



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

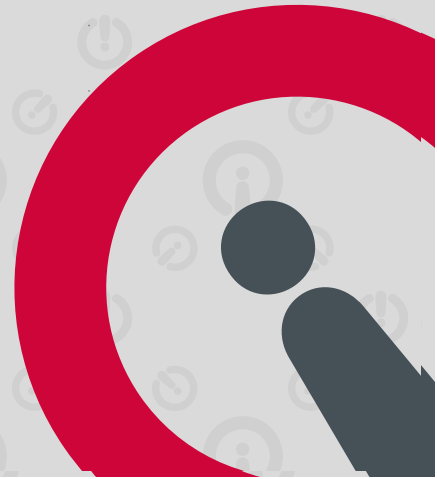
**DOKTORA
TEZİ**

**KARBON NANOTÜP, NANOFİBER
ve E-CAM TAKVİYELİ EPOKSI
NANOKOMPOZİTLERİN
YORULMALI KOROZYON
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Göksel SARAÇOĞLU

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2020





**KARBON NANOTÜP, NANOFİBER ve E-CAM TAKVİYELİ EPOKSİ
NANOKOMPOZİTLERİN YORULMALI KOROZYON DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

Göksel SARAÇOĞLU

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2020

Göksel SARAÇOĞLU tarafından hazırlanan “**KARBON NANOTÜP, NANOFİBER ve E-CAMI TAKVİYELİ EPOKSİ NANOKOMPOZİTLERİN YORULMALI KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ahmet YAPICI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Mustafa Kemal APALAK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Üye: Prof. Dr. Yeliz PEKBAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Ege Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Üye: Doç. Dr. Erdoğan KANCA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Üye: Doç. Dr. Ali GÜNEN

Metalurji ve Malz. Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 26/06/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Tolga DEPCİ

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Göksel SARAÇOĞLU

04/06/2020

KARBON NANOTÜP, NANOFİBER ve E-CAMI TAKVİYELİ EPOKSİ
NANOKOMPOZİTLERİN YORULMALI KOROZYON DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Göksel SARAÇOĞLU

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2020

ÖZET

Bu tez çalışmasında, katyonik yüzey aktif maddesi kullanılarak homojen dağılımı sağlanmış ve aynı zamanda yüzeyi kimyasal olarak fonksiyonelleştirilmiş olan %0,1 oranındaki çok cidarlı karbon nanotüpe ilave olarak, cam elyaf yüzeyleri silan kimyasalı ile fonksiyonelleştirilmiş ve simetri katında nano elyaf tabaka içeren [0/90] elyaf dizilimine sahip E-cam/epoksi kompozit malzemenin korozyonlu yorulma davranışı incelenmiştir. Katyonik yüzey aktif maddesi olarak CetylPyridinium Chloride, silan malzemesi olarak γ -glycidoxypropyltrimethoxysilane kullanılmıştır. Nano elyaf olarak, elektro-eğirme yöntemiyle üretilmiş olan poliakrilonitril kullanılmıştır. Çok cidarlı karbon nanotüplerin saflaştırılmasında 1:1 oranında sülfürik asit/nitrik asit karışımı, amin ile fonksiyonelleştirmede hekzametilen diamin kullanılmıştır.

Üretilen numunelerde nano elyafın, silan uygulamasının ve karbon nanotüp yüzey kimyasının değiştirilmesi işlemlerinin etkilerinin ayrı ayrı görülmesi için ara numuneler üretilmiştir. Tip-I kırılma dayanım ve tokluğunun ölçülmesi için çekme, üç-nokta eğme ve tabakalar arası kırılma testleri uygulanmıştır.

Üretilen numuneler, %10 derişimdeki sodyum hidroksit (NaOH) ortamında dört hafta süreyle bekletilmiş ve ortamın etkisi, korozif ortama girmeyen numunelerle kıyaslanmıştır. Üretilen numunelerin, katkısız muadillerine göre ağırlık artışlarının %4,7 seviyesinden %0,7 seviyelerine kadar indiği tespit edilmiştir. Korozif ortamda bekletilen numunelerin kırılma dayanım ve tokluk değerinin ilk iki haftada ciddi seviyede etkilendiği (%54), fakat, iki haftadan sonra, bu kaybın orantılı bir şekilde daha da aşağı seviyelere inmediği ve kontrollü hâlde kaldığı görülmüştür. R=0,1 oranında ve 3 Hz frekansta gerçekleştirilen yorulma testlerinde, korozyona uğratılan numunelerin statik dayanım kaybından dolayı, gerilme-yük çevrim sayısı (S-N) grafiği eğrisinin yaklaşık olarak %76,7 daha düşük eğime sahip olduğu tespit edilmiştir. Üretilen ara numunelerde, en yüksek mekanik değerlerin silanla işlem görmüş ve katyonik yüzey aktif maddesi ile homojen dağılımı sağlanmış karbon nanotüp içeren numunelerden alındığı görülmüştür. Çok cidarlı karbon nanotüpün asit ile saflaştırılması ve sonrasında amin ile yüzey bağlarının oluşturulması işleminin olumlu sonuç vermediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Fonksiyonelleştirme, kırılma, tokluk, korozyon, yorulma analizi

Sayfa Adedi : 164

Danışman : Prof. Dr. Ahmet YAPICI

INVESTIGATION OF CORROSION FATIGUE BEHAVIOR OF CARBON
NANOTUBE, NANOFIBER AND E-GLASS REINFORCED EPOXY
NANOCOMPOSITES

(Ph. D. Thesis)

Göksel SARAÇOĞLU

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

Jun 2020

ABSTRACT

In this thesis, the corrosion fatigue behavior of the [0/90] E-Glass/epoxy composite laminate was investigated. In the laminate production, the interface of the fiber-matrix was functionalized with γ -glycidoxypropyltrimethoxysilane. The sulfuric acid/nitric acid solution in the ratio of 1: 1 was used for purification of multi-walled carbon nanotubes and hexamethylene diamine for functionalization with the amine. Cetylpyridinium chloride was used as a cationic surfactant to distribute carbon nanotubes homogeneously. In the symmetry layer of produced laminate, there was a nanofiber mat manufactured from polyacrylonitrile by the electro-spinning method.

The semi-finished samples were also produced separately to examine the effects of nanofibre, silane application, and carbon nanotube functionalization on fracture strength and toughness. Tensile, three-point bending, and inter-laminar fracture tests were carried out to measure Mode-I fracture strength and the toughness of the samples.

The produced samples were kept in a 10% concentration of sodium hydroxide (NaOH) for four weeks and the effect of the medium was compared with the samples that were not left in the corrosive environment. It was determined that the absorption amount decreased from 4.7% to 0.7% concerning the native specimen. It was found that the fracture strength and toughness values of the samples left in the corrosive environment showed a dramatic decrease of 54% in the first two weeks, but the loss of mechanical properties remained stable from the second week. In the fatigue tests at a frequency of 3 Hz and $R = 0.1$, it was found that the samples exposed to corrosion had less slope (76.7%) in the applied maximum stress versus the number of cycles to failure (S-N) plots due to the loss of tensile strength. The highest mechanical properties were achieved for samples containing carbon nanotubes treated with silane and homogeneous distribution with a cationic surfactant. It has been determined that the combination of acid purification and amine functionalization does not give positive results in terms of fracture toughness.

KeyWords : Functionalization, fracture strength, fracture toughness, corrosion, fatigue analysis

PageNumber : 164

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet YAPICI

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında desteklerini eksik etmeyen, her zaman şükranlarımı sunacağım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet YAPICI'ya,
Doktora tez konumun belirlenmesinde yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Ahmet AVCI ve deneysel çalışmalarda tecrübesinden faydalandığım Sayın Doç. Dr. Lokman GEMİ hocalarıma,
Tez izleme komitesinde görevli olan ve desteklerini gördüğüm Sayın Doç. Dr. Erdoğan KANCA ve Sayın Doç. Dr. Ali GÜNEN hocalarıma,
Tez savunmasında, değerli fikirlerinden yararlandığım ve ileride yapılacak çalışmalar konusunda yol gösteren ve tezin yalın ve açıklayıcı olmasını sağlayan Sayın Prof. Dr. Mustafa Kemal APALAK ve Sayın Prof. Dr. Yeliz PEKBAY hocalarıma,
Deney numunelerinde malzeme ve bilgi desteğinde bulunan Metyx Composite ve Biesterfeld Türkiye Yetkililerine,
Çalışmalarında manevi desteğini hissettiğim İskenderun Teknik Üniversitesinin akademik ve idari personeline, ve,
Sevgili eşim Ebru ve kızımız Derin'e ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ETİK BEYAN.....	v
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	viii
RESİMLERİN LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ	1
2. NANOKOMPOZİT MALZEMELER.....	9
2.1. Karbon Nanotüplerin Fonksiyonelleştirilmesi	17
2.2. Karbon Nanotüplerin Saflaştırılması.....	18
2.3. Karbon Nanotüplerin Kimyasallarla Yüzey Kimyasının Değiştirilmesi.....	19
2.4. Karbon Nanotüplerin Yüzey Aktif Maddesi ile Fonksiyonelleştirilmesi.....	21
2.5. Cam Elyafların Yapısı ve Özelliği	23
2.6. Cam Elyafların Silan ile Fonksiyonelleştirilmesi.....	25
2.7. Elektro-eğirme Yöntemi ve Nano Elyaflar	30
2.8. Nano elyafların Kompozit Yapıya Getirdiği Mekanik Etki	35
3. KOMPOZİTLERİN YORULMA VE KOROZYON ÖZELLİKLERİ	37
3.1. Kompozitlerin Yorulma Özellikleri	37
3.2. Kompozit Malzemeleri Etkileyen Çevresel Etmenler.....	51
4. KIRILMA MEKANİĞİNİN TEMELLERİ	60
4.1. Gerilme Yoğunluk Faktörü (K_I) Yaklaşımı	63
4.2. Numune Biçiminin Etkisi.....	66
4.3. Elastik Enerji Boşalma Hızı ve Gerilme Yoğunluk Çarpanı.....	68

	Sayfa
5. KIRILMA ÖLÇÜTLERİ	69
5.1. İç Kusur Ölçütü (IFM)	69
5.2. Nokta Gerilme Ölçütü (The Point Stress Criterion-PSC)	71
5.3. K/σ Yaklaşımı.....	74
5.3.1. Her bir çatlak uzunluk oranı (a/W) için K_{eff}/σ_f oranının bulunması	78
5.3.2. Çentiksiz duruma doğru kırılma tokluk sınır değerinin saptanması	81
5.3.3. Kırılma tokluk (K_{ini} , K_{eff} ve K_{IC}) değerlerinin tespit edilmesi.....	84
5.4. Tip-I Tabakalar arası Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi.....	86
6. MALZEME VE YÖNTEM.....	90
6.1. Elektro-Eğirme Ölçütüyle Nano Elyaf Tabakaların Üretimi	90
6.2. Cam Elyaf Yüzeyinin Silan ile Fonksiyonelleştirilmesi	97
6.3. Karbon Nanotüplerin Saflaştırılması ve Amin ile Fonksiyonelleştirilmesi	98
6.4. Mekanik Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	102
6.5. Korozyonlu Yorulma Testine Girecek Numunelerin Hazırlanması.....	105
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	108
7.1. Tek Kenar Çatlağına Sahip Çekme Deney Sonuçları	108
7.2. Üç-Nokta Eğme Test Sonuçları.....	118
7.3. Tabakalar arası Tip-I Kırılma Enerjisinin Tespit Edilmesi.....	131
7.4. Korozyon Deney Sonuçları	137
7.5. Yorulma Analiz Sonuçları.....	142
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	148
KAYNAKLAR	151
ÖZGEÇMİŞ	164
DİZİN.....	165

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Hekzametilen diamin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	20
Çizelge 2.2. Yüzde ağırlık olarak cam çeşitlerinin kimyasal element dağılımı.....	25
Çizelge 2.3. Elyaf camların mekanik özellikleri.....	25
Çizelge 3.1. Kompozit baca iç yüzey ortam kimyasal özellikleri.....	52
Çizelge 3.2. Baca numuneleri kalınlık değerleri.....	53
Çizelge 4.1. Çentiklerin K eşitlikleri.....	65
Çizelge 4.2. Malzemelerin kırılma tokluk değerleri	66
Çizelge 6.1. Üretimlerde kullanılan malzemeler	90
Çizelge 6.2. Üretilen numunelerin kodları ve üretim süreçleri.....	102
Çizelge 7.1. (R) numunelerinin kırılma dayanım ve tokluk değerleri	109
Çizelge 5.2. $R+CNT$ numunelerinin kırılma dayanım ve tokluk değerleri.....	110
Çizelge 7.3. $R+NF+CNT$ numuneleri kırılma dayanım ve tokluk değerleri.....	112
Çizelge 7.4. $R(F)+CNT$ numuneleri kırılma dayanım ve tokluk değerleri.....	113
Çizelge 7.5. $R(F)+CNT(F)$ numuneleri kırılma dayanım ve tokluk değerleri.....	115
Çizelge 7.6. $R(F)+NF+CNT(F)-1$ kat num. kırılma dayanım ve tokluk değerleri.....	117
Çizelge 7.7. $R(F)+NF+CNT(F)-7$ kat num. kırılma dayanım ve tokluk değerleri.....	117
Çizelge 7.8. (R) eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri.....	121
Çizelge 7.9. $R+NF$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri.....	121
Çizelge 7.10. $R+CNT$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri	121
Çizelge 7.11. $R+NF+CNT$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri	121
Çizelge 7.12. $R(F)$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri	124
Çizelge 7.13. $R(F)+CNT$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri ...	124
Çizelge 7.14. $R(F)+CNT(F)$ eğme test num. kırılma dayanım ve tokluk değerleri.....	124
Çizelge 7.15. $R(F)+NF$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri.....	124
Çizelge 7.16. $R(F)+NF+CNT(F)$ eğme test num. kır. dayanım ve tokluk değerleri....	125
Çizelge 7.17. Num. kritik çatlak uzunlukları, kırılma dayanım ve tokluk değerleri	127
Çizelge 7.18. (R) num. Tip-I tabakalar arası ayrılma deney sonuçları	132
Çizelge 7.19. Referans (R) num. Tip-I tabakalar arası ayrılma kritik kırılma enerjisi .	132
Çizelge 7.20. (R) num. Tip-I tabakalar arası ayrılma kritik kırılma enerjileri.....	133

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.21. $R+NF$ num. Tip-I tabakalar arası ayrılma kritik kırılma enerjileri.....	134
Çizelge 7.22. $R(F)$ numuneleri Tip-I tabakalar arası ayrılma kritik kırılma enerjileri .	135
Çizelge 7.23. $R(F)+NF+CNT(F)$ numuneleri kritik kırılma enerji değerleri.....	136
Çizelge 7.24. Kontrol numunelerinin korozyonmaruziyet süreci öncesi ilk boyutları	138
Çizelge 7.25. Kontrol num. çekme test sonuçları ve kırılma tokluk değerleri	140
Çizelge 7.26. Korozyona uğratılmamış num. boyutları ve statik test sonuçları	142
Çizelge 7.27. Korozyona uğratılmamış num. boyutları ve dinamik test sonuçları.....	142
Çizelge 7.28. Korozyona uğratılmış numunelerin boyutları ve statik test sonuçları....	145
Çizelge 7.29. Korozyona uğratılmış numunelerin boyutları ve dinamik test sonuçları	146

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Karbon nanotüp yapısı.....	3
Şekil 2.1. Elyafle güçlendirilmiş kompozit çeşitleri.....	9
Şekil 2.2. Bisfenol-A ve epiklorohidrinden meydana gelen epoksi ön-polimer.....	16
Şekil 2.3. Epoksi ön-polimerin amin ile reaksiyona girerek kürlenmesi.....	17
Şekil 2.4. KNT'nin fonksiyonelleştirme süreci	19
Şekil 2.5. Karbon nanotüplerin fonksiyonelleştirme yolları.....	20
Şekil 2.6. Hekzametilen diamin kimyasal yapısı.....	20
Şekil 2.7. Karbon nanotüp yüzey işleme süreçleri	21
Şekil 2.8. Yüzey aktif maddesi şematik görünümü	22
Şekil 2.9. Yüzey aktif maddesi kritik derişimi şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.10. a) CetylPyridinium Chloride (CPC) kimyasal gösterimi.....	23
Şekil 2.11. Sodyum silikat camın polihedron ağ yapısı.....	24
Şekil 2.12. Ergimiş hâldeki camın, istenilen çapa göre çekilmesi.....	24
Şekil 2.13. Silan kimyasalının fonksiyon aşamaları	26
Şekil 2.14. Bağlama kimyasalı-camsı geçiş sıcaklığı ilişkisi	27
Şekil 2.15. Sıcak su ile hidrolizi sonrası silanın şematik yapısı	29
Şekil 2.16. Arayüz dayanımının sıcak suya daldırma süresiyle değişimi.....	30
Şekil 2.17. Elektro-eğirme metodunun şematik çizimi.....	30
Şekil 2.18. Kısmen kristalin hâldeki polimerin yapısı.....	31
Şekil 3.1. Yorulma çatlağı büyüme aşamaları	40
Şekil 3.2. Çatlaklardaki artışın dayanım ve modül ile ilişkisi	41
Şekil 3.3. Çatlak hatvesinin fonksiyonu olarak modül kaybı şematik görünümü	42
Şekil 3.4. (a) 10^{-10} yük çevrim sayılarında $\sigma_{maks}-\epsilon_{maks}$ eğrileri	46
Şekil 3.5. Cam elyafın havadaki dayanımı ile çeşitli çözeltilerdeki dayanımı	59
Şekil 4.1. Çatlak yanındaki yüksüz alanın şematik görünümü	61
Şekil 4.2. Kırılma enerji dengesi.....	62
Şekil 4.3. Çatlağın ilerlemesiyle açığa çıkan enerjinin şematik görünümü.....	63
Şekil 4.4. Kırılma tipleri	64

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Çatlak ucu koordinat sistemi şematik görünümü.....	64
Şekil 4.6. Çatlak ucundan r_p mesafesi kadar ötede meydana gelen akma gerilmesi	67
Şekil 4.7. Kırılma tokluk numune ölçüleri.....	68
Şekil 5.1. İç Kusur Ölçütü.....	70
Şekil 5.2. Çatlak ucunda meydana gelen gerilme dağılımı.....	71
Şekil 5.3. Bünyesinde dairesel çentik ve çatlak barındıran numune.....	73
Şekil 5.4. SENT ve SENB numunesinin şematik gösterimi	78
Şekil 5.5. SENB parçanın net genişliğindeki gerilme dağılımı	81
Şekil 5.6. Çatlaksız (düz) numuneye doğru K/σ oran sınırının belirlenmesi	83
Şekil 5.7. Nokta Gerilme Ölçütü kırılma tokluğu grafiği	85
Şekil 5.8. a_c ve σ_{ini} değerlerinin tespit edilmesi	86
Şekil 5.9. Tabakalar arası Tip-I kırılma test numunesi yük-yer değiştirme grafiği.....	87
Şekil 5.10. $C^{1/3}$ -a grafiği ve $C^{1/3}$ -a grafiğinde düzeltme işlemi	89
Şekil 6.1. Kullanılan PAN hammaddesinin DTG, DTA ve TG eğrileri	93
Şekil 6.2. Ana elyaf ve nano elyaf tabakaların dizilimi	95
Şekil 6.3. SENT ve SENB testlerinin şematik görünümü	104
Şekil 6.4. Korozyonlu yorulmaya girecek numunelerin şematik görünümü	106
Şekil 7.1. Referans (R) numunelerin çekme testi yük-yer değiştirme grafikleri	108
Şekil 7.2. $R+CNT$ numunelerinin yük-yer değiştirme grafikleri	110
Şekil 7.3. $R+NF+CNT$ numuneleri çekme testi yük-yer değiştirme grafikleri	111
Şekil 7.4. $R(F)+CNT$ numuneleri çekme testi yük-yer değiştirme grafiği	113
Şekil 7.5. $R(F)+CNT(F)$ numuneleri çekme testi yük-yer değiştirme grafiği.....	114
Şekil 7.6. İşlem görmüş karbon nanotüplerin kızılötesi spektroskopik grafiği-1	116
Şekil 7.7. İşlem görmüş karbon nanotüplerin kızılötesi spektroskopik grafiği-2	116
Şekil 7.8. $R(F)+NF+CNT(F)$ ve R numuneleri yük-yer değiştirme kıyaslama grafiği	118
Şekil 7.9. R , $R+NF$ ve $R+CNT$ kompozitlerin yük-çökme grafikleri.....	119
Şekil 7.10. $R(F)$, $R(F)+NF$ ve $R(F)+CNT$ num. yük-yer değiştirme grafikleri	122
Şekil 7.11. Katyonik yüzey aktif maddesinin elastikliğe etkisi	125
Şekil 7.12. Birim kalınlıktaki eğme numuneleri modül değerleri	130
Şekil 7.13. Birim kalınlıktaki eğme numuneleri eğme dayanım değerleri	130

Şekil	Sayfa
Şekil 7.14. Birim kalınlıktaki eğme numuneleri etkin kırılma tokluk değerleri.....	131
Şekil 7.15. R numune Tip-I tabakalar arası ayrılma yük-yer değiştirme grafiği	131
Şekil 7.16. $R+NF$ numunesi Tip-I tabakalar arası ayrılma yük-yer değiştirme grafiği	133
Şekil 7.17. $R(F)$ numunesi Tip-I tabakalar arası ayrılma yük-yer değiştirme grafiği...	136
Şekil 7.18. $R(F)+NF+CNT(F)$ Tip-I tabakalar arası ayrılma yük-yer değiş. grafiği ...	137
Şekil 7.19. $R(F)+NF+CNT(F)$ korozyon kontrol numuneleri ağırlık değişimi	139
Şekil 7.20. Bir, iki, üç ve dört haftalık korozyon maruziyetinin σ - ϵ eğrileri.....	139
Şekil 7.21. Alkali ortam süresinin çekme dayanımına etkisi.....	141
Şekil 7.22. Alkali ortam süresinin elastisite modülüne etkisi.....	141
Şekil 7.23. Korozyona uğratılmamış $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinin S-N eğrisi.....	144
Şekil 7.24. Korozyona uğratılmamış num. logaritmik skalaya göre S-N eğrisi	145
Şekil 7.25. Korozyona uğramış $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinin S-N eğrisi.....	147
Şekil 7.26. Korozyona uğramış numunelerin logaritmik skalaya göre S-N eğrisi	147

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Petrokimya Baca genel resmi ve iç yapısı, alınan numuneler	52
Resim 3.2. Bacanın kimyasal ortama maruz kalan iç yüzeyinden görünüm	53
Resim 6.1. PAN'ın DMF çözücü içinde çözünmesi	91
Resim 6.2. Nanofiber üretim anı, üretilen nano elyaf tabaka	91
Resim 6.3. Üretilen nano elyafların çap dağılımı ve SEM görüntüsü	92
Resim 6.4. Nano elyaf numunelerin çekme test grafiği.....	93
Resim 6.5. Elle yatırma süreç adımları.....	95
Resim 6.6. Nano elyaf ve nanoparçacık içeren numunelerde elle yatırma işlemi	96
Resim 6.7. Asetik asit ile pH 4,5 seviyesinde silan çözeltinin hazırlanması	98
Resim 6.8. KNT'lerin asit ile saflaştırılması işlemi.....	99
Resim 6.9. KNT'lerin amin ile reaksiyonunun gerçekleşmesi	100
Resim 6.10. Amin ile fonksiyonelleştirilen KNT'lerin ayrıştırılması	100
Resim 6.11. İnfüzyon sürecine dahil edilecek KNT'lerin gramajının ayarlanması.....	101
Resim 6.12. Korozyona uğratılmadan yorulma testine tabi tutulan numuneler	106
Resim 6.13. Korozyona uğratılan ve yorulma testine tabi tutulan numuneler.....	107
Resim 6.14. Korozyona uğratılan kontrol numuneleri.....	107
Resim 7.1. $a/W=0,2$ ve $0,3$ SENT numunelerinde kırılma yüzeylerinin kıyaslanması	109
Resim 7.2. $R+CNT$ numunelerinin çekme testi kırılma biçimleri	110
Resim 7.3. $R+NF+CNT$ numuneleri çekme testi sonrası kırılma biçimleri	112
Resim 7.4. $R(F)+CNT$ numuneleri çekme testi sonrası kırılma biçimleri.....	113
Resim 7.5. $R(F)+CNT(F)$ numuneleri çekme testi sonrası kırılma biçimleri.....	115
Resim 7.6. $R(F)+NF+CNT(F)$ numuneleri çekme testi sonrası kırılma biçimleri.....	117
Resim 7.7. R , $R+NF$ kompozitlerin SEM görünümü	120
Resim 7.8. $R(F)$, $R(F)+NF$ ve $R(F)+CNT$ kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	123
Resim 7.9. $R(F)+CNT(F)$ numunesi eğme numunesi kırılma yüzeyi	128
Resim 7.10. $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesi eğme numunesi kırılma yüzeyi-1	128
Resim 7.11. $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesi eğme numunesi kırılma yüzeyi-2	129
Resim 7.12. $R+NF$ numunesi Tip-I tabakalar arası ayrılma kırılma yüzeyi-1	134
Resim 7.13. $R+NF$ numunesi Tip-I tabakalar arası ayrılma kırılma yüzeyi-2	135

Resim	Sayfa
Resim 7.14. $R(F)+NF+CNT(F)$ Tip-I tabakalar arası kırılma yüzeyi SEM görüntüsü	137
Resim 7.15. Önce korozif ortama sonra yorulma testine tabi tutulmuş numuneler.....	143
Resim 7.16. Azami gerilmesi 60 MPa olan yorulma testinde tabi tutulmuş numune...	144
Resim 7.17. Statik ve dinamik teste tabi tutulan korozif ortam numuneleri.....	146



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

a	Çatlak uzunluğu
a_c	Kritik çatlak uzunluğu
a/W	Çatlak uzunluğunun numune genişliğine oranı
B	Numune kalınlığı
E	Elastisite veya eğme modülü
σ	Gerilme
σ_N, σ_f	Artık kırılma dayanımı
σ_{UTS}	Kusursuz malzemenin çekme dayanımı
σ_0	İç kusuru olan malzemenin çekme dayanımı
k	Rijitlik
K	Gerilme yoğunlukfaktörü
K_{ini}	Çatlağı ilerleten gerilme yoğunluk faktörü
K_{eff}, K_{IC}	Etkin ve kritik kırılma tokluğu
L	Numune boyu ya da mesnet aralığı
L_0	Numune toplam boyu
W	Numune genişliği
Y	Biçim düzeltme etmeni

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Odası
ICM	İç Kusur Ölçütü
ASC	Ortalama Gerilme Ölçütü
LM	Çizgi Ölçütü
PM	Nokta Ölçütü
PSC	Nokta Gerilme Ölçütü
FFM	Sonlu Elemanlar Kırılma Ölçütü

1. GİRİŞ

Malzemeler yaşamlarımız üzerinde öyle bir etkiye sahiptir ki, insanlar, tarihsel dönemlerine malzeme isimlerini vermiştir. Son elli yılda, kompozit malzemeler, plastikler ve seramikler, etkilerini giderek artıran malzemeler olmuştur. Kompozit malzemelerin hacmi ve uygulama sayısı istikrarlı bir şekilde artmış, yeni pazarlara hızlı nüfuz etmiş ve baskın hâle gelmiştir. Cam elyaf takviyeli plastikten yapılmış tekneler ve grafit spor malzemeleri, toplumların hemen hemen her katmanında kullanılır duruma gelmiştir. Kompozit malzemelerin olası uygulamaları, sadece bireyin hayal gücü ile sınırlıdır.

Kompozit malzeme, gelişmiş özelliklere sahip yeni bir malzeme oluşturmak için iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Örneğin, betonun oluşturulması için, içerdiği agregalar kadar güçlü olan ancak agregadan daha kolay şekillendirilebilen çimento ile birleştirilir. Betonun gelişmiş özellikleri dayanıklılık ve üretim kolaylığı olsa da, fiziksel, kimyasal ve süreç ile ilgili özellikleri, uygun bir malzeme kombinasyonu ile artırılabilir. En yaygın kompozitler, bir bağlayıcı içinde bir arada tutulan güçlü elyaflardan yapılanlardır. Parçacıklar veya pulcuklar da takviye olarak kullanılır, ancak elyaf kadar etkili değildir [1]

Polimer kompozitlerin özellikleri, kompoziti oluşturan her bir bileşenin özelliklerine, tipine, şekline, içerisine eklenen parçacıkların miktarına ve homojen dağılım yapıp yapmadığına ve her bir bileşenin matris ile arayüzüne bağlıdır. Dolayısıyla, adı geçen her bir özelliğin değiştirilmesi yoluyla, kompozitin sergileyeceği özellik geniş bir yelpazeye sahip olacaktır [2].

Bir kompozitte bağlayıcı olarak epoksi reçinelerin kullanımı, rüzgâr türbin kanatlarından hava araçlarının karmaşık yapısal parçalarına kadar geniş kullanım alanı bulmuştur. 1960 yılında geliştirilmiş olan DGEBA tipi epoksi (diglycidyl ether of bisphenol A), birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılan epoksi çeşididir. Ayrıca, yüksek birleşme ve yüksek işlenebilme (süreç) özelliklerinden dolayı sırasıyla yapıştırıcı ve elyaf takviyeli plastiklerde (CTP) matris olarak kullanılmaktadır. Fakat, kürlenmemiş epoksi reçineler zayıf mekanik, kimyasal ve ısı direncine sahiptir. Bundan dolayı, genellikle amin kökenli sertleştiricileriyle beraber kullanılmaları gerekir. Bu durumda, üç-boyutlu çapraz bağların

oluştugu termoset yapılar elde edilebilmektedir. Bu yapı, sunduğu yüksek modül, kopma dayanımı ve yüksek arayüz bağlantısı gibi özellikleri nedeniyle mekanik ve ısı uygulamalara ideal bir durumu meydana getirir. Fakat, çok yüksek çapraz bağ yoğunluğu, kurlenme sırasında doğan iç gerilmelerden dolayı yapının kırılma tokluğunun azalmasına neden olmaktadır. Yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip epoksi yapıda, kırılma başlangıç evresinde, malzemenin göstereceği direnci düşürmekte ve plastik deformasyondan doğan boşluk büyümesi kısıtlanmış olmaktadır. Bu durum, dolayısıyla, kullanım alanını azaltmaktadır.

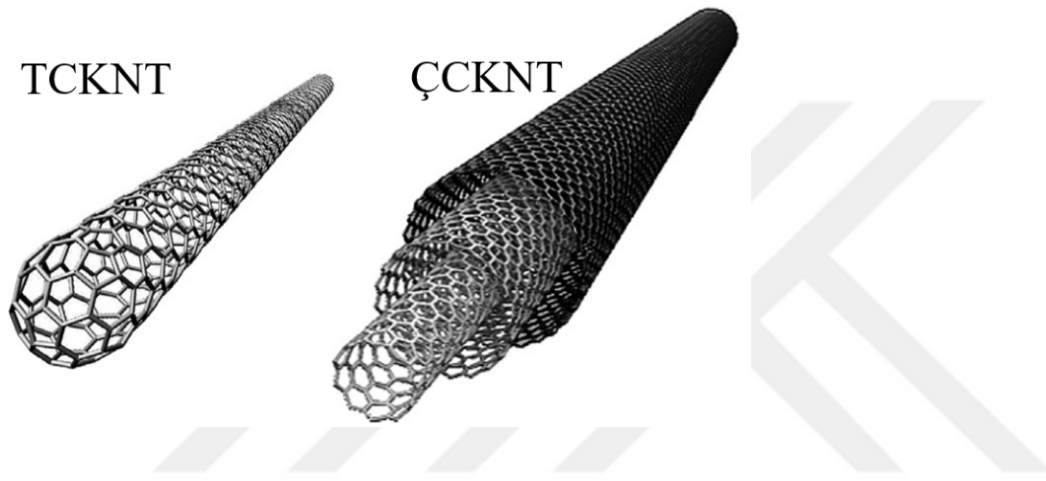
Epoksi matrisin bu zayıf durumu, matrise bir takım katkıların (nano ölçekteki dolguların) ilave edilmesiyle giderilebilmektedir. Saf matrisin rijitliği, özgül dayanımı ve düşük kurlenme büzülmesi gibi faydalı özellikleri, katılan nano ölçekteki katkılarla daha da iyi duruma getirilebilmekte ve özgül bir takım uygulama alanlarında kendine yer edinebilmektedir. Nanokompozitlerin birçok araştırmacı tarafından bu kadar yoğun araştırılması, ileride tespit edilecek müstakbel katkılarla mekanik özelliklerinin daha da iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Nanokompozitlerin en uygun mekanik özellikleri, nano ölçekteki dolgu elemanlarının reçine içine homojen olarak yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Bu katkıların homojen dağılımı, matristen bu katılara yük iletimini rahatlatarak iyileştirecek, dolayısıyla malzemenin mekanik özelliklerinde olumlu yönde artış sağlanacaktır. Fakat, nano katkıların epoksi reçine içine ilave edilmesi, reçinenin viskozitesinde artışı da beraberinde getirdiği bilinmektedir. Bu durum da, homojen dağılımı olumsuz yönde etkileyebilecek bir husustur.

Nano parçacıkları reçine içine homojen olarak dağıtmak için izlenen yol, solüsyon karışım yöntemidir. Bu yöntem, nanoparçacığın çözücü içinde ultrasonik banyoda karıştırılması, reçine içine aktarılması ve çözücü buharlaşana kadar ısıtılarak karıştırılması esasına dayanmaktadır. Fakat ultrasonik banyoda tutulan karışımın banyo süresi, özellikle nano dolgu olarak sık kullanılan karbon nanotüplere ciddi zarar verebilmektedir. Bu zarar, özellikle bu tüplerin boylarının kısalması şeklinde gelişmekte ve sonuçta nanokompozitlerin mekanik ve kırılma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.

Nano dolgu olarak sık kullanılan karbon nanotüpler (KNT), grafen tabakaların silindir haline

getirilmiş, silindirin her iki ucunun beşgen ya da altıgen ringlerle kapatılmış şeklindedir [3]. Yüksek ısı, elektriksel iletkenlikleri ve üstün çekme dayanımları gibi dikkate değer fiziksel özellikleri nedeniyle, yapılan çalışmalarda büyük ilgi görmektedir. Birçok araştırmacı, KNT'leri, yüksek boy/en oranı, yüksek dayanımları, rijitlik performansları, ısı ve elektrik iletkenlik özellikleri nedeniyle sıklıkla kullanmaktadır. KNT'ler üç değişik tipte bulunurlar: Tek cidarlı karbon nanotüpler (TCKNT), iki cidarlı karbon nanotüpler (İCKNT) ve çok cidarlı karbon nanotüpler (ÇCKNT).



Şekil 1.1. Karbon nanotüp yapısı [4]

KNT'ler, üstün nitelikte mekanik, fiziksel ve arayüz özellikler sergilediği için, birçok araştırmacı tarafından daha etkili matris özelliklerine ulaşılması amacıyla kullanılmaktadır [5-19]. KNT'lerin bu üstün özellikleri sergilemesinde, özgül yüzey alanı, yüksek boy/çap oranı ve matris içinde homojen karışımı gibi bir takım kritik etmenler rol oynamaktadır. Yüzey alanı, gerilme iletiminin daha büyük ya da küçük yüzeyden iletilmesi açısından önemlidir. Fakat, bu etmen, tüplerin çap değeri ve cidar sayısına bağlı olarak, nanotüpler arasında kuvvetli çekim güçlerinin doğmasına da neden olabilmektedir. TCKNT, ÇCKNT'ye göre çok daha yüksek boy/çap oranına sahiptir. ÇCKNT, birçok cidar katmanından meydana geldiği için çok daha büyük çap değerine sahiptir. Bu durum, homojen dağılımı rahatlatan bir unsur olmakta fakat gerilme iletiminde daha düşük arayüz özelliğine neden olmaktadır.

Matris reçine ile nano malzeme arasındaki zayıf homojen dağılım ve arayüz özelliği, nano dolgu elemanlarının bu güçlendirme etkisini sınırlamaktadır. Zayıf van der Waals bağlarının

varlığı, homojen dağılımı engelleyen ve nanotüpler arasında topaklaşmayı (aglomerasyon) sağlayan hususlardan biridir. Hem homojen dağılımın sağlanması ve hem de arayüzün kuvvetlendirilmesinde yüzey kimyasının değiştirilmesi (fonksiyonelleştirme), benimsenen bir uygulamadır. Matris ile parçacıklar arasındaki ara yüz ilişkisine bağlı olarak ya fiziksel ya da kimyasal fonksiyonelleştirme uygulanabilmektedir. İkisi arasında kimyasal fonksiyonelleştirme, genellikle çözücü yardımıyla gerçekleştirilmektedir.

Zayıf van der Waals bağları, mekanik kilitlenme ve kovalent bağlar, polimer matristen karbon nanotüplere yük iletiminde önemli rol oynayan potansiyel mekanizmalardır. Bu üçü içerisinde, ilk ikisinin yük iletimine katkısı sınırlıdır. Fakat, birçok araştırma, matris ile karbon nanotüp dış yüzeyindeki fonksiyonel gruplar arasındaki kovalent bağların yük iletiminde asıl önemli değişken olduğunu belirtmektedir [5-7]. Polimer matris ile karbon nanotüpler arasındaki kovalent bağları artırmak için, nanotüplerin daha öncesinde çeşitli kimyasallar yardımıyla yüzey işlemlerine tabi tutulması gerekmektedir. Saflaştırma adı verilen sürecin ilk adımında, karbon nanotüplerin kuvvetli asit ya da bazlar vasıtasıyla yüzeylerinin oksidasyona uğratarak değiştirilmesi amaçlanır. Saflaştırma işlemi iki kademe gerçekleştirilir: Öncelikle, karbon nanotüplerin üretiminden gelen metalik katalist artıkların yüzeyden uzaklaştırılması ve bunların yerine oksijen içeren karboksil ve hidroksil fonksiyonel gruplarının oluşturulması hedeflenir. Bu fonksiyonel gruplar, daha sonra yerine getirilecek olan kimyasal yüzey değişim sürecinde oluşacak kovalent bağların bir yarısını oluşturacak reaktif kısımlardır. Bu saflaştırma işleminden sonra, karbon nanotüplerin çeşitli fonksiyonel grupları içeren kimyasallarla işleme tabi tutulması gerekecektir. Bu yüzey değiştiricilerin hangisinin kullanılacağı, polimer matrisin tipine göre belirlenmektedir.

Saflaştırma işleminde elde edilen karboksil ve hidroksil fonksiyonel grupların kovalent bağları, bu tüplerin matris içinde homojen dağılımını ve yük dağılımını iyileştirmektedir. Ancak, saflaştırma işlemi, karbon nanotüpün mükemmel kristalin yapısına zarar vererek kusurlar oluşturur. Bu zarar, karbon nanotüpün kompozit yapıya vereceği olumlu mekanik katkıyı da azaltır. Dolayısıyla, karbon nanotüpün ilk hâli ile yüzey fonksiyonelleştirme işlemi arasında bir dengenin kurulması ve uygun yüzey fonksiyonelleştirme sürecinin yer alması gerekmektedir. Bu denge, ancak, saflandırmada kullanılacak ortam cinsi ve süresinin en ideal şartlarda sağlanması ile elde edilebilir.

Karbon nanotüplerin yüzey fonksiyonelleştirmesinde kullanılan amin temelli kimyasallar, bu tüplerle epoksi arasında arayüz bağlantılarının gelişiminde etkin bir ortam sağlamaktadır. Zira, yapı içindeki aminin bir ucu karbon nanotüpün yüzeyi ile bağlantı kurarken, diğer uç epoksi reçine ile reaksiyona girer. Amin, aynı zamanda, epoksinin kürlenmesini hem hızlandırır ve hem de artırır [7]. Yüzey aktif maddeleri, karbon nanotüplerin topaklaşmalarını önleyerek epoksi reçine içinde homojen dağılımlarını sağlar. Bu homojenite, kompozit yapı içinde hem elektriksel iletkenliğinin kesintiye uğramasını önler ve hem de mekanik özelliklerin iyileşmesine katkı sağlar [8].

Nano-parçacıklar dışında, kompozit yapı içine nano-elyafların katılması da, yapının mekanik özelliklerini etkileyen bir başka husustur [12, 20–24]. İster parçacık olsun, ister elyaf olsun, bir yapının nano ölçeğe getirilmesi, o yapının yüzey alanını artırdığı gibi, içereceği olası kusurların da azaltılmasına katkı sunar. Bu katkılar, matris içine katılacak olan nano boyuttaki elyaflar, kompozit yapının tabakalar arası kırılma tokluğunda kendisini daha çok göstermektedir [6-11]. Yapılan bir çalışmada, elektro-eğirme yöntemi vasıtasıyla üretilen poliaakrilonitril (PAN) nano elyafları karbon/epoksi kompozit yapı içinde kullanılarak, malzemenin mekanik özelliklerinin daha da iyileştirilmesi hedeflenmişlerdir [9]. PAN nano elyafları seçilmesinin nedeni, bu polimerin sünek yapıda olması ve matris olarak kullanılan epoksi reçineye çok iyi bağlanabilmesinden kaynaklanmıştır [9-10]. Epoksi reçinenin kendisi ya da sertleştiricisinin, PAN nano elyafların çözünmesine etki etmediği belirtilmiştir [12].

Nano elyafların dağınık yönde bulunmalarının, yönlendirilmiş elyaf tabakasına göre, Tip-I yükleme şartına daha olumlu etkin sonuç verdiği ve yönlendirilmiş nano elyafların ise Tip-II yükleme şartında kendilerini gösterdikleri tespit edilmiştir [25]. Bu durum, rastgele yönlerde dağılım sergilemiş nano elyafların daha fazla yüzey pürüzlülüğü sergilemesinden ve komşu karbon ya da cam elyaf tabakalar ile daha iyi birleşme (adhesion) sağlamalarından kaynaklanmaktadır.

Tabakalı kompozit malzemelerde kullanılan cam ya da karbon elyaf kumaşlar, kumaşların düzleminde üstün mekanik özelliklerin sağlanmasını sağlarken, iki kumaş arasındaki kısımlarda doğal olarak matris bu özellikleri sağlamaya çalışmaktadır ve ilkinde göre düşük kalmaktadır. Bu durum, kompozit yapılarda tabakalar arası çatlak oluşumu (delamination)

probleminin doğmasına neden olmaktadır. Yapılan bir çalışmada, tabakalı epoksi kompozit yapının her bir tabakası arasına 1, 2 ve 3 g m⁻² yoğunluklu PAN nano elyaf tabakalar yerleştirilerek, tabakalar arası Tip-I kırılma testi gerçekleştirilmiştir. Bunlar arasında, 2 g m⁻² yoğunluklu nano elyaf tabakanın saf epoksiye göre en yüksek artışı (%127) sağlayarak, matrisin tabakalar arası kırılma tokluğunu artırdığı, fakat bu yoğunluğun üzerindeki değerlere sahip nano elyaf tabakaların yeteri kadar matris tarafından ıslanamadığı için bu artışın düştüğü ve %55 seviyelerine gerilediği tespit edilmiştir [26].

Bu tezin amacı, korozif ortamda bulunan ve dinamik olarak çalışan nano elyaf ve nano parçacık ile takviye edilmiş E-cam/epoksi kompozit malzemenin yorulma dayanımını ve kırılma tokluğunu tespit etmektir. Çalışma, gerek bileşen ve gerekse de uygulanan kimyasal ölçütlerin etkilerinin tek tek ve birlikte ele alınarak değerlendirilmesi açısından önemlidir. Yorulma analizine giden bu çalışma sürecinde, kıyaslanmanın yapıldığı numune niteliğindeki katkısız E-cam/epoksi kompozit malzemeye, nano parçacık ve nano elyaf takviyesi yapılarak ara ürün numuneler üretilmiştir.

Nano parçacık olarak, epoksi matrisin ağırlıkça %0,1 oranında çok cidarlı karbon nanotüp kullanılmıştır. Karbon nanotübün epoksi matris içinde homojen dağılımının sağlanması için, katyonik yüzey aktif maddesi (CetylPyridinium Chloride) kullanılmıştır. Homojen dağılımı sağlanan karbon nanotüp, numunelere yüzeyi fonksiyonelleştirilmiş ve fonksiyonelleştirilmemiş şekilde eklenerek, yüzey fonksiyonelleştirmenin kırılma dayanımı ve tokluğuna etkisi görülmek istenmiştir. Yüzey fonksiyonelleştirmede uygulanan ilk işlem, karbon nanotübün kutupsuz (neutral) durumdaki yüzeylerini değiştirmek ve yüzeylerinde bulunan katalitik artıkları azaltmak için asit banyosuna dahil etmek olmuştur. Asit banyosu olarak, ağırlıkça 1:1 oranında sülfürik asit/nitrik asit karışımı kullanılmıştır. Asit banyosundan çıkartılan karbon nanotüpler saf suyla normalize edilerek heksametilendiamin banyosuna dahil edilmiş ve kimyasal olarak fonksiyonelleştirme tamamlanmıştır.

Yorulma analizine girecek olan nanokompozit malzemenin simetri katında (sekiz kat cam elyaf tabakanın dördüncü ve beşinci katları arasında) nano elyaf tabaka bulunmaktadır. Yorulma analizi öncesinde, nano elyaf tabakaların malzemenin çekme, eğme ve tabakalar arası ayrılmaya etkisi görülmek istenmiş ve çekme, eğme ve tabakalar arası kırılma enerjisinin ölçülmesi için mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Poliakrilonitrilden elektro-

eğirme yöntemiyle üretilen nano elyaf tabakalar, çekme ve eğme testleri için her bir ana elyaf tabaka arasına yerleştirilmiş, tabakalar arası kırılma enerjisindeki etkisinin görülmesi için de, malzemenin sadece simetri katına yerleştirilmiştir. Korozif ortama konulan ve yorulma testine maruz bırakılan numuneler için ön bilgiyi oluşturan bu mekanik testler vasıtasıyla, nano elyafın yapıya kazandırdığı ya da kaybettirdiği özellikler görülmeye çalışılmıştır.

Ana elyaf vazifesi gören cam elyafların epoksi matris ile arayüzünün kuvvetlendirilmesi amacıyla silan kimyasalı (γ -Glycidoxypropyltrimethoxysilane) kullanılmıştır. Silanla işlem görmüş numunelerde nano elyaf, karbon nanotüp ve her iki takviyenin de birlikte kullanıldığı numuneler üretilerek, her bir değişkenin tek tek ve birlikte etkisi gözlemlenmiştir.

Tüm ara test çalışmalarından sonra, cam elyafları silan kimyasalı ile işlem görmüş, aynı zamanda yüzeyi fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp içeren ve kayma gerilmesinin en yoğun yaşandığı simetri katında nano elyaf tabaka içeren nihai numunenin aynı anda hem korozif ortamda bulunması ve hem de yorulma analizine tabi tutulması, mevcut şartlarda mümkün olmamıştır. Fakat, yakın sonucun elde edilmesi ya da malzemenin korozyonlu yorulma özelliği hakkında bilgi edinilmesi kapsamında, numuneler ilk aşamada korozif ortamda bekletilmiş, ardından yorulma testine geçilmiştir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bilinmektedir ki, asidik ortamlardan ziyade, bazik ortamların polimerik kompozit malzemelere etkisi daha fazladır. Dolayısıyla, korozif ortam olarak, %10 derişimdeki sodyum hidroksit (NaOH) seçilmiş ve üretilen numuneler 1, 2, 3 ve 4 hafta süreyle ortamda bekletilmiştir. Korozif ortamda bekletilen numuneler daha sonra yorulma testine tabi tutulmuştur.

Tezin ilk bölümünde, kompozit malzemeler hakkında genel bilgi verilmiştir. Bu kısımda kompozit malzemede elyaf çeşitleri ve özellikleri, elyaf yönlerinin mekanik değerlere etkisi ele alınmıştır. İkinci bölümde, nano parçacık ve nano elyafların kompozit malzemelere sağladığı faydalar ve zayıf yönlerine değinilmiştir. Nano parçacıkların homojen dağılımında kullanılan yüzey aktif maddesinin özellikleri incelenmiştir. Üçüncü bölümde, kırılma mekaniğinin temel kavram ve yöntemlerine değinilmiştir. Çeşitli çatlak uzunluk oranlarına sahip çekme ve eğme numunelerinde kırılma dayanım ve tokluk değerlerinin tespit edilmesi, kontrollü çatlak uzunluklarının hesaplanmasına değinilmiştir. Dördüncü bölümde, polimerik kompozit malzemelerin korozyon ve yorulma konusu ele alınmıştır. Beşinci bölümde,

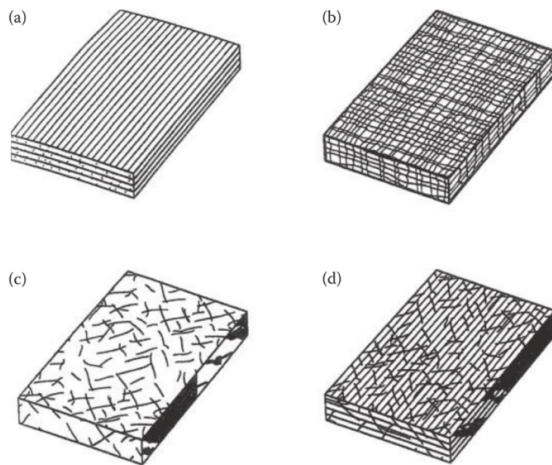
numunelerin üretim sürecine, kullanılan malzemelere ve prosedürlere değinilmiştir. Bu bölümde, ayrıca, korozif ortamın özelliğine ve gerçekleştirilen mekanik testlere yer verilmiştir. Altıncı bölümde, ara ve nihai ürünlerin (numunelerin) test sonuçları irdelenmiştir. Yedinci bölüm ise, tüm değerlerin birlikte ele alınarak değerlendirildiği ve sonuca varıldığı bölümdür.



2. NANOKOMPOZİT MALZEMELER

Eski zamanlarda insanların kilden yapılmış ve samanla güçlendirilmiş tuğlaları kullanmaları, kompozit uygulamalarının ilk örneği olarak düşünülmektedir. Bu ilk kompozit örneğinin bileşenleri olan kil ve saman, işlevlerini birlikte yerine getirmişlerdir. Bu konudaki bir sav, samanın, kilin çatlamasını önlediğini belirtirken, farklı bir sav ise, samanın, kuru kildeki keskin çatlakları körelttiğini öne sürmüştür. M.Ö. 1500’lerde, antik Mısır’da ise, evlerin duvarlarında tabakalı (laminat) ahşaba yapıştırılmış ve bambu ile güçlendirilmiş çamurun kullanılması, kompozitlerin tarihsel örneklerinden bir başkasıdır. Modern kompozitler ise, 20. Yüzyılın başında kendisini göstermiş, cam elyafı ile güçlendirilmiş reçinelerin kullanılmasıyla deniz botlarının ve hava araçlarının imalatı gerçekleştirilmeye başlanmıştır. 1970’li yıllardan itibaren hem matris ve hem de güçlendirme elemanı çeşitliliği artış göstermiş, güçlendirme elemanı olarak boron, karbon ve Aramid kullanılırken, matris olarak seramik ve metaller de ortaya çıkmıştır [27–34].

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla bileşenin birbiri içinde erimeden makroskopik ölçüde birleştirilip bileşenlerinden daha farklı mekanik özelliklere sahip malzemedir. Bu bileşen cinslerinden birisi güçlendirme elemanı iken, diğeri de, bu güçlendirme elemanlarının içine gömüldüğü matris yapıdır. Güçlendirme elemanı, genellikle elyaf, parçacık ya da pulcuk şeklinde iken, matris, sürekli bir bileşendir. Şekil 2.1’de, elyaf tipine göre çeşitlendirilmiş şematik kompozit yapılar görünmektedir.



Şekil 2.1. Elyafle güçlendirilmiş kompozit çeşitleri, a) tek yönlü ve kesiksiz elyaf, b) örgü tipi elyaf kumaşlı, c) kesikli elyaf, d) hibrid elyaf [35]

İleri düzeyde geliştirilmiş kompozitler genellikle havacılık ve uzay sanayinde kullanılmaktadır. Alüminyum ya da epoksi gibi matris içinde, yüksek dayanıma fakat aynı zamanda çok düşük çap değerine sahip grafit, Kevlar ya da boron gibi güçlendirme elemanlarından oluşturulur. Bu kompozit yapılar, gün geçtikçe ticari amaçlar için de kullanılmaya başlamıştır.

Monolitik metaller ve alaşımları, günümüzün gelişmiş teknolojilerinin gereksinimlerini karşılayamaz durumuna gelmiştir. Bu ihtiyacın karşılanabilmesi için, malzemenin birden fazla karakteristik değerlere sahip olması, bir başka ifade ile, birden fazla değişik özellikteki bileşenleri içermesi gerekir. Örneğin, uzaya gönderilen uyduların dış gövdelerinde kullanılan malzemelerin -160 ila 93,3°C aralığında değişen sıcaklık farkında boyutsal kararlılığını koruması gerekir. Dolayısıyla, bu malzemelerin ısıl genleşme katsayısının sınırının düşük olması gerekmektedir. Monolitik malzemeler bu gereksinimleri karşılamaktan uzaktır ve grafit/epoksi gibi kompozit malzemelere yerini bırakması gerekmektedir. Çoğu durumda, kompozitler, monolitiklere göre çok daha verimlidirler. Örneğin, rekabetin yüksek olduğu havacılık alanında, bir imalâtçı, hava aracının bileşenlerinin rijitliğini ve dayanımını düşürmeden ağırlığını azaltmak ve pazardan kendisine daha fazla yer açmak isteyecektir. Bu durumda, bu imalâtçının deneyeceği tek opsiyon, kompozit malzemeler olacaktır. Kompozit malzemenin daha yüksek maliyetini, montajı meydana getiren bileşenlerin sayısının azalması ve hafiflik unsuru karşılayacak ve belki de daha yararlı bir durumu ortaya koyacaktır. 450 gram değerinde hafifleme, bir ticari hava aracının yıllık yakıt sarfiyatında 1 360 litre tasarruf sağlayacaktır. Bu tasarruf, ticari hava aracının toplam operasyon maliyetinin %25'ini yakıt giderlerinin oluşturduğu göz önüne alınırsa, daha anlamlı hâle gelecektir [34].

Kompozitlerin konvansiyonel malzemelere göre avantajlı olduğu detaylara göz atılırsa, bunların, dayanım, rijitlik, yorulma dayanımı, darbe direnci, ısıl iletkenlik ve korozyon direnci olduğu görülmektedir. Birim yoğunluk başına düşen elastisite modülü (özgül modül) ve birim yoğunluk başına düşen kopma dayanımı (özgül dayanım) değerleri açısından irdeleme yapıldığında, kompozit malzemelerin monolitik malzemelere göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Örneğin, grafit/epoksi kompozit malzemenin dayanım değeri, çeliğin değeri ile aynı olmasına rağmen, yoğunluğu üçte bir oranında olduğu için, kompozitin özgül dayanımı üç kat daha fazladır.

Kompozit malzemelerin monolitik malzemelere üstün taraflarının yanısıra, bazı sınırlamaları da söz konusudur. Bunların başında, kompozit malzemenin birim maliyetinin yüksekliği gelmektedir. Süreç ve üretim tekniklerinin geliştirilmesiyle, gelecekte çok daha rekabetçi maliyet değerlerinin söz konusu olacağı aşikardır. Bir diğer husus, monolitik malzemelere göre çok daha fazla ve karmaşık mekanik karakterizasyona sahip olmalarıdır.

Metallerle kıyaslandığında, kompozitler izotropik yapıda değildir. Yani, malzeme özellikleri her yönde aynı değildir. Bu durum, çok daha fazla malzeme değişkenini göz önünde bulundurmaya beraberinde getirmektedir. Örneğin, tek tabakalı grafit/epoksi kompozit malzemenin mekanik analizi için dokuz adet rijitlik (stiffness) ve dayanım (strength) sabitine ihtiyaç vardır (Eş. 2.1). σ , gerilmeyi, ε şekil değiştirmeyi ve C ise, rijitliğin tersi bir kavram olan esnekliği (compliance) belirtmektedir. Buna karşılık olarak, çelik gibi monolitik bir malzemenin mekanik analizi için dört adet rijitlik ve dayanım sabitine ihtiyaç duyulur. Bu durum da, doğal olarak, kompozit malzemelerin mekanik analizinde harcanan bilgisayar yazılım emeğinin artmasına, hesabın daha karışık ve yoğun olmasına neden olmaktadır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{22} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & \textit{simetri} & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

Kompozit malzemelerin tamiratı da, monolitik malzemelere göre daha zordur. Bazı durumlarda, tespit edilemeyen kritik kusur ve çatlakların bünye içinde kalması söz konusu olabilmektedir.

Kompozitlerin yüksek dayanım sergilemelerinde baş rol oynayan ana unsurlardan bir tanesi, tabakalarda kullanılan elyafların çok düşük çap değerlerine sahip olmasıdır. Normal şartlarda, bir malzemenin fiili dayanım değeri, teorik değerinin çok altında yer alır. Aradaki fark, malzemenin iç kusurlarından kaynaklanır. Bu kusurların ortadan kaldırılması, aradaki farkın kapanmasını sağlar. Elyafın çap değeri küçüldükçe, malzeme içinde yer alacak iç kusurların bulunma ihtimali düşer. Çelik bir plakanın dayanım değeri 690 MPa değerinde

iken, aynı malzemededen yapılmış bir telin dayanım değeri 4100 MPa değerine kadar çıkabilir [34].

Çok daha yüksek süneklik ve tokluk değerine ulaşmak ve matristen elyafa çok daha iyi yük iletiminin sağlanması için, kompozit malzemeler, matris ile elyaflar arasında yüksek yüzey alanına ihtiyaç duyulur. Aynı elyaf hacim oranında, elyaf çap değerinin düşmesi, ters orantılı olarak yüzey alanının artışı getirecektir.

Elyafaların, kompozit yapının mekanik özelliklerini etkileyen dört ana değişkeni bulunmaktadır. Bunlar, uzunluk, biçim ve malzemedir. Kompozit yapıda elyafların uzun ya da kısa olması mümkündür. Uzun elyafların yapıda yerleşimi ve süreci, kısa elyaflara göre çok daha kolaydır. Kısa elyafların istenilen dizilime getirilmesi çok daha zordur. Uzun elyaflar, malzemenin özellikle çarpma direncinin artmasında, büzülmenin daha az olması, daha temiz yüzey elde edilmesi ve boyutsal kararlılığın sağlanmasında sunduğu üstünlükler vardır. Buna karşın, kısa elyaflar, çok daha ucuz olmaları, çalışılmasının çok daha kolay olması gibi üstünlükleri vardır. Kısa elyaflar, aynı zamanda çok daha az kusur barındırır ve bundan dolayı daha yüksek dayanım sunarlar.

Sadece bir yönde dizilmiş olan elyafların bu yönde çok yüksek rijitlik ve dayanım sundukları bilinmektedir. Eğer, elyaflar çok daha fazla yönde yerleştirilirse, elyafların sahip oldukları tüm yönlerde yüksek rijitlik ve dayanım elde edilecektir. Aynı elyaf hacim oranında, elyafların tümününün bir yönde dizildiği yerleşime göre, dağınık yönlerde dizilen elyaflara sahip kompozit yapının bu yöndeki rijitlik ve dayanım değeri düşecek ve tüm yönlerde eşite yakın bir değer aralığına sahip olacaktır.

Elyafaların kesiti genellikle daire şeklindedir. Bunun nedeni, üretimlerinin bu hâlde daha kolay olmasından kaynaklanır. Fakat, altıgen ve köşeli keside sahip elyaflar da mümkündür. Bu kesitlere sahip olacak elyafların aralarındaki boşluk daha az olacaktır. Fakat, bu durum, elyafların işlenmesinin ve üretim sürecinin daha zor olmasını da beraberinde getirecektir.

Elyafaların malzeme çeşidi, kompozit yapının doğrudan mekanik performansını etkileyen bir değişkendir. Elyafardan genellikle, yüksek elastik modülüne ve dayanıma sahip olmaları beklenir. Yaygın olarak kullanılan elyaf malzemeleri grafit, Aramid ve camdır.

Elyaf lar eğer tel halat ya da kablo amacıyla kullanılmıyorsa, bir matrise ihtiyaç duyarlar. Matris, elyaflara imento görevi görür ve birbirlerine bağlamış olur. Aynı zamanda, elyafları dış ortama karşı korur. Bu dış ortam etkilerinin başlıcaları, mekanik harici etki ve korozyondur. Matris, içerdiği elyaflara yk dağıtımı yapan bir dağıtıcı şeklinde görev görür. Belki elyaflara göre çok daha düşük mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen, matris, kompozit yapının mekanik özelliklerini etkiler. Parçanın eksenine dik yöndeki modül değeri (transverse modulus) ve dayanım, basma dayanımı, tabakalar arası kayma dayanımı, ısıl genleşme katsayısı, ısıl direnç ve yorulma dayanımı, matrisin doğrudan yapıda etkilediği hususlardır.

Bir kompozit yapıda elyaf ve matris kadar önemli olan ve yapının mekanik özelliklerini etkileyen bir başka husus, elyaf ile matris arasındaki arayüz bağlantısıdır. Genellikle birden fazla çeşitte bağlantının meydana geldiği arayüzde kimyasal, mekanik ve reaksiyon bağlantı, ne çıkan bağlantı şeklidir. Elyaf ların matrise bağlantısı kendi doğal özellikleriyle gerçekleşebilir. Fakat, elyaf ile matris ikilisi açısından arada ıslatma yetersizliği (hydrofobic) bir durum varsa, yani bir bir başka ifade ile yüzey ıslatma gerilimi yüksekse, yapışma ya da bağlanma durumu gerçekleşmeyecektir. Bu durumda, arayüz bağlantı kimyasalının (coupling agent) kullanılması ve kimyasal bağın meydana getirilmesi zorunlu olacaktır. Elyafın yüzeyindeki doğal ya da yapay dalgalanma ya da pürüzlülük, matris ile mekanik bağı meydana getirir. Eğer, matrisin ısıl genleşme katsayısı daha yüksek ise, matris, elyaf den daha fazla bzlmeye uğrayacaktır. Bu durum da, elyaf çevresinde matrisin basma gerilmesine maruz kalmasına neden olacaktır.

Arayüz reaksiyon bağlantısı, elyaf ile matris atomları ya da moleküllerinin birbirleri içine girmesi (difüzyon) mekanizmasına dayanır. Arayüzde oluşan bu farklı faz yapı (interphase), doğal olarak, elyaf ve matrizen çok daha farklı karaktere sahip olacaktır. Bu arayüz fazı, elyaf ile matris arasında belki bağlantı oluşmasını sağlarken, elyafta mikro çatlakların meydana gelmesine de neden olabilmektedir. Bu mikro çatlaklar, elyafın ve dolayısıyla kompozit yapının mekanik özelliklerini düşürecektir.

Zayıf ya da atlağa sahip arayüzler, kompozitlerde erken hasarların sebebidir. Yapıdaki bu yumuşak karın bölgeleri, sıcak gazlar ya da nem gibi çevresel olumsuz etmenlerin yapıya sirayetine açık kapı bırakacaktır. Matrizen elyafa yk iletiminde gerekli olan kuvvetli

arayüz bağlantısı, seramik matrisli kompozit yapılarda olumsuzluğa yol açabilmektedir. Zayıf arayüz bağlantısı, bu tür yapılarda matris çatlaklarının uç kısımlarının körleşmesine ve yön değiştirmesine katkıda bulunabilmektedir. Monolitik seramiklere göre yaklaşık beş kat daha fazla tokluğun meydana gelmesinin ana nedeni, bu zayıf arayüz bağlantılarıdır.

Kompozitler, içerdiği güçlendirme elemanının şekline göre de sınıflandırılabilir. Bu güçlendirme elemanlarının biçimleri parçacık, pulcuk ya da elyaflar şeklinde olabilir. Kompozit yapıların sınıflandırılması, matrise göre de olabilir ve bu durumda karşımıza çıkan matris çeşitleri polimer, metal, seramik ve karbondur.

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, alaşım ya da seramik tipi matris içine parçacıkların gömülmesinden ibarettir. Bu yapılar, parçacıklar matris içine dağınık şekilde yerleştiği için izotropik sayılırlar. Bu kompozitler, özellikle daha yüksek dayanım ve çalışma sıcaklığı ve oksidasyon direnci açısından üstünlüklere sahiptir. Tipik örnekler vermek gerekirse, lastik içine alüminyum parçacıklarının yerleştirilmesi, alüminyum matris içinde silikon karbid parçacıkları ve çimento, kum ve agreganın birlikte meydana getirdiği beton yapı belirtilebilir.

Pulcuk takviyeli kompozitlerde kullanılan pulcuklar, düzlemsel elemanlardır ve genellikle cam, mika, alüminyum ve gümüş malzemesinden meydana getirilir. Pulcukların kompozit yapıya getirdiği üstünlükler başlıca, tabakalar arası eğme dayanımı, yüksek dayanım ve düşük maliyettir. Zayıf yönü ise, pulcukların dağıtılamaması ve pulcuk olarak kullanılacak malzemelerin sınırlılığıdır.

Elyaf takviyeli kompozitler, kısa veya uzun elyaf güçlendirme elemanlarından meydana getirilir. Karbon ve Aramid gibi elyaflar genellikle anizotropiktir. Matris olarak epoksi, metal (alüminyum) ve seramik kullanılır. Elyaf takviyeli kompozitler tek yönlü (uni-directional) ya da örgü elyaf tabakalardan oluşturulur. Bu tabakalar, birbirleri üzerine değişik açılarda konularak, meydana getirilecek yapının çok yönlü olması sağlanır.

Nanokompozitler, kompoziti oluşturan bileşenlerin boyutlarından en az bir tanesinin 100 nm uzunluk değerinden daha az olduğu kompozit yapılardır. Bu boyuta sahip bir malzemenin özelliği, aynı malzemenin makro ya da mikro halindeki özelliğinden farklıdır ve genellikle

daha iyidir. Daha kötüye giden değişkenler, kompozit yapının tokluk ve çarpma (darbe) dayanımı olabilir ve bu değişkenlerde düşüş görülebilir.

