



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ



ELEKTROSPİN NANO-MAT TAKVİYELİ
KARBON/EPOKSİ KOMPOZİTLERDE
ARAYÜZEY DAYANIMININ FİBER DEMETİ
TESTİ İLE BELİRLENMESİ

Ali Fahri DANIŞMAN

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

ÇANAKKALE

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTROSPİN NANO-MAT TAKVİYELİ
KARBON/EPOKSİ KOMPOZİTLERDE
ARAYÜZEY DAYANIMININ FİBER DEMETİ
TESTİ İLE BELİRLENMESİ

Ali Fahri DANIŞMAN

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tezin Sunulduğu Tarih: 23/11/2019

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK

ÇANAKKALE

Ali Fahri DANIŞMAN tarafından Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK yönetiminde hazırlanan ve **23/11/2019** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Elektrospin Nano-Mat Takviyeli Karbon/Epoksi Kompozitlerde Arayüzey Dayanımının Fiber Demeti Testi İle Belirlenmesi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Emin YAKAR

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem ŞAŞ ÇAYCI

Üye

Prof. Dr. Levent GENÇ

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

Sıra No:.....

İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Ali Fahri DANIŞMAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda değerli bilgilerini benimle paylaşan, yönlendiren ve sürekli motive eden danışmanım Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK'e teşekkür ederim. Tez çalışmasının hazırlanmasında ve değerlendirilmesinde değerli katkılarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Emin YAKAR'a ve Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem ŞAŞ ÇAYCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince verdikleri destek için değerli arkadaşlarım Öğr. Gör. Osman Fatih DAMNALI, Sevban AKKAYA ve Mustafa Kemal EREN'e,

Hayatımın her aşaması boyunca bana destek olan kızlarım Elif ve Naz'a, eşim Merve DANIŞMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Ali Fahri DANIŞMAN
Çanakkale, Kasım 2019

SİMGELER VE KISALTMALAR

PAN	Poliakrilonitril
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
DMF	Dimetil formamid
FTK	Fiber takviyeli kompozit
FTTK	Fiber takviyeli tabakalı kompozit
g	Gram
mg	Miligram
mL	Mililitre
MPa	Megapaskal
GPa	Gigapaskal
Pa	Paskal
π	Pi
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
%	Yüzde oranı
σ	Gerilme
σ_{\max}	Maksimum gerilme
P	Numuneye uygulanan yük
P_{\max}	Numunenin taşıyabildiği maksimum yük
A	Kesit alanı
N	Newton
δ	Deformasyon
$\Delta\sigma$	İki gerilme arasında fark
$\Delta\varepsilon$	Şekil değiştirme arasındaki fark

ÖZET

ELEKTROSPİN NANO-MAT TAKVİYELİ KARBON/EPOKSİ KOMPOZİTLERDE ARAYÜZEY DAYANIMININ FİBER DEMETİ TESTİ İLE BELİRLENMESİ

Ali Fahri DANIŞMAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK

23/11/2019, 46

Karbon fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin zayıf tabakalar arası kırılma dirençleri daha geniş alanlardaki yapısal uygulamaları önündeki büyük bir kısıtlamadır. Bu nedenle, karbon fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin tabakalar arası mekanik performansının iyileştirilmesi son yıllarda yoğun bir araştırma odağı haline gelmiş ve birçok yöntem önerilmiştir. Komşu tabakalar arasında reçine bakımından zengin ara katmana büyük yüzey alanı ve yüksek tokluğa sahip nanofiber mat ara tabakaların ilave edilmesi, tabakalı kompozitlerin düzlem dışı özelliklerini geliştirmek için tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin tabakalar arası kırılma performanslarının belirlenmesinde kullanılan standart testler mevcuttur. Bu testlerde kullanılan aparat ve ölçüm tekniklerinin zorluğu, makro boyutlu numunelerde ortaya çıkan mikro ve nano ölçekteki tokluk arttırıcı mekanizmaların etkisinin yeterince belirlenememesi, farklı yükleme koşullarında mikromekanik test yaklaşımlarının yüksek sapmalar göstermesi ara yüzey mekanik performansının ölçülmesinde daha basit ve küçük numuneler kullanan mekanik testlerin kullanılması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Fiber takviyeli kompozitlerde fiber/matris ara yüzey mekanik performansını değerlendirmek için mikromekanik testlere alternatif olarak fiber demeti testleri de kullanılmaktadır. Bu çalışmada, termoplastik nanofiber matların tabakalı kompozitlerde tabakaları arası mekanik performansa etkisinin belirlenmesi için literatürde ilk defa fiber demeti testleri kullanılmıştır. Bunun için, elektro-eğirme yöntemiyle üretilmiş poliakrilonitril (PAN) nanomatlar iki karbon fiber demeti arasına yerleştirilmiş ve elde edilen numuneler saf çekme ve saf kayma yüklerine maruz bırakılmıştır. Enine fiber demeti çekme ve V-çentikli

kayma deneyleri sonrasında elde edilen sonuçlar grafik ve tablolar halinde verilmiş ve sonuçlar kıyaslanarak tartışılmıştır. Ayrıca, mekanik deneyler sonucu numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu analizleri ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kırılma yüzeylerinin incelenmesiyle elde edilen sonuçlar ile mekanik performans sonuçları arasında ilişkiler kurulmuş ve bu ilişkilere göre sonuçlar değerlendirilmiştir. Enine fiber demeti çekme testi sonuçlarına göre iki fiber demeti arasındaki dayanım ortalama 30 MPa olarak ölçülmüş ve iki demet arasına yerleştirilen PAN nanomat ilavesi ile birlikte ara yüzey dayanımı %12.2 arttırılmıştır. V-çentikli kayma testlerine göre PAN mat takviyesiz karbon fiber demeti ara yüzey kayma dayanımı ortalama 26,89 MPa olarak belirlenirken PAN nanomat takviyeli karbon fiber demeti en yüksek kayma ara yüzey dayanımı 52,96 MPa olarak ölçülmüştür ki bu değer saf numunelerden yaklaşık iki kat daha büyüktür. Karbon fiber demetleri arasına ilave edilen PAN nanomat takviyesi mikro ve nano boyutta çeşitlik tokluk arttırıcı mekanizmalar ile ara yüzey dayanımının mekanik performansının artmasına katkıda bulunmuştur. SEM analizlerine göre PAN nanomatların mekanik performansa en önemli katkıları PAN nanofiberlerin epoksi matris içerisinde sınırlanarak yuttukları enerji olduğu belirlenmiş, bununla birlikte, ayrılan iki mikro yüzeyi bağlayan nanofiber köprülemesi, nanofiber kırılması, çatlağın yön değiştirmesi veya durdurulması gibi çeşitli tokluk arttırıcı mekanizmalar da ara yüzey mekanik performansının artmasına katkıda bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar fiber demeti testlerinin tabakalar arası kırılma tokluğu ve fiber-matris ara yüzey dayanımının belirlenmesi için kullanılan makro ve mikro boyuttaki testlere bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Anahtar sözcükler: Polimer-matris Kompozitler, Arayüzey, Fiber/Matrix Yapışması, Kırılma Tokluğu

ABSTRACT

DETERMINATION OF INTERFACE STRENGTH OF ELECTROSPUN NANOFIBER INTERLEAVE REINFORCED CARBON/EPOXY COMPOSITES WITH FIBER BUNDLE TESTS

Ali Fahri DANIŞMAN

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master of Science Thesis in Bioengineering and Materials Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Volkan ESKİZEYBEK

11/23/2019, 46

The weak interlaminar resistance of carbon fiber reinforced laminated composites is a major limitation for being utilized in various structural applications. Therefore, improving the mechanical performance of the carbon fiber reinforced laminated composites has become an intensive research focus in recent years and many methods have been proposed. The addition nanofiber mat interleaves with large surface area and high toughness into the resin-rich region between adjacent fiber plies has become a preferred method for improving the out-of-plane properties of laminated composites. Standard tests are available to determine the fracture performance of fiber-reinforced composites. The difficulty of the apparatus and measurement techniques used in these tests, the impact of micro and nano scale toughness increasing mechanisms in macro-sized samples, the high deviations of micromechanical test approaches under different loading conditions, revealed the need to use mechanical tests that use simpler and smaller samples to measure the mechanical performance of the fiber-matrix interface. Fiber bundle tests are also used as an alternative to micro-mechanical tests to evaluate the mechanical performance of fiber/matrix interface in fiber-reinforced composites. In this study, fiber bundle tests were used for the first time in the literature to determine the effect of thermoplastic nanofiber mats on mechanical performance between plies in laminated composites. For this, polyacrylonitrile (PAN) nanomats produced by the electro-spinning method were placed between two carbon fiber bundles and the obtained samples were subjected to pure tensile and shear loads. The results obtained after transverse fiber bundle and V-notched shear tests are given in graphs and tables and the results are discussed. In addition, as a result of

mechanical experiments, the fracture surfaces of the samples were examined in detail with scanning electron microscopy analysis. Relationships between the results obtained by examining the fracture surfaces and mechanical performance results were established and the results were evaluated according to these relations. According to the transverse fiber bundle tensile test results, the strength between the two fiber bundles was measured as an average of 30 MPa and the interfacial strength was increased by 12.2% with the addition of PAN nanomat placed between the two carbon fiber bundles. According to the V-notched shear tests, the PAN mat-reinforced carbon fiber bundle interface shear strength was determined as an average of 26.89 MPa, while the PAN nanomat reinforced carbon fiber bundle was measured as the highest shear interface strength 52.96 MPa, which is about twice as much as pure samples. The PAN nanomat reinforcement has contributed to the increase of the mechanical performance of the interfacial strength with various micro and nano size toughening mechanisms. According to SEM analysis, the most important contribution of PAN nanomatts to mechanical performance was determined to be the energy that PAN nanofibers absorbed while pulling-out from the epoxy matrix, however, various toughness enhancing mechanisms such as nanofiber bridging, nanofiber breakage, crack bifurcation or blunting are also observed. The obtained results show that fiber bundle tests can be an alternative to macro and micro size tests used to determine the interlaminar fracture toughness and fiber-matrix interface strength in fiber reinforced laminated composites.

Keywords: Polymer-matrix Composites, Interface, Fiber/Matrix Adhesion, Fracture Toughness

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ SINAVI SONUÇ FORMU.....	ii
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
2.1. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler	4
2.2. Tabakalar Arası Kırılma Teorisi	5
2.3. Fiber Takviyeli Kompozitlerde Bileşenlerin veya Tabakalar Arası Bölgelerin Modifikasyonu	6
2.4. Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu Testleri.....	9
2.5. Tez Çalışmasının Literatürdeki Yeri.....	9
BÖLÜM 3	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Malzemeler.....	14
3.2. Yöntem.....	14
3.3. PAN Çözeltilisinin Hazırlanması	15
3.4. Elektrospin Yöntemi ile Nanomat Üretimi	16
3.5. Numune Hazırlama	18
3.6. Mekanik testler.....	22
3.6.1. Enine Fiber Demeti Çekme Testleri	22
3.6.2. V-Çentikli Fiber Demeti Kayma Testleri	23
3.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	24
BÖLÜM 4	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	25
4.1. PAN Nanomatların Morfolojik ve Mekanik Özellikleri	25
4.2. Enine Fiber Demeti Çekme Testleri.....	27
4.3. V-Çentikli Fiber Demeti Kayma Testleri Sonuçları	30

4.4. Kırılma Yüzeylerinin Morfolojik Analizi	34
BÖLÜM 5	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	39
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	I



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. FRP kompozitlerde oluşan hataların şematik gösterimleri.....	5
Şekil 2.2. Kırılma Modları a) Mod I, b) Mod II, c) Mod III.....	5
Şekil 2.3. Farklı ara yüzey bağı karakterizasyon testleri: a) fiber fragmantasyon, b) fiber-çekme, c) fiber-itme	11
Şekil 2.4. Fiber demet testleri a) TFBT, b) 45FBT, c) Fiber demeti çekme testi (fiber bundle pull-out)	12
Şekil 3.1. Numune üretimi ve test için kullanılan yaklaşımlar	15
Şekil 3.2 PAN nanofiber üretimi için kullanılan PAN-DMF çözeltisi görüntüsü	16
Şekil 3.3 Elektroçirime prosesi ile nanomat üretiminin şematik olarak gösterimi	17
Şekil 3.4. a) Şematik olarak elektroçirime esnasında Taylor konisi oluşumu, b) PAN üretiminde kullanılan elektrospinning ünite	17
Şekil 3.5. ASTM D638 standardına uygun olarak tip 1 numune boyutlarına uygun olarak hazırlanan enine fiber demeti çekme deney numuneleri.....	19
Şekil 3.6. Şematik olarak V-çentikli kırış kayma deney fikstirü	20
Şekil 3.7. Açık kalıp yöntemi ile üretilen enine çekme ve kayma fiber demeti numuneleri	21
Şekil 3.8. Numunelerin kalıp yerleşimleri ve kurlenme sonrası fotoğrafları a) Enine çekme ve Mod I kırılma numunelerinin silikon kalıp içerisindeki yerleşimleri, b) Kurlenme sonrası Mod I kırılma numuneleri, c) Kurlenme sonrası enine çekme numuneleri, d) Kayma numunelerinin silikon kalıp içerisindeki yerleşimleri, e) Kurlenme sonrası kayma numuneleri	21
Şekil 3.9. Şematik olarak enine fiber demeti çekme deneyi ve deney sonrasında hasara uğrayan numuneler.....	23
Şekil 3.10.V-çentikli fiber demeti kayma deneyi ve deney sonrasında hasara uğrayan numuneler	24
Şekil 4.1. (a) PAN nanomatların SEM fotoğrafı, (b) PAN nanofiberlerin TEM görüntüsü	25
Şekil 4.2. Saf (PAN nanomat içermeyen) karbon fiber demetlerinin enine fiber çekme testi ile belirlenen arayüzey dayanımları	27
Şekil 4.3. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demetlerinin enine fiber çekme testi ile belirlenen arayüzey dayanımları	29
Şekil 4.5. V-çentikli kayma testlerinde görülen çentik doğrultusuna 45° açı ile gerçekleşen kayma hasarı	31
Şekil 4.6. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demetlerinin V-Çentikli fiber demeti kayma testleri ile belirlenen kayma arayüzey dayanımları	33
Şekil 4.7. Enine fiber çekme testi sonrasında saf numuneye ait kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri	35
Şekil 4.8. Enine fiber çekme testi sonrasında PAN nanomat takviyeli numuneye ait kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri.....	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 4.1. PAN nanomatların çekme testi sonucunda elde edilen mekanik özellikleri ...	26
Çizelge 4.2. Saf karbon fiber demetlerinin enine fiber çekme deneyinden elde edilen mekanik performanslarının kıyaslanması	28
Çizelge 4.3. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demetlerinin enine fiber çekme deneyinden elde edilen mekanik performanslarının kıyaslanması	30
Çizelge 4.4. Saf karbon fiber demetlerinin V-Çentikli fiber demeti kayma testlerinden elde edilen mekanik performanslarının kıyaslanması	32
Çizelge 4.5. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demetlerinin V-Çentikli fiber demeti kayma testlerinden elde edilen mekanik performanslarının kıyaslanması	34



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler uzay ve havacılık, deniz endüstrisi, askeri uygulamalar gibi endüstri ve mühendisliğin birçok alanında kullanılmaktadır. Örneğin uçak gövdelerinde, bazı araçların kaporta ve şasilerinde, şaftlarında, jantlarında, inşaat mühendisliğinde eski yapıların desteklenmesinde, rüzgar türbin kanatları karbon fiberlerin kullanımına spesifik olarak verilebilecek örnekler arasındadır. Yüksek özgül rijitliğe ve dayanım/ağırlık oranına, çevresel etkilere karşı görece yüksek toleransa sahip olmalarından dolayı karbon fiber kompozit malzemeler son yıllarda büyük bir ilgi çekmektedir.

Fiber takviyeli kompozitleri oluşturan bileşenlerden fiberler, kompozit malzemede yükü taşıyan bileşen olup matris ise fiberlere yükü aktaran ve fiberleri bir arada tutan ana unsurdur. Ancak kuvvet aktarımında fiberler ile matris arasında kalan ara yüzey olarak tanımlanan bölgenin mekanik özellikleri, aktarılabilecek kuvvetin büyüklüğünü tamamen belirlediği için fiber takviyeli kompozitlerde bu bölge kilit rol oynamaktadır. Ara yüzeyin kimyasal bileşimi ve mikro yapısı ara yüzeyin özelliklerini kontrol eden parametrelerdir.

Fiber takviyeli kompozitler genelde tabakalı kompozitler olarak üretilirler ve tabakalı kompozit malzemelerin en büyük dezavantajı fiber yönünde yüksek dayanım değerleri elde edilmesine rağmen fiber takviyesine dik doğrultularda bu durumun geçerliliğini yitirmesidir. Bunun nedeni fibere dik yönlerde takviyenin olmayışıdır. Bu nedenle, matrisçe zengin ara yüzeyler kompozit malzemeler için zayıf bölgeler olup, kompozit fiber yönüne dik yönlerde kuvvetlere maruz kaldığında kolaylıkla tabakalar arası ayrılmalar olabilir.

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerde tabakalar arasında oluşan delaminasyon hasarı karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin uygulama alanlarını kısıtlayan önemli bir hasar toleransıdır. Tabakalar arası matrisçe zengin bölgenin tokluğunun artırılması için önerilen geleneksel çözümlerin başında kauçuk/termoplastik ilavelerin kullanımı ve kalınlık yönünde dikme (stiching) gelmektedir. Bu yöntemler zaten kendi sınırlarına ulaşmış olmak, yüksek maliyet veya uyarlanmış üretim süreçlerine olan ihtiyaç gibi önemli dezavantajlara sahiptir. Son zamanlarda ise tabakalar arası bölgeye yüksek mekanik özelliklere sahip nanoparçacıkların ilave edilmesi ile tokluk iyileştirilmeye çalışılmıştır. Nanoparçacıkların kullanımı ile tokluk artışı elde edilse de nanoparçacıkların

artan takviye oranı ile birlikte kümelenmeye karşı gösterdiği eğilim ve reçinenin viskozitesini arttırması gibi dezavantajlar ortaya çıkmıştır.

Karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin elektroçirime yöntemiyle üretilen termoplastik nano-fiber keçeler ile takviye edilmesi, tabakalar arası bölgenin mikro ölçekte güçlendirilmesi için umut verici bir strateji haline gelmektedir. Nano-fiber matlar, tabakalar arasına kolayca yerleştirilebilir veya doğrudan fiber veya prepreg yüzeylerinde üretilebilir. Nanofiber çaplarının nano boyutta olması, yüksek yüzey alanına sahip olmalarına ve tabakalar arası bölgede oldukça ince bir takviye meydana getirmelerine imkan vermekte ve karbon fiber takviyeli polimer kompozitler uygulanabilirliğin önemli derecede artmasını sağlamaktadır. Kompozitlerin ara-yüzeyinde kullanılan nano-fiberler, nano boyutlu diğer takviyelerden farklı olarak reçinenin viskozitesini etkilememektedir. Ayrıca sürekli takviye oldukları için dağılım problemleri bulunmamaktadır. Nano-fiberlerin kompozit yapılarda kullanımı hasar toleransını, delaminasyon direncini, Mod I ve Mod II tabakalar arası kırılma tokluğunu ve yorulma direncini arttırmaktadır.

Havacılık isterlerinde üretilen karbon/epoksi tabakalı kompozitlerde katmanlar arasına serilen termoplastik nanofiber matların kompozitlerin mekanik performansına etkisi tasarım girdisi oluşturacak şekilde farklı yüklemelerde gerçekleştirilen mekanik deneyler sayesinde doğrulanmaktadır. Çekme basma ve eğilme deneyleri fiber özellikleri tarafından kontrol edilmesine rağmen nanomat takviyeli hibrit kompozitlerin mekanik tasarım bilgilerinin oluşturulması için gerçekleştirilmektedir. Nanofiber matların mekanik performansa etkilerinin görüldüğü ve bu tez çalışmasının asıl odak noktasını oluşturan tabakalar arası bölgenin mekanik performansının belirlenmesinde tabakalar arası enine çekme ve kayma deneyleri gerçekleştirilmektedir. Tabakalar arası kayma deneyleri ile tabakalı kompozitlerde tabakalar arasında saf kayma gerilemeleri oluşturularak reçinece zengin bölgenin yük aktarım kabiliyeti mekanik olarak test edilmektedir.

Bu deneyler makroskobik boyutta üretilen numunelerden elde edilen kupon testleri ile yapılmakta ve bu numunelerin üretimi standart açısından oldukça zorlu ve maliyetlidir. Ayrıca, makro boyutta gerçekleştirilen testlerde artan numune boyutları ile birlikte numunelerin içerisine üretim kaynaklı hataların oluşma olasılığında artmaktadır. Termoplastik nanomatların makro boyuttaki numunelerde fiber-matris ara yüzeyinin mekanik performansına etkisinin belirlenmesi de numune boyutları nedeniyle sınırlandırılmaktadır. Son zamanlarda, naoboyutlu takviyelerin fiber-matris arayüzeyine etkilerinin belirlenmesi amacıyla fiber demeti testleri kullanılmaktadır. Fiber demeti testleri, makro boyutta fiber-matris ara yüzey dayanımını ölçen standart testlere kıyasla oldukça basit, ucuz ve elde

edilen sonuçlar itibariyle daha az standart sapma değerlerine sahip kararlı sonuçlar veren testler olarak öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, karbon-epoksi kompozitlerde tabakalar arası bölgenin takvi edilmesinde kullanılan termoplastik nanofiber katmanlarının etkinliğini fiber demeti testleri ile ölçmek ve tokluk arttırıcı mekanizmaları nano ve mikro boyutta etkin bir şekilde gözlemlemektir. Bunun için, elektro eğirme yöntemi ile üretilen PAN nanomat takviyesi karbon fiber demetleri arasına yerleştirilmiş ve kupon numuneleri epoksi reçinenin kalıba dökülmesi ile üretilmiştir. Elde edilen numunelere enine fiber çekme testleri ve V-çentikli kayma testleri uygulanarak iki farklı yükleme tipi altında PAN nanomat takviyesinin mekanik performansa etkisi mikro boyutta incelenmiştir. Kırılma yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen mikroskobik incelemeler ile mekanik performansa etki eden nano ve mikro boyutlu tokluk arttırıcı mekanizmalar görüntülenerek deneylerden elde edilen sonuçlar ile ilişkilendirilmiştir.

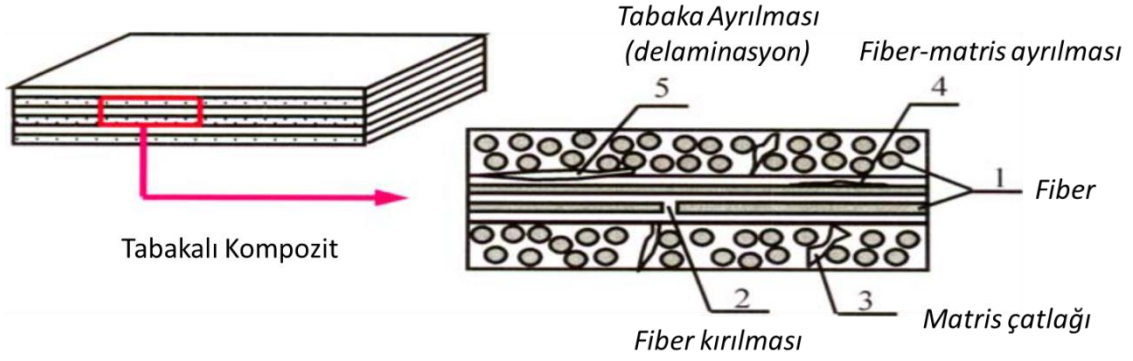
BÖLÜM 2

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler yüksek özgül mukavemet, iyi yorulma direnci ve farklı yükleme koşulları için özelleştirilebilme gibi üstün mekanik özelliklere sahiptir. Bu üstün özellikleri sayesinde, havacılık ve uzay endüstrisinin yanı sıra, FRP kompozitler otomotiv, spor, petrol ve gaz, denizcilik ve inşaat gibi diğer endüstrilerde de giderek yaygınlaşan kullanım alanları bulmaktadır (Bhudolia ve Joshi, 2018) .

FRP kompozitler genellikle birden fazla katmandan yani tabakalı olarak yapılır. Tabakalar arasındaki laminar bölgeler polimer matris bakımından zengin bölgelerdir. Tabakalar arası matrisçe zengin bölgedeki polimer varlığı kuvvet aktarım kabiliyetini sınırlamakta ve bu bölge tabakalı kompozitlerin zayıf bölgesi haline gelmektedir (Şekil 1). Bu zayıflık, özellikle kalınlık yönünde yüklemeye maruz kalan tabakalı kompozitlerde tabaka ayrılması yani delaminasyon hasarına neden olmaktadır. Matrisçe zengin bölgedeki yük aktarım başarısızlığının bazı nedenleri arasında üretim süreci, talaşlı imalat, darbe hasarı (takım düşmesi, kuş darbesi vb. Nedeniyle) ve yapıdaki süreksizlikler (örneğin, tabaka sayısının düşüşü, cıvatalı bağlantı) bulunur (Garg, 1988; Raju ve O'Brien, 2008). Tabakalar arası hasar, kompozit yapının yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltabilir. Bu nedenle, FRP kompozitlerin potansiyelini arttırmak için tabakalı kompozitlerde tabakalar arası bölgelerinin ve özellikle tabakalar arası kırılma tokluğunun (ILFT) mekanik performansının geliştirilmesi önemlidir. FRP kompozitler makro boyutta farklı özelliklere sahip bileşenlerin bir araya getirilmesi ile üretilir. Fiber takviyeler tek yönlü, örgü ve dikişli kumaşlar halinde kullanılabilir. Dikişli kumaşlar farklı yönelimlere sahip tek yönlü takviyelerin termoplastik iplikler ile dikilmesiyle bir araya getirilen kumaşlardır. Fiber tabakaları arasında kalan tabakalar arası bölge farklı yükleme koşullarında tabaka ayrılması hasarına maruz kalarak kompozit yapının işlev göremez hale gelmesine neden olabilir.



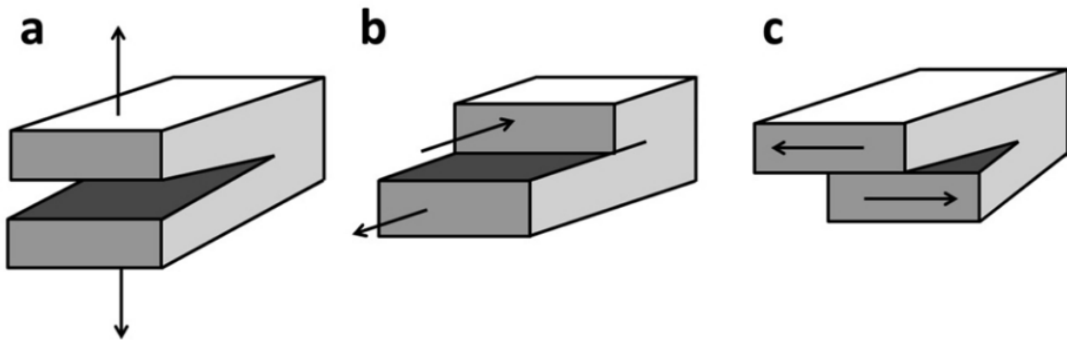
Şekil 2.1. FRP kompozitlerde oluşan hataların şematik gösterimleri

2.2. Tabakalar Arası Kırılma Teorisi

Tabakalı kompozitlerin kırılma mekaniği izotropik malzemelerin kırılma mekaniği teorisinin devamı niteliğindedir. Genel olarak, kompozit malzemelerde oluşan çatlaklar üç farklı yükleme modundan dolayı oluşmaktadır (Şekil 2.2). Çatlak ucundaki enerjinin belirlenmesine yönelik yapılan araştırmalar çatlakın ilerlemesi için gerekli enerji miktarı için gerilme şiddet faktörü “ K ” ve şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı “ G ” yaklaşımlarını kullanmaktadır. Bu iki yaklaşım izotropik malzemeler için Denklem 2.1’deki gibi ilişkilidir (Raju ve O'Brien, 2008);

$$G = G_I + G_{II} + G_{III} = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} + \frac{(1+\nu)K_{III}^2}{E} \quad (2.1)$$

Burada I, II, III kırılma modlarını, düzlem gerilme hali durumunda $E' = E$, $E' = E/(1-\nu^2)$, E elastisite modülü ve ν ise Poisson oranıdır. K ve G değerlerinin her ikisi de hasar tahmini için kullanırken, C alt indisi her iki kavram için kritik enerji değerini ifade etmektedir.



Şekil 2.2. Kırılma Modları a) Mod I, b) Mod II, c) Mod III

Ortotropik malzemeler için iki tabaka arasında oluşan çatlak ucunda gerilme ve enerji analizleri izotropik malzemeler için kullanılan teori üzerine bina edilmiştir ancak sonuçlar K ve G arasındaki çok daha karmaşık ilişkiler ile belirlenir. FRP kompozitlerde yükleme durumuna bağlı olarak bu analizler daha da karmaşık hale gelmektedir. Çünkü, genel olarak, çatlak ucundaki etki her üç modun birlikte olduğu karışık moda dönüşme eğilimi olmasıdır. Bu eğilim, tabakalı kompozit malzemelerde fiber tabakaları arasında kalan reçinece zengin bölgenin düşük kırılma direncinden dolayı ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden, tabaka ayrılması hasarı yükleme koşulundan bağımsız olarak ortaya çıkabilir. FRP kompozitlerin mikro mekanik özellikleri de çatlağın başlaması ve yayılmasında önemli etkiye sahiptir.

2.3. Fiber Takviyeli Kompozitlerde Bileşenlerin veya Tabakalar Arası Bölgelerin Modifikasyonu

Matris, fiber takviyesi ve tabakalar arası bölgelerde yapılan değişiklikler FRP tabakalı kompozitlerin tabakalar arası kırılma tokluğunu iyileştirmek için kullanılabilir.

Epoksi gibi ısıyla sertleşen polimerlerin kırılma toklukları, kauçuk ilavesi ile iyileştirilmektedir. Bütadien akrilonitril bazlı elastomerlerin epoksi için etkin bir tokluk artırıcı ajanlar olduğu gösterilmiştir (Raju ve O'Brien, 2008; Ratna, 2003). Kauçuk fazından kaynaklanan tokluk artırma mekanizması, matristeki kayma deformasyonunu tetikleyen kauçuk kaviteasyondur (Raju ve O'Brien, 2008; Ratna, 2003). Bununla birlikte, epoksi içindeki kauçuk ajanlarının tokluk artırma etkisi, epoksi esaslı FRP tabakalı kompozitlere tam olarak aktarılmaz. Yan ve diğerleri ağırlıkça %15 kauçuk ile modifiye edilen dökme epoksinin, modifiye edilmemiş epoksiye kıyasla kırılma tokluğunda %377'lik bir artış gösterdiğini bildirmiştir (Yan ve ark., 2002). Modifiye edilmiş epoksi, CFRP kompozit laminatlarda matris olarak kullanıldığında, modifiye edilmemiş epoksi matrisli laminatlara kıyasla kırılma tokluğundaki iyileşme %139 daha düşük olduğu belirlenmiştir (Yan ve ark., 2002). Ayrıca, kauçuk ilavesinin epoksi reçinesinin viskozitesini artırma yan etkisi vardır, bu nedenle kompozit üretimini daha zor hale getirmektedir (DeCarli ve ark., 2005; Wu ve ark., 2017). Polimer reçinenin viskozitesini düşük tutmak için araştırmacılar hiper dallı polimerleri (HBP) potansiyel tokluk artırıcılar olarak tanımlamışlardır (DeCarli ve ark., 2005; Ratna, 2003; Wu ve ark., 2017). HBP'ler, bir çekirdek, hacim ve kabuktan yapılmış küresel bir yapıya sahip reaktif sıvı kauçuklardır. Küresel yapı HBP'nin polimer reçineleri ile harmanlanmasının düşük viskoziteye sahip olmasını sağlar (Ratna, 2003). Bu avantajı kullanarak Verrey ve ark. reçine transfer

kalıplama (RTM) gibi sıvı kalıplama işlemlerinin HBP modifiye epoksi reçine ile kullanılabilceğini göstermiştir (Verrey ve ark., 2005). Diğer taraftan, termoplastik polimerler termosetlere kıyasla daha yüksek tokluğa sahiptir. Sonuç olarak, termoplastik polimer matrisli kompozitler iyi darbe direnci ve hasar toleransı sergiler (Imagawa ve ark., 2018). Ancak, ASTM standartlarında mevcut karakterizasyon yöntemleri esas olarak epoksi gibi kırılğan polimer matrisleri için tasarlanmıştır. Fiber takviyeli termoplastik laminatlar için mod I ve II ILFT'nin karakterizasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır (Perez ve ark., 2019).

Karbon ve cam fiberler çeşitli yüzey işlemine tabi tutulduktan sonra kompozit üretiminde kullanılır. Fiberlerin yüzey işlemi veya kaplanması, fiberlerin el ile teması veya imalat sırasında hasar görmesini önlemek ve aynı zamanda fiber-matris ara yüzey performansını arttırmak için yapılır (Jones, 2010). Çatlaklar fiber-matris arayüzü boyunca yayılma eğiliminde olduğundan fiber yüzeylerine uygulanan işlemler önemlidir. Cam fiberler için silan birleştirme ajanları yüzey işlemi için kullanılırken, karbon elyaflar için bir elektrolitik oksitleme işlemi ve ardından epoksi gibi polimerlerinin yüzeye kaplanması gerçekleştirilir.

Tabakalı kompozitlerde tabakalar arası kırılma tokluğu, tabakalar arası sünek ve tok ara tabakalar ilave edilerek de geliştirilebilir. Del Saz-Orozco ve diğ. termoplastik ara tabakaların cam fiber takviyeli kompozitlerde tabakalar arası yerleştirilmesi ile Mod I kırılma tokluğundaki değişimi araştırmıştır (Del Saz-Orozco ve ark., 2017). Takviye olarak tek yönlü cam elyaf kumaşlar kullanılmıştır. Tabakalar arası ise poliamid (PA) ve polietilen tereftalat (PET) olmak üzere iki termoplastik ara tabakası ilave edilmiştir. Termoplastik ara tabakalar mikro boyutlu fiberlerden yapılmıştır. PA mat, başlangıç ve yayılma kırılma tokluğu değerlerinde ara tabaka içermeyen tabakalı kompozitlere kıyasla sırasıyla% 59 ve% 90 artışlarla PET örtülerden daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur. Garcia-Rodriguez ve diğ. karbon/epoksi tabakalı kompozitlerde tabakalar arası takviyenin hasar direncine etkilerini araştırmıştır (Garcia-Rodriguez ve ark., 2018). Ara tabaka olarak farklı erime noktalarına sahip iki tip ko-poliamid (CoPA) dokuma olmayan mat kullanıldı. Erime noktaları karbon/epoksi kompozitlerin kürlenme sıcaklığından daha yüksek ve daha düşük olan CoPA matları, sırasıyla V1 ve V2 olarak etiketlenmiş ve tabakalı kompozitler üzerinde darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Tabakalar arası V2 mat içeren kompozitlerde, darbe sonrası delaminasyondan etkilenen alanın CoPA örtü içermeyen laminatlardan% 100 daha küçük olduğu ve kompozitlerin iyileştirilmiş hasar direncine sahip olduğu gösterilmiştir. Diğer taraftan, V1 mat takviyesinin hasar direncini iyileştirmede etkisiz

olduğu bildirilmiştir. Bunun nedeni, V1 matların krleme işlemi sırasında eriyememesi, dolayısıyla daha kalın interlaminar bölgeler ve daha yüksek boşluklara neden olması olarak açıklanmıştır.

