



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN  
ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KARBONFİBER TAKVİYELİ EPOKSİ  
KOMPOZİTLERİN HİBRİT CIVATALI /  
YAPIŞKANLI BAĞLANTILARI ÜZERİNE  
DENEYSEL ÇALIŞMA: GERİ  
DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ NANOFİBER  
POLİSTİREN ETKİSİ**

**Mehmet Talha TINASTEPE**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran-2023  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# KARBONFİBER TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN HİBRİT CIVATALI / YAPIŞKANLI BAĞLANTILARI ÜZERİNE DENEYSEL ÇALIŞMA: GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ NANOFİBER POLİSTİREN ETKİSİ

**Mehmet Talha TINASTEPE**

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr.Ögr.Üyesi Mehmet Emin ÇETİN**

**2023, 55 Sayfa**

**Jüri**

**Dr.Ögr.Üyesi Mehmet Emin ÇETİN  
Prof.Dr. Mesut UYANER  
Dr.Ögr.Üyesi Oğuzhan ŞAHİN**

Bu tez çalışmasında karbonfiber takviyeli epoksi kompozitlerin tek taraflı bindirmeli civatalı, yapışkanlı ve hibrit civatalı/yapışkanlı (HBB) bağlantı konfigürasyonlarında polistiren (PS) nanofiber takviyesinin etkisi incelenmiştir. HBB bağlantılar, civatalı ve yapışkanlı bağlantı tekniklerinin avantajlarına sahip olmalarına rağmen, yapışkan tabakanın performansı HBB bağlantıların yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Nanofiber takviyesi, yapışkanlı ve HBB bağlantıların yapışma performansını artırmak için etkili bir çözüm haline gelmiştir. Bu amaçla, doğa dostu bir uygulama olarak atık polimerlerden, PS nanofiber matı elektro-eğirme yöntemiyle üretilmiştir. PS nanofiber matı, bağlantı elemanları arasına güçlendirme katmanı olarak yerleştirilmiş ve numuneler yarı-statik gerilme yüklemesi altında test edilmiştir. Çekme testi ASTM D5961 standartlarında gerçekleştirilmiştir. PS nanofiber modifikasyonu ile yapışkanlı bağlantının maksimum yük değerinde %10'luk önemli bir iyileşme görülmüş olup HBB bağlantının kırılma enerjisi ise %15 artmıştır. Nanofiber takviyeli bütün numunelerin çekme testi sonucunda, maksimum yük ve kırılma enerjisi açısından nanofiber takviyesiz numunelere göre daha mukavemetli olduğu görülmüştür. PS takviyeli numuneler, sade epoksi yapışkanlı numunelere göre daha gelişmiş hasar modları sergilemiştir. Bu noktada geri dönüştürülmüş PS nanofiberin epoksi ile uyumlu olması ve PS modifikasyonu ile geliştirilmiş yapışkan tabaka performansının etkili olduğu görülmüştür. Numunelerin kırılma yüzeylerinin morfolojisi SEM ile görüntülenmiş ve kırılma tokluğuna etki eden faktörler araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Polistiren (PS) nanofiber, karbon kompozit (KK), hibrit civatalı/yapışkanlı (HBB) bağlantı, mekanik performans

## ABSTRACT

### MS THESIS

# AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE HYBRID BOLTED/BONDED JOINTED CARBONFIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITE: THE EFFECT OF RECYCLED NANOFIBER POLYSTYRENE