Elyaf takviyeli polimerik kompozit yapılarda cam elyafların kullanılması, daha sık karşılaşılan bir durumdur. Bunun nedeni, yüksek dayanıma sahip olması, düşük maliyet, yüksek kimyasal dayanım ve ısı direnç özelliğinin iyi olmasıdır. Fakat, düşük elastisite modül değerine sahip olması, polimerlere yapışmasının düşük olması, yüksek özgül yerçekim değeri, aşınmaya karşı hassasiyeti ve düşük yorulma dayanımı, zayıf yönünü meydana getiren değişkenlerdir.

Cam elyaflar da değişik özelliklere sahip olarak sınıflandırılmıştır. En fazla kullanılan tipi E-cam ve S-camıdır. E-cam'daki "E", bunun elektriksel amaçlı olarak imâl edildiğini belirtir. Fakat, günümüzde değişik amaçlar için, örneğin, dekorasyon ve yapıların meydana getirilmesinde kullanılmaktadır. S-camındaki "S", daha yüksek oranda silis içerdiğini belirtmekte ve E-cama göre daha yüksek sıcaklığa ve yorulma dayanımına sahip olduğunu belirtmektedir. Daha çok, havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılmaktadır.

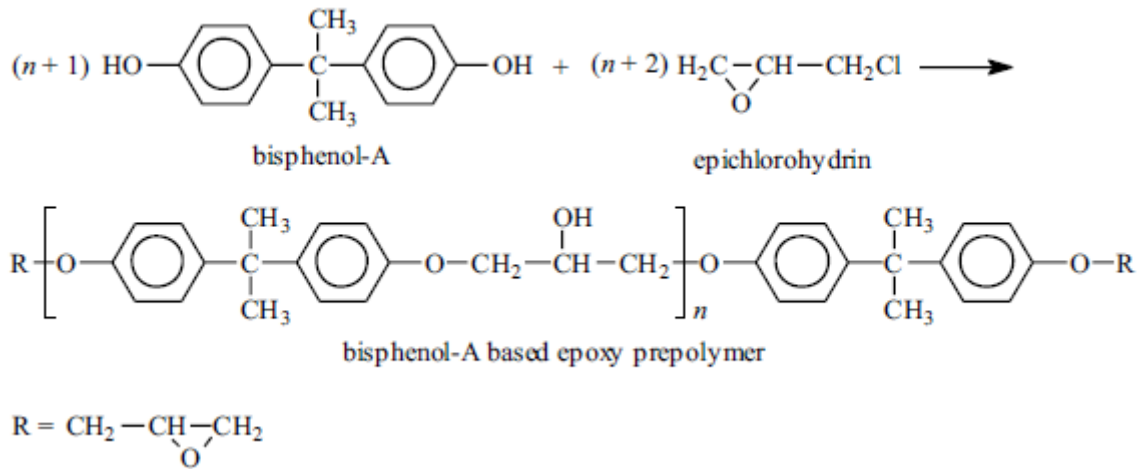
C-camı, cam elyafların bir diğer çeşididir. "C", bu camın korozyona dayanıklı olduğunu belirtmekte ve kimyasal ortamlarda, süreçte kullanılacak örneğin depolama tankın imalâtında kullanılabileceğini belirtmektedir. R-cam ise, konstrüksiyonlarda yapısal elemanlarda kullanılırken, D-camı, hava araçlarının radom bölgesi gibi düşük dielektrik sabitine ihtiyaç duyulan alanlarda, A-camı, yüzey görünüşünün önemli olduğu görsel uygulamalarda tercih edilen çeşitlerdir. E-CR-cam çeşidi, elektriksel ve korozyon direncinin birlikte arandığı uygulamalarda, AR-cam ise, alkali direncinin arandığı yerlerde kullanılmaktadır.

Kompozitlerin polimer matris çeşitlerine bakıldığında, başlıca polyester, fenolik ve epoksiler başlığı altında toplandığı görülmektedir. Polyesterler, düşük maliyet ve şeffalık açısından öne çıkmaktadır. Fakat, 77°C nin altında servis sıcaklığı, kırılma ve yüksek büzülme (kürlenme sırasında %8 oranında) açısından zayıflıklara sahiptir. Fenolikler ise, düşük maliyet ve yüksek mekanik dayanıma sahip olması üstün yönlerini oluştururken, yüksek boşluk oranı bırakması, fenoliklerin zayıf yönünü meydana getirir. Epoksiler ise, yüksek mekanik dayanım ve metal ve camlara karşı yüksek birleşme gücüne sahip olması

üstünlük teşkil ederken, yüksek maliyet ve işleme zorluğu zayıf noktalarıdır.

Görüldüğü gibi, her bir matris malzeme çeşidinin kendine has üstün ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Bunlardan hangisinin seçileceği, uygulama alanına bağlıdır ve bu durum da, kompozit imalatının monolitiklere karşı aslında önemli bir özelliğidir.

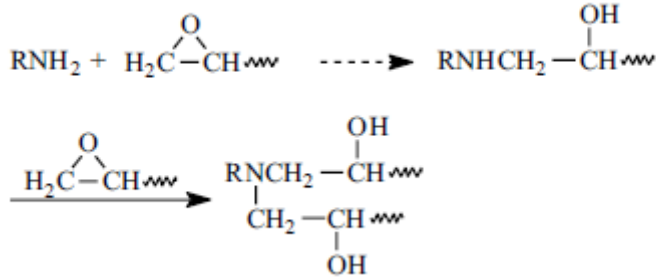
Epoksi reçineler, bunlar arasında en fazla kullanılan reçine tipidir. Epoksiler, aslında, epoksi grupları içeren düşük moleküler ağırlığına sahip sıvılardır. Epoksi grubu, kendi ringi içinde üç adet elemandan oluşur. Bunlar, bir adet oksijen ve iki adet karbon atomudur. Epiklorohidrinin fenollerle ya da aromatik aminlerle reaksiyonu, epoksi dediğimiz matrisi meydana getirir. Epoksinin kürlenmesini sağlayan amin gibi sertleştiriciler, kıvamlaştırıcılar (yağlar) ve dolgular epoksiye eklenerek, değişik uygulamalar için değişik özellikte matrislerin elde edilmesini sağlar (Şekil 2.2 ve 2.3).



Şekil 2.2. Bisfenol-A ve epiklorohidrininden meydana gelen epoksi ön-polimer [36]

Epoksiler, diğerlerinden daha pahalı olmasına rağmen, çok daha fazla oranda kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılan polimer matrislerin üçte ikisinden fazlası epoksi temellidir. Bunun nedenlerinden başlıcaları, yüksek dayanım, düşük akış oranlarıdır. Özellikle düşük akış oranı, elyafların tam olarak ıslanmasını sağlarken, aynı zamanda elyafların açısız yönlerini ve konumlarını bozmamasını sağlar. Diğer tercih nedenleri, kürlenme sırasında düşük gazlaşma ve düşük büzülme oranlarıdır. Düşük büzülme oranı, yapının kürlenme sonrasında iç gerilimlerinin çok daha az olmasını sağlar ve önemli bir özelliktir. Ayrıca, birçok uygulama alanına, sahip olduğu en az 20 değişik türüyle cevap

verebilmektedir.



Şekil 2.3. Epoksi ön-polimerin amin ile reaksiyona girerek kürlenmesi [36]

Termoset polimerler, zincirleri güçlü kovalent bağlarla bağlı olduğu için, kürlendikten sonra çözülmezler ve şekil verilemezler. Buna karşın, termoplastikler, zayıf van der Waals bağlarıyla bağlı oldukları için yüksek sıcaklık ve basınç altında tekrar değişik formlara sahip olabilirler. Termosetlere örnek verildiğinde, epoksiler, polyesterler, fenolikler ve polyamidler öne çıkar. Termoplastikler için de, polietilen, polistirenler, polyeter-eterketonlar (PEEK) ve polifenilen sülfatlar (PPS) örnek verilebilir [37].

2.1. Karbon Nanotüplerin Fonksiyonelleştirilmesi

Karbon nanotüpler, yüzeylerindeki düşük miktardaki kusurlardan ve fonksiyonel kimyasal gruplardan dolayı, kimyasal olarak kutupsuz (neutral) durumdadır. Polimer matris içine katılan bu nanotüplerin, matris içindeki dağılımı zayıf kalır ve aynı zamanda matris ile arayüzünde zayıf bir bağlantı meydana gelir. Bu durum, bazı durumlarda, kompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerinin zayıflamasına neden olur. Karbon nanotüpün bireysel bazdaki faydalarını kompozit yapıya yani bileşkeye yansıtabilmek için, yüzeylerinin matrisle bağlayıcılık özelliğinin geliştirilmesi gerekir [38-44]. Bu değişiklik, nanotüplerin yüzeylerindeki kusurların ve fonksiyonel grupların sayısının artırılması ile ilgilidir [45]. Karbon nanotüpün yüzey kimyasının değiştirilmesi, bu nanotüplere dayalı olan kompozit yapının özelliklerinin değişmesine neden olacaktır [46-47].

Karbon nanotüpün yüzeyinde, kendi üretim sürecinden gelen ve bir takım artıklardan oluşan safsızlıklar bulunur. Yüzeyde kimyasal fonksiyonelleştirme işlemi meydana getirilmeden önce, bu safsızlıkların giderilmesi gerekir [48]. Karbon nanotüpün yüzey işlemi iki adımdan oluşur. Bunlar, saflaştırma (oksidasyon) ve kimyasal olarak yüzeyin

fonksiyonelleştirilmesidir.

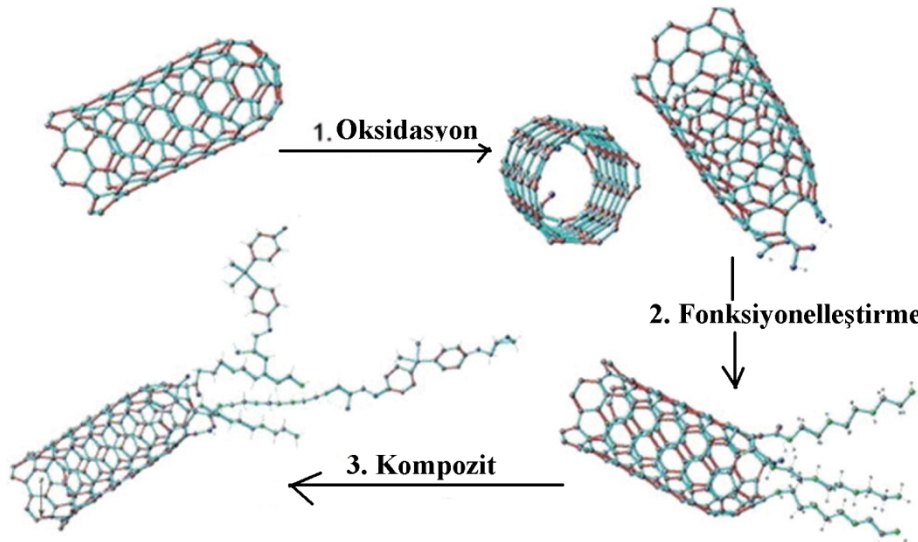
Karbon nanotüp dış cidarı yüzeyinde karboksil ve hidroksil gruplarının oluşturulması için oksitleyici asit ya da baz karışımlarının kullanılması gerekir. Bu fonksiyonel gruplar, esterifikasyon, amidasyon ya da asit-baz kimyası yoluyla yapıya eklenir. Kovalent bağ yapısına sahip olmayan yüzey değişimi, yüzey aktif maddelerinin kullanılmasıyla karbon nanotüp yüzeyine uygulanır. Yüzey aktif maddesi, karbon nanotüplerin cidar yapısına zarar vermez fakat her bir nanotüpe aynı elektriksel kutup yoluyla zayıf bağlarla bağlanarak, tüplerin birbirlerinden ayrışmasını ve matris içinde homojen dağılımına yardımcı olur.

2.2. Karbon Nanotüplerin Saflaştırılması

Karbon nanotüplerin asit ya da bazlarla işleminin gerçekleştirilerek bu nanotüplerin yüzeylerindeki sentezleme aşamasından kaynaklanan amorf, mikro-kristalin karbon safsızlıklarının giderilmesi ve aynı zamanda karboksil ve hidroksil grupların oluşturulması işlemi, saflaştırma olarak adlandırılır [49-50]. Karbon nanotüplerin asit ve baz karışımlarıyla saflaştırma işleminde nitrik asit (HNO_3), sülfürik asit (H_2SO_4), hidroklorik asit (HCl), potasyum hidroksit (KOH), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve amonyum hidroksit (NH_4OH) kullanılır.

Karbon nanotüplerin kimyasal oksidasyon süreci iki adımdan oluşur. İlk adımda, oksidan, nanotüp cidarında kusur oluşturulurken elektrolitik reaksiyonlar yoluyla grafen yapıya sirayet eder ve cidarda hidroksil gibi aktif bölgelerin meydana gelmesi sağlanır (Şekil 2.4). Bu adımın başarısı, oksidanın hidroksil gruplar oluşturabilme ve bunları da karboksil gruplara dönüştürme yeteneğine bağlıdır. Bu adım sırasında, karbon nanotüpün grafen cidarı hasara uğrar. Sürecin ikinci adımı, karbon nanotüplerin elektronik ve mekanik özelliklerinin değişimiyle ilgilidir. Dolayısıyla, saflaştırmada kullanılan kimyasal ortam, süresi, ortam şartları ve uygulanan yöntem, hem nanotüplerin üzerindeki safsızlıkların ortadan kaldırılması ve hem de nanotüplerin grafen cidarına istenilenin üzerinde hasarın verdirilmemesi amacıyla uygun olarak optimize edilmelidir. Çünkü, bu hasarın durumu, meydana getirilecek nanokompozitin elektriksel ve mekanik özelliklerinin doğrudan etkilenmesine neden olacaktır. Karbon nanotüp dolgulu kompozitin elektriksel direnci, nanotüplerin sahip olacağı hidroksil ve karboksil grupların varlığıyla meydana gelen

polaritesinin artmasıyla artış gösterecektir. Asit karışımı içine daldırılan karbon nanotüplerin bu ortamda bulunma süresi ve sıcaklığının artması, elektriksel iletkenliğin azalmasına neden olacaktır. Ama, normalde elektriksel açıdan kutupsuz vaziyette bulunan karbon nanotüplerin asit karışımıyla muamelesi, polimer kompozite vereceği güçlendirme katsayısını artıracaktır [50-51].



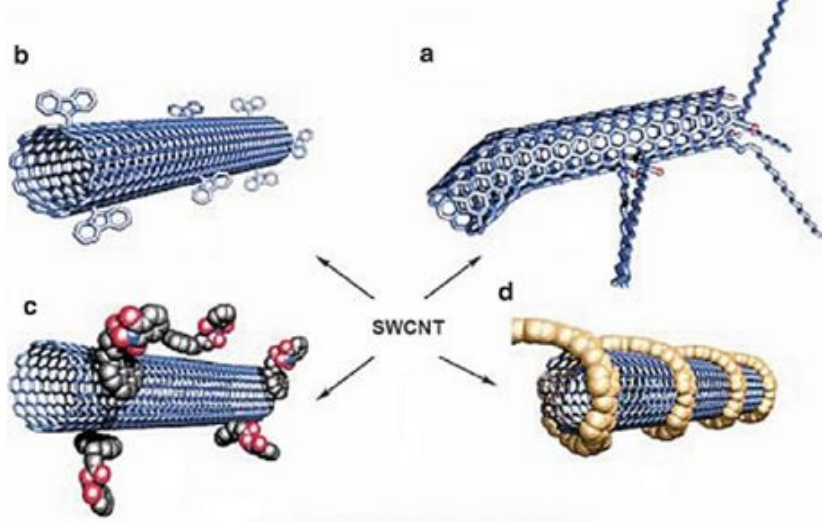
Şekil 2.4. KNT'nin fonksiyonelleştirme süreci [50]

2.3. Karbon Nanotüplerin Kimyasallarla Yüzey Kimyasının Değiştirilmesi

Karbon nanotüplerin cidar yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi, nanotüplerin cidar dış yüzeyleriyle kovalent ve kovalent olmayan bağlarla bağ kuran düşük moleküllü kimyasallar vasıtasıyla yerine getirilmektedir (Şekil 2.5). Bunlar, genellikle, silan, fonksiyonel aminler, vinil monomerler, polimerik ve oligomerik malzemelerdir. Okside edilmiş karbon nanotüp yüzeyinde kovalent bağ teşkili, esterleştirme ya da amidleştirme yoluyla gerçekleşir [52]. Zayıf van der Waals bağlarına dayalı olan kovalent olmayan bağ yapısı, termodinamik ölçütlerle kontrol edilebilmektedir ve yüzey aktif maddeleri bu noktada rol oynamaktadır [53].

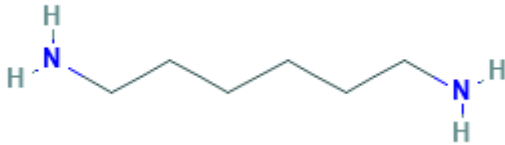
Fonksiyonelleştirme kimyasalının oksitlenmiş karbon nanotüp üzerinde kovalent bağı teşkil ettiği sırada, nanotüp üzerinde, oksitleme sürecinde oluşmuş olan karboksil gruplar, fonksiyonelleştirme kimyasalının reaksiyon gruplarıyla reaksiyona girer [54]. Böylece, karbon nanotüp ile fonksiyonelleştirme kimyasalı olarak kullanılan amid ya da ester arasında bir köprü (bağ) kurulmuş olur. Nanotüplerin cidar iç yüzeyinde ise, oksitlemenin getirdiği

kusur bölgelerinde kovalent bağlar oluşur.



Şekil 2.5. Karbon nanotüplerin fonksiyonelleştirme yolları: (a) oksitleme, (b) amin-ester ile, (c) yüzey aktif maddesiyle, (d) polimerle [55]

Kompozit yapıda matris olarak epoksi (DGEBA) nın kullanıldığı bu tezin numune üretim aşamasında, oksitlenmiş karbon nanotüplerin yüzeyinde kovalent bağ teşkilinde, heksametilen diamin (HMDA) kullanılmıştır (Şekil 2.6). Hekzametilen diaminin özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

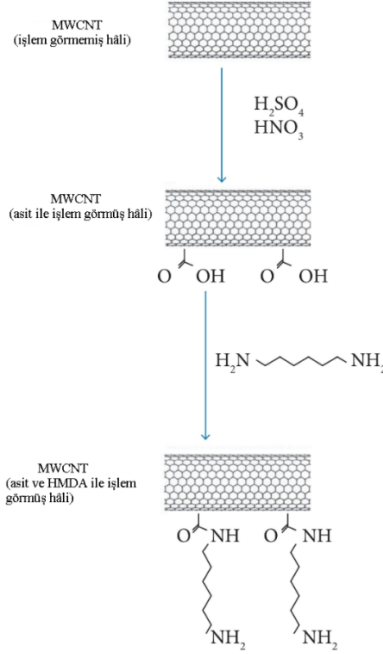


Şekil 2.6. Hekzametilen diamin kimyasal yapısı [56]

Çizelge 2.1. Hekzametilen diamin fiziksel ve kimyasal özellikleri [56]

IUPAC adı:	Hexane-1,6-diamine (1,6-Diaminohexane, 1,6-Hexanediamine)
CAS numarası	124-09-4
Moleküler formülü	C ₆ H ₁₆ N ₂
Moleküler ağırlık	116,20 g mol ⁻¹
Görünüş	Renksiz kristaller
Yoğunluk	0,84 g/mL
Erime noktası	39-42°C
Kaynama noktası	205°C

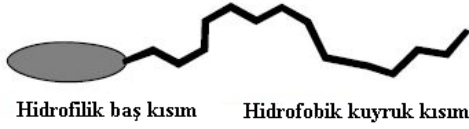
Hekzametilen diamin (HMDA), $H_2N(CH_2)_6NH_2$ formülasyonuna sahip organik bir bileşiktir (Şekil 2.7). Hekzametilen zinciri ihtiva eden ve amin fonksiyonel grupla bu zincirin sonlandığı diamin molekülüdür. Bu renksiz katı bileşiklerin kuvvetli amin kokusu vardır. HMDA, sahip olduğu ikili fonksiyonel yapısı sayesinde, özellikle naylon 66 gibi polimerlerin üretiminde kullanılmaktadır [57].



Şekil 2.7. Karbon nanotüp yüzey işleme süreçleri [57]

2.4. Karbon Nanotüplerin Yüzey Aktif Maddesi ile Fonksiyonelleştirilmesi

Yüzey aktif maddeleri, bir sıvının yüzey gerilimini düşürerek, içine daldırılan parçacıkların ıslanmasını sağlayan ıslatma kimyasallarıdır. Bu tanımda geçen katı-sıvı ikilisi haricinde, katı-buhar, sıvı-sıvı, sıvı-buhar gibi ikili durumların arayüzlerinde de görevlerini gerçekleştirebilirler. Yüzey aktif maddesi molekülleri, su ilgisi yüksek (hidrofilik) yapıdaki bir baş ve bir de düşük (hidrofobik) yapıdaki kuyruk kısmından oluşur. Hidrofobik kısım, dallanmış ya da lineer yapıda olabilir (Şekil 2.8). Hidrofilik baş kısmı, parçacıkların alkil zincirinin sonuna bağlanarak, homojen dağılımın gerçekleşmesini sağlar. Alkil zincirin dallanma derecesi, polar grupların konumu ve zincirin uzunluğu, yüzey aktif maddelerinin özelliğini etkileyen hususlardır [58].



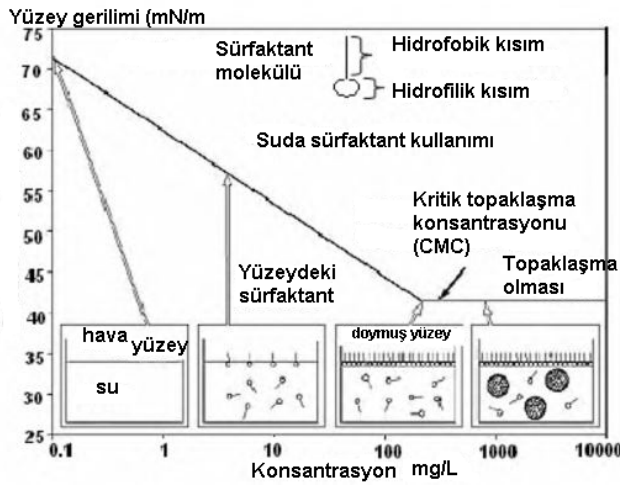
Şekil 2.8.Yüzey aktif maddesişematik görünümü [58]

Karbon nanotüp içeren polimerik kompozit malzemelerde yüzey aktif maddesi kullanımının iki amacı bulunmaktadır. Birincisi, karbon nanotüp ile polimerik matris arasındaki yüzey gerilimini düşürerek bu nanotüplerin iyi ıslanmasını sağlamak, ikincisi de, zayıf van der Waals bağlarını yenerek topaklaşmayı önlemek ve nanotüplerin matris içinde homojen dağılımını sağlamaktır. Bir kompozitte kullanılacak yüzey aktif maddesinin seçiminde, yüzey aktif maddesinin baş kısmının elektro-statik yükü, baş kısmının büyük ya da küçük olması, yüzey aktif maddesinin alkil zincir uzunluğu ve yüzey aktif maddesi yapıda bulunan benzen ringinin varlığı önem taşır. Yüzey aktif maddesinin baş kısmının küçük ve kuyruk kısmının uzun olması, sırasıyla, yüzey aktif maddesinin parçacık yüzeyine tutunması açısından ve karbon nanotübün yüzey aktif maddesinin kuyruğu ile sarılması açısından tercih edilir [58].

Yüzey aktif maddeleri, baş kısımlarındaki elektrik yüklerine göre sınıflandırılırlar. Baş kısım iyonik de olabilir, iyonik olmayabilir de. İyonik baş kısımlar da, anyonik ya da katyonik olabilir. İyonik yüzey aktif maddesinin kuyruk kısımları su itici (hidrofobik) yapıda (alkil kuyruk) olur ve karbon nanotüplerin çeper yüzeylerine bağlanırlar. Bağlanan yüzey aktif maddesinin baş kısımları da, aynı elektriksel kutba sahip olacakları için, birbirlerini itecekler ve karbon nanotüpler arasında topaklaşmaya neden olan zayıf van der Waals bağlarını yeneceklerdir. İyonik olmayan yüzey aktif maddelerinde ise, tersi bir durum gözlenerek, baş kısımlarından karbon nanotüp çeperine bağlanmaya çalışacak, kuyruk kısmı ile polimer matris- nanotüp arasındaki bağı güçlendireceklerdir. Bu durum da, nano parçacıkların arasındaki çekim potansiyelinin düşmesini sağlar [53, 58–61].

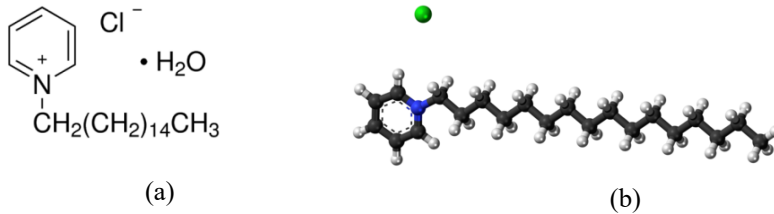
Yüzey aktif maddesi miktarı ile ilgili derişim üst sınırı (critical micelle concentration-CMC) önemli hususlardan bir tanesidir (Şekil 2.9). Bu derişim seviyesinde, sıvının yüzeyi yüzey aktif maddesi ile doymuş duruma gelmekte ve bu seviyenin üzerinde ise, sıvı içine dağılmış yüzey aktif maddesi moleküllerinin topaklaşması söz konusudur. Yüzey aktif maddesi moleküllerinin su itici kuyruk kısımları, su itici bir yüzeye, örneğin suyun yüzeyinden dışarı doğru yönelirken, su çekiciliğe sahip (hidrofilik) baş kısımları, suyun iç kısmında bulunur.

Sıvı yüzeyinin tamamen dolması sonrasında ise, daha da eklenecek olan yüzey aktif maddesinin molekülleri arasında topaklaşma meydana gelecektir. Kompozit hazırlığı evresinde karbon nanotüp içeren çözücüne eklenecek olan yüzey aktif maddesinin bu kritik derişimin üzerine çıkmaması gerekir [62]. Olması gerekenden çok daha düşük derişim oranında ise, karbon nanotüplerin yüzey aktif maddesi molekülleri ile yeteri kadar kaplanması ve elektro-statik itme kuvvetlerinin oluşması gerçekleşmez.



Şekil 2.9. Yüzey aktif maddesi kritik topaklaşma derişimi (CMC) şematik gösterimi [50]

Bu çalışmada, kationik yüzey aktif maddesi ailesinden Cetylpyridinium Chloride (CPC) kullanılmıştır (Şekil 2.10). CPC kationik yüzey aktif maddesine uygun çözücü olarak, etil alkol seçilmiştir.

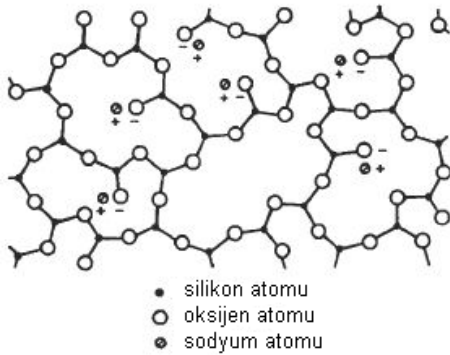


Şekil 2.10. a) CetylPyridinium Chloride (CPC) kimyasal gösterimi, b) üç boyutlu şematik gösterimi [63]

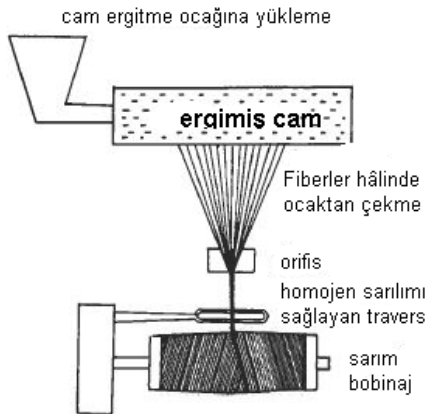
2.5. Cam Elyafının Yapısı ve Özelliği

Elyafı imâl etmek için değişik kimyasal kompozisyona sahip mineral camlar kullanılır [64]. En yaygın kullanılan elyaf, kalsiyum, sodyum ve magnezyum oksit ilaveli ve silika (SO₂) temelli olanlardır. Sodyum silikat camın silikon atomu çevresinde kovalent bağlarla bağlanmış oksijen atomlarından oluşan polihedron ağ yapısı aşağıdaki şekilde şematik

olarak gösterilmiştir (Şekil 2.11). Dikkat edilirse, sodyum iyonları ağ yapısına bağlanmamıştır fakat sadece oksijen atomlarıyla iyonik bağ oluşturmuştur. Cam elyafların, camın bu üç-boyutlu yapısıyla, seramik ve organik yapıdaki elyafların aksine izotropik yapıda olduğu belirtilir. Cam elyaflar, sürekli haldeki filament ya da kesikli (staple) hâlde üretildiği süreci vardır. Filament hâlde üretilen cam elyaflar, erimiş hâldeki camın, istenilen sürekli elyaf (filament) çapına göre çapı ayarlanan küçük orifis açıklıklarından çekilerek üretilmesi söz konusudur (Şekil 2.12). Filament çapının ayarlanmasında orifisten çekme hızı ve erimiş hâldeki camın viskozitesi değişkenleri de etkilidir.



Şekil 2.11. Sodyum silikat camın silikon atomu çevresinde kovalent bağlarla bağlanmış oksijen atomlarından oluşan polihedron ağ yapısı [65]



Şekil 2.12. Ergimiş hâldeki camın, istenilen filament çapına göre çapı ayarlanan küçük orifis açıklıklarından çekilerek üretilmesi [65]

En fazla kullanılan cam elyaf kombinasyonlarının kimyasal kompozisyon dağılımı Çizelge 2.2'de, mekanik özellikleri Çizelge 2.3'de belirtilmiştir.

Çizelge 2.2. Yüzde ağırlık olarak cam çeşitlerinin kimyasal element dağılımı [65]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O, K ₂ O	Ba ₂ O ₃	BaO
E-camı	52,4	14,4	17,2	4,6	0,8	10,6	
C-camı	64,4	4,1	13,4	3,3	9,6	4,7	0,9
S-camı	64,4	25,0		10,3	0,3		

Çizelge 2.3. Elyaf camların mekanik özellikleri [65]

Özellik	E-cam	S-camı
Çap (µm)	5-25	5-15
Yoğunluk (g/cm ³)	2,54	2,49
Çekme dayanımı (GPa)	2,4	4,5
Kopma elastikiyeti (%)	3-4	5,4
Elastisite Modülü (GPa)	72,4	85
Isıl genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ /K)	5,0	5,6

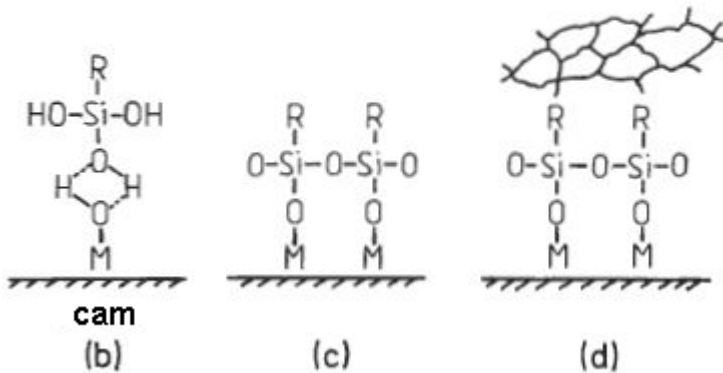
2.6. Cam Elyafların Silan ile Fonksiyonelleştirilmesi

Cam-epoksi kompozit malzemelerin özgül dayanım-ağırlık oranları göz önüne alındığında ve alüminyum veya çeliğe kıyaslandığında, kompozitlerin dayanım değerinin yüksek olduğu görülür. Fakat, neme uzun süre maruz kalan kompozitler, dayanımlarının büyük bir oranını yitirirler. Bu dayanım kaybı, suyun araya girmesiyle, reçinenin, hidrofilik camdan ayrılmasından kaynaklanır. Birbirine benzemeyen iki malzeme arasında, özellikle kompozitler düşünüldüğünde, organik reçine ile mineral cam arasında suya dayanıklı arayüzey bağlantısı oluşmaz [64].

Birbirine benzemeyen iki malzeme arasında bir bağlama ajanının kullanılması kavramı, aslında Plato'nun, evrenin dört elementten (toprak, hava, su ve ateş) oluşarak homojen bir yapıyı meydana getirmesi ile açıklanmıştır: "İki şeyin birleşerek homojen bir yapıyı meydana getirmesi, üçüncüsü olmadan mümkün değildir. Zira, bu iki şeyi birbirine bağlamak gerekmektedir. Bu üçüncü de, ikisinin ortasıdır. Birinciden sona doğru bir bağın

gerçekleşebilmesi için, ortanın, hem birinci ve hem de sonuncu malzemenin özelliklerine sahip olması gerekir. Böylece, tümü bir yapıyı meydana getirir” [64].

Silan kimyasalları, cam elyaflar gibi inorganik yüzeylerin epoksi reçine gibi organik matrislerle arayüzlerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılırlar. Bu bağ kurulumunda meydana gelen mekanizmaların açıklanması amacıyla birçok teori ortaya konulmuştur. Bunlar arasında en fazla kabul edilen teori, kimyasal bağ teorisidir. Bu teori, inorganik yüzey ile reçinenin organik yüzeyi arasındaki kimyasal reaktivite kavramına dayanır. Bu teoride, ikili fonksiyon yapabilme yeteneğine sahip silan molekülleri, cam elyafın yüzeyi ile siloksan köprü kurarak bağlantıyı sağlarken, silan molekülünün organo-fonksiyonel grubu ise, reçine ile bağ oluşturur. Cam ile polimer arasında bu şekilde meydana gelen kovalent bağlar, moleküler sürekliliğini sağlar. Silan kimyasalının hem polimerle ve hem de cam yüzey ile reaksiyona giren genel kimyasal formülasyonu X_3Si-R şeklindedir. R, reçine ile reaksiyona giren grubu temsil ederken, X ise, silanın sulu çözeltisinde hidrolize olarak silanol grubunu oluşturur ve cam yüzeydeki hidroksil grupla reaksiyona girer. R-grubu vinil, γ -aminopropil, γ -metakriloksipropil vb. olabilir. X-grubu ise kloro, metoksi, etoksi vb. çeşitte olabilir. Trihidroksisilanol ($Si(OH)_3$), cam yüzeydeki suyla uyumlu olup, bu yüzeydeki hidroksil gruplarla hidrojen bağı oluşturmak için uygundur. Şekil.13’de görülen M, Si, Fe ve/veya Al’yi temsil etmektedir.

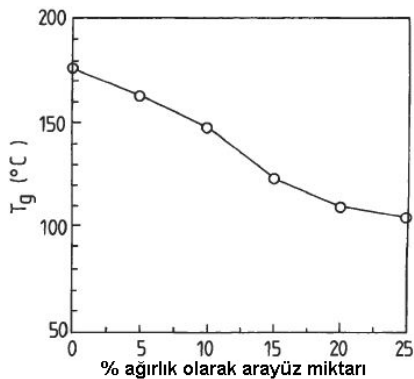


Şekil 2.13. Silan kimyasalının fonksiyonu, (a) silanol oluşması, (b) cam yüzey ile silanol arasında hidrojen bağlarının oluşması, (c) cam yüzeye bağlanmış polisiloksan, (d) polimerle reaksiyona girmiş organofonksiyonel R-grup [65]

Organo-fonksiyonel grubun tipi ve sulu çözeltinin pH değeri, solüsyondaki silanın

karakteristiğinde etkili olan değişkenlerdir. Silanla işlem gören cam elyaflar kurutulduğunda, elyaf yüzeyinde silanol ve M-OH grupları arasında tersinir yoğunlaşma meydana gelir ve elyaf yüzeyinde cam yüzeyle bağ kuran polisiloksan tabakası oluşur. Dolayısıyla, silanla işlem görmüş cam elyaflar kürlenmemiş reçineyle temas ettiğinde, elyaf yüzeyindeki R-grupları, polimerin epoksi, amin, metakrilat ve stiren gibi fonksiyonel gruplarıyla reaksiyona girerek kontrollü kovalent bağlar oluşturur. Her iki taraftaki grupların birbirlerine uyumlu olması önemlidir.

Cam elyafla matris arasında kurulan bu bağlara rağmen, arayüzde oluşan bu üçüncü yapının matrisle ayrışan bir takım özelliklere sahip olması sürpriz değildir. Arayüz katmanı ile matris arasındaki mekanik özellikler irdelendiğinde, arayüz malzemesinin daha düşük camsı geçiş sıcaklığına, daha yüksek modül ve çekme dayanım değerlerine ve matrise göre daha düşük kırılma tokluğuna sahip olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.14, epoksi matrisin olduğu kompozit yapıda, arayüzde bulunan bağlama ajanının miktarının artmasıyla camsı geçiş sıcaklığındaki monotonik azalmayı belirten grafiği göstermektedir. Bu grafik, arayüzdeki silan ve diğer girdilerin, yapının bu bölgesinde üç boyutlu çapraz bağların yoğunluğunu düşürdüğünü göstermektedir. Silan kimyasalı içeren ve epoksiye uyumlu kimyasallarla işlem gören elyafları içeren epoksi kompozit yapı, işlem görmemiş kompozit yapılara göre, boyuna ve enine yönde hem eğme dayanımı ve hem de tabakalar arası kırılma enerjisi açısından daha yüksek değerlere sahiptir. Ancak, kırılma arayüz malzemesi, kopmuş elyaf ucu yanındaki matris çatlaklarını artırdığı da bilinmektedir.



Şekil 2.14. Arayüzde bulunan bağlama kimyasalının miktarının artmasıyla camsı geçiş sıcaklığındaki monotonik azalmayı belirten grafik [65]

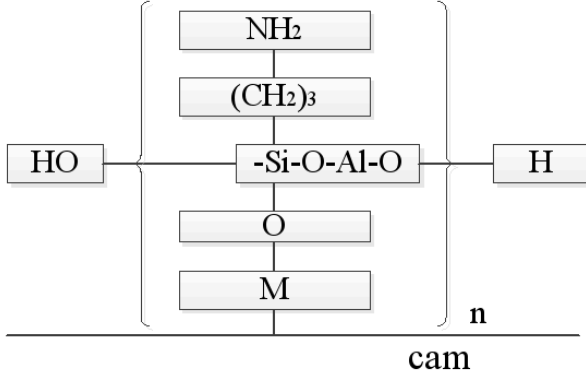
Kırılma arayüz malzemesinin, kopmuş elyaf ucu yanındaki matris çatlaklarını artırmasının tersi durumuyla da karşılaşılmıştır. Polyester reçinedeki büyük miktardaki siloksanın (Y-

MPS) varlığı, arayüz malzemesinin modül değeri ve basma dayanımını düşürürken, bu arayüz malzemesinin kırılma tokluğunu artırmıştır. Bu farklı durum, normalde kırılğan yapıya sahip reçinenin silan ile kırılğanlığının azalması ve matrise göre arayüz malzemesinin daha az kırılğan ve yumuşak bir yapıya sahip olmasını sağlar. Sonuç olarak, elyafın yüzeyinde oluşan kimyasal tabaka dolayısıyla, elyafın matristen sıyrılması rahatlayacak ve matris içinden ayrılma kuvveti düşecektir. Dolayısıyla, arayüzün matristen daha kırılğan ya da daha yumuşak olması, kompozit malzemenin mekanik dayanımı ve yapısal kararlılığı açısından önemli bir detay olarak belirlemektedir.

Kimyasal reaksiyondan farklı olarak, cam elyafların silanla yüzey işlemlerinin yapılmasında önemli bir değişken de, oluşan bu bağların suya dayanıklı karakterde olmasıdır. Yüzeyi işlenmemiş cam elyafların reçine matris ile arayüz bağlantılarında suyun yarattığı tahribat çok daha fazladır. Suyun küçük hacimdeki moleküllerinin bu bölgeye ulaşması, reçine matrisin bünyesindeki çatlaklar ve boşluklardan olabileceği gibi, elyaflar boyunca da gerçekleşebilmektedir. Cam üzerinde rastgele yerleşmiş olan Fe_2O_3 , SiO_2 ve Al_2O_3 gibi oksit grupları, hidroksil grup olarak suyu çekerler. Çekilen bu su, bu oksitlerle zayıf bir hidrojen bağ oluşturur. Diğer oksitler de aynı zamanda suyu bünyesine alır ve arayüzde meydana gelmiş olan birleşimi (adezyonu) yıkararak varolan fiziksel bağları hidrolize eder. Bu durum da, kompozit yapının mekanik zaafiyet kaynağı olur. Cam elyaflar hidrolize olmuş silan solüsyonu ile işlem gördüğünde, elyaf yüzeyinde silan katmanları oluşur. Katmanların kalınlığı ve dizilimi, cam yüzeyin topolojisine, çözeltilinin derişimine ve işlem süresi gibi değişkenlere bağlıdır.

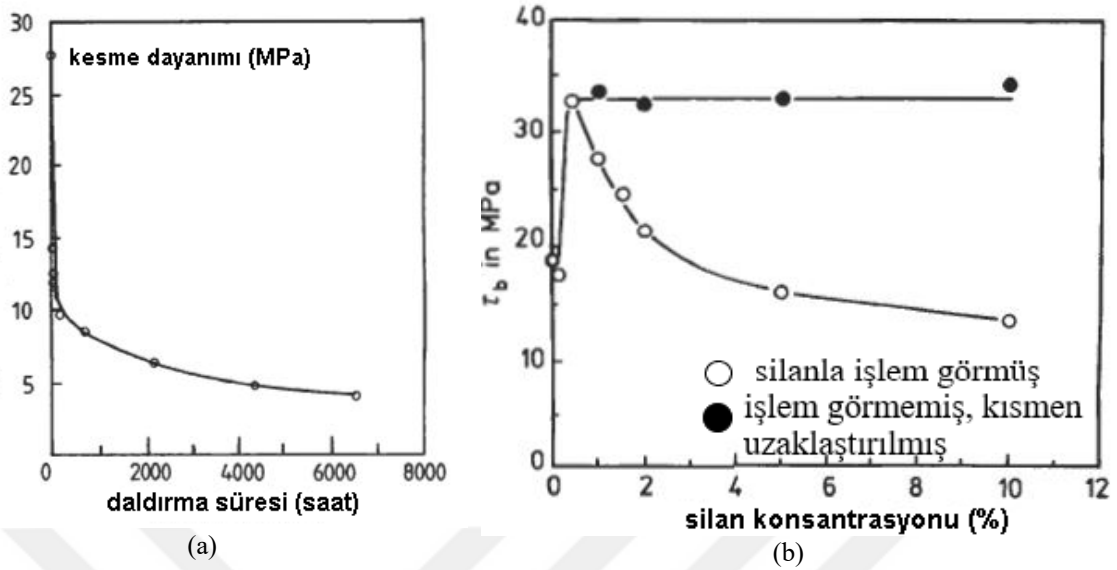
Cam elyaf üzerinde başlıca üç silan tabakasının meydana geldiği belirtilir [65]. En dışta, yani, matrise bakan yüzeyde bulunan fiziko-absorbsiyon bölgesi, zayıf oligomerik siloksanol tabakasıdır. Kolaylıkla hidrolize olur ve oda sıcaklığındaki su ile ayrışabilir. Ortada bulunan kimyasal-absorbsiyon bölgesi ise, uzun süre kaynayan su ile ayrışma gösterebilir. Daha yüksek oligomerik siloksanollardan oluşan bu tabaka, hidrolizasyona karşı daha iyi direnci vardır. En içteki kimyasal olarak reaksiyona girmiş tabaka ise, sıcak suya karşı dirençlidir. İç yapısında üç-boyutlu siloksan çapraz bağların bulunduğu bu tabakada bu bağ yoğunluğu en fazla cam yüzey üzerinde vardır. Şekil 2.15, sıcak su ile ayrışma hidrolizi sonrası cam yüzeyde kalan silan yapısını şematik olarak göstermektedir. Silanla işlem görmüş cam elyafların matrisle arasındaki arayüzde en fazla iş gören kısım, en

içteki kısımdır. Bu kısım, sadece su atağına karşı bir bariyer sağlamaz, aynı zamanda arayüzde meydana gelmiş tahribatın, yüksek sıcaklıkta kurutulması vesilesiyle bir dereceye kadar tekrar onarılmasını da sağlar.



Şekil 2.15. Sıcak su ile hidrolizi sonrası cam yüzey üzerinde kalan silanın şematik yapısı [65]

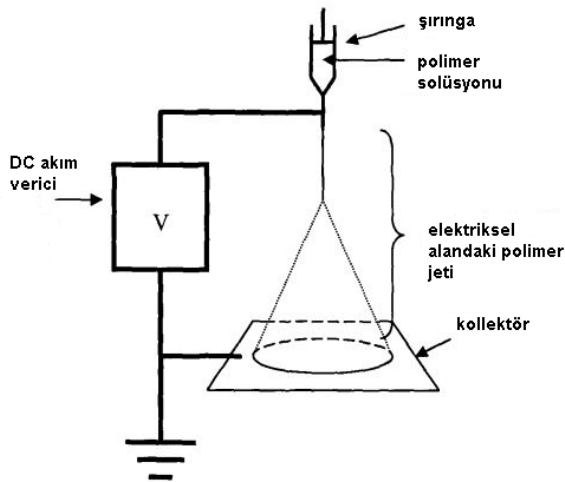
Çok katlı silan katmanının sıcak suda yıkandıktan sonra cam yüzeyinde kalması durumunda, arayüz kesme dayanımının bu sıcak su şartlarında en fazla olacağı belirtilmiştir (Şekil 2.16a) [57]. Diğer taraftan, aynı maruziyete kalmış fakat kuru ortama alınmış arayüzde ise, elyafın matrinden ayrılma kuvveti en fazla olacaktır. Islak ortam ile kuru ortamda, arayüz için gereken silan miktarı farklılık gösterecektir. Kalın silan tabakası, ıslak ortamda olumlu sonuç vermezken, tam aksine, arayüzün bağ dayanımını azaltır. Dolayısıyla, aşırı miktarda bağlama kimyasalının kullanılması etkili değildir. Bu kimyasallar için en uygun derişim oranı belirlenmiştir [66]. Örneğin, cam elyaf-epoksi kompozit malzemenin arayüzünün kesme dayanımının optimize edilebilmesi için, % 0,5 derişimde N-2-aminoethylene-3-aminopropyltrimethoxysilane (AAPS) kimyasalının olması gerektiği belirtilmiştir. Dolayısıyla, kalın silan tabakasının matrisle birleşmeden önce fazlasının alınmasının mekanik performansa etkisi Şekil 2.16b'de gösterilmiştir. Çift kirişli, tabakalar arası en yüksek Tip-I kırılma enerjisi açısından da, silanın derişim miktarı önem arz etmektedir. Aşırı miktardaki söz konusu kimyasal, kontrolsüz çatlak yayılmasına neden olarak, kırılma tokluğunun düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 2.16. (a) Silan uygulanmış E-cam/epoksi tabakalı kompozitin arayüz dayanımının sıcak suya daldırma süresiyle değişimi, (b) diamino-silan çözelti derişiminin kayma dayanımına etkisi [66]

2.7. Elektro-eğirme Yöntemi ve Nano Elyaflar

Elektro-eğirme üretim yöntemi, en basit hâli ile, polimer solüsyonu içeren bir pipetten, iki elektrottan ve kV mertebesinde doğru akım veren bir kaynaktan oluşur (Şekil 2.17). Şırınga ucundan çıkan polimer damlası, yüksek voltajın etkisiyle çekilerek elyaf hâline gelir. Voltaj etkisiyle çekilen polimer damlası, doğal olarak elektriksel olarak yüklenmiştir ve bu yük, yol boyunca polimer jetinin helisel yol almasına neden olur ve jetin (elyafın) çapı gittikçe azalır. Nihayetinde, hedefe ulaşan elyaf, karışık yönlü olarak bu hedef yüzeyde toplanır.

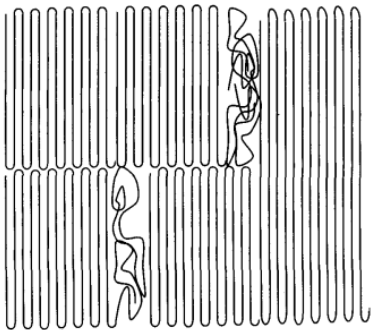


Şekil 2.17. Elektro-eğirme metodunun şematik çizimi [67]

Elektro-eğirme sürecinin önemli hususları şu şekildedir:

- Polimerin çözülmesi için uygun çözücünün kullanılması gerekmektedir.
- Nano elyaf hedef yüzeye ulaştığında, çözücünün elyaf yüzeyinden rahatlıkla uzaklaşması gerekir. Bu çok yavaş olduğunda, üst üste binen nano elyaflar arasında köprü bağları meydana gelir ve ayrıca çözücü uzaklaşamayacağı için kompozit yapıda kullanılması mümkün olmaz. Fakat, çözücünün çok hızlı buharlaşması da, elyafın hedefe ulaşmadan önce, mikron altı ya da nano ölçeğine getirilmesi, yani başarılı çekme işlemi mümkün olmayabilir.
- Çözücünün viskozitesi ve yüzey gerilimi optimum aralıkta olmalıdır. Çok düşük değer, eğirme sırasında polimer ile çözücünün ayrışmasına, çok yüksek değer ise, elyafın şekil almasını güçleştirir.
- Güç kaynağı, polimer solüsyonun nano elyaf formuna ulaşmasını sağlayacak ve viskozite ve yüzey tansiyonu eşiğini geçecek yeterlilikte olmalıdır.
- Şırınga ucu ile topraklanmış hedef yüzey arasındaki mesafe eğer çok kısa olursa, iki kutup arasında atlamalar meydana getirir. Optimum uzunluk, elyaf oluşumu sırasında ve hedef yüzeyde çözücünün elyafden uzaklaştırılabileceği mesafedir.

Polimerlerin bünyesinde genellikle kristalin ve amorf kısımlar bulunur (Şekil 2.18). Bu iki farklı yapının oranı, polimerin özelliğini tayin eder. Eğer bir polimerin lineer moleküllerinin dizilimi tamamen amorf (karışık-düzensiz) yapıda ise, bu polimerin amorf yapıda olduğu belirtilir. Eğer bu molekül zincirleri doğrusal (lineer) yapıda ise, bu molekülün kristalin yapıda olduğu belirtilir. Kristalin yapıdaki bu zincirlerin birbiri üzerine katlandıkları ve amorf yapıdaki kuyruk molekülleri tarafından bu katların tutuldukları belirtilir. Bu katlı yapı bükülerek kurdeleye benzer yapıya sahip olur.



Şekil 2.18. Kısmen kristalin hâldeki polimerin yapısı [67]

Yüksek kristalin yapıya sahip polimerler daha yüksek akma dayanımına, modül değerine ve sertliğe sahip olur. Bu kristalin yapıdaki polimer gerdirildiğinde, polimer zincirleri, gerilme yönünde dizilirler ve kurdele yapıyı bozarlar. Bu polimerler, daha iyi aşınma ve kimyasal dayanıma sahiptir. Fakat, kristalin yapıdaki polimerler daha kırılğandır. Amorf yapıdaki polimerler, görünüş açısından şeffaf olurken, kristalin yapıdaki polimerler daha opaktırlar.

Polimer zincirler, tekrarlayan birimlerden (monomerlerden) meydana geldiği için, polimerin moleküler ağırlığı, bu tekrarlayan monomerlerin ağırlıklarının toplamıdır. Genellikle daha yüksek moleküler ağırlıktaki polimerlerin çözücü çözünme direnci yüksektir.

Camsı geçiş sıcaklığı, polimerlerin önemli bir özelliğidir. Bu sıcaklığın altında moleküller donduğu için, amorf yapıdaki polimerler kırılğandır. Fakat, bu sıcaklığın üzerinde daha yumuşak bir hâle ulaşır ve molekül zincirlerin birbirleri üzerinde kaymasını sağlayacak yeterli ısı enerjisi kavuşmaları sağlanır. Camsı geçiş sıcaklığının üzerinde, amorf yapıdaki polimerlerin doğal olarak elastisite modülleri düşer. Bu sıcaklık değerlerinde, polimerin mekanik davranışı, yükleme oranından etkilenir. Eğer yükleme oranı hızlı olursa, moleküler zincirlerin vereceği tepki için yeterli zaman olmayacak, fakat, bu oran yavaş olursa, tepki için yeterli zaman olacaktır.

Elektro-eğirme yönteminde başarılı bir elyaf ağ yapısının üretilebilmesi için, seçilen polimerin moleküler ağırlığının ve viskozitesinin önemli değişkenler olduğu belirtilmişti. Moleküler ağırlık, polimer solüsyonunun da viskozitesini etkilemektedir. Yüksek moleküler ağırlığa sahip bir polimer çözücü içinde çözdürüldüğünde, viskozitesi, aynı polimerin daha düşük moleküler ağırlığına sahip tipinin aynı derişimdeki solüsyonuna göre daha yüksek viskozite değerine sahip olacaktır. Aşırı moleküler ağırlığa sahip polimerin elektro-eğirme süreci sırasında, şırınga ucundan çıkan solüsyon jeti, hedef yüzeye ulaşırken esneyerek uzayacaktır. Bu uzama sırasında, molekül zincirlerinin birbirlerine dolanmış olması, elektrik yüklü jetin yolda kopmasını önleyecek ve sürekli bir jet akışına sağlayacaktır. Daha yüksek moleküler ağırlık, polimer zincirinin daha yüksek olduğunu temsil etmektedir.

Optimum viskoziteye ulaşmak için uygulanacak bir başka prosedür, polimerin solüsyondaki derişimini artırmaktır. Derişim artışı da, benzer olarak, polimer molekül zincirlerinin yoğunluktan dolayı dolaşıklığının artışı beraberinde getirecek ve kopmadan sürekli bir

elyaf oluşumunu sağlayacaktır. Moleküler ağırlığın ve viskozitenin aşırı derecede yüksek olması ise, elyaf yapılarında boncuklaşma (bead) oluşumuna neden olacaktır. Ayrıca, polimer solüsyonun pompalanması zorlanacak, şırınga ucunda donmalar ile karşılaşılacaktır. Dolayısıyla, en az seviyede moleküler ağırlık ve viskozite teşkili önemli olmaktadır.

Polimer solüsyon jetinin süreç sırasında yüzey gerilimini yenmesi, şeklin düzgünlüğü için gereken bir diğer detaydır. Solüsyonun yüzey geriliminden dolayı dış yapının bozulmaması için, solüsyona etil alkol ya da yüzey aktif maddesi katılması, bu konuda olumluluk sergileyecektir.

Elektro-eğirme sürecinde önemli bir diğer etmen, uygulanan voltajdır. Yüksek voltaj, solüsyonun elektriksel olarak yüklenmesini sağlamakta, solüsyonun yüzey enerji eşiği aşıldıktan sonra, ortamdaki elektriksel alanla beraber eğirme işleminin başlamasını sağlamaktadır. Genellikle, 6 kV'dan daha yüksek voltaj değeri, şırınga ucunda Taylor Konisinin oluşumunu tetiklemektedir. Voltajın yükseltilmesi, polimer jetinin hızını artırmakta ve şırınga ucundan daha büyük hacimde polimer solüsyonunun çekilmesini sağlamaktadır. Bu çekme işlemi, besleme oranından uyumsuz olursa ve çok büyük olursa, Taylor Konisi oluşamayacaktır. Voltajın elyaf morfolojisine etkisi irdelendiğinde, daha yüksek voltaj değerinin elyaf çapını azalttığı ve çözücü buharlaşmasını hızlandırdığı belirtilebilir. Fakat, yüksek voltaj, elyaflarda boncuklaşmaya da neden olmaktadır. Düşük viskoziteli solüsyon kullanıldığında, yüksek voltaj, eğirme işlemi sırasında ikinci jet oluşumuna zemin hazırlar. Bu durum da, elyaf çapının düşmesine neden olur. Jetin şırınga ucu ile topraklanmış hedef yüzey arasındaki uçuş süresi arttığında, elyafların esnemesi ve hedefe ulaşmadan önce daha fazla uzamasına neden olur. Dolayısıyla, daha düşük voltaj düzeyi de, bu sürenin artışına neden olarak, oluşan elyafların çap değerinin düşmesini sağlamaktadır. Bu etkiler göz önüne alınarak, optimum voltaj değerinin ayarlanması, istenilen çap değerine sahip elyaf oluşumu için önemlidir.

Uygulanan voltaj, elyafların sadece fiziksel özelliklerini değil, elyaf hâldeki polimerin molekül zincirlerinin dağılımını da etkilemektedir. Elektriksel alanın bir noktaya kadar artışı, polimerde kristalin yapının oluşmasını sağlarken, daha fazla voltaj artışı, kristalin yapı oluşumu için yeterli süre veremeyecektir.

Elektro-eğirme sürecinde Taylor Konisinin kararlılığının sağlanması için belirli voltaja denk gelen besleme oranı bulunur. Besleme oranı daha da artırıldığında, oluşacak elyafların çap değeri artış gösterecek ve meydana gelecek boncuklaşmaların büyüklüğü artacaktır. Besleme oranının gerekenden fazla olması, polimer jetinde bulunan çözücünün buharlaşması için gereken sürenin fazla olması ihtiyacını beraberinde getirecektir. Hedef yüzeye ulaşan fakat bünyesindeki çözücüyü atabilmek için gereken süreyi bulamayan elyafların birbiri üzerine binmesi, temas noktalarında bir kaynamayı beraberinde getirecektir. Bu da, istenmeyen bir durum olduğu için, gereken en az besleme hızının seçilmesi, sağlıklı nano elyaf oluşumu için gereken değişkendir.

Şırınga iğnesinin delik çapı da, elektro-eğirme sürecine etki eden bir başka etmendir. Küçük iç çap değeri, meydana gelen elyafda boncuklaşma miktarının azalmasında ve iğnenin tıkanmasının önlenmesinde etkilidir. İğnedeki tıkanıklığın çap ile azalmasının nedeni, elektro-eğirme süresince çözeltinin atmosfere daha az maruz kalmasıyla ilgilidir. Ayrıca, küçük iç çap değeriyle çalışılması, elyaf çaplarının da azalmasını sağlamaktadır. Şırınga ucundaki polimerik solüsyonun miktarının azalması, solüsyon damlasının yüzey enerjisinin artmasına, bu durum da, polimer solüsyon jetinin hızının düşmesine neden olacaktır. Bu hız düşüşü, jetin daha fazla esneyip uzamasını sağlayacaktır. Fakat, şırınga iç çap değerinin daha fazla azaltılması, şırınga haznesinden iğneye solüsyon akışını kısacaktır.

Elektriksel alan içerisinde solüsyon jetinin uçuş süresi de, elyafı etkileyen bir başka değişkendir. Şırınga iğne ucu ile hedef yüzey arasındaki mesafenin değiştirilmesi, hem jetin uçuş süresini ve hem de elektriksel alan yoğunluğunu etkileyecektir. Uçuş süresinin üzerinde etkili olduğu en önemli konu, çözücünün buharlaşarak elyaf yapıdan uzaklaşmasıdır. Eğer bu mesafe düşürülürse, solüsyon jeti doğal olarak daha kısa bir yol çizecek, aynı zamanda kutuplar birbirlerine yaklaştırıldığı için elektriksel alan yoğunluğu artacaktır. Bu durum, jetin hızlanmasına neden olacak ve çözücünün buharlaşması için yeterli bir zaman sağlamayacaktır. Eğer mesafe çok kısaltılırsa, kollektör üzerinde birbiri üzerine binen elyaflar arasında, buharlaşmayan çözücü dolayısıyla, temas noktalarında kaynamalar meydana gelecektir. Fakat, ilginç nokta, bu ara noktalardan bağlantılı elyaf ağ yapısı, ek bir dayanımı da beraberinde sağlamasıdır.

Çözeltinin özelliğine bağlı olarak, değişen mesafenin elyaf dış yüzeyi ve iç yapısı üzerinde

etkisi önemli ya da önemsiz olabilir. Bazı durumlarda, mesafenin elyaf çapı üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Fakat, mesafe çok kısa olduğunda, elyaflarda boncuklaşma artar. Boncuklaşma, iki kutup arasındaki elektriksel alan yoğunluğunun arttığına göstergesidir. Dolayısıyla, mesafenin azaltılması ve voltajın artırılması, aynı sonucu (elektriksel alan yoğunluğunun artışı) verecektir ve bu değerlerin yüksekliği, boncuklaşmayı beraberinde getirecektir. Mesafenin artırılması, ortalama elyaf çapını azaltacaktır. Fakat, mesafenin artmasının elyaf çapını artırması sonucunu veren durumlar da söz konusudur. Bu durum, elektriksel alanın zayıf kalması ile ilgili bir durumdur. Elektriksel alanın zayıflığı, çözültiden doğan jetinin yolda iken daha az esnemesine ve uzamasına neden olacaktır. Mesafenin çok fazla olması, kollektör üzerinde elyafların birikmesini de olumsuz etkileyecektir. Dolayısıyla, optimum elektriksel alanın sağlanması gerekmektedir.

Ortamın nemi de, elyaf yüzeyinde etki eden bir başka değişkendir. Genellikle, % 50'nin altındaki nem oranlarında gerçekleştirilen süreçlerde, meydana gelen elyaf yüzeylerinin düz olduğu görülmektedir. Fakat, nem oranı arttıkça, bu yüzeyin değiştiği, kollektöre doğru ilerleyen ve kollektör üzerinde biriken elyafın çözücü buharlaşırken soğuyan yüzeyde yoğunlaşan su buharının yüzeyde birikmesi ve ilave olarak tekrar çözücüyle beraber buharlaşması, elyaf yüzeylerinin pürüzlülüğü olmasına neden olmaktadır. Bu durum, aslında, nano elyafın matris ile arayüz bağlantısını kuvvetlendirmede olumlu olarak etkileyen bir husustur. Çok düşük nem ortamlarında gerçekleştirilen eğirme sürecinde, iğne ucundan çıkan çözültide yüksek derecede çözücü buharlaşması meydana geleceği için, iğnede tıkanmalar yaşanabilmektedir [67].

2.8. Nano elyafların Kompozit Yapıya Getirdiği Mekanik Etki

Eğme test sonuçları, kompozit yapıda ağırlıkça %5 oranında bulunan naylon nano elyafların kırılma dayanımını yaklaşık olarak %36 oranında, eğme modülünü %26 oranında ve kırılma enerjisini %42 oranında artırdığını göstermiştir. Bu artışta, nano elyafla matris arasındaki birleşmenin iyi olması ve bunun sonucu olarak nano elyafın eğme momenti etkisi altında matristen sıyrılma yerine kopmayı yeğlemesinden kaynaklanmaktadır. Fakat, buna rağmen, nano elyaflarla matris arasındaki arayüzün iyileştirilmesine de ihtiyaç vardır.

Nano elyaf tabakaların tabakalar arası Tip-I kırılma enerjisine verdiği katkı birçok

araştırmacı tarafından incelenmiştir [68-77]. Özellikle termoset matrise sahip kompozit malzemelerde tabakalar arası çatlak hızı genellikle yüksektir. 20 katlı tek yönlü karbon/epoksi kompozit yapı üzerinde yapılan bir çalışmada, simetri noktasında, karbon tabakalar arasına polybenzimidazolenano elyaf tabaka yerleştirilerek Tip-I tabakalar arası kırılma testi (DCB) gerçekteştirilmiştir. Nano elyaf çap dağılımı 300-500 nm aralığında olan çalışmada, Tip-I kırılma enerjisinin (G_{IC}) %15 seviyesinde arttığı, Tip-II kırılma enerjisinin (G_{IIC}) % 130 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir [67].



3. KOMPOZİTLERİN YORULMA VE KOROZYON ÖZELLİKLERİ

3.1. Kompozitlerin Yorulma Özellikleri

Bir malzemeye statik dayanım kuvvetinin altında bir kuvvet değeri, periyodik olarak uygulandığında, bu statik dayanımın altındaki kuvvetin belirli bir çevrim süresi sonunda malzemeyi tahribata uğrattığı, tüm malzemelerde karşılaşılan bir gerçektir. Dolayısıyla, malzemenin hayata geçirilmesi aşamasında, statik dayanım değeri yanında, bir ekipmanın malzemesinin karşılaşıacağı periyodik yüklemenin aralığı ve yük değerinin bilinmesi ve yorulma analizinin gerçekleştirilmesi, başta hava araçları olmak üzere, emniyeti ilgilendiren alanlarda bir zorunluluktur.

Tek yönlü kompozit yapıların elyaf yönlerinde uygulanan yorulma yüklemelerine karşı direnci yüksektir. Çünkü, elyafların tamamının yük yönünde olması ve elyafların yorulma dirençlerinin yüksek olması bunda etkilidir. Fakat, çok yönlü, tabakalı kompozit yapıların bir yönde karşılaşıacağı yorulma kuvvetlerinin varlığı, tek yönlü kompozit yapılardan daha farklı bir mekanik davranışın gelişmesine neden olur. Tabakalardan bir kısmı, kuvvet yönünde oryantasyona sahip iken, diğer tabakaların farklı açılarda oryantasyona sahip olması, her bir tabakanın vereceği tepkinin farklı olmasına neden olacaktır. Meydana gelecek tahribat, elyaf-matris arayüzü, matris çatlama, elyaf kopması ve boşluk büyümesi (tabakalar arası ayrılma) gibi şekillerde olabilir. Metallerde tespit edilen çatlak, malzemenin son kırılma anına kadar giden süreçte çok hızlı davranacağı için emniyetli sayılmaz. Kompozit malzemelerde ise, ilk tahribat, yorulma ömrünün ilk başlarında tespit edilebilir. Fakat, kompozitin bileşenlerinin iç içe geçmiş yapısı, bu kusurun ilerlemesine etki eder. Buna rağmen, kritik uygulamalardaki dizayn yükünün, kompozitte herhangi bir hasarı meydana getirecek yük değerinin altında olması önemlidir. Herbir tabakada meydana gelebilecek hasar, genellikle tüm yapının şekil değiştirme (uzama-kısalma) özelliğini düşürür ve yapısal tahribata neden olur. Ancak, bu süreç, kompozit yapının kırılmasından çok daha önce kendisini belli eder. Dolayısıyla, kompozit malzemelerde kırılma probleminin tanımı, uygulamadan uygulamaya değişiklik gösterir. Rijitlikteki değişimin sınırlandığı bir uygulamada, belli bir yüzde oranında meydana gelen rijitlik kaybı, komple hasar kıstasından daha öncelikli bir kıstas hâline gelir. Metallerde ise, bu iki kriter genellikle çakışıktır. Çünkü, metaller, çatlaklar çok yoğun olmadığı sürece, rijitlik değişimini daha az sunma kabiliyetine

sahiptir. Bu nedenlerden dolayı, yorulmaya maruz kalacak kompozit malzemelerin başarılı bir şekilde tasarlanması, metaller için hazırlanan ölçütlerin kullanılıp tahmin edilmesi şeklinde olamaz. Dolayısıyla, kompozit malzemelerin yorulma davranışlarının iyi anlaşılması önemli ve tasarım mühendisine yol gösterici olacaktır.