Son yıllarda, mikro ve nano gibi farklı boyutlarda takviyeler içeren kompozit yaklaşımları daha popüler gelmiştir. Birçok araştırmacı FRP kompozitlerine nano dolgu ilavesinin kompozitlerin mekanik, elektriksel, termal vb. zellikleri zerine etklilerini incelemiştir. Nano boyutlu dolgu maddeleri, boyutlarından en az biri nanometre boyutunda olan parçacıklardır. Nano dolguların temel özelliklerinden biri büyük yüzey alanı/hacim oranıdır (Taylor, 2010). Karbon nanotüpler gibi nano dolgu maddelerinin eklenmesi, takviyesiz polimerlere kıyasla polimer matrisinin mekanik özelliklerini (sertlik, mukavemet, kırılma tokluğu) arttırmaktadır. Kompozit malzemelerde dolgu olarak kullanılan karbon bazlı nano yapılar karbon nanofiberler (CNF'ler), karbon nanotüpler (CNT'ler), grafen, grafen oksit (GO), karbon siyahı ve diğer nanofiberler olarak sayılabilir (Dikshit ve ark., 2017; Gou ve ark., 2012; Taylor, 2010). Nanodolgu malzemelerin kompozit malzemelere ilavesinde çeşitli yöntemler uygulanabilir: (i) polimer reçine içerisinde, (ii) katlar arası bölgede kuru dolgular olarak, (iii) katlar arası bölgede bir polimer ara tabaka ile birlikte ve (iv) fiber yüzeyinde (Dikshit ve ark., 2017). Nano dolgu katkılı kompozitlerin uygulanmasındaki zorluklardan biri üretim sürecidir. Özellikle, nano dolgu maddelerinin, ILFT'yi iyileştirmede etkili olabilmeleri için homojen şekilde dağılmış olmaları gerekir. Bunun nedeni, nano dolgu maddelerinin topaklaşma eğiliminde olmaları ve kümelenme durumlarında, takviye yerine FRP kompozitlerinde kusur olarak hareket etmeleridir (Taylor, 2010).

Karbon bazlı nano dolgu maddelerinin yanı sıra, elektrospun nanofiber matlar FRP kompozitlerinin tabakalar arası kırılma tokluğunu iyileştirmek için geniş çapta incelenmiştir. İncelenen elektrospun nanofiber matlar arasında polistiren (PS) (Nguyen ve ark., 2018), poliamid-6,6 (PA66) (Beylergil ve ark., 2017), poliakrilonitrit (PAN) (Eskizeybek ve ark., 2018; Razavi ve ark., 2018), polivinil btiral (PVB) (Barzoki ve ark., 2019) ve polisülfon (PSF) (Zheng ve ark., 2017) nanofiberler bulunmaktadır. FRP kompozitlerinde ara yüzey olarak elektro-eğrilmiş nanofiber matların uygulanması nedeniyle hem Mod I hem de Mod II kırılma tokluğunda iyileşmeler bildirilmiştir. Bununla birlikte, nanofiberlerin FRP tabakalı kompozitlerin düzlem boyunca özellikleri üzerindeki etkileri malzemeye göre değişmektedir. Düzlem boyunca özelliklerin (ekme dayanımı gibi), tabakalar arasında PSF ve PA66'ya nanofiber matlar kullanıldığında azaldığı (Barzoki ve ark., 2019; Beylergil ve ark., 2017), PS nanofiberler ile arttığı belirtilmiştir

(Nguyen ve ark., 2018). Nanofiber matların FRP düzlem boyunca özellikler üzerindeki olumsuz etkiyi atlatmak ve tabakalar arası kırılma tokluğunu daha da iyileştirmek için, araştırmacılar CNT PAN (Eskizeybek ve ark., 2018), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve PAN ve CNT gibi bir dizi nano dolgu kombinasyonu uygulamıştır (Zheng ve ark., 2017).

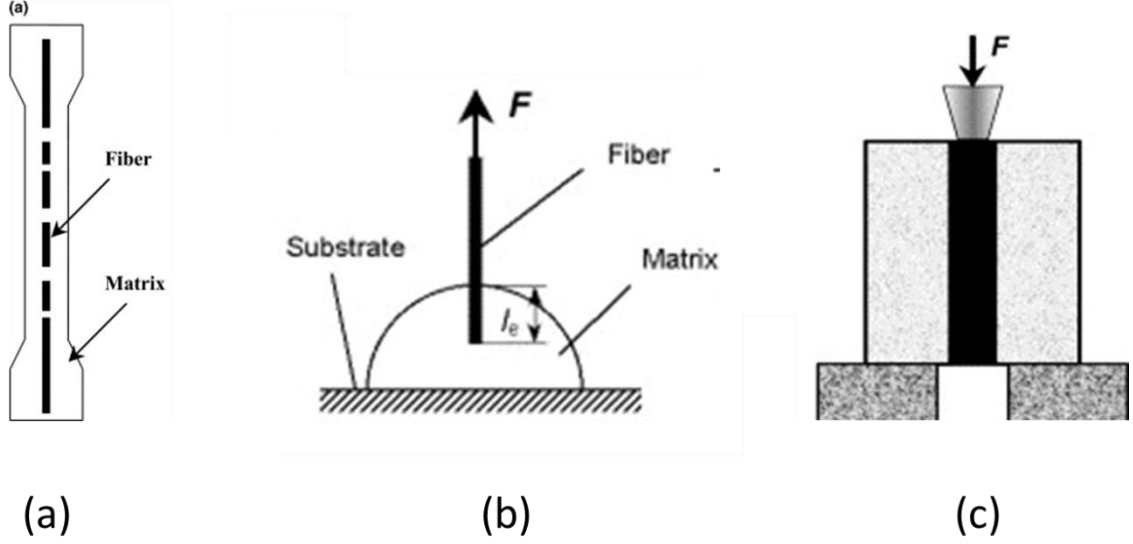
2.4. Tabakalar Arası Kırılma Tokluğu Testleri

Kompozit malzemelerin tabakalar arası kırılma davranışını incelemek için araştırmacılar çeşitli testler kullanmaktadır. Mod I tabakalar arası kırılma tokluğunun ölçülmesinde çift ankastre kiriş (DCB) yöntemi kullanılırken, Mod II kırılma tokluğunun belirlenmesi için ise uç çentik eğilmesi (ENF) testleri kullanılmaktadır. DCB ve ENF testlerine ait prosedürler ASTM D5528 ve ASTM D7905 standartlarında verilmiştir. DCB testi için, yük, deplasman ve çatlakın konumu senkronize olarak kaydedilmelidir. Mod I enerji boşlama hızı G_I belirlenmesi için modifiye edilmiş kiriş teorisi (MBT) standartta tavsiye edilmektedir ancak kompoliyans kalibrasyonu (CC) ve modifiye edilmiş kompoliyans kalibrasyonu yöntemleri de kullanılabilir. ASTM D5528 standardı tek yönlü fiber takviyeli kompozitlerin kırılma tokluğunun belirlenmesi için ortaya çıkmışsa da, araştırmacılar diğer fiber konfigürasyonları için de kullanılmaktadır. ENF testinde yük ve deplasman kayıt edilir ancak yükleme koşulu nedeniyle çatlak ilerleyişi kararsız olabileceğinden CC yöntemi Mod I enerji boşlama hızı G_{II} belirlenmesi için kullanılmaktadır. ENF testi de tek yönlü ve diğer fiber konfigürasyonları için kullanılmaktadır. Mod I ve II testlerinin yanında araştırmacılar bu iki modun birlikte ortaya çıktığı karışık mod (mixed mode I/II) testlerini de kompozitlerin kırılma davranışını belirlemek için kullanmaktadır. Bu test, elde edilen sonuçların saf Mod I ve II sonuçlarında farklılık göstermesi açısından önemlidir. Karışık mod için herhangi bir test standardı olmamakla birlikte Reeder ve Crews tarafından literatüre kazandırılan test düzeneği ve test prosedürleri mevcuttur (Reeder ve Crews, 1992)Öte yandan, Mod III kırılma tokluğunun ölçümü ile ilgili nispeten az çalışma vardır. Birçok araştırmacı, Mod III kırığının önemsiz olduğunu düşünmektedir (Zhang ve Fox, 2006).

2.5. Tez Çalışmasının Literatürdeki Yeri

Kompozit malzemelerin bileşenlerinden olan ara yüzey, diğer bileşenler olan fiberler ve matrisi bir arada tutan unsur olarak kompozit malzemenin performansında kritik öneme sahiptir. Fiber ve matris arasındaki bağlantının önemi düşünüldüğünde ara yüzey odaklı çalışmaların literatürdeki etkinliği her geçen gün artmaktadır (Karger-Kocsis ve ark.,

2015). Bu çalışmalardaki araştırma sorusu ara yüzey yapışkanlığının (adhesion) kompozit malzemenin performansına etkisinin incelenmesi temeline dayanmaktadır. Bu araştırma sorusu son yıllarda çeşitli mikro-mekanik yaklaşımlarda ele alınmaktadır (Ramirez ve ark., 2009; Zhandarov ve Mader, 2005; Zhou ve ark., 1999; Zinck ve ark., 2001). Yük-odaklı ve enerji-odaklı olmak üzere iki farklı çerçevede incelenen bu yaklaşımlar ile ara yüzey bağı (interfacial bonding) fiber fragmantasyonu, fiber-çekme, fiber-itme ya da mikro-damlacık gibi yöntemler ile karakterize edilmektedir. Yük-odaklı çalışmalarda amaç fiber/matris ara yüzeyinde kayma kuvvetinin limitinin belirlenmesini kapsamaktadır (Zhandarov ve Mader, 2005; Zinck ve ark., 2001). Enerji-odaklı çalışmalarda ise ara yüzey tokluğunu ile birlikte lineer elastik kırılma mekaniği (LEFM) kullanılarak çatlak oluşumunun ve/veya çatlak ilerleyişinin incelenmesini içermektedir. Bu sebeple enerji-odaklı çalışmalarda ara yüzey tokluğu ara yüzey kırılma enerjisi olarak ifade edilmektedir (Ramirez ve ark., 2009; Zhou ve ark., 1999). Fakat, literatürdeki bu çeşitli mikro-mekanik test yöntemleri ile elde edilen sonuçlar arasında büyük farklar vardır (Deng ve ark., 2009). Bu farklar tek fiberli sistemler ile yapılan ara yüzey karakterizasyon testlerinde özellikle ara yüzey mukavemeti ya da ara yüzey tokluğu verilerinde kabul edilemeyecek oranlara ulaşmaktadır (Zhou ve ark., 2001). Mikromekanik test yöntemlerinin en büyük dezavantajı, farklı yöntemlerden elde edilen sonuçların tutarsızlığıdır. Farklı fiber/matris ara yüzey testleri ile belirlenen ara yüzey dayanımı veya tokluğu değerleri arasında büyük farklılıkları vardır. Ek olarak, kompozit laminatın enine çekme testi, kısa kiriş testi ve kırılma tokluğu testi, kompozitlerin makro mukavemetine veya tokluk özelliklerine dayanarak ara yüzey yapışmasını değerlendirmek için de kullanılmıştır. Bu makro testler, kompozit tabakalardaki karmaşık hasar mekanizmalarından dolayı ara yüzey karakterizasyonu için dolaylı yöntemler olarak kabul edilir. Ara yüzey etkileşimin oldukça zayıf olması ve ara yüzeyin kompozitin hasara uğramasında baskın olması durumunda, makro test sonuçları ayrıca fiber/matris bağı göstermek için de uygulanabilir. Bununla birlikte, tekrarlanabilir özelliklerde kompozit tabakaların imalatı hala pahalı ve zaman alıcıdır.

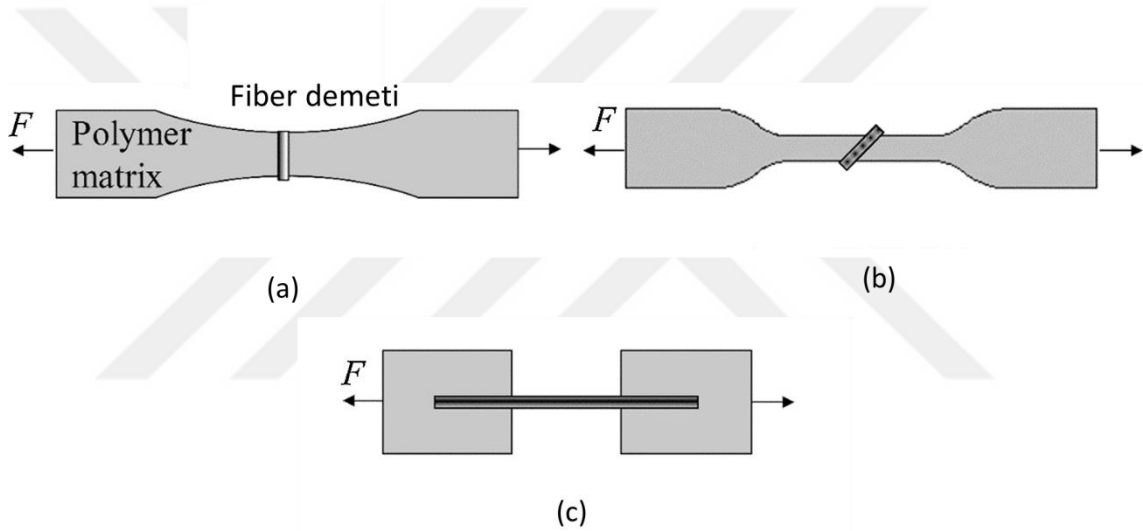


Şekil 2.3. Farklı ara yüzey bağı karakterizasyon testleri: a) fiber fragmantasyon, b) fiber-çekme, c) fiber-itme (Zhandarov ve Mader, 2005)

Mikro-karakterizasyonların yanında çeşitli testler ile tabakalı kompozitlerin makro seviyede ara yüzey bağının değerlendirilmesi de yapılmaktadır. Çekme testi (transverse), kısa-kiriş testi, kırılma tokluğu testleri ile makro seviyedeki mukavemet ve tokluk değerlerinden ara yüzey yapışkanlığı elde edilebilmektedir (Hamer ve ark., 2014; Koyanagi ve ark., 2010; Wang ve ark., 2017). Kompozitlerin kompleks kırılma mekanizmaları düşünüldüğünde makro seviyedeki bu testler ile gerçekleştirilen ara yüzey karakterizasyonu dolaylı bir yöntem olup, elde edilen sonucun tekrarlanabilirliği düşük olacaktır. Bu testlerin güvenilirliği ancak hasar nedeninin (failure mechanism) diğer hasar mekanizmalarından çok ara yüzey zayıflığı tarafından domine edildiği durumlar için geçerlidir (Koyanagi ve ark., 2010). Ayrıca, bu makro yaklaşımlardaki göz ardı edilemeyecek bir diğer durum ise tabakalı kompozit yapıların üretiminin zorluğu ve yüksek maliyetidir.

Makro testlerdeki yukarıda belirtilen sıkıntılarının ışığında micro-testlerin ara yüzey karakterizasyonuna yönelik kullanımında yeni bir yaklaşım ile dramatik bir artış bulunmaktadır. Bu yaklaşım son yıllarda birçok araştırmacının da tercih ettiği üzere fiber ya da tabakalı kompozit yerine fiber demetleri kullanılarak yapılmasını içermektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi fiber demetleri ile bu testler enine fiber demeti çekme testi (Transverse fiber bundle tension, TFBT) (Deng ve ark., 2009; Drescher ve ark., 2013; Feng ve ark., 2014; Qi ve ark., 2014; Rosso ve Varadi, 2006; Zhang ve ark., 2013), 45 derece fiber demeti çekme testi (45° fiber bundle tension, 45FBT) (Qi ve ark., 2016; Qi ve ark., 2017)

ve fiber demeti çekme testi (fiber bundle pull-out) (Zhou ve ark., 2016) olarak yapılmaktadır. Drescher vd.'nin önerdiğine göre tek fiberin kullanıldığı karakterizasyon testlerine göre fiber demetleri ile yapılan ara yüzey karakterizasyon deneylerinin standard sapların daha düşük olduğu belirlenmiştir (Drescher ve ark., 2013). Ayrıca bu deneylerin uygulanması da diğer testlere göre göreceli olarak daha kolaydır ve makro seviyede testler için tabakalı kompozit imalatı gerektiği için göreceli olarak da daha düşük maliyetlidir. Sonuç olarak bu testler ile ara yüzey bağının değerlendirilmesi ve bu bağın hem farklı matris hem de fiber modifikasyonları ile nasıl değiştiğinin belirlenmesinde kullanılabilir (Deng ve ark., 2009; Drescher ve ark., 2013; Feng ve ark., 2014; Zhou ve ark., 2016).



Şekil 2.4. Fiber demet testleri a) TFBT, b) 45FBT, c) Fiber demeti çekme testi (fiber bundle pull-out) (Li ve ark., 2019).

Bu tez çalışmasının amacı, karbon-epoksi kompozitlerde tabakalar arası bölgenin takviye edilmesinde kullanılan termoplastik nanofiber katmanlarının etkinliğini fiber demeti testleri ile ölçmek ve tokluk arttırıcı mekanizmaları nano ve mikro boyutta etkin bir şekilde gözlemlemektir. Bunun için, elektro eğirme yöntemi ile üretilen PAN nanomat takviyesi karbon fiber demetleri arasına yerleştirilmiş ve kupon numuneleri epoksi reçinenin kalıba dökülmesi ile üretilmiştir. Elde edilen numunelere enine fiber çekme testleri ve V-çentikli kayma testleri uygulanarak iki farklı yükleme tipi altında PAN nanomat takviyesinin mekanik performansa etkisi mikro boyutta incelenmiştir. Kırılma yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilen mikroskobik incelemeler ile mekanik performansa etki

eden nano ve mikro boyutlu tokluk arttırıcı mekanizmalar görüntülenerek deneylerden elde edilen sonuçlar ile ilişkilendirilmiştir.



