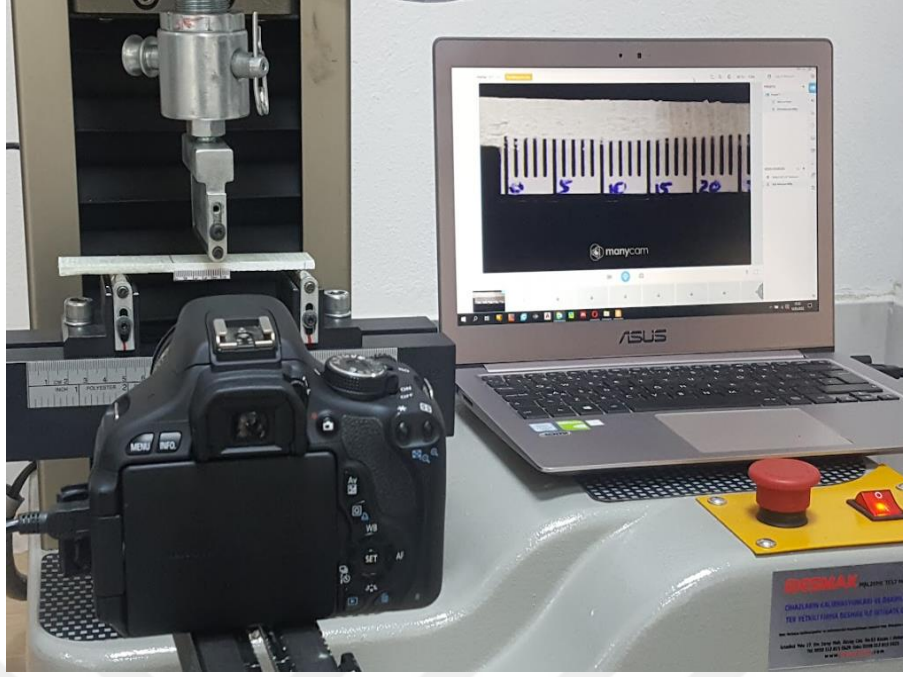
ENF numunesi, 25 mm' lik bir çatlak uzunluğu (a) elde edilecek şekilde standart bir üç noktalı bükme tertibatına yerleştirilmiştir. Çatlak uzunluğunun sonraki ölçümü için numune kenarındaki destek konumu işaretlenmiştir. Merkez kiriş sapması (yük noktası yer değiştirmesi) δ makine uyumluluğu için düzeltilmiş çapraz kafa yer değiştirmesinden ölçülmüştür.

0,5-1 mm/dk hızında bir çapraz kafa hızı kullanılmış ve yük-yer değiştirme grafiği oluşturulmuştur. Hem yükleme hem de boşaltma durumları üniversal test cihazı yazılımı sayesinde kayıt altına alınmıştır. Katastrofik kırılmadan önce herhangi bir yavaş, kararlı çatlak yayılımını tespit etmek için yükleme sırasında çatlak ucu 10x büyütme Canon EOS 650D marka fotoğraf makinesi yardımıyla görüntülenmiştir.



Şekil 3.5 Yapay delaminasyonlu mod II test numunesi.

ENF numunelerinin yan yüzeyi su esaslı beyaz boya ile boyanarak boyanan yüzeyde çatlak takibi yapılmıştır. ENF numuneleri üç nokta eğme deney aparatına yerleştirilmiş ve BESMAK E-serisi 10 kN üniversal test cihazı ile kırılmaya zorlanmıştır. ENF numuneleri orta noktalarından 0,75 mm/dk yer değiştirme hızı ile eğilmeye maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.6 Mod II tabakalar arası kırılma testi düzeni.

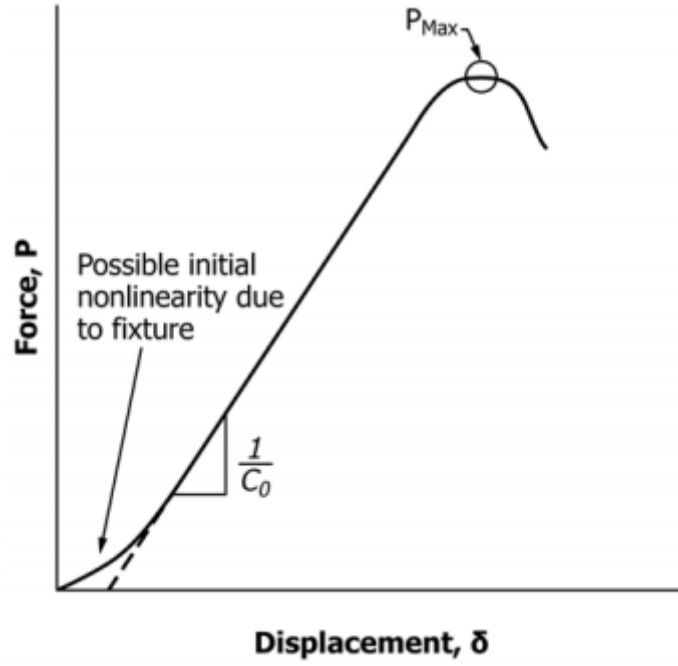
ENF numunesinin eğilme modülü E_1 bilinmiyorsa, kırılma tokluğu G_{IIc} , ölçülen kompliyans C kullanılarak aşağıdaki kiriş teorisi ifadesinden hesaplanabilir:

$$G_{IIc} = \frac{9a^2P^2(C-C_{SH})}{4bL^3[1+1,5(\frac{a}{L})^3]} \quad 3.1$$

Burada C_{SH} , hesaplanan tabakalar arası kayma deformasyonundan kaynaklanan bir kompliyans düzeltme faktörüdür. C_{SH} değerinin hesaplanmasında G_{13} kullanılır. Fakat G_{13} değeri bilinmiyorsa düzlem içi kesme modülü G_{12} , tek yönlü kompozitler için G_{13} 'e denk olarak kullanılabilir (Carlsson vd. ,2014).

$$C_{SH} = \frac{6L+3a-l^3/a^2}{20bhG_{13}} \quad 3.2$$

Test boyunca numunenin yan yüzeyi dijital kamera ile izlenerek mod II yüklemesi altında çatlak boyu (a) ölçülmüştür. Test başlangıcı ile birlikte dijital kamera kaydı başlatılmış ve her bir çatlak boyunun tespit edildiği an için test süresi kaydedilmiştir. Kaydedilen test süresi daha sonra test cihazından elde edilen yük ve yer değiştirme verilerini çatlak uzunluğu ile eşleştirmek için kullanılmıştır. Mod II kırılma tokluğu testleri her bir numune tipi için altı defa tekrar edilmiştir.



Şekil 3.7 Uygunluk ve maksimum yük noktası belirleme grafiği (ASTM 7905)

Tabakalı kompozit malzemenin mod II kırılma tokluğu (G_{IIc}), yapay delaminasyon çatlakını ilerletmek için gerekli kritik yük (P_{cr}) ve yer değiştirme (δ_{cr}) kullanılarak hesaplanmıştır. Kritik yük ve yer değiştirme ise ASTM D7905 - 14 metoduna göre gözle izlenerek (*Visual Observation - VIS*), P - δ grafiğinin doğrusallıktan uzaklaştığı nokta tespit edilerek (*NL* noktası) bulunmuştur.

3.3 Hasara Uğramış ENF Numunelerinin Eğilme Testleri

Tabakalar arası mod II kırılma tokluğu değerleri tespit edilen katkısız ve katkılı numunelerde tabakaları arasında çatlak ilerlemesi olmasına rağmen çatlakın altında ve üstünde bulunan katmanların kırılmadığı görülmüştür. Kırılmayan katmanların varlığı ile malzemenin bir miktar daha eğme yüküne dayanabileceği düşünülmüştür. Katkısız ve farklı tiplerde KNT katkılı numunelerin arta kalan eğilme dayanımlarının tespiti için numunelere eğme testi yapılmıştır. Eğme testleri ASTM D790-15 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Testler BESMAK marka universal çekme-basma test cihazında yapılmıştır. Numuneler kompozit malzemeler için özel olarak tasarlanmış üç nokta eğme aparatının mesnet silindirleri üzerine yerleştirilerek orta noktadan basma yükü uygulanmıştır. Yükleme başlığı ve mesnetlerin silindir çapları 5 mm'dir. Test numunesi kırıldığında test sonlandırılmıştır.

ENF Numunelerinin eğilme analizleri için ASTM 790 Standardı kullanılmıştır. Fakat testlerin mod II kırılma tokluğu testleri ile uyumlu olması için $2L = 100 \text{ mm}$ alınarak testler yapılmıştır. Test hızı denklem 3.3'e göre belirlenmiş ve 3.79 mm/dk olarak hesaplanmıştır. Test esnasında maksimum yükler bulunarak denklem 3.4' ye göre esneklik mukavemeti hesaplanmıştır. Test hızını hesaplamak için;

$$R = ZL^2/6d \quad 3.3$$

R : Test hızı, mm/dk

L : Mesnet silindirlerinin merkezleri arasındaki mesafe, mm

d : Numune kalınlığı, mm

Z : Dış yüzdeki liflerin şekil değiştirme oranı, 0.01 mm/mm/dk
denklemleri kullanılmıştır. Eğilme mukavemetini hesaplamak için;

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad 3.4$$

σ_f : Esneklik mukavemeti, MPa

P_{max} : Maksimum kuvvet, N

b : Numune genişliği, mm

denklemleri kullanılmıştır. Eğilme gerilmesini hesaplamak için;

$$\varepsilon_f = 6Dd/L^2 \quad 3.5$$

denklemleri kullanılmıştır. Katkısız ve nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin esneklik deneyleri üç kez tekrar edilmiştir. Bu üç değer ortalaması alınarak standart sapmaları belirlenmiştir. Üç nokta eğme esneklik testleri sonucunda esneklik mukavemetleri bulunmuştur.

3.4 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri

Nano partikül katkılı ve katkısız ENF numunelerinin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (*Scanning Electron Microscope – SEM*) ile incelenerek karşılaştırılmıştır. Nano partiküllerin kırılma yüzeylerindeki matris malzeme ve lifler ile olan etkileşimi ve kırılma mekaniğine etkisi araştırılmıştır. ENF numuneleri üniversal

freze tezgâhında yaklaşık 4 mm kalınlığında işlenerek SEM numuneleri hazırlanmıştır. SEM görüntülerini belirgin olarak elde edebilmek için incelenecek yüzeylerin ENF numunesi içerisinde lif köprülerinin daha az olduğu kısımlardan çıkarılmasına dikkat edilmiştir.

SEM görüntülerini çekmek için Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan FEI marka Quanta 650 Field Emission SEM taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 3.8). Öncelikle numuneler mikroskop tablasına karbon bant ile sabitlenmiştir. Net görüntü elde etmek için kırılma yüzeyleri altın – paladyum tabakası ile kaplanmıştır. Altın – paladyum kaplamanın diğer bir görevi de görüntüleme esnasında numune yüzeyine uygulanan elektron yüklemesinin kırılma yüzeyinde oluşturabileceği olumsuz etkiyi azaltmaktır (Thakre vd. , 2011). Nano partiküllerin kaplama ile tamamen örtülmesini engellemek için kaplama kalınlığının 3 nm'yi geçmemesine dikkat edilmiştir.

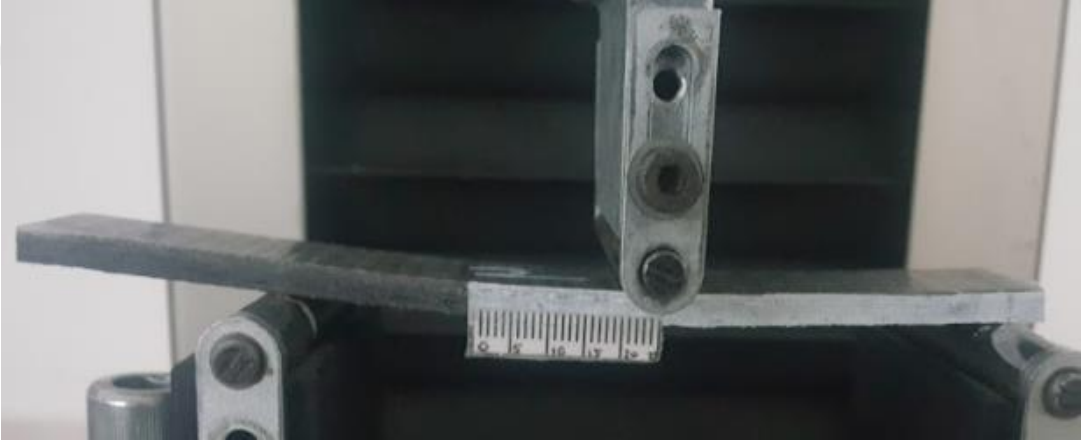


Şekil 3.8 FEI marka Quanta 650 Field Emission SEM model taramalı elektron mikroskobu (Url-2).

4. BULGULAR

4.1 E-cam lifi/epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin Mod II Tabakalar Arası Kırılma Analizleri

Üretilen E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozitlerin mod II yüklemesi altında birim şekil değiştirme enerjisi yayılım hızını tespit edebilmek için mod II tabakalar arası kırılma testleri yapılmıştır. Tabakalar arası mod II kırılma tokluğunun belirlenebilmesi için *ASTM D7905-14* standardı uygulanmıştır. Mod II yüklemesine maruz ENF numunesi Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu kompozit için, gözle görülür kararlı çatlak uzantısı olmadan hızlı kırılma meydana gelmiş ve tepki eğrisi esasen kırılmaya kadar doğrusal olmuştur.



Şekil 4.1 ENF numunesinin üniversal test cihazına yerleşimi.

Karbon nano tüp içeren tabakalı kompozit malzemelerin kırılma mekaniği üzerine şu ana kadar yapılan çalışmalarda genellikle tek tip karbon nano tüp kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada ise karbon nano tüp partiküllerin ebatlarının kırılma mekaniğine etkisini araştırmak için TİP 1 ve TİP 3 karbon nano tüpler ve karbon nano tüp partiküllerin dış çapının kırılma mekaniğine etkisini araştırmak için TİP 1 ve TİP 2 karbon nano tüpler seçilmiştir. Tabakalar arası kırılma mekaniğini araştırmak için yapılan tüm testler Tablo 4.1’de listelenmiştir.

Tablo 4.1 Mod II tabakalar arası kırılma ve eğilme test adetleri.

| Test Numuneleri | Ağırlıkça Partikül Oranı (%) | Mod II Kırılma Testleri (Adet) | Eğilme Testleri (Adet) |
|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Katkısız | 0 | 6 | 3 |
| TİP 1 KNT | 0,1 | 6 | 3 |
| (10-20 nm dış çap, | 0,3 | 6 | 3 |
| 5-10 nm iççap, | 0,7 | 6 | 3 |
| 10-30 mikron uzunluk) | 0,9 | 6 | 3 |
| TİP 2 KNT | 0,1 | 6 | 3 |
| (30-50 nm dış çap, | 0,3 | 6 | 3 |
| 5-12 nm iççap, | 0,7 | 6 | 3 |
| 10-20 mikron uzunluk) | 0,9 | 6 | 3 |
| TİP 3 KNT | 0,1 | 6 | 3 |
| (10-20 nm dış çap, | 0,3 | 6 | 3 |
| 5-10 nm iççap, | 0,7 | 6 | 3 |
| 0,5-2 mikron uzunluk) | 0,9 | 6 | 3 |
| Toplam Test Sayısı | | 78 | 39 |

Mod II kırılma testleri ile tüm numuneler için elde edilen ortalama P_{cr} - δ_{cr} , P_{max} - δ_{max} ve G_{IIC} değerleri Tablo 4.2 'de verilmiştir. En yüksek P_{max} değeri (1079,05 N) TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi katkılı kompozit malzemenin ağırlıkça % 0,3 oranında görülürken en düşük P_{max} değeri (785,84 N) TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi katkılı kompozit malzemenin ağırlıkça % 0,7 oranında görülmüştür. En yüksek P_{max} değerine karşılık gelen δ_{max} değeri 5,18 mm'dir.