Yapılan birçok araştırmadan görülmüştür ki, yorulma hasarı, yorulma kuvvetinin uygulandığı yöne dik yöndeki elyafların matristen ayrılması, yani elyaf-matris arayüz bağlarının kaybolması şeklinde başlamaktadır [78-80]. Bunun sebebi, arayüzde meydana gelen büyük gerilmeler ve şekil değiştirme yığılmalarıdır. Bu şekilde ilk çatlak oluşumlarından sonra, çatlaklar, bu elyafların ilerleme yönünde, yani yük yönüne dik olarak, arayüzlerde ilerleyerek tüm en boyunca yayılır. Yük doğrultusuna dik yöndeki çatlaklar, uygulanan yük değerinin, birim tabakanın dayanımını aşması ile meydana gelmekte ve genellikle yük çevriminin ilk aşamalarında oluşmaktadır. Bu yük değeri, tabakalı yapının dayanım değerinin kopma dayanımının yaklaşık %20'sine denk gelmektedir. Yük çevrim sayısının artmasıyla ya da uygulanan gerilme seviyesinin artırılmasıyla bu enine çatlakların sayısında artış yaşanır.

Belli bir düzene sahip olmayan elyaflara sahip kompozitlerde ilk hasar oluşumu da, benzer şekilde başlamaktadır. Kesikli ve belli bir düzene sahip olmadan yerleşmiş elyaf yapısına sahip ince bir kompozit malzemenin çekme testinde, çekme dayanımının yaklaşık %30 unda, hasarın ilk izlenimleri elde edilir. Bu yapıda da ilk hasarlar, kesikli elyafın matrisle arayüz bağının kopması ve açılmal konum olarak, yüklemeye en dik pozisyondaki elyaflarda görülür.

Tabakalı kompozit yapıda, yüklemeye eksenine dik yönde bulunan elyaflara sahip tabakada meydana gelen çatlaklar, bitişik kattaki tabakaya sirayet etmek isteyecektir. Fakat, bitişikteki tabakanın elyaf yönleri, eğer yüklemeye yönünde ise, bu geçişi tıkayacaktır. Dolayısıyla, çatlak ilerleyişi, birbirine dik yöndeki elyaf yönlerine sahip tabakalar arasında duracaktır. Fakat, çatlak ucu, önünde gerilme yığılmasını meydana getirir. Bu yığılma nedeniyle, çatlak, bitişik tabakaya geçmektense, iki tabaka arasında kendisine bir yol çizerek, tabakalar arası ayrılma problemini meydana getirecektir. Bu ayrılma, yüklemeye çevrimi arttıkça artış gösterecek ve bir başka problemin tetiklenmesine yol açacaktır. Malzemenin bu safhasında, yüklemeye karşı koyan tabakalar, sadece yük doğrultusunda elyafa sahip tabakalardır ve bu tabakalardaki elyaflarda kopmalarla, matris ile aralarındaki arayüz bağlantısının kaybolması

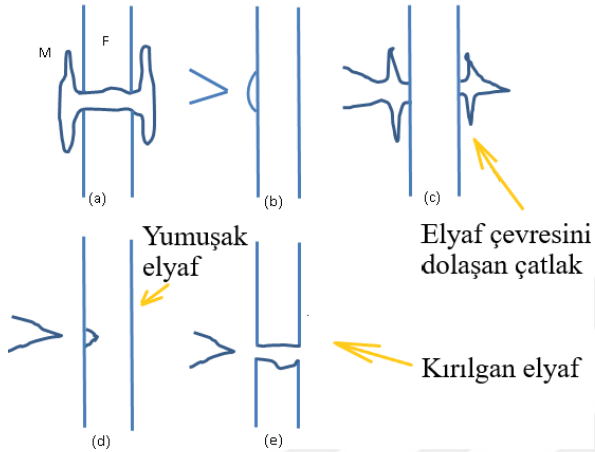
ile karşılaşılacaktır. Yük doğrultusunda bulunan elyaflarda karşılaşılacak kopmalar, dik yöndeki elyafların aksine belli bir düzlemde kırılma yolu seçmezler.

Kompozit yapıda meydana gelen tabakalar arası ayrılma ve sonrasında karşılaşılacak yük doğrultusundaki elyaflardaki kopmalar, yapının nihai olarak kırılmasına doğru götürür. Çünkü, yük yönündeki elyafların kopması, aslında yükü taşıyan bu elyafların yavaş yavaş devre dışı kalmasına neden olmakta ve malzemeyi artık oldukça zayıflatmaktadır. Tabakalar arası çatlakların varlığı, tabakalar arasında yük dağılımını engelleyici bir görev yapmakta ve yapıyı aslında birbirinden bağımsız olarak bir çok alt tabaka şekline büründürmektedir. Yükü birbirinden bağımsız olarak karşılamaya çalışan bu alt tabakalardan öncelikle en zayıf olanı hasara uğramakta, sayısı azalan tabakalar da doğal olarak birbiri ardına hasara uğramaya başlamaktadır. Yorulma testinde karşılaşılacak tabakalar arası ayrılma, yorulma sürecinin (ömrünün) yaklaşık %90 ında devreye girmektedir. Bu tespit de, tabakalar arası ayrılma sonrası yaşanan sürecin ne kadar kısa sürdüğünü belirtmektedir.

Elyaf kopmasından kaynaklanan çatlak oluşumu ve elyaf takviyeli kompozit yapıda çatlakların yayılımı, Şekil 3.1'de şematik olarak belirtilmiştir. Elyaf kopmasından kaynaklanan bir süreksizlik, elyaf-matris arayüzünde yüksek kayma gerilmesinin meydana gelmesine neden olmakta ve çatlağın büyümesi için elverişli bir ortamın doğmasına neden olmaktadır. Arayüz bağının kuvvetli olmasına ve matrisin dayanımına bağlı olarak, çatlak, elyaf-matris arayüzünde ya da bitişik matris bölgesinde büyümeye başlar. Arayüz bağlantısının güçlü olmadığı kompozit yapılarda, arayüzde meydana gelen çekme ayrılması, matriste meydana gelen yorulma çatlağının önünde oluşur [81].

Şekil 3.1a'da görülen çatlak dallanması ve Şekil 3.1b'de görülen çekme ayrılması, çatlaktaki gerilme yığılmasının düşmesine neden olarak, malzemenin yorulma ömrünün artmasını sağlar. İlave olarak, göreceli olarak düşük akma dayanımına sahip matris malzemesinde meydana gelecek plastik şekil değiştirme, çatlak uç gerilimini düşürerek çatlağın körleşmesini sağlar ve ilerlemesini durdurur. Matristeki yorulma çatlağı bir elyafa yaklaştığında, Şekil 3.1c, d ve e'de görüldüğü gibi, genellikle üç çeşit yol izler. Şekil 3.1c'deki gibi, zayıf arayüz bağlantısı ve kuvvetli elyafın olduğu bir ortamda, çatlak elyafa zarar vermeden çevresini dolaşır. Eğer arayüz kuvvetli olursa, çatlak ucundaki yüksek gerilme, elyafı etkiler. Eğer bu elyaf, Şekil 3.1d'de olduğu gibi, esnek yapıya sahip ise, çatlak

ucundaki yüksek gerilmeye karşı hassas olacak, sonuçta da yorulma çatlak hızlı büyüyecektir. Kırılma yapıya sahip elyaf ise, Şekil 3.1e’de olduğu gibi, çatlak ucundaki yüksek gerilme değerlerinden dolayı aniden kırılacaktır. Şekil 3.1d ve e’de gösterilen yorulma çatlak büyüme tipleri, genellikle kompozitlerin zayıf yorulma dayanımını veren kırılma tipleridir.

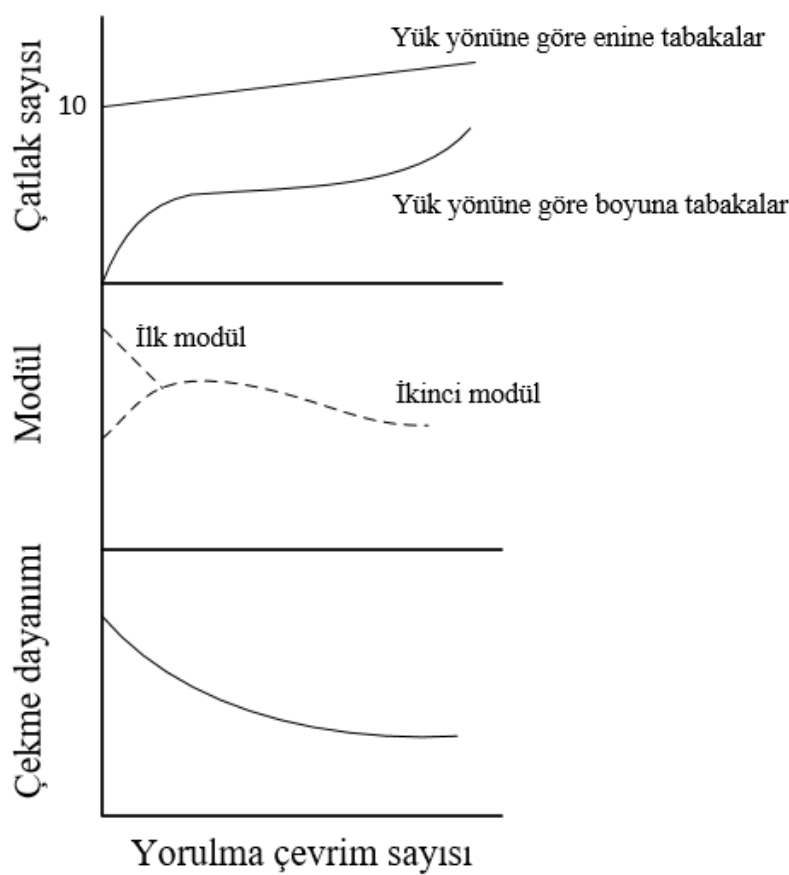


Şekil 3.1. Yorulma çatlak büyüme anları (a) elyaf kopma bölgesinde bulunan çatlak, (b) elyaf arayüz bölgesinde meydana gelen çekme ayrılması, (c) kuvvetli elyafın çevresini dolaşan çatlak, (d) esnek elyafta çatlak büyümesi, (e) kırılma elyafta kırılma [81]

Kompozit yapının iç çatlak oluşumları, yapının rijitliğinin ve dayanımının düşmesine yol açar. Kompozit yapının gerilme-şekil değiştirme grafiği, sahip olduğu iki adet eğim vasıtasıyla, iki adet elastisite modül değeri verir (Şekil 3.2). Testin başlangıcında, yapı, grafikte daha yüksek eğim sunar. Bu durum, yapının çatlak içermemesinden ve bundan dolayı, test yüküne karşı hem yük doğrultusunda ve hem de bu doğrultuya dik eksen boyunca uzanan elyafların birlikte daha yüksek rijitlik sunmasından kaynaklanır. Yük arttıkça, yük doğrultusuna dik yöndeki elyaflarda çatlaklar oluşmaya ve bu doğrultudaki elyafların rijitliği sağlamadaki rollerinin düşmesine yol açar ve rijitlik düşer. Yorulma testinde, yük doğrultusuna dik yöndeki elyafların çatlayıp kopmasıyla ve sonrasında yük doğrultusundaki elyafların kopması ve tabakalar arası çatlakların oluşmasıyla düşme gözlemlenir. Dolayısıyla, yorulmaya maruziyet ile, eğride ikinci eğim devreye girer.

Belli bir gerilme seviyesinde, sayısı artan yorulma yük çevrimine maruz kalan malzemenin statik dayanımında zayıflama meydana gelir. Şekil 3.2’de de görüldüğü üzere, dayanımdaki azalmanın büyük bir oranı, yorulma ömrünün yaklaşık olarak ilk %25’lik diliminde

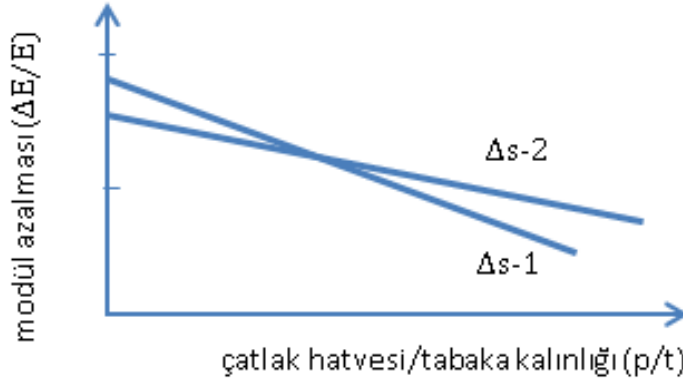
gerçekleşir. Bu dilimden sonra, dayanımdaki düşüşte azalma meydana gelir ve bu düşüş yorulma ömrünün sonuna kadar sürer ve malzemenin taşıyıcılık özelliği kaybolur. İlk dayanım kaybındaki ana neden tekrar hatırlanacak olursa, yük doğrultusuna dik yönde uzanan elyaflardır. İlk %25'lik dilimden sonra ivmesi zayıflayan dayanım kaybındaki nedenler ise, boyuna uzanan elyaflar ve tabakalar arası çatlak oluşumlarıdır. Güçlü elyafların kaybı ile, yorulma ömrünün son birkaç çevriminde hızlı bir kayıp yaşanır. Ömrün sonuna doğru yaşanan bu hızlı dayanım azalmasından önce, yapıyı meydana getiren tabakalar aslında zayıflamıştır. Fakat yapı komple düşünüldüğünde, yapının ortalama dayanımındaki zayıflama yavaştır. İç çatlak hasarının yanında, [0/90] kompozit malzemelerin özellikle frekansı yüksek yorulma testleri sırasında malzemede gözlemlenen sıcaklık yükselmesi de, malzemenin özelliklerinde düşüşü meydana getirdiği bilinmektedir.



Şekil 3.2. Çatlaklardaki artışın [0/90] kompozit malzemede dayanım ve modül ile ilişkisi

Şekil 3.3'de, [0/90] yapısındaki E-cam/epoksi kompozit malzemeler için çatlak yoğunluğu-modül değişimini veren fonksiyon verilmiştir [82]. Bu ilişkide geçen ve yük doğrultusuna

dik yöndeki elyaflara sahip tabakalarda, ardışık çatlaklar arasındaki ortalama mesafe, çatlak hatvesi (crack pitch) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.3. Çatlak hatvesinin fonksiyonu olarak modül kaybı şematik görünümü [81]

Yorulma testlerinin sonuçları, gerilme-yük çevrim sayısı (S-N) grafiği adı verilen ve x -ekseninde malzemenin kopmasına kadar giden yorulma çevrimini logaritmik ölçekte, y -ekseninde ise uygulanan gerilme değerlerini doğrusal ölçekte veren bir grafik yoluyla belirtilir. Yorulma süreci, malzemenin yük taşıma özelliğini kaybetmesine kadar yürütülebileceği gibi, çevrim boyunca malzemedeki rijitlik kaybının ölçümü şeklinde de ele alınabilir. S-N grafiği, metaller, polimerler ve kompozitler, yani tüm malzemeler için doğal olarak eksi eğime sahiptir. Yani, gerilme azaldığı müddetçe, malzemenin yorulma çevrim sayısı ya da ömrü artış gösterir. Eğrinin tam şekli, malzemedeki malzemeye değişiklik gösterebilir. Kompozit malzemeler için, eğrinin karakteristiğini etkileyen etmenler matris malzemesi, tabakaların yerleşimi (yani elyaf yönleri), güçlendirme elemanlarının hacimsel oranları, elyaf-matris arayüz özelliği, yükleme tipi, ortalama gerilme, frekans ve çevresel etmenlerdir. Adı belirtilen bu etmenlerden ilk dördü malzeme özellikleri ile ilgili iken, diğerleri test değişkenleridir.

Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan termoset matrisler içinde en iyi yorulma dayanımını epoksi reçineler vermektedir. Bu durum, epoksinin tokluk ve dayanıklılığından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, yüksek mekanik dayanım, kürlenme sırasında sergilediği düşük büzülme oranı ve cam elyaflarla arayüz bağlantısının çok iyi olması, yorulma dayanımını artıran diğer etmenlerdir.

Elyaf yön dağılımının yorulma dayanımı açısından etkisi karmaşıktır. Tek yönlü kompozitlerin elyaf yönündeki çekme dayanımı en yüksek seviyedeysen, bu malzeme yapısının yorulma tasarımı açısından en uygun durumda olmadığı bilinmektedir. 0° yöndeki elyafların zayıf durumu, enlemesine yöndeki dayanımının elyaf olmaması nedeniyle yetersiz kalması ve dolayısıyla boyuna elyafların kendi içinde ayrılmasından kaynaklanmakta, ayrıca yorulma testinin bu şartlarda uygun yapılamaması ve parçanın test cihazının çenelerinden ayrılmasından kaynaklanır. Bunun düzeltilebilmesi için, bazı tabakaların 90° yönde elyaflara sahip olması gerekir. Tabakaların elyaf yönlerinin %50-%50 dağılımla [0/90] olarak ayarlandığı fakat bir kompozitin örgülü (woven) tabakalardan oluştuğu, diğer kompozitin ise örgüsüz (non-crimp) tabakalardan oluştuğu bir durum göz önüne alındığında, yön ve yönler pay edilen elyaf hacim oranları aynı olmasına rağmen, örgüsüz yapının çok daha iyi yorulma dayanımına sahip olacağı aşikârdır. Bunun nedeni, örgüsüz tabakalardaki elyafların diğer yönlerdeki elyaflarla kesişim noktalarında doğrusallıklarını ve düzlemlerini kaybetmemeleridir. Örgüsüz tabakalardan oluşan kompozitler sadece yorulma açısından değil, bu özelliğinden dolayı statik yüklemelerde de en uygun sonucu verir.

Tabakaların elyaf yön ve yerleşim değişikliğinin hangi tabaka katlarında meydana geldiğinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu özellik, yapının yorulma tasarımında etkili olan bir etmendir. Yapılan bir çalışmada, $[\pm 15/\pm 45]_s$ ve $[\pm 45/\pm 15]_s$ tabaka açısal yerleşimine sahip kompozit malzemelerin yorulma dayanımlarının önemli derecede farklı olduğu, ilkinin yaklaşık 25000 psi (175 MPa) daha düşük yorulma dayanımına sahip olduğu belirtilmiştir [83]. Kuşkusuz, bunda, basma karakterdeki tabakalar arası gerilmelerin meydana getirilmesi sağlanmış ve yorulma dayanımı yükselmiştir.

Elyaf ile matris arasındaki arayüz bağlantısının yorulma dayanımına etkisi bir çalışmada incelenmiştir [84]. Çalışmada, yüzeyi işlem görmemiş cam elyafların yanısıra, organosilan ile yüzeyi işlem görmüş cam elyafların epoksi matris ile birlikteliğinden meydana gelen kompozit malzemeler ele alınmıştır. Kuru ortamda yapılan yorulma testlerinde, yüzeyi işlem görmemiş cam elyaflara sahip kompozit malzemeler en iyi yorulma dayanımını sergilerken, nemli ortamlarda da en düşük yorulma dayanım değerlerini vermiştir.

Ortalama gerilmenin yorulma dayanımına etkisi, sabit bir çevrim ömrü esas alındığında, Goodman doğrusu yardımıyla anlaşılır. x - y koordinat sisteminde ortalama gerilme x -

eksenine, gerilme genliği y -eksenine yerleştirildiğinde, eğimi eksi olan bir doğru ile karşılaşılır. Bu doğrunun y -eksenini kestiği nokta, ortalama gerilmenin sıfır olduğu ve sadece gerilme genliğinin etkili olduğu durumu belirtirken, doğrunun x -eksenini kestiği nokta ise, gerilme genliğinin olmadığı statik yükleme şartını sağlar. Goodman doğrusu ile x -ekseni ve y -ekseninin çevrelediği alan, yorulma açısından emniyetli alanı, yani yorulmaya maruz kalan malzemenin sonsuz ömre sahip olacağını temsil ederken, bu üçgenin dışındaki alan, yorulmanın belli bir çevrim ömründen sonra meydana geleceğini belirten emniyetsiz alanı oluşturur. Goodman doğrusu, yorulmaya maruz kalan malzemede, gerilme genliğinin arttığı durumda, ortalama gerilmenin düşmesi gerektiğini, veya tersi bir şartı beraberinde getirmektedir. Goodman-Boller doğrusundaki fonksiyonel ilişki Eş. 3.1'deki gibidir [85–87]:

$$\frac{S_A}{S_E} = 1 - \frac{S_M}{S_C} \quad (3.1)$$

Eş. 3.1'de yer alan S_A , S_E , S_M ve S_C , sırasıyla, gerilme genliğini, ortalama gerilmenin olmadığı durumdaki eşdeğer yorulma gerilme değerini, ortalama gerilmeyi ve malzemenin statik gerilme değerini temsil etmektedir. Kompozit malzemelerde frekansın artmasının, sıcaklığın artmasını beraberinde getireceği göz önüne alınırsa, yüksek frekanslarda Goodman doğrusunda farklılaşma ve sapmanın olacağını da belirtmek gerekir.

Kompozit malzemelerin S-N eğrilerinin ampirik bir formül yardımıyla çıkartılabildiği, yorulma testi gibi birçok değişkenin (gerilme oranı, malzeme statik dayanımı, elyaf yön- yerleşim düzeni, yorulma çevrim sayısı, frekans gibi) arka planda çalıştığı bir test için büyük rahatlık sağlar. Genelde kabul gören eşitlik, Eş. 3.2'deki gibidir [88–91]:

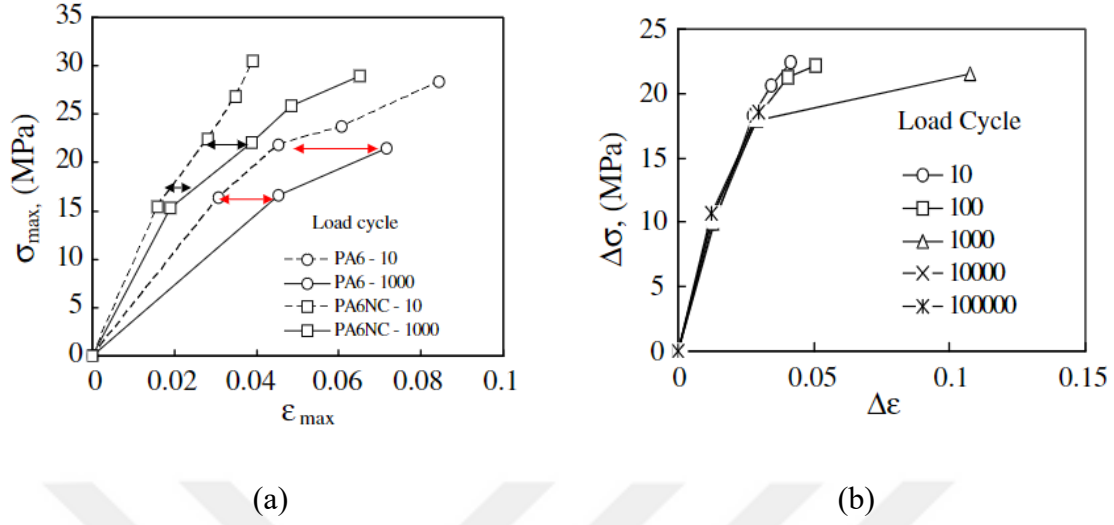
$$\frac{\Delta S}{\sigma_u} = m \log N + b \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte yer alan m ve b katsayıları, malzemeye göre değişen katsayılardır. N , yorulma çevrim sayısı, ΔS , gerilme genliğini, σ_u , malzemenin çekme dayanımını belirtmektedir. Malzemenin yorulma özelliğini veren bir diğer eşitlik, Eş. 3.3'te verilmiştir:

$$N^k \Delta \varepsilon = c \quad (3.3)$$

Eş. 3.3'te yer alan $\Delta\varepsilon$, malzemenin ilk ve son durumu arasındaki şekil değiştirme farkını belirtirken, k ve c , ilgili malzemenin sabitleridir. Bu eşitliğin, özellikle metal malzemelerin yorulma ömrünü tahmin etmede kullanışlı olduğu belirtilmektedir [88-92]. Metal malzemeler için k değeri 0,5-0,6 aralığında yer alırken, c , malzemenin esnekliği ile ilgilidir. Kompozit malzemeler göz önüne alındığında, k ve c değerlerinin tespit edilmesi metallerinki kadar kolay olmamaktadır.

Yapılan bir çalışmada, nano kil takviyesinin, çevrimsel yüke maruz bırakılan Polyamid-6 (PA6) ve Polyamid-6 esaslı nanokompozit numunelerde (PA6NC) sıcaklık artışına ve sekant ve dinamik modül değerindeki düşüşüne etkisi gözlemlenmiştir [93]. Sekant modül (E_{sec}), bir gerilme-şekil değiştirme grafiğinde, numuneye uygulanan azami gerilme (σ_{maks}) ile azami şekil değiştirme (ε_{maks}) değerlerinin oranı iken, dinamik modül (E_{din}), gerilme genliği ($\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min}$) ile şekil değiştirme genliğinin ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_{maks} - \varepsilon_{min}$) oranıdır. Bu gözlemlerde, test malzemelerinin hangi nedenden dolayı özelliğini kaybettiğini anlamak için çevrim gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılmıştır. Her bir numune çeşidi için 10^x yük çevrim sayısına ait $\sigma_{maks} - \varepsilon_{maks}$ eğrileri elde edilmiş, bunun yanında, $\Delta\sigma - \Delta\varepsilon$ grafikleri de ortaya çıkartılmıştır (Şekil 3.4). $\sigma_{maks} - \varepsilon_{maks}$ çiftinden meydana gelen ve kopma noktasına kadar uzanan eğriden uzaklaşma (sapma), visko-elastik sürünme, yorulma problemi ve sıcaklık artışı sonucunu verirken, $\Delta\sigma - \Delta\varepsilon$ çiftinden meydana gelen ve kopma noktasına kadar uzanan eğriden sapma ise, malzemede yorulma problemi ve sıcaklık artışı sonucunu vermektedir. Polyamid-6 numuneler, kopma noktasına kadar, yüksek gerilme değerlerinde boyun verme ve sürekli sıcaklık artışı gibi sonuçlar verirken, nano kil takviyesi, saf polimerlere göre modül değerinin düşüşünün kontrol edilmesini sağlamıştır. Nanokompozit numuneler, tüm gerilme değerlerinde, 10^5 çevrim sayısından daha fazla ömre sahip olmuşlardır. Ömür artışında, nano kil takviyesinin, çevrimsel şekil değiştirme genliğini düşürmesinin etkili olduğu, bunun da, Polyamid-6 numunelere göre düşürülmüş histeresis ısınmayı meydana getirmesi sonucunu doğurduğu tespit edilmiştir [93].



Şekil 3.4. (a) $10-10^3$ yük çevrim sayılarında PA6 ve PA6NC numunelere ait $\sigma_{maks}-\epsilon_{maks}$ eğrileri, (b) Çeşitli yük çevrim sayılarında PA6 numunesinden elde edilen $\Delta\sigma-\Delta\epsilon$ eğrileri [93]

Epoksi reçine içerisinde, nano levhacıklar şeklindeki boron nitratların ve çok cidarlı karbon nanotüplerin farklı ağırlıklarda ve karışımlarda yer aldığı hibrid nanokompozitlerin mekanik davranışını üzerine yapılan bir çalışmada, boron nitrat katkılı kompozit malzemelerde, boron nitratın ağırlıkça %0,5 oranına kadar, çekme dayanımlarında artış tespit edilmiştir. Boron nitrat ve karbon nano tüp kompozit malzemelerde ise, karbon nano tüpün ağırlıkça %0,3 oranına kadar artışın meydana geldiği tespit edilmiştir. Nanoparçacık takviyesinin, saf epoksiye kıyasla süneklik artışı sağladığı görülmüştür. Ayrıca, kopma noktasındaki dayanım ve şekil değiştirme değerlerindeki artışın tokluk artışını beraberinde getirdiği ve toklukta artış sağlanabilmesi için nano parçacıklardan faydalanılması gerektiği belirtilmiştir [94].

Vakum infüzyon yöntemiyle elde edilmiş olan cam elyaf/epoksi kompozitlerin düzlemsel kesme mekanik özelliğine çok cidarlı karbon nanotüplerin etkisinin incelendiği bir çalışmada, çok cidarlı karbon nanotüpler ve amino-fonksiyonlu çok cidarlı karbon nanotüpler, sırası ile %0,1 ve %0,3 ağırlık oranlarında kullanılmıştır. Çok cidarlı karbon nanotüpler, epoksi reçine içerisine katılmadan önce, mekanik karıştırma ve ultrasonik karıştırma işlemlerine tabi tutulmuştur. Karbon nanotüplerin epoksi matris içerisinde dağılımı, ısı iletimi (conduction) ile değerlendirilmiştir. Oda sıcaklığında, ASTM D4255 standardına göre gerçekleştirilen monotonik ve quasi-statik düzlemsel yırtılma testlerinde, kayma modülü, plastik deformasyon ve malzeme sertleşmesi sırasındaki kayma modül

özelliği değerlendirilmiştir. Yapılan incelemelerde, çok cidarlı karbon nanotüplerin bu yükleme şartlarında, matris özelliklerinde ihmâl edilebilir etkisinin olduğu ve reçineye dahil edilmesinin sonuçları etkilemediği tespit edilmiştir [95].

Sert silika ve yumuşak kauçuk ihtiva eden çentiksiz nano kompozitlerin çevrimli yorulma şartları altındaki davranışlarının incelendiği ve deneylerde Basquin Eşitliğine uygun sonuçların alındığı bir başka çalışmada, silika parçacıklarını içeren kompozitlerin, aynı gerilme genliği çerçevesinde, yumuşak kauçuk içeren kompozitlere göre yorulma ömürlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Hem silika ve hem de kauçuk içeren üçlü yapıdaki kompozit malzemelerin yorulma ömrünün ise, saf epoksi matrise göre çok daha iyi olmadığı sonucuna varılmıştır. Çevrimsel yorulma yükü altında, çentiksiz Polyamid-6 termoplastik nanokompozitlerin ise, meydana gelen lokal yüzey sıcaklıkları, cam dönüşüm sıcaklık değerine eşit olduğu ya da bu değeri aştığı için, ısıl yumuşamadan dolayı, istenilen ömrü veremedikleri tespit edilmiştir. Pul ya da levhacıklar şeklindeki nano kil takviyesinin ise, kauçuklara göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bu durum da, bu konudaki teori ve deneylerin örtüşüğünü göstermektedir [96].

Çok cidarlı karbon nanotüp oranının kompozit malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin ele alındığı farklı bir çalışmada, en yüksek çekme dayanımı, %0,1 oranında nanotüp kullanımıyla %18,83 oranıyla elde edilmiştir. Eğme dayanımı ise %8,2 oranıyla elde edilmiş ve buradaki karbon nanotüp oranı %0,05 seviyesinde olmuştur. Çekme dayanımından farklı olarak, nanokompozitlerin elastiklik modülü, çok cidarlı karbon nanotüplerin ağırlıkça %0,05 ile %0,5 oranları aralığında olduğunda artış göstermiştir. Nanokompozitlerin eğme (esneme) modülü, en fazla, çok cidarlı karbon nanotüplerin ağırlıkça %0,25 oranında kullanılmasıyla elde edilmiş ve elde edilen değer, saf epoksi malzemenin değerine göre %4,7 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Matris içerisinde nano parçacıkların dağılımının önemli olduğu ve matris içinde eşit derecede dağılımın sağlanmamasının, yük altındaki matriste sıkıntıları erken başlattığı görülmüştür. Çok cidarlı karbon nanotüplerin topaklaşmasının, numunenin esneme dayanımını ve modül değerini düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Çok cidarlı karbon nanotüpün oranının artırılmasının, şekil değiştirme-problem oluşturma safhasını kısalttığı ve yapının daha kırılğan hâle gelmesine yol açtığı tespit edilmiştir [97].

Poliüretan kompozitlerde karbon nanotüplerin takviyesinin, malzemenin yorulma ve çekme dayanımları üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada, yorulma deneylerinde, gerilme ile yük çevrim sayısı arasında ilişki kurabilmek için, 30 ila 50 MPa yük değerlerinde çekme-çekme yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Düşük oranda karbon nanotüp takviyesi ile, poliüretan kompozitlerin yorulması için gereken çekme enerjisi %38'e varan oranda artmıştır. Ayrıca, karbon nanotüp takviyesi ile, yüksek gerilme genliği ve düşük çevrim sayısının uygulandığı testlerde, yorulma ömrü %248'e kadar artış göstermiştir. Polivinil bütiral kullanılarak, karbon nanotüplerin çok iyi dağılım gösterdiği, mikrograflardan tespit edilmiş ve karbon nano tüplerin yorulma dayanımını iyileştirmesinde, çatlaklarda köprü görevi görmesinin etkili olduğu görülmüştür. Yapılan deneylerden, poliüretan sistemlerin, yapısal uygulamalarda, epoksiye göre daha üstün özelliklere sahip olabileceği sonucuna varılmıştır [98].

Matris yapıya küçük miktarda nano kil ve çok cidarlı karbon nanotüp takviyesi ile, cam elyaf kompozitlerin yorulma dayanımı üzerinde etkisinin incelendiği bir çalışmada, %1 oranında nano kil takviyesi ile, matriste iyi dağılımın sağlanabildiği, fakat daha yüksek nano kil ve çok cidarlı karbon nanotüp ilavesinin, hâlihazırdaki karışım tekniği ile dağılımda verim elde edilemediği gözlemlenmiştir. Dağılımdan bağımsız olarak, daha fazla ağırlık oranlarında nano parçacık takviyesi ile, eğme ve çekme statik dayanımlarının artış göstermediği belirtilmiştir. 3-nokta eğme ve çekme-çekme yorulma deneylerinde, %0,5 oranında çok cidarlı karbon nanotüp ve %1 oranında nano kil takviyesi yapılmış kompozitlerin yorulma dayanım değerlerinin, cam elyaf takviyeli saf epoksi matris kompozitlerin değerlerine yakın olduğu, fakat, daha yüksek nano parçacık takviyesinin, özellikle 3-nokta eğme yüklemesi altında önem arz eden yorulma dayanımını azalttığı görülmüştür. Nano kil takviyesi ile, yorulma dayanım oranının hafif oranda artış gösterdiği, bu artışın özellikle karbon nanotüpün %0,5 oranda eklenmesiyle kayda değer olduğu, fakat topaklanma problemi nedeniyle, karbon nano tüpün %1 oranda bulunması durumunda azalış gösterdiği tespit edilmiştir. Çekme-çekme yorulma deneylerinde ise, karbon nano tüplerin yorulma çatlakları önünde engel oluşturması nedeniyle, nano kil ve karbon nanotüp takviyesinin yorulma dayanımını artırdığı tespit edilmiştir [99].

Cam fenolik kompozitler üzerinde yorulma çatlak ilerlemesinde gerilme oranı ve frekansının etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, 0,1, 0,25 ve 0,50 gerilme oranlarında yapılan deneylerde,

birim yük değiştirme sayısı başına yorulma çatlak uzunluğunun (da/dN), test frekansına hassas derecede bağlı olduğu gözlemlenmiştir. 3 Hz seviyesindeki düşük frekansta en yüksek da/dN değeri tespit edilirken, 10 ve 15 Hz değerlerinde daha düşük da/dN değerleri tespit edilmiştir. Gerilme oranının ise, yüksek frekans değerlerinde, malzemenin yorulma çatlak büyüme oranında daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Düşük gerilme yoğunluk faktörü genliklerinde (ΔK), yüksek gerilme oranlarının yüksek çatlak büyüme oranına neden olduğu, fakat yüksek frekans ve yüksek gerilme yoğunluk faktörlerinde ise, tüm gerilme oranları için yorulma çatlak büyüme oranının sabit kaldığı görülmüştür [100].

Polimer temelli kompozit malzemelerde kırılmayı etkileyen etmenler, malzeme bünyesinde biriken yorulma hasarı ve yorulma çatlak ilerleme oranı (da/dN)'dir. Uygulanan yükün frekansı, gerilme oranı (R =asgari/azami gerilme oranı) ve çevresel etkiler, bir bileşenin yorulma çatlak ilerleme oranını ve yorulma hasarını etkiler. Eğer malzeme korozif ortam içerisinde bulunuyorsa, düşük frekansta, yüksek yorulma çatlak ilerleme oranına ulaşılabilir [100]. Birçok malzeme çeşidinde, test frekansının artırılmasıyla, yorulma çatlak ilerleme oranına ulaşmak mümkün olmakla birlikte, polikarbonat ve polisülfon gibi polimerik malzemelerin test frekansına hassasiyetinin olmadığı tespit edilmiştir. Genelde, R oranı arttıka, çatlak ilerlemesinin artış gösterdiği bilinmektedir. Gerilme yoğunluk faktörü,

$$\Delta K = \Delta \sigma Y \sqrt{a} \quad (3.4)$$

dir. Çekme gerilmesine maruz kalan ve tek kenar çatlağına sahip numunenin biçim düzeltme etmeni Y , aşağıdaki ifadeye eşittir. Biçim etmende bulunan α , a/W , yani çatlak uzunluğunun numune genişliğine oranını belirtir.

$$Y=1,99-0,41\alpha+18,7\alpha^2-38,48\alpha^3+53,85\alpha^4 \quad (\alpha=a/W) \quad (3.5)$$

Kompozit malzemelerin yorulma dayanımı, frekansın değişimiyle değişim göstermektedir. Tüm R oranlarında, yani asgari/azami gerilme oranlarında, frekansın artmasıyla yorulma direncinin artış gösterdiği görülmüştür. Bu karakteristik durum, özellikle, ΔK 'nın $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ değerinin üzerinde olduğunda kendisini göstermektedir. Bu değerin altında, bu etki önemini kaybetmektedir. Özellikle $R=0,1, 0,25$ ve $0,50$ gibi gerilme oranları için, yorulma çatlak ilerleme oranı (da/dN) ile ΔK arasında ilişkinin, 10 ve 15 Hz frekans değerlerinde Paris

Kuralını takip etmediği ve ΔK 'nın tüm değerlerinde da/dN 'nin değişmediği bu konuda yapılmış çalışmalardan bilinmektedir. Bu durum, 10 Hz ve yukarı değerlerinde, çatlak ucundaki histeretik ısınma ve bunun sağladığı malzeme yumuşaması ve gerilme rahatlamasından kaynaklandığı belirtilmektedir. 3 Hz frekans seviyesinde ise, 10 ve 15 Hz seviyelerinde, çatlak ucunda malzeme yumuşamasından kaynaklanan çatlak ilerleme direnci yaşanmamaktadır. 3 Hz frekans seviyesinde, R'nin etkisi önemsiz kalmaktadır. 3 Hz'den daha düşük frekans değerlerinde, ΔK 'nın düşükten yükseğe doğru tüm değerlerinde Paris Kuralı geçerli olmaktadır. 10 ve 15 Hz seviyelerinde, R'nin her bir değerinde, çatlak ilerlemesinin iki bölgesi ortaya çıkmaktadır. Daha düşük ΔK değerinde ortaya çıkan birinci bölge, çatlak ilerlemesinin hızlı olduğu bölgedir ve Paris Kuralı geçerli olur. Daha yüksek ΔK değerinin geçerli olduğu ikinci bölge ise, bu kuralın geçerli olmadığı ve kontrollü çatlak ilerlemesinin olduğu bölgedir.

Çok cidarlı karbon nanotüp yüzey kimyası değişikliği ve matris içinde dengeli dağılımında yüzey aktif maddesi kullanımının, epoksi matrisli kompozitlerin elektriksel iletkenliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelendiğinde, karbon nanotüp yüzey kimyası değişimi aşamasında 1,6-diaminohekzan (HMDA), kompozitler hazırlanırken ise bir katyonik bir de iyonik olmayan yüzey aktif maddesi kullanılmıştır. Yapılan incelemede, karbon nanotüp yüzeyinde amin kullanımı ile elde edilen kovalent bağ teşkili ve nanotüplerin matris içine dağılımında katyonik yüzey aktif maddesi kullanımının, karbon nanotüplerin kompozit içerisinde daha küçük boyutlarda ve homojen dağılmalarını sağlamış ve panellerin yorulma, darbe ve çekme dayanımlarında artış sağlamıştır [101].

Yapılan bir çalışmada, örgü cam kumaş elyaf yüzeyleri 3-(Aminopropil)trietoksilan (APTES) organik çapraz bağlayıcıları ile fonksiyonelleştirilmiş epoksi kompozit malzeme kullanılmış, ÇCKNT kimyasal olarak bağlanmış ve tabakalar arası kırılma toklukları ele alınmıştır. APTES'ların su itici özellikteki amino (-NH₂) uçlarına ise kimyasal yöntemler ile yüzeyi kimyasal bağlarla değiştirilmiş ÇCKNT'ler bağlanmıştır. Cam elyaflar ile ÇCKNT'lerin kimyasal olarak bağlanması, Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi analizleri ile karakterize edilmiş, ayrıca taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile cam elyafların yüzey fiziki özelliği araştırılmıştır. ÇCKNT 'ler cam elyaf yüzeylerine kimyasal olarak bağlandığında çekme dayanımları kısmen azalmış ancak toklukları önemli ölçüde artmıştır. İlaveten, eğme deneyleri ile elde edilen sonuçlara göre ÇCKNT'ler cam elyaf

yüzeylerine kimyasal olarak bağlandığında eğme dayanımında önemli artışlar sağlanmıştır. Tip-I tabakalar arası kırılma tokluğu deneyleri sonucunda elyaf köprülenmesi mekanizmasına ilaveten ÇCKNT sıyırılması, polimer akması, çatlak önünde çatlak, çatlağın farklı düzlemlerde ilerlemesi, enine elyaf demeti köprülenmesi, mekanik kilitlenme gibi mekanizmalar ile nanokompozitlerin kırılma tokluğu değerlerinde büyük artışlar sağlanmıştır [102].

3.2. Kompozit Malzemeleri Etkileyen Çevresel Etmenler

Malzemelerin çeşitli ortam şartlarından etkilendiği, gerek statik ve gerekse de dinamik yükler altında farklı davranışlar sergilediği aşikârdır. Bu ortam şartları olarak, malzemenin su ve su buharına maruz kalması ve/veya diğer korozyif ortamlar, düşük ve yüksek sıcaklık şartları belirtilebilir.

Cam takviyeli plastik (CTP) kompozitler, paslanmaz çelikler ve boyalı çelik malzemelere karşı, endüstride, özellikle korozyif ortamlarda giderek daha fazla pay almaktadır. Korozyona karşı dirençlerinin iyi olmasının yanında, hafiflik ve bu hafifliğiyle sağladığı mukavemet ve sertlik, gün geçtikçe daha rekabetçi üretim maliyetleri, kompozitleri çekici kılan unsurlar olmaktadır. Günümüzde, kompozit borular kimya sanayiinde, binalarda ve alt yapı sistemlerinde büyük ölçüde kullanılmaktadır [103]. Öte yandan, hidrometalurji sürecinin yer aldığı tesislerde kullanılan CTP tankları yaygınlaşmaktadır [104]. Ancak, CTP tankları ve borular, problemlerden uzak değil ve aşınma, kırılma ve çatlak oluşumu veya sertlik, tabakalar arası ayrılma, elyafın matristen ayrılması, sert parçacıkların yüksek hızlı akışı nedeniyle matrisin bozulması, tankların döngüsel olarak yüklenmesi ve boşaltılması, asit çözeltilerinin matris yapı içine sirayeti ve benzeri problemler nedeniyle özelliklerini yitirmektedir.

Resim 3.1a'da, bir kimyevi gübre üretim tesisinde, 1986 yılında devreye alınmış cam takviyeli polyester kompozit malzemenin baca görülmektedir. Üretim sürecinde atmosfere salınan amonyak gazının tutulması için %54 derişimdeki fosforik asit gazı ile yıkamanın gerçekleştirildiği bacada (Resim 3.1b), 30 yıllık çalışma süresi sonunda üç farklı yükseklik noktasından numuneler alınmış ve mikroskopla iç yapı incelenmiş ve kalınlık ölçümleri alınmıştır (Resim 3.1c).



(a)

(b)

(c)

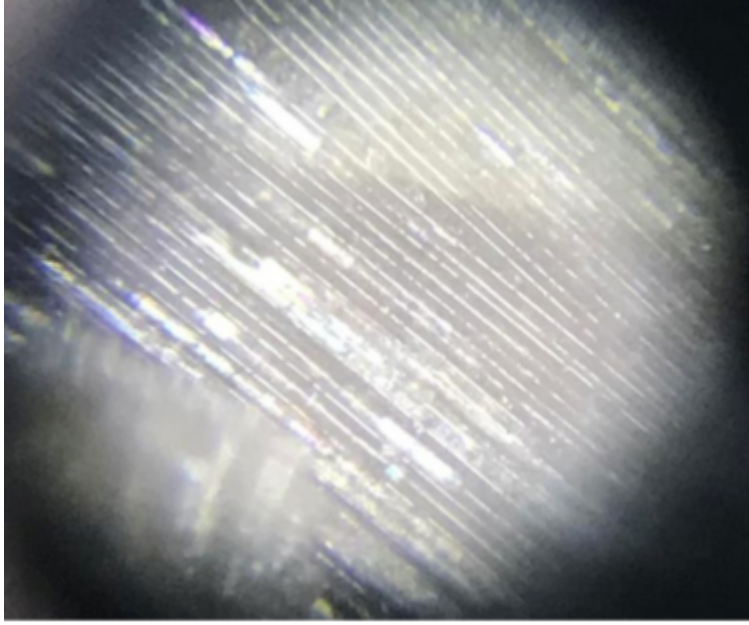
Resim 3.1. (a) Baca genel resmi, (b) baca iç yapısı, (c) bacadan alınan numuneler

Baca iç ortamında alkali karakterdeki amonyak ile asidik karakterdeki fosforik asitin birleşimi, çevreye ısı veren ekzotermik reaksiyonu beraberinde getirir (Çizelge 3.1). Dolayısıyla, bacanın çalışma sıcaklığı 60-70°C aralığındadır.

Çizelge 3.1. Kompozit baca iç yüzey ortam kimyasal özellikleri

Monoamonyum fosfat (MAP) kimyasal özellikleri	
Kimyasal formülasyonu	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
P_2O_5 (fosforik asit) oranı	%48-61
N_2 (azot) oranı	%10-12
pH	4-4,5

Yaklaşık olarak pH 4,5 seviyesindeki baskın asidik karakterdeki akışkan ve gaz ortam, bacada hem akış hızı ile matrisi aşındırmış ve hem de iç yüzeylere sirayet ederek cam elyafların yer yer kopmalarına neden olmuştur. Asit ile alkali ürünlerin birleşimi ile meydana gelen nihai ürünün, cam fiberlere tutunduğu Resim 3.2’de görülmektedir.



Resim 3.2. Bacanın kimyasal ortama maruz kalan iç yüzeyinden görünüm

Kalınlık değeri incelendiğinde, doğal olarak en alt kot seviyesinde bulunan numunenin aşınma seviyesinin daha fazla olduğu Çizelge 3.2’den görülmektedir.

Çizelge 3.2. Baca numuneleri kalınlık değeri

Numune no	Cidar kalınlığı (mm)
1 (en düşük kot seviyesi)	6,3; 6,5; 5,8
2 (orta)	6,2; 6,1; 6,2
3 (en yüksek kot seviyesi)	6,3; 6,3; 6,9

Fakat, bu malzemelerin mekanik özelliğini yitirmesinde altta çalışan mekanizmanın tanımında eksikliğin olduğu görülmektedir. Eğme dayanımında, sertlik ve Charpy darbe dayanımındaki değışimin, asit tipine ve daldırma süresine bağılı olduğunu belirten bir çalışmada, örneğin, hidroklorik asit göz önüne alındığında, eğme mukavemetinin 30 gün süreyle daldırmada değeri değişmediği, fakat, bu süreden sonra, dayanım değeri %10 düşüşün olduğu tespit edilmiştir [105]. Sertlik açısından ise, polysterin Barcol sertliğinin 90 günlük maruziyetten sonra yaklaşık %15 düşüşü tespit edilmiştir. 30 günlük maruziyet sürecinde, boru dış yüzeyi sertliğinde bir değışiklik tespit edilmezken, boru iç yüzeyinde etkilenmemeye 60 güne kadar sürmüştür. Charpy etkisi açısından irdeleme yapıldığında, 60 günlük daldırma süreci boyunca %5 seviyesinde bir düşüş tespit edilmiş, fakat, 60-90 gün aralığındaki maruziyette bu düşüş artarak %10 seviyesine yükselmiştir. Hidroklorik asidin

etkisi ile beraber sıcaklık etmeni de işin içine dahil edildiğinde, belirtilen tüm mekanik özelliklerde önemli derecede düşüş kaydedilmiştir. Yapılan bir çalışmada, polyester ve bisfenol-A epoksi vinil ester reçineleri iki farklı asidik çözeltide (1M H₂SO₄, Co harcanmış elektrolit), iki farklı sıcaklıkta (25°C, 75°C) ve iki ayrı maruziyet sürecinde (1 hafta, 4 hafta) test edilmiştir [104]. Yapılan çalışmalar sonucunda, polyester, daha yüksek sıcaklığa ya da daha fazla maruziyet sürecine tabi tutulduğunda, bisfenol-A epoksi vinil ester reçineye göre daha düşük modül değerine sahip olduğu görülmüştür. Her iki reçine için ortalama sertlik 2 haftalık maruziyetten sonra artmış ve sonra 4 haftalık maruziyet sürecinden sonra azalmaya başladığı fakat buna rağmen ilk hâlden (maruziyet öncesi durumu) daha yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, polyesterin mikro yapısı, yüzey pürüzlülüğü, çatlaklar ve çatlakların içine sülfürün sirayeti gibi nedenlerden dolayı asit ve yüksek sıcaklıktan daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir. Diğer taraftan, cam/polyester kompozitlerin çekme özelliklerine asit ve alkalilerin etkisi üzerine yapılan bir çalışmada, alkalilerin çekme özelliklerini (çekme dayanımı ve elastisite modülünü) düşürdükleri ve pH derecesi arttığında bu düşüşün artış sergilediği tespit edilmiştir [103]. Asit solüsyonlarının ise çekme dayanımlarını artırdığı ve pH derecesi azaldığında, bu artışın daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Her iki solüsyon için ortak olan nokta, maruziyet süresi, yani solüsyon içinde bekleme gün sayısı ile çekme özelliklerinin orantılı bir şekilde değişmesidir.

Alkalın ve asit çözeltilerinin CTP'nin mekanik özelliklerine olan etkisi üzerine bu konuda son zamanlarda birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir [105-121]. Sülfürik asit derişimi ve cam elyaf açısıl yön diziliminin tabakalı kompozit malzemeye asidin sirayetine etkisi, yapılan bir başka çalışmada ele alınmıştır [123]. Kumaş yapıdaki elyafla, kesikli elyaftan oluşan keçe yapıdaki elyaf takviye elemanına sahip iki kompozit arasında kıyaslama yapıldığında, kumaş (atkı ve çözgü) yapıya sahip kompozitin daha az oranda ağırlık artışı sergilediği tespit edilmiştir. Malzemenin özelliğini yitirmesi, sülfürik asit derişimi ile doğru orantılı seyretmiştir. Malzeme özellik kaybı üzerine gerçekleştirilen bir çalışmada, ortam olarak %10 sodyum hidroksit (NaOH), 1 N HCl ve %10 derişimde sodyum klorür (NaCl) çözeltileri kullanılmıştır [124]. Çalışma sonunda, asidik çözeltilerde çekme dayanımı ve elastisite modül değerinin artış sergilediği, diğer çözeltilerde ise azalış gösterdiği tespit edilmiştir.

Oksalik, hidroklorik, nitrik ve sülfürik aside maruz bırakılmış E-cam elyafların korozyon davranışının ele alındığı çalışma, E-cam elyafların asidik ortamdaki korozyonunda, kalsiyum ve alüminyum iyon eksiltmelerinin önemli bir etmen olduğu sonucunu vermiştir [125]. Bu tespit, diğer çalışmalar tarafından da belirtilmiştir [126-137]. Bu metalik iyonlarının çözülmesinde sadece hidrojen iyon derişimi etkili olmamakta, aynı zamanda asidik ortamdaki anyonlar da kuvvetli bir şekilde etkili olmaktadır. Oksalik ve sülfürik asitlerdeki anyonlar ile E-cam elyaftan eksilen kalsiyum ve alüminyum iyonlar arasında meydana gelen çözülmeyen tuzlar veya karmaşık iyonlar, elyafların korozyon hızını önemli ölçüde artırmaktadır. Daha da ötesi, asit tipine ve derişimine bağlı olarak, asit korozyonu, elyaf yüzeyinde aksel ya da spiral çatlak meydana getirmektedir. Bu çalışmada, elyaf yüzeyinde meydana gelen yüzey çatlağının açıklanmasında, iyonu azalmış tabakanın derinlik modeli esas alınmıştır. Aksel çatlak formasyonunda, spiral çatlak formasyonuna göre, daha derin bir iyonu azalmış tabakanın etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Hidroklorik aside ve sodyum hidrokside maruz bırakılmış cam elyaf/epoksi kompozit malzemenin esneme özellikleri ve darbe dayanımının ele alındığı bir çalışmada, alkali ortamların, asidik ortamlara göre, malzemenin esneklik özelliklerinde daha etkili olduğu tespit edilmiştir [138]. Bu durumun, çarpma dayanımı için de geçerli olduğu görülmüştür. Yüzey karıncalanmasının, daldırma süresi ile orantılı olduğu ve en fazla karıncalanmanın sodyum hidroksit ortamında gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

6 katmanda (45°, 55° ve 75° açılarla) E-cam sürekli elyafların sarılı olduğu, üzerinde aksel yönde çatlak oluşturulmuş ve 0,6 M derişimdeki hidroklorik asite maruz bırakılmış kompozit boruların gerilme korozyon çatlak davranışının incelendiği bir çalışmada, dış yüzeyleri, ortam sıcaklığında korozif ortama maruz kalan kompozit boruların uçları açık bırakılarak, boruların aksel yönde rahatça deforme olabilmesi sağlanmıştır [139]. Boruların içerisinde, 0,42 Hz frekansında ve gerilme oranı 0,05 olacak şekilde hidrolik yağ geçirilmiştir. Yapılan deneylerde, yüzey çatlağının, cidar kalınlığı boyunca düzlemsel olarak ilerlediği tespit edilmiştir. En düşük çatlak ilerleme hızının 75° sargılı sistemde ve en hızlı ilerlemenin ise 45° açılı sarılmış sistemde meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Mekanik etkiden dolayı meydana gelen zarar, en fazla 45° açılı borularda görülmüştür. Gerilmenin bir noktada birikmesi ile çatlak ilerleme oranlarının doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır. Korozyonlu yorulma sürecinde, cam elyaf yüzeylerinde spiral ve çevresel mikro çatlakların meydana geldiği ve gerilmeli korozyon çatlaklarının merdiven basamağı şeklinde olduğu

gözlemlenmiştir. Korozyif olmayan ortamlarda daha çok meydana gelen elyafın bünyeden ayrılması hadisesine, gerilmeli korozyon deneylerinde rastlanmamıştır. Elyafın temas ettiği bölgelerde, çeşitli düzlemlerde, çatlak ilk oluşum yapısı gözlemlenmiştir. Pek çok bağlanmamış, bünyeden ayrılmış bölgeler gözlemlenmiş ve bu bölgelerin uzunluğu boyunca korozyon hasarının meydana geldiği tespit edilmiştir. Farklı katmanlar söz konusu olsa da, yorulma çatlakları düzenli olarak ilerleme göstermiştir. Gerilmenin yüksek olduğu yerlerde, gerilmeli korozyon hasarının daha fazla meydana geldiği görülmüştür. Elyafın kırılma yüzeyleri incelendiğinde, iki yüzey bileşeninden meydana geldiği, birinin korozyon problemi nedeniyle oluştuğu, kalan yüzeyin ise, mekanik etki ile oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu yüzeyler de göstermiştir ki, elyaf kırılması, çatlak ilerleme düzleminde meydana gelmiştir.

E-cam elyaf takviyeli polyester, epoksi ve vinil ester polimerlerinin gerilmeli korozyon davranışlarını aynı ortamda görmek isteyen bir çalışmada, 4 nokta eğme test düzeneği hazırlanmış ve pH derecesi 1,2 olan nitrik asit ortamı kullanılmıştır [140]. Çalışma sonucunda, gerilmeli korozyon hasarının şiddetini etkileyen en büyük değişkenin polimer cinsi olduğu sonucuna varılmıştır. Gerilmeli korozyon çatlağının üç safhası olan başlangıç, eşik öncesi çatlak ilerlemesi ve düzgün ilerleme gösteren safhalardan ilk ikisinin ayrımını kolaylaştırmak için akustik emisyon yöntemi kullanılmış ve akustik emisyon-zaman eğrilerinden yararlanılmıştır. İlk iki safhada meydana gelen akustik emisyon sinyalleri, zamana bağlı olarak lineer bir davranış göstermiştir. Korozyon süreci, hem çekme gerilmesi altında ve hem de korozyif ortama maruz kalan cam elyaf yüzeylerinde kendisini göstermiştir. Maruz kalan yüzey alanına bağlı olarak, gerilmeli korozyon yüzey hasarının çeşitli dereceleri gözlemlenmiştir. Polimerlerin gerilmeli korozyon davranışları kıyaslandığında, ilk safha açısından, E-cam/vinil ester kompozitlerin, E-cam/epoksi kompozitlere göre 10 kat, epoksi kompozitlerin de polyestere göre 5 kat daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. İkinci safhada ise, epoksi kompozitlerin aynı şekilde, polyester kompozite göre 5 kat daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Rüzgâr türbinleri ve diğer uzun dönemli çevrimsel yüke ve yüksek rutubet koşullarına (% 65 deniz havası rutubet oranı) maruz kalabilecek alanlarda, hibrid (% 50-% 50) ve nano-parçacık ile güçlendirilmiş kompozitlerin potansiyel kullanımını irdeleyen bir çalışmada, karbon takviyeli kompozitlerin cam takviyeli kompozitlere göre daha iyi yorulma dayanımına sahip olduğu, kompozitlerin ömürlerinde rutubetin büyük etkisi bulunduğu ve

rutubetten en fazla cam takviyeli kompozitlerin etkilendiği, karbon nanotüplerin kompozitlere eklenmesiyle, ömürlerinde artış sağlandığı tespit edilmiştir [141]. Cam elyaf kompozit malzemelerin, karbon elyaf kompozit malzemelere kıyasla, rutubetten etkilenmelerinin, karbon nanotüple takviye edilmesiyle daha çok azaltılabildiği görülmüştür.

Gerilmeli korozyon çatlaması üzerine cam takviyeli plastikler (kompozitler) üzerinde bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir [142-166]. Cam takviyeli plastiklerde gerilme korozyon çatlaması, korozif ortam ve bu ortamda uygulanan yükün bileşke hâlinde oluşmaktadır [147]. Malzeme bünyesinde ince çatlaklar meydana gelmekte ve yapı içinde ilerlemektedir. Bu durum, asidin cam elyaflara ulaşmasına imkân tanımakta ve elyafı olumsuz olarak etkilemektedir. Çatlak ucunda, elyaf yüzeyindeki kimyasal ataklar ve asidin sirayetiyle, elyafın dayanımı ciddi seviyede düşmektedir. Bu durum da, düzlemsel kırılmaya neden olmakta ve kırılma dayanımını ciddi şekilde düşürmesiyle sonuçlanmaktadır.

Gerilmeli korozyondan dolayı elyafların dayanımını yitirmesi, bu ortamın etkisiyle matris-elyaf arasındaki arayüzey bağlantının zayıflaması, matris malzemesinin kimyasal olarak özelliğini yitirmesi ve sonucunda modül ve dayanımını kaybetmesi, korozif etkinin sıcaklık ile birleşerek hızlı bir şekilde malzeme özelliğini düşürmesi, karşılaşılabilecek maruziyet etkileri olabilir.

Kompozit malzemelerin ana üç bileşeni olan elyaf, matris ve arayüzün korozif ortamdan etkilenmesi, sadece ardışık olarak gerçekleşmemekte, etkilenme, olumsuz sinerji göstererek, tüm bu bileşenlerde aynı anda da gerçekleşebilmektedir.

Gerilme altında iken korozif ortam maruziyeti, gerilme-korozyon mekanizması olarak adlandırılmaktadır. Çeşitli malzemelerin, maruz kalacakları çevre de göz önüne alındığında, sergileyecekleri ortak özellikler bulunur:

- Elektriksel olarak yüksüz ortamlarda veya düşük sıcaklık şartları altındaki korozyon mekanizmasının hızı ihmâl edilebilecek seviyede düşük olur.
- Bu malzemelerin gerilme anında korozif ortamda bulunmaları durumunda, yapıda meydana gelecek korozif etki, önce korozif ortama maruz kalıp sonra gerilme altına giren eşdeğer malzemeye kıyasla daha fazla olur. Bu da, korozyon hızının uygulanan gerilme ile hızının arttığını göstermektedir.

Kompozitlerde en fazla kullanılan güçlendirme elemanı olan cam, oda sıcaklığındaki statik yükler altında, herhangi bir sürünme tepkisi göstermeden malzemenin kopmasını geciktirir. Fakat, malzeme bünyesine girecek olan nem, önceden varolan kusurların sabit yük altında büyümesini ilerletir. Eğer nemin etkisiyle ilerleyen bu kusur, kritik bir boyuta ulaşırsa, kırılma ya da kopma hadisesi ani olarak meydana gelir.

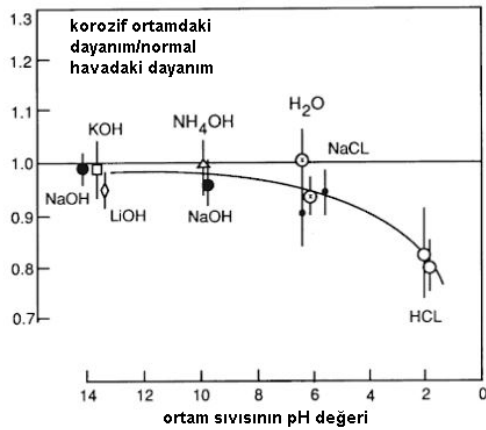
Birçok cam takviyeli plastik (CTP), asitlere maruz kaldıktan bir süre sonra hasara uğrar. Zamana bağlı olarak hasara uğramasında etkili olan etmen, aslında yapıda bulunan ve yüksek dayanıma sahip (çap değeri 12 µm olan) ve bünyesinde alkali metalleri barındıran cam elyaflara asit etkisinden kaynaklanır. Cam elyafların dayanım kaybında altta yatan mekanizma, camda bulunan sodyum gibi alkali iyonlarla, ortamdaki korozif sıvıda bulunan hidrojen iyonlarının değişimidir. Şöyle ki, cam yapıda gevşek bağa (tek elektrik yüküyle bağlı) sahip olan Na⁺ iyonunun yanısıra, aynı yapıda, Ca⁺² gibi çift elektriksel bağa sahip olan, bir diğer deyimle daha kuvvetli bağa sahip olan iyonlar da bulunmaktadır. Korozif ortamda bulunan ve çok küçük yapıda olan hidrojen iyonu da, sodyum iyonu gibi tek elektriksel bağa sahiptir ve cam yapıya nüfuz ederek, gevşek bağlı iyona ulaşmaya çalışır. Bu buluşma sonrasında, yerini hidrojen iyonuna bırakan sodyum iyonu yüzeye çıkar ve cam yapıdan uzaklaşır. Kimyasal eşitlik, Eş. 3.6'daki gibidir:



Eş. 3.6'daki çift yönlü ok, reaksiyonun her iki tarafa doğru çalışabileceğini göstermektedir. Eğer, ortamdaki hidrojen derişimi çok yüksek ise, cam yapıda bulunan sodyumun devamlı surette yapıdan uzaklaşacaktır.

Elyaf yapıdaki camın, korozif ortamdaki hidrojen iyonlarıyla etkileşimi, yüzeyin birkaç atom katmanı kadar altına nüfuz edebilir. Yapıya giren hidrojen iyonunun hacimsel küçüklüğünü, sodyum iyonunun büyüklüğüyle kıyaslandığında, yapıda bir büzüşme beklenir. Fakat, çekirdeğine kadar etkilenmemiş olan elyaf camın yapısı, bu büzüşmeye engel olacaktır. Dolayısıyla, yüzeyde bir çekme gerilmesi meydana gelecektir. Elyaf, gerilme altında malzemede aynı zamanda görev paylaşımı da yaptığı için, hidrojen iyonu atağına maruz kalmış elyafın hızlı bir şekilde hasarı kaçınılmaz olacak, yüzeyde spiral şeklinde çatlamlar meydana gelecektir.