BÖLÜM 3

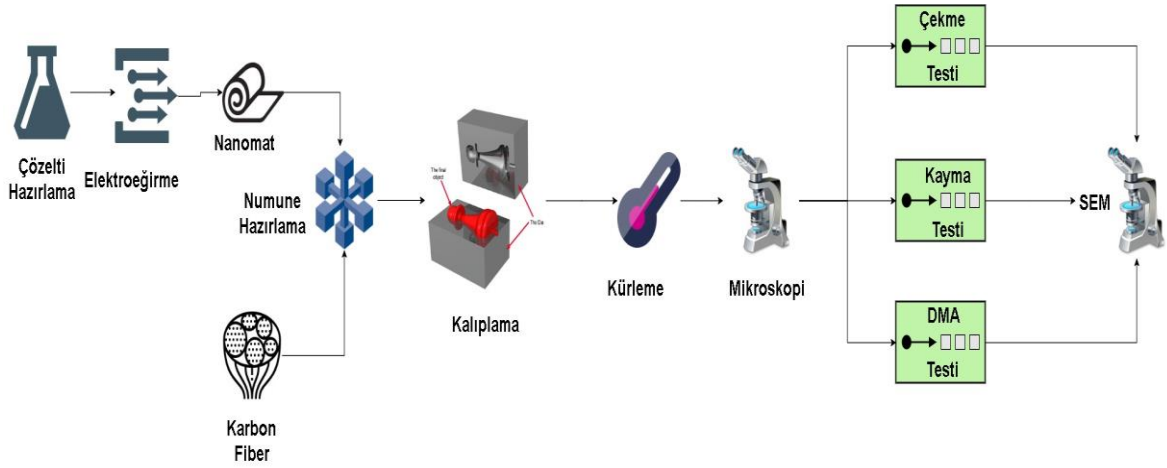
MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler

Poliakrilonitril (PAN) termoplastik nanofiberlerin üretimi için Sigma-Aldrich (Almanya) firmasından satın alınan, moleküler ağırlığı 150.000 g/mol olan poliakrilonitril polimeri kullanılmıştır. PAN polimeri % 98 saflıkta dimetil formamid (DMF) (Sigma-Aldrich, Almanya) içerisinde çözülmüştür. Kalıp hazırlığında kullanılmak üzere Ak-Sil Rtv-2 E-15 kalıp silikonu (Aydın Kompozit) sertleştiricisi ile birlikte temin edilmiştir. Fiber demeti olarak Mitsubishi (Japonya) firması tarafından PAN bazlı TR 30S (Young modülü 235 GPa, çekme dayanımı 4120 MPa) karbon fiber demetleri kullanılmıştır. Fiber yüzeyleri standart olarak epoksi uyumlu yüzey uyumlaştırıcılar ile kaplanmıştır. Epoksi reçinesi ve sertleştirici olarak sırasıyla MGS L160 ve MGS H160 (Momentive-Hexion) kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında, tabakalı karbon/epoksi kompozitlerde tabakalar arası bölgenin mekanik performansının belirlenmesinde kullanılan geleneksel yöntemlerden farklı olarak fiber demeti testleri kullanılmıştır. Bu çalışma için kullanılan yaklaşım Şekil 3.1'de verilmiştir. Buna göre, öncelikle numune hazırlama alt yapısı oluşturulmuş, sonrasında numune üretimi gerçekleştirilmiş, üretilen numuneler morforlojik ve mekanik olarak test edilmiş, son olarak kırılma yüzeyleri mikroskobik olarak incelenmiştir. Bu yaklaşıma ait adımlar aşağıda verilen alt başlıklarda detaylıca açıklanmıştır.

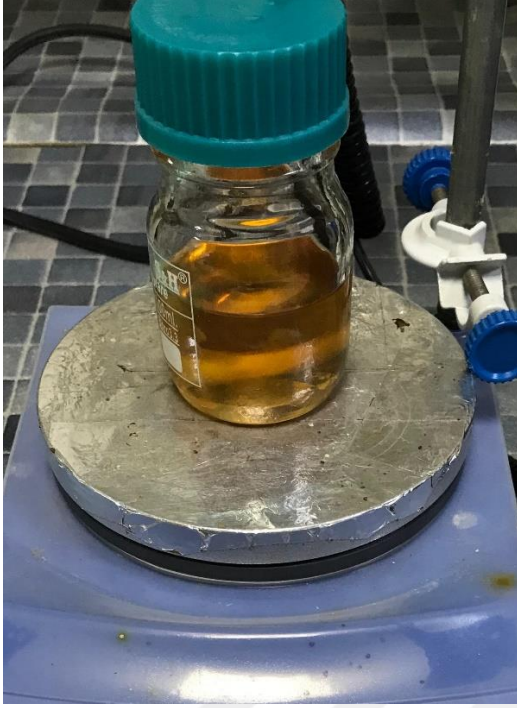


Şekil 3.1. Numune üretimi ve test için kullanılan yaklaşımlar

3.3. PAN Çözeltisinin Hazırlanması

Elektroegirme ile termoplastik nanofiberlerin üretiminde polimer çözeltisinin yoğunluğu ve viskozitesi önemli bir parametredir. Polimer çözeltisinin yoğunluğu ve viskozitesi elektro egirme işlemi sırasında kullanılan üretim parametreleri olan uygulanan gerilim, iğne ve toplayı arasındaki mesafe ve enjeksiyon hızına bağlı olarak nanofiber morfolojisine doğrudan etki etmektedir (Yar ve ark., 2017). Polimer çözeltisinin yoğunluğu optimum değer aralığından yüksek olduğunda üretilen nanofiberlerin çapları mikron değerlerine yaklaşır ki bu nanofiberlerin önemli bir avantajı olan büyük yüzey alanı etkisini azaltır. Ayrıca yüksek viskozite egirme işlemi sırasında damlacık oluşumuna da neden olarak homojen bir nanofiber morforlojisi oluşumunu engeller. Düşük viskozite ve yoğunluk değerlerinde ise egirme esnasında oluşan kohezif kuvvetler yetersiz kalır ve egirme işlemi gerçekleşmez. Ayrıca, düşük yoğunluğa sahip polimer kullanımı ise polimer zincirleri arasındaki düşük elektrostatik etkileşim nedeniyle egirme işlemi kesintili olarak gerçekleşir. Bu tez çalışmasında, literatürden elde edilen bilgiler, deneyimlerimiz ve elektroegirme egirme cihazının kabiliyetlerine dayanarak sürekli ve homojen morfolojiye sahip düşük çaplarda PAN nanofiber üretimi gerçekleştirilmiştir (Eskizeybek ve ark., 2018), PAN nanofiber üretimi için hazırlanan çözeltide DMF çözücü olarak kullanılmış ve PAN/DMF oranı ağırlıkça 1/9 olacak şekilde belirlenmiştir. PAN çözeltisi için, yeterli büyüklükteki bir beher içerisine 10 g PAN ve 90 g DMF çözeltisi ilave edilmiş, çözelti 70°C’de 24 s boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karışım esnasında çözelti rengi değişerek açık kahverengi rengine dönüşmüştür. Karıştırma işlemi sonunda çözelti oda sıcaklığına soğutulmuş ve elektro egirme işlemi gerçekleşene kadar karıştırmaya

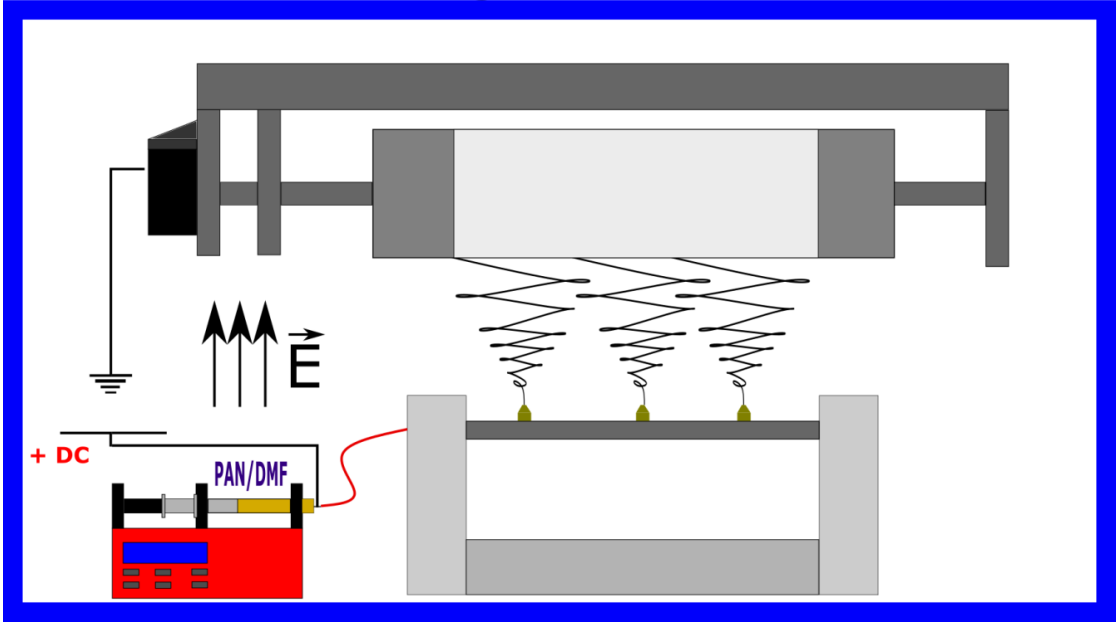
devam edilmiştir. Şekil 3.2’de homojen olarak elde edilen PAN/DMF çözeltisine ait bir fotoğraf verilmiştir.



Şekil 3.2 PAN nanofiber üretimi için kullanılan PAN-DMF çözeltisi görüntüsü

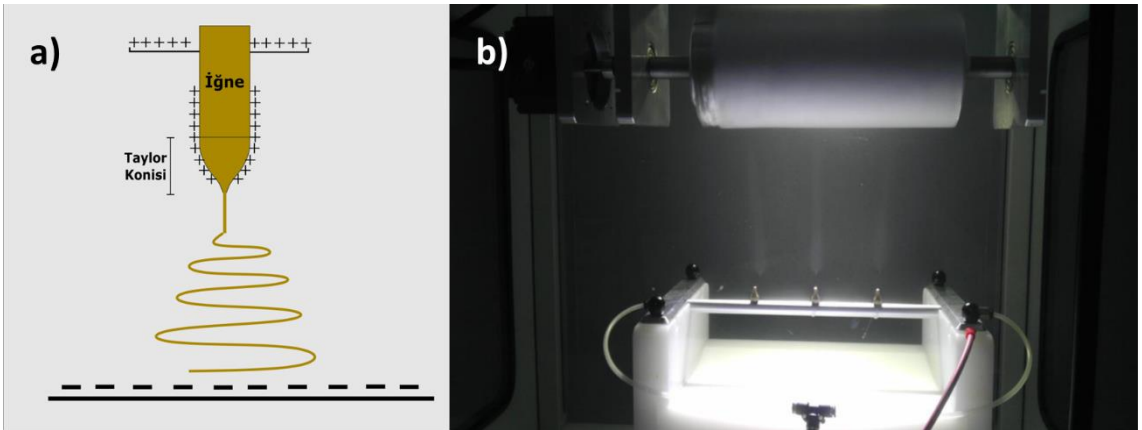
3.4. Elektrosin Yöntemi ile Nanomat Üretimi

Elektrosin işlemi (Şekil 3.3), iğneler ile sabit hızda dönen bir tambur arasına 20 kV elektrik potansiyeli uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, plastik steril şırınga içerisine 10 mL PAN/DMF çözeltisi çekilmiştir. Steril şırınga sabit hızda otomatik besleme kabiliyetine sahip şırınga pompası (New Era Pump System Inc. Model NE-1000) kullanılarak 19 gauge (yaklaşık 1mm dış çapında) üç iğne kullanılarak oda sıcaklığında sabit 0.35 mL/saat besleme hızında enjekte edilmiştir. İğneler ile tambur arasındaki uzaklık çözeltiliye etki eden elektrik alanını değiştirmektedir. Polimer çözeltilisine etki eden hacimsel yük yoğunluğu uzaklığın artmasıyla eksponansiyel olarak azalmaktadır. Fakat nanofiberlerin morfolojilerindeki bu azalma sınırlı kalmaktadır (Effect of needle length, electrospinning distance, and solution concentration on morphological properties of polyamide-6 electrospun nanowebs). Tüm üretim süreci boyunca, iğneler ve toplayıcı arasındaki mesafe 15 cm olarak sabitlenmiş ve üzerine alüminyum folyo sarılan tambur (40 cm çapında) 10 m/sn hızında döndürülmüştür.



Şekil 3.3 Elektroğirme prosesi ile nanomat üretiminin şematik olarak gösterimi

Elektroğirme ile nanofiber mat üretiminde, nanofiberlerin tambura birikme miktarını belirleyen diğer parametre ise polimer solüsyonun akış hızıdır. Çünkü polimer akış hızı polimer sıvısının şişkinliğini ve Taylor konisi oluşumunu etkilemektedir. Nisbeten daha düşük solsyon akış hızlarında kararlı Taylor konisi oluşumu gözlenmiş ve iğne ucundaki solüsyonun şişkinliği değişmemiştir. Bu sayede polimer çözeltisi iğne ucunda daha az olduğundan ve polimer çözeltisi şişkinliği yeterli hacimsel yük yoğunluğuna sahip olduğundan dolayı iğne ucundan çıkan polimer çözeltisinin uzamasını sağlayarak küçük çaplı fiberlerin oluşmasına yol açmaktadır (Şekil 3.4).

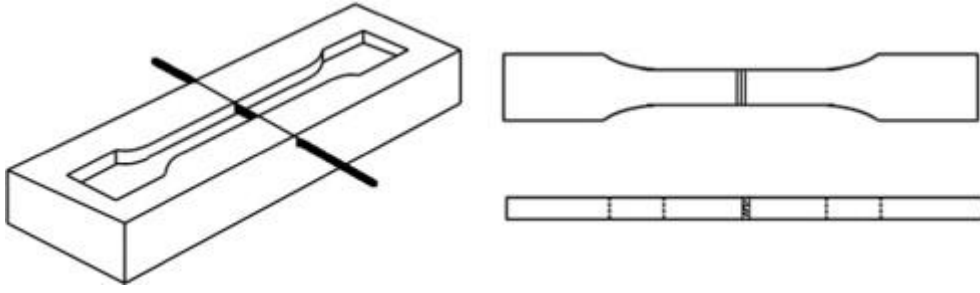


Şekil 3.4. a) Şematik olarak elektroğirme esnasında Taylor konisi oluşumu, b) PAN üretiminde kullanılan elektrospinning ünite

Üç saatlik Üretim süreci sonunda nanomatlar, bir işlem boyunca toplandı. Üretilen nanomatlar yaklaşık 220 x 300 mm'lik bir alana ve $4,6\pm 3$ g/m² alan yoğunluğuna sahiptir.

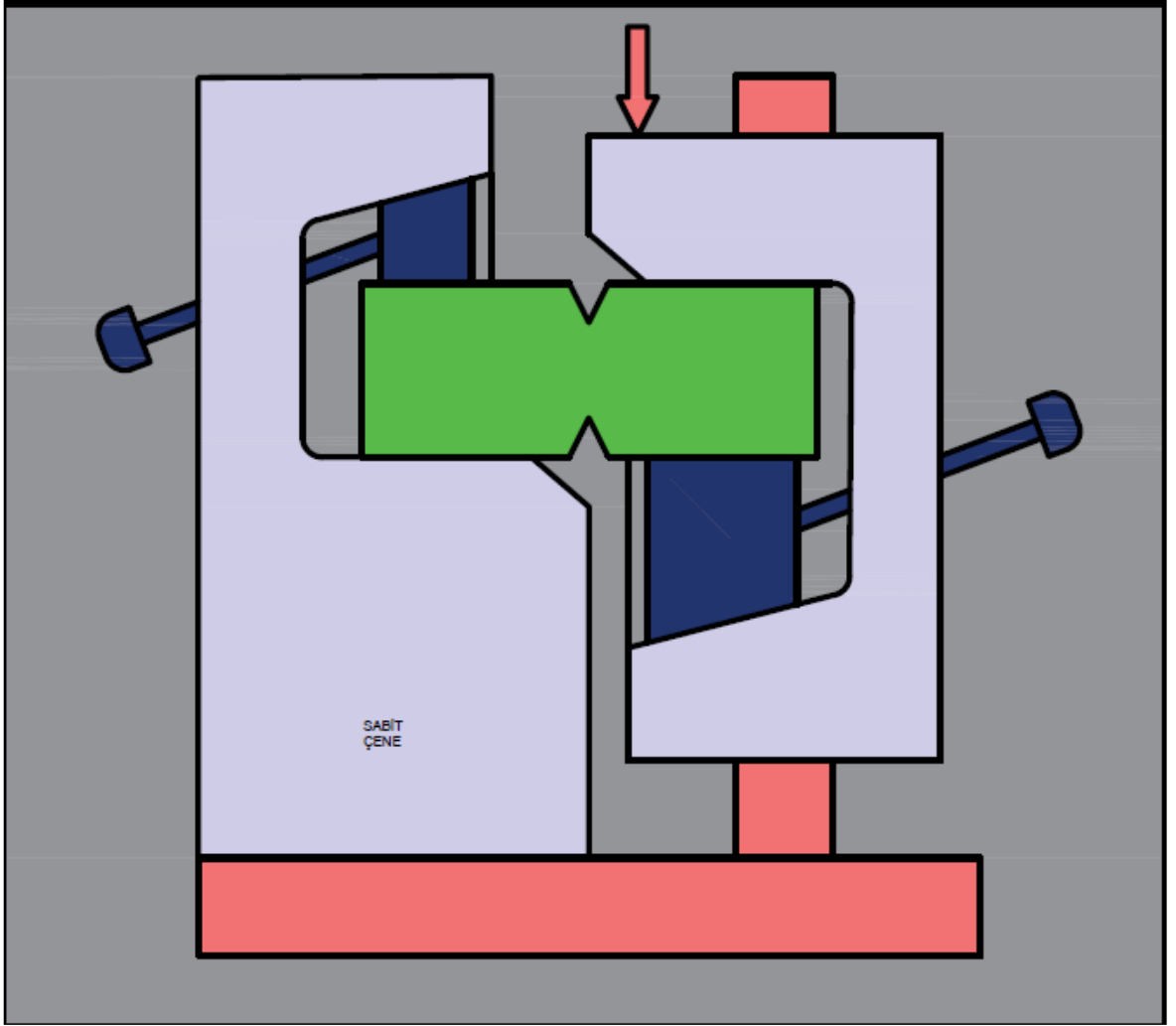
3.5. Numune Hazırlama

Enine fiber demet çekme testi numunesi ilk olarak Okroafor ve Hill tarafından geliştirilmiştir (Okoroafor ve Hill, 1995). Enine fiber demet çekme testi ile uygulanan gerilme ara yüzlerin dayanımının ölçülmesinde oldukça hassastır ve tek fiber çekme testi (single fiber pull-out) veya fiber fragmantasyonu testi ile iyi tutarlılık göstermektedir (Drescher ve ark., 2013). Şekil 3.5'te gösterildiği gibi enine fiber demet çekme testi numunesi, ASTM D638 standardına uygun olarak tip 1 numune boyutlarına uygun olarak hazırlanan silikon kalıplar içerisinde epoksi reçinesinin kürleştirilmesi ile elde edilmiştir. Karbon fiber ve PAN nanomatların kalıba yerleştirilmesi için kalıp gage uzunluğunun ortasına bir neşter yardımı ile numune derinliğinde bir yarık açılmıştır. Açılan yarık içerisine karbon fiber demetleri yerleştirilmeden önce 10 mm uzunluğunda sabit boylarda kesilmiştir. Fiber demetlerinin kesimi öncesinde her iki yüzeyine kâğıt bant yapıştırılmış, böylece kesim esnasında fiber demeti içerisinde fiber yönelimlerinin bozulması engellenmiştir. Kesilen fiber demetlerinin her iki ucuna hızlı sertleşen yapıştırıcı sürülerek kalıp içerisine yerleştirme esnasında oluşabilecek şekil bozukluklarının önüne geçilmiştir. Fiber demetleri açılan yarığa cımbız yardımıyla düz bir şekilde yerleştirilmiştir. PAN nanomatların fiber demeti üzerine yerleştirilmesinde benzer bir yaklaşım uygulanmıştır. PAN nanomatlar karbon fiber demet genişliği kadar (~5 mm) şeritler halinde kesilen nanomatlar 10 mm aralıklar ile her iki tarafından kâğıt bantlar ile karbon fiber demeti üzerine yerleştirilmiş makasla kesim işleminin ardından her iki ucuna hızlı sertleşen yapıştırıcı uygulanmıştır. Karbon fiber ve karbon fiber/PAN nanomat fiber demetleri üzerine epoksi reçine dökülerek kalıp boşlukları doldurulmuştur. Epoksi reçine hazırlanırken, üretici tarafından belirlenen oranlarda L160 epoksi ve H160 amin bazlı kürleştirici el ile 5 dk boyunca karıştırılmış ve içerisindeki hava kabarcıklarının giderilmesi için bir vakum odasında 15 dk atmosferik vakum etkisinde gaz giderme işlemi yapılmıştır. Bu işlemin ardından epoksi reçine sistemi silikon kalıplara yerleştirilen fiber demetleri üzerine dökülerek kalıp boşlukları reçine sistemi tarafından doldurulmuştur. Silikon kalıplar fırın içerisine yerleştirilmiş ve 80° C'de 1 s takiben 120°C'de 4 s olmak üzere kürlenmiştir. Kürleme işleminden sonra, numunelerin tüm yüzey ve köşeleri üstte de yüzeylerdeki olası hataları gidermek için bir yüzey taşlama makinesi kullanılarak yüzey pürüzlülükleri giderildi.