Tablo 4.2 Mod II kırılma testleri için $P_{cr}-\delta_{cr}$, $P_{max}-\delta_{max}$ ve G_{IIc} değerleri.

| Test Numuneleri | Ağırlıkça Partikül Oranı (%) | P_{cr} (N) | δ_{cr} (mm) | P_{max} (N) | δ_{max} (mm) | G_{IIc} (kJ/m ²) | %CV |
|-----------------|------------------------------|--------------|--------------------|---------------|---------------------|--------------------------------|------|
| Katkısız | 0 | 791,20 | 4,36 | 892,89 | 5,07 | 1,35 | |
| TİP 1 KNT | 0,1 | 924,49 | 4,89 | 959,35 | 5,43 | 1,84 | 8,50 |
| | 0,3 | 1042,83 | 4,83 | 1079,05 | 5,18 | 2,40 | 8,89 |
| | 0,7 | 847,47 | 4,88 | 880,60 | 5,26 | 1,65 | 7,62 |
| | 0,9 | 859,24 | 4,68 | 895,07 | 5,07 | 1,74 | 8,76 |
| TİP 2 KNT | 0,1 | 917,90 | 4,87 | 949,59 | 5,37 | 1,82 | 1,48 |
| | 0,3 | 967,37 | 5,31 | 994,79 | 5,59 | 2,09 | 9,69 |
| | 0,7 | 753,60 | 4,34 | 785,84 | 4,76 | 1,33 | 4,87 |
| | 0,9 | 968,36 | 5,15 | 994,20 | 5,50 | 1,89 | 5,62 |
| TİP 3 KNT | 0,1 | 886,85 | 4,65 | 909,12 | 4,87 | 1,82 | 7,13 |
| | 0,3 | 984,59 | 5,24 | 1002,44 | 5,51 | 2,27 | 7,77 |
| | 0,7 | 867,17 | 4,74 | 887,80 | 4,97 | 1,73 | 9,69 |
| | 0,9 | 812,39 | 4,75 | 838,87 | 5,11 | 1,50 | 4,92 |

VIS noktası bütün testlerde sağlıklı olarak tespit edilemediği için *NL* noktasında okunan $P-\delta$ değerleri $P_{cr}-\delta_{cr}$ olarak kabul edilmiş ve G_{IIc} değerleri buna göre hesaplanmıştır. ENF numunesine kuvvet uygulanmaya başladıktan sonra kuvvet *NL* noktasına kadar doğrusal olarak artmıştır. Çatlak ilerlemeye başladıktan sonra yaklaşık ilk 5-7 mm çatlak ilerlemesi kararlı halde iken devamında ani ve düzensiz çatlak gelişimi meydana gelmiştir. Bununla birlikte ENF numunelerin tepki kuvveti katastrofik olarak düşüş göstermiştir. Bu kırılma davranışı katkısız ve KNT katkılı tüm ENF numunelerde aynı şekilde görülmüştür. *NL* ile P_{max} arası 0 mm çatlak boyu ile 5-7 mm çatlak boyu arasına denk gelir. P_{max} elde edildikten sonra kuvvet ani düşüş gösterir.



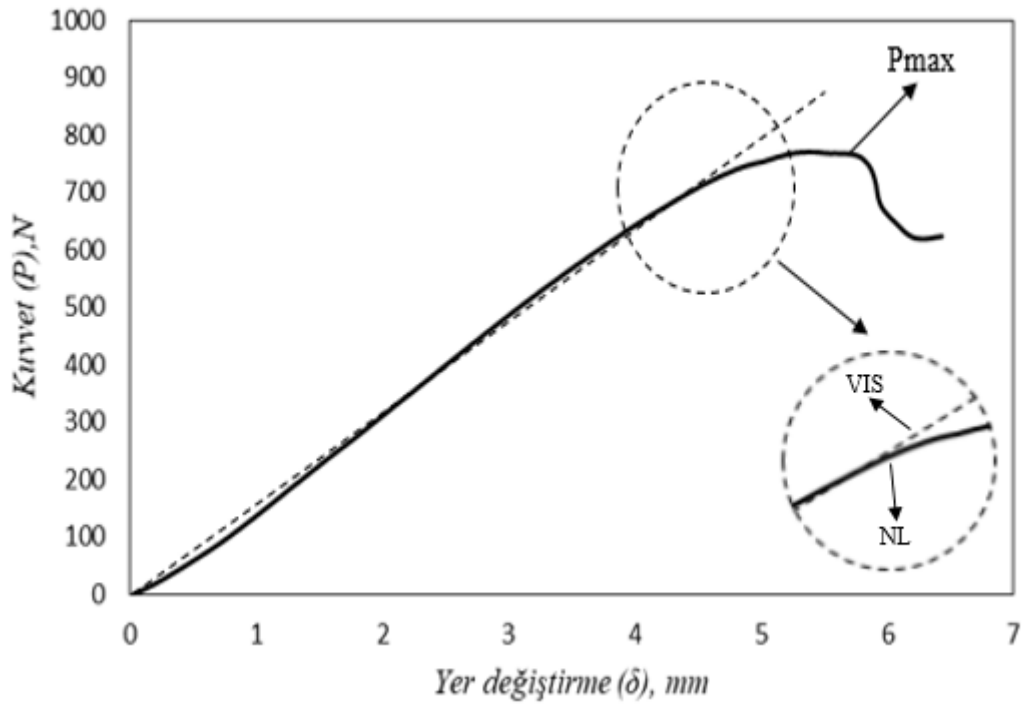
Şekil 4.2 ENF numunesinin $P_{max}-\delta_{max}$ noktasındaki durumu.

Şekil 4.2’de ENF numunesinin $P_{max}-\delta_{max}$ noktasındaki durumu gösterilmiştir. Mod II testi esnasında alt ve üst katmanlar birbiri üzerinde kayma hareketi göstermişlerdir.

4.1.1. Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kırılma davranışı

ENF numunesi kullanılarak katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kırılma testleri yapılmış ve elde edilen veriler ile hazırlanan $P-\delta$ grafiğinin bir örneği Şekil 4.3’de sunulmuştur. $P-\delta$ grafiğinin doğrusallıktan uzaklaştığı nokta NL noktası olarak belirlenmiştir. Çatlak başlangıcının gözle ilk görüldüğü nokta ise VIS noktası olarak belirlenmiştir.

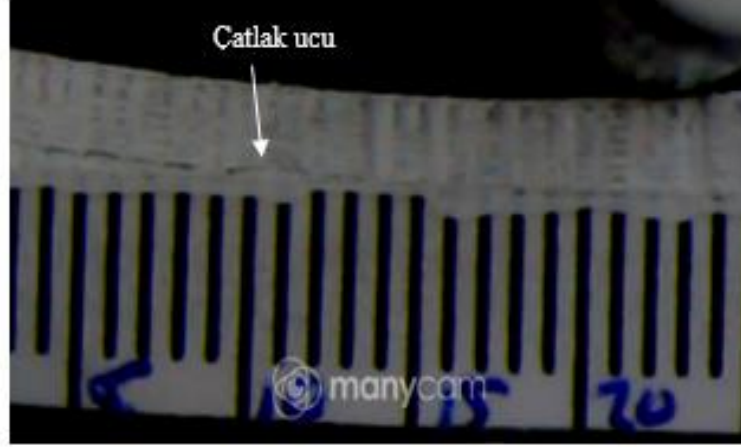
Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzeme için $P-\delta$ grafiğinin doğrusal bölgesindeki eğiminin tersi olan ve katkısız kompozit malzemenin esnekliği ile doğru orantılı olan kompliyans değeri (C) 0,14 ile 0,18 mm/N aralığında değişmiştir. Yapay delaminasyonun ucunda çatlağın başladığı anda ise ortalama C değeri VIS noktasına göre 0,1546 mm/N, NL noktasına göre ise 0,1590 mm/N’dur (Daricik, 2017).



Şekil 4.3 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin $P-\delta$ grafiği.

P_{cr} ve δ_{cr} değerlerinin tespit edilmesi için ASTM D7905-14 standart test metodunda tavsiye edilen yöntemler (VIS noktası, NL noktası) Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Her iki metot ile elde edilen P_{cr} ve δ_{cr} değerleri birbirlerine çok yakın olmakla birlikte NL noktasına göre tespit edilen P_{cr} değeri ve ona karşılık gelen δ_{cr}

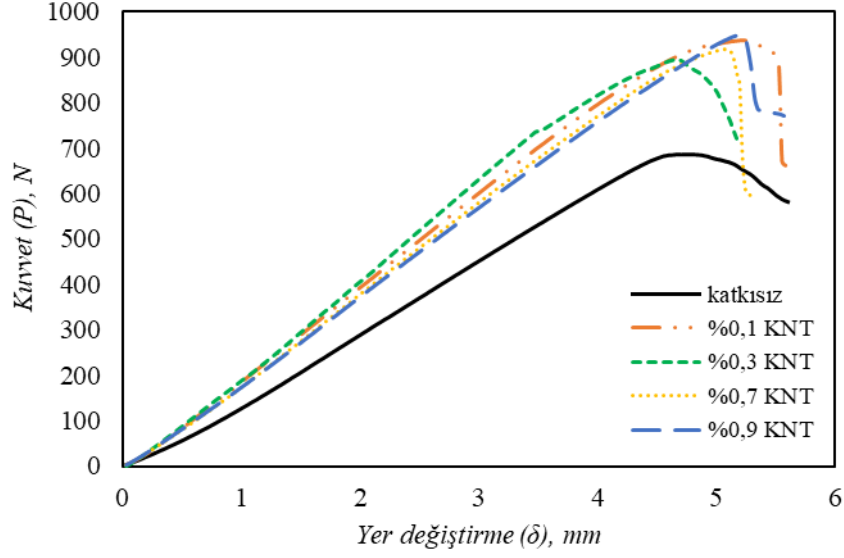
değeri en konservatif olandır. Katkısız ENF numunesinin çatlak gelişimi Şekil 4.4’de gösterilmiştir. $P-\delta$ grafiğinde P_{max} değerine ulaştıktan sonra kuvvet değeri sürekli düşüş göstermiştir. Bu bölgede çatlak boyu ve yer değiştirme sürekli artarken kuvvet değeri düşüş göstermiştir.



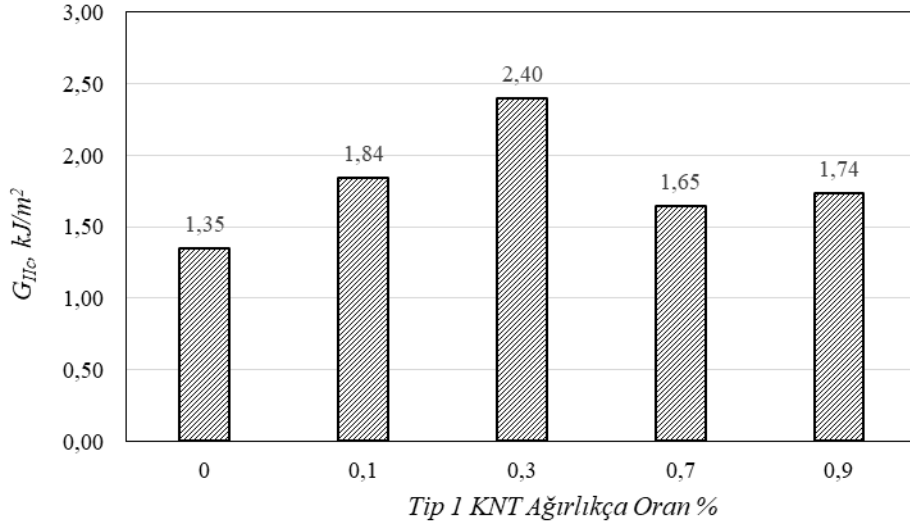
Şekil 4.4 Katkısız E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerde tabakalar arası çatlak gelişiminin gözle takibi.

4.1.2. TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kırılma davranışı

TİP 1 KNT partiküllerin iç ve dış çap ölçüleri TİP 3 KNT partiküller ile aynı olup, uzunlukları TİP 2 ve TİP 3 KNT partiküllerin uzunluğundan daha fazladır. Matrisine ağırlıkça farklı oranlarda TİP 1 KNT ilave edilmiş E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelere ait $P-\delta$ grafik örnekleri Şekil 4.5’te sunulmuştur. Elde edilen $P-\delta$ verileri kıyaslandığında TİP 1 KNT’lerin E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemeye eklenmesi ile malzemenin eğilme rijitliğinin arttığı anlaşılmaktadır. Eğme yüküne karşı en yüksek direnci ağırlıkça %0,3 KNT içeren E-cam lifi/epoksi kompozit malzeme göstermiştir.

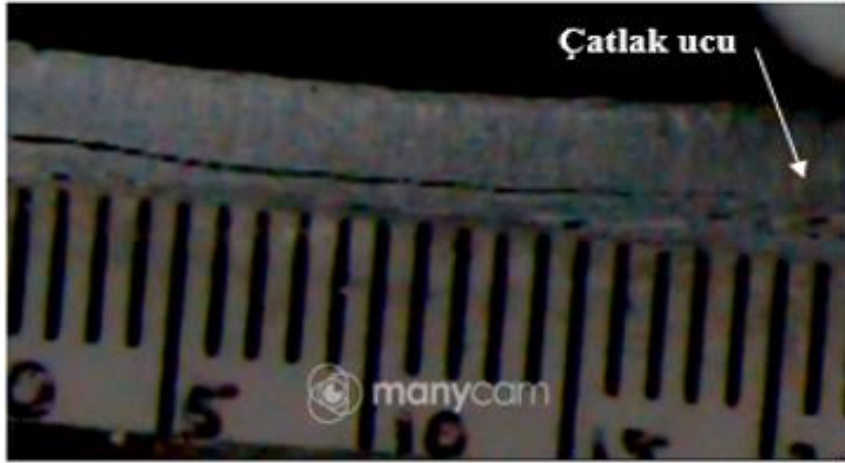


Şekil 4.5 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 1 KNT katkıli E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait $P-\delta$ grafikleri.



Şekil 4.6 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 1 KNT katkıli E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait G_{IIc} değerleri.

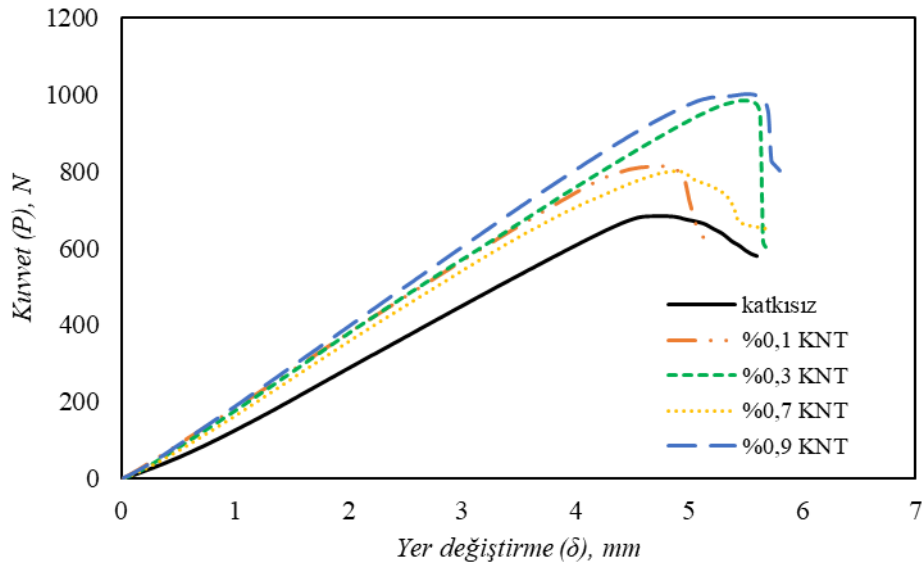
TİP 1 Karbon nano tüp katkıli E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerde en büyük tabakalar arası mod II kırılma tokluğu değeri %77,7'lik artış ile ağırlıkça %0,3 oranında görülürken en az artış %22,2'lik artış ile ağırlıkça %0,7 oranında görülmüştür. Şekil 4.7'de görüldüğü üzere test esnasında gözle çatlak ucunun takibi yapılmaya çalışılmıştır.