E-cam elyafların normal havadaki dayanımının, çeşitli pH değerlerindeki korozif ortamlardaki dayanımı arasındaki kıyaslama, Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, cam elyafların kuvvetli asidik ortamlardaki kısa süreli maruziyeti dahi, elyafların dayanımını düşürmektedir. İyon değişimi zamana bağlı olduğu için, değeri azalan şekil değiştirme ya da gerilme değerleri altında dahi, süre arttıkça, dayanımın azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.5. Cam elyafların havadaki dayanımını ile çeşitli çözeltilerdeki dayanımının kıyaslanması [167]

Çevresel etkiden dolayı cam elyafların mekanik özelliğini yitirmesi, cam takviyeli plastik malzemelerin mekanik özelliğini doğrudan etkilemektedir. Kompozit malzemede, çevre etkisine hassas olan bu güçlendirme elemanlarının matris tarafından korunduğu göz önüne alınır, matris olarak kullanılan reçinenin geçirgenliği ve etkiden dolayı matriste meydana gelebilecek çatlakların oluşup oluşmaması önem arz eder.

4. KIRILMA MEKANİĞİNİN TEMELLERİ

Yapıları oluşturan malzemelerin ortak özellikleri, üretimden gelen bir takım kusurları barındırmalarıdır. Bu malzemelerin içerdiği kusurlar, statik ve dinamik zorlanmaların etkisiyle büyürler. Büyüyen kusurların birleşmesiyle artık adına çatlak adı verilen ve yapının kararlılığını olumsuz olarak etkilemeye başlayan daha büyük kusurlar meydana gelmeye başlar. Yapının rijitliğini olumsuz olarak etkilemelerinin nedeni, kılcal ya da minik çatlakların gerilme yığılması etkisi göstermeleri ve gerilmenin malzeme kesidi boyunca dengeli ya da eşit yayılımını engellenmesidir.

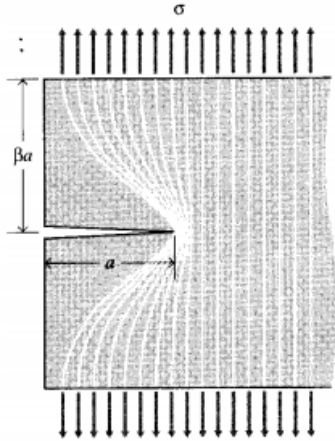
A.A. Griffith (1883-1963), 1920 yılından önce, cam malzemelerin kırılması üzerine başlattığı çalışmalar sırasında, Inglis'in eliptik delikler çevresindeki gerilme yığılmasının hesaplanması konusundaki çalışmalarından [168] haberdardı ve kırılma dayanımını nasıl daha doğru tahmin edilebileceği üzerine düşünceler içerisindeydi. Inglis'in çözümü, keskin uçlu çatlakların uç noktasındaki gerilme değerinin sonsuz değere ulaşması gibi, pratikte karşılığı olmayan matematiksel düğüm noktası barındırıyordu. Bu durum, fiziksel olarak mümkün değildi. Çünkü, malzeme, çatlak ucunda akmaya uğrayarak, çatlak ucunun körleşmesine neden olmaktadır. Inglis'in matematiksel çözümünün anlamı, malzemenin küçük yük seviyelerinde dahi, sifıra yakın kırılma dayanımının olacağı sonucunu ortaya çıkartıyordu. Çatlak ucundaki gerilmeye odaklanmaksa, Griffith (1921), enerji-denge yaklaşımı adı verilen ve malzeme biliminde önemli gelişmeyi sağlayan metodu kullanma yolunu seçmiştir [169]. Bu yaklaşımda, gerilmeye uğrayan malzemenin birim hacimdeki şekil değiştirme enerjisi,

$$U^* = \frac{1}{V} \int f dx = \int \frac{f}{A} \frac{dx}{L} = \int \sigma d\epsilon \quad (4.1)$$

şeklindedir. Eğer malzeme Hooke Kanuna uygun özellikteyse ($\sigma = E\epsilon$), birim hacimdeki şekil değiştirme enerjisi,

$$U^* = \frac{E\epsilon^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (4.2)$$

gibi olur. Çekme gerilmesine maruz kalan bir malzemedeki bir çatlak a derinliğine ulaşırsa, çatlağın serbest kalan yüzeylerine komşu kısımları yük taşımayacak ve bu kısımların şekil değiştirme enerjisi serbest kalmış olacaktır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Çatlak yanındaki yüksüz alanın şematik görünümü [170]

Inglis'in çözümünü kullanarak, Griffith (1921), bu enerjinin ne kadar bir büyüklüğe sahip olduğunu bulmuştur. Şekil 4.1 göz önüne alındığında, şekil değiştirme enerjisinde serbest kalan bu kısımların alansal büyüklüğünün, çatlağın üzerindeki ve altındaki üçgenel alanlar olduğu düşünülür. Plakanın diğer kısımları ise, hâlen σ gerilmesi altındadır. Üçgenin dikey kenar uzunluğunu belirten βa daki β değişkeninin, Inglis'in çözümüne bağlı olarak, düzlemsel gerilme durumunda π olduğu düşünülür. İki adet üçgenin bu durumdaki toplam alanı πa^2 olacaktır. O hâlde, bu alandan serbest kalan şekil değiştirme enerjisi,

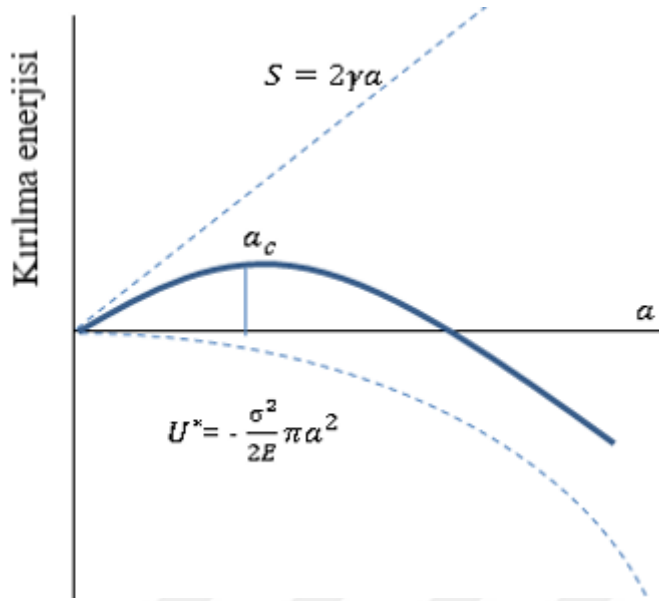
$$U^* = \frac{\sigma^2}{2E} \pi a^2 \quad (4.3)$$

kadar olacaktır. Bu serbest kalan şekil değiştirme enerjisi, çatlağın ilerlemesi için gereken enerji olarak harcanacaktır. Birim kalınlıktaki malzemede, çatlağın ilerlemesi için gereken enerji,

$$S = 2\gamma a \quad (4.4)$$

dir. Eş. 4.4'teki γ , birim kalınlıktaki bir adet çatlak yüzey ayırma enerjisi, 2 katsayısı, çatlak dolayısıyla açığa çıkan iki adet yüzeyi ve S , malzemenin kırılma yüzey enerjisini temsil etmektedir. Eş. 4.3 ve 4.4'ün eşit olduğu ve Şekil 4.2 göz önüne alındığında, açığa çıkan

şekil değiştirme enerjisi, a_c kritik çatlak uzunluğundan sonra baskın hâle gelmeye başlar. Bunun anlamı, bu kritik çatlak uzunluğundan sonra meydana gelen kırılmanın kendiliğinden ve ani bir şekilde meydana geleceği, fakat bu kontrolsüz çatlağın başlayacağı noktaya kadar ki artışın ancak gerilmenin artırılmasıyla kademeli bir şekilde artacağı şeklindedir.



Şekil 4.2. Kırılma enerji dengesi [170]

Bu kritik çatlak uzunluğu, iki enerjinin toplamının ($S + U^*$) çatlak uzunluğu a 'ya göre türevinin sifıra eşitlenmesiyle bulunur (Eş. 4.5). Eş. 4.5'deki kırılma dayanımı (σ_f) yalnız bırakıldığında, Eş. 4.6'daki, kırılma dayanımını veren eşitliğe ulaşılır:

$$\frac{\partial(S+U)}{\partial a} = 2\gamma - \frac{\sigma_f^2}{E} \pi a = 0 \quad (4.5)$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (4.6)$$

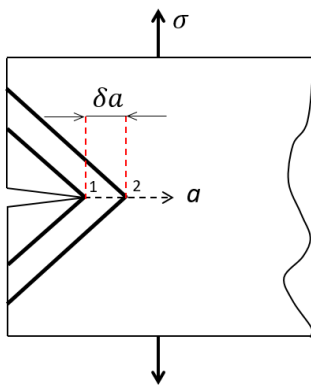
Griffith'in (1921) bu çalışması, kırılğan malzemeler için sonuç verirken, daha yumuşak ve az kırılğan malzemelerde yeterli sonucu verememektedir. Açığa çıkan şekil değiştirme enerjisi, süneklik özelliği olan malzemelerde, sadece yeni çatlak oluşumu için harcanmamakta, çatlak ucunda oluşan plastik bölgenin bu kıvama gelmesi için de harcanmaktadır. Bu tamamlama çalışması, kısmen Irwin (1960) [171] ve Orowan (1949) [172] tarafından yerine getirilmiştir. Dolayısıyla, Griffith'in (1921) aşağıdaki eşitliğinde yer

alan yüzey ayırma enerjisi (γ) yerine kırılma tokluğunun şekil değiştirme enerjisi karşılığı (G_c) yazıldığında, işin içine plastik şekil değişimi de katılmış olur. Eş. 4.6 bu hâli ile yazıldığında,

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi a}} \quad (4.7)$$

kırılma dayanımının kırılma enerjisine bağlı olduğu durum elde edilir. Belli bir malzemedeki tokluk kırılma enerjisi (G_c), varolan bir çatlak boyunun (a) kontrollü çatlak ilerlemesi sonuna ulaşması durumunda meydana gelecek kopma dayanımı (σ_f), Eş. 4.7 yardımıyla bulunabilir.

Bir plakada çatlak boyunun küçük bir ilerleme (δa) kaydetmesi durumunda, parçanın yine belli bir kısmının şekil değiştirme enerjisi altından kurtulması anlamına gelecektir. Fakat, her bir birim ilerleme karşılığında, enerjiden kurtulacak alanın büyüklüğü artış sergileyecektir. Eğer açığa çıkan elastik enerji sadece yeni yüzeylerin oluşması için gereken enerjiye eşitse termodinamik denge sağlanır. Şekil 4.3'te, çatlak ucunun 1'den 2 numaralı noktaya ulaşması durumunda, gerilme altından kurtulacak üçgensel alanın miktarı artacaktır. Bu durum da, çatlak ilerledikçe, çatlakın ilerlemesi için daha fazla enerjiye ihtiyaç olacağını belirtir. Çatlak ilerledikçe, net alan azalacak ve içereceği kusurların bulunma ihtimâli zayıflayacaktır.

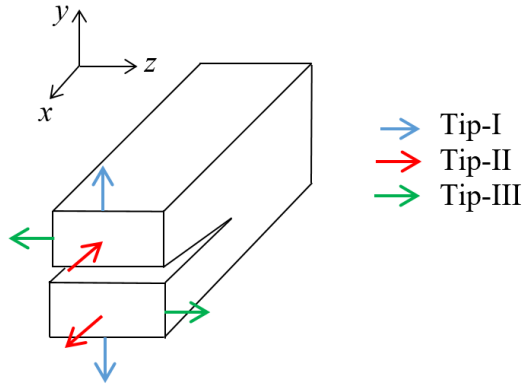


Şekil 4.3. Çatlakın ilerlemesiyle açığa çıkan enerjinin şematik görünümü [170]

4.1. Gerilme Yoğunluk Faktörü (K_I) Yaklaşımı

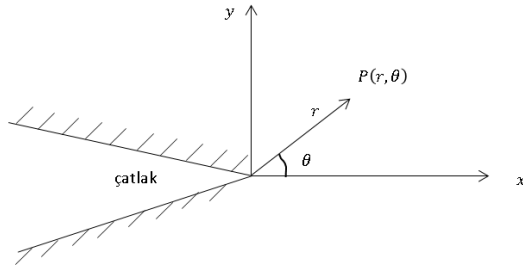
Enerji dengesi yaklaşımı, kırılma sürecine geniş bir bakış açısı sağlasa da, keskin bir çatlak ucunda gerilme durumunu irdeleyen gerilme yoğunluk faktörü yaklaşımı, mühendislik

pratiği açısından daha kullanışlıdır. Bu konuda yapılmış çalışmalar, Tip-I, Tip-II ve Tip-III şeklinde üç tip kırılmayı değerlendirir. Tip-I, çekme numunesinde, çekme yönüne normal yöndeki çatlak ağzı açılmasını simgelerken, Tip-II, çatlağın, komşu yüzeyler arasında kayma gerilmesi ile ilerletilmesini, Tip-III ise, bu çatlağın yırtılarak ilerletilmesini simgeler (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Kırılma tipleri

Çatlağın büyümesi bakımından çatlak ucu çevresindeki gerilmelerin durumu önemlidir. Sonsuz büyüklükteki bir levhada düzlem gerilme hâlinde, Şekil 4.5’de verilen koordinatlarla, herhangi bir P noktasındaki gerilmeler,



Şekil 4.5. Sonsuz büyüklükteki bir levhada çatlak ucu koordinat sistemi şematik görünümü

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (4.8)$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (4.9)$$

$$\tau = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \left[\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (4.10)$$

gibi ifade edilmektedir. K değeri, ‘Gerilme Yoğunluk Çarpanı’ olarak adlandırılır. K değeri, kritik bir K_C değerini aştığında, çatlak büyümeye başlar ve K_C değeri kırılma tokluğu olarak adlandırılır. Çatlak ucundaki gerilme durumu, sadece K değeri ve noktanın konumunu belirleyen koordinatlarla saptanabilmektedir. Elastik şekil değiştirme enerjisi (G) değeri, fiziksel olarak daha anlamlı olmasına rağmen, kırılma mekaniğinde çalışma kolaylığı bakımından K değerinin kullanılması tercih edilmektedir.

Çentiklerin şekline ve parça içindeki konumlarına göre üretecekleri gerilme yoğunluk faktör eşitlikleri Çizelge 4.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Değişik şekil ve parça içindeki konumda bulunan çentiklerin K eşitlikleri [170]

Çatlak Tipi	Gerilme Yoğunluk Faktörü, K_I
Sonsuz bir plakada, $2a$ uzunluğunda merkezi bir çatlak durumu	$\sigma_\infty \sqrt{\pi a}$
Yarı-sonsuz uzunluktaki plakada a uzunluğunda kenar çatlağı durumu	$1,12 \sigma_\infty \sqrt{\pi a}$
Sonsuz bir yapıda, merkezde a yarıçapına sahip eliptik bir çatlak olması durumu	$2 \sigma_\infty \sqrt{\frac{a}{\pi}}$
W genişliğindeki bir plakada $2a$ uzunluğunda merkezi bir çatlak olması durumu	$\sigma_\infty \sqrt{W \tan\left(\frac{\pi a}{W}\right)}$
W genişliğindeki bir plakanın her iki kenarında simetrik a uzunluğunda çatlak olması durumu	$\sigma_\infty \sqrt{W \left[\tan\left(\frac{\pi a}{W}\right) + 0,1 \sin\left(\frac{2\pi a}{W}\right) \right]}$

Gerilme yoğunluk faktörü K_I , benzetim yapılacak olursa, malzemeye uygulanan yükün meydana getirdiği gerilme değeri iken, eşik gerilme yoğunluk faktörü ya da kırılma tokluğu, o malzemenin dayanım değeridir. O hâlde, kritik gerilme yoğunluk faktörü, malzeme tokluğunun bir göstergesidir. Kırılma dayanımı σ_f ya da σ_N , çatlak uzunluğu a ve kırılma tokluğunun K_{IC} bir fonksiyonudur (Eş. 4.11):

$$\sigma_f = \frac{K_{IC}}{\alpha \sqrt{\pi a}} \quad (4.11)$$

Bu eşitlikteki α , çatlak tipine göre, Çizelge 4.1’de karşılık gelen katsayıdır. $\alpha = 1$ olması durumunda, bu eşitlikten gelecek oran, kritik şekil değiştirme enerjisi oranıyla eşit olması gerekir (Eş. 4.12):

$$\sigma_f = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} = \sqrt{\frac{EG_c}{\pi a}} \Rightarrow K_{Ic}^2 = EG_c \quad (4.12)$$

Bu durum, düzlem gerilme durumunda geçerlidir. Düzlem şekil değiştirme durumunda ise, bir miktar değişiklik gösterir (Eş. 4.13):

$$K_{Ic}^2 = EG_c(1 - \nu^2) \quad (4.13)$$

Poisson's oranı (ν) yaklaşık olarak 0,3 olduğunda, aradaki fark %9 olmaktadır. Fakat, düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme durumunda, G_c ve K_{Ic} , çok değişik değerlere sahip olmaktadır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Malzemelerin kırılma tokluk değerleri [170]

Malzeme	G_c (MPa.mm)	K_{Ic} (MPa \sqrt{m})	E (GPa)
Çelik alaşımı	107	15	210
Alüminyum alaşımı	20	03	69
Polietilen	20	7	0,15
Yüksek çarpma dayanımlı polistiren	15,8	-	2,1
Yumuşak çelik	12	-	210
Lastik	13	50	0,001
Cam takviyeli termoset	7	-	7
Lastikle toklaştırılmış epoksi	2	7	2,4
PMMA	0,5	2,2	2,5
Polistiren	0,4	1,1	3
Ahşap	0,12	1,1	2,1
Cam	0,007	0,5	70

4.2. Numune Biçiminin Etkisi

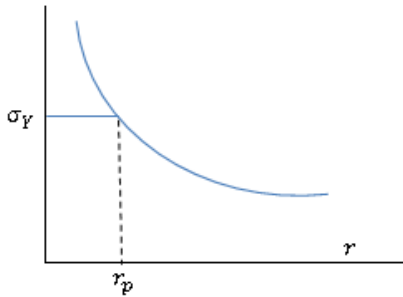
Bir malzemenin çatlak ilerlemesine karşı direnci, ya da diğer ifadeyle tokluğu, çatlak ilerlerken bünyesine sirayet eden enerji ile belirlenir. Pencere camı gibi son derece kırılğan bir malzemedeki bu enerji, çatlak düzlemi boyunca kimyasal bağların koparılmasıdır. Fakat, tokluğu yüksek bir malzemedeki, daha önce de belirtildiği gibi, bu bağların koparılması, çatlak ucundaki plastik akıştan dolayı oldukça küçük bir etki gösterir. Koordinatlardaki gerilmelerin belirttiği eşitlikler göz önüne alındığında, çatlak ucundaki bu gerilme değerleri, malzemenin akma gerilmesinin (σ_Y) üzerinde olacaktır. Fakat, bu bölgedeki gerilme, (σ_Y) nin üzerinde olamayacağı için, plastik bölgedeki gerilmenin en fazla (σ_Y) olacağı düşünülür (Eş.

4.14). x -ekseni üzerinde, yani $\theta=0$ olduğunda, çatlak ucunda meydana gelen plastik bölge büyüklüğü r_p kadar ötede, gerilmenin σ_Y ye ulaştığı mesafe eşitliği şu şekildedir:

$$\sigma_y = \sigma_Y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r_p}} \quad (4.14)$$

$$r_p = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_Y^2} \quad (4.15)$$

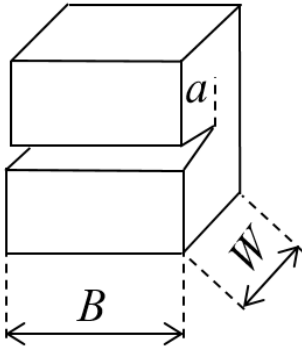
Plastik bölge büyüklüğü r_p ile gerilme ilişkisi Eş. 4.15 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Gerilme yoğunluk çarpanı, uygulanan gerilmenin artırılması ya da çatlağın ilerlemesi suretiyle bir şekilde artırıldığında, yukarıdaki eşitliğin de gösterdiği gibi, plastik bölgenin büyüklüğü artacaktır. Fakat, plastik akış, malzemenin moleküler ya da mikroyapı hareketliliği tarafından sınırlandırıldığı için, aynı oranda artış gösteremeyebilir. Dolayısıyla, artış, sadece plastik alanının büyüklüğüyle sınırlı kalır. Plastik bölgenin büyümesi durduğunda, çatlağın büyümesini engelleyici etmen ortadan kalkar ve kontrollü olmayan çatlak yayılması baş gösterir. Bu durumdaki gerilme yoğunluk faktörü K_I , artık malzeme özelliği olan kırılma tokluğu K_{IC} olarak adlandırılır.



Şekil 4.6. Çatlak ucundan r_p mesafesi kadar ötede meydana gelen akma gerilmesi [170]

Ölçülen K_{IC} kırılma tokluk değerinin geçerli olması için, plastik bölgenin alanının çok büyük olmaması gerekir. Kırılma tokluğu için düzenlenmiş ASTM E399 standardı [173], kırılma tokluğu ölçümü yapılacak numunenin çatlak boyuna ve plastik bölge büyüklüğüne göre belirli bir boyutta olmasını ister (Şekil 4.7) ve (Eş. 4.16):

$$a, B, (W - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (4.16)$$



Şekil 4.7. Kırılma tokluk numune ölçüleri

4.3. Elastik Enerji Boşalma Hızı ve Gerilme Yoğunluk Çarpanı

Sonsuz büyüklükte ve birim kalınlıkta bir levha ele alındığında, levhada mevcut $2a$ uzunluğunda bir çatlakın ilerlemesi için zorlayıcı etmen, açığa çıkacak elastik enerjidir. İşte bu değere ‘Elastik Enerji Boşalma Hızı’ veya ‘Çatlak Büyümesi Kuvveti’ adı verilerek G sembolüyle gösterilir (Eş. 4.17).

$$G = - \frac{\partial(\Delta U_E)}{\partial(2a)} \quad (4.17)$$

Bu büyüklüğün kritik bir G_C değerini aşması hâlinde, çatlak ilerler. İnce bir levhada, düzlem gerilme durumunda, Eş. 4.18 geçerlidir:

$$G = \frac{\pi}{E} a \sigma^2 \quad (4.18)$$

Görüleceği üzere, bu cisimde G değerini, $a\sigma^2$ katsayısı belirlemekte, başka bir ifadeyle, kırılma tehlikesi $a\sigma^2$ çarpımından doğrudan etkilenmektedir. π değeri de, bu çarpım içine alınırsa,

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4.19)$$

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (4.20)$$

tanımına ulaşılır. Bu eşitlikler, düzlem gerilme durumları için geçerlidir. Düzlem şekil değiştirme durumunda ise, E yerine $E/(1-\nu^2)$ konulması gerekir.

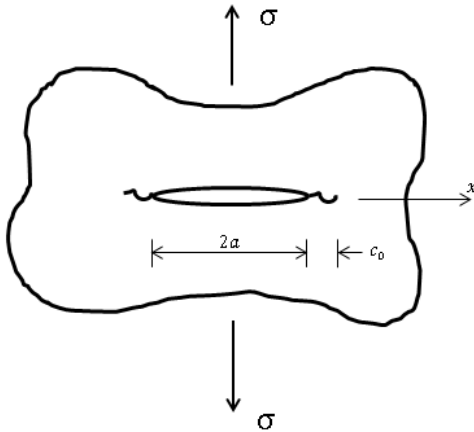
5. KIRILMA ÖLÇÜTLERİ

Çentikli tabakalı kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının tespitinde günümüze kadar birçok model ortaya atılmıştır [174-180]. Bunların birçoğu, malzemenin makroskopik olarak homojen ve anizotropik olduğunu göz önüne alır. İç Kusur Ölçütü, malzemenin çentik önündeki enerji-yoğun bölgenin izotropik malzemede çatlığa denk geldiğini düşünen ve lineer elastik kırılma mekaniğini uygular [174]. Bu ölçüt, özünde, iki adet değişken içerir: çentik önündeki hasar bölgesinin uzunluğu c_0 ve tabakalı kompozit malzemenin çentiksiz çekme dayanımı σ_0 .

İç Kusur Ölçütüne benzer olan fakat daha farklı prensibe dayanan iki ölçüt daha öne sürülmüştür [175]. Çentiğin önünde meydana gelen gerilme dağılım bilgisini gerektiren bu ölçütler, Nokta Gerilme (the Point Stress Criterion-PSC) ve Ortalama Gerilme (Average Stress Criterion-ASC) dir. Nokta Gerilme Ölçütü, çentiğin d_0 karakteristik uzunluğu kadar ilerisinde meydana gelen gerilmenin, malzemenin çekme dayanımına (σ_0) eşit olması durumunda, malzemenin hasara uğrayacağını belirtir. Çatlak ucundan itibaren ortalama gerilmeyi göz önüne alan ölçüt ise, çentik ucundan a_0 kadar ileride meydana gelen ortalama gerilme değerinin, malzemenin çentiksiz hâlinin çekme dayanımına eşit olması durumunda malzemenin hasara uğrayacağını belirtir. Ölçütlerin her ikisi, bu karakteristik uzunluk değerlerinin, ilgili malzemenin bir sabiti olduğunu düşünür. Bu kriterlerin detayları aşağıda sunulmuştur.

5.1. İç Kusur Ölçütü (IFM)

İç kusur modeli, çekme gerilmesi altında bulunan ve sonsuz genişlikte olan, aynı zamanda iç kısmında $2a$ uzunluğunda çatlak barındıran bir plakanın, çekme gerilmesi etkisiyle çatlakın her iki ucunun önünde meydana gelecek yüksek enerji yoğunluklu bölgelerin de sanki bir ilave çatlakmış gibi ele alınması prensibine dayanır (Şekil 5.1). Bu enerji yoğunluklu bölgelerin ilave çatlakmış gibi düşünülmesi, Irwin (1960) ın metallerde plastik bölge düzeltmesine benzer yapıdadır ve bu ilave çatlak uzunluklarının her birisi (c_0), bu ölçütün karakteristik uzunluğudur.



Şekil 5.1. Çatlak ucundaki yüksek enerjili bölgeleri hayali çatlak olarak gözönüne alan İç Kusur Ölçütü

Eğer, çentiksiz ve sonsuz genişlikteki bir parçanın çekme gerilme durumu düşünülürse, yani Şekil 5.1'deki $2a$ uzunluktaki çatlağın olmadığı durum ele alınırsa, çentiksiz parçanın sadece $2c_0$ uzunluğunda çatlak içeren bir hâle indirgeneceği rahatlıkla düşünülebilir. Waddaups ve diğerleri (1971), çentiksiz ve çentikli çekme numunelerinin kırılma tokluğunu bu şekilde eşitleyerek, malzemelerin kritik uzaklıkların tespitini mümkün kılmışlardır [174].

Ortasında çatlak barındıran ve çekme gerilmesine maruz kalan geniş bir plakanın kırılma tokluğu Eş. 5.1'deki gibidir:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte σ , uygulanan gerilmeyi, a , çatlağın yarı uzunluğunu belirtmektedir. Eşitlikte σ yerine parçanın çentiksiz hâlinin çekme gerilme dayanımı σ_0 ve a yerine c_0 konulduğunda, çentiksiz parçanın kırılma tokluk değeri (K_{Q^∞}) elde edilir. Aynı kırılma tokluk değerine, söz konusu eşitliği kullanarak bu sefer σ yerine σ_{NC}^∞ ve a yerine $a+c_0$ konulduğunda da ulaşılabilir (Eş. 5.2):

$$K_{Q^\infty} = \sigma_0\sqrt{\pi c_0} = \sigma_{NC}^\infty\sqrt{\pi(a+c_0)} \quad (5.2)$$

Yazılan bu eşitlik, orantıyı beraberinde getirir:

$$\frac{a+c_0}{c_0} = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{NC}^\infty}\right)^2 \quad (5.3)$$

Eğer parça sonlu bir genişliğe sahipse, sonsuz genişlikteki hâlden bir miktar daha düşük çekme dayanımına sahip olacaktır. Bu durum da, Eş. 5.4'deki gibi, Y biçim etmeni ile düzeltilmesini gerektirir:

$$\sigma_N^\infty = Y\sigma_N \quad (5.4)$$

Bu düzeltme işlemi eşitliğe yerleştirilirse, Eş. 5.5'deki son hâline ulaşır:

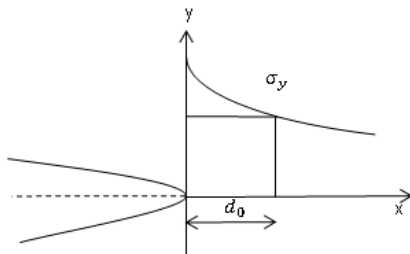
$$\sigma_N^{IFM} = \frac{\sigma_0}{Y} \sqrt{\frac{c_0}{a+c_0}} \quad (5.5)$$

Bu eşitlikteki σ_N^{IFM} , sonlu genişlikteki çentikli çekme numunesinin çekme dayanımını vermektedir.

5.2. Nokta Gerilme Ölçütü (The Point Stress Criterion-PSC)

Bu ölçütte, çentik önündeki d_0 karakteristik uzunluk ile çatlak ya da çentik uzunluğu arasında bir ilişki olması gerekir. Eğer, çatlak uzunluğu, karakteristik uzunluktan yeteri kadar büyükse, sonuçların teoriye uygun çıkması ve diğer ölçütlerle uyumu söz konusudur. Fakat, çatlak uzunluğu, karakteristik uzunluktan yeteri kadar büyük değilse, bir uyumsuzluk ortaya çıkmaktadır.

Bir çentik ya da çatlak önünde meydana gelen gerilme dağılımı Eş. 5.6 ile belirtilir (Şekil 5.2):



Şekil 5.2. Çatlak ucunda meydana gelen gerilme dağılımı

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi x}} \quad (5.6)$$

2a uzunluğunda çatlak ya da çentik içeren ve σ çekme gerilmesi altında bulunan tabakalı kompozit malzemede Tip-I gerilme yoğunluk faktörü, Eş. 5.7'ye sahip olur:

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad (5.7)$$

Nokta Gerilme Ölçütü, çatlak ucundan d_0 kadar ötede meydana gelen gerilme değerinin (Şekil 3.11), malzemenin çentiksiz hâlinin dayanımına eşit ise, malzemede kırılmanın yaşanacağını belirtir (Eş. 5.8):

$$\sigma_y(x, 0) \Big|_{x=d_0} = \sigma_0 \quad (5.8)$$

Bu eşitlikler birlikte düşünüldüğünde, σ_N^{PSC} çentikli çekme dayanım değerini veren eşitliği ortaya çıkartacaktır (Eş. 5.9):

$$\sigma_N^{PSC} = \frac{\sigma_0}{Y} \sqrt{\frac{2d_0}{a}} \quad (5.9)$$

Gerek İç Kusur Ölçütünde ve gerekse de Nokta Gerilme Ölçütünde kullanılan Y biçim etmeni eşitlikleri aşağıda verilmiştir:

Üç nokta eğme numunesi için:

$$K = (3PL/2BW^2)Y\sqrt{\pi a} \quad \alpha = (a/W) \quad (5.10)$$

$$Y = 1,09 - 1,73\alpha + 8,2\alpha^2 - 14,2\alpha^3 + 14,6\alpha^4 \quad (5.11)$$

Tek kenar çatlakına sahip çekme numunesi için:

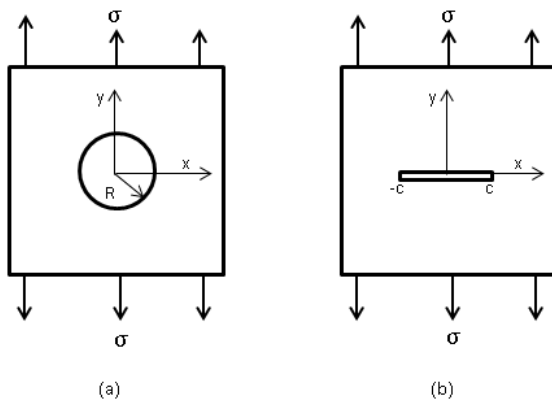
$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad \alpha = (a/W) \quad (5.12)$$

$$Y = 1,12 - 0,231\alpha + 10,55\alpha^2 - 21,71\alpha^3 + 30,39\alpha^4 \quad (5.13)$$

Tabakalı malzemeler, düzlemsel anlamda izotropik özellik sergiledikleri için, izotropik malzemeler için geliştirilmiş olan bu düzeltme etmenleri bu malzemeler için de kullanılabilir.

Nokta Gerilme Ölçütü için, malzemenin barındırdığı delik kenarından d_0 kadar ötede meydana gelen gerilme değeri, malzemenin çentiksiz hâlinin dayanımına eşit ise, malzemede kırılma yaşanacaktır (Şekil 5.3a), (Eş. 5.14):

$$\sigma_y(R + d_0, 0) = \sigma_0 \quad (5.14)$$



Şekil 5.3. a) Bünyesinde dairesel çentik barındıran numune, b) bünyesinde çatlak barındıran numune

Bu kırılma kriteri, çatlak problemlerine de aynı mantıkla uygulanabilir. $2c$ uzunluğunda çatlak barındıran sonsuz genişlikteki bir malzemeye, y eksenine paralel olarak σ gerilmesi uygulandığı düşünölsün (Şekil 5.3b). x ve y eksenleri, elastik simetri düzlemine normal olduğu durumda, Lekhnitskii, çatlağın önündeki tam elastisite çözümünü,

$$\sigma_y(x, 0) = \frac{\sigma x}{\sqrt{x^2 - c^2}} = \frac{K_I x}{\sqrt{\pi c(x^2 - c^2)}}_{x > c} \quad (5.15)$$

şeklinde verir. Bu ifade, delik içeren malzeme için yazılan eşitliğe dahil edilirse, Eş. 5.16 ve 5.17'ye ulaşılır:

$$\frac{\sigma_N^\infty}{\sigma_0} = \sqrt{1 - p_3^2} \quad (5.16)$$

$$p_3 = \frac{c}{c+d_0} \quad (5.17)$$

Çatlak boyunun etkisi, kırılma tokluğu K_Q cinsinden yazılırsa, Eş. 5.18'e ulaşılır:

$$k_Q = \sigma_N^\infty \sqrt{\pi c} = \sigma_0 \sqrt{\pi c (1 - p_3^2)} \quad (5.18)$$

Bu eşitlik, küçük çatlak boylarında kırılma tokluk değerinin sifıra yaklaşacağını, fakat, çatlak boyunun parça genişliğine doğru artış gösterdiğinde ise bir limit değerine yaklaşacağını gösterir. Nokta Gerilme Ölçütüne göre, bu limit değeri Eş. 5.19'daki gibidir:

$$K_Q = \sigma_0 \sqrt{2\pi d_0} \quad (5.19)$$

5.3. K/σ Yaklaşımı

Bu hipotez, bu doktora çalışmasında geliştirilmiştir. Irwin'in (1960) enerji salıverme oranı ve Griffith'in (1921) elastik şekil değiştirme enerjisi salıverme oranları birlikte düşünülmüş ve ortaya çıkartılan eşitliğin lineer elastik kırılma mekaniği ile bağlantısı kurularak, her bir çatlak uzunluk oranındaki (a/W) kırılma dayanımlarının tespiti gerçekleştirilmiştir. Çatlak uzunluk oranındaki a ve W ifadeleri, sırasıyla çatlak uzunluğunu ve parça genişliğini göstermektedir. Her bir çatlak uzunluk oranı için bulunan kırılma tokluğu/gerilme (K/σ) oranı, etkin kırılma tokluğu/kırılma dayanımı (K_{eff}/σ_f) şeklinde düşünüldüğünde, sadece bir kırılma deneyinden elde edilen veriyle, diğer çatlak uzunluk oranlarına ait kırılma dayanımlarını tespit etmek mümkün olabilmektedir. Yapılan değerlendirmede, basitliği nedeniyle yaygın olarak kullanılan Nokta Gerilme Ölçütünün verdiği kırılma dayanımlarıyla kıyaslama yapıldığında, ölçütün sonuçlarına çok yakın değerlerin elde edildiği tespit edilmektedir. Nokta Gerilme Ölçütünün, tek kenar çatlağına sahip çekme (single edge notched tensile-SENT) numunelerinde, parça enine göre uzun çatlaklarda ($a/W > 0.3$) hata payının arttığı bilinmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen düzeltme işlemi ile, uzun çatlak oranlarında fiili test değerlerine ulaşılması mümkün olmuştur. Ayrıca, Klasik Kırılma Mekaniğinde, çatlaksız bir parçada gerilme yoğunluk faktörü K_I değerinin sıfır olacağı belirtilir. Yapılan teorik çalışmada, gerilme yoğunluk faktörü limitinin çentiksiz parçalarda sifıra değil, çekme numuneleri için 2,2288 değerine, üç-nokta eğme numuneleri için 1,99

değerine yakınsadığı tespit edilmiştir. Bu şekilde düşünüldüğünde, numunelerin çekme ya da eğme dayanımlarının yaklaşık %2 hatayla bulunabileceği görülmüştür. Son olarak, Nokta Gerilme Ölçütünün her bir çatlak uzunluk oranı için verdiği kırılma tokluk değerlerini kullanarak, kontrollü ilerleyen çatlak uzunluklarını hesaplamak mümkün olmuştur.

Çatlak malzemelerin artık dayanımlarını bulmak için geliştirilen ölçütler [174-190] sınıflandırıldığında, gerilme, enerji ve gerilme-enerji karışımını uygulayanlar şeklinde ayrıştırma yapılabilir. Gerilme temelli ölçütler, tabakalı kompozit gibi kırılğan yapıdaki malzemelerde lineer elastik kırılma mekaniği kurallarını uygular. Bu alanda kullanılan ilk ölçütler Nokta Ölçütü (the Point Method-PM) ve Çizgi Ölçütüdür (the Line Method-LM) [176-178]. Parçanın çatlak uzunluğu çıkartıldığında geriye kalan net genişliğin gerilme dağılımında malzemenin karakteristik mesafesine odaklanırlar. Çatlak ucundan karakteristik mesafede karşılaşılan en yüksek ana gerilme, malzemenin gerilme mukavemetine eşitse, kırılmanın meydana geleceği ilkesine dayanırlar. PM ve LM, metal yorgunluğunda yaygın olarak kullanılmıştır. Karakteristik uzunlukların atomik aralığa indirgenmesi durumunda, her iki ölçütün de kırılma mukavemetlerinin belirlenmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu fikir, bu ölçütlerin çok daha çeşitli malzemelere uygulanmasını sağlamıştır [179, 180]. Çatlak bir malzemedeki tespit edilen ilk husus, çatlak uzunluğuna bağlı olarak enerjisinin bir kısmını kaybedeceği yönündedir. Ayrıca, çatlağın ilerlemesi için de, malzemeye yeterli enerji verilmelidir.

Bu nedenle, enerji ölçütü, malzemenin izotropik veya anizotropik olup olmadığına bakılmaksızın kırılma analizinin kolayca yapılabilmesini sağlaması bakımından önemlidir. Bir enerji ölçütü olan Sonlu Kırılma Mekaniği (FFM), a uzunluğundaki mevcut bir çatlağın büyüyüp $a+\Delta a$ uzunluğuna erişmesi için gereken enerji miktarının $G_c \Delta a$ ya eşit olduğunu belirtmektedir [181-183]. Her bir çatlak uzunluğu için hazır bir çözüm olarak gerilme yoğunluk faktörünün (K) veya elastik şekil değiştirme enerjisi salıverme hızının (G) sağlanması, FFM ölçütünün bir üstünlüğüdür. Yoğun plastisite koşulları için kırılma ölçütü olarak gerilme yerine ortalama şekil değiştirmeyi kullanan bir yaklaşım önerilmiştir [183]. Ancak, tüm bu yaklaşımlar, farklı bir ilkeden yola çıksalar bile, birbirlerine çok yakın sonuçlar vermektedir.

Polimerik kompozit malzemeler için 1970'lerde geliştirilen Nokta ve Alan Gerilme Ölçütlerinin teorisi, sırasıyla PM ve LM ile aynıdır. Bununla birlikte, PM ve LM arasında lineer elastik kırılma mekaniği ilişkisini kurarak, kırılma tokluğuna dayanan karakteristik mesafenin tanımını ortaya koymuşlardır. Bu ölçütlerin bir diğer önemi de, PM ile LM'nin karakteristik mesafeleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymasındadır. Ortalama Gerilme Ölçütü, parçanın çatlak uzunluğu çıkartıldığında geriye kalan net genişliğindeki gerilme dağılımını tek boyutlu (nokta) değil, iki boyutlu (çizgi) olarak ele aldığından, hata oranı genellikle nispeten düşüktür.

Polimerik kompozit malzemeler, genel olarak sert bir elyaf ile daha esnek bir matrisin birlikteliğinden oluşur. Bununla birlikte, epoksi gibi matrislerin endüstriyel kullanımı için, iyileştirilmesi ve üç boyutlu bir çapraz bağlantı yapısına sahip olması gerekir. Bu işlem, bu matrislerin kırılma tokluğunu azaltır. Polimerik malzemelerin kırılma mukavemetinin belirlenmesi üzerine yapılan bir çalışmada, PM'ye benzer bir ölçüt geliştirilmiştir [184]. Bununla birlikte, bu çalışmanın önemi, doğal mukavemet (σ_0) ve nihai gerilme mukavemeti (σ_{UTS}) kavramlarının aynı olmaması ve bazı malzemeler için farklı değerler alabilmesidir. Bu önemli tespit sayesinde, Nokta Ölçütünün uygulama alanı daha da genişlemiştir. Bir çalışmada, gerilme altındaki çentikli bir numunede, çatlağın çentik ucu yüzeyinden başlamadığı, parçanın net genişliği içinde, çatlak ucundan belirli bir mesafede bir kusur olarak başladığı belirtilmiştir [185]. Bu tespit, bu ölçütlerin altında yatan temelin güçlü olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bu ölçütler, karakteristik mesafe ve gerilme mukavemetinin belirlenmesi için, farklı şekillere sahip çentikleri içeren en az iki test gerektirir.

Tüm bu ölçütlerin, özellikle PM, LM ve ICM'nin basitliğine rağmen, tüm çatlak uzunluk oranları (a/W) için aynı karakteristik mesafenin kullanılması, teorik ve pratik artık kırılma gerilmeleri arasındaki hata payında bir artışa neden olmaktadır. Kısa çatlaklar daha küçük karakteristik mesafe gerektirirken, daha uzun çatlaklar daha büyük karakteristik mesafe gerektirir. Karakteristik uzunluğun tüm nispi çatlak uzunluklarına tam olarak cevap verebilmesi için bir takım değişiklikler geliştirilmiştir. Karlak (1977), karakteristik uzunluğun, çentik uzunluğunun kare kökü ile orantılı olarak değiştiğini belirtirken, Pipes, Wetherhold ve Gillespie (1980), karakteristik uzunluğun üs değerine sahip olacağını ve bu üssün 0-1 arasında orantılı olarak değişen bir değere sahip olacağını ifade etmiştir [186, 187].

Bununla birlikte, karakteristik uzunluğun çatlağın uzunluğuna göre hangi nedenden dolayı değiştiğinden bahsedilmemektedir. Bu, Y biçim etmenin karakteristik mesafe üzerinde etkili olduğunu gösterir.

Kuşkusuz, PM, LM, ICM ve FFM yaklaşımları kendi başlarına kırılma kuvvetlerinin belirlenmesinde başarılı sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte, kırılma sadece enerjiyle değil, aynı zamanda çatlağın ilerlemesi için gerekli gerilmeyle de ilgilidir ve bundan dolayı ikili teoriyi bünyesinde barındıran ölçütler geliştirilmiştir. Bu ölçütler, bünyesinde bir gerilme ve bir enerji ölçütü içerir ve bir kırılma sürecini başlatmak için gerilmenin yeterli seviyede olması ve çatlağın ilerlemesi için de, yeterli enerji olması gerektiğini vurgular. Hitchen, Ogin, Smith ve Soutis (1994), LM ve ICM ölçütlerini birlikte düşünürken, Leguillon (2002), PM ve FFM'yi birlikte kullanarak V şeklinde çentikli kırılma polimerin (PMMA) kırılmasını incelemiştir [188, 190]. PM, analizin gerilme kriterlerini karşılarken, FFM, enerji kriterini karşılamıştır. Gerilme temelli ölçütler lineer elastik kırılma mekaniği ile ilişkili olduğunda, karakteristik mesafenin kritik kırılma tokluğu/çekme dayanımı oranına yani K_{IC}/σ_0 oranına dayandığı görülmektedir [189]. Bu oran, kırılma mukavemeti σ_f 'nin belirlenmesinde önemli görünmektedir. Bununla birlikte, bu oran, malzemenin kritik kırılma tokluğunu ve çentiksiz durumdaki ($a=0$) doğal gerilme mukavemetini bilmeyi gerekli kılmaktadır. Belirli bir boyuttaki çatlağın kontrollü yayılımında, etkin kırılma tokluğu K_{eff} neredeyse değişmez. K_{eff} , başlangıçtaki çatlak uzunluğunu, kontrollü çatlak yayılımının sonunda karşılaşılan kırılma dayanımıyla ilişkilendirir. Bununla birlikte, kırılma tokluğu K_{IC} , çatlağın toplam uzunluğunu ve kontrollü çatlak yayılımının sonundaki kırılma dayanımını ilişkilendirir. Gerilme temelli ölçütlerin karakteristik mesafe değişkeninin temeli olan K/σ oranı K_{eff}/σ_f olarak kabul edilirse, herhangi bir değişikliğe gerek kalmadan nispi çatlak uzunlukları ile ilgili tüm kırılma kuvvetlerini bulmak mümkün olabilir.

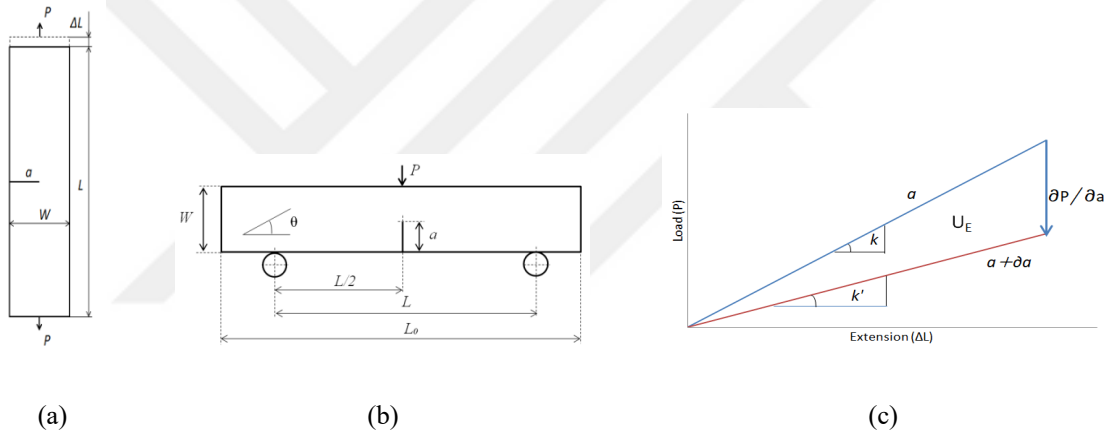
Bu ölçüt geliştirmede, Irwin'in (1960) elastik enerji salıverme hızı [191] ve Griffith'in (1921) şekil değiştirme enerjisi salınım oranı [169] birlikte düşünülmüş ve lineer elastik kırılma mekaniği ile ilişkilendirilmiştir. Enerji Ölçütü ve lineer elastik kırılma mekaniği birlikte değerlendirildiğinde, her bir a/W nispi çatlak uzunluklarına ait K/σ oranları bulunmuştur. K/σ , K_{eff}/σ_f oranı olarak dikkate alınmış ve tüm bağıl çatlak uzunluklarının kırılma dayanımının bulunması mümkün olmuştur.

5.3.1. Her bir çatlak uzunluk oranı (a/W) için K_{eff}/σ_f oranının bulunması

Çatlak içeren bir parçaya P kuvveti yüklenirse, bir çekme numunesindeki uzama veya üç nokta eğme numunesindeki çökme ΔL olacaktır (Şekil 5.4). Parça bir yay olarak kabul edilirse ve yay katsayısı k ile gösterilirse, kuvvet ve parçada biriken enerji (U_E), sırasıyla Eş. 5.20 ve 5.21'deki gibi olacaktır:

$$P = k \cdot \Delta L \quad (5.20)$$

$$U_E = \frac{P\Delta L}{2} = \frac{P^2}{2k} \quad (5.21)$$



Şekil 5.4. (a) SENT numunesinin, (b) SENB numunesinin şematik gösterimi, (c) yük-yerdeğiştirme grafiği

P yükü altında çatlak büyümesi ($a+\partial a$) meydana gelirse, numunenin yay katsayısı da değişecek ve k değeri k' değerine düşecektir. Çatlağın ilerlemesi çekme numunesindeki uzama ya da eğme numunesindeki çökme (ΔL) sabit kalırsa, birim çatlak artışı başına yük değişimi Eş. 5.22 ve 5.23'deki gibi bulunur:

$$\Delta L = \frac{1}{k} P = \text{sabit}$$

$$\frac{\partial(\Delta L)}{\partial a} = \frac{\partial(1/k)}{\partial a} P + \frac{1}{k} \frac{\partial P}{\partial a} = 0 \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial P}{\partial a} = -Pk \frac{\partial(1/k)}{\partial a} \quad (5.23)$$

Öte yandan, Irwin (1960) tarafından tanımlanan elastik enerji salıverme oranı Eş. 5.24'deki gibi yazılır:

$$G_I = \frac{\partial U_E}{\partial a} = -\frac{1}{2} \left(\frac{2P}{k} \frac{\partial P}{\partial a} + P^2 \frac{\partial (1/k)}{\partial a} \right) \quad (5.24)$$

Eğer Eş. 5.23'deki dP/da , Eş. 5.24'te yerine yazılırsa, Eş. 5.25'e ulaşılır:

$$G_I = \frac{\partial U_E}{\partial a} = \frac{1}{2} P^2 \frac{\partial (1/k)}{\partial a} \quad (5.25)$$

Eş.5.25 ve Griffith'in (1921) gerilme enerjisi salıverme oranı, çatlaktan dolayı numunenin birim çatlak uzunluğu başına enerji kaybı miktarını verir ve Eş. 5.26'daki gibi birbirine eşittir:

$$G_I = \frac{\partial U_E}{\partial a} = \frac{1}{2} P^2 \frac{\partial (1/k)}{\partial a} = \frac{\pi a \sigma^2}{E} Y^2 \quad (5.26)$$

Eş. 5.26'daki a , çatlak uzunluğunu, σ , uygulanan gerilmeyi, Y , biçim etmenini ve E ise elastisite ya da esneklik modülünü gösterir. Birim kalınlık durumu için Eş. 5.26'daki P yükü yerine gerilme eşdeğeri σW yazılırsa, Eş. 5.27'deki esneklik ($1/k$) elde edilir. W , parça genişliğini göstermektedir. İntegralin c sabiti yerine, çentiksiz numunenin ($a=0$) yük-yerdeğiştirme grafiğindeki lineer kısmın eğimi yazılırsa, Eş. 5.28'e ulaşılır:

$$\frac{1}{k} = \frac{\pi a^2 Y^2}{E W^2} + c \quad (5.27)$$

$$k = \frac{E}{\pi (a/W)^2 Y^2 + m} \quad (5.28)$$

Eş. 5.28'deki m ifadesi, sırasıyla SENT ve SENB numuneleri için L/W ve $L^3/4W^3$ e karşılık gelir. Eşitlikteki L , çekme numunesinin uzunluğunu veya eğme numunesinin mesnetler arası açıklığını göstermektedir. Eş. 5.28, sadece çatlak numunenin yük-yer değiştirme grafiğinden elastisite ya da esneklik modülünü elde etmek için geçerli değildir. Aynı zamanda, eğer modül değeri biliniyorsa, her nispi çatlak uzunluğundaki (a/W) rijitlik k değerinin bulunmasını da sağlar.

Gerilme yoğunluk faktörü ($K = \sigma Y \sqrt{\pi a}$) denklemi göz önüne alındığında, Eş. 5.28'deki $\pi a Y^2$ ifadesi, $(K/\sigma)^2$ ye eşit olacaktır. Bu ifade Eş. 5.28'de kullanıldığında, Eş. 5.29'a ulaşılır.

$$k = \frac{E}{\left(\frac{K_{eff}}{\sigma_f}\right)^2 \frac{a}{W^2} + m} \quad (5.29)$$

Rijitlik k veya modül E 'den hangisi bilinmiyorsa, Eş. 5.28 yardımıyla bulunabilir. Bu işlemten sonra, Eş. 5.29, her bir çatlak uzunluk oranındaki (a/W) kırılma tokluğu/gerilme (K/σ) oranını verecektir.

Her çatlak uzunluğu/parça genişliği (a/W) oranındaki K_{eff}/σ_f oranını bilmek, kırılma dayanımlarının kolayca bulunmasını sağlayacaktır. Bununla birlikte, hem gerilme hem de eğme gerilmelerinin, parçanın çatlak uzunluğu çıkartıldığında geriye kalan net genişliğinde ($W-a$) bir arada bulunduğu SENT tipi numunelerde, teorik olarak belirlenen kırılma dayanımlarının hata oranları artar. Bu, özellikle $a/W=0,3$ oranından sonra etkilidir. Bu oranın üstünde ($a/W>0,3$), eğme gerilmesinin etkisi artar ve özellikle karşı kenara yakın olan parçanın çatlak uzunluğu çıkartıldığında geriye kalan net genişliği bölgesinde görülür [192].

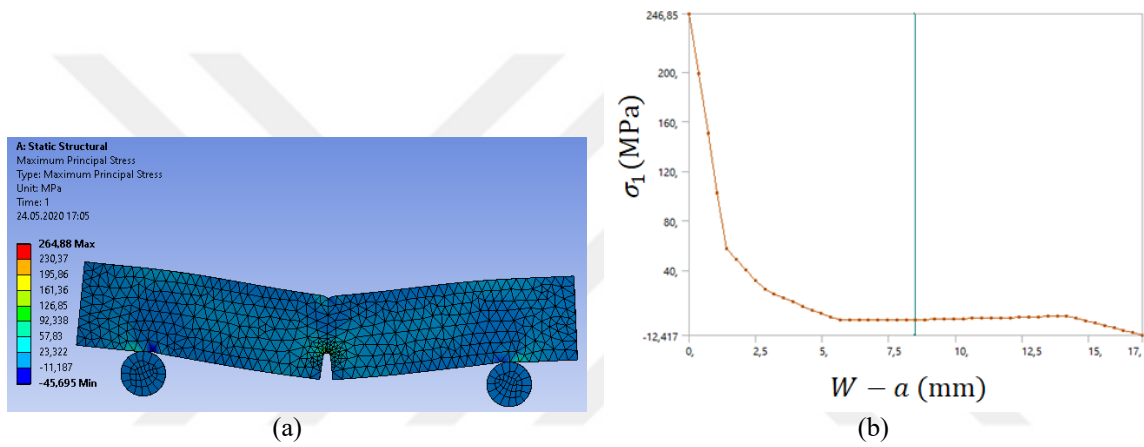
Özellikle $a/W=0,3$ nispi çatlak uzunluğunun üzerindeki SENT numunesine verilen enerjinin bir kısmı, basma gerilmesinin etkisiyle parçanın net genişliğinin karşı kenarına yakın yerde harcanır. Bu nedenle, lineer elastik kırılma mekaniğinden elde edilen teorik kırılma gerilmesi değerleri, uygulamada karşılaşılanlardan daha düşüktür. Dolayısıyla, basma gerilmesinin etkisinin baskın olduğu uzun çatlak boylarındaki kırılma dayanımlarının tespiti için, etkin kırılma tokluk değerlerinin Eş. 5.30'daki gibi, $a/W=0,2$ veya $a/W=0,3$ 'te belirlenen değere göre Y biçim etmenleri kullanılarak telafi edilmelidir:

$$\left(\frac{K_{eff}^2}{Y}\right)_{\frac{a}{W}=0,2} = \left(\frac{K_{eff}^2}{Y}\right)_{\frac{a}{W}=0,4} = \dots \quad (5.30)$$

SENT numunesi için $a/W=0,3$ 'ten sonraki belirtilen telafi işlemi, $K^2=EG$ yerine $K^2=EGY$ ilişkisinin kullanılması gerektiğini gösterir. Yani, enerji salınım hızı $G=\pi a \sigma^2 Y/E$ 'ye eşit olacaktır. SENT numunesinde gerçekleştirilen bu düzeltme işlemi, sadece $a/W=0,3$ 'ten sonra çatlak uzunluklarının kırılma gerilmesi değerlerini bulmak için değil, aynı zamanda düz,

yani çatlaksız numuneye doğru gidildikçe, kırılma tokluğu sınırının ($a=0$) belirlenmesi için de geçerlidir.

SENB numunelerinde, SENT'ten farklı olarak, yük yönü ve çatlak ilerlemesi aynı ekseninde buluşur ve parçanın net genişliğinde ($W-a$) iki farklı gerilme durumu meydana gelmez (Şekil 5.5a). Şekil 5.5b'de görüldüğü gibi, çentik ucunda görülen gerilme azalır, parçanın net genişliğinin orta ekseninde sıfırlanır ve karşı kenara doğru hafif bir basma gerilmesi oluşturur. Bu nedenle, SENB örneklerinde bir düzeltme işlemine ihtiyaç bulunmamaktadır.



Şekil 5.5. (a) SENB numunesi, (b) SENB parçanın net genişliğindeki gerilme dağılımı

5.3.2. Çentiksiz duruma doğru kırılma tokluk sınır değerinin saptanması

Gerilme mukavemeti σ_{UTS} , herhangi bir kusur, gözeneklilik veya üretimden kaynaklanan bir boşluğu içermeyen parçanın mukavemetini belirtir. İçinde kusur barındırmayan böyle bir malzemeyi meydana getirmek mümkün değildir ve bu kusurlu durumun σ_{UTS} dayanımı, σ_0 gerilme mukavemetinden farklı olacaktır. Seramik gibi malzemelerde, bu kusurlar küçük boyutta olabilirken, birçok malzemede bundan daha büyük iç kusurlar olabilir. Tüm malzeme tiplerine uygulanmasa da, düz ($a=0$) numunelerin çekme mukavemetini bu iç kusurlardan dolayı kırılma mekaniği ölçütlerine dayanarak yakınsamak mümkündür. Suresh, Shih, Morrone ve O'Dowd (1990), elastik ve sonsuz genişlikteki bir numunedeki çentikten kaynaklanan yorulma çatlaklarının uzunluğu, çentiğe göre çok küçükse, Eş. 5.31'de belirtilen gerilme yoğunluk faktörünün geçerli olacağını belirtir [193]. Eşitlikteki 1,12 katsayısı, serbest biçim faktörünü gösterirken, K_T ve a , sırasıyla, elastik gerilme yığılma etkeni ve çentikten çıkan çok küçük yorulma çatlaklarının uzunluğunu belirtir. σ^∞ ise, sonsuz genişliğe sahip parçaya uygulanan gerilmeyi göstermektedir. Çentikli kısımdan düz duruma ($a \rightarrow 0$)

geçerken, gerilme yığılma etkeni K_T , 1 değerine yaklaşacaktır. Parça sonlu bir genişliğe sahip olduğunda, σ^∞ yerine, gerilmenin biçim etmenle işlem görmüş hâli σY kullanılır. Biçim etmen, bağıl çatlak uzunluğu a/W 'nin çok düşük değerleri için 1,99 değerine yakınlaşacaktır. SENT numunesi için Y biçim etmeni, Amerikan Malzeme ve Test Kuruluşuna (ASTM) ait ilgili bir yayında belirtilmiştir [194]. Eş. 5.31'de tüm değerler yazıldığında, çatlak uzunluğu a sifıra yaklaştığında, kırılma tokluğunun kırılma gerilmesine oranının bir sınır değere ulaştığı görülebilir (Eş. 5.32 ve 5.33).

$$K = 1,12K_T\sigma^\infty\sqrt{\pi a} \quad (5.31)$$

$$K = 1,12\sigma Y\sqrt{a} \quad (5.32)$$

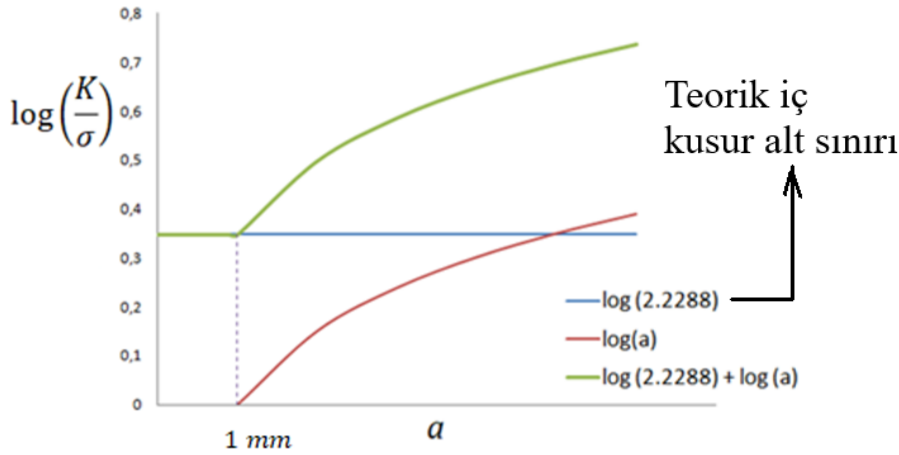
$$Y = 1,99 - 0,41\alpha + 18,70\alpha^2 - 38,48\alpha^3 + 53,85\alpha^4 \quad \alpha = a/W$$

$$K = 1,12\sigma 1,99\sqrt{a} \quad (5.33)$$

Şekil 5.6'da, çatlak uzunluğu a 'nın değerinin 1 mm değerine yaklaşmasına karşın, gerilme yoğunluk faktörünün kırılma gerilmesine oranının logaritmik değişimi ($\log(K/\sigma)$) grafik hâlinde sunulmuştur. Eş. 5.33'ün logaritması alınırsa, çatlak uzunluğu $(0,51\log a)$, 1 mm'lik çatlak uzunluğunda sıfır değerini verecektir (Eş. 5.34). Bu nedenle, gerilme yoğunluk faktörü sınırı, özellikle kırılma gösteren malzemeler için, içsel mukavemetin (σ_0) yaklaşık 2,2288 katı olacaktır (Eş. 5.35). Bu katsayı, çatlak uzunluğu birimi milimetre olarak ifade edildiğinde geçerlidir.

$$\log \frac{K}{\sigma} = \log 1,12 + \log 1,99 + 0,5 \log a \quad (5.34)$$

$$\lim_{a \rightarrow 0} K = 1,12\sigma_0 1,99 \quad (5.35)$$



Şekil 5.6. Çatlaksız (düz) numuneye doğru K/σ oran sınırının belirlenmesi

Cruse (1973), bir parçanın çentik boyutu küçüldüğünde, çentiğin gerilme yığılmasından etkilenen bölgedeki iç kusurların dayanımı belirleyeceğini belirtmiştir [195]. İç kusur, $2a$ uzunluğunda bir çatlak olarak gösterilirse, Eş. 5.36 geçerli olacaktır. K_Q kırılma tokluğunu göstermektedir.

$$\sigma^\infty = \frac{K_Q}{\sqrt{\pi a}} \quad (5.36)$$

Cruse (1973), [0/±45] karbon/epoksi numuneleri üzerine yaptığı çalışmalarda, iç kusur uzunluğunu 1,727-1,800 mm aralığında neredeyse sabit olarak belirlemiştir. Eş. 5.36'da K/σ oranı 2,2288 olarak girilirse, iç kusurun çatlak uzunluğu karşılığı, Cruse tarafından bulunan değerlere çok yakın olan 1,58 mm olarak belirlenir. Küçük kusurlar içeren düz numunenin ($a=0$) etkin kırılma tokluğu sınır değeri, kırılma tokluğunun, Eş. 5.37 ile düzenlenmesiyle bulunur:

$$\left(\frac{K_{eff}^2}{1,1215} \right)_{\frac{a}{W}=0} = \left(\frac{K_{eff}^2}{Y} \right)_{\frac{a}{W}>0} \quad (5.37)$$

Eş. 5.37'de bulunan kırılma tokluğu, Eş. 5.35'de kullanılırsa, malzemenin yaklaşık doğal gerilme mukavemetine (σ_0) ulaşılır. SENB numunesi için SENT numunesinde açıklanan yol izlenirse, K/σ oranı 1,9878'e yaklaşacaktır. Fett (1998), Eş. 5.38'deki gerilme yoğunluk etmeni eşitliğindeki çentiksiz eğme numunesi için Y biçim etmenini 1,1215 olarak ifade etmiştir [196].

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad (5.38)$$

$\sqrt{\pi}$, Y biçim etmeni içinde düşünülürse ve Eş. 5.38'in logaritması alınır, herhangi bir çatlak olmayan fakat iç kusurları içeren eğme numunesinin kırılma tokluk sınırı bulunabilir (Eş. 5.39). Küçük boyuttaki iç kusurlar, $0,5 \log a$ değerini sıfır değerine yakınsatacağı için, kırılma tokluğunun sınır değeri, düz numunenin eğme mukavemetinin (σ_0) 1,9878 katı olacaktır (Eş. 5.40).

$$\log \frac{K}{\sigma} = \log 1,9878 + 0,5 \log a \quad (1,1215\sqrt{\pi} = 1,9878) \quad (5.39)$$

$$\lim_{a \rightarrow 0} K = 1,9878 \sigma_0 \quad (5.40)$$

SENB numunesinin herhangi bir a/W oranından belirlenecek etkin kırılma tokluğu, SENT numunesindeki gibi telafi gerektirmeyeceğinden, bulunan tokluk değeri, düz numune için de geçerli olacaktır. Bu değer 1,9878 katsayısına bölünmesi, numunenin yaklaşık eğme mukavemetini σ_0 verecektir.