Mehmet Talha TINASTEPE

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN AIRCRAFT ENGINEERING

Advisor: Asst.Prof.Dr. Mehmet Emin ÇETİN

2023, 55 Pages

Jury

Asst.Prof.Dr. Mehmet Emin ÇETİN

Prof.Dr. Mesut UYANER

Asst.Prof.Dr. Oğuzhan ŞAHİN

In this thesis, the effect of polystyrene (PS) nanofiber reinforcement on carbon fiber-reinforced epoxy composites was investigated in single lap bolted, bonded, and hybrid bolted/bonded (HBB) joint configurations. HBB joints combine the advantages of bolted and bonded joint techniques; however, the performance of the adhesive layer significantly affects the load-carrying capacity of HBB joints. Nanofiber reinforcement has emerged as an effective solution to enhance the bonding performance of bonded and HBB joints. For this purpose, PS nanofibers were produced from waste polymers using the electrospinning method as an environmentally friendly approach. PS nanofiber mats were placed as a reinforcement layer between the adherends, and the specimens were tested under quasi-static tensile loading. Tensile testing was performed according to ASTM D5961 standards. By PS nanofiber reinforcement, a significant improvement of 10% in the maximum load value of the bonded joint was observed, while the fracture energy of the HBB joint increased by 15%. All nanofiber-reinforced specimens exhibited higher strength in terms of maximum load and fracture energy compared to the specimens without nanofiber reinforcement. Progressive damage modes were observed in PS-reinforced specimens compared to neat epoxy specimens. In this sense, the compatibility of recycled PS nanofiber with epoxy and the improved performance of the adhesive layer through PS modification were thought to be effective. The morphology of the fracture surfaces of the specimens was examined using scanning electron microscopy (SEM), and the factors influencing fracture toughness were investigated.

**Keywords:** Polystyrene (PS) nanofiber, carbon composite (CC), hybrid bonded/bolted (HBB) joint, mechanical performance

## ÖNSÖZ

Hayatım boyunca bana her anlamda destek olan ve yanımda olan, bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan, oğulları olmaktan gurur duyduğum annem Saliha TINASTEPE ve babam Süleyman TINASTEPE'ye ve kardeşim Sena Nur TINASTEPE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren ve her türlü desteği sağlayan çok değerli hocam Sayın Dr.Öğr.Üyesi Mehmet Emin ÇETİN'e en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın, en başından sonuna kadar yardımcı olan, olumlu ve yapıcı eleştirileriyle beni yönlendiren, tecrübe ve bilgi birikimleriyle her zaman kendilerinden çok şey öğrendiğim çok değerli hocalarım Sayın Doç.Dr. Halil Burak KAYBAL ve Sayın Dr.Öğr.Üyesi Hasan ULUS'a ve nano malzeme üretiminde yardımlarını esirgemeyen ve destek olan değerli hocam Sayın Doç.Dr. Mehmet Okan ERDAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bilimsel katkılarını ve tecrübelerini esirgemeyen, saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet AVCI 'ya teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Mehmet Talha TINASTEPE  
KONYA-2023

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	v
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	ix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Kompozit Malzemeler .....	2
1.1.1. Vakum İnfüzyon Metodu.....	5
1.2. Kompozit Malzemelerde Bağlantılar.....	5
1.2.1. Cıvatalı Bağlantılar .....	6
1.2.2. Yapışkanlı Bağlantılar .....	8
1.2.3. Hibrit Bağlantılar .....	9
1.3. Nanoteknoloji.....	10
1.3.1. Cıvatalı, Yapışkanlı ve Hibrit Bağlantılarda Nanoteknoloji.....	10
1.3.2. Elektro-Eğirme Yöntemi ve Nanofiber Üretimi .....	11
1.4. Tezin Amacı.....	15
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>16</b>
2.1. Cıvatalı Yapışkanlı ve Hibrit Bağlantılar .....	16
2.2. Cıvatalı, Yapışkanlı ve Hibrit Bağlantılarda Nano Takviye.....	20
2.2.1. Kompozit Malzemeye Nanofiber Takviyeleri .....	20
2.2.2. Nanoparçacık ve Nanotüp Takviyeleri .....	20
2.2.3. Nanofiber Takviyeleri.....	24
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>27</b>
3.1. Malzemeler .....	27
3.2. Karbon Kumaş Epoksi Kompozit ve Nanofiber Üretimi.....	27
3.3. Tek Taraflı Bindirmeli Cıvatalı, Yapışkanlı ve Hibrit Bağlantılı Numunelerin Hazırlanması .....	30
3.4. Üretilen Numunelere Çekme Testinin Yapılması ve Karakterizasyon.....	32
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>33</b>
4.1. Üretilen Numunelerin Çekme Testi Sonuçları.....	33
4.2. Çekme Testi Sonrası Numune Yüzeyinde Oluşan Hasarların İncelenmesi.....	39
4.3. SEM Görüntüleri ile Hasar Analizi .....	42
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>49</b>
<b>6. KAYNAKLAR .....</b>	<b>50</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