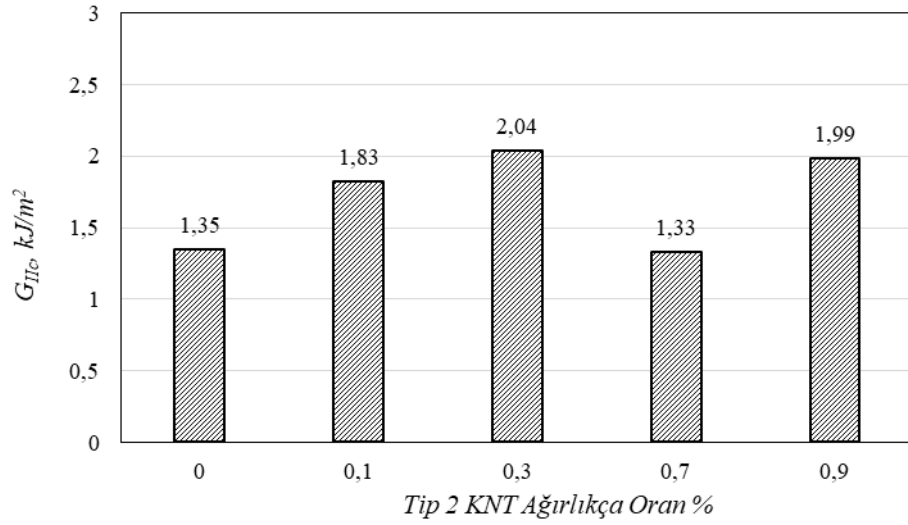
Şekil 4.7 TİP 1 KNT katkıli E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerde tabakalar arası çatlak gelişimi.

4.1.3. TİP 2 KNT katkıli E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kırılma davranışı

TİP 2 KNT partiküllerin iç ve dış ölçüleri TİP 1 ve TİP 3 KNT partiküllere göre daha büyüktür. Uzunlukları ise TİP 3 KNT partiküllere göre fazla, TİP 1 KNT partiküllere göre ise daha azdır. Matrisine ağırlıkça farklı oranlarda TİP 2 KNT ilave edilmiş E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelere ait $P-\delta$ grafik örnekleri Şekil 4.8’de sunulmuştur. Elde edilen $P-\delta$ verileri kıyaslandığında TİP 2 KNT’lerin E-cam lifi/epoksi tabalı kompozit malzemeye eklenmesi ile malzemenin eğilme rijitliğinin arttığı anlaşılmaktadır. Eğme yüküne karşı en yüksek direnci ağırlıkça %0,9 KNT içeren E-cam lifi/epoksi kompozit malzeme göstermiştir.



Şekil 4.8 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 2 KNT katkıli E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait $P-\delta$ değerleri.

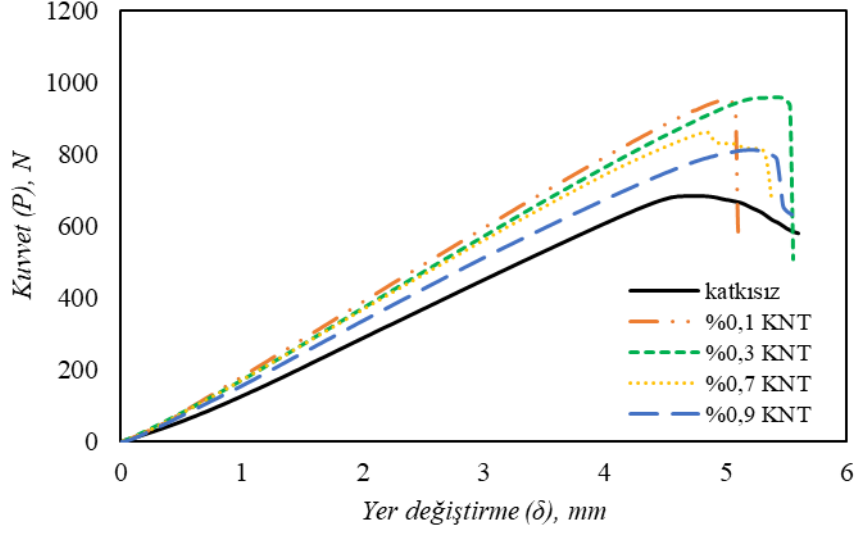


Şekil 4.9 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait G_{IIc} değerleri.

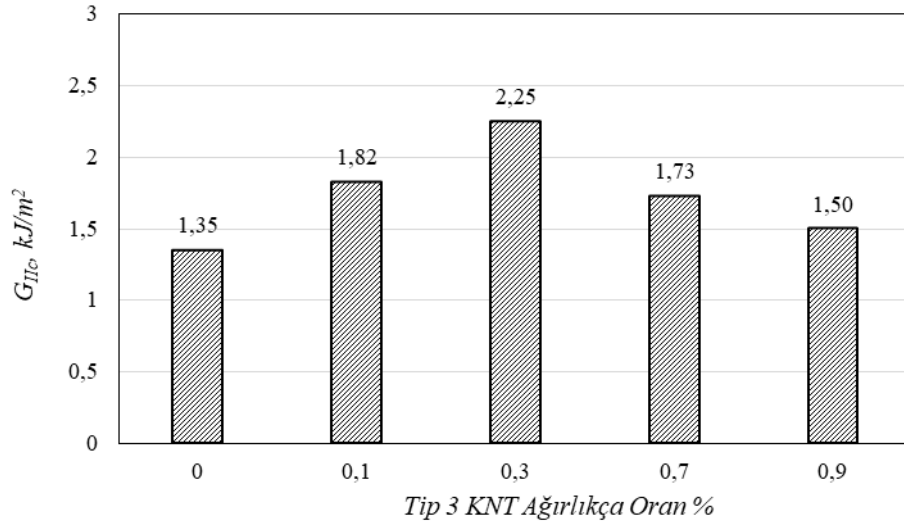
TİP 2 Karbon nano tüp katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerde en büyük tabakalar arası mod II kırılma tokluğu değeri %51,1'lik artış ile ağırlıkça %0,3 oranında görülürken ağırlıkça %0,7 oranında %-1,48'lik bir azalma meydana gelmiştir.

4.1.4. TİP 3 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin kırılma davranışı

TİP 3 KNT partiküllerinin iç ve dış çap ölçüleri TİP 1 KNT partiküller ile aynı, TİP 2 KNT partiküllere göre ise daha küçüktür. Uzunlukları ise TİP 1 ve TİP 2 KNT partiküllere göre daha azdır. Matrisine ağırlıkça farklı oranlarda TİP 3 KNT ilave edilmiş E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelere ait $P-\delta$ grafik örnekleri Şekil 4.10' da sunulmuştur. Elde edilen $P-\delta$ verileri kıyaslandığında TİP 3 KNT'lerin E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemeye eklenmesi ile malzemenin eğilme rijitliğinin arttığı anlaşılmaktadır. Eğme yüküne karşı en yüksek direnci ağırlıkça %0,3 KNT içeren E-cam lifi/epoksi kompozit malzeme göstermiştir.



Şekil 4.10 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 3 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait $P-\delta$ değerleri.



Şekil 4.11 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 3 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait G_{IIc} değerleri.

TİP 3 Karbon nano tüp katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerde en büyük tabakalar arası mod II kırılma tokluğu değeri %66,6'lık artış ile ağırlıkça %0,3 oranında görülürken en az artış %11,1'lik artış ile ağırlıkça %0,9 oranında görülmüştür.

4.2. ENF Numunelerinin Arta Kalan Eğilme Dayanımları

Mod II kırılma testleri yapıldıktan sonra KNT takvyeli E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin yapısal bütünlüğü tam olarak bozulmamıştır. 8. Arayüzde bulunan delaminasyon ilerlemiş ancak $[0_8]$ dizilimli alt ve üst tabakalarda gözle görülür hasar oluşmamıştır. Bundan dolayı tabakalı kompozitlerde delaminasyon gelişiminden

sonra arta kalan eğilme dayanımının olduğu düşünülmüştür. Tablo 4.3 'de üç nokta eğme testlerinden elde edilen P_{max} , δ_{max} ve σ_{max} değerleri verilmiştir. En yüksek P_{max} değeri (1147,66 N) TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi katkılı kompozit malzemenin ağırlıkça % 0,1 oranında görülürken en düşük P_{max} değeri (1004,73 N) TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi katkılı kompozit malzemenin ağırlıkça % 0,9 oranında görülmüştür. En yüksek P_{max} değerine karşılık gelen δ_{max} değeri 21,92 mm'dir.

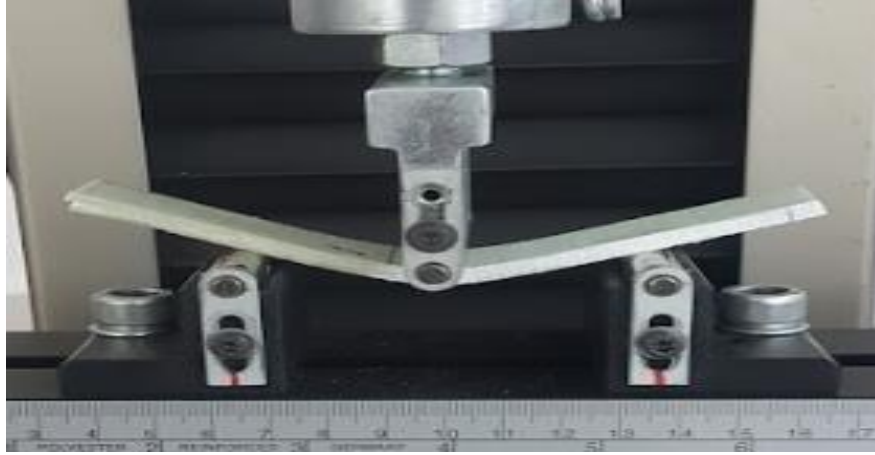
Tablo 4.3 Üç nokta eğme testleri için P_{max} , δ_{max} ve σ_{max} değerleri.

| Test Numuneleri | Ağırlıkça Partikül Oran (%) | P_{max} (N) | δ_{max} (mm) | σ_{max} (Mpa) | %CV |
|------------------|-----------------------------|---------------|---------------------|----------------------|------|
| Katkısız | 0 | 908,63 | 21,10 | 269,22 | 2,00 |
| TİP 1 KNT | 0,1 | 1147,66 | 21,92 | 352,07 | 2,84 |
| | 0,3 | 1076,66 | 23,35 | 319,01 | 1,71 |
| | 0,7 | 1016,42 | 25,16 | 301,15 | 2,00 |
| | 0,9 | 1004,73 | 22,28 | 297,69 | 2,88 |
| TİP 2 KNT | 0,1 | 1065,81 | 20,00 | 315,79 | 4,58 |
| | 0,3 | 1054,12 | 23,07 | 312,33 | 3,60 |
| | 0,7 | 1105,94 | 26,51 | 327,68 | 1,19 |
| | 0,9 | 1047,58 | 21,26 | 310,39 | 2,23 |
| TİP 3 KNT | 0,1 | 1040,70 | 21,58 | 308,35 | 2,29 |
| | 0,3 | 1115,69 | 25,57 | 330,57 | 1,81 |
| | 0,7 | 1072,74 | 24,09 | 317,85 | 2,81 |
| | 0,9 | 1029,32 | 21,30 | 304,98 | 0,94 |

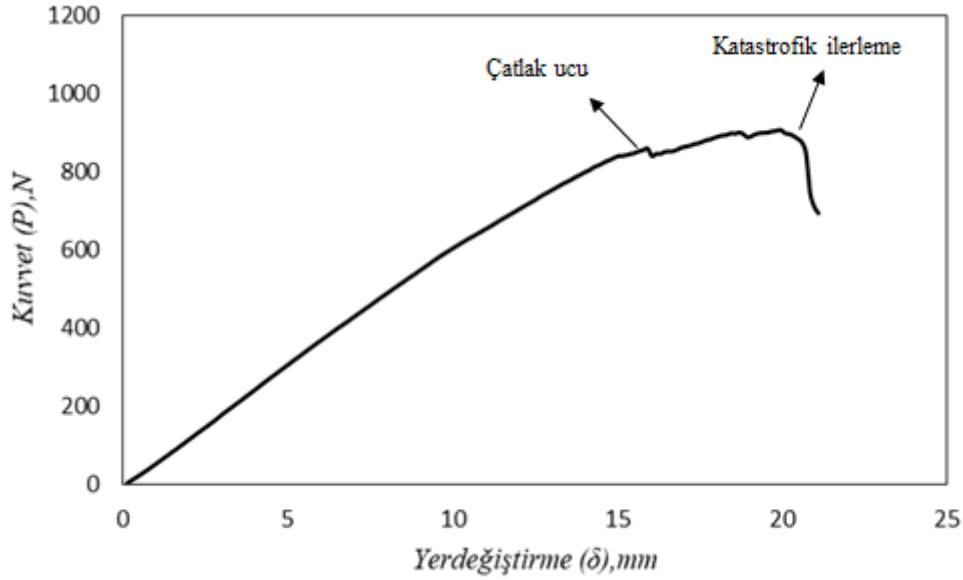
4.2.1. Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin eğilme davranışı

Üç nokta eğme test aparatı ile saf eğmeye maruz bırakılan katkısız numunenin deformasyonu Şekil 4.12 'de verilmiştir. Eğme yüküne bağlı olarak malzeme doğrusal yük-yer değiştirme davranışı göstermiştir. Yük altında orta arayüzde bulunan delaminasyon bir miktar daha ilerlemiştir. Delaminasyonun ilerlemesi ile $P-\delta$ grafiği doğrusallıktan uzaklaşmıştır (Şekil 4.13). Devamında numune bir miktar daha yük taşımış ve son olarak aniden kırılarak bütünlüğünü kaybetmiştir. Eğme yükü ile numunenin alt yüzünde düzlemsel çekme, üst yüzünde ise düzlemsel basma gerilmeleri oluşmuştur. Oluşan gerilmelere bağlı olarak numunelerin önce üst katman grubu sonrasında ise alt katman grubu kırılmıştır. Katkısız E-cam lifi/epoksi kompozit

malzemenin mod II kırılmasından sonra arta kalan eğilme dayanımının 269,22 MPa olduğu hesaplanmıştır.



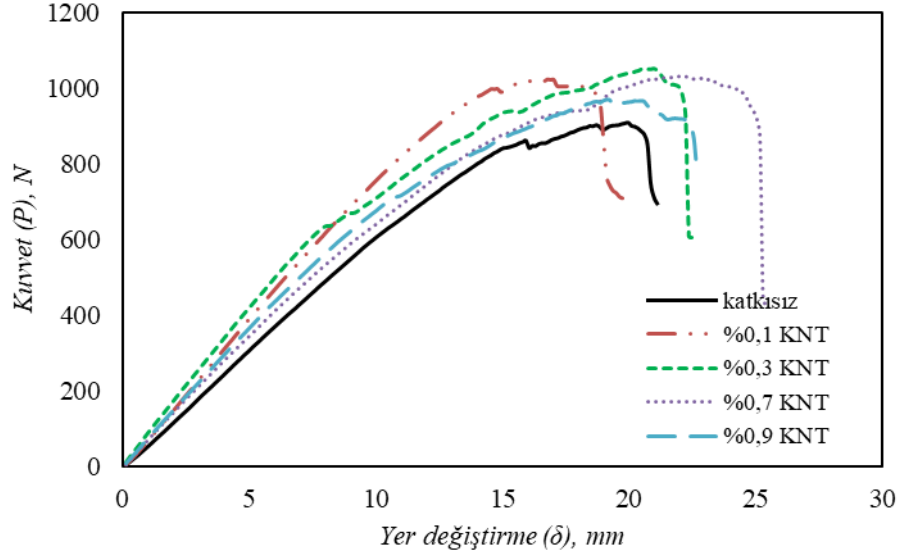
Şekil 4.12 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin deformasyonu.



Şekil 4.13 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin $P-\delta$ grafiği.