5.3.3. Kırılma tokluk (K_{ini} , K_{eff} ve K_{IC}) değerlerinin tespit edilmesi

Tabakalı kompozit malzemede bulunan bir çatlakın kontrollü ilerlemesi, izotropik malzemelerdeki gibi çatlak eksenine boyunca meydana gelmez. Farklı yönelimlere sahip ana elyaflar, genellikle bu ilerlemeyi yönlendirir. Matris içindeki bir kusur bir mikro çatlak haline geldiğinde, elyaf matris arayüzüne ulaşır. Elyafların kesişme noktaları, çatlaklar için bir dönüm noktasıdır ve tabakalar arası ayrılmaya neden olabilir. Bununla birlikte, tüm bu karmaşık ilerlemenin enerji ölçütünde bir karşılığı vardır ve çevresine yayılan çatlak, malzemenin şekil değiştirme enerjisini azaltacaktır. Tabakalı kompozit bir malzemede bu enerji düşüşü, çatlakın doğrusal bir uzantısı şeklinde teorik bir eşdeğere sahiptir.

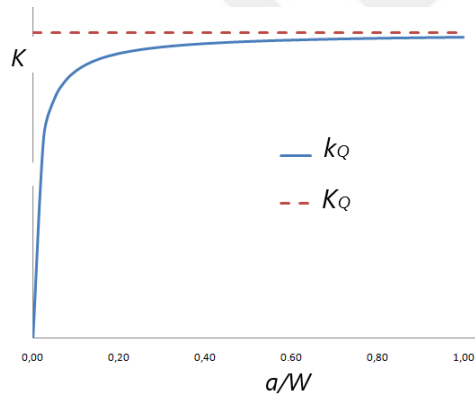
Nokta Gerilme Ölçütü, çatlak uzunluğunun parça genişliğine (a/W) oranları için kırılma tokluğunu vermektedir. Belirli bir çatlak uzunluğunu içeren kırılma yapıdaki bir numune için, Ölçüt tarafından sağlanan tokluk değeri, kararlı çatlak yayılımını başlatacak olan başlangıç kırılma tokluğudur (K_{ini}). Malzemenin kırılma tokluğuna (K_{IC}) ulaşıldığında, kontrolsüz kırılma meydana gelir. Ölçüt, Eş. 5.41 ile her bir başlangıç çatlak uzunluğu oranı

için başlangıç kırılma tokluğunu (K_{ini}) verir. Eşitlikte, a ve d_0 sırasıyla çatlak uzunluğunu ve karakteristik mesafeyi gösterir. Bu kırılma tokluğu değerleri a/W 'nin 1'e doğru ilerlemesi ile bir sınır kırılma tokluğuna ulaşır (Şekil 5.7). Yakınsanan kırılma tokluğu (Eş. 5.42), aynı zamanda, bünyesinde iç kusurları barındıran çatlaksız numune ($a=0$) için belirlenen sınır kırılma tokluğuna eşittir.

$$p_3 = \frac{a}{a + d_0}$$

$$K_{ini} = k_Q = \sigma_n^\infty \sqrt{\pi a} = \sigma_0 \sqrt{\pi a (1 - p_3^2)} \quad (5.41)$$

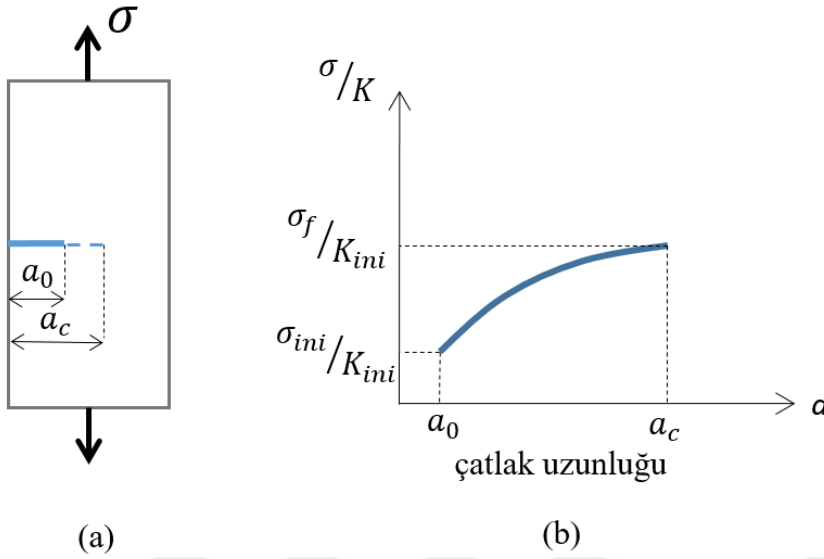
$$K_Q = \sigma_0 \sqrt{2\pi d_0} \quad (5.42)$$



Şekil 5.7. Nokta Gerilme Ölçütünün kırılma tokluğunun çatlak boyu artışıyla sınır değere ulaşması

Yük-yer değiştirme grafiğinde, tabakalı kompozitlerin birçoğunun, son kırılma noktasına kadar doğrusal karakteristik verdikleri bilinmektedir. Bununla birlikte, bu süre zarfında, küçük fakat kararlı çatlak yayılımı da malzeme içinde devam etmektedir. Şöyle ki, Şekil 5.8a'da, a_0 uzunluğunda çatlak barındıran numuneye gerilme uygulandığında, çatlağın uzunluğunun ilk artış sergilediği gerilme, σ_{ini} gerilmesidir. Bu gerilmeye karşılık gelen kırılma tokluğu K_{ini} 'dir. Çatlak, gerilmenin artmasıyla kontrollü olarak ilerler ve malzemenin kırılma tokluk değerine ulaşılan a_c çatlak uzunluğuna ulaşılır. Bu andaki uygulanan gerilme, malzemenin kırılma gerilmesidir ve σ_f ile gösterilir. Bu çatlak uzunluğundan sonra gerilme düşer ve kontrolsüz olarak çatlak ilerler ve parça kopar. Belirli bir a/W koşulu için rijitlik k sabit tutulursa ve çatlak uzunluğu (a), Eş. 5.29'da arttırılırsa,

Şekil 5.8b'deki $\sigma/K-a$ eğrisi elde edilir. σ_{ini}/K_{ini} oranı, ilk çatlak uzunluğuna (a_0), σ_f/K_{ini} son çatlak uzunluğuna (a_c) ait olacaktır. Bu eğrinin fonksiyonu en küçük kareler yöntemiyle bulunur. Bu eğride hakim olan tokluk, Nokta Gerilme Ölçütünün Eş. 5.41'de belirtilen ilk kırılma (K_{ini}) tokluğudur. Belli bir a/W oranının kırılma gerilmesi σ_f bilindiğinden, σ_f/K_{ini} oranı, kritik çatlak uzunluğu a_c yi verecektir.



Şekil 5.8. (a) Gerilme altında çatlağın ilk ve son uzunluğu, (b) Eş. 5.29 yardımıyla a_c ve σ_{ini} değerlerinin tespit edilmesi

5.4. Kompozit Malzemelerde Tip-I Tabakalar arası Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi

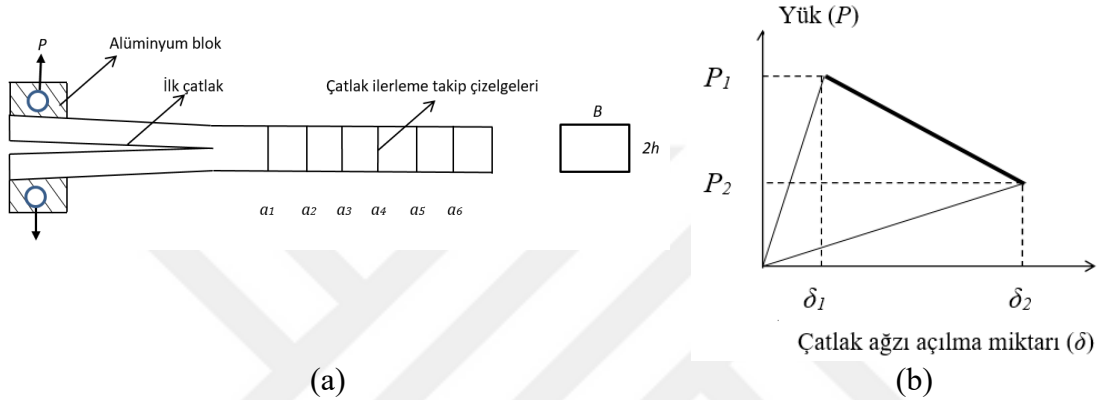
Tabakalar arası ayrılma, elyaf takviyeli kompozit malzemelerin emniyetli kullanımında bir engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tür problem, sadece üretim sonrası malzemede bir rijitlik kaybı gibi sonuç çıkarmaz, endüstriyel kullanımda sinsice ilerleyen ve yapıyı tehdit eden mekanik değerlere ulaşılmasına da yol açar. Başlangıçtaki kusurlar genellikle oldukça küçüktür ve malzeme üretimi sırasında ortaya çıkan boşluklardan, öneğin liflerin matris tarafından eksik ıslatılması veya darbe hasarından başlayabilir. Bununla birlikte, malzeme yüklendiğinde, bu kusurlar malzemenin mekanik özellik kaybını artırarak çoğalabilir. Bu nedenle, malzeme seçimi ile tasarım ve ömür tahmini çalışmaları için çatlak büyüme davranışı bilgisi gereklidir.

Tabakalar arası ayrılma testlerinde sıklıkla kullanılan test numunesi, Şekil 5.9a'da gösterildiği gibi kirişlerin uçlarına simetrik açılma gerilme kuvvetleri uygulanarak yüklenen

çift-kiriş örneğidir. Bu test, Tip-I kırılma enerjisinin (G_{Ic}) tespit edilmesinde kullanılmaktadır.

Yük-yerdeğiştirme verilerini analiz etmek için temel olarak dört farklı lineer elastik kırılma mekaniği ölçütü vardır. İlk olarak, "alan" ölçütünden G_{IC} değeri şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$G_{IC} = \frac{\Delta U}{B\Delta a} \quad (5.43)$$



Şekil 5.9. (a) Tabakalar arası Tip-I kırılma test numunesi şematik çizimi, (b) yük-yer değiştirme grafiği

B , numune genişliğini, ΔU , Şekil 3.16b'de yer alan yük-yerdeğiştirme grafiğindeki eğrinin altındaki alanı ve Δa ise, çatlakın ilerleme miktarını, örneğin Şekil 5.9a'da a_1 'den a_2 'ye ilerlemesini belirtmektedir. Numuneye yük uygulanması ve yük boşaltımı doğrusal eğim vereceği için, Eş. 5.44, ΔU için sonuç vermektedir:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{1}{2} \{P_1 \delta_2 - P_2 \delta_1\} \quad (5.44)$$

P_1 ve δ_1 , a_1 çatlak uzunluğunda uygulanan yük ve yer değiştirmeyi gösterirken, P_2 ve δ_2 , a_2 çatlak uzunluğundaki yük ve yer değiştirmeyi belirtmektedir. Irwin ve Kies tarafından bulunmuş olan Esneklik (compliance) Ölçütünde kırılma enerji eşitliği ise,

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (5.45)$$

şeklinde belirtilmektedir. C , esnekliği verir:

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (5.46)$$

P ve δ , herhangi bir a çatlak uzunluğunda tespit edilen yük ve yer değiştirmediir. Çatlak uzunluğu a 'ya karşı esneklik C grafiği, bu orandan bulunur. Bu grafiğin eğrisinin polinom ifadesinin çatlak uzunluğuna göre türevi kırılma enerjisi eşitliğine yerleştirildiğinde, kırılma enerjisi tespit edilmiş olacaktır.

Yük Ölçütünde ise, basit kiriş teorisindeki esneklik eşitliği kullanılır:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{2a^3}{3EI} \quad (5.47)$$

I , alan atalet momentidir ve değeri $Bh^3/12$ olduğundan dolayı, esneklik eşitliği,

$$C = \frac{8a^3}{BEh^3} \quad (5.48)$$

olacaktır. E , eğme modülü, $2h$, numune yüksekliği ya da kalınlığıdır. Eş. 5.45 ve 5.47'in birlikte düşünülmesiyle, Eş. 5.49 türetilir:

$$G_{IC} = \frac{P^2 a^2}{BEI} \quad (5.49)$$

Yer değiştirme Ölçütünde, Eş. 5.47'de yükün (P) karşılığı, Eş. 5.49'da yerine konulursa, Eş. 5.50'ye ulaşılır:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2Ba} \quad (5.50)$$

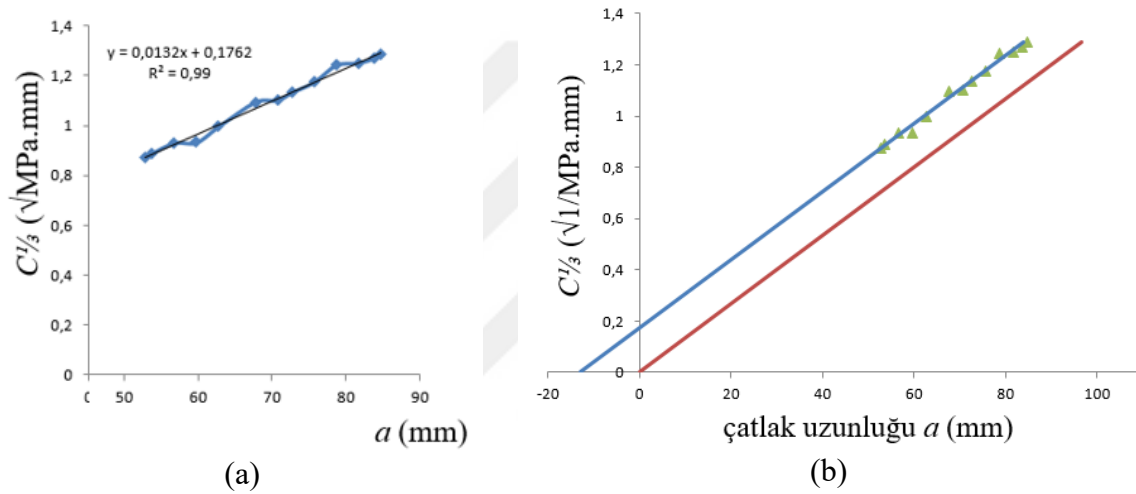
Alan ve esneklik ölçütleri, birbirlerine genelde yakın sonuçlar veririrken, diğer iki ölçütten ayrışırlar. Bu ayrışmalar, çatlak uzunluğu, yer değiştirme ve yük değerinin yanlış okunmasından kaynaklandığı gibi, çatlak ucunda kirişlerin bir eğime sahip olmadıkları ve çökmenin olmadığı prensibine dayanmalarından da kaynaklanmaktadır. Halbuki, çatlak ucuna yakın kısımda kirişlerin bir eğiminin olduğu, izotropik malzemelerde yapılan incelemelerde tespit edilmiştir. Çatlak uzunluğu ilerledikçe artan bir eğme modül değeri yerine sabit bir eğme modül değerine ulaşılması için, çatlak uzunluğu a 'ya düzeltmenin (Δ) ilave edilmesi gerekmektedir:

$$a(\text{gerçek}) = a + \Delta \quad (5.51)$$

Çatlak uzunluğu a 'nın bu düzeltilmiş değeri, Eş. 5.48'de yerine konulursa,

$$C = \frac{8(a+\Delta)^3}{BEh^3} \quad (5.52)$$

Eş. 5.52'ye ulaşılır. Şekil 5.10a'da, testten elde edilen yük P ve yerdeğiştirme δ verisine dayalı olarak bulunan esneklik-çatlak uzunluğu ($C^{1/3}$ - a) grafiği yer almaktadır. Grafikteki noktalardan oluşan yaklaşık doğrunun polinom denklemi, $C^{1/3}$ - a ilişkisinde geçerli kılınsa, olması gereken çatlak uzunluk değerlerine ulaşılır.



Şekil 5.10. (a) $C^{1/3}$ - a grafiği, (b) $C^{1/3}$ - a grafiğinde düzeltme işlemi

Şekil 5.10b'de, yeşil noktalar ve mavi doğru, Şekil 5.10a'daki bilgidir. Dikkat edilirse, mavi renkteki doğru, x -eksenini 0'dan farklı bir değerde kesmektedir. Yukarıda izâh edilen düzeltme Δ , bu kaçıklığı yok eden, yani esneklik-çatlak uzunluğu grafiğindeki doğruyu (0,0) noktasından başlatacak değer olmaktadır.

Bu düzeltme işlemiyle bulunacak kırılma enerjisi, gerçek değere daha da yakın seviyeye ulaşacak, aynı zamanda, çatlak ilerledikçe, eğme modülünde artış yerine sabit bir değer söz konusu olacaktır.

6. MALZEME VE YÖNTEM

Deneysel uygulamalar ve malzeme karakterizasyonu çeşitli bölümler altında belirtilmiştir. İlk bölümde, elektro-eğirme yöntemiyle poliakrilonitril nano elyaf tabakanın üretimi, ikinci bölümde, çok cidarlı karbon nanotüplerin kimyasal olarak yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi çalışmalarına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, numunelerin elle yatırma ve vakum infüzyon ölçütleriyle üretimine, dördüncü bölümde plakaların mekanik test standartlarına göre uygun ebatlara getirilmesi ve testlerin yerine getirilmesi konularına yer verilmiştir.

Üretimlerde kullanılan hammaddelerin isimleri, özellikleri ve tedarik edilme yerleri Çizelge 6.1’de belirtilmiştir.

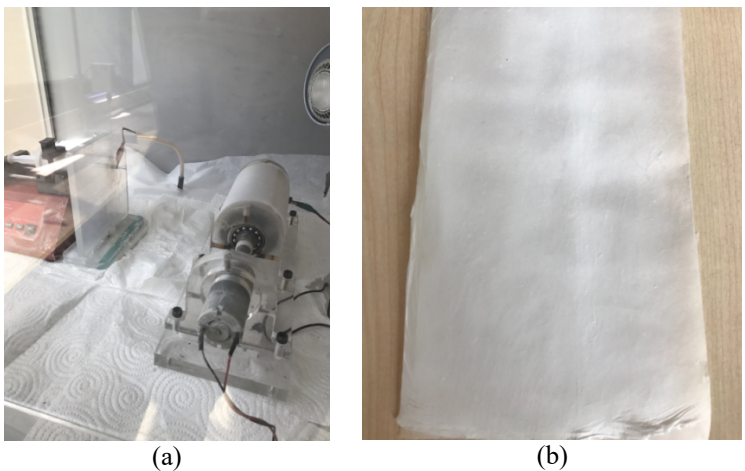
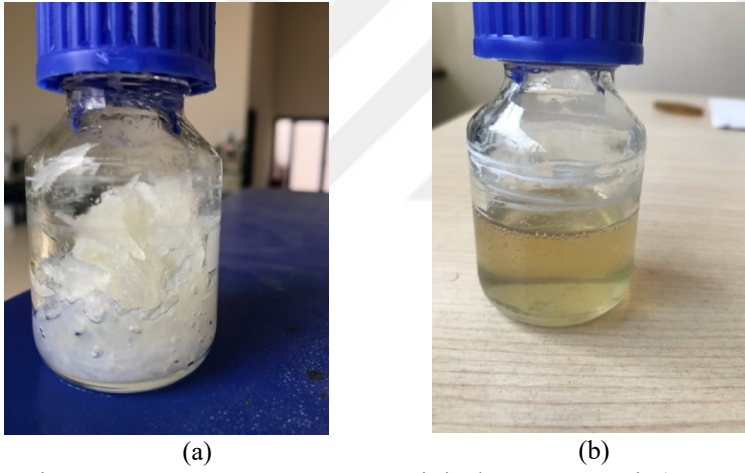
Çizelge 6.1. Üretimlerde kullanılan malzemeler

Malzeme	Tedarik edilen yer	Malzeme	Tedarik edilen yer
Bisphenol-A tipi epoksi reçine (Epikote MGS LR160):	Hexion [197]	Cam kumaş: iki-yönlü, non-crimp, L300 tipi, 300 g/m ² , kalınlık = 0.229 mm	Metax Composite [198]
Amin sertleştirici (Epikote MGS H160):	Hexion [197]	Poliakrilonitril (PAN) (M _w =110 kDa)	Aksa Akirlik [199]
Dimethylformamide (DMF, %99,8)	Sigma Aldrich [200]	ÇCKNT, CNTI13, boy/en: 10-30/10-30 nm, saflık %90, yüzey alanı >200 m ² /g	Grafen Chemical Industry [202]
Katyonik yüzey aktif maddesi (Cetylpyridinium Chloride)	Sigma Aldrich [63]	Hekzametilen diamin (HMDA)	Sigma Aldrich [203]
Silan (OFS-6040)	Biesterfeld [201]		

6.1. Elektro-Eğirme Ölçütüyle Nano Elyaf Tabakaların Üretimi

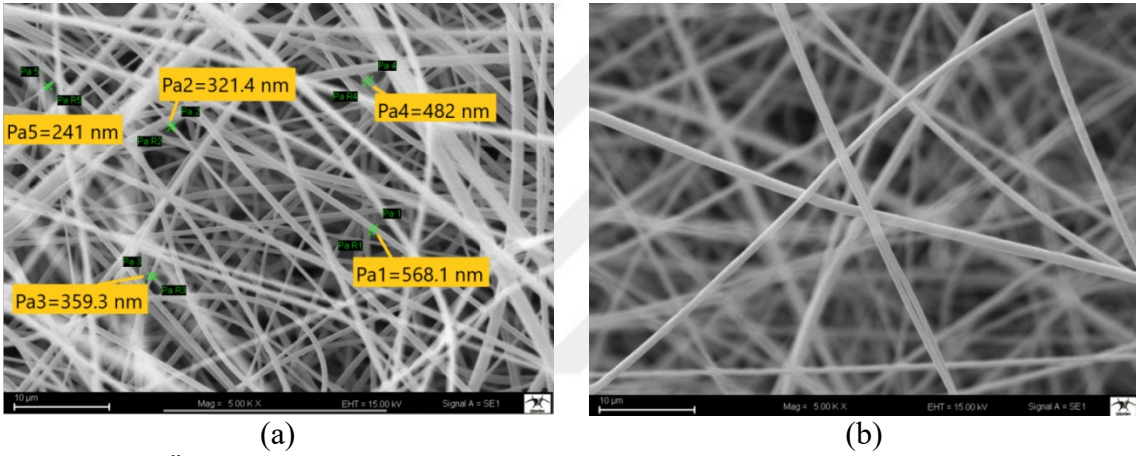
Üretimde kullanılacak olan poliakrilonitril (PAN) hammaddesi, elyaf şeklinde, kopolimer olarak tedarik edilmiştir. Elektro-eğirme yönteminde PAN için gereken en uygun çözücülerden birisi, dimetilformamid (DMF) dir. %13 derişim oranında karışımı hazırlanan solüsyon, ortam sıcaklığında 6 saat süreyle manyetik karıştırıcıda karıştırılarak bekletilmiştir (Resim 6.1). Elektro-eğirme süreci için kullanılan cihaz, en yüksek 50 kV voltaj kapasitesine

sahip, düz yüzeyli, döner tamburlu sistemdir. 150 mm çapındaki döner tamburun yüzeyine sarılmış alüminyum folyo üzerine nano elyaf tabakanın birikmesi hedeflenmiştir. Hazır hâle getirilen çözelti, iç çapı 0,51 mm olan iğneye sahip 10 cc'lik şırınga tüplerine doldurularak, strok hızı ayarlanabilen pompanın haznesine yerleştirilmiştir. Şırınga ucu ile döner tamburun yakın yüzeyi arasındaki mesafe 180 mm'ye ayarlanmış, iki yüzey arasında yaklaşık 20 kV mertebesinde voltaj ayarlanmış, polimer çözeltisinin besleme hızı 0,5 g/saat seviyesinde tutulmuştur (Resim 6.2a). Herbir alüminyum folyo üzerinde, 10 cc hacmindeki şırınga haznesi harcanana kadar nano elyaf tabaka oluşumu sağlanmıştır (Resim 6.2b). Üretim sırasında ortam sıcaklığı yaklaşık 30-35°C, nem oranı %65 oranı olarak tespit edilmiştir. Herbir üretim sonunda alüminyum folyo üzerinde biriken nano elyaf tabakanın ağırlığı ölçülmüş ve ağırlık yoğunluğunun ortalama olarak 17 g/m² seviyesinde olduğu tespit edilmiştir.



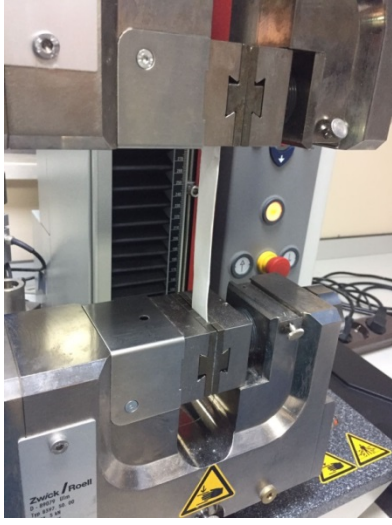
Üretilen nano elyafların SEM analizi yapılarak, nano elyafların yüzey fiziksel yapısı, çap dağılımı ve boncuklaşma oranı incelenmiş, gerçekleştirilen mekanik (çekme) testleri ile, dayanım seviyeleri tespit edilmiştir.

110 000 molekül ağırlığına sahip PAN hammaddesine dayalı nano elyaf tabakadan örnek alınarak, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında SEM görüntüleri alınmıştır. SEM görüntülerinde yapılan incelemede, nano elyafların akma ile oluşan boncuklaşmalardan (bead) yoksun olduğu ve temiz şekilde elyafların olduğu, ayrıca çap aralığının 240-580 nm arasında meydana geldiği tespit edilmiştir (Resim 6.3).

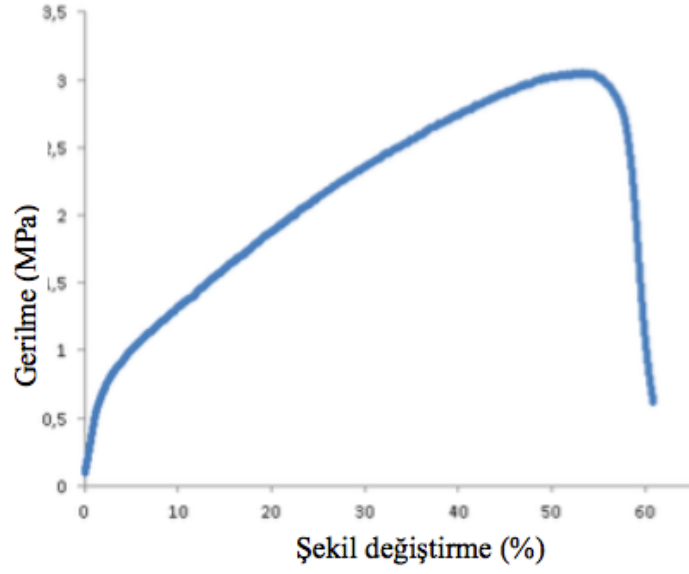


Resim 6.3. a) Üretilen nano elyafların çap dağılımı, b) nano elyaf yüzey SEM görüntüsü

Nano elyaf tabakalardan hazırlanan numunelerin çekme testleri ASTM D638 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Ortalama 128 µ kalınlık ve 22,2 mm genişlikte kesilerek hazırlanan 3 adet nano elyaf numuneler, Zwick/Roell D-89079 Ulm. çekme test cihazında teste tabi tutulmuştur (Resim 6.4a). Çekme dayanımı ve elastisite modülü, sırasıyla 3,49 MPa ve 36,6 MPa olarak tespit edilmiştir (Resim 6.4b).



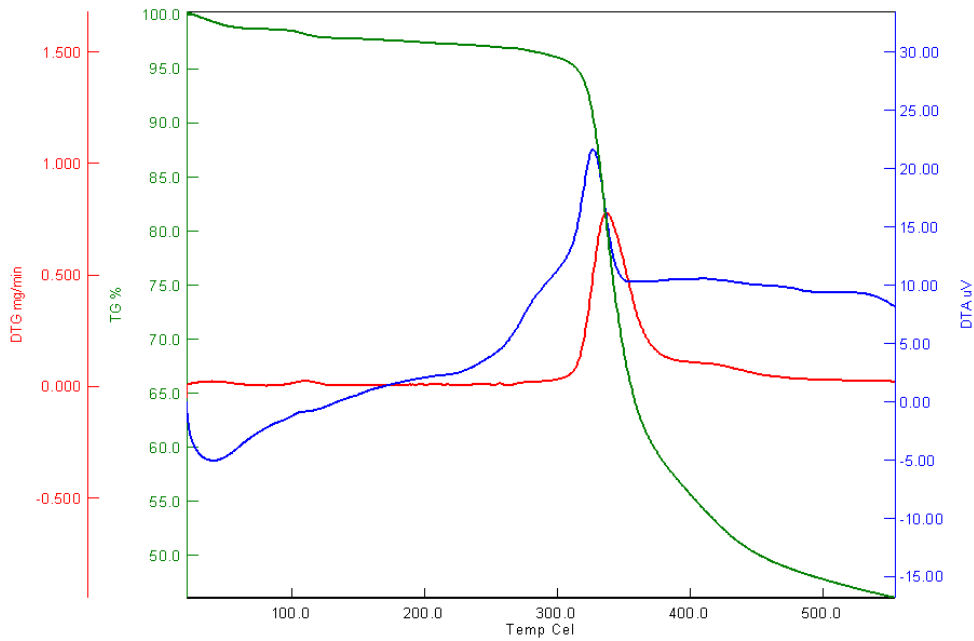
(a)



(b)

Resim 6.4. a) Nano elyaf numunelerin çekme testi sırasındaki görünümü, b) gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) grafiği

Termo-gravimetrik analiz (TGA), numunenin kütlesindeki değişimi sıcaklığın fonksiyonu olarak veren bir tekniktir. Aşağıdaki şekilden de görüldüğü üzere, nano elyafın yaklaşık olarak 337,3°C sıcaklık değerinde, çok hafif bir kademe düşüş sergileyerek kütle kaybına uğradığı görülmektedir (Şekil 6.1).

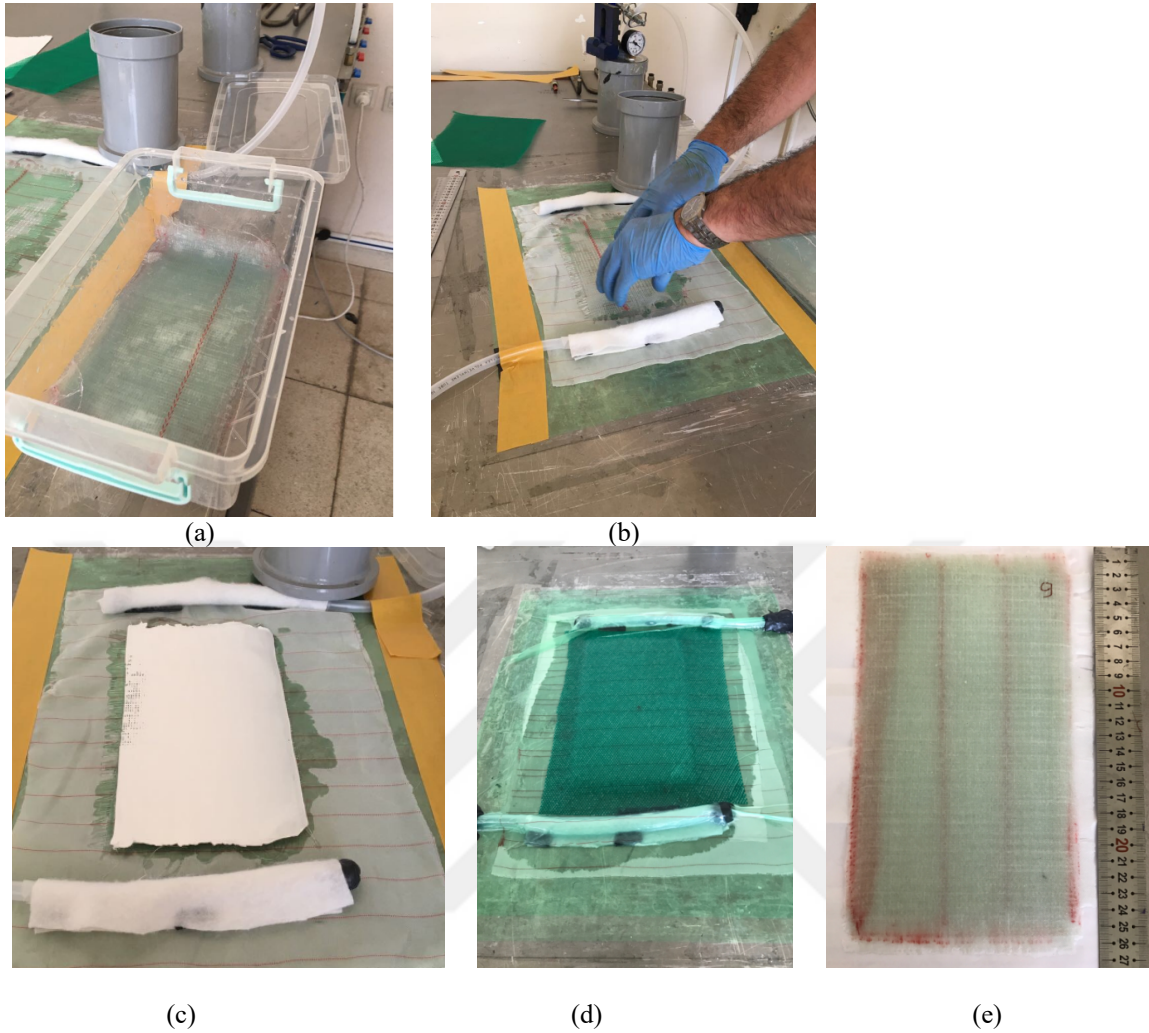


Şekil 6.1. Kullanılan PAN hammaddesinin DTG, DTA ve TG eğrileri

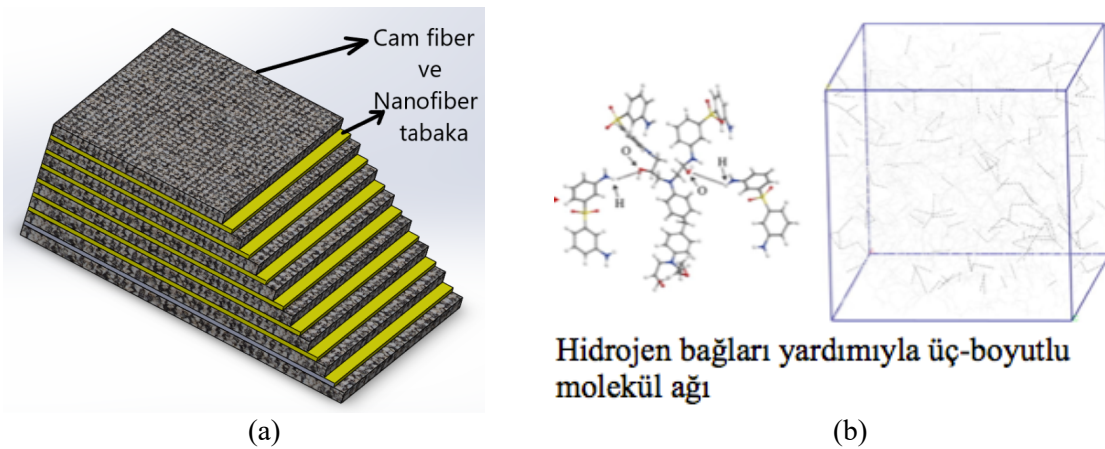
Gerek kalın nano elyaf tabakaların yeteri kadar matris (epoksi) tarafından ıslanması için ve gerekse de çok cidarlı karbon nanotüplerin vakum infüzyon metodunun keesinde filtrelenmemesi için, nano elyaf ve karbon nanotüp içeren numunelerin üretiminde iki adımlı süreç üretimi benimsenmiştir. Sürecin ilk adımında, elyaf doğrultusuna dikkat edilerek 140x240 mm² ölçülerinde kesilmiş olan iki yönlü [0/90] ve kıvrımsız (non-crimp) yapıda E-cam kumaş, daha önceden epoksi üreticisinin talimatına uygun olarak ağırlıkça yüzde oranına göre amin sertleştiricisi katılmış ve karışımı sağlanmış epoksinin yer aldığı kaba (havuza) tek tek daldırılmış ve cam kumaşların ıslanması sağlanmıştır. Nano elyaf tabaka içeren numunelerde, havuza daldırılarak ıslatılmış olan E-cam tabakalar soyma kumaşı üzerine serilmiş ve üzerine nano elyaf katmanı yerleştirilmiştir. Tabakaların vakum infüzyon işlemi öncesinde ıslatılması, nanofiberlerin bir filtre görerek infüzyon sürecinde ıslanmayı engelleyici bir etken oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Numune, ister yüzey fonksiyonelleştirilmesi yapılmış olsun, isterse de saf hâlde kullanılacak olsun, karbon nanotüp içerecekse, karbon nanotüpün etil alkol yardımıyla epoksi içine katılması ve ultrasonik ve manyetik karıştırıcı yardımıyla çözücünün uzaklaştırılarak, epoksi içinde homojen dağılımı sağlanmıştır. Bu haldeki ve ortam sıcaklığına getirilmiş epoksinin amin sertleştiricisi katılarak ve karışımı sağlanarak, havuza boşaltımı yerine getirilmiş ve az önce belirtilen cam elyaf tabakaların ıslatılması prosedürü tekrar edilmiştir (Resim 6.5).

Üretilen numunelerin tümünde sekiz adet E-cam kumaş katman [0/90]_{4s} kullanılmıştır. Hexion firmasının bisfenol-A tipi MGS L-160 epoksi ürünü için gereken amin sertleştiricisi (MGS LH-160) miktarı, ağırlıkça 100:25'dir.

Numunelerde kullanılan nano elyaf tabakaların sayısının etkisinin görülmesi için bazı numunelerde, her bir E-cam tabaka arasına yerleştirilecek tarzda, yani yedi adet nano elyaf yerleştirilirken, tabakalar arası ayrılma testi ve yorulma test numuneleri için sadece simetri noktasına bir adet nano elyaf tabaka konulmuştur (Şekil 6.2a).



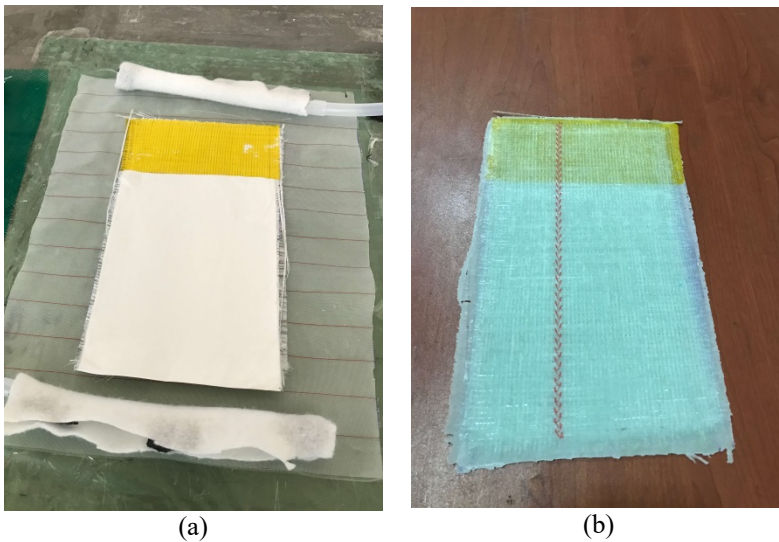
Resim 6.5. Elle yatırma süreç adımları (a) cam elyaf tabakaların epoksi içinde daldırılması, (b) ıslatılan cam elyafların soyma kumaşı üzerine yerleştirilmesi, (c) nano elyaf tabakanın ıslak cam elyaf tabaka üzerine yerleştirilmesi, (d) vakum infüzyon süreci, (e) elde edilen kompozit plaka



Şekil 6.2. (a) Ana elyaf ve nano elyaf tabakalarının dizilimi, (b) epoksi matris üç-boyutlu moleküler yapı [204]

Sürecin ikinci ve son adımında ise, vakum infüzyona geçilmiştir. Vakum basıncı 400 mmHG olan süreçte, E-cam tabakalar ıslanmış hâlde bulunmasına rağmen, nano elyaf tabakaların tam olarak ıslanması ve yeterli derecede matris yapının oluşabilmesi için, vakum ortamına, amin sertleştiricisi ilave edilmiş olan toplam 125 g ağırlığında epoksi beslemesi gerçekleştirilmiştir. Vakum basıncı bu hâlde iken yaklaşık olarak 15 saat bekletilerek ilk kürlemenin gerçekleşmesi sağlanmıştır. Şekil 6.2b'deki gibi, matris yapıda üç-boyutlu molekül zincirlerinin oluşumu için gerçekleştirilen son kürleme 8 saat süreyle 82°C sıcaklık değerinde fırında gerçekleştirilmiştir.

ASTM D5528-13 standardına [205] uygun olarak Tip-I tabakalar arası kırılma enerjisinin görülmesi için hazırlanan kompozit plakalarda yapay çatlak oluşumu için, elle yatırma süreci sırasında, kompozit plakaların simetri katında, plakanın bir kenarında 140 mm plaka genişliğinde ve 65 mm uzunluğunda 25 mikron kalınlığında Kapton film yerleştirilmiştir. Nano elyaf tabakanın kırılma tabakalar arası ayrılma etkisinin görülmek istendiği numunelerde, Kapton filminin bitiminden başlayacak boyutta kesilip hazırlanan nano elyaf tabaka da simetri katına yerleştirilmiştir (Resim 6.6).



Resim 6.6. a) Nano elyaf ve nanoparçacık içeren numunelerde elle yatırma sonrası vakum infüzyona başlanması, b) vakum infüzyon sonrası elde edilen numune

Çeşitli ilavelerle üretilen kompozit plakalarda, sadece sekiz kat E-cam tabakadan oluşan E-cam/epoksi plakaların kalınlığı yaklaşık 2,6 mm seviyesinde ölçülürken, yedi kat nano elyaf tabaka içeren plakaların kalınlığı yaklaşık olarak 3,9 mm seviyesinde tespit edilmiştir. Tek nano elyaf tabaka içeren numunelerin kalınlığı ise 3,3 mm seviyesinde ölçülmüştür. Sadece

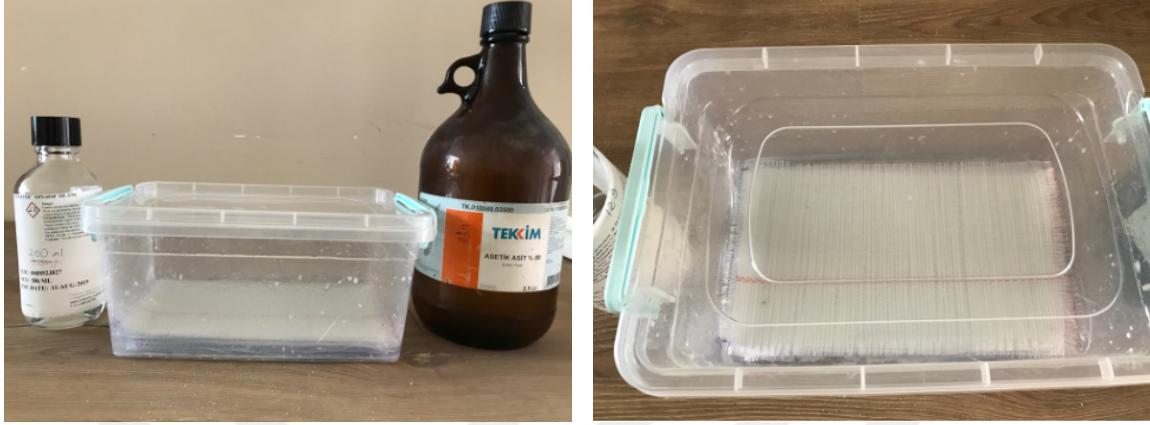
E-cam elyaf tabakaları barındıran numunelerin vakum infüzyon süreci sonunda elyaf hacim oranları %49 seviyesinde tespit edilmiştir. Yedi kat nano elyaf tabaka içeren numunelerde cam elyaf tabaka ve nano elyaf tabaka hacim oranı, sırasıyla %33,7 ve %2 seviyelerinde hesaplanmıştır. Tip-I tabakalar arası ayrılma test numunelerinde hacim oranlarına bakıldığında, cam elyaf ve nano elyaf hacim oranları sırasıyla %42 ve %0,3 oranlarında tespit edilmiştir.

6.2. Cam Elyaf Yüzeyinin Silan ile Fonksiyonelleştirilmesi

Organik yapıdaki reçinelerin cam elyaf gibi inorganik yapıdaki güçlendirme elemanları ile ara yüz bağlarının kuvvetlendirilmesinde kullanılacak silan çeşidi, matris olarak kullanılan reçinenin cinsine göre değişiklik göstermektedir. Bisfenol-A tipi epoksinin matris olarak kullanıldığı numunelerde, fonksiyonelleştirilmiş E-cam elyaf tabakaların etkisinin görülmek istendiği numunelerde, Biesterfeld/Dow Chemical'dan tedarik edilen γ -glycidoxypropyltrimethoxysilane (γ -GPS) esaslı, Xiameter OFS-6040 ticari kodlu ürün kullanılmıştır. Epoksi reaktivitesi yüksek olan bu ürün, glisidoksi reaktiviteli organik grupla beraber, trimetoksil inorganik grubu içinde barındıran, böylece organik ve inorganik yüzeylerle güçlü silan bağları oluşturabilmektedir. Glisidoksi-fonksiyonel grup, birçok organik polimerle reaksiyona girebilme yeteneğine sahiptir.

Xiameter OFS-6040 silan kimyasalı, cam elyaf gibi inorganik yüzeylere %0,1-0,5 derişim oranlarında uygulanabilmektedir. İlk önce, bir havuza konulan saf su, pH seviyesi 4,5 olacak şekilde asetik asit kullanılarak, silan reaksiyonu için uygun ortama getirilmiştir. Asetik asitin saf suya damlatılması sonrası gerçekleştirilen hafif karışım sonrası, asidik suya %0,3 oranında silan eklenmiş ve hidroliz olmadan önce, üreticinin tavsiyesine uygun olarak 15 dakika süreyle karıştırılmıştır. Silan derişiminde, üreticinin belirttiği oranın üzerindeki silan miktarı, silanın kararlı olmasını engellemekte ve miktarın fazlalığından dolayı, polisiloksan hâlde yağlı tabakanın çözeltilen ayrışımına neden olmaktadır. Bu karışımdan sonra, numune için uygun ölçüde kesilmiş cam elyaf tabakaların bu çözeltiliye daldırılması ve 1 saat süreyle reaksiyon için beklenilmesi işlemine yer verilmiştir (Resim 6.7). Cam elyaf tabakaların durgun hâlde bu çözeltili havuzunda bekletilmesi işlemi sonrasında, cam elyaf tabakalar çözeltilen alınmış ve 30 dakika süreyle 105°C sıcaklıkta fırında kurutulmuştur. Kurutma

işlemden sonra, üretimde kullanılacağı zamana kadar, ortamın rutubetini çekmemesi için kapalı bir kap içerisinde bekletilmiştir.



Resim 6.7. a) Asetik asit ile pH 4,5 seviyesinde çözeltinin hazırlanması, b) silan eklenmiş çözeltiliye cam elyafların yatırılması

6.3. Karbon Nanotüplerin Saflaştırılması ve Amin ile Fonksiyonelleştirilmesi

Epoksi miktarının ağırlıkça %0,1 oranında çok cidarlı karbon nanotüp içeren numunelerde, yüzey fonksiyonelleştirmenin etkisinin görülmesi için, bazı numuneler için karbon nanotüpte hiçbir işlem gerçekleştirilmemiş, diğerlerinde ise yüzey fonksiyonelleştirme işlemi uygulanmıştır. Fonksiyonelleştirme iki adımda gerçekleştirilmiştir. Saflaştırma adı verilen ilk adımda, nitrik asit/sülfürik asit hacimce 1:1 oranında karıştırılmış ve bu karışıma karbon nanotüp eklenerek 80°C sıcaklıkta, 30 dakika süreyle ultrasonik banyoda tutularak karıştırılmıştır (Resim 6.8a). Bu sürenin sonunda, karışım banyodan alınarak, saf su ile hem soğutulmaya ve hem de pH derecesi artırılmaya çalışılmıştır (Resim 6.8b). Yaklaşık olarak ortam sıcaklığına indirgenen fakat halen pH derecesi yüksek olan seyreltik asit karışımından karbon nanotüplerin filtrelenmesi için, gözenek çapı 0,2 μm olan filtre kâğıdı kullanılmıştır (Resim 6.9a). Filtre kâğıdı üzerinde biriken karbon nanotüpler, saf su ve etil alkol kullanılarak tekrar bir kaptaki biriktirilmiştir ve tekrar tekrar yıkama gerçekleştirilerek filtrelenmiş ve bu işleme pH seviyesi 7 olana kadar devam edilmiştir. Saflaştırma işleminden sonra, sürecin ikinci adımı olan amin ile fonksiyonelleştirme işlemine geçilmiştir (Resim 6.9b). Bunun için, saflaştırma işleminin sonunda asidik etkiden uzaklaştırılan karbon nanotüplerin her bir 0,2 gramı için, ağırlıkça %5 derişimdeki 200 ml hekzametilen diamin (HMDA) çözelti hazırlanmış ve karbon nanotüpler, bu çözeltiliye katılmış ve bu hâlde

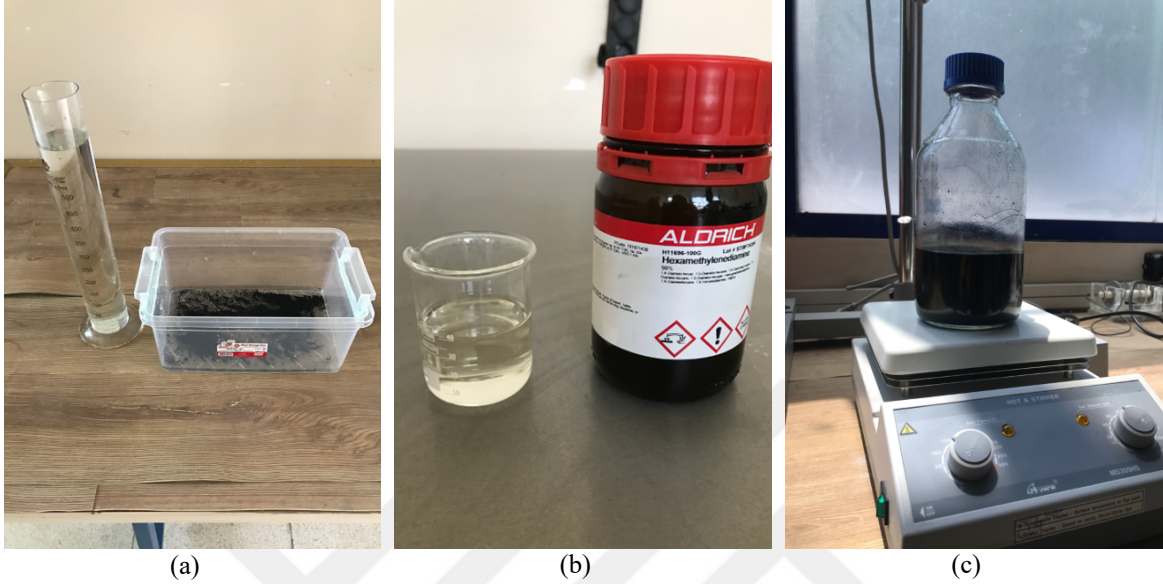
ultrasonik banyoda 25°C sıcaklıkta, 2 saat süreyle karıştırılmıştır. Bu işlemten sonra, cam beher içinde bulunan çözeltinin beher kapağı kapatılarak, manyetik karıştırıcıda 120°C sıcaklıkta beş gün boyunca karışımı sağlanarak, saflaştırılan karbon nanotüplerin amin ile yüzey fonksiyonunun gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir (Resim 6.9c). Beş günlük karıştırma işleminden sonra, saflaştırma sürecinde gerçekleştirilen nötralizasyon ve filtrasyon çalışmaları tekrar gerçekleştirilerek, karbon nanotüpler amin karışımından ayrılmış ve pH 7 seviyesine getirilmiştir (Resim 6.10). Bundan sonra, cam beher içinde bir miktar çözelti içinde bulunan karbon nanotüplerin fırında kurutulması adımına geçilmiştir. 100°C sıcaklıkta kurutulmuş karbon nanotüpler arasında meydana gelen topaklaşmanın ortadan kaldırılması için, ağzı kapalı cam beher içine alınan kuru hâldeki karbon nanotüplerin manyetik karıştırıcıda karışımı gerçekleştirilmiştir.



Resim 6.8. a) Sulfirik ve nitrik asidin 1:1 oranında karıştırılması, b) KNT'lerin asit ile saflaştırılması sonrası saf suyla nötralizasyon işlemi

Saflaştırma ve fonksiyonelleştirme işlemine tabi tutulmuş olsun ya da olmasın, karbon nanotüp içeren numunelerde, karbon nanotüplerin matris içinde homojen dağılımının sağlanması için katyonik yüzey aktif maddesi ailesinden CetylPyridinium Chloride (CPC) kullanılmıştır. Bunun için, 50 g ağırlığında etil alkol içeren 250 cc hacmindeki cam behere 0,21 g CPC ve 0,25 g karbon nanotüp konulmuş ve ultrasonik banyoda 25°C bir saat süreyle karışımı sağlanmıştır (Resim 6.11a ve b). Daha sonra, bu çözeltiliye 150 g epoksi ilave edilmiş ve 30 dakika süreyle banyoda karışımına devam edilmiştir. Sonrasında, 50°C sıcaklıkta 6 saat süreyle manyetik karıştırıcıya konularak çözücünün tamamen buharlaştırılması sağlanmıştır. Kompozit plaka üretim sürecinin ilk adımı olan elle yatırma ve sonrasında devreye alınacak vakum infüzyon adımlarının hazırlığı tamamlandıktan sonra, ortam sıcaklığında bulunan cam beher içindeki çözeltiliye 37,5 g amin bazlı sertleştirici eklenmiş ve

ortam sıcaklığında beş dakika süreyle manyetik karıştırıcıda karıştırılmış ve elle yatırma işleminde havuz görevi görecek kaba boşaltılmıştır (Resim 6.11c).



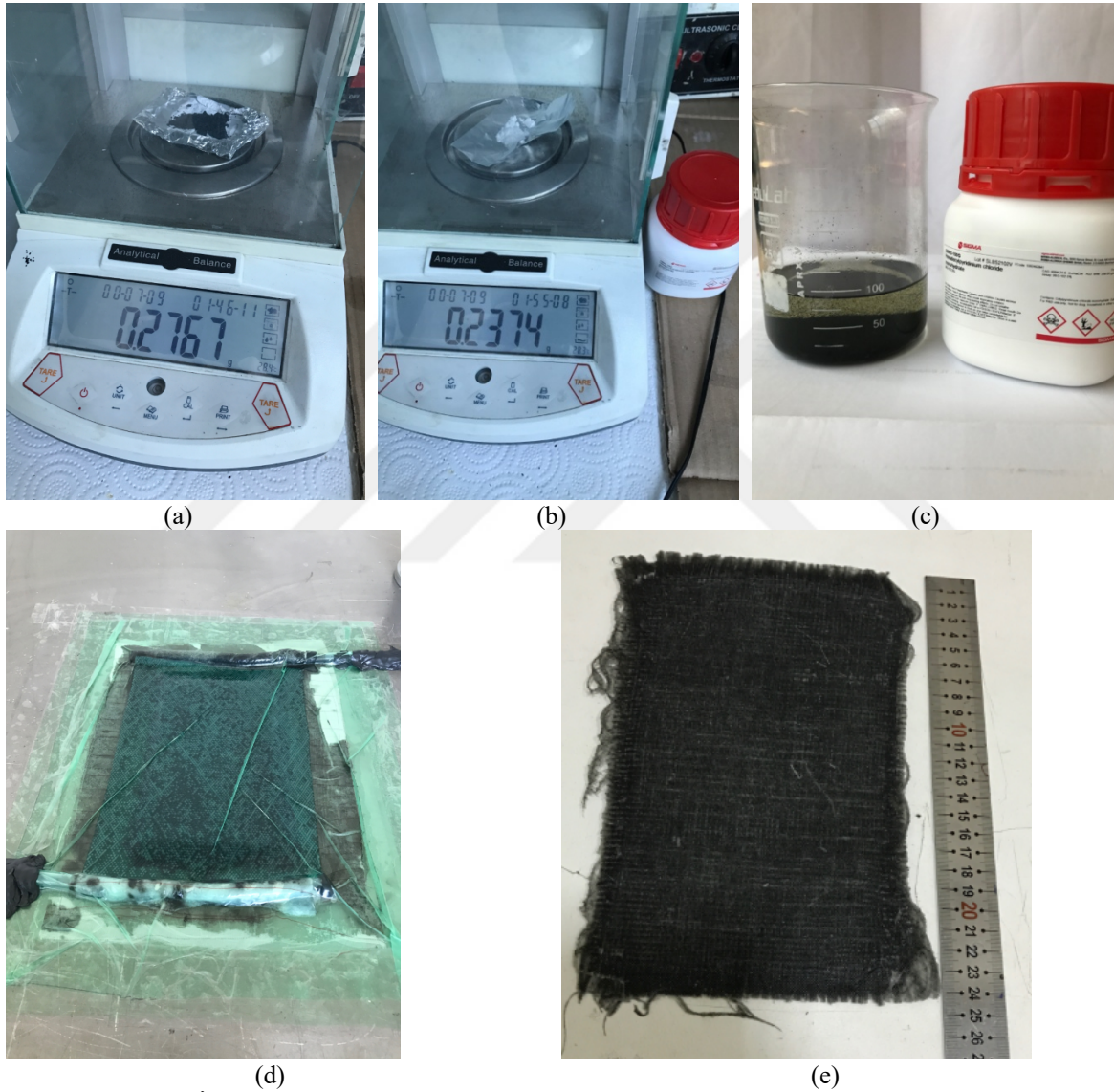
Resim 6.9. a) KNT'lerin saf suyla nötralize edilmesi, b) heksametilen diamin çözeltisinin hazırlanması, c) manyetik karıştırıcıda KNT'lerin amin ile reaksiyonunun gerçekleşmesi



Resim 6.10. Beş gün 120°C'de amin ile fonksiyonelleştirilen KNT'lerin ayrıştırılması

E-cam tabakaların bu havuza yatırılması ve matris tarafından ıslatılması sonrası, vakum infüzyon sürecinin soyma kumaşı üzerine sırasıyla yerleştirilmesi işlemi yerine getirilmiştir. Burada, doğrudan vakuma alınmama sebebi, vakum infüzyon yönteminde yer alan spiral hortum üzerinde sarılı bulunan keçenin karbon nanotüpler için filtre görevi görmemesi

içindir. 400 mmHg seviyesinde gerçekleştirilen vakum ortamı sırasında, ilave olarak 100 g epoksi ve 25 g sertleştiriciden oluşan karışım, infüzyon süreci sırasında ihtiyaç duyacağı miktar olarak hesap edilmiş ve dolayısıyla bu karışım infüzyona dahil edilmiştir. Resim 6.11d ve Resim 6.11e’de, sırasıyla, vakum infüzyon süreci ile süreçten çıkmış kompozit plakanın görüntüsü bulunmaktadır.



Resim 6.11. a) İnfüzyon sürecine dahil edilecek KNT'lerin gramajının ayarlanması, b) CPC'nin gramajının ayarlanması, c) KNT'lere amin ilavesi, d) vakum infüzyon süreci, e) üretilen nanokompozit plaka

E-cam/epoksi temelli tabakalı kompozit yapıda poliakrilonitrilden üretilmiş nano elyafın etkisi, cam elyafların silan ile işlem görmesinin etkisi, çok cidarlı karbon nanotüpün kationik yüzey aktif maddesi ile homojen dağılımının sağlanarak etkisinin görülmesi ve

karbon nanotüpün amin ile yüzeyinin fonksiyonelleştirilmesinin etkisinin kırılma mekaniği açısından görülmesi amaçlanmış, aynı zamanda her bir eklenti ya da işlemin getireceği olumlu ya da olumsuz etkilerin görülmesi için ara üretimler gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit plakaları çeşitleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Üretilen numunelerin kodları ve üretim süreçleri

Numune kısaltması	Tanım	Üretim yöntemi
<i>R</i>	Referans	Vakum infüzyon (VARTM)
<i>R+NF</i>	7 kat nano elyaf takviyeli numune	Elle yatırma (EY)+VARTM
<i>R+CNT</i>	ÇCKNT takviyeli numune	EY+VARTM
<i>R+NF+CNT</i>	ÇCKNT eklenmiş, 7 kat nano elyaf tabaka takviyeli numune	EY+VARTM
<i>R(F)</i>	Silan ile işlem görmüş numune	VARTM
<i>R(F)+NF</i>	7 kat nano elyaf takviyeli, silanla işlem görmüş numune	EY+VARTM
<i>R(F)+CNT</i>	ÇCKNT takviyeli, silanla işlem görmüş	EY+VARTM
<i>R(F)+CNT(F)</i>	Fonksiyonelleştirilmiş ÇCKNTs takviyeli, cam elyafları silanla işlem görmüş numune	EY+VARTM
<i>R(F)+NF+CNT(F)-1 kat</i>	Fonksiyonelleştirilmiş ÇCKNT takviyeli, cam elyafları silanla işlem, simetri katında nano elyaf tabaka bulunan numune	EY+VARTM
<i>R(F)+NF+CNT(F)-7 kat</i>	Fonksiyonelleştirilmiş ÇCKNT takviyeli, cam elyafları silanla işlem, her cam elyaf tabaka arasında nano elyaf tabaka bulunan numune	EY+VARTM

6.4. Mekanik Deney Numunelerinin Hazırlanması

Cam elyaf ve epoksi temelli kompozit plakalarda, matrisin yüksek oranda PAN nano elyafyla doyurulması, katyonik yüzey aktif maddesi (CPC) kullanılarak homojen dağılımı sağlanmış az orandaki (ağırlıkça %0,1) çok cidarlı karbon nanotüp eklentisi, karbon nanotüpün fonksiyonelleştirilerek kompozit yapıya eklenmesi ve cam elyafların silan kimyasalı ile matrise bağlantısının kuvvetlendirilmesi gibi değişkenlerin Tip-I çekme ve 3-nokta (simetrik) eğme kırılma tokluklarına etkisi, bunun yanında, 8-kat cam elyaf içeren ve simetri katında nano elyaf tabaka içeren numunelerde Tip-I tabakalar arası kırılma enerjisinin tespit

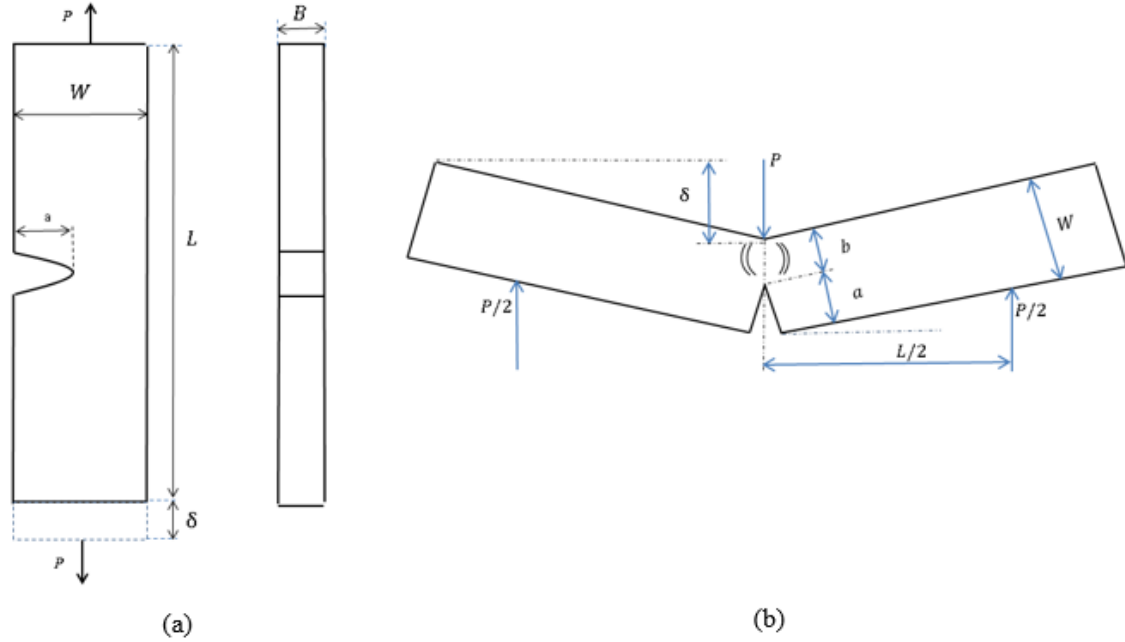
edilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, üretilen plakalar, gerçekleştirilecek testlerin standartlarına dayalı olarak numune boyutlarına getirilmiş ve yapay çatlaklar dremel kullanılarak hazırlanmıştır.

Üç-nokta eğme testinin çekme testine ilave olarak kullanılmasının nedeni, tabakalar arasındaki bağlantı kuvvetinin test edilmesi içindir. Üretilen tabakalı kompozit numunelere tabakalara paralel yönde uygulanacak eğme kuvveti, meydana getireceği moment vasıtasıyla tabakaları eğerek birbirinden ayırmaya zorlayacaktır. Çekme testinde ise, tabakalar birbirlerine göre paralel çalışacağı için, tabakalar arası ayrılma kuvvetinin ölçülmesi, üç-nokta eğilmedeki gibi gözlemlenmesi kolay sonuç vermeyecektir.

140x240 mm² boyutlarındaki kompozit plakalar, hem elmas uçlu kesici ile test numune ölçülerine getirilmesi ve hem de çekme, üç-nokta simetrik eğme testleri ve de Tip-I tabakalar arası ayrılma testlerinin yapılması için, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Teknokent Kampüsü içerisinde yerleşkesi bulunan İnnoma Test Hizmetleri Ltd. Şti'ne gönderilmiştir. Burada, ilgili test standartlarına göre kesilerek hazırlanan numunelerde, yine elmas kesici uç ile tek kenarında yapay çentik oluşturulmuştur. Çentik uçlarında yapay çatlak oluşumu için 0,45 mm kalınlığında ve 1,0 mm derinliğinde dremel kullanılmıştır. Tek kenar çatlağına sahip çekme numunelerinde çatlak uzunluğunun numune genişliğine oranı 0,20-0,30 aralığında hazırlanmıştır (Şekil 6.3a). Tek kenar çatlağına sahip üç-nokta eğme numunelerinde bu oran aralığı 0,40-0,60 seviyesinde olmuştur (Şekil 6.3b). Çekme testleri ASTM D3039-17 [206], 3-nokta eğme testleri ASTM D790-17 [207] standartlarında gerçekleştirilmiştir. Bazı numunelerde çekme testleri, hem çentiksiz ve hem de tek kenar çatlağına sahip numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çentiksiz numuneler üzerinde yapılan çekme testleri 'çentiksiz', çentikli numuneler üzerinde yapılan çekme testleri 'SENT' olarak kısaltılmıştır.