F	: Yük
$\mu$	: Uzunluk ( $\mu\text{m}$ )
$^{\circ}\text{C}$	: Derece

### Kısaltmalar

PS	: Polistiren
ASTM	: American Society for Testing and Materials
HBB	: Hibrit cıvatalı/yapışkanlı
TTBB	: Tek taraflı bindirmeli bağlantı
SNF	: Selüloz nanofiber
PSF	: Polisülfon
ANF	: Aramid nanofiber
MWCNT	: Çok katmanlı karbon nanotüpler
Ag	: Gümüş
GNP	: Grafen nanoplatelet
GONP	: Grafen oksit nanoplatelet
CSR	: Çekirdek-kabuk kauçuk
BNNT	: Boron nitrit nanotüp
CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer
CNF	: Karbon nanofiber
PVA	: Polivinil alkol
DCB	: Çift kirişli kantilever
PAN	: Poliakrilonitril
SAN	: Stiren-akrilonitril
N6.6	: Naylon 6.6
KK	: Karbon kompozit
VİM	: Vakum infüzyon metodu
FRP	: Fiber takviyeli polimer
PVB	: Polivinil bütral
LFT	: Hafif-fiber yırtılma
PVP	: Polivinil pirolidon

## 1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun hızla artması, günümüzde karşılaştığımız en büyük küresel sorunlardan biridir ve bu durum doğal kaynakların kullanımı ve atık miktarı açısından büyük bir etkiye sahiptir. İnsanlar dünya üzerindeki kaynaklara olan taleplerini artırdıkça, üretim ve tüketim süreçleri de hızlanmaktadır. Bunun sonucunda ise atık miktarı her geçen gün katlanarak artmaktadır. Atıkların kontrolsüz bir şekilde birikmesi, çevre kirliliği, iklim değişikliği, su kaynaklarının tükenmesi gibi bir dizi sorunu beraberinde getirmektedir.

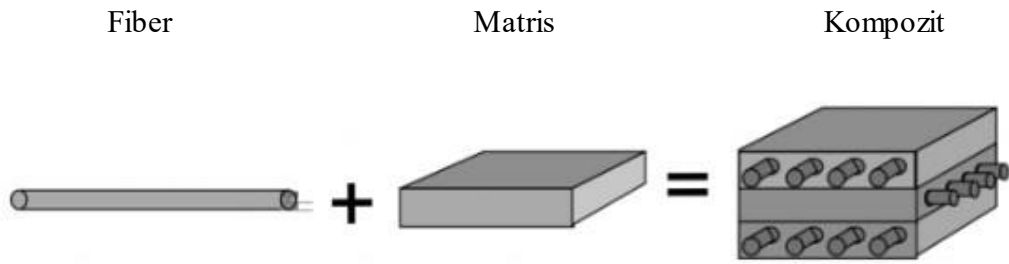
Bu kapsamda, polistiren atıkların geri dönüştürülmesi doğayı koruma ve yeşil bir çevre açısından büyük önem taşımaktadır. Polistiren, yaygın olarak kullanılan bir plastik türüdür ve doğada yıllarca çözünmeden kalabilen bir malzemedir. Ancak geri dönüşüm süreci sayesinde, polistiren atıkların yeniden kullanılması sağlanarak olumsuz çevresel etkileri minimize edilebilir. Geri dönüştürülen polistiren, yeni ürünlerin üretiminde kullanılarak doğal kaynakların tüketimini azaltabilir. Bu sayede, bir nebze olsun çevreye verilen zararın azaltılması ve yeşil bir çevrenin korunması sağlanabilir. Polistiren atıklarının geri dönüştürülmesi, sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda adımlar atılmasını sağlayarak gelecek nesillere daha yaşanabilir bir dünya bırakma amacına hizmet etmektedir.

Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş polistirenin, havacılıkta kullanımı giderek artan birleştirme yöntemlerinden olan yapışkanlı ve hibrit cıvatalı/yapışkanlı bağlantılarda kullanılmasının etkileri görülecektir. Bu bağlamda, polistiren atıkların yeni potansiyel kullanım alanı ile dünyamızı bu atıklarından bir miktar kurtarabilmek ve yapışkanlı bağlantılarda kullanımı ile ilgili literatüre bilimsel bir katkı sağlamak hedeflenmektedir.

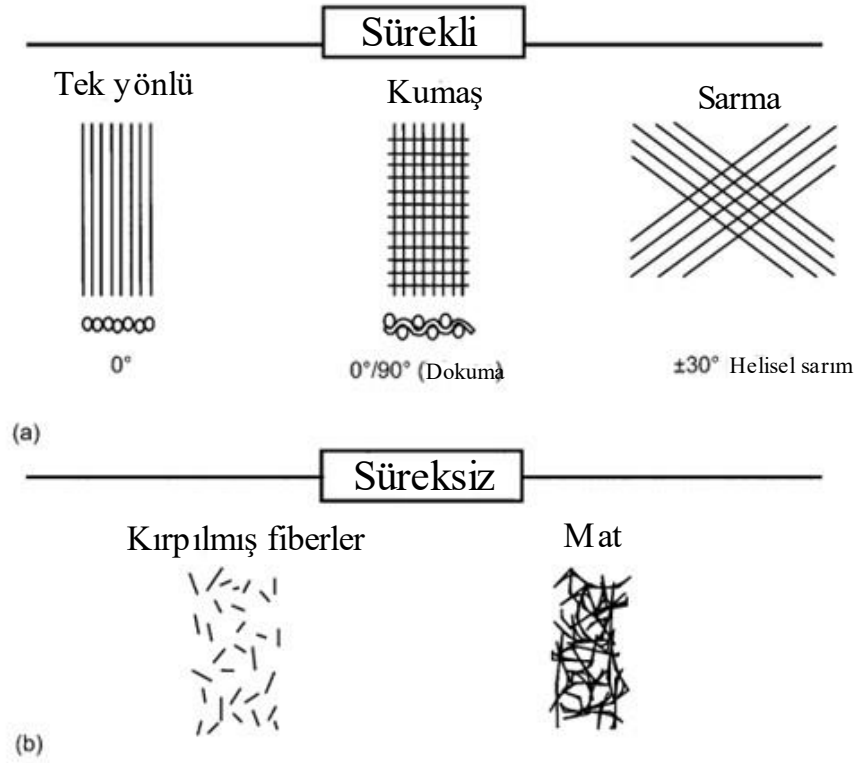
Bu tez, yapılan çalışmanın amacını ve tez çalışması sınırları içerisinde yararlanılan öz teorik bilgilerin, kullanılan malzeme ve yöntemlerin anlatılmasını içeren giriş bölümü ile başlamaktadır. İkinci bölüm, tez çalışmasının konusu kapsamında bugüne kadar yapılan çalışmaların özetini, karşılaşılan sorunları, yapılan iyileştirmeleri ve bu tezde yapılan çalışmanın gerekliliğini ortaya koyan kaynak araştırması bölümü ile devam etmektedir. Üçüncü bölümde, yapılan deneysel çalışma, kullanılan malzemeler ve üretim detayları, numune hazırlığı ve deneylerin nasıl yapıldığı ve deneylerde hangi araçların kullanıldığı, alt başlıkları ile anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, yapılan deneyin sonuçları ve bunlar ile ilgili tartışmalar sunulmaktadır. Beşinci bölüm, tez çalışmasından çıkarılan sonuçları ve bu sonuçlar doğrultusundaki önerileri içermektedir.