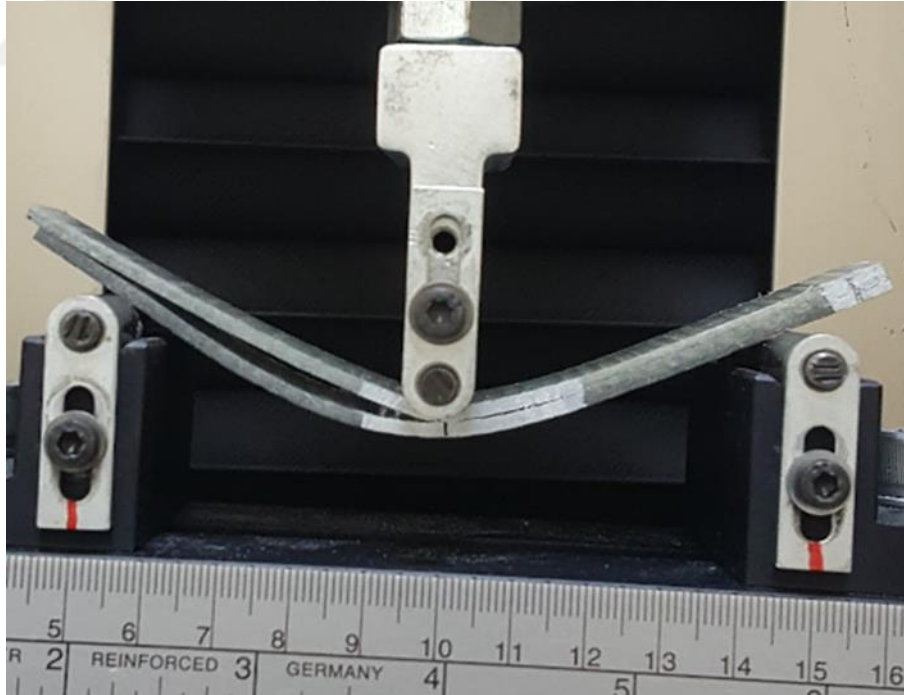
4.2.2. TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin eğilme davranışı

TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin deformasyonu Şekil 4.15 gösterilmiştir. Eğme yükü altında numunenin önce üst katman grubu daha sonra ise alt katman grubu kırılmıştır.

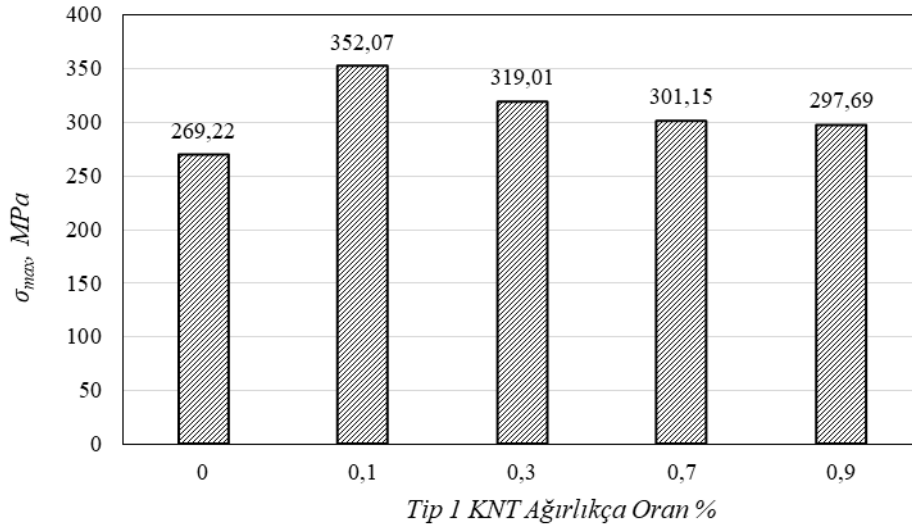


Şekil 4.14 TİP1 KNT katkı E-cam lifi/epoksi malzemelerin 3-nokta eğme testine göre P - δ grafiği.

TİP 1 KNT katkı E-cam lifi/epoksi katkıli kompozit malzemenin en yüksek P_{max} değeri (1147,66 N) malzemenin ağırlıkça % 0,1 oranında görülürken en düşük P_{max} değeri (1004,73 N) ağırlıkça % 0,9 oranında (1004,73 N) görülmüştür. En yüksek P_{max} değerine karşılık gelen δ_{max} değeri 21,92 mm'dir.



Şekil 4.15 TİP 1 KNT katkı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin deformasyonu.

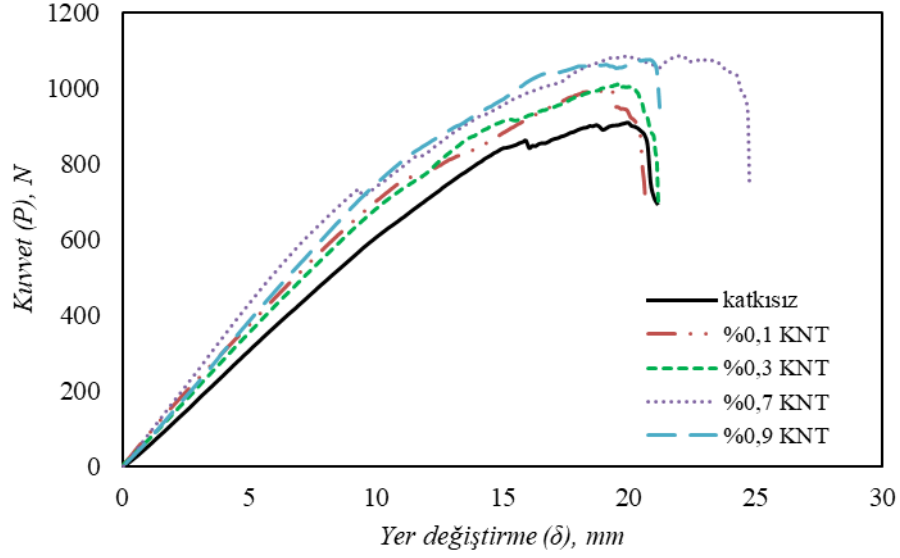


Şekil 4.16 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 1 karbon nano tüp katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait σ_{max} değerleri.

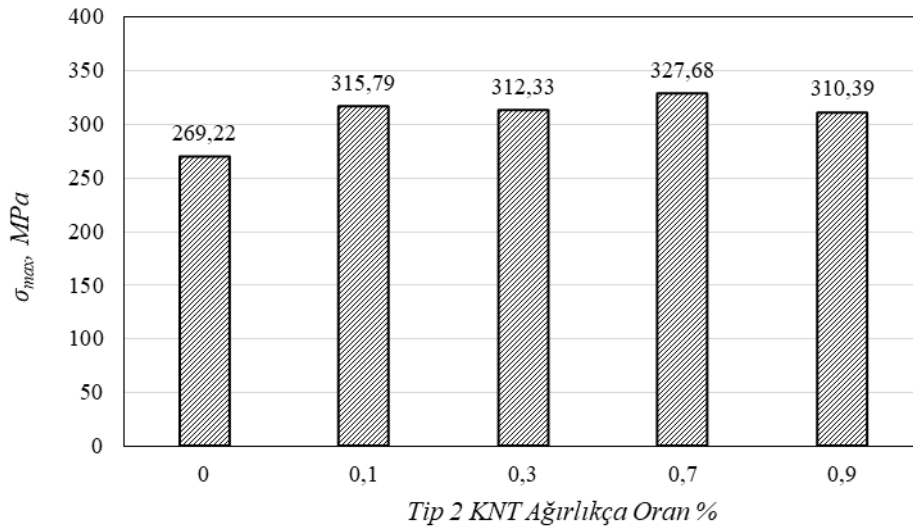
TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerde en büyük eğilme dayanım değeri %30,8' lik artış ile ağırlıkça %0,1 KNT içeren numunelerde görülürken en az artış %10,6'lık artış ile ağırlıkça %0,9 KNT içeren numunelerde görülmüştür.

4.2.3. TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin eğilme davranışı

TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi malzemelerin üç nokta eğme testine göre P - δ grafiği Şekil 4.17'de gösterilmiştir. TİP 2 KNT katkılı E-cam lifi/epoksi katkılı kompozit malzemenin en yüksek P_{max} değeri (1105,94 N) malzemenin ağırlıkça % 0,7 oranında görülürken en düşük P_{max} değeri (1047,58 N) ağırlıkça % 0,9 oranında görülmüştür. En yüksek P_{max} değerine karşılık gelen δ_{max} değeri 26,51 mm'dir.



Şekil 4.17 TİP 2 KNT katkı E-cam lifi/epoksi malzemelerin 3-nokta eğme testine göre P - δ grafiği.



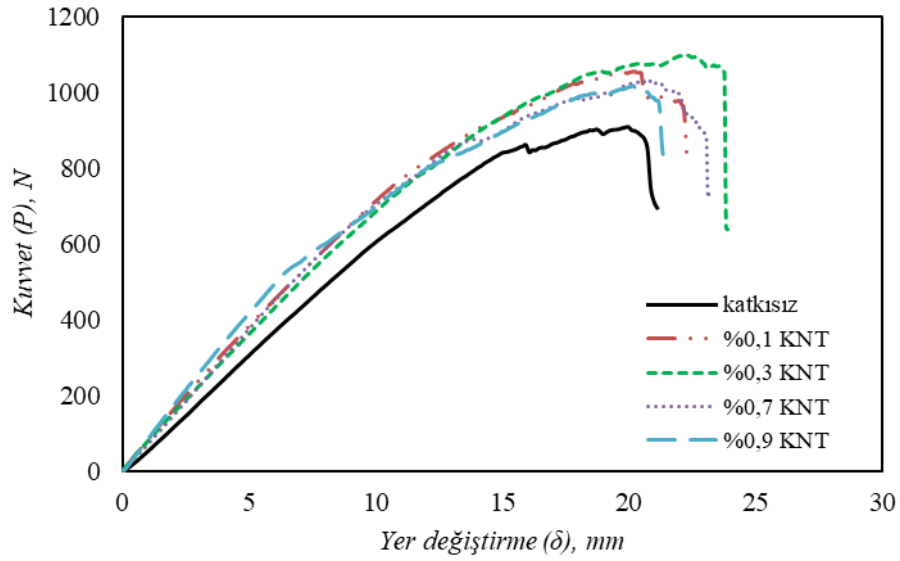
Şekil 4.18 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 2 karbon nano tüp katkı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait σ_{max} değerleri.

TİP 2 KNT katkı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerde en büyük eğilme dayanım değeri %21,7' lik artış ile ağırlıkça %0,7 KNT içeren numunelerde görülürken en az artış %15,3 'lük artış ile ağırlıkça %0,9 KNT içeren numunelerde görülmüştür.

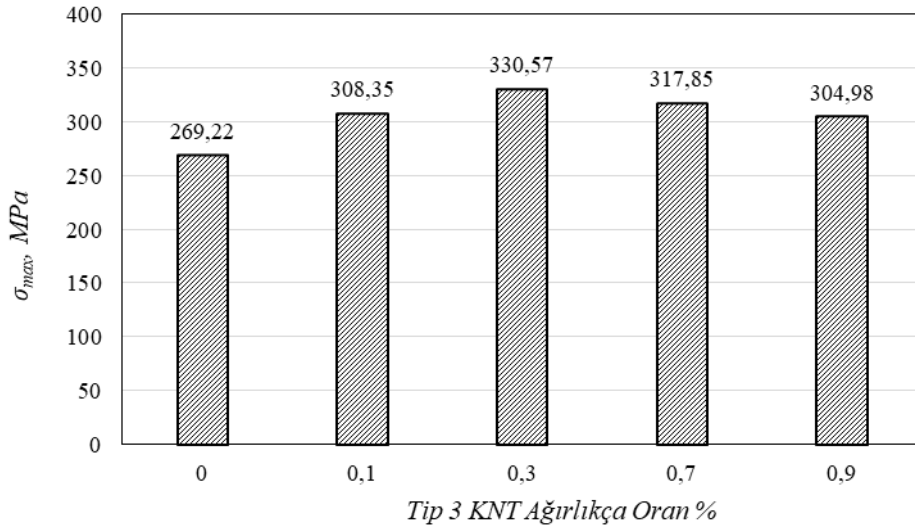
4.2.4. TİP 3 KNT katkı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin eğilme davranışı

TİP 3 KNT katkı E-cam lifi/epoksi malzemelerin üç nokta eğme testine göre P - δ grafiği Şekil 4.19'da gösterilmiştir. TİP 3 KNT katkı E-cam lifi/epoksi katkı kompozit malzemenin en yüksek P_{max} değeri (1115,69 N) malzemenin ağırlıkça % 0,3

oranında görülürken en düşük P_{max} değeri(1029,32 N) ağırlıkça % 0,9 oranında görülmüştür. En yüksek P_{max} değerine karşılık gelen δ_{max} değeri 25,57 mm'dir.



Şekil 4.19 TİP 3 KNT katkı E-cam lifi/epoksi malzemelerin 3-nokta eğme testine göre P - δ grafiği.

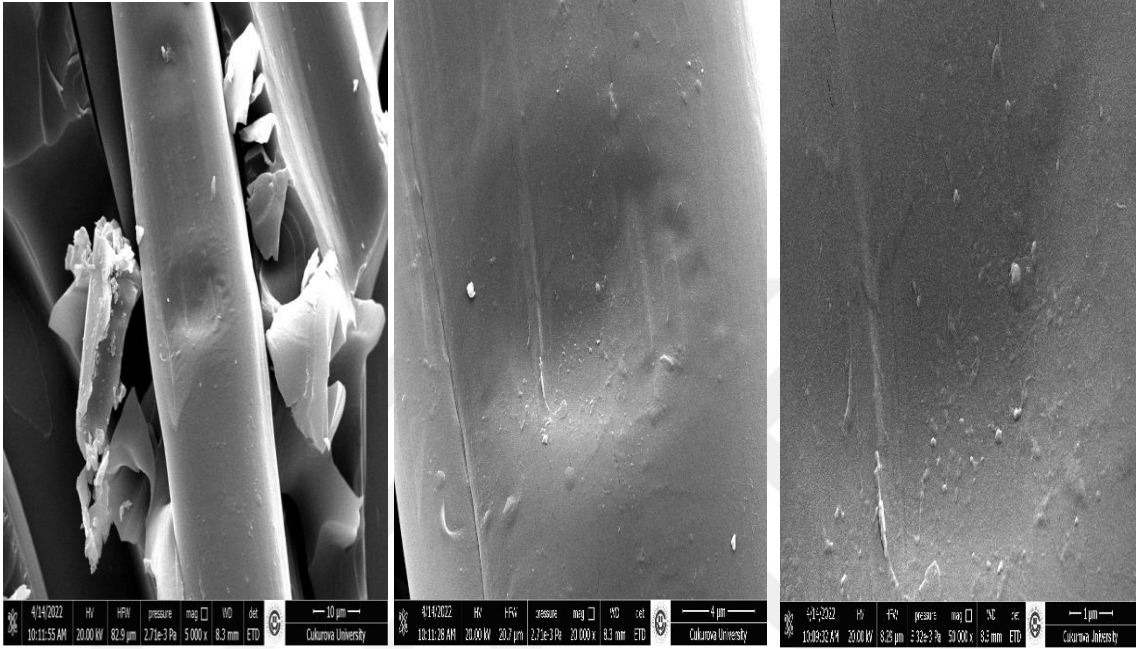


Şekil 4.20 Katkısız ve farklı oranlarda TİP 3 karbon nano tüp katkı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelere ait σ_{max} değerleri.