Çentiksiz ve tek kenar çatlağına sahip çekme numunelerinde numune şerit genişliği W yaklaşık olarak 25 mm, şerit uzunluğu L 200 mm olarak hazırlanmıştır. 3-nokta simetrik eğme numunelerinde L_0 uzunluğu 100 mm, iki mesnet arasındaki mesafe L_0 64 mm olarak alınmıştır. Numune yüksekliği W , 12-15 mm aralığında değişim göstermiştir. Bu şekilde, L/W oranı, simetrik eğme test numuneleri için 4 olarak düşünülmüştür. Test cihazının piston

hızı 2 mm/dakika olarak ayarlanmıştır. SENB numunelerinin çökme değeri, piston yerdeğiştirmesinden elde edilmiştir.



Şekil 6.3. (a) SENT ve (b) SENB testlerinin şematik görünümü

Tabakalar arası kırılma enerjisinin ölçülmesi için hazırlanan 200x25 mm² boyutlarındaki test numuneleri ASTM D5528 standardına göre hazırlanmış ve testleri gerçekleştirilmiştir. 2h kalınlığındaki şeritlerin üretimi sırasında simetri katına Kapton film yerleştirilerek yapay çatlak oluşturulmuş, şeritlerin en üst ve en alt tabaka yüzeyine tabaka arasında yük uygulayarak çatlak ilerletmek için alüminyum malzemeden yükleme yuvaları yapıştırılmıştır. Yükleme noktası ile yapay çatlakın uc noktası arasındaki mesafe a_0 , değişiklik göstermekle beraber ortalama 50 mm olarak ayarlanmıştır.

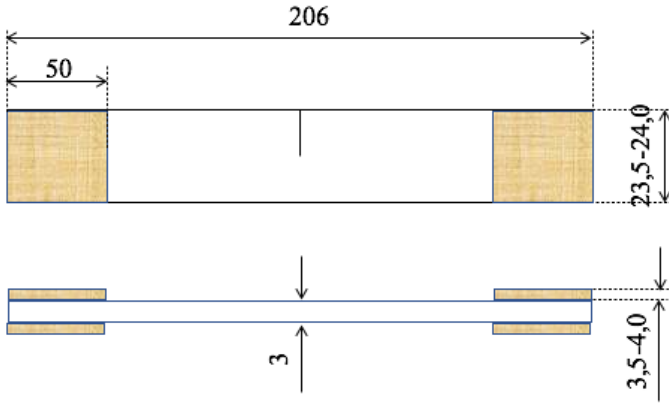
Her bir numune için 5 adet hazırlanan şerit numuneler, 5 kN kapasiteli Schimadzu marka çekme cihazı kullanılarak 5 mm/dakika çekme hızı ile test edilmiştir. Tabakalar arası çatlak ilerleme hızının ölçüldüğü bu testte uygulanan yüke karşılık ağız açıklığı ve çatlak ilerleme miktarı ölçülmüş ve tablolar hâlinde elde edilmiştir.

6.5. Korozyonlu Yorulma Testine Girecek Numunelerin Hazırlanması

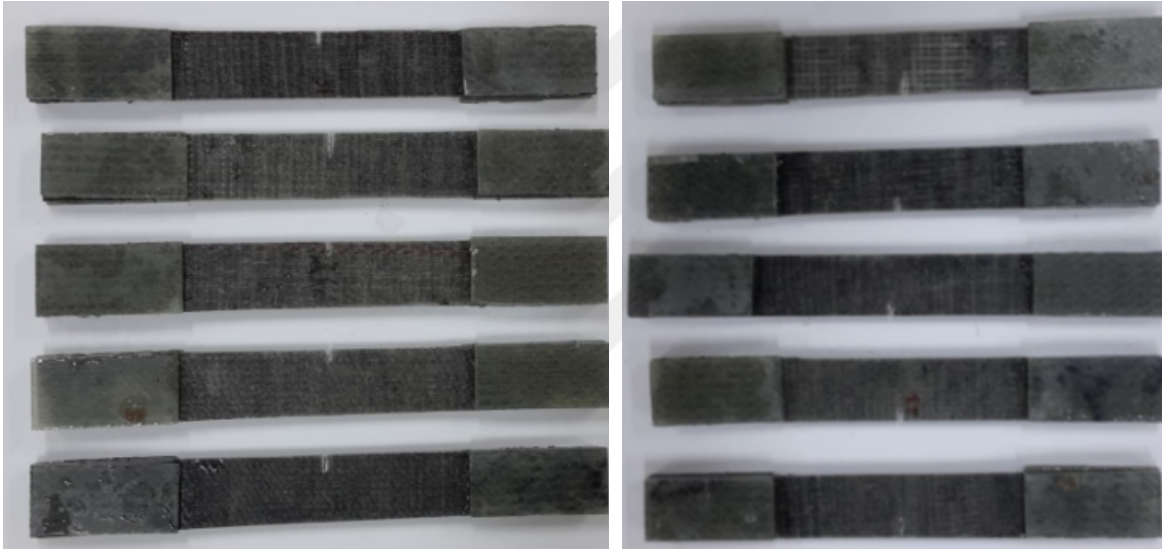
Simetri katında bir adet poliakrilonitril nano elyaf tabaka bulunan $R(F)+NF+CNT(F)-1$ kat kompozit numunenin şematik çizimi Şekil 6.4'de verilmiştir. Numunelerin bir kısmı korozyona uğratılmadan statik ve dinamik testlere tabi tutulmuştur (Resim 6.12). Yorulma testleri ASTM D3479-19 [208] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Diğer numuneler, ASTM D543-20 [209] standardına göre %10 derişimde sodyum hidroksit (NaOH) çözeltilisine yatırılarak bazik ortamda 4 haftalık koroziif sürecine başlanmıştır (Resim 6.13). Elmas kesici ile istenilen ebada getirilen ve tek kenar çentiğine sahip numuneler statik ve dinamik teste tabi tutulacağı için, tezgâh çenesinden sıyrılma ve numuneye zarar gelmemesi için, çenelerin kavrayacağı uc kısımlara numune genişliğinde ve 50 mm uzunluğunda kompozit plakalar yapıştırılmıştır. 4 haftalık korozyon sürecinde numunelerin ağırlık değişimlerini doğru gözlemlemek için, koruyucu plaka (end tab) bulunmayan dört adet numune de aynı koroziif ortamda tutulmuş ve ağırlık ölçümleri bu kontrol numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir (Resim 6.14). 32A, 32B, 32C ve 32D kodlarına sahip bu numuneler ilk aşamada 40°C sıcaklıkta 6 saat süreyle bekletilmiş, ağırlıkları ölçülmüş ve bu kurutma işleminde sonra koroziif ortama bırakılmıştır. Numunelerin günlük olarak ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 4 haftalık süreç boyunca yapılan ağırlık ölçümlerinde, numuneler korozyon banyosundan çıkartılmış, saf suyla durulanmış, kuru bez ile kurutulmuş ve 15 dakikalık kurutma işleminin ardından hassas terazide tartılmış ve ilk ağırlığına göre değişimleri kaydedilmiştir. Numunelerin suyu bünyesine alma miktarının tayininde Eş. 6.1 kullanılmıştır:

$$\% \text{ değişim} = \frac{\text{Son ağırlık} - \text{İlk ağırlık}}{\text{İlk ağırlık}} \times 100 \quad (6.1)$$

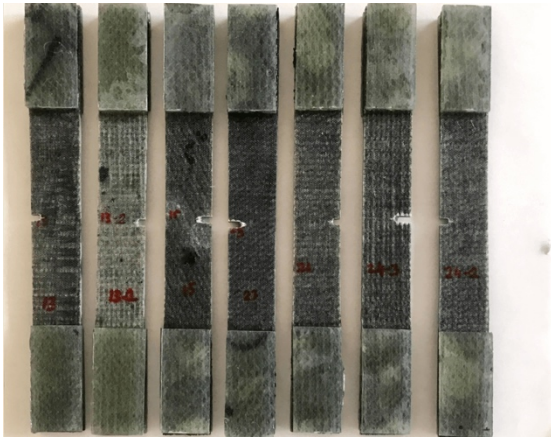
Bu numunelerden 32A kodu, bir haftalık koroziif maruziyet sonrasında, 32B, iki, 32C, üç haftalık ve 32D kod numarasındaki numune ise dört haftalık maruziyet sonrasında çekme testine tabi tutulmuştur. Böylece, numunelerin mekanik değerlerinde yarattığı tahribatın haftalık olarak ölçülmesi planlanmış ve yerine getirilmiştir.



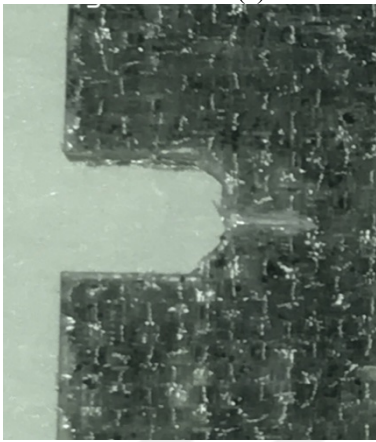
Şekil 6.4. Korozyonlu yorulmaya girecek numunelerin şematik görünümü



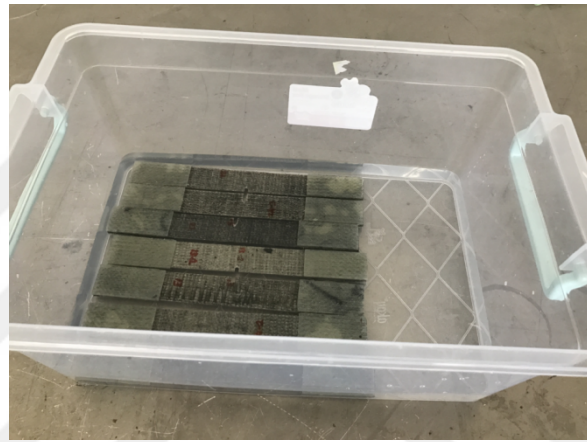
Resim 6.12. Korozyona uğratılmadan yorulma testine tabi tutulan $R(F)+NF+CNT(F)$ numuneleri



(a)

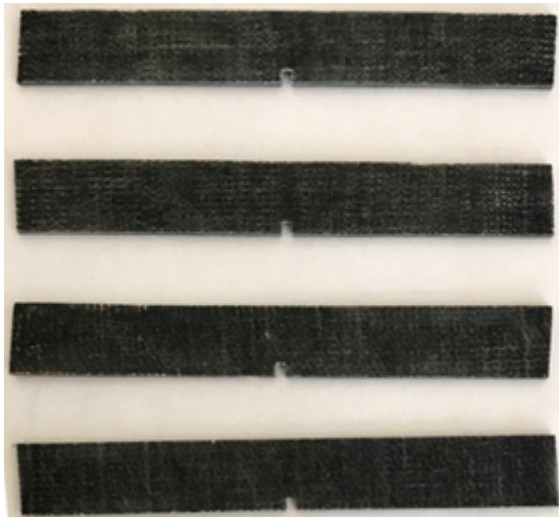


(b)



(c)

Resim 6.13. %10 NaOH derişimde korozyona uğratılan ve yorulma testine tabi tutulan numuneler, (a) numunelerin gerçek görünüşü, (b) çentiğın detay görünümü, (c) numunelerin korozif ortamda bekletilmesi



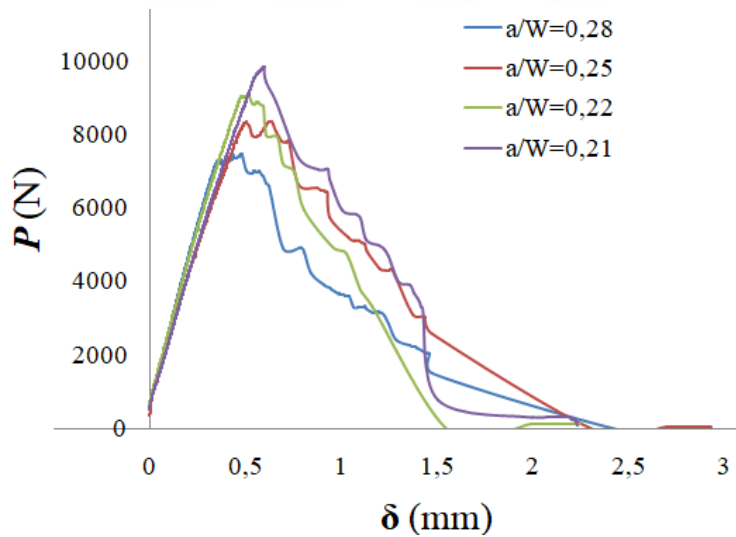
Resim 6.14. Korozyona uğratılan ve ağırlık ve boyut değişimi ölçülen ve sonrasında çekme testine tabi tutulan kontrol (32 A, B, C, ve D) numuneleri

7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

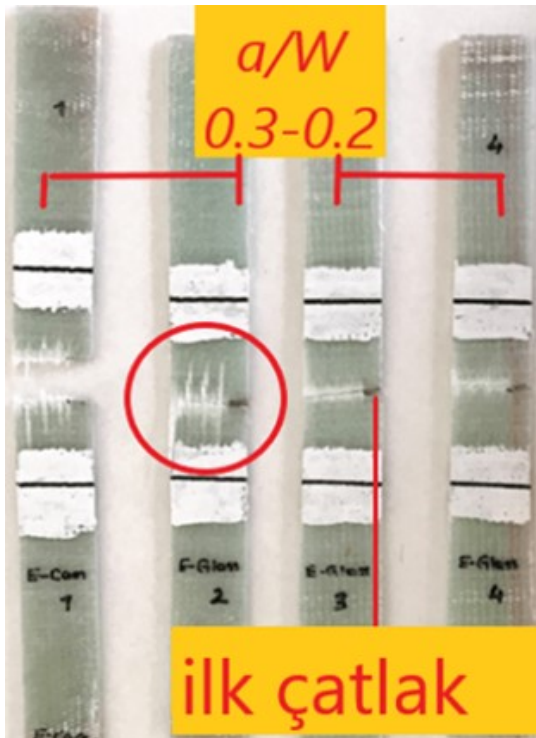
7.1. Tek Kenar Çatlağına Sahip Çekme Deney Sonuçları

Tek kenar çatlağına sahip numunelerin çatlak uzunlukları, numune genişliğine oranı (a/W) 0,2-0,3 aralığında olacak şekilde ayarlanmıştır. Bunun nedeni, numunelerin net kesitinde basma gerilmesinin oluşmaması içindir. Gerek elyaf-matris arayüz güçlendirmesi ve gerekse de matrise karbon nanotüp ve nano elyaf katkısı gerçekleştirildiğinde, testlerin yük-yerdeğiştirme grafiklerinde hemen hemen tek bir eğimin meydana geldiği ve numunelerin en yüksek yüke kadar rijitliklerini muhafaza ettikleri görülmüştür.

Referans niteliği (R) taşıyan katkısız hâldeki dört adet numunenin yük-yerdeğiştirme grafiklerinde, çatlak uzunluk oranı (a/W) nispetinde rijitlik ve en yüksek yük değişiminin olduğu görülmektedir (Şekil 7.1 ve Çizelge 7.1). Çatlak uzunluk oranında özellikle 0,3 değerine yaklaşıldığında, çatlak ilerleme yolunda, karşı kenara doğru boyuna yöndeki elyafların eğme momenti etkisiyle matristen ayrılma yaptıkları görülmektedir (Resim 7.1).



Şekil 7.1. Referans (R) numunelerin çekme testi yük-yer değiştirme grafikleri

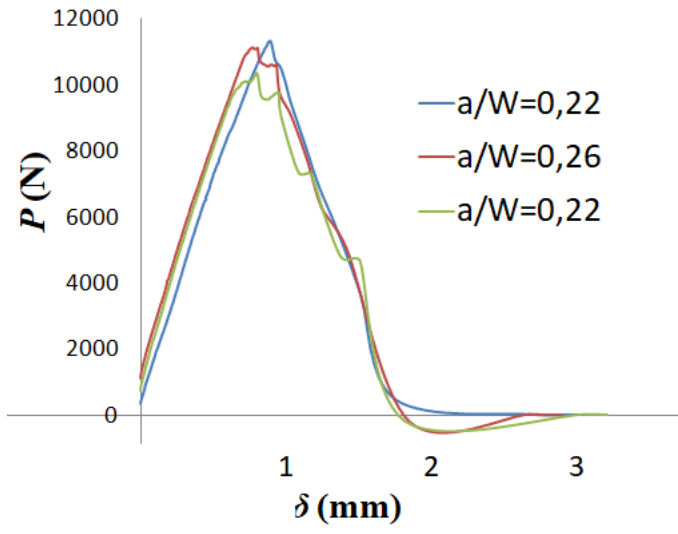


Resim 7.1. $a/W=0,2$ ve $0,3$ çatlak uzunluk oranlarındaki SENT numunelerinde kırılma yüzeylerinin kıyaslanması

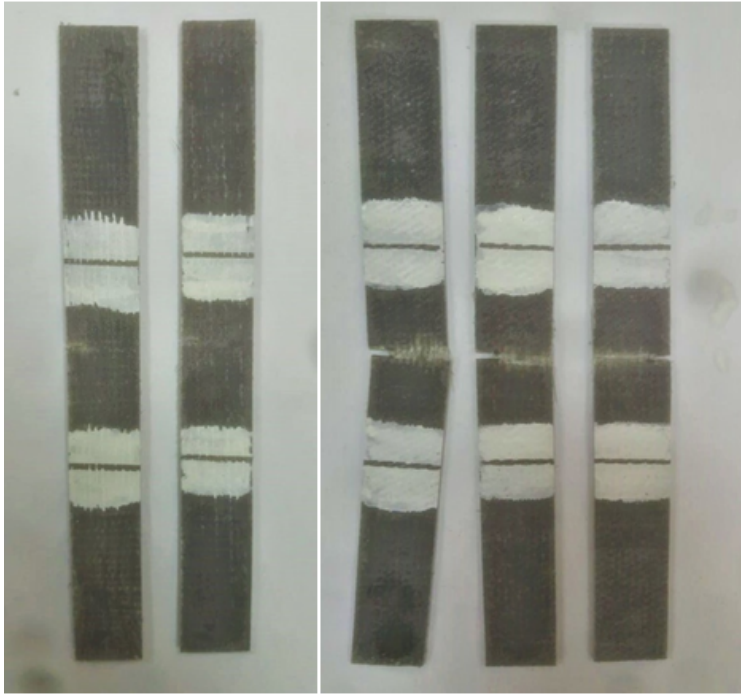
Çizelge 7.1. Şekil 7.1’de grafiği sunulan (R) numunelerinin kırılma dayanım ve tokluk değerleri

R	B (mm)	W (mm)	a/W	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{IC} (MPa \sqrt{m})
1	2,68	24,14	0,28	115	379	27,0
2	2,45	25,39	0,29	134	393	33,5
3	2,63	24,37	0,21	142	364	25,6
4	2,44	24,48	0,21	165	411	29,0

Referans numunede çatlak uzunluk oranı $0,21$ durumundayken en yüksek yük $10\ 000$ N seviyesine yaklaşmaktadır. Şekil 5.2’de, katyonik yüzey aktif maddesi kullanılarak epoksi matris içine $\%0,1$ oranında çok cidarlı karbon nanotüp eklentisi yapıldığında, en yüksek yükün $12\ 000$ N seviyelerine çıktığı, üç adet numunenin yük-yer değiştirme grafiğinden görülmektedir. Katyonik yüzey aktif maddesinin epoksi matrisin elastikiyetini artırdığı, grafiğin en yüksek yüke karşılık gelen yer değiştirme değerinden görülmektedir. Referans numunenin uzama miktarı dört numune için $0,90-1,13$ mm aralığındayken, katyonik yüzey aktif maddesinin etkisiyle, $R+CNT$ numunesindeki uzama miktarı $1,13-1,27$ mm aralığında seyretmiştir. Resim 7.2 ve Çizelge 7.2, sırasıyla, $R+CNT$ numunelerinin test sonrası görünümünü ve kırılma dayanım ve tokluk değerlerini belirtmektedir.



Şekil 7.2. *R+CNT* numunelerinin yük-yer değiştirme grafikleri

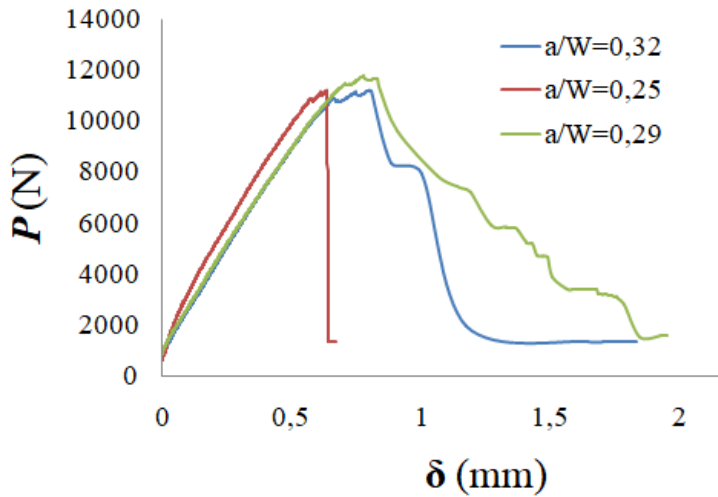


Resim 7.2. *R+CNT* numunelerinin çekme testi kırılma biçimleri

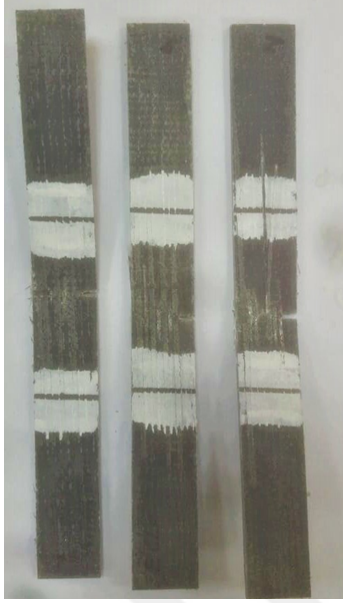
Çizelge 7.2. *R+CNT* numunelerinin kırılma dayanım ve tokluk değerleri

<i>R+CNT</i>	<i>B</i> (mm)	<i>W</i> (mm)	<i>a/W</i>	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{IC} (MPa \sqrt{m})
1	2,49	24,88	0,22	183	494	34,8
2	2,62	25,65	0,26	166	528	37,2
3	2,68	24,42	0,22	158	417	29,5

Numunelerin tümünde sekiz kat [0/90] yönünde kıvrımsız (non-crimp) cam elyaf kumaş bulunmaktadır. Referans niteliğindeki numunede ve karbon nanotüp katkıli numunenin kalınlık değerleri 2,49-2,68 mm aralığındadır. Karbon nanotüp katkıli numunenin her bir cam elyaf tabakası arasına poliakrilonitrilden üretilmiş nano elyaf tabaka yerleştirildiğinde, numune kalınlık değeri 3,78-4,05 mm aralığına yükselmektedir. Kuşkusuz, numunenin çekme gerilmesini karşılayan malzeme bileşeni cam elyaftır. Yapıya nano parçacık ve nano elyaf katkısı, matristen daha fazla faydalanılması ve kırılma tokluğunun artırılması içindir. Karbon nanotüp ve nano elyaf katkıli $R+NF+CNT$ numunesinin yük-şekil değiştirme grafiğinde karşılaşılan en yüksek yük, karbon nanotüp katkıli $R+CNT$ numunesinde karşılaşılan en yüksek yüke yakın seviyededir (Şekil 7.3 ve Çizelge 7.3). 1,13-1,17 mm aralığındaki uzama miktarına sahip olan $R+NF+CNT$ numunesi, karbon nanotüp katkıli $R+CNT$ numunesinden kısmen düşük durumdadır. Bu durum, üç-nokta eğme test analizinde de belirtileceği üzere, nano elyafın epoksi matrisin tokluğunu artırması ve her bir cam elyaf tabaka arasında ayrı bir katman olarak gerilme altında çalışmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, numune kalınlığını artırması nedeniyle, kırılma dayanımı $R+CNT$ numunesine göre düşük kalmaktadır. Resim 7.3, $R+NF+CNT$ numunelerinin çekme testi sonrası görünümünü belirtmektedir.



Şekil 7.3. $R+NF+CNT$ numuneleri çekme testi yük-yer değiştirme grafikleri

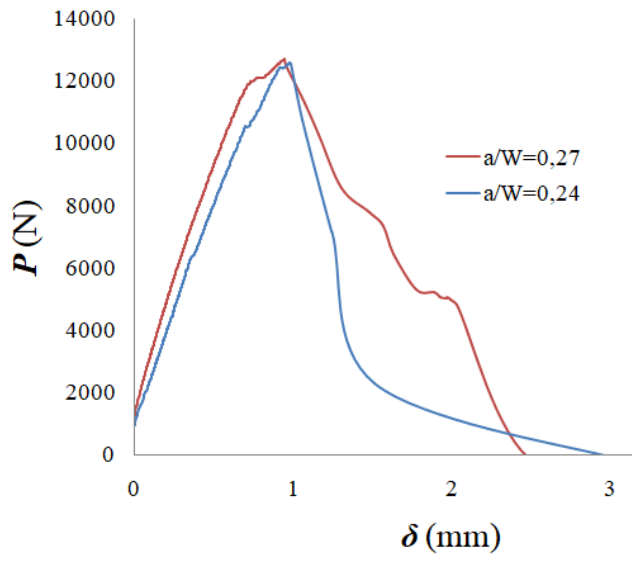


Resim 7.3. $R+NF+CNT$ numuneleri çekme testi sonrası kırılma biçimleri

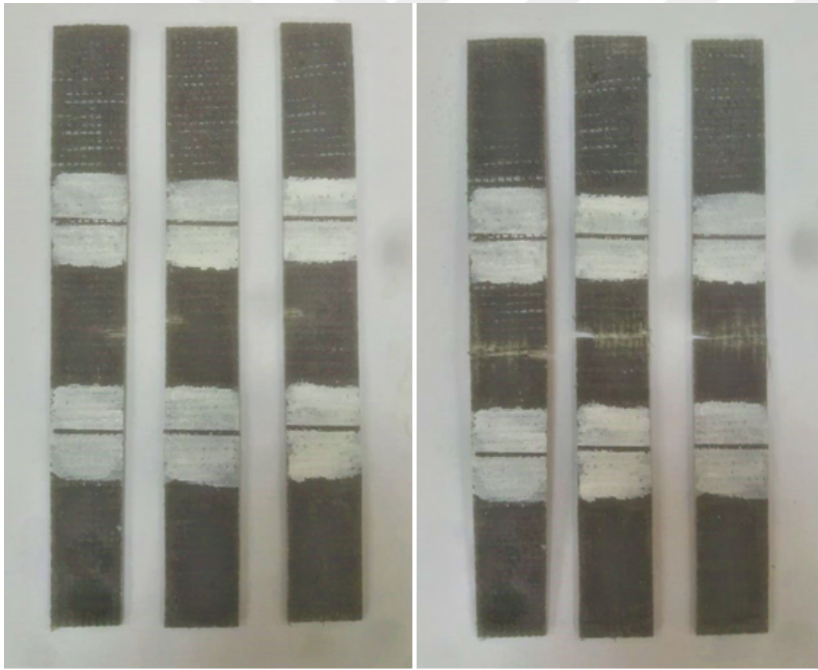
Çizelge 7.3. $R+NF+CNT$ numuneleri kırılma dayanım ve tokluk değerleri

$R+NF+CNT$	B (mm)	W (mm)	a/W	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{IC} (MPa \sqrt{m})
1	3,78	24,92	0,32	119	474	33,4
2	3,85	24,98	0,25	160	483	34,1
3	4,05	24,37	0,29	119	410	29,0

Homojen karışım sağlandığında, çok düşük oranda (ağırlıkça %0,1) dahi etkisini gösteren çok cidarlı karbon nanotüp, cam elyaf yüzeylerinin silan ile fonksiyonelleştirildiği numuneye katıldığında, numunenin uzama miktarı 1,30-1,35 mm aralığına çıkmaktadır. Uzama miktarındaki artışta, katyonik yüzey aktif maddesinin etkisinin yanında, matris ile elyaf ara yüzünün kovalent bağ ile tam olarak bağlanması ve yük iletiminin çok daha uzun süre gerçekleştirilebilmesi de etkindir. En yüksek yük dayanımının 13 000 N seviyesine ulaşması, katkısız numuneye göre yaklaşık %30 oranında artışın meydana geldiğini belirtmektedir (Şekil 7.4 ve Çizelge 7.4). Resim 7.4, $R(F)+CNT$ numunelerinin çekme testi sonrası görünümünü belirtmektedir.



Şekil 7.4. $R(F)+CNT$ numuneleri çekme testi yük-yer değiştirme grafiği



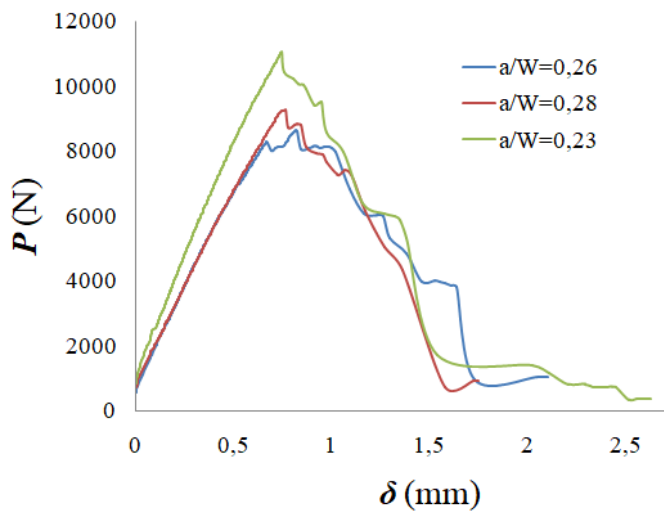
Resim 7.4. $R(F)+CNT$ numuneleri çekme testi sonrası kırılma biçimleri

Çizelge 7.4. $R(F)+CNT$ numuneleri kırılma dayanım ve tokluk değerleri

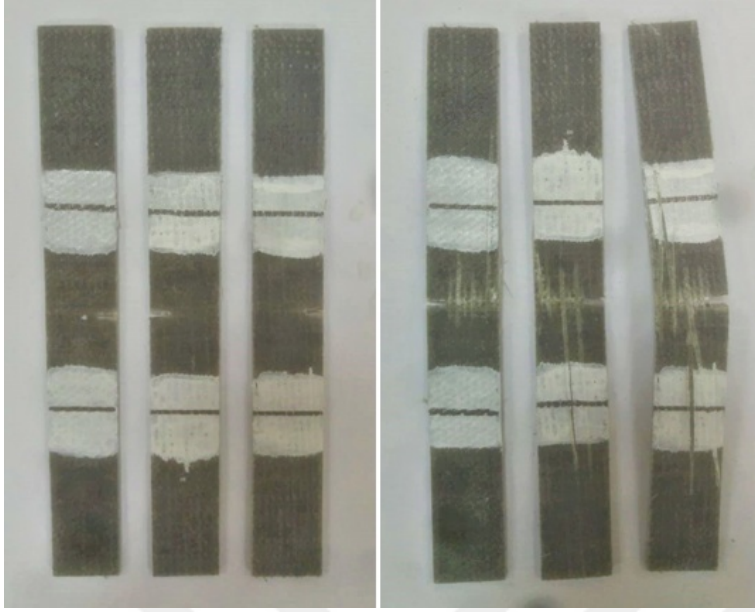
$R(F)+CNT$	B (mm)	W (mm)	a/W	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{IC} (MPa \sqrt{m})
1	2,78	25,58	0,28	147	498	35,0
2	2,88	25,78	0,27	171	554	39,1
3	2,81	24,62	0,24	182	524	37,0

Cam elyaf arayüzünün kuvvetlendirilmesi ve karbon nanotüpün homojen olarak matris içine yerleştirilmesiyle elde edilen kazanımın, karbon nanotüpün sülfürik asit/nitrik asit banyosunda saflaştırılması ve hekzametilen diamin ile fonksiyonelleştirilmesiyle kaybedildiği görülmektedir (Şekil 7.5 ve Çizelge 7.5). Çatlak uzunluk oranı 0,23'de dahi, en yüksek yükün 12 000 N seviyesinin altında kaldığı şekilden görülebilmektedir. Uzama miktarı 1,03-1,13 mm değer aralığıyla, şu ana kadar incelenen numuneler içinde, en az uzama değerini de beraberinde getirmiştir.

Francisco ve diğerleri (2015), oda sıcaklığında, hacimsel olarak 3:1 oranında sülfürik asit/nitrik asit banyosunda çok cidarlı karbon nanotüpleri 6 saat süreyle ultrasonik karıştırıcı ile karıştırmışlardır [57]. Karbon nanotüpün asit banyosundaki mikro yapı değişimi, matris içindeki dağılımını iyileştirmiş ve matrisin sertliğinde artış olduğunu kaydetmişlerdir. Karboksil fonksiyonelleştirmeye ilave olarak hekzametilen diamin ile 5 gün süreyle 100°C sıcaklık şartları altında tepkimeye sokarak amin fonksiyonelleştirmesini de gerçekleştirmişlerdir. Malzeme sertlik değerinde daha fazla artışın kaydedildiği karboksil ve amin fonksiyonelleştirmenin etkisi, resimdeki çekme numunelerinden görülmektedir. $R(F)+CNT$ numunesinde çatlak ilerleme yolu boyunca, elyafların matristen ayrılmadığı görülürken, $R(F)+CNT(F)$ numunesinde, elyafların yer yer matristen ayrıldıkları görülmektedir (Resim 7.5).



Şekil 7.5. $R(F)+CNT(F)$ numuneleri çekme testi yük-yer değişirme grafiği

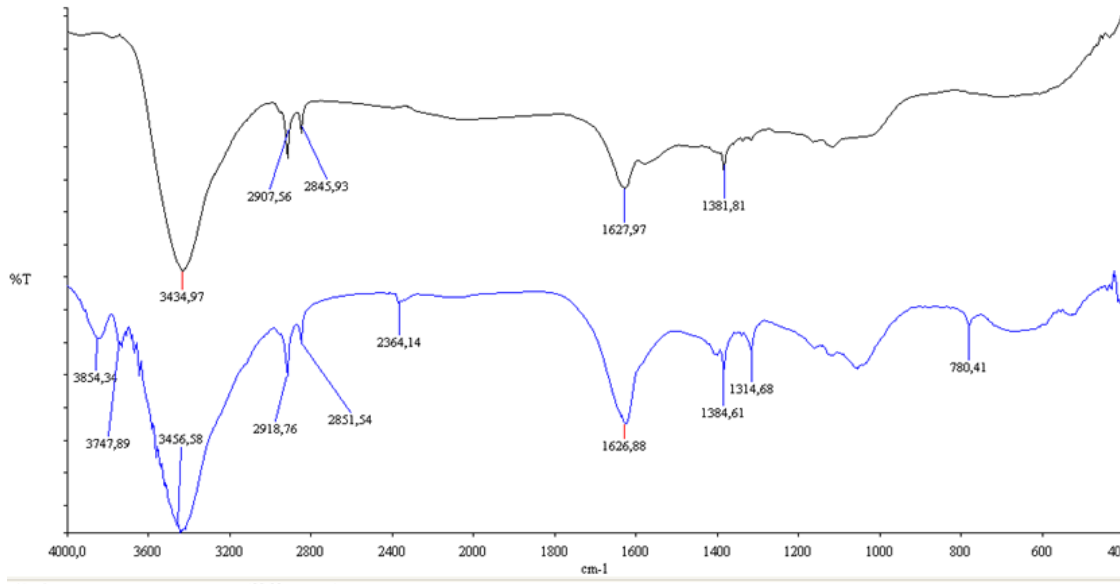


Resim 7.5. $R(F)+CNT(F)$ numuneleri çekme testi sonrası kırılma biçimleri

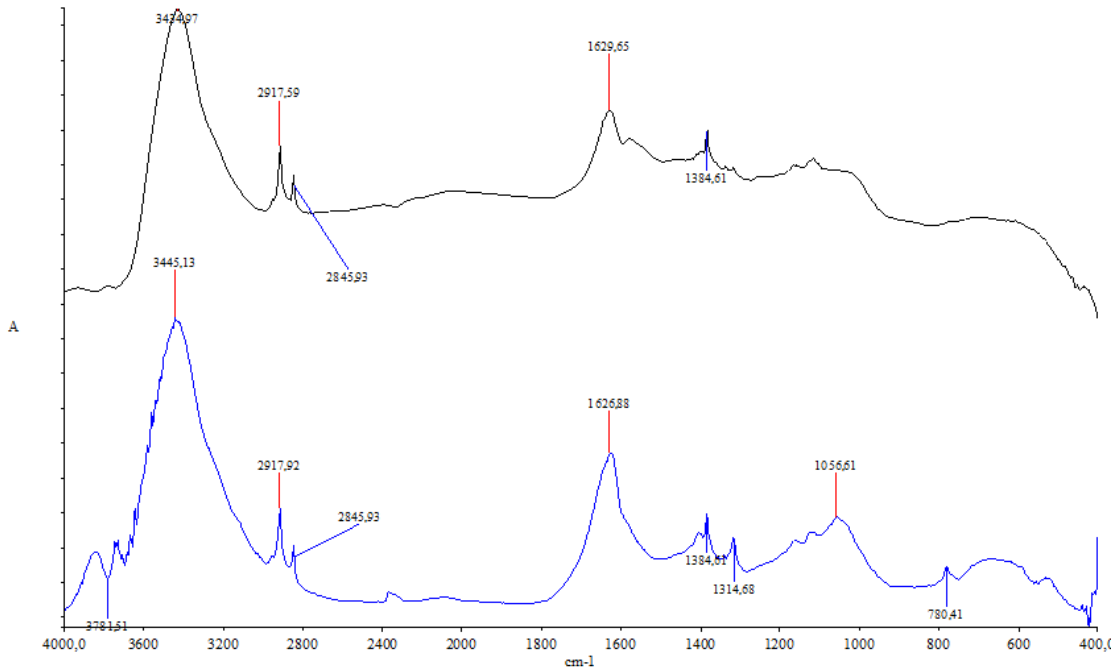
Çizelge 7.5. $R(F)+CNT(F)$ numuneleri kırılma dayanım ve tokluk değerleri

$R(F)+CNT(F)$	B (mm)	W (mm)	a/W	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{IC} (MPa \sqrt{m})
1	2,94	24,65	0,26	119	367	26,0
2	2,89	24,75	0,28	129	432	30,4
3	3,25	24,62	0,23	138	382	27,0

Şekil 7.6 ve 7.7’de, karboksil ve amin fonksiyonelleştirilmesi yapılan çok cidarlı karbon nanotüpün, fonksiyonelleştirme yapılmamış nanotüp ile kıyaslamasında kızılötesi spektroskopi grafiğine yer verilmiştir. Mavi renkli grafik, fonksiyonelleştirmenin yapıldığı karbon nanotüpe aittir. x -ekseni, dalga boyunu verirken, y -ekseni, geçirgenlik bilgisini vermektedir. Her iki nanotüpün belirgin pik farklılıklarının bulunduğu dalga boyu bölgeleri incelendiğinde, $3700-3800\text{ cm}^{-1}$ aralığının ilk karşılaşılan bölge olduğu ve O-H gerilme bağlarını temsil ettiği belirtilebilir (alkoller, asitler, Hidrojen-bağı). 1626 ve 1380 cm^{-1} bölgelerindeki farklılıklar ise karbon-karbon ve karbon-azot bağlarının meydana geldiğini göstermektedir. Asit banyosu ve amin ile reaksiyon ve nihayetinde de katyonik yüzey aktif maddesinin adı geçen piklerde farklılıkları meydana getiren unsurlar olduğu belirtilebilir.



Şekil 7.6. Saflaştırılmış ve amin ile işlem görmüş karbon nanotüplerin kızılötesi spektroskopisi grafiği-1



Şekil 7.7. Saflaştırılmış ve amin ile işlem görmüş karbon nanotüplerin kızılötesi spektroskopisi grafiği-2

$R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinde kullanılan nano elyaf tabakasının çekme dayanımına etkisi incelendiğinde, numunenin sadece simetri katında bir adet nano elyaf kullanımının, her bir cam elyaf tabaka arasında nano elyaf tabaka yerleşim tasarımına göre çok daha yüksek

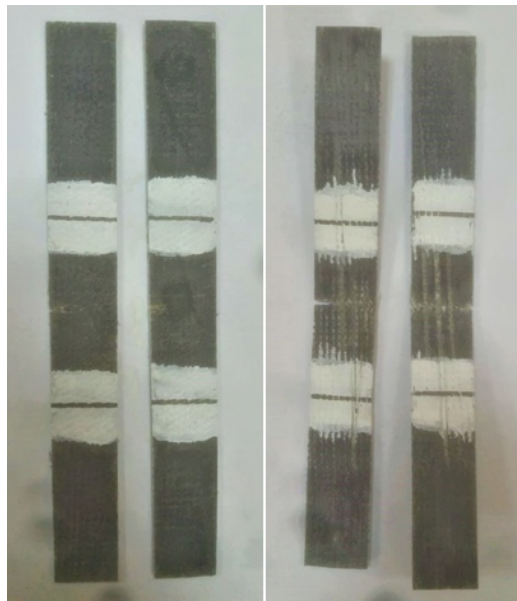
kırılma dayanım ve tokluk değeri verdiği tespit edilmiştir (Çizelge 7.6 ve 7.7). Çünkü, her bir cam elyaf tabaka arasında yer alan ve nanofibere doygun olan ara bölge matrisi, kalınlığının da etkisiyle, ana elyaf tabakalardan ayrılarak paralel çalışacaktır. Resim 7.6'ya dikkat edilirse, sade bir kırılma yolundan ziyade, dış ana elyaf tabakanın diğer tabakalarla paralel çalıştığı ve ana elyaflardan bazılarının matristen açılı bir şekilde ayrıldıkları görülmektedir. Dolayısıyla, nano elyaf tabaka sayısının artmasının kırılma tokluğunu düşürücü etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 7.6. $R(F)+NF+KNT(F)$ -1 kat numuneleri kırılma dayanım ve tokluk değerleri

$R(F)+NF+KNT(F)$	B	W	a/W	σ_f	σ_0	K_{IC}
1-kat nano elyaf	(mm)	(mm)		(MPa)	(MPa)	(MPa \sqrt{m})
1	2,98	24,21	0,21	189		29,3
2 (çentiksiz)	2,99	24,03			376	
3 (çentiksiz)	2,96	23,53			362	
4 (çentiksiz)	2,91	23,43			360	

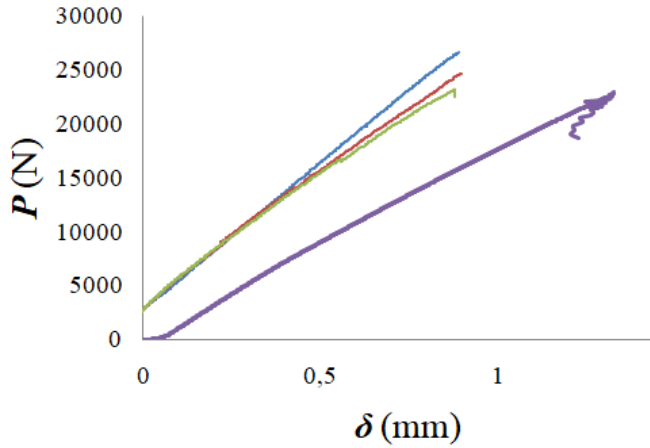
Çizelge 7.7. $R(F)+NF+KNT(F)$ -7 kat numuneleri kırılma dayanım ve tokluk değerleri

$R(F)+NF+KNT(F)$	B	W	a/W	σ_f	K_{IC}
7-kat nano elyaf	(mm)	(mm)		(MPa)	(MPa \sqrt{m})
1	3,74	25,66	0,24	116	21,4
2	3,67	25,05	0,28	119	25,3



Resim 7.6. $R(F)+NF+KNT(F)$ numuneleri çekme testi sonrası kırılma biçimleri

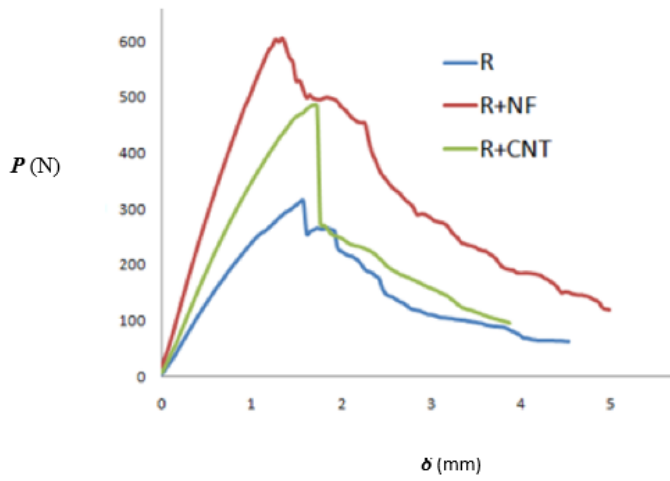
Şekil 5.8’de, simetri katında bir kat nano elyaf içeren üç adet numunenin yanısıra, mor renk ile belirtilmiş referans (katkısız) numunenin çentiksiz çekme testine ait yük-yer değiştirme grafiğine yer verilmiştir. Katkılı numunelerde elastikiyet düşüklüğü dikkate değer biçimde azalmış durumdadır.



Şekil 7.8. $R(F)+NF+CNT(F)$ ve R numuneleri yük-yer değiştirme kıyaslama grafiği

7.2. Üç-Nokta Eğme Test Sonuçları

Şekil 7.9’da, referansın (R), ÇCKNT takviyeli ($R+CNT$) ve nano elyaf takviyeli ($R+NF$) numunelerin yük-yerdeğiştirme grafiklerine yer verilmiştir. Referans ve ÇCKNT takviyeli numuneler en yüksek yüke ulaştığında, yük aniden azalırken, nano elyaf takviyeli numunede kademeli bir azalma görülmektedir. Bu durum, nano elyafa doymuş matrisin çatlak yolunu mümkün olduğunca arttırdığını göstermektedir. Aynı zamanda, referans ve nano elyaf takviyeli numunelerin rijitlik eğiminin (k) en yüksek yüke kadar doğrusal bir özelliğe sahip olduğu, ÇCKNT takviyeli numunesindeki elastikiyetin arttığı ve eğiminin hafif bir eğri özelliğine sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca KNT'lerin homojen dağılımı için kullanılan katyonik yüzey aktif maddesinin epoksinin esnekliğini ve viskozitesini arttırdığı bilinmektedir [210]. Bununla birlikte, nano elyafa doymuş ara bölge matrisin rijitlik artışı da söz konusudur.



Şekil 7.9. Referans (R), nano elyaf-takviyeli ($R+NF$) ve ÇCKNT takviyeli ($R+CNT$) kompozitlerin yük-çökme grafikleri

Referans numunenin (R) kırılma yüzeyinden alınan SEM görüntüsü, 0^0 yöndeki (çekme gerilmesi yönündeki) cam elyafların süpürge benzeri görünümünü göstermekte, bununla birlikte tabakalar arası ayrılma probleminin olmadığını belirtmektedir (Resim 7.7a). Ayrıca, nano elyafa doymuş olan numunelerde, her bir cam elyaf tabaka arasındaki matris bölgesinin nano elyaf tabaka kalınlığından dolayı genişlediği ve nano elyafa doymuş olan ara bölge matrisin ayrı bir katman olarak işlev gördüğü ve tabakalar arası ayrılmaya neden olduğu görülmektedir (Resim 7.7b).

Numunelerde kullanılan cam kumaş, kıvrımsız (non-crimp) bir yapıya sahiptir. Tabakalar arası ayrılmanın, numune uzunluğu boyunca uzanan ve eğme momenti altında gerilme ve basma gerilmesine maruz kalan, 0^0 yöndeki cam elyaflara bitişik noktalarda daha az meydana geldiği görülmektedir. Bu bölgedeki iki cam elyaf arasında biraz daha dar bir alan olduğundan, nano elyaf tabaka ile cam elyaf tabaka arasında mekanik bir temas vardır (Resim 7.7c). Bu durum, nano elyaf tabakanın cam elyaf tabakalar üzerine el ile yerleştirmeden ziyade, elektro-eğirme işleminin doğrudan cam elyaf tabaka üzerine gerçekleştirilmesinin, bir diğer ifadeyle mekanik temasın tam olarak sağlanmasının tabakalar arası ayrılma açısından daha olumlu sonuç vereceğini göstermektedir.



Resim 7.7. a) Referans (R), b) ve c) nano elyaf-takviyeli ($R+NF$) kompozitlerin SEM görünümü

Çizelge 7.8-7.11’de, elyaf-matris ara yüzünde silanla işlem görmemiş numunelerde her bir katkının meydana getirdiği mekanik değişimlere yer verilmiştir. Çizelgelerde B , W ve a/W , sırasıyla numune kalınlığını, genişliğini ve yapay çatlak uzunluğunun numune genişliğine oranını vermektedir. σ_f , σ_0 ve K_{eff} ise, sırasıyla, kırılma ve eğme dayanımlarıyla etkin kırılma tokluğunu belirtmektedir.

Çizelge 7.8. (R) eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri

<i>R</i>	<i>B</i> (mm)	<i>W</i> (mm)	<i>a/W</i>	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{eff} (MPa \sqrt{m})
1	2,60	12,9	0,56	70	286	17,48
2	2,55	12,8	0,44	109	297	18,15
3	2,70	13,1	0,40	128	312	19,04
4	2,59	12,9	0,48	107	331	20,21
5	2,71	13,1	0,42	121	315	19,23

Çizelge 7.9. R+NF eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri

<i>R+NF</i>	<i>B</i> (mm)	<i>W</i> (mm)	<i>a/W</i>	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{eff} (MPa \sqrt{m})
1	3,87	15,7	0,61	54	292	17,86
2	3,76	15,5	0,61	46	246	15,05
3	3,85	15,7	0,56	64	289	17,69
4	3,63	15,3	0,55	69	292	17,85
5	3,82	15,6	0,59	58	285	17,41

Çizelge 7.10. R+CNT eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri

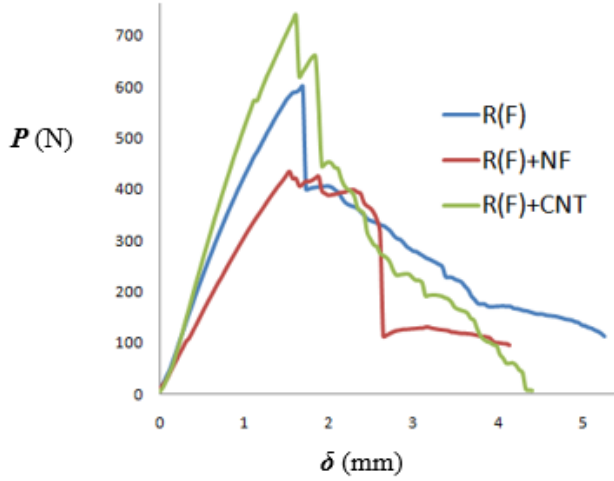
<i>R+CNT</i>	<i>B</i> (mm)	<i>W</i> (mm)	<i>a/W</i>	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{eff} (MPa \sqrt{m})
1	2,72	13,2	0,39	105	257	15,69
2	2,75	13,3	0,46	106	317	19,40
3	2,75	13,3	0,45	110	319	19,48
4	2,69	13,1	0,51	101	344	21,03
5	2,73	13,2	0,46	97	286	17,50

Çizelge 7.11. R+NF+CNT eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri

<i>R+NF+CNT</i>	<i>B</i> (mm)	<i>W</i> (mm)	<i>a/W</i>	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{eff} (MPa \sqrt{m})
1	3,94	15,9	0,64	51	308	18,83
2	3,76	15,5	0,59	55	275	16,79
3	3,96	15,9	0,52	64	246	15,01
4	3,89	15,8	0,54	51	209	12,75
5	3,88	15,8	0,53	72	289	17,66

Silanla işleme tabi tutulmuş numunelerin yük-yerdeğiştirme grafik karakteristikleri, genelde, işleminden geçirilmemiş numunelerinkine benzemektedir (Şekil 7.10). Fakat, nano elyaf

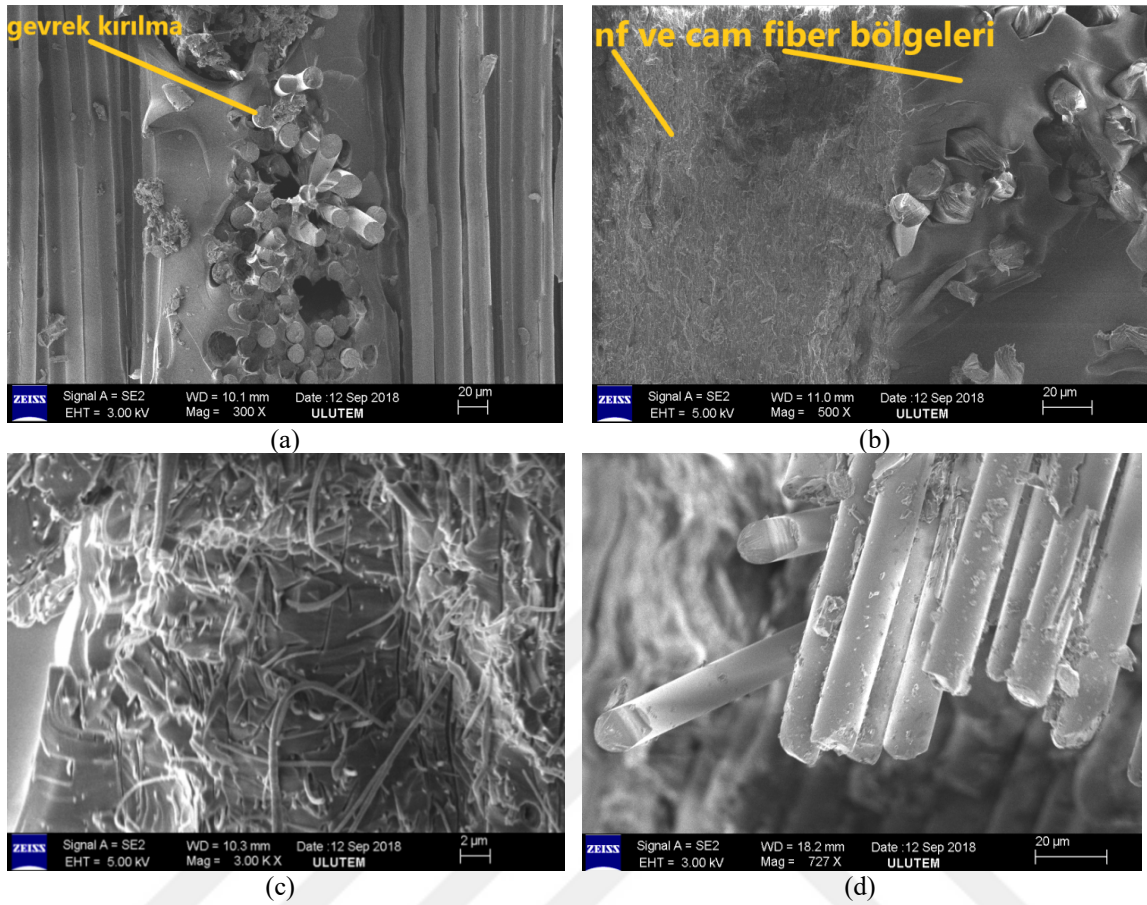
takviyeli numunenin grafiği, diğerlerinden farklı olarak, azami yükten sonra ani bir düşüş sergilemektedir.



Şekil 7.10. $R(F)$, $R(F)+NF$ ve $R(F)+CNT$ numunelerinin yük-yerdeğiştirme grafikleri

Nano-takviye içermeyen ancak silanla işleme tabi tutulmuş $R(F)$ numunenin kırılma yüzeyinin SEM görüntüleri incelendiğinde, kırılma yüzeyinde elyaflar boyunca gevrek kırılmanın meydana geldiği ve bazı elyafların toplu olarak matristen sıyrıldığı görülmektedir (Resim 7.8a). Nano elyaf takviyeli numunenin kesit yüzeyi incelendiğinde, nano elyaf açısından zengin olan matris alanına yakın bazı elyafların plastik şekil değiştirme ile kırıldığı, ancak bunun genel durumu yansıtmadığı belirlenmiştir (Resim 7.8b). Bu durum, bağlama kimyasalının (silan) gevrek kırılmayı önleyemediğini ve cam elyaf tabaka ile ayrı bir katman gibi davranan nano elyafa doygun matris arasında tabakalar arası ayrılma probleminin meydana geldiğini göstermektedir.

Resim 7.8c'deki SEM görüntüsünde, nano elyafların malzemenin kırılma yüzeyinde tek parça halinde epoksi matristen çekilebildiği görülmektedir. Bu durum, nano elyafların mukavemeti ve modülü açısından ilginçtir. Çünkü, adı geçen mekanik özelliklerde, nano elyaf, epoksi matristen daha düşük değerlere sahiptir. Resim 7.8d'de, $R(F)+CNT$ numunesindeki silanla işlem görmüş cam elyaf yüzeyi üzerindeki matris kalıntıları, arayüzün yeterli bir birleşme gücüne sahip olduğunu göstermektedir.



Resim 7.8. (a) $R(F)$, (b, c) $R(F)+NF$ ve (d) $R(F)+CNT$ numuneleri kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

Çizelge 7.12-7.16 aralığındaki çizelgeler incelendiğinde, eğme modülündeki en yüksek artışın cam elyafların silan ile işlevselleştirildiği $R(F)$ numunelerinde elde edildiği görülmektedir. Referans (R) numunesine göre, silan ile muamele edilmiş numune $R(F)$ 'nin eğme modülünün ve mukavemetinin sırasıyla %4,9 ve %25,6 arttığı belirlenmiştir. $R(F)$ numunesine ağırlıkça %0,1 oranında ÇCKNT katkısı, değerleri daha fazla artırmamıştır. Referans (R) örneğine nano elyaf tabakalar eklendiğinde, modül ve mukavemet değerlerinin sırasıyla %17,3 ve %5,2 azaldığı görülmektedir. Referansa ve silanla işleme tabi tutulmuş numunelere nano elyaf tabakalar eklendiğinde, cam elyaf hacim oranı %38,6'dan %33'e düşmektedir. %33 hacim oranında, referans numunesi (R) ve silan ile muamele edilmiş numunenin ($R(F)$) eğme modülü değerleri sırasıyla 10,85 GPa ve 11,38 GPa'dır. Nano elyaf ilavesi, eğme modülünde sırasıyla %3,3 ve %41,6 azalmayı beraberinde getirmiştir.

Kuşkusuz, nano elyaf tabaka kalınlığından dolayı iki bitişik cam elyaf tabakası arasında gerekli hacimden daha fazla yer kaplayan ara matris bölgesi, bu rakamları azaltmada en önemli etmen olabilir.

Çizelge 7.12. $R(F)$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri

$R(F)$	B (mm)	W (mm)	a/W	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{eff} (MPa \sqrt{m})
1	2,60	12,9	0,46	133	387	23,65
2	2,64	13,0	0,41	147	374	22,82
3	2,50	12,7	0,46	117	333	20,35
4	2,52	12,7	0,49	109	339	20,71

Çizelge 7.13. $R(F)+CNT$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri

$R(F)+CNT$	B (mm)	W (mm)	a/W	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{eff} (MPa \sqrt{m})
1	3,16	14,2	0,44	107	310	18,95
2	3,07	14,0	0,48	118	383	23,37
3	3,07	14,0	0,45	109	322	19,69
4	3,18	14,3	0,43	133	372	22,73
5	3,15	14,2	0,45	123	365	22,27

Çizelge 7.14. $R(F)+CNT(F)$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri

$R(F)+CNT(F)$	B (mm)	W (mm)	a/W	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{eff} (MPa \sqrt{m})
1	2,92	13,7	0,45	103	299	18,26
2	2,82	13,4	0,46	81	240	14,63
3	2,83	13,5	0,46	95	278	16,96

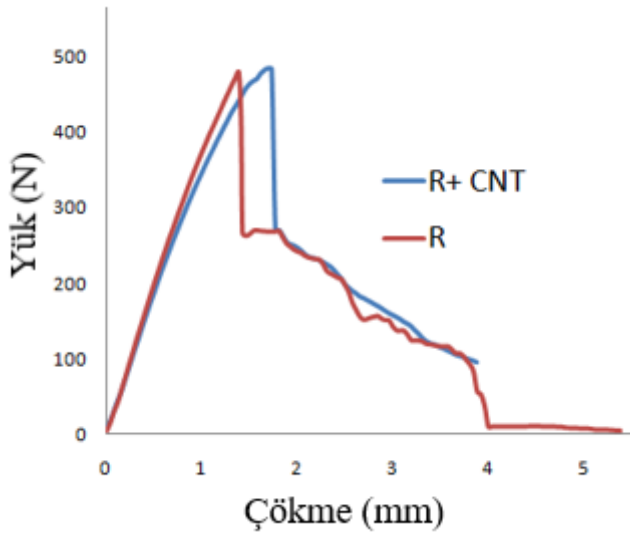
Çizelge 7.15. $R(F)+NF$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri

$R(F)+NF$	B (mm)	W (mm)	a/W	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{eff} (MPa \sqrt{m})
1	3,83	15,7	0,56	51	224	13,7
2	3,49	15,0	0,57	41	187	11,4
3	3,46	14,9	0,52	62	231	14,1
4	3,66	15,3	0,60	49	245	15,0
5	3,49	15,0	0,57	53	244	14,9

Çizelge 7.16. $R(F)+NF+CNT(F)$ eğme test numunesi kırılma dayanım ve tokluk değerleri

$R(F)+NF+$ $CNT(F)$	B (mm)	W (mm)	a/W	σ_f (MPa)	σ_0 (MPa)	K_{eff} (MPa \sqrt{m})
1	3,74	15,5	0,53	76	298	18,2
2	3,76	15,5	0,57	78	357	21,8
3	3,92	15,8	0,54	65	273	16,7
4	3,89	15,8	0,47	85	280	17,1

Referans numuneye ÇCKNT eklentisi, eğme modülünü %13 oranında azaltırken, eğme mukavemetini %11,7 arttırmıştır. Karbon nanotüplerin homojen dağılımını sağlamak için kullanılan katyonik yüzey aktif maddesi, epoksinin viskozitesini ve esnekliğini artırarak, bu sonucun alınmasında etkili olma durumu vardır. KNT'ler, $R(F)$ numunesine eklendiğinde, eğme modülü %0,6 oranında azalmıştır. Bu, fonksiyonelleştirmenin ve ağırlıkça %0,1 oranındaki karbon nanotüp katkısının getirdiği rijitlik artışı ile katyonik yüzey aktif maddesine bağlı rijitlik azalmasının neredeyse eşit olduğunu göstermektedir (Şekil 7.11).



Şekil 7.11. Katyonik yüzey aktif maddesinin yük-yerdeğiştirme grafiğinde elastikiyete etkisi

Numunelerin $a/W=0.31-0.32$ aralığında kırılma tokluğu değerleri Çizelge 7.17'de gösterilmektedir. a/W , çatlak uzunluğunun genişliğe oranını göstermekte, σ_{ini} ve σ_f sırasıyla kontrollü çatlak ilerlemesi safhasındaki ilk ve son kırılma gerilmesini göstermektedir. K_{ini} ve K_{eff} , sırasıyla, kontrollü çatlak başlangıcındaki tokluğu ve etkin kırılma tokluğunu

gösterir. Öte yandan, a_i ve a_c , sırasıyla çatlakın ilk uzunluğunu ve kontrollü ilerlemiş çatlak uzunluğunu göstermektedir.

Referans numuneye ağırlıkça %0,1 oranında ÇCKNT ilave edildiğinde, kritik kırılma tokluğu K_{IC} 'nin %7 arttığı, ancak nano elyaf tabakaların eklenmesiyle %9,5 azaldığı belirlenmiştir. Bu çalışmada, daha etkili TCKNT'ler (tek cidarlı karbon nanotüp) ile bir önceki çalışmada elde edilen %3 ve %10,7 artış göz önüne alındığında, ağırlıkça %0,1 oranındaki ÇCKNT'lerin nihai eğme mukavemetini ve kırılma tokluğunu sırasıyla %11,7 ve %7 oranlarında artırdığını belirtmek önemlidir [211]. Bu durum, ÇCKNT'lerin homojen dağılımını sağlamak için kullanılan katyonik yüzey aktif maddesi sayesinde gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, elastikiyet artışına bağlı olarak eğme modülünde bir kayıp da olmuştur. Ağırlıkça %0,1 oranındaki ÇCKNT'lerle yapılan aynı çalışmada, nihai gerilme mukavemetinde hafif bir azalma ve modülde %7 artış bulunması ilginçtir. Bu çalışmada, eğme modül artışı aynı seviyede bulunmuştur, ancak nihai eğme dayanımı da artmıştır.

Cam elyafların fonksiyonelleştirilmesiyle, K_{IC} 'nin %16,6 artışla $921 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ 'ye ulaştığı gözlemlenmiştir. Karbon nanotüpün fonksiyonelleştirilmiş numune $R(F)$ üzerindeki etkisinin gözlenmediği ve nano elyaf tabakaların tokluk değerini $599 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ 'ye düşürdüğü belirlenmiştir.