## 1.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme, tek başına kullanılan bileşen malzemelerin özelliklerinden daha iyi özelliklere sahip olan, iki veya daha fazla malzemenin birleşimi olarak tanımlanabilir. Metal alaşımlarının aksine, her malzeme ayrı ayrı kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini korur. Kompozit malzemeyi oluşturan iki bileşen, takviye ve matris olarak adlandırılır. Şekil 1'de kompoziti oluşturan bileşenler şematik olarak gösterilmiştir. Takviye fazı, mukavemet ve rijitlik sağlar. Genellikle, takviye matristen daha sert, daha güçlü ve daha rijit bir yapıya sahiptir. Takviye genellikle bir lif veya parçacık şeklinde olur. Sürekli takviye örnekleri arasında tek yönlü, dokuma kumaş ve helisel sarım (Şekil 2.a) yer alırken, süreksiz takviye örnekleri arasında kırılmış fiberler ve gelişigüzel üretilmiş mat (Şekil 2.b) bulunabilir. Bir kompozit oluşturmak için eklenebilecek takviye malzemesi miktarı yaklaşık hacimsel olarak kompozitin %70'i ile sınırlıdır. Matris, polimer, metal veya seramikten üretilir. Matris fazı, fiberleri uygun yönlendirme ve aralıkta tutma, aşınmaya ve çevresel etkilere karşı koruma gibi birkaç önemli işlevi yerine getirir. Polimer matrisli kompozit malzemeler çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Matrisler termoset veya termoplastik reçineler olabilir. Epoksi reçineler, yüksek performanslı kompozit malzemeler ve yapıştırıcılar için en yaygın matris malzemeleridir. Dayanıklılık, yapışma ve işleme esnekliği gibi mükemmel özelliklere sahiptirler [1].



Şekil 1. Tipik bir kompoziti oluşturan bileşenler



Şekil 2. Tipik takviye çeşitleri [1]

Kompozit malzemelerin havacılıkta kullanımı çeşitli avantajlarından dolayı bir hayli artmıştır. Bu avantajlar şöyle sıralanabilir;

- Hafiflikleri nedeniyle verilen bir ağırlık için daha yüksek performans sağlar. Kompozit malzemelerin kullanımı ile mükemmel mukavemet-ağırlık ve rijitlik-ağırlık oranları elde edilebilir. Bunlar, özgül mukavemet ve özgül rijitlik özellikleri olarak adlandırılır.
- Bir parçada laminasyon desenleri ve katman yapılanması, gereken mekanik özellikleri sağlamak için uyarlanabilir.
- Drag kuvvetini azaltmak için pürüzsüz aerodinamik profiller elde etmek daha kolaydır. Pürüzsüz bir yüzey bitimine sahip karmaşık çift eğrilikli parçalar, tek bir üretim işleminde yapılabilir.
- Kompozit malzemelerin kullanımı ile parça sayısı azaltılabilir.
- Üretim maliyeti görece düşüktür. Kompozitler malzemelerin üretiminde birçok farklı yöntem kullanılabilir.

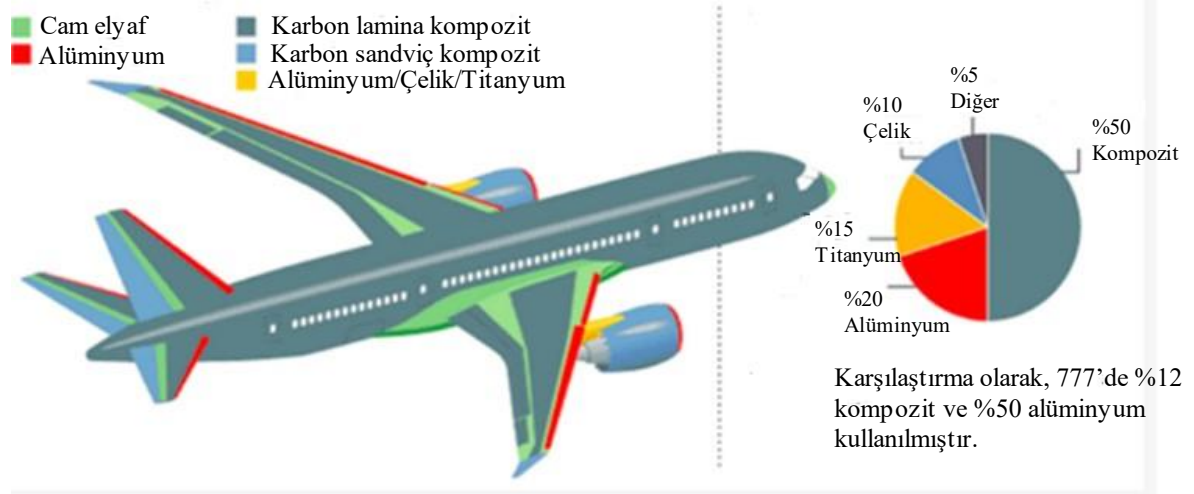
- Kompozit malzemeler korozyona, kimyasal saldırılara ve dış hava koşullarına karşı mükemmel direnç sağlar.