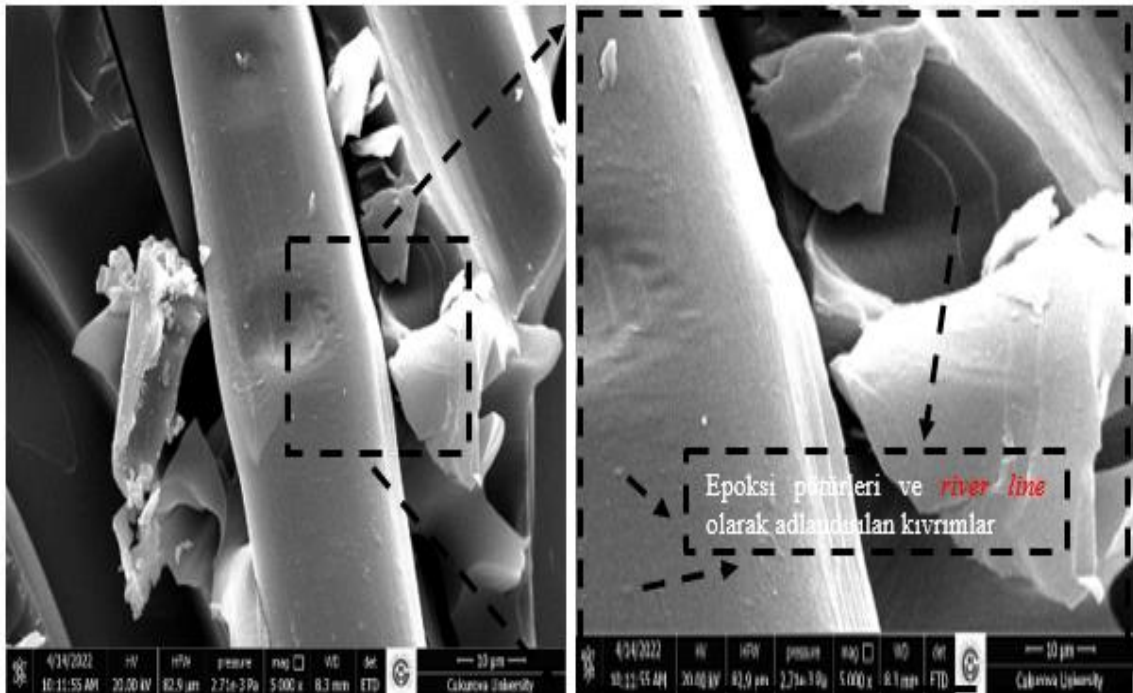
TİP 3 KNT katkı E-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerde en büyük eğilme dayanım değeri %22,8' lik artış ile ağırlıkça %0,3 KNT içeren numunelerde görülürken en az artış %13,3 'lük artış ile ağırlıkça %0,9 KNT içeren numunelerde görülmüştür.

4.3. Tabakalar Arası Kırılma Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri

Kırılma mikrografilerinde takviye lif ve matris ara yüzüne odaklanılmış ve bu iki bileşenin yapışması özellikle incelenmiştir. Katkısız tabakalı kompozitin sırasıyla 5.000x, 20.000x ve 50.000x büyütme oranına sahip taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.21’de görülmektedir.



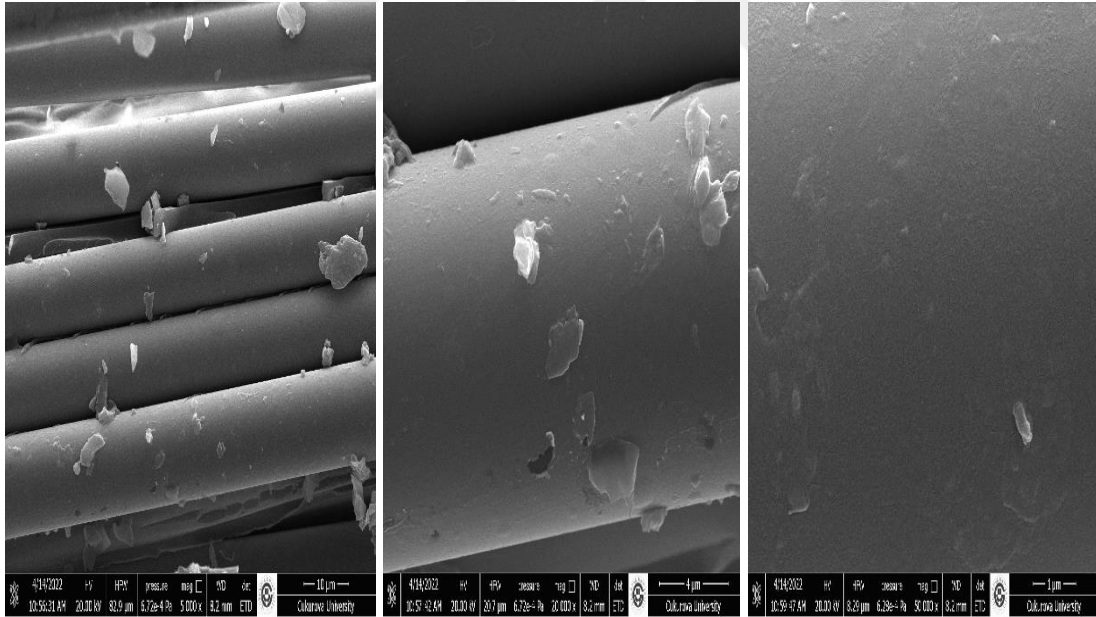
Şekil 4.21 Katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin tabakalar arası kırılma yüzeyi.



Şekil 4.22 Statik yük altında kırılan katkısız E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin matris bakımından zengin tabakalar arası kırılma yüzeyi.

Epoksinin bol miktarda bulunduğu bölgelerde kırılma yüzeylerinin sivri kenarlar veya uçlar içermediği, “*river line*” olarak adlandırılan sivri olmayan radüslü kıvrımlar ve pürüzsüz yüzeylerden oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.22). Epoksi matrisin yüzeyinin pürüzsüz ve lif köprülerinin olmaması içerisinde karbon nano partikül olmadığını göstermektedir. Epoksi matrisin kırılma yüzeylerindeki “*river line*” olarak adlandırılan sivri olmayan radüslü kıvrımlar kırılmanın gevrek olduğunu E-cam lifi/epoksi arasında oluşan yapışma kuvvetinin fazla olduğunu (Mirjalili vd. , 2014; Siddiqui vd. , 2007) göstermektedir. Katkısız numuneye ait kırılma yüzeylerinde hem epoksi matris üzerinde, hem E-cam lifinin matris üzerinde iz bıraktığı yerlerde, hem de E-cam lifi üzerinde küçük epoksi pütürlerinin neden olduğu pürüzler göze çarpmaktadır.

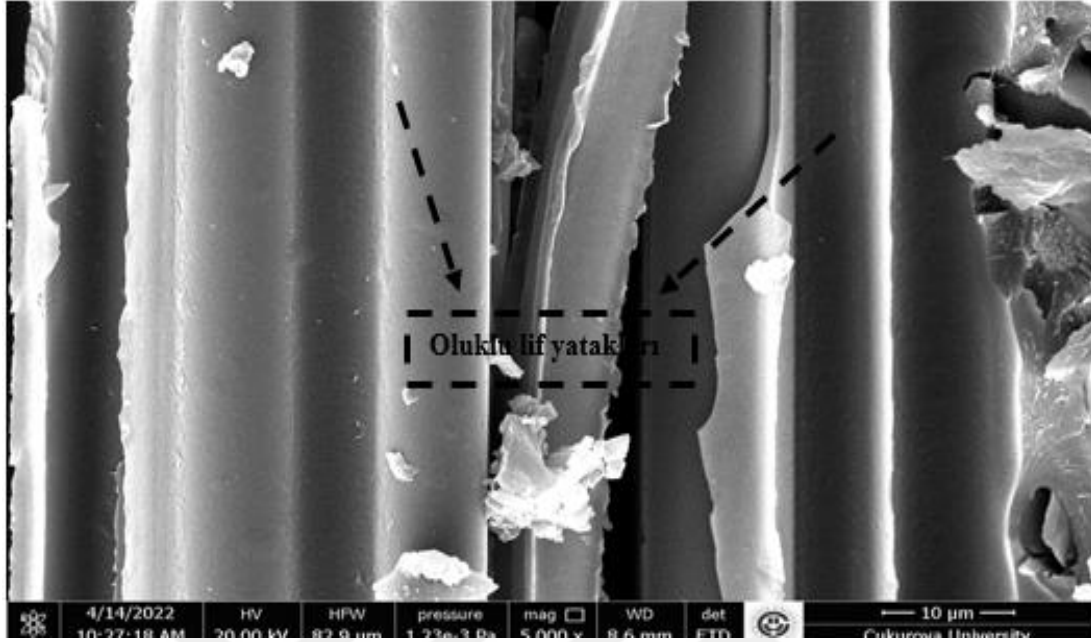
TİP 1 KNT katkılı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozitin sırasıyla 5.000x, 20.000x ve 50.000x büyütme oranına sahip taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.23’de görülmektedir. Katkısız numuneye göre kıyasladığımızda lifler üzerinde bulunan epoksi miktarı TİP 1 KNT katkılı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozitin yüzeyinde daha fazla bulunmaktadır. Bu durum Tablo 4. 2’ de yer alan G_{IIc} değerleriyle de örtüşmektedir.



Şekil 4.23 TİP 1 KNT katkılı E-cam lifi/ epoksi tabakalı kompozitin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Şekil 4.24’te yer alan TİP 1 KNT katkılı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozit incelendiğinde epoksinin neredeyse lif yüzeyinin tamamını kaplayarak oluklu lif yataklarını oluşturmuştur ve E-camlifi/epoksi arasındaki yapışma kuvvetinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Matris bakımından zengin bölgelerde kırılan epoksi

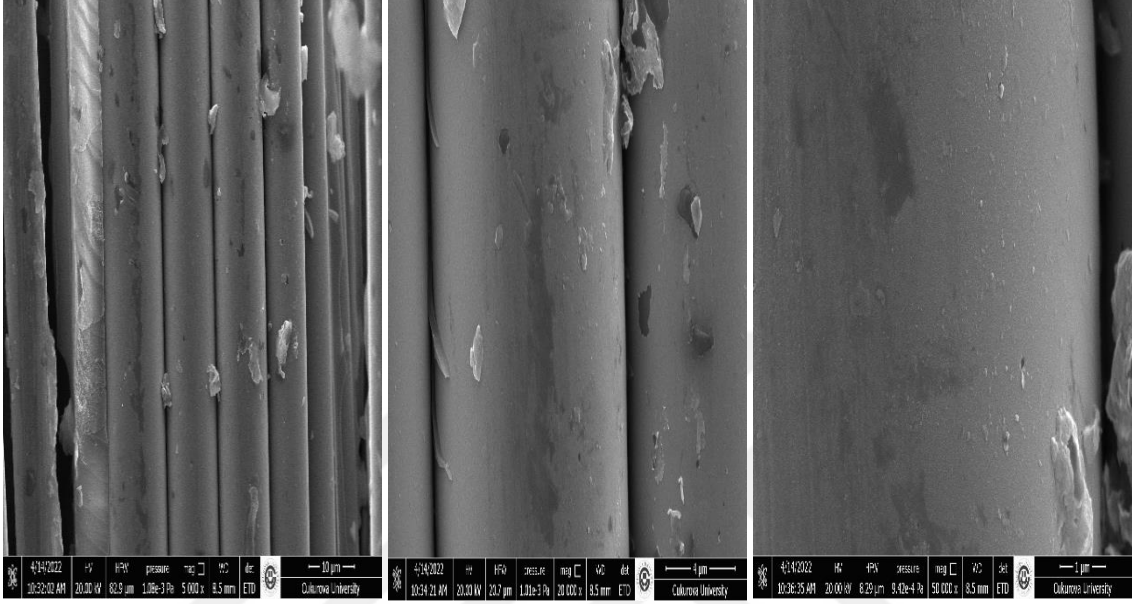
yüzeylerinin pürüzlü olması bu bölgelerde karbon nano partiküllerin olduğunu dolayısıyla da yapışmanın katkısız numuneye göre daha güçlü olduğunu göstermektedir.



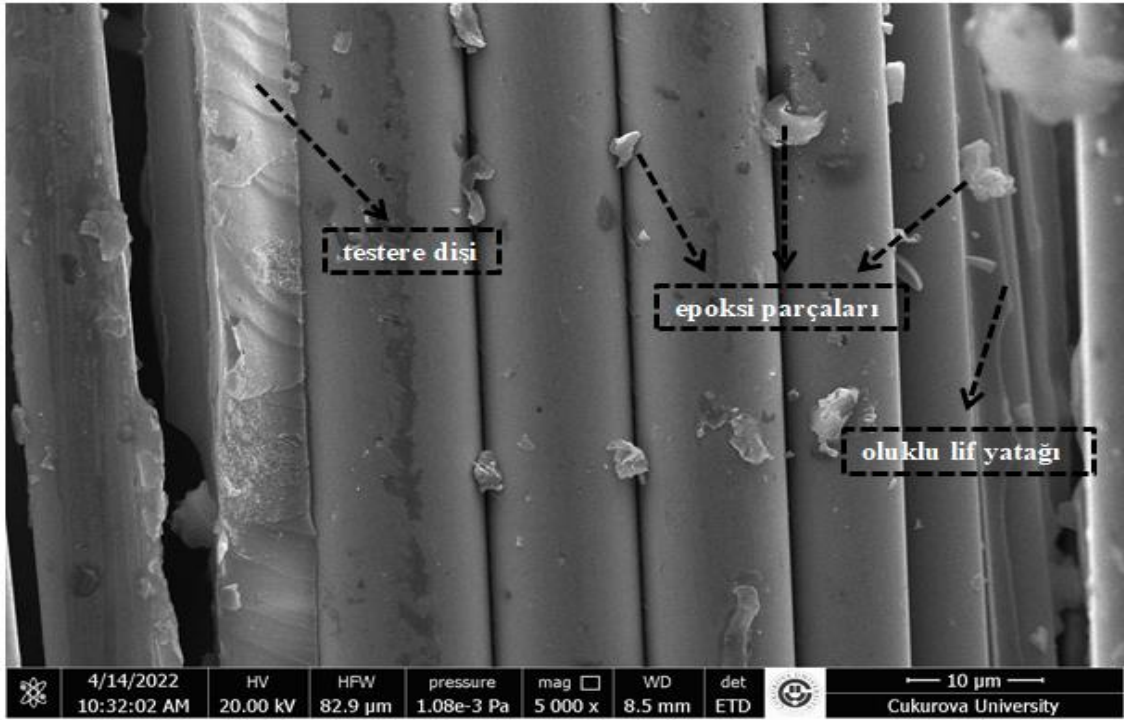
Şekil 4.24 TİP 1 KNT katkı E-camlifi/ epoksi tabakalı kompozitin matris bakımından zengin bölgelerde oluşan oluklu lif yatak görüntüleri.

TİP 2 KNT katkı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozitin sırasıyla 5.000x, 20.000x ve 50.000x büyütme oranına sahip taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.25’de görülmektedir. Şekil 4.26’da TİP 2 KNT katkı E-camlifi/ epoksi tabakalı kompozitte görülen hasar mekanizmalarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri sunulmuştur. Lif ve epoksinin ayrılması ile meydana gelen lif olukları, delaminasyon gelişimi sırasında lif/epoksi hasarı ile birlikte delaminasyon ara yüzündeki kesme gerilimi nedeniyle testere dişi hasar mekanizmasını göstermiştir (Salamat-Talab, 2021). Çatlak yayılımının artmasıyla, oluklu lif yataklarının yanı sıra, testere dişi hasar mekanizmalarının yoğunluğu önemli ölçüde artar ve kırılma yüzeyi önceki aşamaya (çatlak büyümesinin başlangıcı) kıyasla daha pürüzlü hale gelir (Mohammadi vd. ,2020). Görüldüğü gibi, testere dişleri lif yönüne dik olarak oluşan baskın bir hasar mekanizmadır. Testere dişleri, kompozitlerde gözlenen en önemli fraktografik özelliklerden biridir ve kesme stresi nedeniyle mod-II ve karışık mod-I/II delaminasyon büyümesinde sıklıkla gözlenir (Greenhalgh, 2009; Bonhomme vd. , 2009; Johannesson vd. ,1984). Bu modeller, genellikle maksimum asal gerilmeye dik olarak oluşan kırılma matris mikro çatlaklarıdır. Kırılma yüzeyinin pürüzlü hale gelmesi lif köprülerinin oluşumunu dolayısıyla da karbon nano patiküllerin varlığını işaret

etmektedir. TİP 2 KNT katkı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozitin SEM görüntüleri incelendiğinde lifler üzerinde bulunan epoksi parçalarının katkısız numuneye göre daha fazla, TİP 1 KNT katkı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozite göre ise daha az miktarda bulunduğu görülmektedir. Bu gözlemler Tablo 4. 2' de yer alan G_{IIC} değerleriyle de uyum sağlamaktadır.