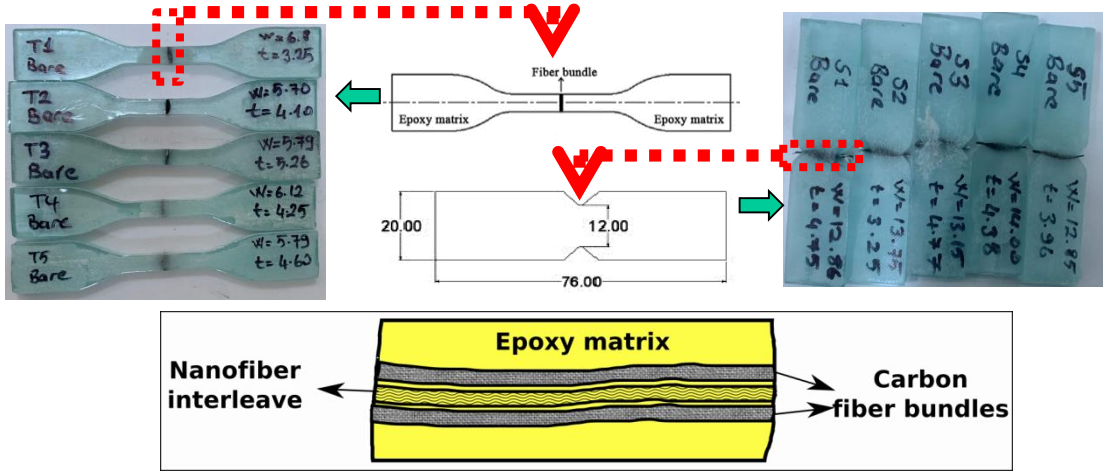
Şekil 3.5. ASTM D638 standardına uygun olarak tip 1 numune boyutlarına uygun olarak hazırlanan enine fiber demeti çekme deney numuneleri

Karbon fiber demetleri üzerine uygulanan PAN nanomat takviyenin saf kayma yükü etkisi altındaki etkisi ASTM D5379 standardına uygun olarak üretilen V çentikli kiriş kayma deneyleri ile belirlenmiştir. ASTM D5379 standardı kompozit malzemelerin kayma özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan Iosipescu dört noktadan asimetrik eğilme fikstürü ile deneyler gerçekleştirilir (Şekil 3.6). V-çentikli deney numunelerinin kullanılması numunenin genişlik doğrultusundaki simetri eksenine yerleştirilen fiberlerin demetleri üzerinde lokal kayma gerilmelerinin oluşmasına, gage bölgesinde kayma gerimesi dağılımının çentiksiz numunelere göre daha homojen oluşturulmasını sağlar (Deng ve ark., 2009).



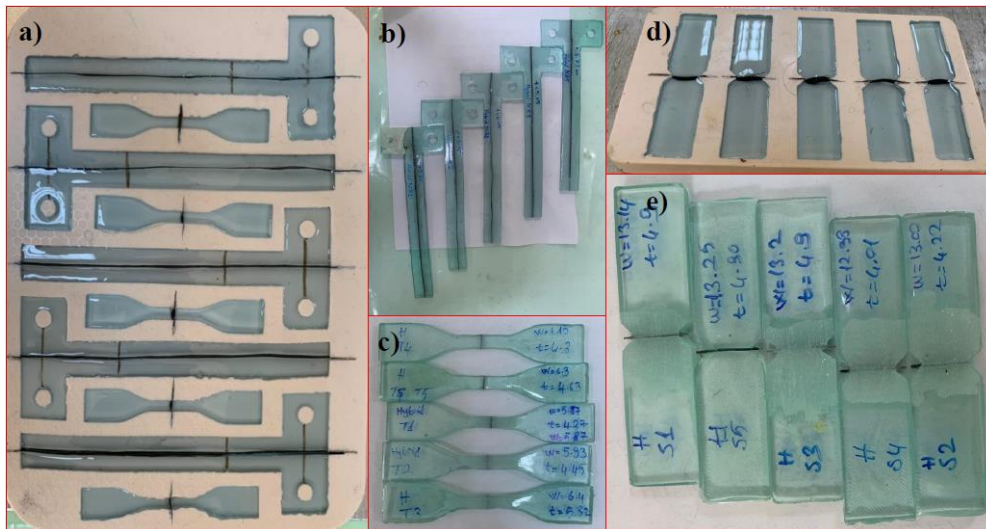
Şekil 3.6. Şematik olarak V-çentikli kiriş kayma deney fikstiri (Deng ve ark., 2009)

Bu çalışmada hazırlanan kayma deney numuneleri boyutları ASTM D5379 standardına uygun olarak 76x20 mm boyutlarında olup, orta noktasından her iki tarafına açılan çentikler sonrasında fiber demetininin yer aldığı etkin uzunluk 12 mm'dir (Şekil 3.7). Numune kalınlıkları, kalıp boşluğundaki epoksi miktarına bağlı olarak değişmektedir. Kayma deney numunelerinin hazırlanma süreci enine fiber demeti çekme deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan yöntemler ile aynıdır.



Şekil 3.7. Açık kalıp yöntemi ile üretilen enine çekme ve kayma fiber demeti numuneleri

Numunelere uygulanan mekanik deneyler esnasında epoksinin kürlenme etkisinin elde edilen sonuçlara etkisini ortadan kaldırmak için tüm numuneler aynı anda kürlenmiştir. Bunun için enine çekme ve kırılma numuneleri tek bir kalıba yerleştirilmiş, kayma numuneleri ise ayrıca kalıplanarak tüm numunler etüvde kürlenmiştir. Numunelerin silikon kalıplar içerisindeki yerleşimleri ve kürlenme sonrası fotoğrafları Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Numunelerin kalıp yerleşimleri ve kürlenme sonrası fotoğrafları a) Enine çekme ve Mod I kırılma numunelerinin silikon kalıp içerisindeki yerleşimleri, b) Kürlenme sonrası Mod I kırılma numuneleri, c) Kürlenme sonrası enine çekme numuneleri, d) Kayma numunelerinin silikon kalıp içerisindeki yerleşimleri, e) Kürlenme sonrası kayma numuneleri

3.6. Mekanik testler

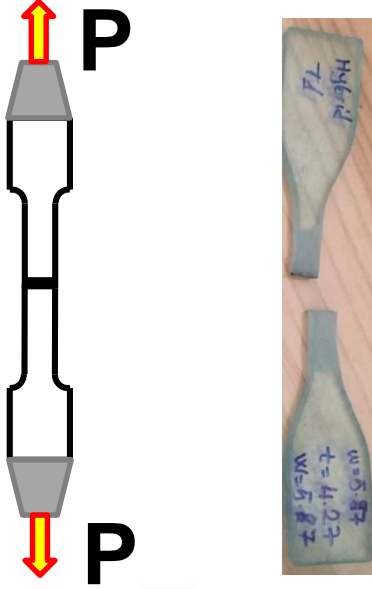
3.6.1. Enine Fiber Demeti Çekme Testleri

Fiber/matris arayüzey yapışma özelliği, enine fiber demet dayanımı yaklaşımı ile ölçülebilir. Karbon fiberler demetleri ve aralarına PAN nanomat yerleştirilmiş karbon fiber demetleri epoksi matrislere gömülüdür (Deng ve ark., 2009). Numunelerin enine fiber çekme testi, plastiklerin çekme gerilme özelliklerini belirlemek için kullanılan ASTM D638-02 standardına göre yapılmıştır. Bu çalışmada, iki karbon fiber demeti epoksi numunenin ortasına yerleştirilmiştir. Çekme deneyi, Instron 5565 elektro-mekanik çekme test cihazında ve oda sıcaklığında 1 mm / dk çekme hızda gerçekleştirilmiştir. Enine fiber demeti çekme örneklerinin uzamaları bir ekstensometre ile doğru olarak ölçülmüştür. Gerilme değerleri % 80 oranında azaldığında çekme testi durdurulmuş ve numunenin hasarlandığı kabul edilmiştir. Her numune türü için 5 tekrar yapılarak gerilme mukavemeti verisi elde edilmiştir. Enine fiber demeti çekme deneylerinde çekme gerilmesi-şekil değiştirme grafiklerinin çizilmesi için Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 kullanılmıştır.

$$\sigma = F/A \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \quad (3.2)$$

Burada, σ enine çekme gerilmesini (MPa), F uygulanan kuvveti (N), A uygulanan kuvvete dik yüzey alanını (mm^2), ε şekil değiştirme miktarını, ΔL uzama miktarını (mm) ve L_0 ise numunenin başlangıç gage uzunluğunu (mm) göstermektedir. Enine fiber demeti çekme deneyi şematik olarak Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Şematik olarak enine fiber demeti çekme deneyi ve deney sonrasında hasara uğrayan numuneler

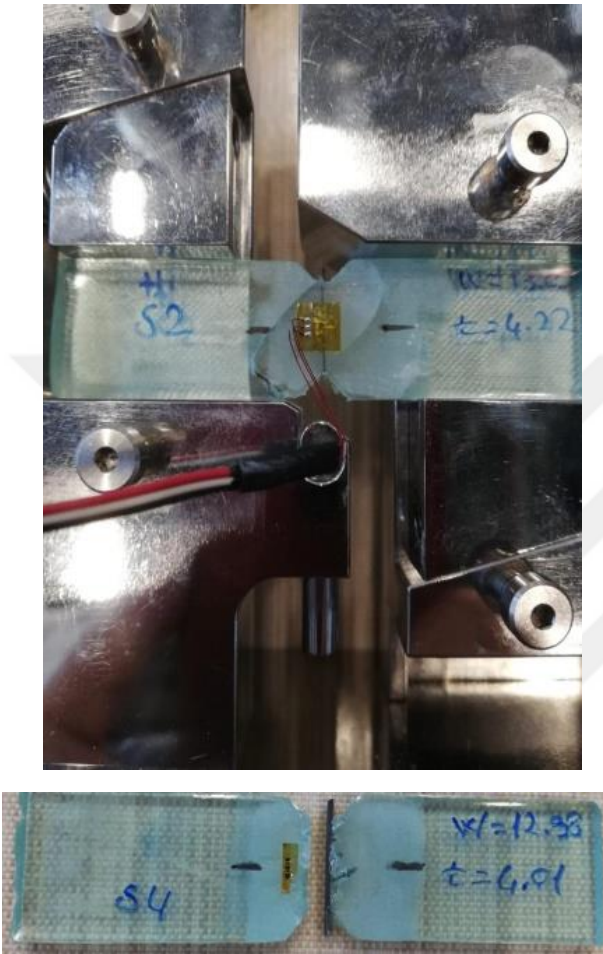
3.6.2. V-Çentikli Fiber Demeti Kayma Testleri

Fiber/matris arayüzey kayma dayanımı, v-çentikli fiber demeti kayma testleri yaklaşımı ile ölçülebilir. Karbon fiberler demetleri ve aralarına PAN nanomat yerleştirilmiş karbon fiber demetleri epoksi matrislere gömülüdür (Feng ve ark., 2014) Numunelerin enine fiber çekme testi, plastiklerin çekme gerilme özelliklerini belirlemek için kullanılan ASTM D5379 standardına göre yapılmıştır. Bu çalışmada, iki karbon fiber demeti epoksi numunenin ortasına yerleştirilmiştir. Kayma deneyi, Instron 5565 elektromekanik çekme test cihazında ve oda sıcaklığında 1 mm / dak çekme hızda gerçekleştirilmiştir. V-çentikli fiber demeti kayma örneklerinin uzamaları Şekil 3.10'de gösterildiği gibi numune üzerine yerleştirilen strain-gageler tarafından kaydedilmiştir. Gerilme değerleri % 80 oranında azaldığında Iopinescu kayma testi durdurulmuş ve numunenin hasarlandığı kabul edilmiştir. Her numune türü için 5 tekrar yapılarak gerilme verisi elde edilmiştir. Kayma gerilmesi-şekil değiştirme grafiklerinin çizilmesi için Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 kullanılmıştır.

$$\tau = F/A \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 \quad (3.4)$$

Burada, τ kayma gerilmesini (MPa), F uygulanan kuvveti (N), A uygulanan kuvvete dik yüzey alanını (mm²), ε şekil değiştirme miktarını, ΔL uzama miktarını (mm) ve L_0 ise numunenin başlangıç gage uzunluğunu (mm) göstermektedir. V-çentikli fiber demeti kayma testleri Şekil 3.11’da verilmiştir.



Şekil 3.10.V-çentikli fiber demeti kayma deneyi ve deney sonrasında hasara uğrayan numuneler

3.7. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Çekme testlerinden sonra, mikroskobik hasar mekanizmalarını araştırmak için SEM (CamScan JEOL 6010) kullanılarak TFBT numunelerinin tipik kırılma yüzeyleri gözlenmiştir. BFBCT örnekleri için temsili mikroskopi fotoğrafları hem çatlak başlangıcı hem de büyüme bölgelerinde çekilmiştir. Numune yüzeyindeki görüntü kalitesinin artırılması için numuneler 5-8 nm kalınlığında Au-Pt karışımı ile kaplanmıştır.

BÖLÜM 4

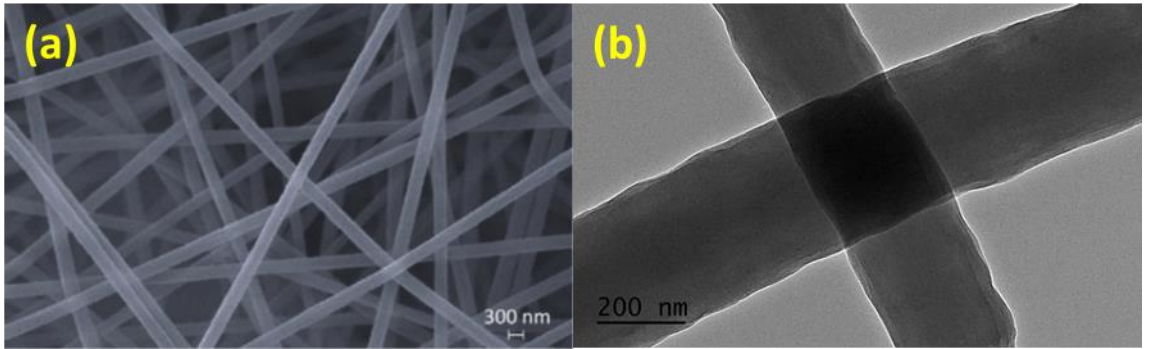
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde ilk olarak PAN nanomatların morfolojik özellikleri SEM analizleri ile gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri nanofiberlerin çapları ve yönelimleri hakkında detaylı olarak tartışılmasını sağlamaktadır.

Enine fiber demeti çekme, V-çentikli kayma ve Mod-I kırılma deneyleri sonrasında elde edilen sonuçlar grafik ve tablolar halinde verilmiş ve sonuçlar kıyaslanarak tartışılmıştır. Ayrıca, mekanik deneyler sonucu numunelerin kırılma yüzeyleri ışık mikroskobu ve SEM analizleri ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kırılma yüzeylerinin incelenmesiyle elde edilen sonuçlar ile mekanik performans sonuçları arasında ilişkiler kurulmuş ve bu ilişkilere göre sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.1. PAN Nanomatların Morfolojik ve Mekanik Özellikleri

PAN nanomatların SEM görüntüsü Şekil 4.1a'da verilmiştir. PAN nanomatu oluşturan nanofiberler incelendiğinde boncuksuz, birbirine dolanmış ve homojen bir yapıya sahip rastgele yönlendirilmiş nanofiberler görüntülenmiştir. Nanofiberlerin çapları Şekil 4.1(a)'da gösterildiği gibi 150-300 nm aralığında olup nanofiberler pürüzsüz yüzeylere sahiptir. Şekil 4.1b'de PAN nanofiberlerin TEM görüntüleri görülmektedir. Elde edilen TEM fotoğraflarında pürüzsüz yüzeye sahip nanofiberler açıkça görülmekte ve nanofiber çaplarının SEM analizi sonucunda elde edilen değerler ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. (a) PAN nanomatların SEM fotoğrafı, (b) PAN nanofiberlerin TEM görüntüsü

PAN nanomatların morfolojik özelliklerine ilaveten, çekme deneyi ile mekanik performansları belirlenmiştir. Çekme testleri Shimadzu Model AGS-X10 kullanılarak

yapılmıştır. Fiber gerilme testi için, ortam sıcaklığında mikropnömatik kavramalar ve 10N yük hücresi ile donatılmış üniversal çekme test cihazı kullanılmıştır. Çekme numuneleri, 20 mm uzunluğunda dikdörtgen açıklığa sahip 40x40 mm sert kağıt çerçevelerin içerisine monte edilmiştir. Çekme hızı 0,5 mm olarak ayarlandı en az beş numune için deney gerçekleştirildi.