Dezavantajlarına bakacak olursak;

- Kompozit malzemeler, işlenmiş metallere göre daha kırılmandır ve dolayısıyla daha kolay hasar görebilir.
- Eğer perçinler kullanılmış ve çıkarılması gerekiyorsa, bunun zarar vermeden nasıl yapılacağı sorunlar doğurabilir.

1980'lerin ortalarından önce, uçak üreticileri kompozit malzemeleri ikincil yapılar (örneğin, kanat kenarları) ve kontrol yüzeylerinde kullanmışlardır. 1988 yılında, Airbus A320'yi tanıtmış ve üretimdeki ilk tamamen kompozit kuyruk kısmına sahip uçağı üretmiştir. 1995 yılında ise Boeing, Boeing 777'yi kompozit bir kuyruk kısmına sahip uçak olarak tanıtmıştır. Ticari uçaklarda kullanılan kompozit malzemeler genellikle karbon veya cam liflerinin epoksi ile birleştirilmesiyle üretilmektedir. Son yıllarda, üreticiler kompozit malzemelerin kullanımını gövde ve kanatlara genişletmişlerdir, çünkü bu malzemeler genellikle geleneksel olarak uçaklarda kullanılan metalik malzemelere göre yukarıda belirtilen avantajlara sahiptir. Boeing 787, ticari hizmette olan ilk büyük ölçekli çoğunlukla kompozit malzemelerden oluşan bir uçaktır. Boeing 787'nin ağırlıkça (motorlar hariç) yaklaşık %50'si kompozittir. Şekil 3'te Boeing 787'de kullanılan malzemelerin dağılımı verilmiştir.

787'de kullanılan malzemeler



Şekil 3. Boeing 787 uçağında kullanılan malzemeler [2]

### 1.1.1. Vakum İnfüzyon Metodu

Polimer kompozit yapıların üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır. Vakum infüzyon metodu (VİM), polimer kompozit yapıların üretiminde kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, özel bir fırın gibi özel ekipmanlara ihtiyaç duymadan neredeyse her boyuttaki polimer kompozit yapıların üretimine uygulanabilir. VİM tekniği, önceden yapılan altyapı ve taşıma yapıları gibi büyük kompozit parçaların üretimi için geliştirilmiştir. Bu süreç, maliyeti düşük ve seri üretime uygun olup, temel prensip vakum ve çevre basıncı arasında oluşan basınç farkını kullanarak istenen özelliklere sahip parçalar elde etmektir. Katmanlı kompozitler plastik bir malzemeyle sarılır ve sarılan kompozitlerin arasındaki boşlukları doldurmak için reçine içeri çekilir. Kompozit yapılar çok büyük olmadıklarında, VİM tekniği kullanılarak tek parça halinde üretilirler. VİM tekniğinin avantajları şöyle özetlenebilir;