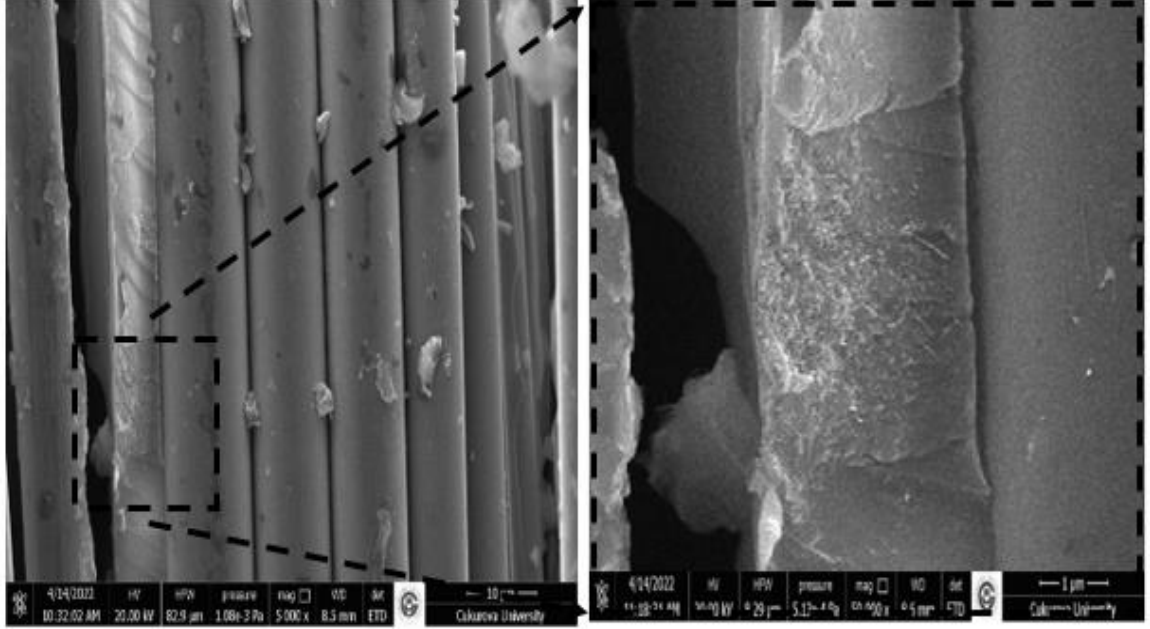


Şekil 4.25 TİP 2 KNT katkı E-cam lifi/ epoksi tabakalı kompozitin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.



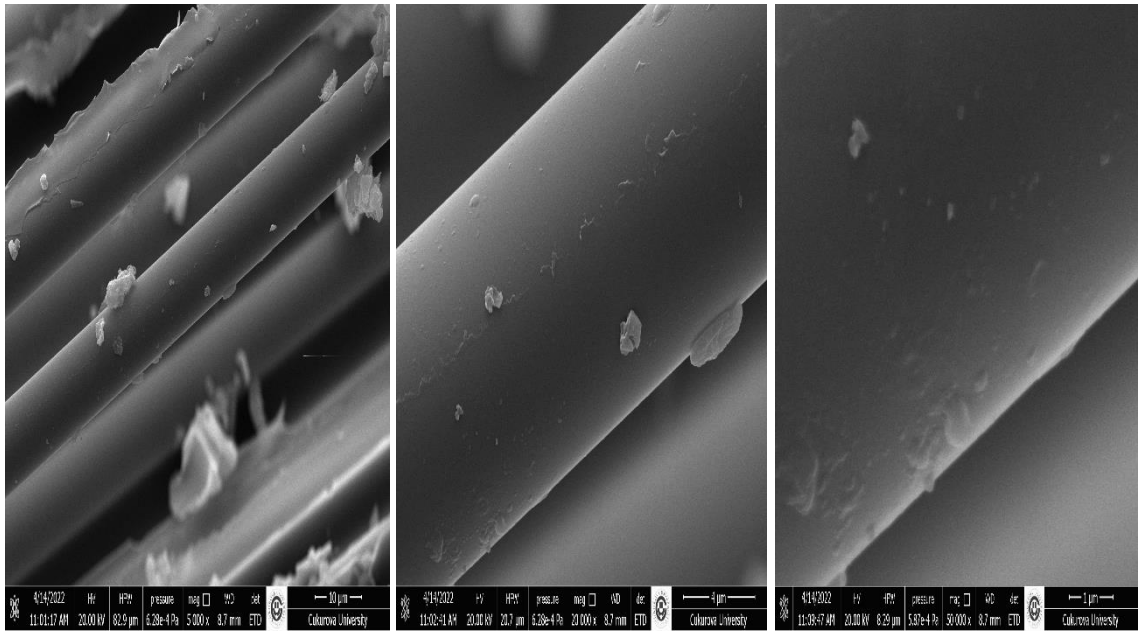
Şekil 4.26 TİP 2 KNT katkı E-cam lifi/ epoksi tabakalı kompozitte görülen hasar mekanizmalarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.

Şekil 4.27’de TİP 2 karbon nanotüp patiküllerin matris malzeme üzerindeki dağılımı gösterilmektedir. Matris malzeme üzerindeki pürüzlü bölgeler E-camlifi/epoksi arasındaki yapışma kuvvetinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

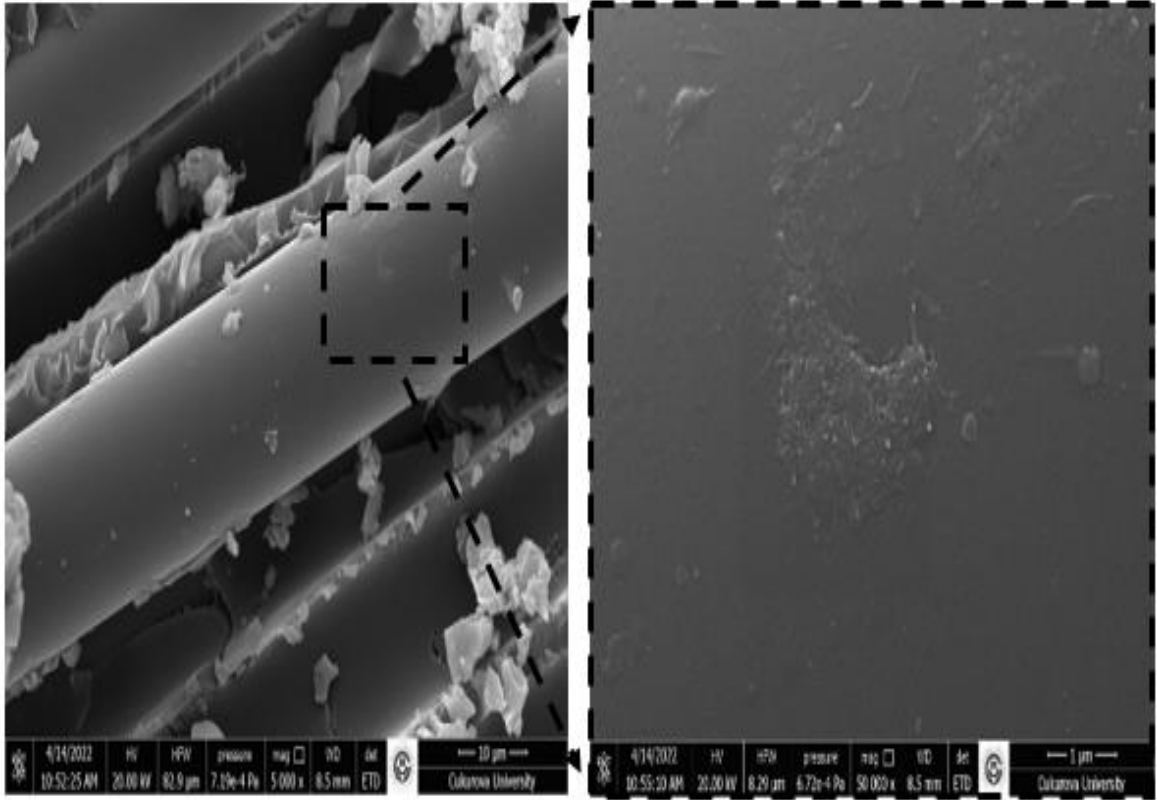


Şekil 4.27 TİP 2 karbon nano tüp partiküllerin epoksi üzerinde dağılımı.

TİP 3 KNT katkılı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozitin sırasıyla 5.000x, 20.000 ve 50.000x büyütme oranına sahip taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.28’de görülmektedir.

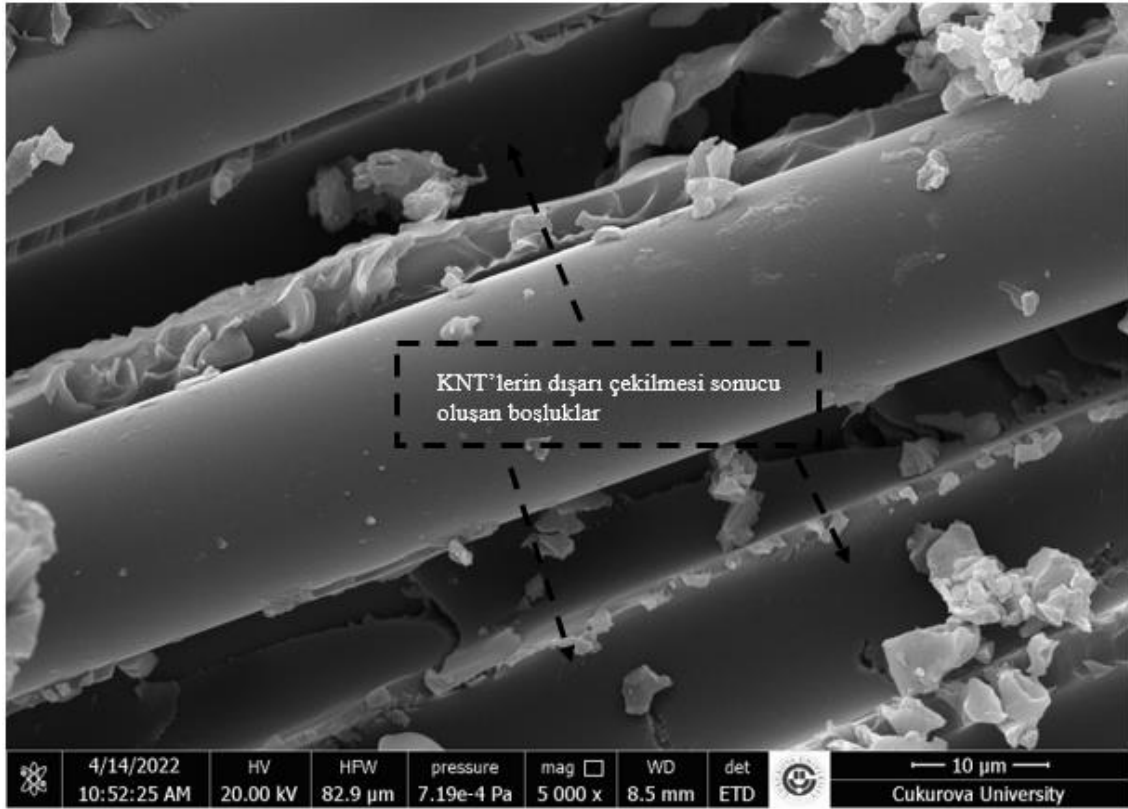


Şekil 4.28 TİP 3 KNT katkılı E-cam lifi/ epoksi tabakalı kompozitin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri.



Şekil 4.29 TİP 3 karbon nano tüp partiküllerin E-cam lifi üzerinde dağılımı.

TİP 3 karbon nano tüp katkı tabakalı kompozit malzemenin kırılma yüzeyinin genel karakteristiği Şekil 4.21’de verilen katkısız tabakalı kompozit malzemenin kırılma yüzeyinin karakteristiği, Şekil 4.23’de verilen TİP 1 karbon nano tüp katkı tabakalı kompozit malzemenin kırılma yüzeyinin karakteristiği ve Şekil 4.25’de verilen TİP 2 karbon nano tüp katkı tabakalı kompozit malzemenin kırılma yüzeyinin karakteristiği ile benzerdir. E-cam lifi üzerinde bulunan TİP 3 karbon nano tüp partiküllerin 50.000x büyütme oranı ile takviye lifin üzerinde görüntülenen TİP 1 karbon nano tüplere benzer şekilde epoksi malzemenin yüzeylere homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Bu durum TİP 3 karbon nano tüp katkı E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemede takviye lif ile matris malzemenin yapışma kuvvetini artırmış olabilir.



Şekil 4.30 TİP 3 KNT'lerin dışarı çekilmesi sonucu oluşan boşluklar.

TİP 3 KNT'lerin dışarı çekilmesi sonucu oluşan boşluklar Şekil 4.31' de gösterilmektedir. Karbon nano partiküllerin varlığı, çatlak yayılmasını engeller ve elde edilen kırılma tokluğu değerlerinin artmasına yardımcı olur. TİP 3 KNT katkılı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozitin SEM görüntüleri incelendiğinde lifler üzerinde bulunan epoksi parçalarının katkısız ve TİP 2 KNT katkılı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozit numunelere göre daha fazla, TİP 1 KNT katkılı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozite göre ise daha az miktarda bulunduğu görülmektedir. Bu gözlemler Tablo 4. 2' de yer alan G_{IIc} değerleriyle de uyum sağlamaktadır.

KNT katkılı E-camlifi/epoksi tabakalı kompozit arayüzü, çatlakların gelişimini ve mikro çatlakların birleşmesini geciktirir. Bu da, kompozit arızayı daha yüksek bir yüke doğru uzatır. Tabakalar ve testere dişi hasar mekanizmasının oluşturduğu tüylenmeler arasındaki sürtünme, Mod II katmanlar arası dayanıklılık değerine önemli ölçüde katkıda bulunan mekanizmalardır. Matris içinde nanopartiküllerin varlığı varlığı, mikro çatlakların başlamasını ve yayılmasını etkili bir şekilde bastırır. Fiber matris bölgesinin yakınındaki nanopartiküller, çatlak yayılmasını daha dallı ve karmaşık hale getirir (Prasad vd. , 2019).

Elyaf yüzeyinin epoksiden ayrılması önemli miktarda boşluk oluşturur ve bu da büyük kırılma yüzey alanı ile sonuçlanır. Burada önemli miktarda deformasyon enerjisi tüketilir, bu da kırılma tokluğu değerlerinde kayda değer bir iyileşme ile sonuçlanır. Nanopartiküllerin mevcudiyeti, böylece fiber matris katmanları arasındaki stres transferlerinin etkinliğini artırarak, gelişmiş fiber matris arayüzü yapışması için kanıt sağlar (Tian vd. , 2017).



5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Katkısız ve matrisine ağırlıkça farklı oranlarda karbon nano tüp takviye edilmiş tek yönlü E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin mod II tabakalar arası kırılma mekaniği araştırılmıştır. Yapılan mod II kırılma testleri ve üç nokta eğme testlerinden sonra aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır:

- E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemenin düzlemsel çekme özelliklerinde olumsuz etkiler oluşturmadan, epoksi matrise ağırlıkça farklı oranlarda ve farklı boyutlarda fonksiyonlaştırılmış karbon nano tüp katılarak G_{IIc} değerini artırmak mümkündür. E-cam lifi/epoksi kompozit malzemeye KNT ilave ederek malzemenin eğilme rijitliğini artırmak mümkündür.

- Boyca daha uzun Tip 1 KNT'lerin ağırlıkça % 0,3 oranında ilave edilmesi ile E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin G_{IIc} değerini % 77'ye kadar artırılabilir. Diğer KNT tipleri ve ağırlıkça konsantrasyonları da E-cam lifi/epoksi kompozitin G_{IIc} değerini artırmaktadır.