Deney sırasında elde edilen çekme kuvvetleri kullanılarak öncelikle spesifik dayanım hesaplanmış, daha sonra spesifik dayanım kullanılarak çekme gerilmesi Deklem 4.1 ve 4.2.'deki gibi hesaplanmıştır;

$$\text{Gerilme} \left(\frac{\text{g}}{\text{teks}} \right) = \frac{\text{Kuvvet (g)} * \text{numune genişliği (mm)}}{\text{Alan yoğunluğu} \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right)} \quad (4.1)$$

$$\text{Gerilme (MPa)} = 9.8 \times \text{Gerilme} \left(\frac{\text{g}}{\text{teks}} \right) \times \text{yoğunluk} \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right) \quad (4.2)$$

Çekme testleri sonucunda elde edilen çekme modülü ve çekme dayanımı değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. PAN nanofiber matların 26.8 MPa çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. İlâveten, PAN nanomatların çekme modülleri ise 8 GPa olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar benzer morfolojik özelliklere sahip PAN nanomatlardan elde edilmiş literatür ile kıyaslandığında mekanik performanslarının oldukça yakın olduğu, üretim esnasında kullanılan polimer konsantrasyonu, eğirme hızı, toplayıcının dönme hızı ve yönelim gibi üretim parametrelerinin mekanik performans üzerine etkisi olduğu belirtilmiştir (Liu ve ark., 2019).

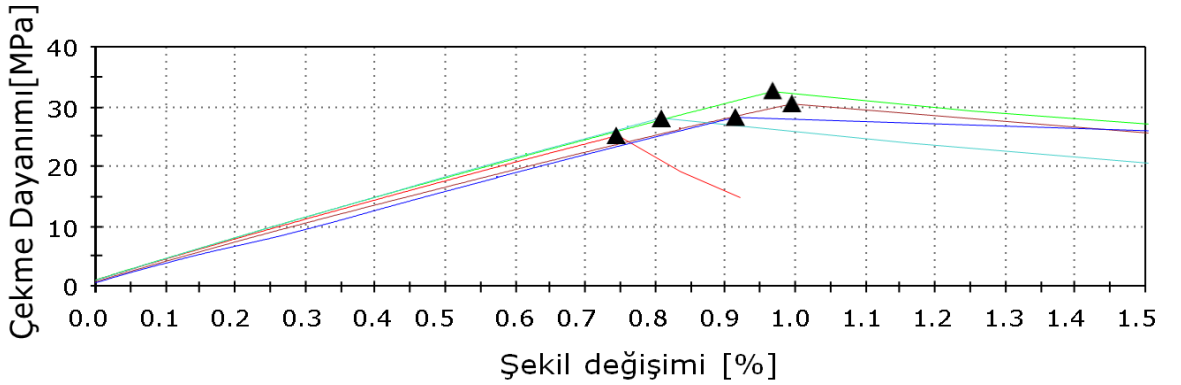
Çizelge 4.1. PAN nanomatların çekme testi sonucunda elde edilen mekanik özellikleri

	Çekme Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
PAN nanomat	8	26,8

4.2. Enine Fiber Demeti Çekme Testleri

Enine fiber çekme testleri, iki karbon fiber demetini birbirinden ayırmaya çalışan çekme yükü etkisi altında tabakalar arası zsnğince bölgeye yerleştirilen PAN nanomatların arayüzey dayanımına etkisini ortaya çıkarmak için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.2’de nanomat takviyesi içermeyen iki karbon fiber demeti ile oluşturulan 5 farklı saf numuneye ait enine fiber çekme deney sonuçları verilmiştir. Elde edilen gerilme-şekil değiştime grafiği incelendiğinde numunelerin tamamının elastik olarak maksimum çekme dayanımına lineer elastik olarak deforme olduğu ve maksimum dayanım anında demetler arası ayrılma hasarı gerçekleşerek hasarın ortaya çıktığı görülmektedir. Numunelerin tamamında kırılma fiber demetleri arasından gerçekleşmiş ve ani gerçekleşen kırılma davranışından anlaşılacağı üzere numuneler gevrek kırılma sergilemiştir. Ayrıca, numunelerin tamamının 30 MPa civarında kararlı bir şekilde düşük sapmalarda maksimum çekme dayanımı sergilediği belirlenmiştir. En yüksek çekme dayanımı 32,75 MPa olarak ölçülürken en yüksek elastisite modülü 3,36 GPa olarak saptanmıştır. Tüm numunelerin E-modülü ve çekme dayanımı değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olması numune üretiminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğinin açık bir kanıtıdır. Şekil değişimi değerleri incelendiğinde ise %0,9-1,0 aralığına yoğunlaşan şekil değişimi değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.2. Saf (PAN nanomat içermeyen) karbon fiber demetlerinin enine fiber çekme testi ile belirlenen arayüzey dayanımları

Saf numunelere ait tüm enine fiber çekme deney sonuçları standart sapmaları içerecek şekilde Çizelge 4.2.’de verilmiştir. Numunelere ait elde edilen sonuçlar incelendiğinde PAN mat takviyesiz karbon fiber demeti ara yüzey dayanımının ortalama 30 MPa ara yüzey dayanımına sahip olduğu ve elastisite modülünün de 3,2 GPa olduğu

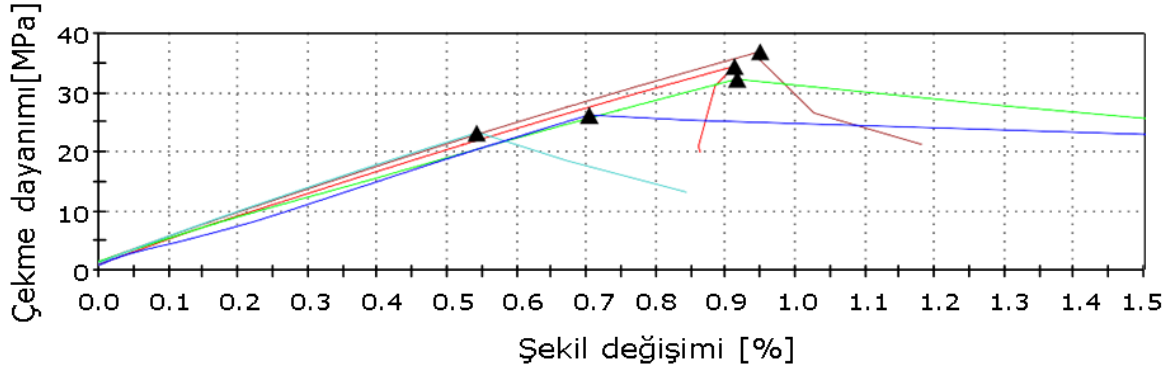
belirlenmiştir. En yüksek çekme dayanımını 32,75 MPa ve en yüksek elastisite modülü ise 3,36 GPa olarak ölçülmüştür. Qi ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı karbon fiber demetlerinin ara yüzey dayanımları ölçülmüş ve karbon fiber demeti numunelerinin 30 MPa civarında ölçülmüş ve fiber/matris ara yüzeyinin fiber demetine uygulanan kimyasal yüzey işlemlerinin etkisi ile mekanik performansının iyileştiği belirlenmiştir (Qi ve ark., 2018). Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre saf karbon fiber demeti deneylerinde bulunan fiber-matris ara yüzey sonuçları literatür ile uyumludur.

Çizelge 4.2. Saf karbon fiber demetlerinin enine fiber çekme deneyinden elde edilen mekanik performanslarının kıyaslanması

	Numune	Genişlik [mm]	Kalınlık [mm]	Alan [mm ²]	Çekme Dayanımı [MPa]	E-modülü [MPa]
1	1	5,8	3,96	23	25,309	3222,78
2	2	6,1	4,48	27	30,661	2987,77
3	3	5,9	4,43	26	32,751	3253,24
4	4	5,6	4,62	26	28,19	3367,56
5	5	6	5,95	36	28,398	3174,47
Ortalama		5,9	4,69	28	29,062	3201,16
S.D.		0,18	0,75	4,74	2,8	138,85

Şekil 4.3’de PAN nanomat ile takviye edilmiş iki karbon fiber demeti ile oluşturulan beş farklı saf numuneye ait enine fiber çekme deney sonuçları verilmiştir. Elde edilen gerilme-şekil değişime grafiği incelendiğinde saf numunelerden elde edilen sonuçlara benzer olarak numunelerin tamamının elastik olarak maksimum çekme dayanımına kadar lineer elastik olarak deforme olduğu ve maksimum dayanım anında demetler arası ayrılma hasarı gerçekleşerek hasarın ortaya çıktığı belirlenmiştir. Numunelerin tamamında kırılma fiber demetleri arasında bulunan PAN nanomat tabakanın alt veya üst yüzeyinden gerçekleşmiş ve ani gerçekleşen kırılma davranışından anlaşılacağı üzere numuneler gevrek kırılma sergilemiştir. Ancak, sonuçlar saf numuneler ile kıyaslandığında bazı farklılıklar görülmektedir. İlk olarak PAN nanomat takviyeli numunelerin daha düşük nisbeten daha düşük şekil değiştirme değerlerinde kırıldığı görülmektedir. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demeti en yüksek ara yüzey dayanımı 36,75 MPa olarak ölçülmüştür ki bu değer saf numunelerden %12,2 daha büyüktür. Bununla birlikte elde edilen sonuçlardan elastisite modülleri karşılaştırıldığında en yüksek elastisite modülü değeri 3,90

GPa ölçülmüştür Bu değer saf numunlerden elde edilen en yüksek elastisite değerinden %16,6 daha yüksektir. Bununla birlikte PAN nano mat takviyeli numunelerden bazılarının 30 MPa değerinin altında ara yüzey dayanımı sergilediği bunun da standart sapma değerlerinde artışa ve ortalama dayanım değerinin aşağı yönde değişeceğini göstermektedir.



Şekil 4.3. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demetlerinin enine fiber çekme testi ile belirlenen arayüzey dayanımları

PAN nanomat takviyeli numunelere ait tüm enine fiber çekme deney sonuçları standart sapmaları içerecek şekilde Çizelge 4.3.'de verilmiştir. Numunelere ait elde edilen sonuçlar incelendiğinde PAN mat takviyeli ortalama 30,52 MPa ara yüzey dayanımına sahip olduğu ve elastisite modülünün de 3,72 GPa olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde PAN nanomat takviyeli numunelerde ara yüzey dayanımını ve elastisite modülü sonuçlarında standart sapmaların saf numunelere göre yaklaşık iki kat arttığı ve özellikle bu artışın kaynağının 3 ve 4 nolu numelerden kaynaklandığı açıkça görülmektedir. Bu sapmadaki artışın numune hazırlama süreçlerinde ara yüzeye yerleştirilen nanomat takviyesinin yönelimi ile ilgili olduğu ve nanomat tabasının karbon fiber demetlerine paralel olarak uzanmadığı düşünülmektedir.

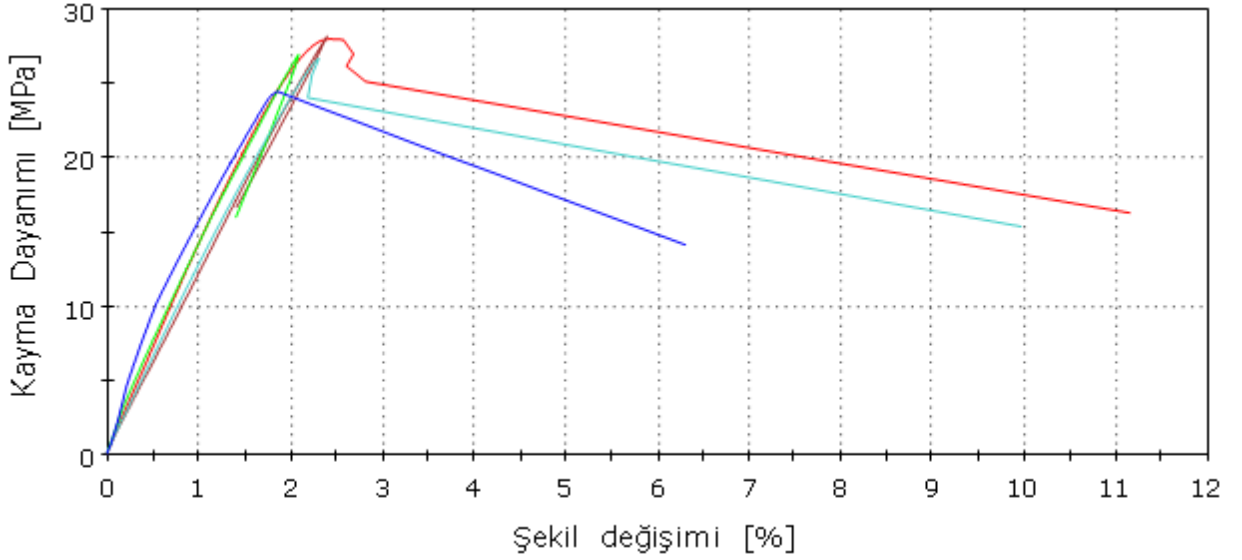
Çizelge 4.3. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demetlerinin enine fiber çekme deneyinden elde edilen mekanik performanslarının kıyaslanması

	Numune	Genişlik [mm]	Kalınlık [mm]	Alan [mm ²]	Çekme Dayanımı [MPa]	E-modülü [MPa]
1	1	5,8	4,48	26	34,312	3714,20
2	2	5,6	3,95	22	36,775	3824,76
3	3	5,9	4,01	24	32,174	3301,70
4	4	5,6	4,03	22	23,194	3980,24
5	5	5,8	5,01	29	26,174	3825,16
Ortalama		5,7	4,30	25	30,526	3729,21
S.D.		0,14	0,45	2,79	5,67	257,07

4.3. V-Çentikli Fiber Demeti Kayma Testleri Sonuçları

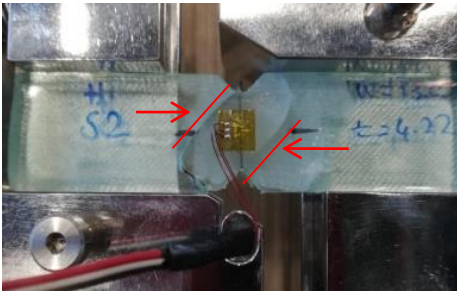
V-Çentikli fiber demeti kayma testleri, iki karbon fiber demetiarasındaki epoksi reçinece zengin bölgenin saf kayma yükü etkisi altında mekanik performansını belirlemek ve PAN nanomat takviyesinin mekanik performans ve davranışa etkisini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.4'de nanomat takviyesi içermeyen iki karbon fiber demeti ile oluşturulan 5 farklı saf numuneye ait V-Çentikli fiber demeti kayma deneyi sonuçları verilmiştir. Elde edilen gerilme-şekil değiştime grafiği incelendiğinde numunelerin tamamının elastik olarak maksimum çekme dayanımına lineer elastik olarak deforme olduğu belirlenmiştir. Kırılan numuneler incelendiğinde, numunelerin bazılarının karbon nanofiber demetinin yer aldığı kayma yükünün etki ettiği çentik bölgesinden değil, çentik doğrultusuna 45° açı yapacak şekilde bu bölge dışında gerçekleştiği gözlenmiştir (Şekil 4.5). Bu etkinin özellikle fiber-matiks ara yüzey dayanımının kayma yükü etkisi altında fiber demetini çevreleyen epoksi reçinenin kayma dayanımı aştığı durumlarda ortaya çıktığı ve bu iki değerlerin olayın gözlenme sıklığı göz önüne alındığında birbirine yakın olduğu sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 4.4. Saf (PAN nanomat içermeyen) karbon fiber demetlerinin V-Çentikli fiber demeti kayma testleri ile belirlenen ara yüzey kayma dayanımları

Numunelerin bazılarında hasar ile birlikte anı kırılma gözlemlenirken bazı numunelerde ise maksimum kayma dayanımına ulaşıldıktan sonra yüksek şekil değişimi değerleri ölçülmüştür. Bu durum özellikle çentik doğrultusu dışında kırılma gösteren numunelerde gözlemlenmiştir. Ayrıca, numunelerin tamamının 26,5 MPa civarında kararlı bir şekilde düşük sapmalarda maksimum kayma dayanımı sergilediği belirlenmiştir. En yüksek kayma dayanımı 28,23 MPa olarak ölçülürken en yüksek kayma Chord modülü 1,66 GPa olarak saptanmıştır. Tüm numunelerin chord modülü ve kayma dayanımı değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olması numune üretiminin başarılı bir şekilde gerçekleştiğinin açık bir kanıtıdır.



Şekil 4.5. V-çentikli kayma testlerinde görülen çentik doğrultusuna 45° açı ile gerçekleşen kayma hasarı

Saf numunelere ait tüm V-Çentikli fiber demeti kayma testleri sonuçları standart sapmaları içerecek şekilde Çizelge 4.4.'de verilmiştir. Numunelere ait elde edilen sonuçlar incelendiğinde PAN mat takviyesiz karbon fiber demeti ara yüzey kayma dayanımının ortalama 26,89 MPa ve chord modülünün ise 1,38 GPa olduğu belirlenmiştir. En yüksek kayma dayanımını 28,23 MPa ve en yüksek chord modülü ise 1,66 GPa olarak ölçülmüştür Deng ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı epoksif reçinelerin termoplastik tokluk arttırıcılar etkisinde ara yüzey kayma dayanımları ölçülmüştür (Deng ve ark., 2009). İosipescu deneyleri kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde epoksi reçinelerin kayma dayanımları yaklaşık 28 MPa civarında ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar literatür ile de uyumludur.