Bu çalışmada olduğu gibi, aynı silan grubu ile muamele edilmiş üç nokta eğme E-cam/epoksi laminatlarla yapılan bir çalışmada, silan %0,1, %0,3 ve %0,5 oranlarında kullanıldığında, eğme mukavemetlerinin sırasıyla %39, %77 ve %78 oranlarında arttığı ve %0,5 silan oranından sonra bu artışın bozulmaya başladığı belirtilmiştir [212]. Bununla birlikte, bu çalışmada, %0,3 silanın kullanılması, nihai eğme mukavemetini referans numuneye (R) kıyasla %25,6 arttırmıştır. Saf DGEBA epoksinin ÇCKNT'lerine aynı silanın uygulandığı bir başka çalışmada, modül ve eğme mukavemetinin, aynı miktardaki işlem görmemiş ÇCKNT içeren numunelere kıyasla ağırlıkça %0,25'e kadar iyileştiği gözlenmiştir [213]. Ağırlıkça %0,5 ÇCKNT oranından sonra, muamele edilen KNT'lerde epoksi grubundan etkilenen epoksi-amin sertleştirici nedeniyle her iki numunenin değerlerinin bozulduğunu belirtmek ise ilginçtir. İşlemden geçirilmemiş ÇCKNT'ler numunelerde arttıkça kırılma tokluğu azalmış, ancak fonksiyonelleştirme yapılan numunelerde ağırlıkça %0,5'e kadar artış gözlenmiştir.

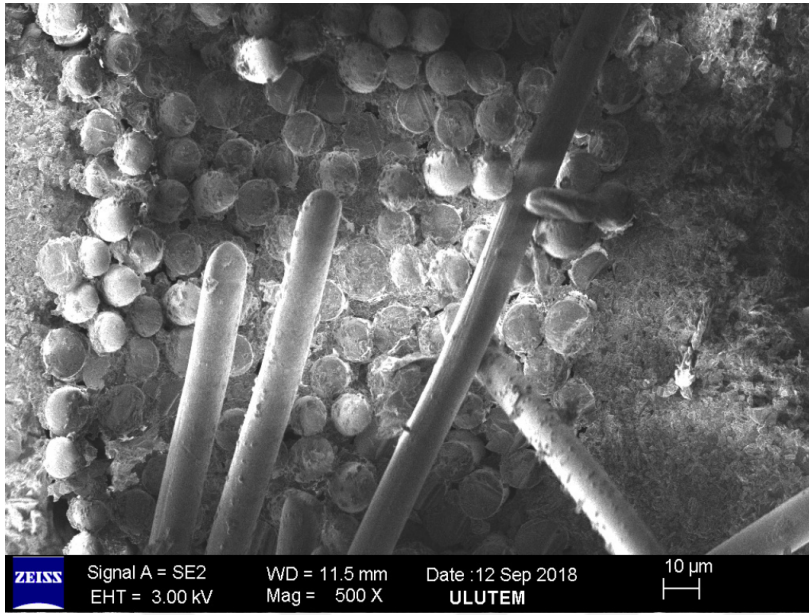
Çizelge 7.17'deki kritik çatlak uzunluğu a_c , kararlı çatlak ilerlemesinin bitiş noktasıdır, bundan sonra kararsız ilerleme başlar. Referans numune (R) ve cam elyaf-epoksi matris arayüzünde silanla bağlayıcılığı artırılan $R(F)$ numunelerinde kontrollü çatlak uzunluğunun neredeyse değişmediği görülmektedir. Diğer taraftan, %0,1 karbon nanotüp katkısı, katyonik yüzey aktif maddesinin esneklik etkisi nedeniyle ilave edilen numunelerde kontrollü çatlak uzunluğunu yaklaşık %15 oranında artırdığı görülmektedir.

Çizelge 7.17. Numunelerin kritik çatlak uzunlukları, kırılma dayanım ve tokluk değerleri

	a/W	σ_{ini}	σ_f	K_{ini}	K_{IC}	K_{eff}	a_i	a_c
		MPa		(MPa \sqrt{mm})			(mm)	
R	0,31	142 (9,2)	160 (9,0)	567	790	637	4	5,04
$R+NF$	0,32	114 (8,5)	129 (9,4)	498	715	563	5	6,4
$R+CNT$	0,31	140 (14,2)	156 (17,9)	584	846	666	4	5,2
$R(F)$	0,31	165 (13,2)	185 (14,1)	664	921	744	4	5,02
$R(F)+NF$	0,32	93 (9,7)	105 (11,0)	418	599	471	5	6,34
$R(F)+CNT$	0,31	154 (14,2)	173 (15,8)	649	920	738	4	5,17
$R(F)+NF+CNT(F)$	0,31	149	168	608	863	689	4,8	6,14

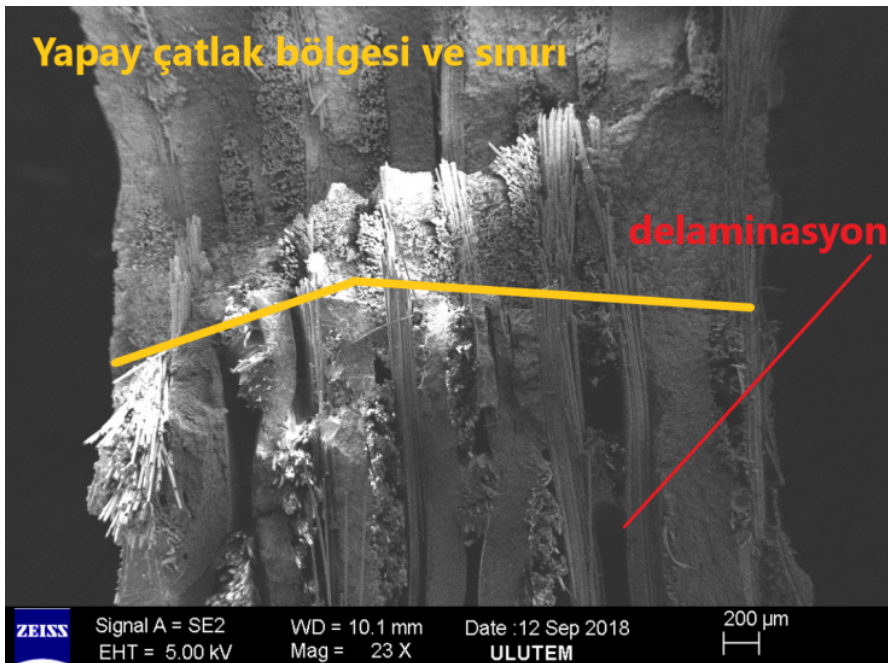
Parantez içindeki değerler, standart sapmayı belirtmektedir.

Karbon nanotüpün sülfürik asit ve nistrik asit banyosunda saflaştırılması ve HMDA ile amin fonksiyonelleştirilmesinin gerçekleştirilmesi, malzemenin rijitliğinin artmasına ve $R(F)$ ve $R(F)+CNT$ numunelerinde elde edilen mekanik değerlerdeki iyileşmenin azalmasına neden olmuştur. Resim 7.9'da, $R(F)+CNT(F)$ numunesinin kırılma yüzeyindeki cam elyafların matristen sıyrılmadan kırıldıkları görülmekte, fakat bununla birlikte, epoksi matrisin yapısının önemli derecede değiştiği görülmektedir. Üretim sırasındaki epoksinin viskozite artışı da, bu durumun ilk göstergesi olmuştur.

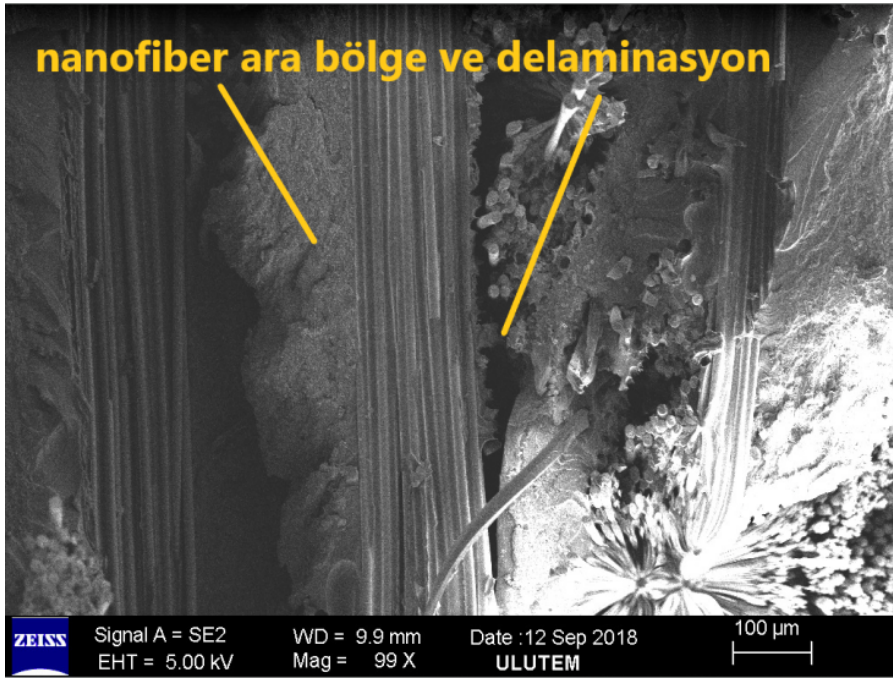


Resim 7.9. $R(F)+CNT(F)$ numunesi eğme numunesi kırılma yüzeyi

$R(F)+CNT(F)$ numunesinin cam elyaf tabakaları arasında nano elyaf tabakalar bulunması durumunda, numunenin mekanik özelliklerinde iyileşmeler tespit edilmesine rağmen, kırılma yüzeylerinde tabakalar arası ayrılma probleminin yer aldığı tespit edilmiştir (Resim 7.10 ve 7.11).

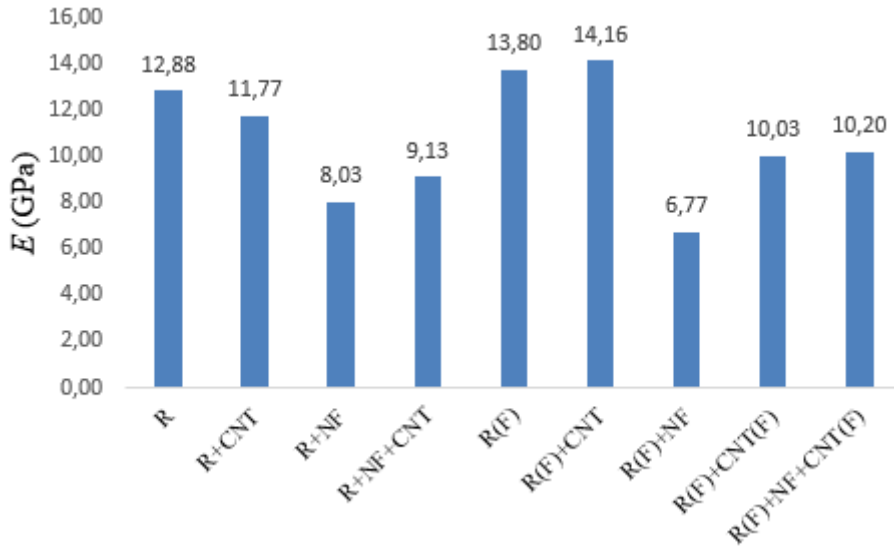


Resim 7.10. $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesi eğme numunesi kırılma yüzeyi-1

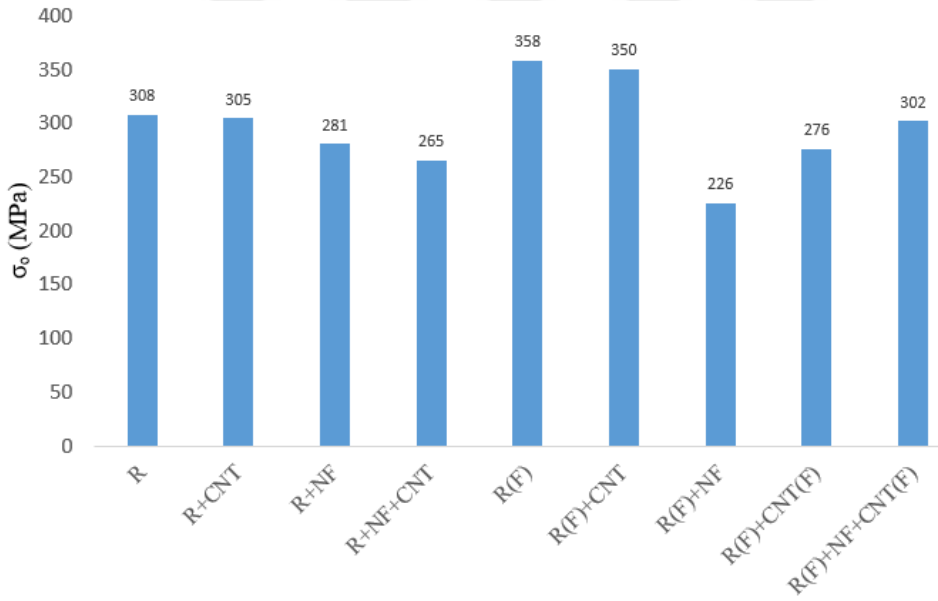


Resim 7.11. $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesi eğme numunesi kırılma yüzeyi-2

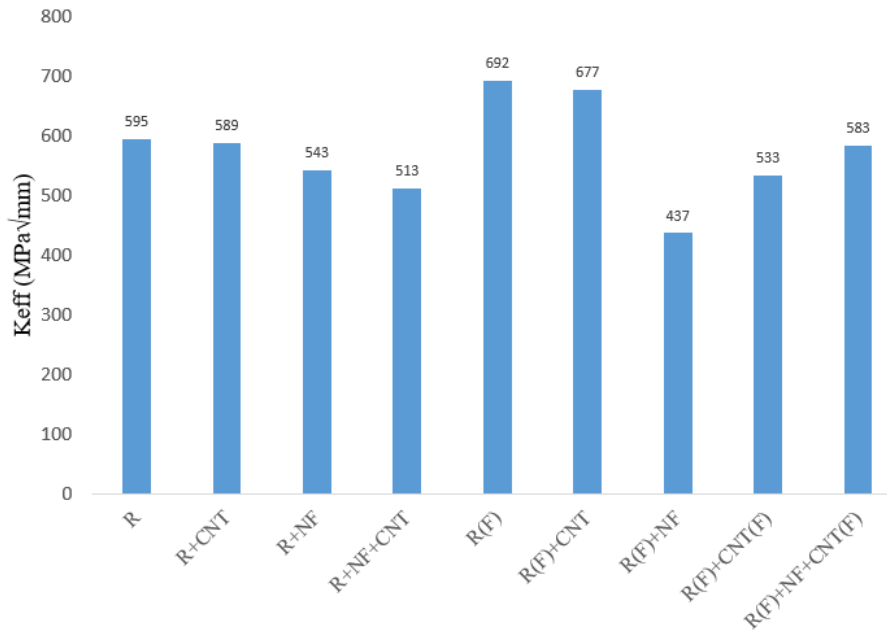
Numunelerin eğme dayanımı, kırılma tokluğu ve eğme modülleri kıyaslandığında, en yüksek değerlerin $R(F)+CNT$ ve $R(F)$ numunelerinden elde edildiği görülmektedir. Cam elyaf yüzeylerin silan ile işlem gördüğü ve aynı zamanda katyonik yüzey aktif maddesi kullanılarak çok cidarlı karbon nanotüplerin matris içinde homojen dağılımının sağlandığı $R(F)+CNT$ numunesinin eğme dayanımı, kırılma tokluğu ve eğme modül değeri, katkısız (R) numuneye göre, sırasıyla %16, %16 ve %7 oranlarında artmıştır. $R(F)+CNT$ numunesinin $R(F)$ numunesine göre eğme dayanımı ve kırılma tokluğu sırasıyla %2,2 ve %2,1 oranlarında azalış gösterirken, eğme modülü %2,7 oranında artış göstermiştir. Karbon nanotüp eklentisi, katkısız matriste, katyonik yüzey aktif maddesinin elastikiyet verici özelliğinden dolayı modül değerini düşürürken, numunede silan ve nano elyaf kullanıldığında, bu etkisinin ortadan kaybolduğu ve modül değerlerinde artışın gerçekleştiği tespit edilmiştir (Şekil 7.12, 7.13 ve 7.14).



Şekil 7.12. Birim kalınlıktaki eğme numuneleri modül değerleri



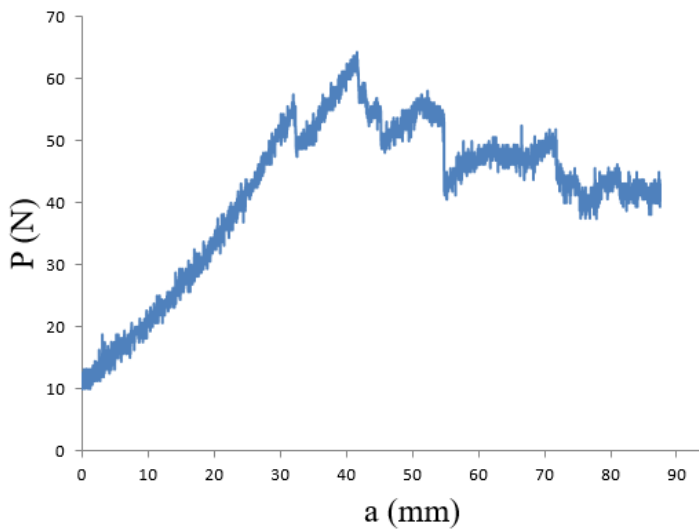
Şekil 7.13. Birim kalınlıktaki eğme numuneleri eğme dayanım değerleri



Şekil 7.14. Birim kalınlıktaki eğme numuneleri etkin kırılma tokluk değerleri

7.3. Tabakalar arası Tip-I Kırılma Enerjisinin Tespit Edilmesi

Referans niteliğindeki 5 adet E-cam/epoksi (*R*) numunesinden bir tanesinin yük-yer değiştirme grafiğine ve açıklamalı şekilde kompanzasyon tablosuna yer verilmiştir (Şekil 7.15 ve Çizelge 7.18, 7.19). (*R*) numunelerinin eğme modülü ve kırılma enerjileri ortalama değerlerine Çizelge 7.20’de sunulmuştur. Referans numunenin eğme modülü ortalama 57,5 GPa seviyesinde, kırılma enerjisi $1,92 \text{ kJ m}^{-2}$ seviyesinde tespit edilmiştir.



Şekil 7.15. Referans (*R*) numune Tip-I tabakalar arası ayrılma yük-yer değiştirme grafiği

Çizelge 7.18. Referans (*R*) numune Tip-I tabakalar arası ayrılma yük, çatlak uzunluğu ve kiriş ağız açıklığı

<i>a</i> (mm)	<i>P</i> (N)	δ (mm)	<i>C</i> (mm/N)	<i>E</i> (MPa)	$C^{1/3}$ (mm/N)
52,75	50,62	33,9	0,67	43 326	0,87
53,66	51,47	36,2	0,70	43 834	0,89
56,75	54,37	43,9	0,81	45 264	0,93
59,75	55,62	45,2	0,81	45 321	0,93
62,75	53,75	53,2	0,99	47 283	0,99
67,75	41,87	54,9	1,31	49 954	1,09
70,75	47,50	63,5	1,34	50 142	1,10
72,75	46,25	67,4	1,45	50 913	1,13
75,75	44,37	71,9	1,62	51 867	1,17
78,75	39,37	75,4	1,92	53 316	1,24
81,75	41,87	81,9	1,96	53 491	1,25
83,75	40,62	82,9	2,04	53 844	1,26
84,75	40,62	86,5	2,13	54205	1,28

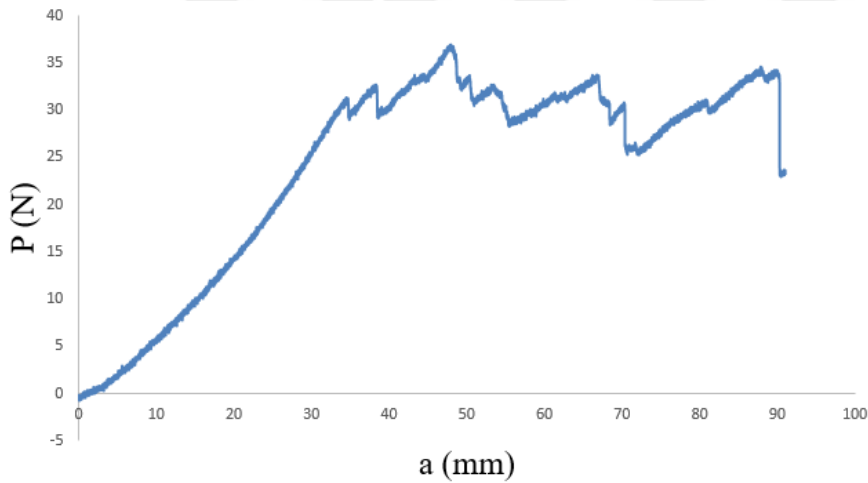
Çizelge 7.19. Referans (*R*) numune Tip-I tabakalar arası ayrılma kritik kırılma enerjisi

Olmaması gereken <i>a</i> (mm)	Düzeltilmiş <i>a</i> (mm)	<i>E</i> (MPa)	Yük	Yerdeğiştirme	Alan	Esneklik
-12,83	0					
52,96	65,79	83 059	1,55	1,55	1,60	1,63
54,04	66,87	83 059	1,66	1,66	1,83	1,75
57,21	70,04	83 058	2,03	2,03	2,08	2,18
57,34	70,17	83 058	2,13	2,13	2,20	2,29
62,11	74,94	83 058	2,27	2,27	1,95	2,47
69,47	82,30	83 057	1,66	1,66	1,90	1,80
70,03	82,86	83 057	2,17	2,17	2,17	2,35
72,41	85,24	83 057	2,17	2,17	2,16	2,35
75,50	88,33	83 056	2,15	2,15	2,02	2,31
80,58	93,41	83 056	1,89	1,89	2,02	2,00
81,22	94,05	83 056	2,17	2,17	2,13	2,29
82,55	95,38	83 056	2,10	2,10	2,13	2,21
83,93	96,76	83 056	2,16	2,16	0,00	2,27

Çizelge 7.20. Referans (*R*) numuneleri Tip-I tabakalar arası ayrılma kritik kırılma enerjileri

Numune (<i>R</i>)	<i>E</i> (MPa)	Ölçütleri- <i>G_{IC}</i> (kJm ⁻²)			
		Yük	Yerdeğiştirme	Alan	Esneklik
1	62 610	1,81	1,81	1,83	1,83
2	51 355	1,92	1,92	1,93	1,89
3	60 498	1,83	1,83	1,82	1,53
4	55 458	2,12	2,12	2,15	2,42

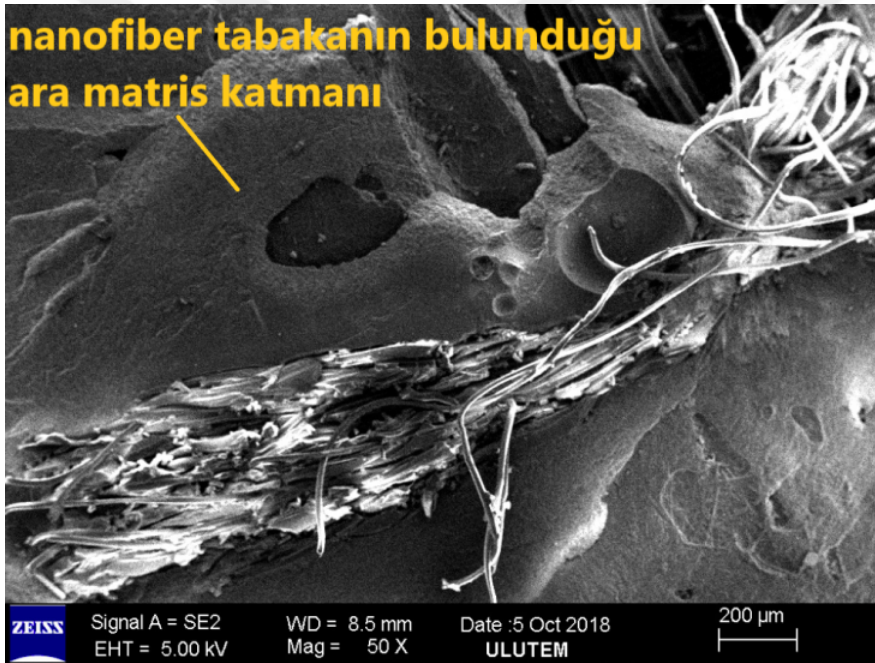
Referans numunenin simetri katına bir adet nano elyaf tabaka yerleştirildiğinde, kirişlerin eğme modül değeri ortalama %43,9 azalışla 32,2 GPa seviyesine gerilemiştir. Kırılma enerjisi de, %40,5 azalışla 1,16 kJ m⁻² seviyesine gerilemiştir (Şekil 5.16 ve Çizelge 5.21).

Şekil 7.16. *R+NF* numunesi Tip-I tabakalar arası ayrılma yük-yer değiştirme grafiği

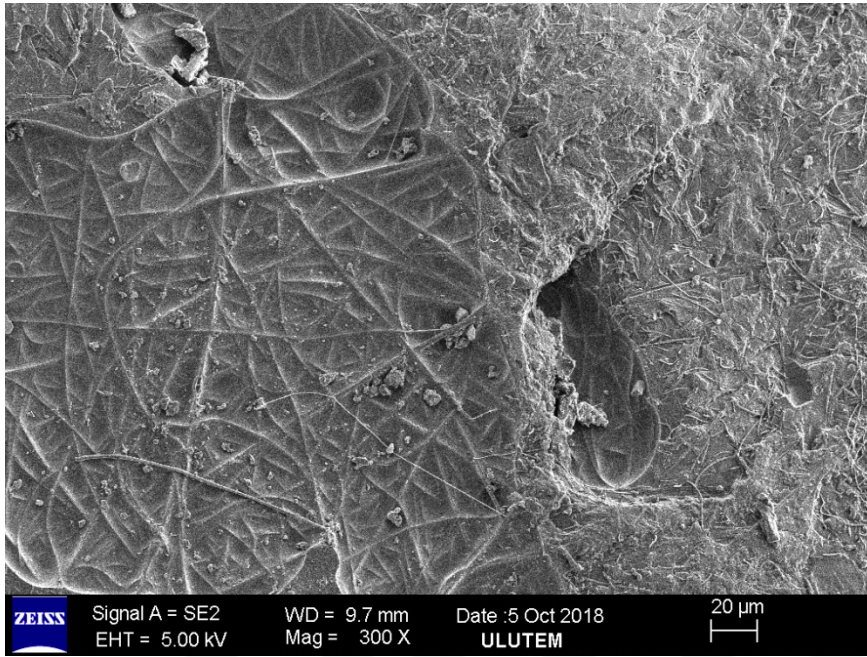
Referans numunede nano elyaf katmanının kırılma enerjisini düşürmesinde, yaklaşık 128 μ m kalınlığındaki nano elyafın ara bölgedeki epoksi matrisin tokluğunu artırması ve iki cam elyaf tabaka arasında bağlayıcı dolgu görevinden ziyade, birleşme bağı zayıflamış ayrı bir katman gibi görev yapması etkindir. Bu durumun eğme modülündeki azalışa olan etkisi ise, ara bölge matrisin elyaf köprülemeyi ortadan kaldırmasıyla açıklanabilir. Resim 7.12 ve 7.13'e dikkat edilirse, tabakalar arası kırılmanın nano elyaf tabaka ile cam elyaf tabaka arasında gerçekleştiği çatlakların ilerlemesini önleyecek herhangi bir içi içe geçmiş karmaşık bir durumun meydana gelmediği görülmektedir.

Çizelge 7.21. *R+NF* numuneleri Tip-I tabakalar arası ayrılma kritik kırılma enerjileri

Numune (<i>R+NF</i>)	<i>E</i> (MPa)	Yük	Yerdeğiştirme Ölçütleri- <i>G_{IC}</i> (kJm ⁻²)	Alan	Esneklik
2	34 914	1,30	1,30	1,29	1,32
3	31 024	1,04	1,04	1,01	1,17
4	28 000	1,28	1,28	1,26	1,11
5	36 450	1,08	1,08	1,05	0,94



Resim 7.12. *R+NF* numunesi Tip-I tabakalar arası ayrılma kırılma yüzeyi-1

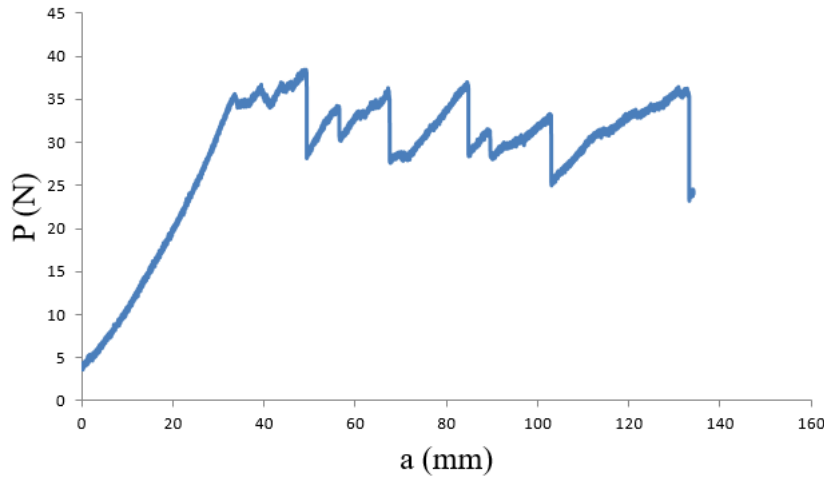


Resim 7.13. $R+NF$ numunesi Tip-I tabakalar arası ayrılma kırılma yüzeyi-2

Cam elyafların silan ile işlem gördüğü $R(F)$ numunesinde kırılgarlığın eğme modülü ortalama 34 762 MPa seviyesinde tespit edilmiştir (Çizelge 7.22 ve Şekil 7.17). Bu değer, referans numuneye göre %39,5 oranında azalış anlamına gelmektedir. Kırılma enerjisi ortalama 1,36 kJ m^{-2} seviyesinde bulunmuştur. Bu değer de, referansa göre %29 azalmayı göstermektedir. Cam elyaf ile matris arayüzünde kimyasal bağların kuvvetlendirilmesi, köprülemenin olmadığı gevrek kırılmayı meydana getirmiştir.

Çizelge 7.22. $R(F)$ numuneleri Tip-I tabakalar arası ayrılma kritik kırılma enerjileri

Numune ($R(F)$)	E (MPa)	Yük	Yerdeğiştirme	Alan		Esneklik
				Ölçütleri- G_{Ic} (kJm^{-2})		
1	47 810	1,67	1,66	1,65	1,69	
2	37 812	1,22	1,22	1,22	1,17	
3	31 217	1,08	1,07	1,09	1,09	
4	32 170	1,32	1,32	1,35	1,39	
5	24 800	1,52	1,52	1,53	1,62	

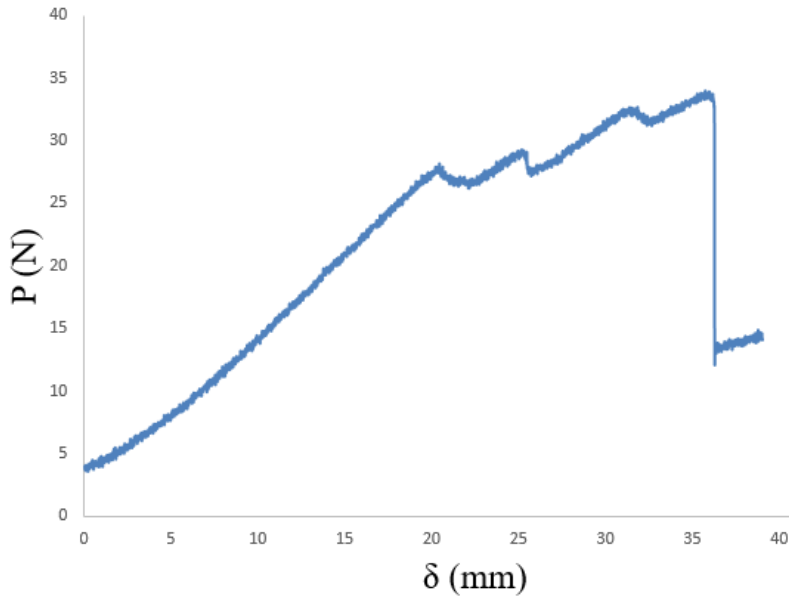


Şekil 7.17. $R(F)$ numunesi Tip-I tabakalar arası ayrılma yük-yer değiştirme grafiği

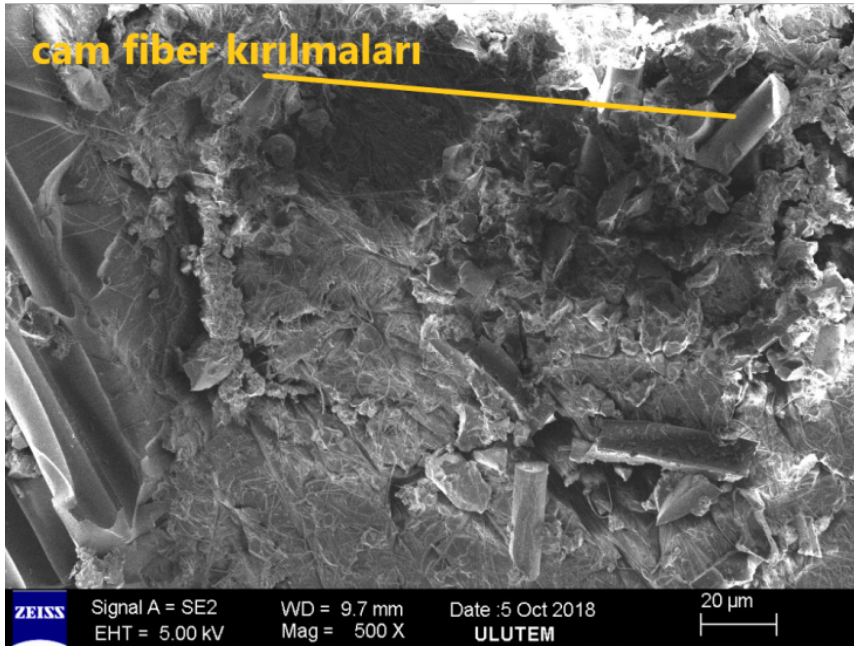
Arada nano elyaf tabakanın bulunduğu, matrisin fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp ile takviye edildiği ve aynı zamanda elyaf-matris arayüzünün silan ile işlem gördüğü $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinde çatlak ilerlemesinin 30 N yük değerinin hemen altında başladığı görülmektedir (Şekil 7.18 ve Çizelge 7.23). Nano elyaf köprülemesinin çatlak ilerledikçe etkisi görülmesine rağmen, kırılma enerjisinin yaklaşık olarak $0,65 \text{ kJ m}^{-2}$ seviyesinde, kiriş eğme modülünün ortalama 25 000 MPa seviyesinde tespit edildiği görülmektedir. Kırılma enerjisindeki düşüşte, kalın nano elyaf tabakanın meydana getirdiği ara bölge etkili olmuştur. Kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü incelendiğinde, cam elyafa ait kırık parçaların tespit edilmesi, ara bölgenin aşırı rijitliğinin göstergesi olarak yorumlanmıştır (Resim 7.14).

Çizelge 7.23. $R(F)+NF+CNT(F)$ numuneleri kritik kırılma enerji değerleri

Numune ($R(F)+NF+CNT(F)$)	E (MPa)	Yük	Yerdeğiştirme	Alan Esneklik	
				Ölçütleri- G_{IC} (kJm^{-2})	
1	29 725	0,62	0,62	0,65	0,54
2	21 367	0,56	0,56	0,51	0,55
3	25 417	0,53	0,53	0,52	0,45



Şekil 7.18. $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesi Tip-I tabakalar arası ayrılma yük-yer değıştirme grafiği



Resim 7.14. $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesi Tip-I tabakalar arası kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

7.4. Korozyon Deney Sonuçları

Yapılan bir çalışmada, korozif ortamın etkisinin çekme numunelerinden ziyade, en fazla eğme numunelerinde görüleceği belirtilmiştir [104]. Fakat, korozif ortam maruziyetinden

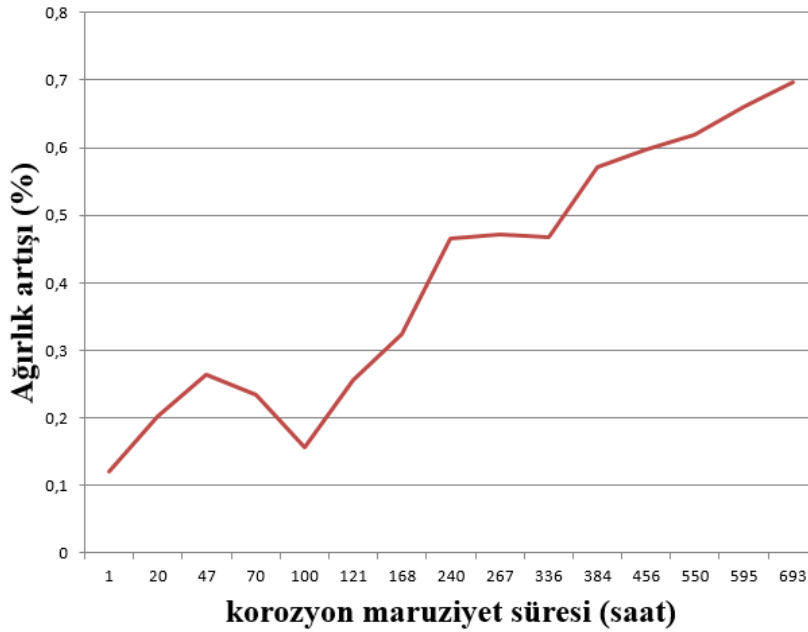
sonra dinamik test gerçekleştirildiği için, çekme numuneleri üzerinde korozyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Nem çekme miktarlarının ölçüldüğü ve birer hafta ara ile korozif ortamdan çıkartılan toplam dört numunenin (32-A, B, C ve D) boyut bilgileri Çizelge 7.24'de verilmiştir. 32-A'dan 32-D'ye doğru, sırasıyla, ağırlıkça %10 derişimdeki NaOH (pH=13) alkali korozif ortamda bekleme süresi 1, 2, 3 ve 4 hafta kadardır.

Çizelge 7.24. Kontrol numunelerinin korozyonmaruziyet süreci öncesi ilk boyutları

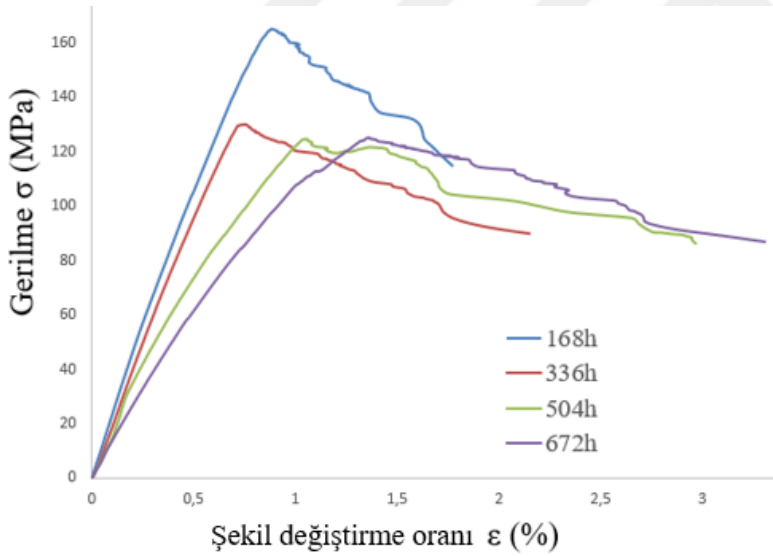
Numune kodu	Genişlik (mm)	Boy (mm)	Kalınlık (mm)	Çentik genişlik (mm)	Çentik boyu (mm)
32-A	25,00	198,85	2,93	3,65	4,75
32-B	25,39	199,05	2,97	3,60	4,65
32-C	24,37	199,36	3,06	3,52	4,72
32-D	24,48	199,35	3,23	3,60	4,82

Ağırlık değişimleri ortalama olarak hesap edildiğinde, 47-100 saatlik maruziyet aralığında ağırlık azalışı ile karşılaşmış, fakat diğer zaman aralıklarında numunelerin ağırlıklarında artışlar kaydedilmiştir. Ağırlık artış trendi saat başı izlendiğinde, 4 haftalık korozif maruziyet sürecinde trendin devamlı yukarı yönlü olduğu, yani malzeme tarafından absorpsiyonun gerçekleştiği tespit edilmiştir. Grafiğin sadece 47-100 saatleri arasında trend tersine dönmüş ve artışta kayıplar tespit edilmiş, fakat 100. saatten sonra artışın devam ettiği tespit edilmiştir. 4 haftalık maruziyet sonunda ağırlık artışı %0,7 oranında tamamlanmıştır (Şekil 7.19).

Korozif ortam maruziyet süresi arttıkça, numunelerin mekanik değerlerinde azalma tespit edilmiştir (Şekil 7.20). $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinin 1 haftalık alkali ortamdaki maruziyeti sonunda, elastisite modülü 22 821 MPa, azami gerilme karşısındaki uzama miktarı %1,78 seviyesindeyken, 4. haftanın sonunda modül değeri 12 897 MPa seviyesine inerken, elastikiyet oranı %3,3 seviyesine çıkmıştır. Elastikiyet ve modülde dramatik kayıplar, üç haftalık korozif ortam maruziyetinden sonra hızlanarak artmıştır.



Şekil 7.19. $R(F)+NF+CNT(F)$ korozyon kontrol numuneleri zamana bağlı ağırlık değişimi



Şekil 7.20. Bir, iki, üç ve dört haftalık korozyon maruziyetinin σ - ϵ eğrileri

Bununla birlikte, $[45_2, 90_2, -45_2, 0_2]$ cam elyaf dizilimine sahip epoksi kompozit numuneleri 36 gün boyunca %10 derişimdeki sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi içinde bekletilerek malzemenin mekanik değerlerindeki değişiminin tespit edildiği bir çalışmada [138], %10 derişimdeki sodyum hidroksit çözeltisi içinde ilk 12 günün sonunda kompozit malzemenin ağırlığındaki derişimin %1,23, 24. günün sonundaki derişimin %3,26 ve 36. günün sonunda ise %4,17 seviyesinde gerçekleştiği görülmüştür. Karboksil ve amin fonksiyonelleştirilmesi

yapılan karbon nanotüpün katyonik yüzey aktif maddesiyle beraber malzeme bünyesine verildiği, ortasında nano elyaf tabaka bulunan ve elyaf-matris arayüzünde metoksi-silan kimyasalın kullanıldığı $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinde, 30 günün sonundaki ağırlık farkının %0,7 seviyesinde olması, uygulanan kimyasal işlemlerin, alkali ortamın numune yüzeyinden ve kalınlık yüzeyinden iç kısma sirayet etmesine kısmen engel olduğunu göstermektedir.

Korozyona uğratılmış olan 4 adet SENT numunesinin çekme testi gerçekleştirildiğinde, kırılma dayanımı ve Tip-I kırılma tokluk değerinin bir haftalık maruziyet süreci sonunda ani bir şekilde düşüş gösterdiği, fakat 2., 3. ve 4. haftadaki değerlerin birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 7.25). Korozif ortam öncesi yapılan statik çekme testinde kırılma dayanımı 189 MPa seviyesinde tespit edilmiştir.

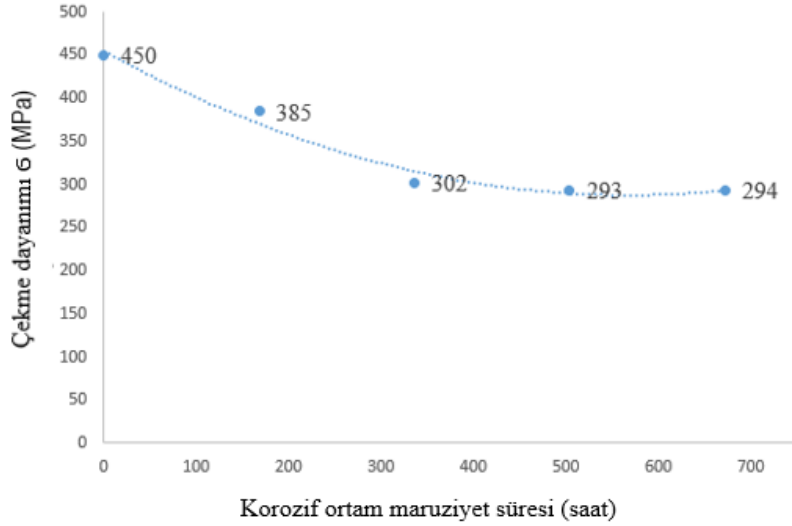
Çizelge 7.25. Kontrol numunelerinin çekme test sonuçları ve kırılma tokluk değerleri

$R(F)+NF+CNT(F)$	B	W	a/W	P_{maks}	σ_N	K_{IC}	K_Q
saat	(mm)			(N)	(MPa)	(MPa \sqrt{mm})	
0	2,98	24,21	0,19	13 632	189	28,1	31,5
168	3,16	25,00	0,19	13 040	165	24,3	27,2
336	3,16	25,39	0,19	11 099	130	19,0	21,3
504	3,36	24,37	0,18	10 983	125	18,5	20,7
672	3,44	24,48	0,18	11 543	125	18,5	20,7

Belirtilen çalışmada [138], %10 derişimdeki sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisinde bekletilen epoksi bazlı kompozit malzemelerde eğme dayanımı 36. günün sonunda %22 seviyesinde olurken, $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinin çekme dayanımındaki azalma %33,8 seviyesinde gerçekleşmiştir. Eğme modülündeki azalma %26,9 seviyesinde iken, $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinde, 30 günlük süreçte %50,2 seviyesinde azalma ile karşılaşmıştır. Asidik ve alkali etkinin eğme numunesinde etkisinin daha fazla görüldüğü göz önüne alınırsa, $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinde daha az orandaki nem çekme oranının çok daha olumsuz etkide bulunduğu belirtilebilir.

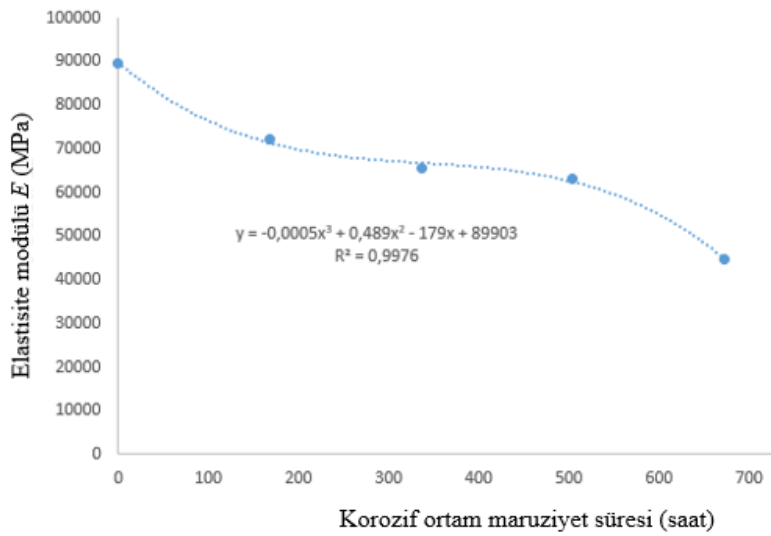
Tek kenar çentiğine sahip çekme numunelerinin kırılma dayanım değerlerinden ve çentik uzunluk oranından hareketle, Nokta Gerilme Ölçütü ve K/σ yaklaşımıyla, numunelerin çentiksiz hâllerinin çekme dayanımlarına ulaşmak mümkündür. Bu yöntem ve yaklaşımlar yardımıyla, korozif ortam maruziyeti bulunmayan numunenin çentiksiz çekme dayanımı 445

MPa seviyesinde tespit edilmiştir. Korozif ortamın malzeme dayanımındaki etkisi, Şekil 7.21’de gösterilmektedir. Korozif etki grafiği incelendiğinde, çekme gerilmesine maruz öentikli bir parçanın çatlak ucundan itibaren oluşan gerilme dağılımına benzer karakterde bir dayanım azalma eğrisinin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 7.21. Alkali ortam süresinin $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesi çekme dayanımına etkisi

Elastisite modülünün alkali ortamdan etkilenme grafiğine Şekil 7.22’de yer verilmiştir. Birim kalınlıktaki numunenin elastisite modülündeki azalmanın, korozif maruziyetin ilk bir haftalık sürecinde ve üçüncü haftadan sonra hızlanarak arttığı görülmektedir.



Şekil 7.22. Alkali ortam süresinin $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesi elastisite modülüne etkisi

7.5. Yorulma Analiz Sonuçları

Korozif ortamda tutulmamış olan $R(F)+NF+CNT(F)$ tek kenar çatlığına sahip numunelerinden 1 tanesinde statik çekme testi, 4 adedinde çekme-çekme yorulma testi gerçekleştirilmiştir. Korozif ortamda tutulmuş numunelerde ise 1 adet statik çekme testi, 2 adet de çekme-çekme dinamik (yorulma) testi gerçekleştirilmiştir. Statik test için çekme hızı 0,33 mm/s ve dinamik test için yorulma frekansı 3 Hz olarak alınmıştır. Gerilme oranı $R=0,1$ olarak seçilmiştir. Testler oda sıcaklığında (18-24°C) gerçekleştirilmiştir. Hem korozif ortama tabi tutulmamış ve hem de 30 gün süreyle %10 derişimdeki sodyum hidroksit ortamında maruziyeti olan statik test numunelerinin boyutları ve kırılma mekanik özellikleri Çizelge 7.26'da verilmiştir.

Çizelge 7.26'dan, 30 gün süreyle alkali ortamda kalan numunenin, normal numuneye göre, statik çekme testinde kopma anındaki uzama miktarının %1,969'dan % 1,149 değerine indiği görülmektedir. Bu durum, daha önceki çalışmalarla uyumludur ve alkali ortamın epoksi tabanlı kompozit malzemede beklenen etkisidir.

Çizelge 7.26. Korozyona uğratılmamış numunelerin boyutları ve statik test sonuçları

$R(F)+NF+CNT(F)$	B (mm)	W (mm)	ŞDÖ* (mm)	a/W	σ_N (MPa)	σ_{kopma} (MPa)	σ_{akma} (MPa)	Uzama (%)
Numune-1	2,98	24,21	103,33	0,19	189,0	80,0	178,7	1,969

ŞDÖ*=Şekil değiştirme ölçerler arasındaki mesafe

Çizelge 7.27. Korozyona uğratılmamış numunelerin boyutları ve dinamik test sonuçları

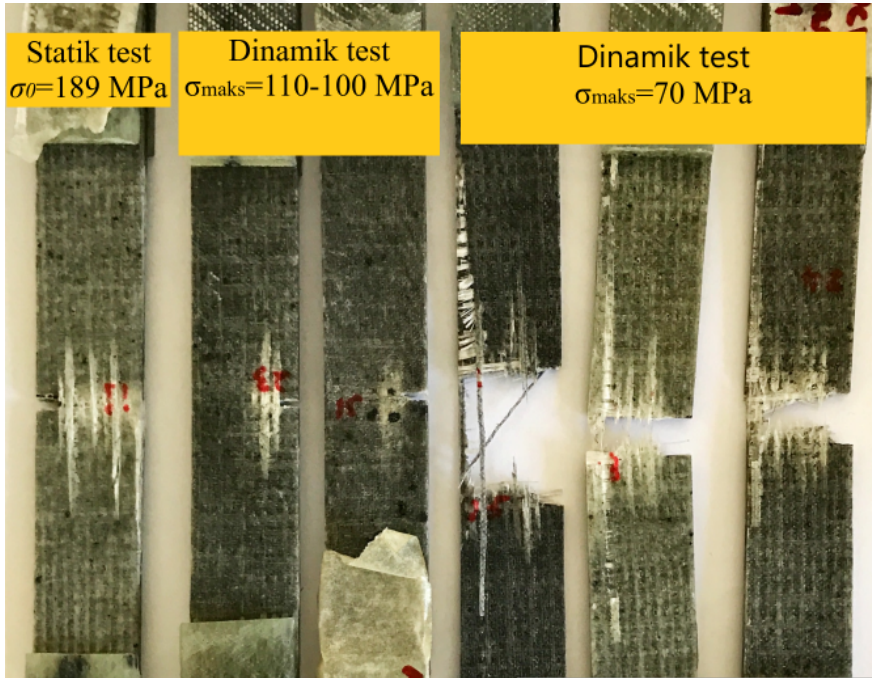
$R(F)+NF+CNT(F)$	B (mm)	W (mm)	ŞDÖ* (mm)	a/W	σ_{maks} (MPa)	N	Süre	Durum
Numune-1	2,94	24,04	104,73	0,19	110	8 424	48 dk	Kırıldı
Numune-2	3,06	23,33	107,45	0,19	100	78 837	7 saat 20 dk.	Hasarlı
Numune-3	3,22	23,9	106,27	0,18	70	572 753	52 saat 19 dk.	Kırıldı
Numune-4	3,24	24,01	93,62	0,18	60	780 584	72 saat	Hasarsız

ŞDÖ*=Şekil değiştirme ölçerler arasındaki mesafe, N=Yük çevrim sayısı

Resim 7.15'de 30 gün boyunca alkali ortamda tutulduktan sonra çeşitli gerilme değerlerinde statik ve dinamik çekme testlerine tabi tutulan numuneler görülmektedir. En sol tarafta,

statik teste tabi tutulan numunenin 189 MPa kırılma dayanımına sahip olduğu ve çatlak ilerlerken, en dış katmandaki boyuna cam elyafların matristen sıyrılma yaptıkları görülmektedir.

Resim 7.15’de 30 gün boyunca alkali ortamda tutulduktan sonra çeşitli gerilme değerlerinde statik ve dinamik çekme testlerine tabi tutulan numuneler görülmektedir. En sol tarafta, statik teste tabi tutulan numunenin 189 MPa kırılma dayanımına sahip olduğu ve çatlak ilerlerken, en dış katmandaki boyuna cam elyafların matristen sıyrılma yaptıkları görülmektedir. Bu durum, tabakaların bir bütün olarak çekme gerilmesini karşılayamadığını ve tabakalardan bazılarının devre dışı kalarak çatlakın ilerleme gösterdiğini belirtmektedir. Bu durum, azami gerilmenin 110, 100 ve 70 MPa seviyelerinde uygulandığı dinamik çekme-çekme test numunelerinde de görülmektedir.



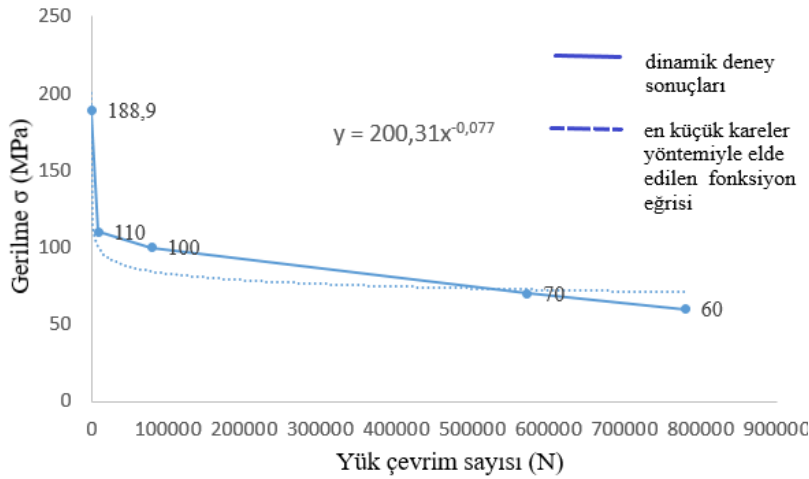
Resim 7.15. Önce korozyon ortamına sonra yorulma testine tabi tutulmuş numuneler

Resim 7.16’da, azami gerilmesi 60 MPa seviyesine indirilmiş çekme-çekme dinamik test numunesi görülmektedir. Bu azami gerilme yaklaşık olarak 780 500 yük çevrimine maruz kalmış numunede önemli bir makroskopik hasar tespit edilmemiştir.



Resim 7.16. Azami gerilmesi 60 MPa olan yorulma testinde 780 500 yük çevrimine tabi tutulmuş numune

Elde edilen veriler, gerilme-yük çevrim sayısına taşındığında, Şekil 7.23'deki mavi renkli eğri elde edilir. Bu eğri, Basquin Ölçütünün dayalı olduğu eşitliğe en küçük kareler ölçütüyle yakınsandığında, kesikli eğri elde edilir.



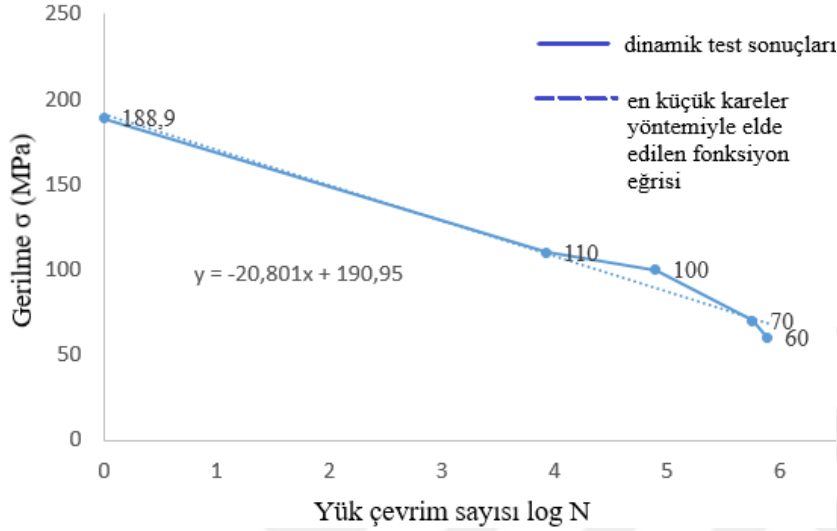
Şekil 7.23. Korozyona uğratılmamış $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinin S-N eğrisi

Basquin Ölçütüne yakın sonuç veren bir diğer seçenek,

$$\sigma_{maks} = \alpha(\log N) + \beta$$

şeklinindedir. Bu ölçütte, yük çevrim sayısı N, logaritmik skala cinsindedir. Bu ölçüt

kullanıldığında, Numune-4 kodundaki hasarsız numunenin 60 MPa en yüksek gerilmede dayanacağı yük çevrim sayısının yaklaşık olarak 1 974 108 olacağı hesap edilebilir ki, bu gerilme değerinin yorulma sınırı (eşiği) olarak tanımlanacağı açıktır (Şekil 7.24).



Şekil 7.24. Korozyona uğratılmamış $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinin logaritmik skalaya göre S-N eğrisi

Korozif ortamda bulunmuş olan numunelerin dinamik çekme test sonuçları Çizelge 7.28'de sunulmuştur. Korozif ortama tabi tutulmamış olan numune 189 MPa kırılma dayanımına sahipken, korozif maruziyetin etkisi ile, bu değer 105 MPa seviyesine indiği görülmektedir. Çekme-çekme yorulma numune sonuçları incelendiğinde, azami 70 MPa çekme gerilmesinde gerçekleştirilen dinamik testte, numunenin 545 000 yük çevriminde hasara uğradığı tespit edilmiştir. Azami gerilme 60 MPa seviyesine indirildiğinde, numunenin 238 000 yük çevriminde makroskopik olarak hasarsız olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.28. Korozyona uğratılmış numunelerin boyutları ve statik test sonuçları

$R(F)+NF+CNT(F)$	B	W	ŞDÖ* (mm)	a/W	σ_N	σ_{kopma}	σ_{akma}	Uzama (%)
	(mm)				(MPa)			
Numune-1	2,86	23,56	105,48	0,19	105,5	85,1	98,7	1,149

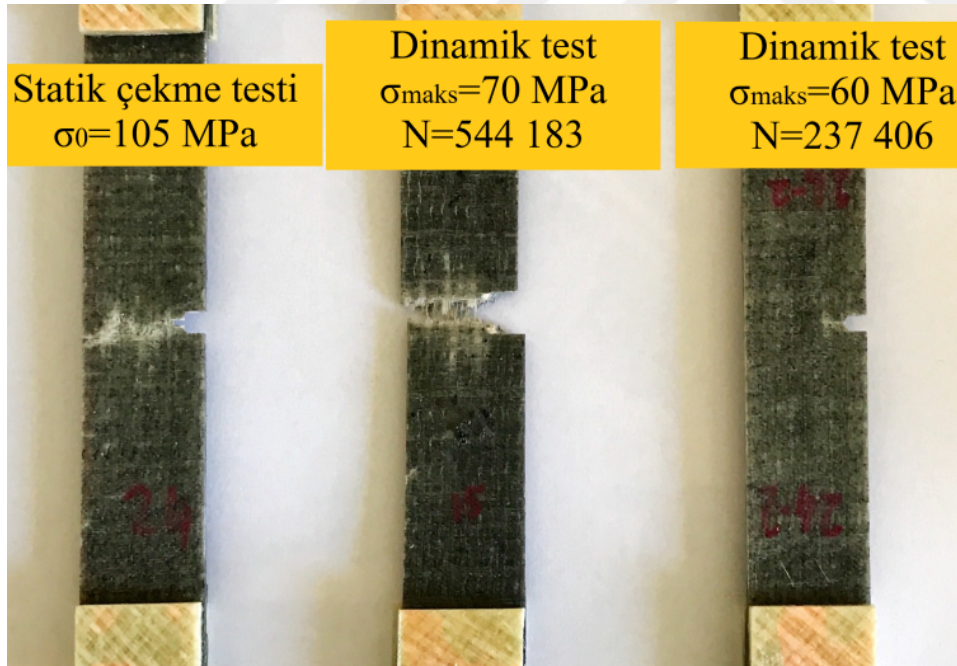
ŞDÖ*=Şekil değiştirme ölçerler arasındaki mesafe

Çizelge 7.29. Korozyona uğratılmış numunelerin boyutları ve dinamik test sonuçları

$R(F)+NF+CNT(F)$	B	W	ŞDÖ*	a/W	σ_{maks} (MPa)	N	Süre	Durum
	(mm)		(mm)					
Numune-1	3,01	23,45	104,78	0,19	70	544 183	50 saat 23 dk	Kırıldı
Numune -2	2,58	23,63	105,81	0,19	60	237 406	21 saat 58 dk.	Hasarsız

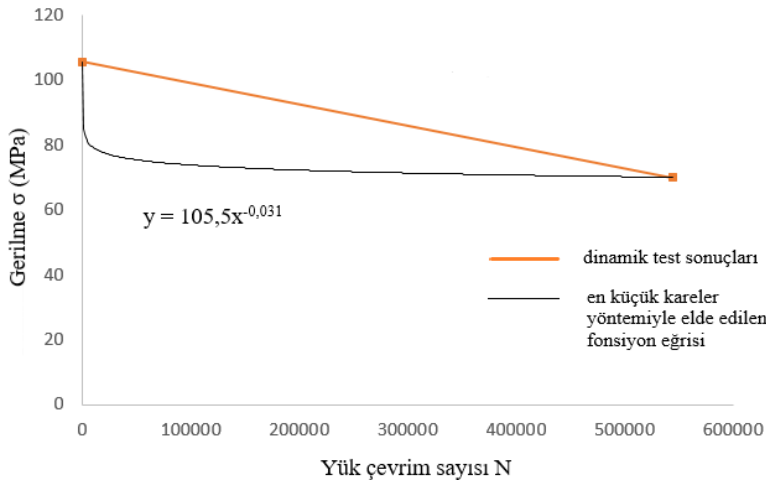
ŞDÖ*=Şekil değiştirme ölçerler arasındaki mesafe, N=Yük çevrim sayısı

Resim 7.17’de, statik ve dinamik teste tabi tutulan ve öncesinde koroziv ortama maruz bırakılmış $R(F)+NF+CNT(F)-1$ kat numunelerin kırılma biçimleri görülmektedir. Koroziv ortama maruz bırakılmadan testlere tabi tutulan numunelerden farklı olarak, çatlak ilerledikçe, dış katmanda bulunan boyuna cam fiberlerin matristen ayrılmadığı ve daha temiz bir kırılmanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, aslında, $R(F)+NF+CNT(F)-1$ kat numune tipinin aşırı rijit hâle geldiğini göstermektedir. Alkali etki, %0,7 oranında da olsa, yapı içine sirayet ederek, cam fiberleri etkilediği ve dayanım kaybı meydana getirerek, aşırı rijit yapının sunacağı görüntüyü engellediğini belirtmektedir.



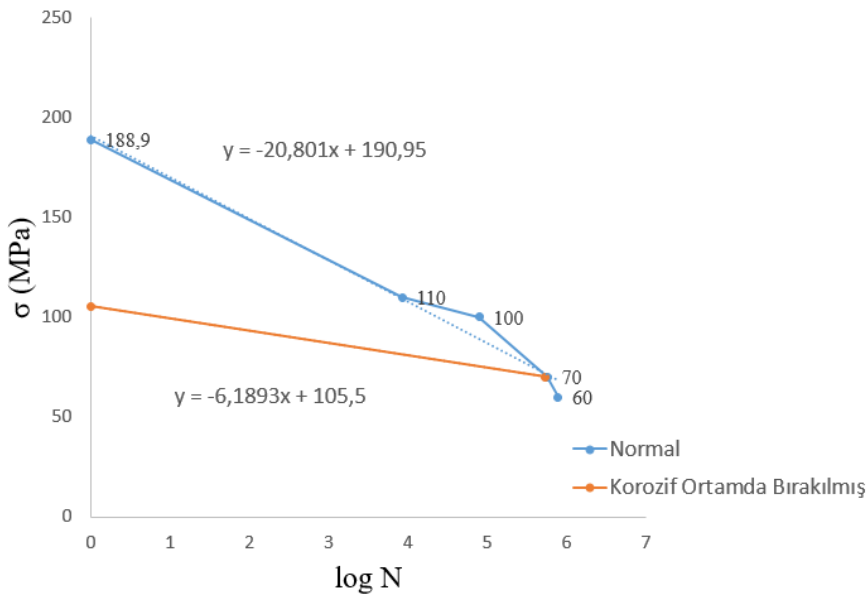
Resim 7.17. Statik ve dinamik teste tabi tutulan koroziv ortam numuneleri

Bir adet statik ve bir adet dinamik test sonucundan S-N grafiği Basquin Ölçütüne göre çizildiğinde, Şekil 7.25’deki turuncu renkli doğru elde edilir. Basquin Ölçütü doğrusal değil de, üssel bir fonksiyon sunduğu için, en küçük kareler ölçütüyle bu iki noktadan geçen eğri bulunabilir. α katsayısı 105,5 ve β katsayısı -0,031 olarak tespit edilir.