- Karbon nano tüp partiküllerin matris içerisinden çekilirken oluşturduğu boşluklar, soyulmalar, çatlak ucunu saptırma ve lif-matris yapışma kuvvetini artırma gibi hasar mekanizmalarına neden olarak tabakalar arası kırılma direncini artırmaktadır.

- Mod II kırılma testlerinde malzemenin yük taşıma kabiliyetinin aniden azalması ile testler sonlandırılmaktadır. Ancak mod II hasarı içerirken eğme testlerine tabi tutulan ENF numuneler eğilme dayanımlarını muhafaza etmektedir. Delaminasyonlu numunelerde kalınlık boyunca kırılmaya sebep olan eğme yükleri, mod II kırılma testlerindeki maksimum yüklere kıyasla % 10'a kadar artış göstermektedir. Bu numunelerin maksimum sehimi ise kırılma testlerindeki maksimum sehimlerin yaklaşık 4 katıdır.

- KNT içeren delaminasyon hasarlı numunelerin arta kalan eğilme dayanımları delaminasyon içeren katkısız numunenin arta kalan eğilme dayanımından fazladır. En yüksek σ_{max} değeri ağırlıkça % 0,1 TİP 1 KNT içeren numunenin eğilme dayanımı katkısız numuneye kıyasla % 30 daha fazladır.

- Yapılan üç nokta eğme deneylerinde katkısız numuneye göre en fazla σ_{max} değeri TİP 1'de ağırlıkça % 0,1 KNT içeren numunelerde, TİP 2'de ağırlıkça % 0,7 KNT içeren numunelerde TİP 3'te ağırlıkça % 0,3 KNT içeren numunelerde meydana gelmiştir.

Sonuç olarak epoksi matrise fonksiyonlaştırılmış KNT partikül katılarak E-cam lifi/epoksi tabakalı kompozit malzemelerin tabakalar arası kırılma dayanımını artırmak mümkündür.



6. KAYNAKLAR

- Akinyede, O. , Mohan, R. , Kelkar, A. ve Sankar, J. (2009). Static and fatigue behavior of epoxy/fiberglass composites hybridized with alumina nanoparticles. *Journal of Composite Materials*, 43, 769-781.
- Ali, A. , Andriyana, A. , Hassan, S.B.A. ,Ang, B.C.(2021). Fabrication and Thermo-Electro and Mechanical Properties Evaluation of Helical Multiwall Carbon Nanotube-Carbon Fiber/Epoxy Composite Laminates. *Polymers*, 13, 1437. <https://doi.org/10.3390/polym13091437>
- Alif, N. , & Carlsson, L. A. (1997). Failure mechanisms of woven carbon and glass composites. *ASTM special technical publication*, 1285, 471-493.
- K.N. Anyfantis, N.G. Tsouvalis (2010). Characterization of Fiber Bridging in Mode II Fracture Growth of Laminated Composite Materials. *Applied Mechanics and Materials ISSN: 1662-7482, Vols. 24-25, pp 245-250*
- Ashrafi, B. , Guan, J. ,Mirjalili, V. , Zhang, Y. , Chun, L. Hubert, P. , Simard, B. , Kingston, C. T. , Bourne, O. , Johnston, A.(2011). Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes / *Composites Science and Technology* 71,1569–1578
- Argüelles, A. , Viña, J. , Canteli, A. F. , & Bonhomme, J. (2010). Fatigue delamination, initiation, and growth, under mode I and II of fracture in a carbon-fiber epoxy composite. *Polymer composites*, 31(4), 700-706.
- M. Arai, Y. Noro, K.Sugimoto, M. Endo (2008). Mode I and mode II interlaminar fracture toughness of CFRP laminates toughened by carbon nanofiber interlayer, *Composites Science and Technology*,68,516–525
- ASTM D790-15 (2016). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
- ASTM D7905M-14 (2014) Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, DOI: 10.1520/D7905_D7905M-14
- Azeez, A. A., Rhee, K. Y., Park, S. J. ve Hui, D. (2013). Epoxy clay nanocomposites - processing, properties and applications: a review. *Composites Part B: Engineering*, 45, 308-320.
- Balcioglu HE, Yalcin D. (2020).The Determination of Fracture Characterization of Knitted Fabric Reinforced Composites Using Arcan Test. *Fibers Polym*; 21:849–863
- E. Barjasteh, C. Sutanto, T. Reddy and J. Vinh (2017), A graphene/graphite-based conductive polyamide 12 interlayer for increasing the fracture toughness and conductivity of carbon-fiber composites, *Journal of Composite Materials*,0(0),1–9
- Barrett J.D., Foschi R.O. (1977), ‘Mode II stress-intensity factors for cracked wood beams’, *Engng. Fract. Mech.* , 9: 371–378.
- Bashar, T. M., Sundararaj, U. ve Mertiny, P. (2013). Mode-I interlaminar fracture behaviour of nanoparticle modified epoxy/basalt fibre-reinforced laminates. *Polymer Testing*, 32, 402-412.
- Begley, M. R. , Cox, B. N., & McMeeking, R. M. (1997). Creep crack growth with small scale bridging in ceramic matrix composites. *Acta materialia*, 45(7), 2897-2909.
- Benzeggagh, M. L. ve Kenane, M. (1996). Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. *Composites Science and Technology*, 56, 439-449.

- Bethune D.S., Klang C.H., De Vries M.S., et al. (1993). Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls. *Nature*;363:605–7.
- K. , Bilisik, G. , Erdogan, E., Sapanci, S., Gungor (2019). Mode-II toughness of nanostitched carbon/epoxy multiwall carbon nanotubes prepreg composites: Experimental investigation by using end notched flexure, *Journal of Composite Materials*, Vol. 53(28–30) 4249–4271, DOI: 10.1177/0021998319857462
- K. , Bilisik, G., Erdogan, E., Sapanci, S., Gungor, Fracture Toughness (Mode-II) of (2019). Nanostitched Composites, 1st International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials , *Procedia Structural Integrity* 21,146–153.
- J. Bonhomme, A. Argüelles, J. Vina, I. Vina, Fractography and failure mechanisms in static mode I and mode II delamination testing of unidirectional carbon reinforced composites, *Polym. Test.* 28 (6) (2009) 612–617.
- Bullegas G., Pinho S. T. and Piment S. (2016). Engineering the translaminar fracture behaviour of thin-ply composites *Compos. Sci. Technol.* 131: 110–122
- Carlsson L.A., Gillespie J.W., Pipes R.B. (1986), ‘On the analysis and design of the end notched flexure (ENF) specimen for mode II testing’, *J Compos Mater*, 20: 594–604.
- Carlsson, L. A., Adams, D. F. ve Pipes, R. B. (2014). Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, *CRC Press*, Boca Raton.
- C. Chen, S. Nesbitt, J. Reiner, R. Vaziri, A. Poursartip, G. Fernlund (2020). Cure path dependency of static and dynamic mode II interlaminar fracture toughness of interlayer toughened composite laminates, *Composites Science and Technology*, 200, 108444
- Chou, I. (1998). Effect of fiber orientation and moisture absorption on the interlaminar fracture toughness of CFRP laminates. *Advanced Composite Materials*, 7 (4), 377-394.
- Coronado, P., Argüelles, A., Vina, J. ve Vina, I. (2014). Influence of low temperatures on the phenomenon of delamination of mode I fracture in carbon-fibre/epoxy composites under fatigue. *Composites Structures*, 112, 188-193.
- A. Dadian, S. Rahnama & A. Zolfaghari (2020). Experimental study of the CTBN effect on mechanical properties and mode I and II fracture toughness of a new epoxy resin, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34:22, 2389-2404, DOI: 10.1080/01694243.2020.1763540
- L. Daelemans, S. van der Heijden, I. De Baere, H. Rahier, W. Van Paepegem, K. De Clerck, (2015). Nanofibre bridging as a toughening mechanism in carbon/epoxy composite laminates interleaved with electrospun polyamide nanofibrous veils, *Compos. Sci. Technol.* 117, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.06.021>.
- Daelemans L., van der Heijden S, De Baere I, Rahier H, Van Paepegem W, De Clerck K. (2016). Damage-resistant composites using electrospun nanofibers: a multiscale analysis of the toughening mechanisms. *ACS Appl Mater Int*;8:11806–18, <http://dx.doi.org/10.1021/acsami.6b02247>.
- L. Daelemans, S. van der Heijden, I. De Baere, H. Rahier, W. Van Paepegem, K. De Clerck, (2016). Using aligned nanofibres for identifying the toughening micromechanisms in nanofibre interleaved laminates, *Compos. Sci. Technol.* 124,17–26. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.11.021>.
- Dahlen, C., & Springer, G. S. (1994). Delamination growth in composites under cyclic loads. *Journal of Composite Materials*, 28(8), 732-781.
- F. Darıcık, (2017) Nano partikül katkılı e-cam lifi/epoksi kompozit malzemelerin yorulma davranışı. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (Doktora Tezi)*, 114s, Sivas.

- Davidson B.D., Sun X. (2005), 'Effects of friction, geometry and fixture compliance on the perceived compliance from three- and four-point bend end-notched flexure tests', *J. Reinf. Plastics Compos.*, 24: 1611–1628.
- Davidson, B. D., Krüger, R. ve König, M. (1996). Effect of stacking sequence on energy release rate distributions in multidirectional DCB and ENF specimens. *Engineering Fracture Mechanics*, 55 (4), 557-569.
- Davies P., Blackman B.R.K., Brunner A.J. (2001), Mode II delamination. In: Moore DR, Pavan A, Williams JG, editors. *Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers Adhesives and Composites*, Amsterdam, London, New York: Elsevier; 307–334.
- de Morais, A. B., de Moura, M. F., Marques, A. T. ve de Castro, P. T. (2002). Mode-I interlaminar fracture of carbon/epoxy cross-ply composites. *Composites Science and Technology*, 62, 679-686.
- de Moura M.F.S.F., Silva M.A.L., de Morais A.B., Morais J.J.L. (2006), Equivalent crack based mode II fracture characterization of wood, *Engng. Fract. Mech.*, 73: 978–993.
- A. Desai, C.M. Sharanaprabhu and S. K. Kudari (2020). Experimental investigation to evaluate total energy release rate for unidirectional glass/epoxy composite under Mixed mode-I/II load, *Sādhanā* 45:251 *Indian Academy of Sciences* <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01482-3>
- Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Saito R. (1995). Physics of carbon nanotubes. *Carbon* ;33:883–91.
- Emmanuel E. G. (2018). Fracture Mechanics Analysis of Composite Materials. In *Comprehensive Composite Materials II* ,601
- Eskizeybek, V. (2012). Yüzeylerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fiber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışının İncelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı* (Doktora Tezi), 128s, Konya.
- Garcia, E. J., Wardle, B. L., Hart, A. J., (2008). Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes. *Composites: Part A* 39, 1065– 1070.
- A. Gliszczyński, N. Wiącek(2021). Experimental and numerical benchmark study of mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional GFRP laminates under shear loading using the end-notched flexure (ENF) test. *Composite Structures*, 258, Poland
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Fiedler, B. ve Schulte, K. (2005). Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites - a comparative study. *Composites Science and Technology*, 65, 2300-2313.
- González, C. , Vilatela, J. J. , Molina-Aldareguía, J. M. Lopes, C. S. , & LLorca, J. (2017). Structural composites for multifunctional applications: Current challenges and future trends. *Progress in Materials Science*, 89, 194-251.
- E. Greenhalgh, Failure Analysis and Fractography of Polymer Composites, Elsevier, 2009.
- Guenon, V. A., Chou, T. W., Gillespie, J. W., (1989). Toughness properties of a three-dimensional carbon-epoxy composite. *Journal of Materials Science* 24, 4168–4175.
- Hadavand, B. S., Javid, K. M. ve Gharagozlu, M. (2013). Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy polysulfide nanocomposite. *Materials and Design*, 50, 62-67.
- S. Her and P. Chien (2020). Mode II Interfacial Fracture Toughness of Multi-Walled Carbon Nanotubes Reinforced Nanocomposite Film on Aluminum Substrate, *Nanomaterials*, 10, 904; [doi:10.3390/nano10050904](https://doi.org/10.3390/nano10050904)
- J.M. Hodgkinson (2000). Mechanical testing of advanced fibre composites, England

- T. Hsieh and Y. Huang (2016). The mechanical properties and delamination of carbon fiber-reinforced polymer laminates modified with carbon aerogel, *J Mater Sci*,52:3520–3534
- Iijima S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*;354:56–8.
- Irina, M.; Azmi, A.; Tan, C.; Lee, C.; Khalil, A. (2015). Evaluation of Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Polymer Composites and their Architecture. *Procedia Manuf.*, 2, 236–240
- Jia, X. , Zhu, J. , Li, W. , Chen, X. , Yang, X. (2015). Compressive and tensile response of CFRP cylinders induced by multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 110, 35–44.
- T. Johannesson, P. Sjöblom, R. Selden, The detailed structure of delamination fracture surfaces in graphite/epoxy laminates, *J. Mater. Sci.* 19 (1984) 1171–1177.
- Kageyama K., Kikuchi M., Yanagisawa N. (1991), ‘Stabilized end notched flexure test: characterization of mode II interlaminar crack growth’. In: O’Brien TK, editor. *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, ASTM STP 1110, Vol. 3. Philadelphia PA: ASTM, p. 210–225.
- Kanninen MF, Popelar CH (1985), *Advanced Fracture Mechanics*, Oxford: Oxford University Press
- Karapappas, P., Vavouliotis, A., Tsotra, P., Kostopoulos, V. ve Paipetis, A. (2009). Enhanced fracture properties of carbon reinforced composites by the addition of multi-wall carbon nanotubes. *Journal of Composite Materials*, 43 (9), 977-985.
- Kenane, M., Azari, Z., Benmedakhene, S., Benzeggagh, M. L., (2011). Experimental Development of Fatigue Delamination Threshold Criterion. *Composites Part B: Engineering*, 42, 367-375.
- Kim, K.-Y., Ye, L. ve Phoa, K.-M. (2004). Interlaminar fracture toughness of CF/PEI and GF/PEI composites at elevated temperatures. *Applied Composite Materials*, 11, 173-190.
- Kishore ve Santra, S. (2005). Impact studies in elastomer, fly ash, and hybrid-filled epoxy composites: part I - room temperature curing. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24 (9), 903-922.
- J. Korbelen, B. Kotter, H. Voormann, L. Brandenburg, S. Sel, B. Fiedler (2021). Damage tolerance of few-layer graphene modified CFRP: From thin-to thick-ply laminates, *Composites Science and Technology* 209,108765
- C. Kostagiannakopoulou, T.H. Loutas, G. Sotiriadis, V. Kostopoulos (2021). Effects of graphene geometrical characteristics to the interlaminar fracture toughness of CFRP laminates, *Engineering Fracture Mechanics* 245,107584
- Laffan M. J., Pinho S. T., Robinson P. and McMillan A. J. (2012) Translaminar fracture toughness testing of composites: a review. *Polym. Test.* 31(3): 481–489
- H. Li, Y. Yu, X. Xu, T. Chen, W. Lu (2021). Enhancing the fracture toughness of laminated composites through carbon nanotube belt stitching, *Composites Science and Technology* 204,108632
- C., Liu; R., Bai; Z., Lei; J., Di; W., Wu; J., Zou; T., Gao & C., Yan (2020). Mode II fracture toughness related to ply angle for composite delamination analysis, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, DOI: 10.1080/15376494.2020.1740955
- Manjunatha, C. M., Taylor, A. C., Kinloch, A. J. ve Sprenger, S. (2010). The tensile fatigue behaviour of a silica nanoparticle-modified glass fibre reinforced epoxy composite. *Composites Science and Technology*, 70, 193-199.