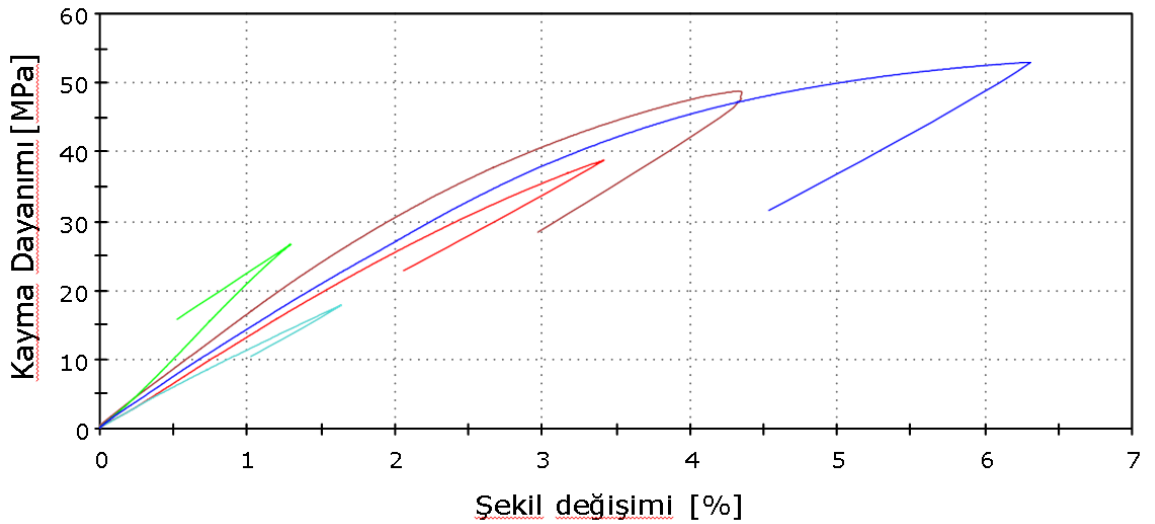
Çizelge 4.4. Saf karbon fiber demetlerinin V-Çentikli fiber demeti kayma testlerinden elde edilen mekanik performanslarının kıyaslanması

Numune	Çentik ucunda genişlik [mm]	Çentik ucunda kalınlık [mm]	Alan [mm ²]	Kayma dayanımı [MPa]	Chord modülü [MPa]
1	13,140	4,90	64,39	27,99166	1410,10
2	13,000	4,22	54,86	28,23819	1177,76
3	13,200	4,90	64,68	27,04648	1374,86
4	12,980	4,01	52,05	26,68779	1273,93
5	13,250	4,90	64,93	24,50891	1664,24
Ortalama	13,114	4,59	60,18	26,89461	1380,18
S.D.	0,120	0,44	6,22	1,48038	182,95

Şekil 4.6'de PAN nanomat ile takviye edilmiş iki karbon fiber demeti ile oluşturulan 5 farklı saf numuneye ait V-Çentikli fiber demeti kayma testleri sonuçları verilmiştir. Elde edilen gerilme-şekil değişime grafiği incelendiğinde saf numunelerin kayma davranışlarının oldukça farklı kayma davranışları belirlenmiştir. Numunelerin tamamının elasto-plastik kayma dayanımı sergilediği açıkça görülmektedir. Ayrıca kayma hasarının gerçekleştiği şekil değişimi değerleri saf numunelere yaklaşık iki kat daha büyüktür. PAN nanomat ilavesinin numunelerin kayma davranışını önemli olarak değiştirdiği görülmektedir. PAN nanomat ilavesinin özellikle kayma yükü etkisi altında kayma dayanımını ve şekilde değişimini arttırarak tokluğu arttırdığı görülmektedir. PAN nanomat takviyesinin kayma yükü etkisinde ara yüzey performansını önemli derecede arttırdığı ancak bu etkinin enine

fiber çekme deneylerinde sınırlı bir miktarda ortaya çıktığı belirlenmiştir. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demeti en yüksek kayma ara yüzey dayanımı 52,96 MPa olarak ölçülmüştür ki bu değer saf numunelerden yaklaşık iki kat daha büyüktür. Bununla birlikte elde edilen sonuçlardan chord modülleri karşılaştırıldığında en yüksek chord modülü değeri 2,13 GPa ölçülmüştür Bu değer saf numunelerden elde edilen en yüksek elastisite değerinden %28,3 daha yüksektir. Bununla birlikte PAN nanomat takviyeli numunelerden bazılarının 40 MPa değerinin altında ara yüzey dayanımı sergilediği bunun da standart sapma değerlerinde artışa ve ortalama dayanım değerinin aşağı yönde değişeceğini göstermektedir.

Kayma yükleri altındaki hasar modlarının saf ve PAN nanomat takviyeli karbon fiber demet numuneleri arasında gibi farklı olduğu bulunmuştur. Saf karbon fiber demet numuneleri genellikle en az dört parçaya bölünmüş ve yüksek stres konsantrasyonunun bulunduğu bölge olan V çentik uçlarının çevresinde hasar normal olarak yüzeydeki yüzey kusurlarında başlamaktadır. Bununla birlikte, kayma hasarından sonra, PAN nanomat takviyeli karbon fiber demet numuneleri normalde üç parçaya ayrılmıştır. Bu tür numunelerde PAN nanomat epoksi arayüzünde başlamış ve arayüz boyunca kısa bir mesafe boyunca yayılmıştır.



Şekil 4.6. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demetlerinin V-Çentikli fiber demeti kayma testleri ile belirlenen kayma arayüzey dayanımları

PAN nanomat takviyeli numunelere ait tüm V-Çentikli fiber demeti kayma testleri sonuçları standart sapmaları içerecek şekilde Çizelge 4.5.'de verilmiştir. Numunelere ait elde edilen sonuçlar incelendiğinde PAN mat takviyeli numunelerin ortalama 37,06 MPa

kayma ara yüzey dayanımına sahip olduğu ve chord modülünün de 1,53 GPa olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde PAN nanomat takviyeli numunelerde ara yüzey kayma dayanımını ve chord modülü sonuçlarında standart sapların saf numunelere göre yaklaşık iki kat arttığı ve özellikle bu artışın kaynağının 3 ve 4 nolu numelerden kaynaklandığı açıkça görülmektedir. Bu sapmadaki artışın numune hazırlama süreçlerinde ara yüzeye yerleştirilen nanomat takviyesinin yönelimi ile ilgili olduğu ve nanomat tabasının karbon fiber demetlerine paralel olarak uzanmadığı düşünülmektedir.

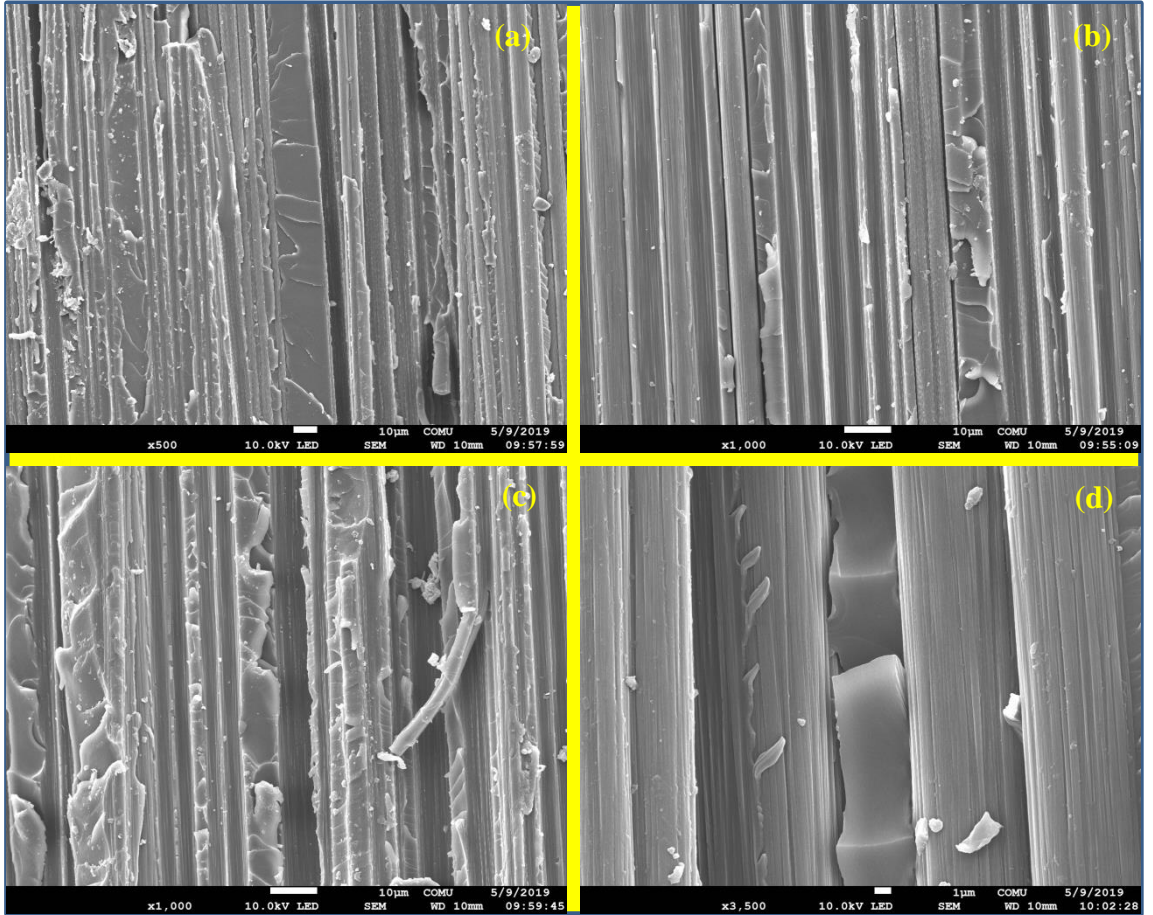
Çizelge 4.5. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demetlerinin V-Çentikli fiber demeti kayma testlerinden elde edilen mekanik performanslarının kıyaslanması

	Numune	Çentik ucunda genişlik [mm]	Çentik ucunda kalınlık [mm]	Alan [mm ²]	Kayma dayanımı [MPa]	Chord modülü [MPa]
1	1	12,860	4,75	61,08	38,89	1340,98
2	2	13,750	3,25	44,69	48,77	1598,57
3	3	13,150	4,77	62,73	26,72	2132,42
4	4	14,000	4,38	61,32	17,94	1149,81
5	5	12,850	3,96	50,89	52,96	1431,60
Ortalama		13,322	4,22	56,14	37,06	1530,67
S.D.		0,526	0,64	7,96	14,71	373,35

4.4. Kırılma Yüzeylerinin Morfolojik Analizi

Genel olarak, matris ve fiber arasındaki arayüzey etkileşimi tabakalı kompozitlerde sıklıkla görülen Mod I ve Mod II hasarlarında önemli bir rol oynar ve arayüzeydeki etkileşim çatlakların yayılabileceği pürüzlü yüzeylere bağlıdır (Chen ve ark., 2011; Eskizeybek ve ark., 2014). Ayrıca, elastik olmayan matris deformasyonu, boşluk çekirdeklenmesi, fiber köprüleme, fiber ayrılması, fiber sıyrılması, çatlakların yön değiştirmesi ve çatlakların durdurulması gibi mikro-mekanik tokluk artırma mekanizmaları, çatlak oluşumu ve yayılması sırasında enerji yutulmasını artırır (Gojny ve ark., 2005). PAN nanomatların fiber demetleri arasındaki matrisçe zengin bölgeye uygulanması durumunda, nano ölçekte ilave tokluk artırıcı mekanizmalar olarak nanofiber ayrılması, nanofiber sıyrılması ve köprüleme tabakalar arası ara yüzey dayanımına katkıda bulunur. PAN nanomatın enine çekme ve kayma yükleri etkisi altında demetler arasındaki matrisçe zengin bölge üzerindeki etkisini daha da açıklamak için, örneklerin kırılma yüzeyleri Şekil 4.7.'de gösterildiği gibi SEM analizi ile incelenmiştir. Karbon fiber demetleri arasında

PAN nanomat içermeyen saf numunelerde kırılma sonrası hafifçe pürüzlü bir kırılma yüzeyi (Şekil 4.7a) gözlenmiştir. Bununla birlikte, eşlenik yüzey incelendiğinde yetersiz çatlak direncini ve yetersiz arayüzey bağı nedeniyle demet içerisindeki karbon fiber yüzeylerinin epoksi matris artığı içermediği ve nisbeten temiz bir yüzeye sahip olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.7b). Karbon fiber demetleri arasında ilerleyen çatlak bazı bölgelerde demet içlerine ilerleyerek karbon fiberleri kesmek suretiyle fiberce zengin bölgede de ilerlemiştir (Eskizeybek ve ark., 2018). Karbon fiberlerin ayrılma veya sıyrılma sırasında epoksi reçine tarafından oluşturulan yuvalarında hasarlar görülmektedir. Bu hasarlar, karbon fiber ile reçine arasında kısmen iyi bir ara-yüzey yapışması olduğunun göstergesidir (Şekil 4.7c). Ancak, her ne kadar sıyrılmış veya ayrılmış fiber yuvalarında etkin bir ara yüzey dayanımını işaret eden mekanik tokluk artırıcı mekanizmaların varlığı gözlemlense de, karbon fiber yüzeylerinde epoksi matrisin olmayışı ayrılma veya sıyrılma anında çatlakın fiber-matris ara yüzeyinde kararsız olarak ilerleyerek kırılmaya neden olduğunu işaret etmektedir (Şekil 4.7d).

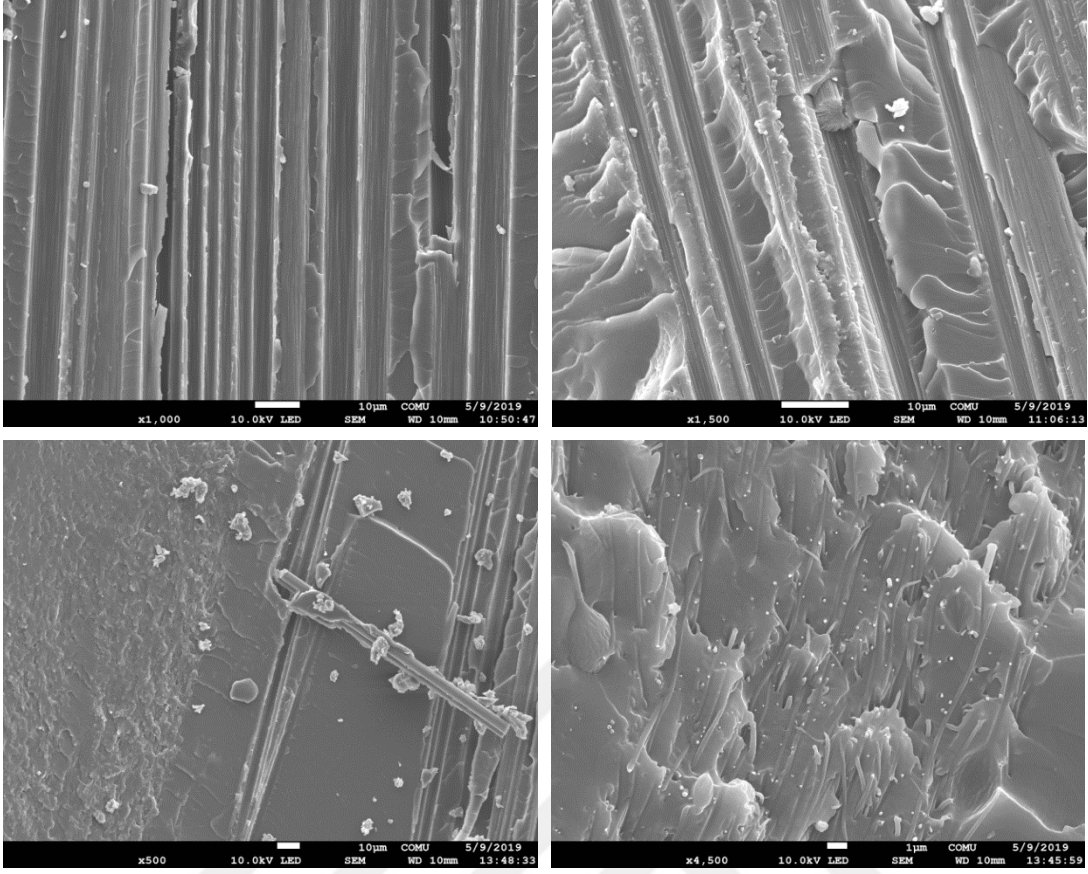


Şekil 4.7. Enine fiber çekme testi sonrasında saf numuneye ait kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri

Karbon demetleri arasına yerleştirilen PAN nanomatların enine çekme ve V-çentikli kayma testlerinde ortaya çıkan mekanik performansa etkileri Şekil 4.8.'de kırılma yüzeylerinin morfolojik incelemeleri ile gösterilmiştir. Karbon fiber demetleri arasında PAN nanomat takviyeli numunelerde kırılma sonrası kırılma yüzeyinde artan pürüzlülük dikkati çekmektedir. Kırılma yüzeyinin pürüzlülüğünün artması, epoksi matrisin nispeten lokal olarak daha fazla plastik şekil değiştirdiğinin ve matris içerisinde oluşan mikro çatlakların PAN nanomat takviyesi nedeniyle sıklıkla ilerleme doğrultusu değiştirdiği ve ilerleyebilmek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyduğu gözlenmiştir (Şekil 4.7a). Fiber yüzeylerinde görülen epoksi artıkları kohezif kırılma ile iyileştirilmiş fiber-matris ara yüzey dayanımını işaret ederken, matris içerisinde oluşan mikro-çatlakların ilerleyişi esnasında çatlağın bu bölgede sürekli yön değiştirerek ilerlediği ve dolayısıyla enerjisini sürekli olarak kaybettiği sonucu çıkarılabilir (Şekil 4.7b). Şekil 4.7c'de demet içerisindeki karbon fiberler ve matrisçe zengin bölge arasına yerleştirilen PAN nanomat bölgesi görülmektedir. Fiberler ile nanomat arasında 150 µm kalınlığında matrisçe zengin bölge görülmektedir. PAN nanomat bölgesinde epoksi reçinede meydana gelen aşırı plastik deformasyon açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, fiber yüzeylerindeki artık epoksi kalıntıları fiber-matris ara yüzeyindeki artan yapışma kabiliyetinin göstergesidir. PAN nanomatın ilave edilmesiyle ara yüzeyde artan yüzey alanı ve enerji emen çatlak durdurma etkileri ile çatlak ucu etrafında lokalize plastik bölgelerin oluşmasına yol açmıştır [10,20]. Kırılma yüzeyi, matris ve PAN nanomat bölgesi olmak üzere iki ayrı bölgeden oluşmaktadır. İkinci olarak, sıyrılan nanofiberlerin duvarlarındaki kısmi epoksi kalıntısı, gelişmiş ara yüzey kuvvetini ortaya çıkararak ara yüzeyde kohezyon hasarını işaret etmektedir (Şekil 4.8d). Şekil 4.8d görüldüğü gibi, epoksi reçinesinin tüm yüzeyi PAN nanomat ile kaplıdır. PAN nanomat takviyeli örneklerinin kırılma yüzeyinin saf örneklere göre görsel olarak daha pürüzlü olduğu anlaşılırken, çok sayıda boş fiber yuvası ve kopmuş nanofiberler gözlenmektedir.