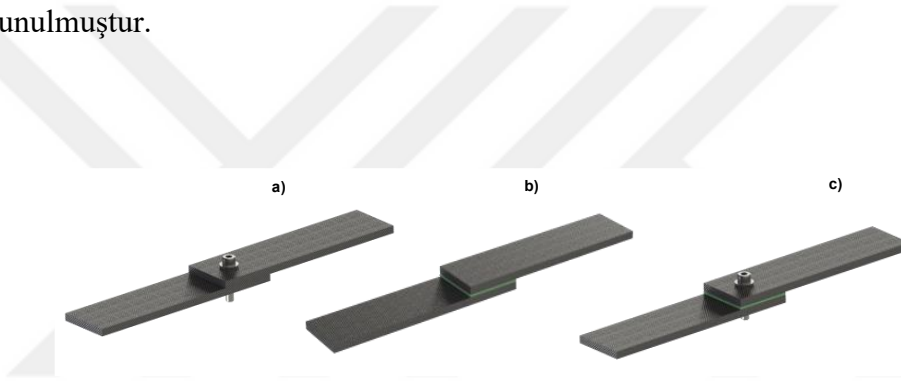
- Tasarım ve malzeme seçimi için esnek bir yapıya sahiptir.
- Geliştirilmiş kaliteye sahip karmaşık ve büyük kompozit parçaların üretilmesine olanak sağlar.
- Kalıp, farklı geometrileri işlemek için kolaylıkla değiştirilebilir.
- Reçine emdirme süreci sırasında oluşan görünür kuru noktalar, bir vakum iğnesi ile havayı dışarı çekerek giderilebilir.
- Reçine ve katalizör ayrı ayrı depolanabilir ve reçine emdirme işleminden hemen önce karıştırılabilir.
- İyi yatak ve yapısal dayanıklılık sağlar.

VİM tekniğinin avantajlarına rağmen, tekniğin, fiber hizalaması ve oluşan boşluklar gibi farklı tipte kusurları olabilmektedir. Seri üretimde, boşluk oluşumu birincil kusurdur. Reçine akış basıncı değişimi veya sıcaklık değişiklikleri gibi birçok faktör bu süreçte boşluk oluşumunu başlatmaktadır.

### 1.2. Kompozit Malzemelerde Bağlantılar

Polimer matrisli kompozitler için iki temel birleştirme yöntemi kullanılmaktadır: mekanik bağlantılar ve yapışkanlı bağlantılar. Bağlantı elemanları delik açarak fiberleri keser ve yük yolunu bozar, bu nedenle yapışkanlı bağlantılar ile daha verimli yük transferi

sağlanabilir. İyi tasarlanmış bir yapışkanlı bağlantı aslında baz laminadan daha güçlü olabilir. Diğer yandan, iyi tasarlanmış bir mekanik bağlantının baz laminadan daha güçlü olma şansı yoktur. Bu avantaja rağmen, yapışkanlı bağlantılar her zaman pratik olmayabilir. Yapışkanlı bağlantılar, cıvatalı bağlantılarda yatak gerilmelerinin kabul edilemez derecede yüksek olacağı ince kompozit kesimlerin birleştirilmesi durumunda veya cıvata ağırlığının önemli bir faktör olduğu uygulamalarda tercih edilir. Cıvatalı bağlantılar ise genellikle kalın kompozit kesimlerinde daha sık kullanılmaktadır. Üçüncü birleştirme yöntemi olarak HBB bağlantıların hem cıvatalı hem yapışkanlı bağlantıların avantajlarını bir arada bulundurabileceğinin düşünülmesi sebebiyle kompozit malzemelerin bağlantılarında güncel olarak bir araştırma konusu olduğu görülmektedir. Tek taraflı bindirmeli cıvatalı, yapışkanlı ve HBB bağlantıların şematik gösterimi Şekil 4' te sunulmuştur.