- McCrary-Dennis, M. C. L., Okoli, O. I. (2012). A review of multiscale composite manufacturing and challenges. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(24), 1687–1711.
- Mirjalili, V., Ramachandramoorthy, R. ve Hubert, P.,(2014) Enhancement of fracture toughness of carbon fiber laminated composites using multi wall carbon nanotubes, *Carbon*, 79, 413-4239
- N.H. Nash, T.M. Young, W.F. Stanley, (2016).An investigation of the damage tolerance of carbon/Benzoxazine composites with a thermoplastic toughening interlayer, *Compos. Struct.* 147,25–32. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.015>.
- Nguyen F., Tun S., Haro A., Hirano N., Yoshioka K., Ovalle-Robles R.(2017) Interlaminar Reinforcement by Aligned Carbon Nanotubes in Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites. *In: 19th International Conference on Composite Materials (ICCM)*.
- D.J. Nicholls, J.P. Gallagher (1983).Determination of GIC in Angle Ply Composites Using a Cantilever Beam Test Method, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Volume: 2 issue: 1, page(s): 2-17
- O'Brien, T. K., (1998). Interlaminar Fracture Toughness: The Long and Winding Road to Standardization. *Composites Part B*, 29(1), 57-62.
- Y., Ou, C., González, J. J. ,Vilatela, (2020).Understanding interlaminar toughening of unidirectional CFRP laminates with carbon nanotube veils; *Composites Part B: Engineering* Volume 201, 108372; <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108372>
- Ozdil, F. ve Carlsson, L. A. (1999). Beam analysis of angle-ply laminate DCB specimens. *Composites Science and Technology*, 59, 305-315.
- V. Prasad, K. Sekar, S.Varghese, M.A. Joseph (2019). Enhancing Mode I and Mode II interlaminar fracture toughness of flax fibre reinforced epoxy composites with nano TiO₂, *Composites Part A*,124,105505
- Pereira, A. B. ve de Morais, A. B. (2004). Mode I interlaminar fracture of carbon/epoxy multidirectional laminates. *Composites Science and Technology*, 64, 2261-2270.
- Prombut, P., Michel, L., Lachaud, F. ve Barrau, J. J. (2006). Delamination of multidirectional composite laminates at 0o/0o ply interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, 73, 2427-2442.
- Qian D., Wagner G.J., Liu W.K., Yu M.F., Ruoff R.S.(2002). Mechanics of carbon nanotubes. *Appl Mech Rev.*;55:495–533.
- D. Quan, F. Bologna, G. Scarselli, A. Ivanković, N. Murphy (2020).Mode-II fracture behaviour of aerospace-grade carbon fibre/epoxy composites interleaved with thermoplastic veils, *Compos. Sci. Technol.* 191,1–10. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108065>.
- Rama, S. R. ve Rai, S. K. (2009). Mechanical and fractographic studies on fly ash-filled hydroxyl-terminated polyurethane-toughened epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 43 (26), 3231-3238.
- Rama, S. R. ve Rai, S. K. (2010). Studies on physicomechanical properties of fly ash-filled hydroxyl-terminated polyurethane-toughened epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 29 (14), 2099-2104.
- Rama, S. R. ve Rai, S. K. (2011). Deformation and fracture behavior of treated fly ash-filled polycarbonate-toughened epoxy resin composites. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 5 (30), 389-395.
- V.A. Ramirez, P.J. Hogg, W.W. Sampson, (2015).The influence of the nonwoven veil architectures on interlaminar fracture toughness of interleaved composites, *Compos. Sci. Technol.* 110,103–110. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.01.016>.

- A. Ramji, Y. Xu, M. Yasaei, M. Grasso, P. Webb, (2020). Delamination migration in CFRP laminates under mode I loading, *Compos. Sci. Technol.* 190,p1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108067>.
- A., Ramji, Y., Xu, M., Grasso, M., Yasaei, P., Webb, (2021). Effect of Interfacial Fibre Orientation and PPS Veil Density on Delamination Resistance of 5HS Woven CFRP Laminates under Mode II Loading; *Composites Science and Technology*, Volume 207, Article number 108735, doi: 10.1016/j.compscitech.2021.108735
- Rao, P. S., Renji, K., Bhat, M. R., Mahapatra, D. R., Narayana Naik, G. N. (2015). Mechanical properties of CNT-Bisphenol e cyanate ester-based CFRP nanocomposite developed through VARTM
- Rathore, D. K., Prusty, R. K., Kumar, D. S., and Ray, B. C. (2016). Mechanical performance of CNT-filled glass fiber/epoxy composite in in-situ elevated temperature environments emphasizing the role of CNT content. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 84, 364–376. doi:10.1016/j.compositesa.
- Reich S., Thomsen C., Maultzsch J. (2004). Carbon nanotubes: basic concepts and physical properties. *New York: Wiley-VCH.* p. 31–40.
- P. Robinson and D. Q. Song (1992). A new Mode III delamination test for composites, *Advanced Composites Letters*, Vol: 1, No: 5, UK
- Russell, A. , & Street, K. (1982). Factors affecting the interlaminar fracture energy of graphite/epoxy laminates. *Progress in science and Engineering of Composites*, 279-286.
- Russell, A. J. , & Street, K. N. (1985). Moisture and temperature effects on the mixed-mode delamination fracture of unidirectional graphite/epoxy Delamination and debonding of materials: *ASTM International*.
- R.J. Sager, P.J. Klein, D.C. Lagoudas, Q. Zhang, J. Liu, L. Dai , J.W. Baur (2009). Effect of carbon nanotubes on the interfacial shear strength of T650 carbon fiber in an epoxy matrix; *Composites Science and Technology* 69,898–904; doi:10.1016/j.compscitech.2008.12.021
- M. Salamat-Talab, M.M. Shokrieh, M. Mohaghegh (2021). On the R-curve and cohesive law of glass/epoxy end-notch flexure specimens with 0// θ interface fiber angles, *Polymer Testing* 93 (2021) 106992
- Sayer, M. (2014). Elastic properties and buckling load evaluation of ceramic particles filled glass/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 59, 12-20.
- Schuecker C., Davidson B.D. (2000), 'Effect of friction on the perceived mode II delamination toughness from three and four point bend end notched flexure tests', *ASTM STP*, 1383: 334–344.
- Schuecker, C. , & Davidson, B. D. (2000). Evaluation of the accuracy of the four-point bend end-notched flexure test for mode II delamination toughness determination. *Composites Science and Technology*, 60(11), 2137-2146.
- Sebaey, T. A. Blanco, N., Lopes, C. S. ve Costa, J. (2011). Numerical investigation to prevent crack jumping in double cantilever beam tests of multidirectional composite laminates. *Composites Science and Technology*, 71 (13), 1587-1592.
- Seyhan, A. T., Tanoglu, M. ve Schulte, K. (2008). Mode I and mode II fracture toughness of e-glass non-crimp fabric/carbon nanotube (CNT) modified polymer based composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 5151-5162.
- Shen, M.-Y., Chang, T.-Y., Hsieh, T.-H., Li, Y.-L., Chiang, C.-L., Yang, H. ve Yip, M.-C. (2013). Mechanical properties and tensile fatigue of graphene nanoplatelets reinforced polymer nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2013, 1-9.

- Shetty, M. R., Vijay Kumar, K. R., Sudhir, S., Raghu, P., Madhuranath, A. D. ve Rao, R. M. (2000). Effect of fibre orientation on mode-I interlaminar fracture toughness of glass epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 19 (8), 606-618.
- N. Shi, R.J. Arsenault, A.D. Krawitz, and L.F. Smith (1993). Deformation-Induced Residual Stress Changes in SiC Whisker-Reinforced 6061 Al Composites, *Metallurgical Transactions A* Volume 24A, 187
- Siddiqui, N. A., Woo, R. S., Kim, J.-K., Leung, C. C. ve Munir, A. (2007). Mode I interlaminar fracture behaviour and mechanical properties of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 449-460.
- Silva M.A. L. (2006), 'Estudo das Propriedades de Fractura em Modo II e em Modo III da Madeira de Pinus pinaster Ait.', Master Thesis, FEUP, Porto
- H. Silva, J.A.M. Ferreirab, J.D.M. Costab, C. Capelac, (2013).A study of mixed mode interlaminar fracture on nanoclay enhanced epoxy/glass fiber composites, *Ciência & Tecnologia dos Materials* 25,92–97, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ctmat.2014.03.005>
- S. , Sprenger, M. , H. , Kothmann, V., Altstaedt, (2014).Carbon fiber-reinforced composites using an epoxy resin matrix modified with reactive liquid rubber and silica nanoparticles, *Composites Science and Technology* 105,86–9, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.10.003>
- V. K. Srivastava, T. Griesb, T. Quadflieg, Benjamin Mohr, M. Kolloch, P. Kumar (2018). Fracture behavior of adhesively bonded carbon fabric composite plates with nano materials filled polymer matrix under DCB, ENF and SLS tests, *Engineering Fracture Mechanics* 202,275–287
- Subagia, I. A., Tijing, L. D., Kim, Y., Kim, C. S., Vista IV, F. P. ve Shon, H. K. (2014). Mechanical performance of multiscale basalt fiber-epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles. *Composites Part B: Engineering* 58, 611-617.
- H. Taheri, M. Oliaei, H. Ipakchi, H. Saghafi (2020).Toughening phenolic composite laminates by interleaving hybrid pyrolytic carbon/polyvinyl butyral nanomat, *Composites Part B*,191,107981
- X. Tang, J.D. Whitcomb, (2003).Progressive Failure Behaviours of 2D Woven Composites, *J. Compos. Mater.* 37,1239–1259. <https://doi.org/10.1177/002199803033468>.
- Tang, Y., Ye, L., Zhang, Z. ve Friedrich, K. (2013). Interlaminar fracture toughness and CAI strength of fibre-reinforced composites with nanoparticles - A review. *Composites Science and Technology*, 37, 26-37.
- Tanaka K., Kageyama K., Hojo M. (1995), 'Prestandardization study on mode II interlaminar fracture toughness test for CFRP in Japan', *Composites*, 26: 243–255.
- Thakre, P. R., Lagoudas, D. C., Riddick, J. C., Gates, T. S., Frankland, S.-J. V., Ratcliffe, J. G., Zhu, J., ve Barrera, E. V. (2011). Investigation of the effect of single wall carbon nanotubes on interlaminar fracture toughness of woven carbon fibre-epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 46 (10), 1091-1107.
- Tian Y, Zhang H, Zhang Z.(2017). Influence of nanoparticles on the interfacial properties of fiber-reinforced-epoxy composites. *Compos A*, 98. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.03.007>.
- Tiber B, Balcioğlu HE. (2019).Flexural and fracture behavior of natural fiber knitted fabric reinforced composites. *Polym. Compos.* 40
- Thostenson E.T., Ren Z.F., Chou T.W. (2001). Advances in the science and technology of CNTs and their composites: a review. *Compos Sci Technol* ;61:1899–912.

- E. Triki, B. Zouari, and F. Dammak, (2016). Dependence of the interlaminar fracture toughness of E-Glass/polyester woven fabric composites laminates on ply orientation, *Eng. Fract. Mech.*, vol. 159, pp. 63–78, DOI: 10.1016/j.engfracmech.2016.03.025
- T. Turgut, A. Kayran, N. Alemdaroğlu, M. Ceylan (2007). Vakum torbalama yöntemi ile kompozit malzemeden yapı üretimi örnek bir havacılık uygulaması, *Mühendis ve Makine*, Cilt: 48, Sayı: 566
- Uddin, M. F. ve Sun, C. (2008). Strength of unidirectional glass/epoxy composite with silica nanoparticle-enhanced matrix. *Composites Science and Technology*, 68, 1637-1643.
- Ulus, H., Üstün, T., Eskizeybek, V., Şahin, Ö. S. ve Avcı, A. (2014). Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: preparation and mechanical properties. *Applied Surface Science*, 318, 37-42.
- Url-1 <http://www.sisecamkimyasallar.com/sites/catalogs/tr/Documents/buss-seg/Cam-Elyaf/tek-uclu-fitul/sisecam-WR6.pdf>, alındığı tarih: 7.6.2016 *Şişecam Kimyasallar*. (2016, 6 7). www.sisecamkimyasallar.com:
- Url-2 <https://cumerlab.cu.edu.tr/cu/laboratuvarlar/cihazlar-listesi/sem>, alındığı tarih: 09.05.2022. Çukurova Üniversitesi. www.cu.edu.tr
- Venkatesan, M., Palani Kumar, K., and Rajendra Boopathy, S. (2019). Analysis of toughness in multi-walled carbon nano tubes for resin and resin glass fiber composites. *Mater. Today Proc.* 16, 367–373. doi:10.1016/j.matpr.2019.05.103
- C. M. Vu & H. J. Choi (2016): Enhancement of Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fiber/Epoxy Composites Using Silk Fibroin Electrospun Nanofibres, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, DOI: 10.1080/03602559.2015.1132459
- Wang Y., Williams J.G. (1992), ‘Corrections for Mode II Fracture Toughness Specimens of Composite Materials’, *Composites Science & Technology*, 43: 251–256.
- Wang H., Vu-Khanh T. (1996), ‘Use of end-loaded-split (ELS) test to study stable fracture behaviour of composites under mode II loading’, *Compos. Struct.*, 36: 71–79.
- K. J. Wong, M. Johar, S. S. R. Kolor, M. Petr and M. N. Tamin (2020). Moisture Absorption Effects on Mode II Delamination of Carbon/Epoxy Composites, *Polymers*, 12, 2162; doi:10.3390/polym12092162
- M. Yasae, G. Mohamed, A. Pellegrino, N. Petrinic, S.R. Hallett, (2017). Strain rate dependence of mode II delamination resistance in through thickness reinforced laminated composites, *Int. J. Impact Eng.* 107, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.05.003>.
- Yakobson B.I., Avouris P. (2001). Mechanical properties of carbon nanotubes. *Top Appl Phys*; 80: 287–327.
- Yayla, P. (2007). Kırılma Mekniği. *Çağlayan Kitabevi*, 229s, İstanbul.
- T. Yokozeki, Y. Iwahori, M. Ishibashi, T. Yanagisawa, K. Imai, M. Arai, T. Takahashi, K. Enomoto (2008). Fracture toughness improvement of CFRP laminates by dispersion of cup-stacked carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 69, 2268–2273
- Yoshihara H., Ohta M. (2000), ‘Measurement of mode II fracture toughness of wood by the end-notched flexure test’, *J Wood Sci.*, 46: 273–278.
- Yoshihara H. (2004), ‘Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test’, *Engng. Fract. Mech.*, 71: 2065–2077
- K. Zafeiropoulou, C. Kostagiannakopoulou, G. Sotiriadis and V. Kostopoulos (2020). A Preliminary Study of the Influence of Graphene Nanoplatelet Specific Surface Area on the Interlaminar Fracture Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites, *Polymers*, 12, 3060; doi:10.3390/polym12123060

Zhang, J., Ju, S., Jiang, D. ve Peng, H.-X. (2013). Reducing dispersity of mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites by introducing multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*, 54, 371-376.

Zhou, Y., Hosur, M., Jeelani, S. ve Mallick, P. K. (2012). Fabrication and characterization of carbon fiber reinforced clay/epoxy composite. *Journal of Material Science*, 42, 5002-5012.

Zhu, Y., Bakis, C. E. ve Adair, J. H. (2012). Effects of carbon nanofiller functionalization and distribution on interlaminar fracture toughness of multi-scale reinforced polymer composites. *Carbon*, 50, 1316-1331.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

Adı Soyadı Coşkun YILDIZ
Yabancı Dil İngilizce

Eğitim ve Akademik Durumu

Lisans Cumhuriyet Üniversitesi, 2004-2008
Yüksek Lisans Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, 2020-2022

İş Tecrübesi

SÖRMAŞ, Makine Bakım Şefi 2008 - 2013
MARMARA KÂĞIT AŞ, Makine Bakım Müdürü 2013 - 2015
MEY İÇKİ, Şişeleme ve Üretim Şefi 2015 - 2017
BİLLAS, Üretim ve Bakım Müdürü 2017 - 2018
FİPOL, Üretim Müdürü 2019 - 2020
GÜNSU, Proje-Taahhüt Şefi 2021 -

Kongreler ve Bildiriler (Uluslararası)

Yıldız C. , Darıcık F. (2021). İşletme koşullarının cam elyaf takviyeli polyester filtrelerin dayanımına etkisi, *III. Uluslararası Akdeniz Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, (Tam Metin Bildiri / Sözlü Sunum)