Şekil 7.25. Koroziona uğramış $R(F)+NF+CNT(F)$ numunesinin S-N eğrisi

Logaritmik yük çevrimine dayalı seçenек ile S-N grafiği incelendiğinde, 60 MPa en yüksek gerilme altında, 237 406 döngü sonrası hasarsız çıkan Korozif-2 isimli numunenin 3 Hz frekans ve $R=0,1$ 'de yorulma sınırı içinde kaldığı görülmektedir (Şekil 7.26). Şekilde, normal numunelerle korozif ortamda tutulmuş numunelerin S-N eğrilerine birlikte yer verilmiştir. Korozif ortamda tutulmuş numunelerin S-N grafiğinin eğiminin daha az olduğu görülmektedir. Normal numunelerde ise, en yüksek gerilme değışimiyle çevrim sayısının daha dramatik bir şekilde değıştiği tespit edilmektedir. Bu duruma etken olan etmen, alkali ortamda bulunan numunelerin rijitliklerinin artmasıdır.



Şekil 7.26. Koroziona uğramış $R(F)+NF+CNT(F)-1$ kat numunesinin logaritmik skalaya göre S-N eğrisi

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, elyaf-matris ara yüzünün kuvvetlendirilmesinin yanısıra, epoksi matrisin yüksek çapraz bağ yoğunluğundan kaynaklanan kırılğan yapısının nano elyaf ve karbon nanotüp ile takviye edilerek, meydana getirilecek nanokompozit yapının endüstriyel davranışları ele alınmıştır. Elyaf-matris ara yüzünde, epoksi ilgisi yüksek olan γ -Glycidoxypropyltrimethoxysilane kullanılırken, epoksi matris takviyesinde ağırlıkça %0,1 oranında çok cidarlı karbon nanotüp kullanılmıştır. Tek cidarlı karbon nanotüp (TCKNT), çok cidarlı karbon nanotüpe (ÇCKNT) göre çok daha yüksek boy/çap oranına sahiptir. Bu özelliği, matris-karbon nanotüp yük aktarımında rahatlatan bir unsur olmakta fakat tüpler arasında yüksek çekim kuvvetini beraberinde getirmektedir. Buna karşın, çok cidarlı karbon nanotüp, birçok cidar katmanından meydana geldiği için çok daha büyük çap değerine sahiptir. Bu durum, homojen dağılımı rahatlatan bir unsur olmakta fakat gerilme iletiminde daha düşük arayüz özelliğine neden olmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, çok cidarlı karbon nanotüpün matris içinde homojen dağılımının sağlanması için katyonik yüzey aktif maddesinden yararlanılmıştır. Yük aktarımının iyileştirilmesi amacıyla, hacimsel anlamda 1:1 oranında sülfürik asit/nitrik asit karışım banyosunda bekletilerek, hem nanotüp yüzeyindeki metalik katalitik artıkların giderilmesi ve hem de karboksil fonksiyonelleştirme gerçekleştirilmiştir. İlave olarak, karbon nanotüpün hekzametilen diamin ile reaksiyonu gerçekleştirilmiş ve amin fonksiyonelleştirmesi sağlanarak, yük aktarım özelliği iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Adı geçen iyileştirmeler nedeniyle, bu konuda yapılmış çalışmalarda sınır nano elyaf kalınlığı olarak belirtilen 128 μm kalınlıkta, poliakrilonitrilden elektro-eğirme yöntemiyle nano elyaf tabaka üretimi gerçekleştirilmiştir. Elyaf-matris arayüzünün güçlendirilmesi ve homojen dağılımı sağlanmış ve aynı zamanda fonksiyonelleştirilmiş çok cidarlı karbon nanotüp eklentisinin, nano elyafın bu sınır kalınlık değerindeki olası etkisinin incelenmesi, araştırmanın amaçlarından bir tanesi olmuştur. Gerçekleştirilen mekanik testlerde, çok cidarlı karbon nanotüpün katyonik yüzey aktif maddesi ile matrise verilmesinin malzemenin çekme dayanımında %24'e yakın iyileştirme getirirken, katyonik yüzey aktif maddesinin matrisin elastikiyetini artırıcı etkisi de tespit edilmiştir. Belirtilen iyileştirmenin ağırlıkça %0,1 oranında alınması, katyonik yüzey aktif maddesi kullanımının önemini ortaya koymuştur.

Tabakalı kompozit malzemede her bir cam elyaf tabaka arasına nano elyaf konulması, iki cam elyaf tabaka arasının açılmasına ve dolayısıyla numune kalınlıklarında artışa neden olmuştur. Bu konuda yapılmış çalışmalar incelendiğinde, elektro-eğirme esnasında doğrudan cam elyaf tabaka üzerine eğirme işleminin yapılması, bu numunelerde eksikliği tespit edilen mekanik teması meydana getirdiği görülmektedir. Üretilen numunelerde cam elyaf tabaka ile nano elyaf tabaka arasında yeterli mekanik temasın olmaması, iki cam elyaf tabaka arasında tabakalar arası ayrılmaya neden olan ve ayrı bir katman gibi çalışan nano elyafa doygun matris tabakasının meydana gelmesine yol açmıştır. Dolayısıyla, nano elyaf içeren numunelerde kırılma dayanım ve tokluk değerlerinin istenilen seviyede tespit edilememesinin nedeni bu olmuştur.

Çok cidarlı karbon nanotüp yüzeylerinde birlikte gerçekleştirilen karboksil ve amin fonksiyonelleştirme işlemlerinin, nanotüpün yapısını bozarak, istenilen verimin alınmasını engellemiştir. Karbon nanotüpün asit ile saflaştırmasının nanotüp yapısını ve yüzeyini hasara uğratarak, beklenen sonucun alınamamasına neden olmuştur.

Tez çalışmasında, her bir kimyasal işlemin ve takviye elemanının kırılma mekaniği açısından değerlendirmesi yapılmıştır. Bu ara ürünler içinde, elyaf-matris arayüzünün iyileştirildiği ve çok cidarlı karbon nanotüpün fonksiyonelleştirilmeden ilave edildiği $R(F)$ ve $R(F)+CNT$ numunelerinde en yüksek mekanik değerlerin elde edildiği tespit edilmiştir. Çekme numunelerinde, $R(F)+CNT$ numunesinin çekme dayanımı, katkısız (R) numunesine göre %35,7 seviyesinde, kırılma tokluğu %28,8 oranında artmıştır. Eğme numunelerinde ise, aynı numunenin referans numuneye göre eğme dayanımı %13,7, eğme kırılma tokluğu %13,8 oranında artış göstermiştir. Sadece silan bağlayıcı kimyasalının kullanıldığı $R(F)$ numunesinin eğme dayanımında referans numuneye göre değeri %6,9 oranında düşmüş, fakat kırılma tokluğu ise %16,5 oranında artış göstermiştir. Bu durum, silan bağlayıcı kimyasalın, malzemenin rijitliğini artırmasından kaynaklanmaktadır.

$R(F)+NF+CNT(F)$ çekme numuneleri 672 saat (30 gün) % 10 derişimdeki (pH=13) NaOH çözeltisi içinde bekletilerek korozyona uğratılmıştır. Mekanik özellik kaybı, dört haftalık sürecin ilk iki haftasında büyük oranda gerçekleşirken, son iki haftada değişimlerin zayıf olduğu tespit edilmiştir. Alkali ortamın, yapının esnekliğini azaltarak, rijitliğinin artmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Korozyona uğramış ve korozyona uğramadan çekme-çekme yorulma testine tabi tutulan numunelerin en yüksek gerilme değerleri, çekme dayanımının belirli yüzdelerinde olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsam doğrultusunda önce statik, sonra da dinamik testler gerçekleştirilmiştir. 3 Hz frekansta ve gerilme oranı $R=0,1$ olacak şekilde gerçekleştirilen yorulma testleri öncesinde, korozyona uğramış olan numunelerin statik çekme dayanımının, korozyona uğramamış numuneye göre dayanım değerini %54 oranında kaybettiği tespit edilmiştir. Dinamik deneyler sonucunda oluşturulan gerilme-yük çevrim sayısı eğrilerinin kıyaslamasında, korozyona uğramış numunenin $N=0$ 'dan yorulma dayanım eşiğine doğru sergilediği eğimin daha az, korozyona uğramamış numunenin ise daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durum da, korozyona uğramamış numunenin yorulmaya karşı hassasiyetinin daha fazla olduğunu göstermektedir.

Tez kapsamında, Kırılma Mekaniğinin ilkeleri üzerinde yapılan araştırmalarda, çentikli çekme ya da eğme numunelerinin çeşitli çentik uzunluk oranlarında ve çentiksiz dayanım değerlerinin tespit edilmesinde en az iki değişkenin bilinmesinin gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Bunlar, malzemenin çekme ya da eğme dayanımı ve Nokta Gerilme Ölçütü ya da İç Kusur Ölçütü için gereken karakteristik uzaklık değerleridir. Bu durum da, bir numuneden en az iki mekanik testin yapılmasını gerektirmektedir. Termodinamiğin 1. Kuralına dayalı olarak enerji ölçütüyle lineer elastik kırılma mekaniği birlikte düşünülerek, numunenin bir adet test değerinden, tüm çentik uzunluk oranlarındaki kırılma dayanımlarını ve modül değerlerini bulmanın mümkün olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Barbero, E. J. (2017). *Introduction to Composite Materials Design*, CRC Press. ISBN: 978-1138196803
- [2] Lawrence, N. (1994). *Mechanical Properties of Polymers and Composites*. ISBN: 9780824789640
- [3] Gul, V. E. (1996). *Structure and Properties of Conducting Polymer Composites*, Taylor & Francis. ISBN: 9789067642040
- [4] Dumas, L., Bonnaud, L., and Dubois, P. (2017). Polybenzoxazine Nanocomposites: Case Study of Carbon Nanotubes. *Advanced and Emerging Polybenzoxazine Science and Technology*, Elsevier, pp. 767–800.
- [5] Zhang, Q., Liu, Z., Zhao, B., Cheng, Y., Zhang, L., Wu, H.-H., Wang, M.-S., Dai, S., Zhang, K., Ding, D., Wu, Y., and Liu, M. (2019). Design and Understanding of Dendritic Mixed-Metal Hydroxide Nanosheets@N-Doped Carbon Nanotube Array Electrode for High-Performance Asymmetric Supercapacitors. *Energy Storage Mater.*, 16, pp. 632–645.
- [6] Zhang, D., Shi, L., Fang, J., Li, X., and Dai, K. (2005). Preparation and Modification of Carbon Nanotubes. *Mater. Lett.*, 59(29), pp. 4044–4047.
- [7] Chen, X., Wang, J., Lin, M., Zhong, W., Feng, T., Chen, X., Chen, J., and Xue, F. (2008). Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Nanocomposites Reinforced with Amino-Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Mater. Sci. Eng. A*, 492(1), pp. 236–242.
- [8] Gong, X., Liu, J., Baskaran, S., Voise, R. D., and Young, J. S. (2000). Surfactant-Assisted Processing of Carbon Nanotube/Polymer Composites. *Chem. Mater.*, 12(4), pp. 1049–1052.
- [9] Molnar, K., Kostakova, E., and Mészáros, L. (2014). The Effect of Needleless Electrospun Nanofibrous Interleaves on Mechanical Properties of Carbon Fabrics/Epoxy Laminates. *EXPRESS Polym. Lett.*, 8, pp. 62–72.
- [10] Lomov, S. (2015). Compressibility of Carbon Fabrics with Needleless Electrospun PAN Nanofibrous Interleaves. *Express Polym. Lett.*, 10, pp. 25–35.
- [11] Neisiany, R. E., Khorasani, S. N., Naeimirad, M., Lee, J. K. Y., and Ramakrishna, S. (2017). Improving Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composite by Incorporating Functionalized Electrospun Polyacrylonitrile Nanofibers. *Macromol. Mater. Eng.*, 302(5)
- [12] Neisiany, R. E., Lee, J. K. Y., Khorasani, S. N., and Ramakrishna, S. (2017). Self-Healing and Interfacially Toughened Carbon Fibre-Epoxy Composites Based on Electrospun Core-Shell Nanofibres. *J. Appl. Polym. Sci.*, 134(31), p. 44956.
- [13] Ionescu, M. I., and Laforgue, A. (2020). Synthesis of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes Directly on Metallic Foams as Cathode Material with High Mass Load for Lithium-Air Batteries. *Thin Solid Films*, 709, p. 138211.
- [14] Bakather, O. Y. (2020). Adsorption of Benzene on Impregnated Carbon Nanotubes. *Ain Shams Eng. J.* <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.03.012>
- [15] Wang, X., Sharif, F., Liu, X., Licht, G., Lefler, M., and Licht, S. (2020). Magnetic Carbon Nanotubes: Carbide Nucleated Electrochemical Growth of Ferromagnetic CNTs from CO₂. *J. CO₂ Util.*, 40, p. 101218.
- [16] Chen, G., Xu, Y., Huang, L., Ibro Douka, A., and Yu Xia, B. (2020). Continuous Nitrogen-Doped Carbon Nanotube Matrix for Boosting Oxygen Electrocatalysis in Rechargeable Zn-Air Batteries, *J. Energy Chem.*

- [17] Zhang, X., Zhang, J., Cheng, X., and Huang, W. (2020). Carbon Nanotube Protected Composite Laminate Subjected to Lightning Strike: Interlaminar Film Distribution Investigation. *Chin. J. Aeronaut.*
- [18] Carlos Ramos, J., Reyes Flores, J., Turlakov, G., Moggio, I., Arias, E., and Rodríguez, G. (2020). Self-Assembly of a Poly(Phenyleneethynylene) on Multiwall Carbon Nanotubes: Correlation of Structural and Optoelectronic Properties towards Solar Cells Application. *J. Mol. Struct.*, p. 128845.
- [19] Vanyorek, L., Prekob, Á., Hajdu, V., Muránszky, G., Fiser, B., Sikora, E., Kristály, F., and Viskolcz, B. (2020). Ultrasonic Cavitation Assisted Deposition of Catalytically Active Metals on Nitrogen-Doped and Non-Doped Carbon Nanotubes — A Comparative Study, *J. Mater. Res. Technol.*, 9(3), pp. 4283–4291.
- [20] Guo, Z., Yang, P., Yang, L., Luo, Q., Wang, J., hao, yawei, Yang, R., Lai, X., Zhao, X., Gao, Q., Shao, Q., Wu, S., Ding, T., fu, qinglong, Mai, X., Dong, M., and Lin, J. (2019). Anchoring Carbon Nanotubes and Post-Hydroxylation Treatment Enhanced Ni Nanofiber Catalysts towards Efficient Hydrous Hydrazine Decomposition for an Effective Hydrogen Generation. *Chem. Commun.*, 55.
- [21] Lin, S., Wang, H., Wu, F., Wang, Q., Bai, X., Zu, D., Song, J., Wang, D., Liu, Z., Li, Z., Tao, N., Huang, K., Lei, M., Li, B., and Wu, H. (2019). Room-Temperature Production of Silver-Nanofiber Film for Large-Area, Transparent and Flexible Surface Electromagnetic Interference Shielding. *Npj Flex. Electron.*, 3(1), pp. 1–8.
- [22] He, Z., Li, M., Li, Y., Wang, L., Zhu, J., Meng, W., Li, C., Zhou, H., and Dai, L. (2019). Electrospun Nitrogen-Doped Carbon Nanofiber as Negative Electrode for Vanadium Redox Flow Battery. *Appl. Surf. Sci.*, 469, pp. 423–430.
- [23] Wang, Q., Ju, J., Tan, Y., Hao, L., Ma, Y., Wu, Y., Zhang, H., Xia, Y., and Sui, K. (2019). Controlled Synthesis of Sodium Alginate Electrospun Nanofiber Membranes for Multi-Occasion Adsorption and Separation of Methylene Blue. *Carbohydr. Polym.*, 205, pp. 125–134.
- [24] Li, X.-X., and He, J.-H. (2019). Nanoscale Adhesion and Attachment Oscillation under the Geometric Potential. Part 1: The Formation Mechanism of Nanofiber Membrane in the Electrospinning. *Results Phys.*, 12, pp. 1405–1410.
- [25] Palazzetti, R., Yan, X., and Zucchelli, A. (2014). Influence of Geometrical Features of Electrospun Nylon 6,6 Interleave on the CFRP Laminates Mechanical Properties. *Polym. Compos.*, 35(1), pp. 137–150.
- [26] Razavi, M., Esmaeely Neisiany, R., Ayatollahi, M. R., Ramakrishna, S., Nouri Khorasani, S., and Berto, F. (2018). Fracture Assessment of Polyacrylonitrile Nanofiber-Reinforced Epoxy Adhesive. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 97, pp. 448–453.
- [27] Yang, Y., Zhang, C., Huang, D., Zeng, G., Huang, J., Lai, C., Zhou, C., Wang, W., Guo, H., Xue, W., Deng, R., Cheng, M., and Xiong, W. (2019). Boron Nitride Quantum Dots Decorated Ultrathin Porous G-C₃N₄: Intensified Exciton Dissociation and Charge Transfer for Promoting Visible-Light-Driven Molecular Oxygen Activation. *Appl. Catal. B Environ.*, 245, pp. 87–99.
- [28] Exarhos, A. L., Hopper, D. A., Patel, R. N., Doherty, M. W., and Bassett, L. C. (2019). Magnetic-Field-Dependent Quantum Emission in Hexagonal Boron Nitride at Room Temperature. *Nat. Commun.*, 10(1), p. 222.
- [29] Karthik, D., Ahn, D. H., Ryu, J. H., Lee, H., Maeng, J. H., Lee, J. Y., and Kwon, J. H. (2020). Highly Efficient Blue Thermally Activated Delayed Fluorescence Organic Light Emitting Diodes Based on Tercarbazole Donor and Boron Acceptor Dyads. *J. Mater. Chem. C*, 8(7), pp. 2272–2279.

- [30] Yankowitz, M., Ma, Q., Jarillo-Herrero, P., and LeRoy, B. J. (2019). Van Der Waals Heterostructures Combining Graphene and Hexagonal Boron Nitride. *Nat. Rev. Phys.*, 1(2), pp. 112–125.
- [31] Zhang, Y.-H., Mao, D., and Senthil, T. (2019). Twisted Bilayer Graphene Aligned with Hexagonal Boron Nitride: Anomalous Hall Effect and a Lattice Model. *Phys. Rev. Res.*, 1(3), p. 033126.
- [32] Lewis, J. S., Barani, Z., Magana, A. S., Kargar, F., and Balandin, A. A. (2019). Thermal and Electrical Conductivity Control in Hybrid Composites with Graphene and Boron Nitride Fillers. *Mater. Res. Express*, 6(8), p. 085325.
- [33] Özkan, A., Atar, N., and Yola, M. L. (2019). Enhanced Surface Plasmon Resonance (SPR) Signals Based on Immobilization of Core-Shell Nanoparticles Incorporated Boron Nitride Nanosheets: Development of Molecularly Imprinted SPR Nanosensor for Anticancer Drug, Etoposide. *Biosens. Bioelectron.*, 130, pp. 293–298.
- [34] Kaw, A. K. (1997). *Mechanics of Composite Materials*. CRC Press. ISBN: 978-0849313431
- [35] Gibson, R. F. (2016). *Principles of Composite Material Mechanics*. CRC Press. ISBN: 9781498720694
- [36] Paluvai, N. R., Mohanty, S., and Nayak, S. K. (2014). *Synthesis and Modifications of Epoxy Resins and Their Composites: A Review*.
- [37] Schulte, K., Gojny, F. H., Fiedler, B., Sandler, J. K. W., and Bauhofer, W. (2005). Carbon Nanotube-Reinforced Polymers: A State of the Art Review. *Polymer Composites: From Nano- to Macro-Scale*, Springer US, Boston, MA, pp. 3–23. ISBN: 978-0-387-24176-0.
- [38] Dyachkova, T., Tugolukov, E., and Burakova, E. (2017). Modelling of Carbon Nanotube Functionalization Processes, MATEC Web Conf., 129, p. 02014.
- [39] El-Brolosy, T. A., Ibrahim, S. S., and Alkudhayr, E. A. (2015). Carbon Nanotube Functionalization Effects on Thermal Properties of Multiwall Carbon Nanotube/Polycarbonate Composites. *Polym. Compos.*, 36(7), pp. 1242–1248.
- [40] Syrgiannis, Z., Melchionna, M., and Prato, M. (2021). Covalent Carbon Nanotube Functionalization. *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–8.
- [41] Roy, S., Petrova, R. S., and Mitra, S. (2018). Effect of Carbon Nanotube (CNT) Functionalization in Epoxy-CNT Composites. *Nanotechnol. Rev.*, 7(6), pp. 475–485.
- [42] Zakharychev, E., Razov, E., Semchikov, Y., Zakharycheva, N., and Kabina, M. (2017). The Influence of Functionalization Time of Carbon Nanotube on the Mechanical Properties of the Epoxy Composites. *J. Compos. Mater.*, 51, p. 002199831770198.
- [43] Ferreira, F. V., Cividanes, L. D. S., Brito, F. S., de Menezes, B. R. C., Franceschi, W., Simonetti, E. A. N., and Thim, G. P. (2016). Functionalization of Carbon Nanotube and Applications. *Functionalizing Graphene and Carbon Nanotubes: A Review*, Springer International Publishing, Cham, pp. 31–61.
- [44] Fried, J. R. (2014). *Polymer Science and Technology*. Pearson Education. ISBN-13: 978-0-13-703955-5
- [45] Shanmugaraj, A. M., Bae, J. H., Lee, K. Y., Noh, W. H., Lee, S. H., and Ryu, S. H. (2007). Physical and Chemical Characteristics of Multiwalled Carbon Nanotubes Functionalized with Aminosilane and Its Influence on the Properties of Natural Rubber Composites. *Compos. Sci. Technol.*, 67(9), pp. 1813–1822.

- [46] Kim, S. D., Kim, J. W., Im, J. S., Kim, Y. H., and Lee, Y. S. (2007). A Comparative Study on Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) Modified with Acids and Oxyfluorination. *J. Fluor. Chem.*, 128(1), pp. 60–64.
- [47] Li, J., Fang, Z., Tong, L., Gu, A., and Liu, F. (2007). Improving Dispersion of Multiwalled Carbon Nanotubes in Polyamide 6 Composites through Amino-Functionalization. *J. Appl. Polym. Sci.*, 106(5), pp. 2898–2906.
- [48] Ma, P. C., Kim, J.-K., and Tang, B. Z. (2006). Functionalization of Carbon Nanotubes Using a Silane Coupling Agent. *Carbon*, 44(15), pp. 3232–3238.
- [49] Xie, X.-L., Mai, Y.-W., and Zhou, X.-P. (2005). Dispersion and Alignment of Carbon Nanotubes in Polymer Matrix: A Review. *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, 49(4), pp. 89–112.
- [50] Yeşil, S. (2010). Processing and Characterization of Carbon Nanotube Based Conductive Polymer Composites. Chem. Eng. Ph Thesis, Middle East Tech. Univ., Ankara, Turkey.
- [51] Xanthos, M. (2010). *Functional Fillers for Plastics*. John Wiley & Sons. ISBN:9783527323616
- [52] Špitalský, Z., Krontiras, C. A., Georga, S. N., and Galiotis, C. (2009). Effect of Oxidation Treatment of Multiwalled Carbon Nanotubes on the Mechanical and Electrical Properties of Their Epoxy Composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, 40(6), pp. 778–783.
- [53] Tasis, D., Tagmatarchis, N., Georgakilas, V., and Prato, M. (2003). Soluble Carbon Nanotubes. *Chem. – Eur. J.*, 9(17), pp. 4000–4008.
- [54] Hirsch, A. (2002). Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 41(11), pp. 1853–1859.
- [55] Eitan, A., Jiang, K., Dukes, D., Andrews, R., and Schadler, L. S. (2003). Surface Modification of Multiwalled Carbon Nanotubes: Toward the Tailoring of the Interface in Polymer Composites. *Chem. Mater.*, 15(16), pp. 3198–3201.
- [56] İnternet: “1,6-Diaminohexane. URL: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/487481>. Son Erişim Tarihi: 13.07.2020.
- [57] Francisco, W., Ferreira, F. V., Ferreira, E. V., Cividanes, L. de S., Coutinho, A. dos R., and Thim, G. P. (2015). Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotube and Mechanical Property of Epoxy-Based Nanocomposite. *J. Aerosp. Technol. Manag.*, 7(3), pp. 289–293.
- [58] Kronberg, B., and Lindman, B. (2003). *Surfactants and Polymers in Aqueous Solution*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester. ISBN: 9780471498834
- [59] Islam, M. F., Rojas, E., Bergey, D. M., Johnson, A. T., and Yodh, A. G. (2003). High Weight Fraction Surfactant Solubilization of Single-Wall Carbon Nanotubes in Water. *Nano Lett.*, 3(2), pp. 269–273.
- [60] Cui, S., Canet, R., Derre, A., Couzi, M., and Delhaes, P. (2003). Characterization of Multiwall Carbon Nanotubes and Influence of Surfactant in the Nanocomposite Processing. *Carbon*, 41(4), pp. 797–809.
- [61] Haggenueller, R., Gommans, H. H., Rinzler, A. G., Fischer, J. E., and Winey, K. I. (2000). Aligned Single-Wall Carbon Nanotubes in Composites by Melt Processing Methods. *Chem. Phys. Lett.*, 330(3–4), pp. 219–225.
- [62] Vaisman, L., Marom, G., and Wagner, H. D. (2006). Dispersions of Surface-Modified Carbon Nanotubes in Water-Soluble and Water-Insoluble Polymers. *Adv. Funct. Mater.*, 16(3), pp. 357–363.

- [63] İnternet: Cetylpyridinium Chloride. URL: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/cetylpyridiniumchloride35800600424611?lang=en®ion=TR>, Son Erişim Tarihi: 13.07.2020.
- [64] Plueddemann, E. P. (1970). Adhesion Through Silane Coupling Agents. *The Journal of Adhesion*, 2:3, 184-201, DOI: 10.1080/0021846708544592
- [65] Kim, J.-K., and Mai, Y.-W. (1998). *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*, Elsevier. ISBN: 978-0-08-042695-2
- [66] Koenig, J. L., and Emadipour, H. (1985). Mechanical Characterization of the Interfacial Strength of Glass-Reinforced Composites. *Polym. Compos.*, 6(3), pp. 142–150.
- [67] Ramakrishna, S. (2005). *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*, World Scientific. ISBN: 978-981-256-415-3. <https://doi.org/10.1142/5894>.
- [68] Aljarrah, M. T., and Abdelal, N. R. (2019). Improvement of the Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fiber Composite Reinforced with Electrospun Nylon Nanofiber. *Compos. Part B Eng.*, 165, pp. 379–385.
- [69] Beylergil, B., Tanoğlu, M., and Aktaş, E. (2017). Enhancement of Interlaminar Fracture Toughness of Carbon Fiber–Epoxy Composites Using Polyamide-6, 6 Electrospun Nanofibers. *J. Appl. Polym. Sci.*, 134(35), p. 45244.
- [70] Saghafi, H., Brugo, T., Minak, G., and Zucchelli, A. (2015). The Effect of PVDF Nanofibers on Mode-I Fracture Toughness of Composite Materials. *Compos. Part B Eng.*, 72, pp. 213–216.
- [71] Barzoki, P. K., Rezaoust, A. M., and Latifi, M. (2018). Tunable Effect of Polyvinyl Butyral Nanofiber Veil on Fracture Toughness of Glass Reinforced Phenolic Composites Manufactured with out of Autoclave Method. *Polym. Test.*, 71, pp. 255–261.
- [72] Yademellat, H., Nikbakht, A., Saghafi, H., and Sadighi, M. (2018). Experimental and Numerical Investigation of Low Velocity Impact on Electrospun Nanofiber Modified Composite Laminates. *Compos. Struct.*, 200, pp. 507–514.
- [73] Daelemans, L., Kizildag, N., Van Paepegem, W., D’hooge, D. R., and De Clerck, K. (2019). Interdiffusing Core-Shell Nanofiber Interleaved Composites for Excellent Mode I and Mode II Delamination Resistance. *Compos. Sci. Technol.*, 175, pp. 143–150.
- [74] Barzoki, P. K., Rezaoust, A. M., Latifi, M., and Saghafi, H. (2018). The Experimental and Numerical Study on the Effect of PVB Nanofiber Mat Thickness on Interlaminar Fracture Toughness of Glass/Phenolic Composites. *Eng. Fract. Mech.*, 194, pp. 145–153.
- [75] Wu, S., Ladani, R. B., Ravindran, A. R., Zhang, J., Mouritz, A. P., Kinloch, A. J., and Wang, C. H. (2017). Aligning Carbon Nanofibres in Glass-Fibre/Epoxy Composites to Improve Interlaminar Toughness and Crack-Detection Capability. *Compos. Sci. Technol.*, 152, pp. 46–56.
- [76] Ipackchi, H., Rezaoust, A. M., Esfandeh, M., and Rezaei, M. (2020). Improvement of Interlaminar Fracture Toughness of Phenolic Laminates Interleaved with Electrospun Polyvinyl Butyral Nanofibers. *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 105, p. 102406.
- [77] Rahman, A. S., and Radford, D. W. (2017). Evaluation of the Geopolymer/Nanofiber Interfacial Bond Strength and Their Effects on Mode-I Fracture Toughness of Geopolymer Matrix at High Temperature. *Compos. Interfaces*, 24(8), pp. 817–831.
- [78] Vedrtnam, A. (2019). Novel Method for Improving Fatigue Behavior of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite. *Compos. Part B Eng.*, 157, pp. 305–321.

- [79] Habibi, M., Laperrière, L., and Hassanabadi, H. M. (2019). Effect of Moisture Absorption and Temperature on Quasi-Static and Fatigue Behavior of Nonwoven Flax Epoxy Composite. *Compos. Part B Eng.*, 166, pp. 31–40.
- [80] Shabani, P., Taheri-Behrooz, F., Maleki, S., and Hasheminasab, M. (2019). Life Prediction of a Notched Composite Ring Using Progressive Fatigue Damage Models. *Compos. Part B Eng.*, 165, pp. 754–763.
- [81] Agarwal, B. D., Broutman, L. J., and Chandrashekhara, K. (2017). *Analysis and Performance of Fiber Composites*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-1-119-38998-9
- [82] Agarwal, B. D., and Dally, J. W. (1975). Prediction of Low-Cycle Fatigue Behaviour of GFRP: An Experimental Approach. *J. Mater. Sci.*, 10(2), pp. 193–199.
- [83] Foye, R., and Baker, D. J. (1970). Design of Orthotropic Laminates. 11th Annu. AIAA Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf.
- [84] Hofer, K. E., Jr. Benett, L. C., and Stander, M. (1976). Effect of Various Fiber Surface Treatments on the Fatigue Behavior of Glass Fabric Composites in High Humidity Environment. Proc. 31st Annu. Tech. Conf. SPI Wash. DC, (Section 6-A).
- [85] Mellott, S. R., and Fatemi, A. (2014). Fatigue Behavior and Modeling of Thermoplastics Including Temperature and Mean Stress Effects. *Polym. Eng. Sci.*, 54(3), pp. 725–738.
- [86] Ufuk, R., and Ereke, M. (2018). Composite Material Optimization for Heavy Duty Chassis by Finite Element Analysis. *Adv. Automot. Eng.*, 1(1), pp. 41–59.
- [87] Shrestha, R., Simsiriwong, J., Shamsaei, N., and Moser, R. D. (2016). Cyclic Deformation and Fatigue Behavior of Polyether Ether Ketone (PEEK). *Int. J. Fatigue*, 82, pp. 411–427.
- [88] Manson, S. S. (1965). Fatigue: A Complex Subject-Some Simple Approximations. *Exp. Mech.*, 5(4), pp. 193–226.
- [89] Carneiro, L., Jalalahmadi, B., Ashtekar, A., and Jiang, Y. (2019). Cyclic Deformation and Fatigue Behavior of Additively Manufactured 17–4 PH Stainless Steel. *Int. J. Fatigue*, 123, pp. 22–30.
- [90] Santecchia, E., Hamouda, A. M. S., Musharavati, F., Zalnezhad, E., Cabibbo, M., El Mehtedi, M., and Spigarelli, S. (2016). A Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metals. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2016, p. 9573524.
- [91] Tsutsumi, S., and Fincato, R. (2019). Cyclic Plasticity Model for Fatigue with Softening Behaviour below Macroscopic Yielding. *Mater. Des.*, 165, p. 107573.
- [92] Tavernelli, J. F., and Coffin Jr, L. F. (1962). Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue. *ASME J. Basic Eng.*, 84, pp. 533-537.
- [93] Ramkumar, A., and Gnanamoorthy, R. (2008). Axial Fatigue Behaviour of Polyamide-6 and Polyamide-6 Nanocomposites at Room Temperature. *Compos. Sci. Technol.*, 68(15–16), pp. 3401–3405.
- [94] Ulus, H., Üstün, T., Eskizeybek, V., Şahin, Ö. S., Avcı, A., and Ekrem, M. (2014). Boron Nitride-MWCNT/Epoxy Hybrid Nanocomposites: Preparation and Mechanical Properties. *Appl. Surf. Sci.*, 318, pp. 37–42.
- [95] Fernández, C., Medina, C., Pincheira, G., Canales, C., and Flores, P. (2013). The Effect of Multiwall Carbon Nanotubes on the In-Plane Shear Behavior of Epoxy Glass Fiber Reinforced Composites. *Compos. Part B Eng.*, 55, pp. 421–425.
- [96] Wang, G.-T., Liu, H.-Y., Saintier, N., and Mai, Y.-W. (2009). Cyclic Fatigue of Polymer Nanocomposites. *Eng. Fail. Anal.*, 16(8), pp. 2635–2645.
- [97] Vahedi, F., Shahverdi, H. R., Shokrieh, M. M., and Esmkhani, M. (2015). Effects of Carbon Nanotube Content on the Mechanical and Electrical Properties of Epoxy-Based Composites. *Carbon*, 85, p. 445.

- [98] Loos, M. R., Yang, J., Feke, D. L., Manas-Zloczower, I., Unal, S., and Younes, U. (2013). Enhancement of Fatigue Life of Polyurethane Composites Containing Carbon Nanotubes. *Compos. Part B Eng.*, 44(1), pp. 740–744.
- [99] Borrego, L. P., Costa, J. D. M., Ferreira, J. A. M., and Silva, H. (2014). Fatigue Behaviour of Glass Fibre Reinforced Epoxy Composites Enhanced with Nanoparticles. *Compos. Part B Eng.*, 62, pp. 65–72.
- [100] Singh, N., and Khelawan, R. (2001). Effect of Frequency and Stress Ratio on Fatigue Crack Propagation of Glass Phenolic Composite. *IJEMS*, Vol.(08)5.
- [101] Yesil, S., Winkelmann, C., Bayram, G., and La Saponara, V. (2010). Surfactant-Modified Multiscale Composites for Improved Tensile Fatigue and Impact Damage Sensing. *Mater. Sci. Eng. A*, 527(27–28), pp. 7340–7352.
- [102] Eskizeybek, V. (2012). *Yüzeylerine Kimyasal Olarak Karbon Nanotüpler Bağlanmış Örgü Cam Fiber/Epoksi Nanokompozitlerin Üretimi ve Tabakalar Arası Kırılma Davranışının İncelenmesi*. PhD Thesis, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [103] Stamenović, M., Putić, S., Rakin, M., Medjo, B., and Čikara, D. (2011). Effect of Alkaline and Acidic Solutions on the Tensile Properties of Glass–Polyester Pipes. *Mater. Des.*, 32(4), pp. 2456–2461.
- [104] Banna, M. H., Shirokoff, J., and Molgaard, J. (2011). Effects of Two Aqueous Acidic Solutions on Polyester and Bisphenol A Epoxy Vinyl Ester Resins. *Mater. Sci. Eng. A*, 528(4–5), pp. 2137–2142.
- [105] Mahmoud, M. K., and Tantawi, S. H. (2003). Effect of Strong Acids on Mechanical Properties of Glass/Polyester GRP Pipe at Normal and High Temperatures. *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, 42(4), pp. 677–688.
- [106] Zhang, L., Wu, H., Zheng, Z., He, H., Wei, M., and Huang, X. (2019). Fabrication of Graphene Oxide/Multi-Walled Carbon Nanotube/Urushiol Formaldehyde Polymer Composite Coatings and Evaluation of Their Physico-Mechanical Properties and Corrosion Resistance. *Prog. Org. Coat.*, 127, pp. 131–139.
- [107] Wang, H., Di, D., Zhao, Y., Yuan, R., and Zhu, Y. (2019). A Multifunctional Polymer Composite Coating Assisted with Pore-Forming Agent: Preparation, Superhydrophobicity and Corrosion Resistance. *Prog. Org. Coat.*, 132, pp. 370–378.
- [108] Kumari, S., Panigrahi, A., Singh, S. K., and Pradhan, S. K. (2018). Enhanced Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Nanostructured Graphene-Polymer Composite Coating on Copper by Electrophoretic Deposition. *J. Coat. Technol. Res.*, 15(3), pp. 583–592.
- [109] Tsoeunyane, M. G., Makhatha, M. E., and Arotiba, O. A. (2019). Corrosion Inhibition of Mild Steel by Poly (Butylene Succinate)-L-Histidine Extended with 1, 6-Diisocyanohexane Polymer Composite in 1 M HCl,” *Int. J. Corros.*
- [110] Wang, C., Wang, H., Li, M., Liu, Z., Lv, C., Zhu, Y., and Bao, N. (2018). Anti-Corrosion and Wear Resistance Properties of Polymer Composite Coatings: Effect of Oily Functional Fillers. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, 85, pp. 248–256.
- [111] Ali, M. M., Magee, J. C., and Hsieh, P. Y. (2020). Corrosion Protection of Steel Pipelines with Metal-Polymer Composite Barrier Liners. *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, p. 103407.
- [112] Hsissou, R., Dagdag, O., Berradi, M., El Bouchti, M., Assouag, M., and Elharfi, A. (2019). Development Rheological and Anti-Corrosion Property of Epoxy Polymer and Its Composite. *Heliyon*, 5(11), p. e02789.
- [113] Umoren, S. A., and Solomon, M. M. (2019). Protective Polymeric Films for Industrial Substrates: A Critical Review on Past and Recent Applications with Conducting

- Polymers and Polymer Composites/Nanocomposites. *Prog. Mater. Sci.*, 104, pp. 380–450.
- [114] Kaabi Falahieh Asl, S., Nemeth, S., and Tan, M. J. (2016). Novel Biodegradable Calcium Phosphate/Polymer Composite Coating with Adjustable Mechanical Properties Formed by Hydrothermal Process for Corrosion Protection of Magnesium Substrate. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.*, 104(8), pp. 1643–1657.
- [115] Othman, N. H., Ismail, M. C., Mustapha, M., Sallih, N., Kee, K. E., and Jaal, R. A. (2019). Graphene-Based Polymer Nanocomposites as Barrier Coatings for Corrosion Protection. *Prog. Org. Coat.*, 135, pp. 82–99.
- [116] Amini, M., and Khavandi, A. (2019). Synergistic Effects of Mechanical and Environmental Loading in Stress Corrosion Cracking of Glass/Polymer Composites. *J. Compos. Mater.*, 53(24), pp. 3433–3444.
- [117] Cui, X., Zhu, G., Pan, Y., Shao, Q., Dong, M., Zhang, Y., and Guo, Z. (2018). Polydimethylsiloxane-Titania Nanocomposite Coating: Fabrication and Corrosion Resistance. *Polymer*, 138, pp. 203–210.
- [118] Solis-Ramos, E., and Kumosa, M. (2017). Synergistic Effects in Stress Corrosion Cracking of Glass Reinforced Polymer Composites. *Polym. Degrad. Stab.*, 136, pp. 146–157.
- [119] Pourhashem, S., Rashidi, A., Vaezi, M. R., and Bagherzadeh, M. R. (2017). Excellent Corrosion Protection Performance of Epoxy Composite Coatings Filled with Amino-Silane Functionalized Graphene Oxide. *Surf. Coat. Technol.*, 317, pp. 1–9.
- [120] Caldon, E. B., Al Christopher, C., Pajarito, B. B., and Advincula, R. C. (2017). Novel Anti-Corrosion Coatings from Rubber-Modified Polybenzoxazine-Based Polyaniline Composites. *Appl. Surf. Sci.*, 422, pp. 162–171.
- [121] Liu, C., Sergeichev, I., Akhatov, I., and Lafdi, K. (2018). CNT and Polyaniline Based Sensors for the Detection of Acid Penetration in Polymer Composite. *Compos. Sci. Technol.*, 159, pp. 111–118.
- [122] Ramezanzadeh, B., Moghadam, M. M., Shohani, N., and Mahdavian, M. (2017). Effects of Highly Crystalline and Conductive Polyaniline/Graphene Oxide Composites on the Corrosion Protection Performance of a Zinc-Rich Epoxy Coating. *Chem. Eng. J.*, 320, pp. 363–375.
- [123] Pai, R., Kamath, M. S., and Rao, R. (1997). Acid Resistance of Glass Fibre Composites with Different Layup Sequencing: Part I-Diffusion Studies. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 16(11), pp. 1002–1012.
- [124] Sindhu, K., Joseph, K., Joseph, J. M., and Mathew, T. V. (2007). Degradation Studies of Coir Fiber/Polyester and Glass Fiber/Polyester Composites under Different Conditions. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 26(15), pp. 1571–1585.
- [125] Qiu, Q., and Kumosa, M. (1997). Corrosion of E-Glass Fibers in Acidic Environments. *Compos. Sci. Technol.*, 57(5), pp. 497–507.
- [126] Tanks, J. D., Arao, Y., and Kubouchi, M. (2018). Diffusion Kinetics, Swelling, and Degradation of Corrosion-Resistant C-Glass/Epoxy Woven Composites in Harsh Environments. *Compos. Struct.*, 202, pp. 686–694.
- [127] Kusano, M., Kanai, T., Arao, Y., and Kubouchi, M. (2017). Degradation Behavior and Lifetime Estimation of Fiber Reinforced Plastics Tanks for Hydrochloric Acid Storage. *Eng. Fail. Anal.*, 79, pp. 971–979.
- [128] Manjunath, R. N., Khatkar, V., and Behera, B. K. (2020). Investigation on Seawater Ageing of PET-Epoxy Composites: An Ecological and Sustainable Approach for Marine Applications. *J Polym Environ* 28, 2289-2300.

- [129] Stone-Weiss, N., Youngman, R. E., Thorpe, R., Smith, N. J., Pierce, E. M., and Goel, A. (2020). An Insight into the Corrosion of Alkali Aluminoborosilicate Glasses in Acidic Environments. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 22(4), pp. 1881–1896.
- [130] Gao, Y., Liang, X., Bao, W., Wu, C., and Li, S. (2019). Failure Analysis of a Field Brittle Fracture Composite Insulator: Characterisation by X-Ray Photoelectron Spectroscopy Analysis. *High Volt.*, 4(2), pp. 89–96.
- [131] Qi, G., Qi, D., Ding, N., and Shao, X. (2017). Hydrostatic Experimental Study and Failure Mechanism of Glass Fiber Reinforced Thermoplastic Pipes Used for Oilfields. *Chinese Materials Conference*, Springer, pp. 1133–1141.
- [132] Yin, J., Zhang, J., Wang, W., and Ren, X. (2017). Effect of Glass Fiber Surface Treatment on the Mechanical Strength of Glass Fiber Reinforced Resin Mineral Composite for Machine Tool Bed. *Polym. Compos.*, 38(8), pp. 1559–1570.
- [133] Matin, M. S., Shahoo, S. C., Roymahapatra, G., Dubey, R. K., and Khatua, P. K. (2017). Effects of Surface Treatments of Glass Fiber on the Mechanical Properties Of Composites Made From Epoxy Resin Reinforced With Wooden Veener-Glass Hybrid. *J Indian Chem Soc*, 94, pp. 389–395.
- [134] Li, Z., Xiao, T., Pan, Q., Cheng, J., and Zhao, S. (2016). Corrosion Behaviour and Mechanism of Basalt Fibres in Acidic and Alkaline Environments. *Corros. Sci.*, 110, pp. 15–22.
- [135] Xie, J., Yin, P., Shi, W., Hu, M., Wang, J., Zhou, X., Han, J., Cao, S., Han, L., and Yao, Y. (2016). Corrosion Mechanism of E-Glass of Chemical Resistance Glass Fiber in Acid Environment. *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater Sci Ed*, 31(4), pp. 872–876.
- [136] Karunagaran, N., and Rajadurai, A. (2016). Effect of Surface Treatment on Mechanical Properties of Glass Fiber/Stainless Steel Wire Mesh Reinforced Epoxy Hybrid Composites. *J. Mech. Sci. Technol.*, 30(6), pp. 2475–2482.
- [137] Sarlin, E., von Essen, M., Palola, S., Lindgren, M., Kallio, P., and Vuorinen, J. (2016). Determination of Environmental Degradation of Matrix and Fiber Materials with a Novel, Statically Reliable Micro-Robotic Approach. *Proceedings of the 17th European Conference on Composite Materials ECCM17, München, Germany*, pp. 26–30.
- [138] Amaro, A. M., Reis, P. N. B., Neto, M. A., and Louro, C. (2013). Effects of Alkaline and Acid Solutions on Glass/Epoxy Composites. *Polym. Degrad. Stab.*, 98(4), pp. 853–862.
- [139] Sahin, Ö. S., Akdemir, A., Avci, A., and Gemi, L. (2009). Fatigue Crack Growth Behavior of Filament Wound Composite Pipes in Corrosive Environment. *J. Reinf. Plast. Compos.*, 28(24), pp. 2957–2970.
- [140] Megel, M., Kumosa, L., Ely, T., Armentrout, D., and Kumosa, M. (2001). Initiation of Stress-Corrosion Cracking in Unidirectional Glass/Polymer Composite Materials. *Compos. Sci. Technol.*, 61(2), pp. 231–246.
- [141] Dai, G., and Mishnaevsky Jr, L. (2015). Carbon Nanotube Reinforced Hybrid Composites: Computational Modeling of Environmental Fatigue and Usability for Wind Blades. *Compos. Part B Eng.*, 78, pp. 349–360.
- [142] Friedrich, K. (1981). Stress Corrosion Crack Propagation in Glass Fibre Reinforced/Thermoplastic PET. *J. Mater. Sci.*, 16(12), pp. 3292–3302.
- [143] Jones, F. R., Rock, J. W., and Wheatley, A. R. (1983). Stress Corrosion Cracking and Its Implications for the Long-Term Durability of E-Glass Fibre Composites. *Composites*, 14(3), pp. 262–269.
- [144] Hogg, P. J. (1983). Factors Affecting the Stress Corrosion of GRP in Acid Environments. *Composites*, 14(3), pp. 254–261.

- [145] Norwood, L. S., and Hogg, P. J. (1984). GRP in Contact with Acidic Environments-a Case Study. *Compos. Struct.*, 2(1), pp. 1–22.
- [146] Tanaka, H., Kuraoka, K., Yamanaka, H., and Yazawa, T. (1997). Development and Disappearance of Microporous Structure in Acid Treated E-Glass Fiber. *J. Non-Cryst. Solids*, 215(2–3), pp. 262–270.
- [147] Kawada, H., and Srivastava, V. K. (2001). The Effect of an Acidic Stress Environment on the Stress-Intensity Factor for GRP Laminates. *Compos. Sci. Technol.*, 61(8), pp. 1109–1114.
- [148] Prabhakar, M. M., Rajini, N., Ayrilmis, N., Mayandi, K., Siengchin, S., Senthilkumar, K., Karthikeyan, S., and Ismail, S. O. (2019). An Overview of Burst, Buckling, Durability and Corrosion Analysis of Lightweight FRP Composite Pipes and Their Applicability. *Compos. Struct.*, 230, p. 111419.
- [149] Jiang, L., He, C., Fu, J., and Xu, D. (2019). Enhancement of Wear and Corrosion Resistance of Polyvinyl Chloride/Sorghum Straw-Based Composites in Cyclic Sea Water and Acid Rain Conditions. *Constr. Build. Mater.*, 223, pp. 133–141.
- [150] Jyotheender, K. S., Gupta, A., and Srivastava, C. (2020). Grain Boundary Engineering in Ni-Carbon Nanotube Composite Coatings and Its Effect on the Corrosion Behaviour of the Coatings. *Materialia*, 9, p. 100617.
- [151] Sari, M. G., and Ramezanzadeh, B. (2020). Epoxy Composite Coating Corrosion Protection Properties Reinforcement through the Addition of Hydroxyl-Terminated Hyperbranched Polyamide Non-Covalently Assembled Graphene Oxide Platforms. *Constr. Build. Mater.*, 234, p. 117421.
- [152] Gao, M., Wu, X., Gao, P., Ting, L. E. I., Liu, C., and Xie, Z. (2019). Properties of Hydrophobic Carbon-PTFE Composite Coating with High Corrosion Resistance by Facile Preparation on Pure Ti. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 29(11), pp. 2321–2330.
- [153] Sinha, M., and Tyagi, R. K. (2020). Strength and Corrosion Analysis in Alloy Steel and E-Glass Composite Wear Ring in Automotive Engine Cooling Water Pump. *Mater. Today Proc.*, 21, pp. 1474–1478.
- [154] Li, X., Liang, J., Shi, T., Yang, D., Chen, X., Zhang, C., Liu, Z., Liu, D., and Zhang, Q. (2020). Tribological Behaviors of Vacuum Hot-Pressed Ceramic Composites with Enhanced Cyclic Oxidation and Corrosion Resistance. *Ceram. Int.*
- [155] Liu, X., and Li, Y. (2019). Static Bearing Capacity of Partially Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Structures Strengthened with PET FRP Composites. *Constr. Build. Mater.*, 211, pp. 33–43.
- [156] Yang, N., Yang, T., Wang, W., Chen, H., and Li, W. (2019). Polydopamine Modified Polyaniline-Graphene Oxide Composite for Enhancement of Corrosion Resistance. *J. Hazard. Mater.*, 377, pp. 142–151.
- [157] Say, Y., Guler, O., and Dikici, B. (2020). Carbon Nanotube (CNT) Reinforced Magnesium Matrix Composites: The Effect of CNT Ratio on Their Mechanical and Corrosive Properties. *Mater. Sci. Eng. A*, p. 139636.
- [158] Sari, M. G., Abdolmaleki, M., Rostami, M., and Ramezanzadeh, B. (2020). Nanoclay Dispersion and Colloidal Stability Improvement in Phenol Novolac Epoxy Composite via Graphene Oxide for the Achievement of Superior Corrosion Protection Performance. *Corros. Sci.*, p. 108799.
- [159] Wang, X., Zhao, X., and Wu, Z. (2019). Fatigue Degradation and Life Prediction of Basalt Fiber-Reinforced Polymer Composites after Saltwater Corrosion. *Mater. Des.*, 163, p. 107529.

- [160] Kaya, G. G., Yilmaz, E., and Deveci, H. (2018). Sustainable Bean Pod/Calcined Kaolin Reinforced Epoxy Hybrid Composites with Enhanced Mechanical, Water Sorption and Corrosion Resistance Properties. *Constr. Build. Mater.*, 162, pp. 272–279.
- [161] Wen, Y., Kong, D., Shang, W., Ma, M., Zhan, X., and Li, Y. (2019). Corrosion Resistance Performance of the Self-Assembled Reduction of Graphene/Silane Composite Films. *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, 562, pp. 247–254.
- [162] Khamseh, S., Alibakhshi, E., Mahdavian, M., Saeb, M. R., Vahabi, H., Kokanyan, N., and Laheurte, P. (2018). Magnetron-Sputtered Copper/Diamond-like Carbon Composite Thin Films with Super Anti-Corrosion Properties. *Surf. Coat. Technol.*, 333, pp. 148–157.
- [163] Liu, H., Wang, J., Jiang, P., and Yan, F. (2018). Hydrostatic Pressure-Dependent Corrosion Behaviour of Polytetrafluoroethylene Composites in the Deep Sea. *Corros. Sci.*, 139, pp. 289–300.
- [164] Zhao, Z., Wang, H., Liu, Z., Zhang, X., Zhang, W., Chen, X., and Zhu, Y. (2019). Durable Fluorine-Free Superhydrophobic Polyethersulfone (PES) Composite Coating with Uniquely Weathering Stability, Anti-Corrosion and Wear-Resistance. *Prog. Org. Coat.*, 127, pp. 16–26.
- [165] Zheng, H., Guo, M., Shao, Y., Wang, Y., Liu, B., and Meng, G. (2018). Graphene Oxide–Poly (Urea–Formaldehyde) Composites for Corrosion Protection of Mild Steel. *Corros. Sci.*, 139, pp. 1–12.
- [166] Liu, X., and Li, Y. (2018). Experimental Study of Seismic Behavior of Partially Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Columns Strengthened with FRP Composites with Large Deformability. *Constr. Build. Mater.*, 191, pp. 1071–1081.
- [167] Metcalfe, A. G., and Schmitz, G. K. (1972). Mechanism of Stress-Corrosion in E-Glass Filaments. *Glass Technol.*, 13(1), p. 5.
- [168] Inglis, C. E. (1913). Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners. *Trans Inst Nav. Arch.*, 55, pp. 219–241.
- [169] Griffiths, A. (1995). The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Met. Term Obrab MetRussia*, 1, pp. 9–14.
- [170] Roylance, D. (2008). Mechanical Properties of Materials. *Mass. Inst. Technol.*, pp. 51–78.
- [171] Irwin, G. R. (1948). *Fracture Dynamics, Fracturing of Metals*. American Society of Metals. Cleveland.
- [172] Orowan, E. (1949). Fracture and Strength of Solids. *Rep. Prog. Phys.*, 12(1), p. 185.
- [173] Srawley, J. E. (1976). Wide Range Stress Intensity Factor Expressions for ASTM E 399 Standard Fracture Toughness Specimens.
- [174] Waddoups, M. E., Eisenmann, J. R., and Kaminski, B. E. (1971). Macroscopic Fracture Mechanics of Advanced Composite Materials. *J. Compos. Mater.*, 5(4).
- [175] Whitney, J. M., and Nuismer, R. J. (1974). Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations. *J. Compos. Mater.*
- [176] Neuber, H. (1936). Theorie Der Technischen Formzahl. *Forsch. Auf Dem Geb. Ingenieurwesens A*, 7(6), pp. 271–274.
- [177] Neuber, H. (1961). *Theory of Notch Stresses: Principles for Exact Calculation of Strength with Reference to Structural Form and Material*. USAEC Office of Technical Information.
- [178] Peterson, R. E. (1938). Methods of Correlating Data from Fatigue Tests of Stress Concentration Specimens. *Stephen Timoshenko Anniv. Vol.*, p. 179.

- [179] McClintock, F. A., and Irwin, G. R. (1965). *Plasticity Aspects of Fracture Mechanics. Fracture Toughness Testing and Its Applications*, ASTM International.
- [180] Novozhilov, V. V. (1969). On a Necessary and Sufficient Criterion for Brittle Strength: *PMM* Vol. 33, No: 2, Pp. 212–222.
- [181] Taylor, D., and Cornetti, P. (2005). Finite Fracture Mechanics and the Theory of Critical Distances. *Adv. Fract. Damage Mech. IV*, pp. 565–570.
- [182] Seweryn, A., and \Lukaszewicz, A. (2002). Verification of Brittle Fracture Criteria for Elements with V-Shaped Notches. *Eng. Fract. Mech.*, 69(13), pp. 1487–1510.
- [183] McClintock, F. A. (1958). Ductile Fracture Instability in Shear. *J Appl Mech*, 25(4).
- [184] Kinloch, A. J., and Williams, J. G. (1980). Crack Blunting Mechanisms in Polymers. *J. Mater. Sci.*, 15(4), pp. 987–996.
- [185] Tsuji, K., Iwase, K., and Ando, K. (1999). An Investigation into the Location of Crack Initiation Sites in Alumina, Polycarbonate and Mild Steel. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. Print*, 22(6), pp. 509–517.
- [186] Karlak, R. F. (1977). Hole Effects in a Related Series of Symmetrical Laminates. *Proceedings of the Fourth Joint ASM-Metallurgical Society of AIME Symposium on Failure Modes in Composites, 1977*, pp. 105–117.
- [187] Byron Pipes, R., Wetherhold, R. C., and Gillespie, J. W. (1980). Macroscopic Fracture of Fibrous Composites. *Mater. Sci. Eng.*, 45(3), pp. 247–253.
- [188] Leguillon, D. (2002). Strength or Toughness? A Criterion for Crack Onset at a Notch. *Eur. J. Mech.-ASolids*, 21(1), pp. 61–72.
- [189] Taylor, D. (2008). The Theory of Critical Distances. *Eng. Fract. Mech.*
- [190] Hitchen, S. A., Ogin, S. L., Smith, P. A., and Soutis, C. (1994). The Effect of Fibre Length on Fracture Toughness and Notched Strength of Short Carbon Fibre/Epoxy Composites. *Composites*, 25(6), pp. 407–413.
- [191] Irwin, G. R. (1960). *Fracture Mechanics, [In:] Structural Mechanics, JN Goodier, and NJ Hoff*, Pergamon Press.
- [192] Dixon, J. R., Strannigan, J. S., and McGregor, J. (1969). Stress Distribution in a Tension Specimen Notched on One Edge. *J. Strain Anal.*, 4(1), pp. 27–31.
- [193] Suresh, S., Shih, C. F., Morrone, A., and O’Dowd, N. P. (1990). Mixed-Mode Fracture Toughness of Ceramic Materials. *J. Am. Ceram. Soc.*, 73(5), pp. 1257–1267.
- [194] Brown, W. F., and Srawley, J. E. (1967). ASTM Spec. Tech. Publ. No 410. Am Soc Test Mat Phila.
- [195] Cruse, T. A. (1973). Tensile Strength of Notched Composites. *J. Compos. Mater.*, 7(2), pp. 218–229.
- [196] Fett, T. (1998). *Stress Intensity Factors and Weight Functions for Special Crack Problems*. FZKA Karlsruhe.
- [197] İnternet: Epoksi, HEXION MGS L160 Sistemi. URL: <https://www.dostkimya.com/tr/urunler/epoksi-sistemler//epoksi-hexion-mgs-l160-sistemi>, Son Erişim Tarihi: 15.07.2020.
- [198] İnternet: Çok yönlü (Multiaxial) Örgüler. URL: <https://metyx.com>, Son Erişim Tarihi: 15.07.2020.
- [199] İnternet: Akrilik Elyaf. URL: <https://www.aksa.com>, Son Erişim Tarihi: 15.07.2020.
- [200] İnternet: N,N-Dimethylformamide, URL: <https://www.sigmaldrich.com/catalog/product/sial/227056?lang=en®ion=TR>. Son Erişim Tarihi: 15.07.2020.
- [201] İnternet: Xiameter OFS-6040 Silane. URL: <https://www.dow.com/en-us/pdp.xiameter-ofs-6040-silane.01011278z.html>, Son Erişim Tarihi: 15.07.2020.

- [202] İnternet: Karbon nanotüp. URL: <https://www.graphene-info.com/grafen-chemical-industries>. Son Erişim Tarihi: 15.07.2020.
- [203] İnternet: Hexamethylenediamine. URL: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/hexamethylenediamine1162012409411?lang=en®ion=TR>. Son Erişim Tarihi: 15.07.2020.
- [204] Okabe, T., Oya, Y., Tanabe, K., Kikugawa, G., and Yoshioka, K. (2016). Molecular Dynamics Simulation of Crosslinked Epoxy Resins: Curing and Mechanical Properties. *Eur. Polym. J.*, 80, pp. 78–88.
- [205] ASTM International. (2013). *D5528-13 Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D5528-13>
- [206] ASTM International. (2017). *D3039/D3039M-17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17
- [207] ASTM International. (2017). *D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D0790-17>
- [208] ASTM International. (2019). *D3479/D3479M-19 Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials*. Retrieved from https://doi.org/10.1520/D3479_D3479M-19
- [209] ASTM International. (2020). *D543-20 Standard Practices for Evaluating the Resistance of Plastics to Chemical Reagents*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D0543-20>
- [210] Ying, Z., Du, J.-H., Bai, S., Li, F., Liu, C., and Cheng, H.-M. (2003). Mechanical Properties of Surfactant-Coating Carbon Nanofiber/Epoxy Composite. *Asianano 2002*, World Scientific, pp. 51–56.
- [211] Feih, S., Wei, J., Kingshott, P., and Sørensen, B. F. (2005). The Influence of Fibre Sizing on the Strength and Fracture Toughness of Glass Fibre Composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, 36(2), pp. 245–255.
- [212] Sever, K., Sarikanat, M., Seki, Y., and Tavman, I. H. (2009). Concentration Effect of γ -Glycidoxypropyltrimethoxysilane on the Mechanical Properties of Glass Fiber–Epoxy Composites. *Polym. Compos.*, 30(9), pp. 1251–1257.
- [213] Ma, P. C., Kim, J.-K., and Tang, B. Z. (2007). Effects of Silane Functionalization on the Properties of Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposites. *Compos. Sci. Technol.*, 67(14), pp. 2965–2972.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :SARAÇOĞLU, Göksel
 Uyuğu :T.C.
 Doğum tarihi ve yeri :01.04.1974, Gaziantep
 Medeni hâli :Evlü
 Telefon :0(538) 486 79 56
 Faks :0(326) 613 56 13
 e-posta :goksel.saracoglu@iste.edu.tr



Eğitim

Derece	Okul/Bölüm	Mezuniyet Tarihi
Doktora	İskenderun Teknik Üniversitesi/Makine Müh. A.B.D.	2020
Y. Lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi/Makine Müh. A.B.D.	2013
Lisans	Anadolu Üniversitesi/İşletme A.B.D.	2012
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi/Makine Müh. A.B.D.	1997

İş Deneyimi

Yıl	Kurum	Görev
2017-hâlen	İSTE/Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi/Uçak Bakım ve Onarım Bölümü	Öğretim Görevlisi
2003-2017	Tekfen/Toros Tarım Sanayi ve Tic. A.Ş.	Teknik Kontrol Şefi
2001-2003	Midaş Tekstil San. ve Tic. A.Ş.	Bakım Mühendisi
1997-2001	Kipaş Tekstil San. ve Tic. A.Ş.	Bakım Mühendisi

YabancıDil

İngilizce (B2 Seviye)
 Almanca (B1 seviye)
 Fransızca (A2 seviye)

Yayınlar

- SARACOĞLU, G., YAPICI, A., (2020). The effects of interface and matrix reinforcements on fracture toughness of E-Glass/Epoxy laminate. Materials Research Express. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab98ce>.
- YAPICI, A., SARACOĞLU, G., Fatigue analysis of girth gear of a rotary dryer, Engineering Failure Analysis, 68, 187-196, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.024> (Yayın No:3504934)
- SARACOĞLU, G., YAPICI, A., Fatigue analysis of bolted flange joints of a rotaryDryer, Engineering Failure Analysis, 63, 182-190, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.02.011> (YayınNo: 3504924)
- SARACOĞLU, G., YAPICI, A., Kurutucu Döner Tambur Yüzeyinde Gerilme Analizi ve Dizayn Çalışması, Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi 1 (2), 39-50, 201

DİZİN

A

arayüz · 2, 3, 5, 13, 14, 28, 29,
30, 31, 37, 39, 40, 41, 44,
45

C

Cetylpyridinium Chloride · 6,
24

D

DGEBA · 1, 21
DWCNTs · 3

E

E-cam/epoksi · 6, 104
Elektro-eğirme · 31, 32, 34,
35, 92
epoksi · 1, 2, 5, 6, 7, 10, 11,
15, 16, 17, 21, 26, 27, 28,
31, 37, 43, 44, 45, 68, 78,
85, 92, 96, 97, 98, 99, 103,
105

F

fonksiyonel · 4, 18, 20, 22,
27, 28, 45, 100
Fonksiyonelleştirme · 21, 101

G

Gerilme Yoğunluk Faktörü ·
65, 67

H

hekzametilen diamin · 6, 21,
101, 102

İ

İç kusur modeli · 71

K

karbon nanotüp · 4, 5, 6, 7,
18, 20, 21, 23, 24, 96, 100,
103, 105
katyonik sürfaktant · 6, 24,
103, 105
 K_{eff}/σ_f · 76, 79, 80, 82
 K_{IC} · 68, 79, 86
kırılma mekaniği · 76, 77, 78,
83, 104
kırılma tokluğu · iv, 66, 69,
72, 76, 79, 82, 83, 85, 86,
87
Korozif · iv, 7, 60
korozyon · iv, 8, 11, 16, 59,
108, 142

M

Mod-I · 5, 6, 31, 37, 65, 98,
105, 106, 144
MWCNTs · 3

N

nano partikül · 6, 7
nanofiber · 6, 7, 32, 35, 37,
93, 94, 96, 97, 98, 99, 105,
108
NaOH · 7, 110

P

PAN · 5, 6, 92, 93, 94, 95, 96,
105
pH · 28, 60, 100, 101
poliakrilonitril · 92, 108

R

rijitlik · 3, 11, 13, 39, 42, 44,
81, 87

S

SENB · 80, 81, 83, 85, 86,
106, 107
SENT · 76, 80, 81, 82, 83, 85,
86, 106, 107, 112, 144
Silan · 26, 27, 28, 92, 99, 100
Sürfaktant · 18, 23, 24, 92
SWCNTs · 3

Ş

şekil değiştirme enerjisi · 62,
63, 64, 65, 67, 76

V

van der Waals · 4, 17, 20, 23

Y

yorulma · iv, 6, 7, 8, 11, 13,
15, 38, 39, 40, 41, 42, 44,
45, 46, 83, 108, 109, 110
Yorulma · 6, 40, 42, 44, 46,
108
yorulma analizi · iv



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