Genel olarak, karbon fiber demetleri arasına ilave edilen PAN nanomat takviyesi mikro ve nano boyutta çeşitlik tokluk arttırıcı mekanizmalar ile ara yüzey dayanımının mekanik performansının artmasına katkıda bulunmaktadır. SEM analizlerine göre PAN nanomatların mekanik performansa en önemli katkıları PAN nanofiberlerin epoksi matris içerisinden sıyrılrken yuttukları enerjidir. Bununla birlikte, ayrılan iki mikro yüzeyi bağlayan nanofiber köprülemesi, nanofiber kırılması, çatlağın yön değiştirmesi veya durdurulması gibi çeşitli tokluk arttırıcı mekanizmalar da ara yüzey mekanik performansının artmasına katkıda bulunmuştur. PAN nanomatlar karbon fiber demetleri

arasındaki ara yüzeyi mekanik olarak takviye ederler ve bu bölgede çatlak oluşumu ve ilerlemesi için takviyesiz saf numunelere göre daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulur. Bunlara ilaveten, ilerleyen çatlak ile yeniden oluşan çatlak yüzeyleri PAN nanofiberler tarafından köprülenmektedir. Köprüleme etkisi reçinece zengin bölgede gözlemlenen aksel olarak deforme olmuş veya sıyrılmış nanofiberlerden belirlenmektedir. Bu etkinin ortaya çıkabilmesi için nanomatı oluşturan PAN nanofiberler ile nanomatı çevreleyen epoksi matris arasında etkin bir kohezif yapışmanın ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Enine fiber çekme deneylerinde karbon fiber demetlerini birbirinden ayırmaya çalışan yük çekme yükü iken, V-çentikli kayma deneylerinde ise kayma yükü etkisi altında hasar gerçekleşmiştir. Bu etkilere dayanarak, enine fiber çekme deneylerinde PAN nanofiberlerin tokluk arttırıcı etkin mekanizmaları nanofiber sıyırılması ve köprülemesidir. Ancak, V-çentikli kayma deneylerinde nanomat kaymaya zorlandığından nanofiberler yoğun plastik deformasyona zorlanmıştır. Dolayısıyla, her iki deney numunelerinin davranışları arasındaki temel fark, nanofiberlerin kayma yükü etkisi altında yoğun plastik deformasyon sergileyerek karbon fiber demetleri arasında kalan epoksi ara yüzeyinin elastik deformasyondan elasto-plastik deformasyona geçişini sağlayarak enerji yutulmasını arttırmıştır.



Şekil 4.8. Enine fiber çekme testi sonrasında PAN nanomat takviyeli numuneye ait kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, karbon/epoksi kompozitlerde fiber tabakalı arasına uygulanan termoplastik nanofiber matların arayüzey yapışma verimine etkisi enine fiber demeti çekme, V-çentikli kayma deneyleri ile belirlenmiştir. Ayrıca, mekanik deneyler sonucu numunelerin kırılma yüzeyleri SEM analizleri ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Kırılma yüzeylerinin incelenmesiyle elde edilen sonuçlar ile mekanik performans sonuçları arasında ilişkiler kurulmuş ve bu ilişkilere göre sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Numunelere ait elde edilen sonuçlar incelendiğinde PAN mat takviyesiz karbon fiber demeti ara yüzey dayanımının ortalama 30 MPa ara yüzey dayanımına sahip olduğu ve elastisite modülünün de 3,2 GPa olduğu belirlenmiştir. Demetler arasına PAN nanomat ilavesi ile enine fiber çekme dayanımı artmış, PAN nanomat takviyeli karbon fiber demeti en yüksek ara yüzey dayanımı 36,75 MPa olarak ölçülmüştür ki bu değer saf numunelerden %12,2 daha büyüktür. Bununla birlikte elde edilen sonuçlardan elastisite modülleri karşılaştırıldığında en yüksek elastisite modülü değeri 3,90 GPa ölçülmüştür Bu değer saf numunelerden elde edilen en yüksek elastisite değerinden %16,6 daha yüksektir.

- V-çentikli kayma deneyleri sonuçlarına göre, PAN mat takviyesiz karbon fiber demeti ara yüzey kayma dayanımının ortalama 26,89 MPa ve Chord modülünün ise 1,38 GPa olduğu belirlenmiştir. PAN nanomat takviyeli karbon fiber demeti en yüksek kayma ara yüzey dayanımı 52,96 MPa olarak ölçülmüştür ki bu değer saf numunelerden yaklaşık iki kat daha büyüktür. Bununla birlikte elde edilen sonuçlardan chord modülleri karşılaştırıldığında en yüksek chord modülü değeri 2,13 GPa ölçülmüştür Bu değer saf numunelerden elde edilen en yüksek elastisite değerinden %28,3 daha yüksektir.

- Kırılma yüzeyleri incelendiğinde, PAN nanomat ilavesi ile fiber yüzeylerinde görülen epoksi miktarında artışlar gözlenmiştir. Bu gözlem PAN ilavesi ile artan fiber-matris ara yüzey dayanımını işaret ederken, matris içerisinde oluşan mikro-çatlakların ilerleyişi esnasında çatlakın bu bölgede sürekli yön değiştirerek ilerlediği ve dolayısıyla enerjisini absorbe ettiği düşünülmektedir.

- SEM analizlerine göre PAN nanomatların mekanik performansa en önemli katkıları PAN nanofiberlerin epoksi matris içerisinde sıyrılırken yuttukları enerji olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, nanofiber köprülmesi, nanofiber kırılması, çatlakın yön

değiştirmesi veya durdurulması gibi çeşitli tokluk arttırıcı mekanizmalar da ara yüzey mekanik performansının artmasına katkıda bulunmuştur.

Enine fiber çekme ve V-çentikli fiber demeti kayma deneyleri kompozitlerde arayüzey mukavemeti ve tokluk özelliklerini kapsamlı bir şekilde karakterize etmek için uygulanabilir. Gelecekteki araştırmalar, arayüzey modifikasyonunun arayüzey tokluğu üzerindeki etkisini araştırmak ve Mod I örneklerinin görünür kırılma tokluğu ile matris arayüzey tokluğu ile ilişkilendirilmesi için kırılma modelleri oluşturmaya odaklanabilir.



KAYNAKLAR

- Bhudolia S.K., Joshi S.C., 2018. Low-velocity impact response of carbon fibre composites with novel liquid Methylmethacrylate thermoplastic matrix. *Composite Structures*, 203: 696-708.
- Barzoki P.K., Latifi M., Rezaoust A.M., 2019. The outstanding effect of nanomat geometry on the interlaminar fracture toughness behavior out of autoclave made glass/phenolic composites under mode-I loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 205: 108-119.
- Beylergil B., Tanoglu M., Aktas E., 2017. Enhancement of interlaminar fracture toughness of carbon fiber-epoxy composites using polyamide-6,6 electrospun nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 134.
- Bhudolia S.K., Joshi S.C., 2018. Low-velocity impact response of carbon fibre composites with novel liquid Methylmethacrylate thermoplastic matrix. *Composite Structures*, 203: 696-708.
- Chen Q., Zhang L.F., Rahman A., Zhou Z.P., Wu X.F., Fong H., 2011. Hybrid multi-scale epoxy composite made of conventional carbon fiber fabrics with interlaminar regions containing electrospun carbon nanofiber mats. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 42: 2036-2042.
- DeCarli M., Kozielski K., Tian W., Varley R., 2005. Toughening of a carbon fibre reinforced epoxy anhydride composite using an epoxy terminated hyperbranched modifier. *Composites Science and Technology*, 65: 2156-2166.
- Del Saz-Orozco B., Ray D., Stanley W.F., 2017. Effect of Thermoplastic Veils on Interlaminar Fracture Toughness of a Glass Fiber/Vinyl Ester Composite. *Polymer Composites*, 38: 2501-2508.
- Deng S.Q., Qi B., Hou M., Ye L., Magniez, K., 2009. Assessment of interfacial bonding between polymer threads and epoxy resin by transverse fibre bundle (TFB) tests. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 40: 1698-1707.
- Dikshit V., Bhudolia S.K., Joshi S.C., 2017. Multiscale Polymer Composites: A Review of the Interlaminar Fracture Toughness Improvement. *Fibers*, 5.

- Drescher P., Thomas M., Borris J., Riedel U., Arlt C., 2013. Strengthening fibre/matrix interphase by fibre surface modification and nanoparticle incorporation into the matrix. *Composites Science and Technology*, 74: 60-66.
- Eskizeybek V., Avci A., Gulce A., 2014. The Mode I interlaminar fracture toughness of chemically carbon nanotube grafted glass fabric/epoxy multi-scale composite structures. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 63: 94-102.
- Eskizeybek V., Yar A., Avci A., 2018. CNT-PAN hybrid nanofibrous mat interleaved carbon/epoxy laminates with improved Mode I interlaminar fracture toughness. *Composites Science and Technology*, 157: 30-39.
- Feng Q.P., Deng Y.H., Xiao H.M., Liu Y., Qu C.B., Zhao Y., Fu S.Y., 2014. Enhanced cryogenic interfacial normal bond property between carbon fibers and epoxy matrix by carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 104: 59-65.
- Garcia-Rodriguez S.M., Costa J., Singery V., Boada I., Mayugo J.A., 2018. The effect interleaving has on thin-ply non-crimp fabric laminate impact response: X-ray tomography investigation. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 107: 409-420.
- Garg A.C., 1988. Delamination - a Damage Mode in Composite Structures. *Engineering Fracture Mechanics*, 29: 557-584.
- Gojny F.H., Wichmann M.H.G., Fiedler B., Schulte K., 2005. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites - A comparative study. *Composites Science and Technology*, 65: 2300-2313.
- Gou J., Zhuge J., Liang F., 2012. Processing of polymer nanocomposites. *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (Pmcs)*: 95-119.
- Hamer S., Leibovich H., Green A., Avrahami R., Zussman E., Siegmann A., Sherman, D., 2014. Mode I and Mode II fracture energy of MWCNT reinforced nanofibrilmats interleaved carbon/epoxy laminates (vol 90, pg 48, 2014). *Composites Science and Technology*, 93: 114-114.
- Imagawa S., Nishida H., Okubo K., Fujii T., 2018. Improvement of mode-II interlaminar fracture toughness of carbon textile composites with modified matrix of thermoplastic and thermoset epoxy -addition of glass fibers. 13th International

- Conference on Textile Composites (Texcomp-13), 406.
- Jones F.R., 2010. A Review of Interphase Formation and Design in Fibre-Reinforced Composites. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24: 171-202.
- Karger-Kocsis J., Mahmood H., Pegoretti A., 2015. Recent advances in fiber/matrix interphase engineering for polymer composites. *Progress in Materials Science*, 73: 1-43.
- Koyanagi J., Yoneyama S., Nemoto A., Melo J.D.D., 2010. Time and temperature dependence of carbon/epoxy interface strength. *Composites Science and Technology*, 70: 1395-1400.
- Li W., Chen W., Tang L.Q., Jiang Z.Y., Huang P.Y., 2019. A general strength model for fiber bundle composites under transverse tension or interlaminar shear. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 121: 45-55.
- Liu S.D., Li D.S., Yang Y., Jiang L., 2019. Fabrication, mechanical properties and failure mechanism of random and aligned nanofiber membrane with different parameters. *Nanotechnology Reviews*, 8: 218-226.
- Nguyen D.D., Vu C.M., Choi H.J., 2018. Improvement of the mode I interlaminar fracture toughness of glass fiber/epoxy composites using polystyrene electrospun nanofibres. *Polymer Bulletin*, 75: 5089-5102.
- Okoroafor E.U., Hill R., 1995. Determination of Fiber-Resin Interface Strength in Fiber-Reinforced Plastics Using the Acoustic-Emission Technique. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 28: 1816-1825.
- Perez P.G., Bouvet C., Chettah A., Dau F., Ballere L., Peres P., 2019. Effect of unstable crack growth on mode II interlaminar fracture toughness of a thermoplastic PEEK composite. *Engineering Fracture Mechanics*, 205: 486-497.
- Qi G.C., Du S.Y., Zhang B.M., Tang Z.W., Yu Y.L., 2014. Evaluation of carbon fiber/epoxy interfacial strength in transverse fiber bundle composite: Experiment and multiscale failure modeling. *Composites Science and Technology*, 105: 1-8.
- Qi G.C., Du S.Y., Zhang B.M., Yu Y.L., 2016. A new approach to assessing carbon fiber/epoxy interfacial shear strength by tensile test of 45 degrees fiber bundle

- composites: Experiment, modeling and applicability. *Composites Science and Technology*, 129: 214-221.
- Qi G.C., Zhang B.M., Du S.Y., 2018. Estimation of interfacial toughness using bilayer fiber bundle compact tension (BFBCT) specimens. *Composites Science and Technology*, 161: 1-7.
- Qi G.C., Zhang B.M., Du S.Y., Yu Y.L., 2017. Estimation of aramid fiber/epoxy interfacial properties by fiber bundle tests and multiscale modeling considering the fiber skin/core structure. *Composite Structures*, 167: 1-10.
- Raju I.S., O'Brien T.K., 2008. Fracture mechanics concepts, stress fields, strain energy release rates, delamination initiation and growth criteria. *Delamination Behaviour of Composites*: 3-27.
- Ramirez F.A., Carlsson L.A., Acha B.A., 2009. A method to measure fracture toughness of the fiber/matrix interface using the single-fiber fragmentation test. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 40: 679-686.
- Ratna D., 2003. Modification of epoxy resins for improvement of adhesion: a critical review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 17: 1655-1668.
- Razavi S.M.J., Neisiany R.E., Khorasani S.N., Ramakrishna S., Berto F., 2018. Effect of neat and reinforced polyacrylonitrile nanofibers incorporation on interlaminar fracture toughness of carbon/epoxy composite. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 8: 126-131.
- Reeder J.R., Crews J.H., 1992. Redesign of the Mixed-Mode Bending Delamination Test to Reduce Nonlinear Effects. *Journal of Composites Technology & Research*, 14: 12-19.
- Rosso P., Varadi K., 2006. FE macro/micro analysis of thermal residual stresses and failure behaviour under transverse tensile load of VE/CF - fibre bundle composites. *Composites Science and Technology*, 66: 3241-3253.
- Taylor A.C., 2010. Advances in nanoparticle reinforcement in structural adhesives. *Advances in Structural Adhesive Bonding*: 151-182.
- Verrey J., Winkler Y., Michaud V., Manson J.A.E., 2005. Interlaminar fracture toughness

- improvement in composites with hyperbranched polymer modified resin. *Composites Science and Technology*, 65: 1527-1536.
- Wang Y.L., Pillai S.K.R., Che J.F., Chan-Park M.B., 2017. High Interlaminar Shear Strength Enhancement of Carbon Fiber/Epoxy Composite through Fiber- and Matrix-Anchored Carbon Nanotube Networks. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9: 8960-8966.
- Wu Z.J., Yi X.S., Wilkinson A., 2017. Interlaminar fracture toughness of carbon fibre/RTM6-2 composites toughened with thermoplastic-coated fabric reinforcement. *Composites Part B-Engineering*, 130: 192-199.
- Yan C., Xiao K.Q., Ye L., Mai Y.W., 2002. Numerical and experimental studies on the fracture behavior of rubber-toughened epoxy in bulk specimen and laminated composites. *Journal of Materials Science*, 37: 921-927.
- Yar A., Haspulat B., Ustun T., Eskizeybek V., Avci A., Kamis H., Achour S., 2017. Electrospun TiO₂/ZnO/PAN hybrid nanofiber membranes with efficient photocatalytic activity. *Rsc Advances*, 7: 29806-29814.
- Zhandarov S., Mader E., 2005. Characterization of fiber/matrix interface strength: applicability of different tests, approaches and parameters. *Composites Science and Technology*, 65: 149-160.
- Zhang J., Fox B.L., 2006. Characterization and analysis of delamination fracture and nanocreep properties in carbon epoxy composites manufactured by different processes. *Journal of Composite Materials*, 40: 1287-1299.
- Zhang J.N., Deng S.Q., Wang Y.L., Ye L., Zhou L.M., Zhang Z., 2013. Effect of nanoparticles on interfacial properties of carbon fibre-epoxy composites. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 55: 35-44.
- Zheng N., Huang Y.D., Liu H.Y., Gao J.F., Mai Y.W., 2017. Improvement of interlaminar fracture toughness in carbon fiber/epoxy composites with carbon nanotubes/polysulfone interleaves. *Composites Science and Technology*, 140: 8-15.
- Zhou J., Li Y.G., Li N.Y., Hao X.Z., Liu C.Q., 2016. Interfacial shear strength of microwave processed carbon fiber/epoxy composites characterized by an improved fiber-bundle pull-out test. *Composites Science and Technology*, 133: 173-183.

Zhou X.F., Nairn J.A., Wagner H.D., 1999. Fiber-matrix adhesion from the single-fiber composite test: nucleation of interfacial debonding. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 30: 1387-1400.

Zhou X.F., Wagner H.D., Nutt S.R., 2001. Interfacial properties of polymer composites measured by push-out and fragmentation tests. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 32: 1543-1551.

Zinck P., Wagner H.D., Salmon L., Gerard J.F., 2001. Are microcomposites realistic models of the fibre/matrix interface? I. Micromechanical modelling. *Polymer*, 42: 5401-5413.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ali Fahri DANIŞMAN

Doğum Yeri : Çanakkale

Doğum Tarihi : 10/06/1985

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya – Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Yüksek Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

BİLİMSEL FAALİYETLERİ

- a) Yayınlar -SCI -Diğer
- b) Bildiriler -Uluslararası –Ulusal

Danisman A.F., Sas Cayci H.S., Eskizeybek V., " Interleaving carbon/epoxy composites with PAN Nanofibers: Bilayer bundle tests", II. International Joint Science Congress of Materials and Polymers, 9-12 November 2018, Durres-Albenia

- c) Katıldığı Projeler

İŞ DENEYİMİ

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : İğdaş Çelik Enerji Tersane Ve Ulaşım Sanayi A.Ş., 2011-2019

İLETİŞİM

E-posta Adresi : alifahridanisman@gmail.com