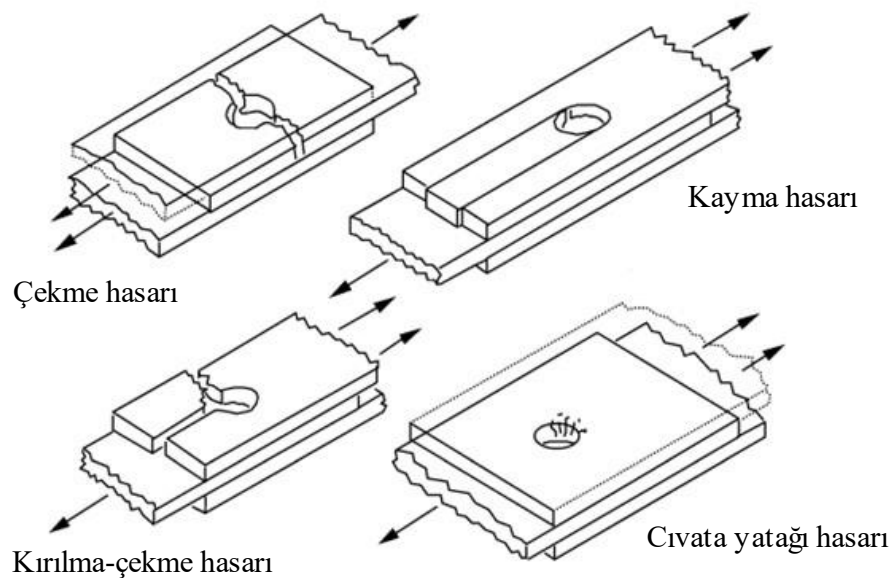
**Şekil 4.** Tek taraflı bindirmeli bağlantı çeşitlerinin gösterimi a) cıvatalı bağlantı b) yapışkanlı bağlantı c) HBB bağlantı

### 1.2.1. Cıvatalı Bağlantılar

Yapışkanlı bağlantılar ile karşılaştırıldığında, mekanik bağlantıların avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Mekanik bağlantının avantajları şu şekilde özetlenebilir: Mekanik bağlantı, yapıştırmaya kıyasla daha doğrudan ve riskli olmayan bir birleştirme işlemidir. Yapıştırma işlemi, detaylı yüzey hazırlıklarını gerektirir ve bağlantının kalitesi polimerizasyon özellikli malzemelerin iyileşmesine bağlıdır. Buna karşılık mekanik bağlantı, yüzey hazırlığı gerektirmez ve çevresel etkilere daha az duyarlıdır. Yapıştırmaya kıyasla mekanik bağlantı, daha iyi bir kalınlık yönünden takviye sağlar ve soyma gerilmelerine veya kalıntı gerilme etkilerine karşı daha duyarlı değildir. Birçok mekanik bağlantı, sökme işlemine olanak sağlar. Seçilen özel bağlayıcıya bağlı olarak, bazıları kalıcı montaj için tasarlanmışken diğerleri kolayca çıkarılabilir. Dolayısıyla bakım-onarım gerektiren uygulamalarda kullanımı daha avantajlıdır.

Mekanik bağlantının dezavantajları ise şunlardır: Mekanik bağlantılarda çok daha düşük birleşik verimlilik elde edilir. Kompozit malzemeler çentik hassasiyetine sahiptir ve en iyi mekanik bağlantılar bile taban laminanın verimliliğinin yalnızca yaklaşık %40 ila %50'sini elde edebilir. Kompozit malzemelerin metallerle karşılaştırıldığında düşük yataklama dayanıklılığı vardır ve kullanım süresince delik elastikiyetine neden olabilir, bu da bağlantı dayanıklılığını düşürür. Yanlış cıvata deliği hazırlama prosedürleri ve düşük kaliteli rondela uygulamaları montaj sırasında delaminasyonlara neden olabilir. Rondela kullanılmamış boşluklar büyük bir sorun olup kompozit yüzeyi ve alt yapıda delaminasyona yol açabilir.

Kompozit malzemelerin cıvatalı bağlantılarında gerçekleşebilecek hasar modları Şekil 5'te gösterilmektedir. Yatak hasarı, delaminasyonlar ve delik etrafında matris hasarı gibi yerel hasarlarla karakterizedir. Cıvatanın neden olduğu yerel basınç yüklemesi, elyaf kıvrılması ve bükülmesine yol açar ardından matrisin ezilmesine neden olur. Kayma hasarı, genellikle yetersiz kenar mesafesi veya yük yönünde fazla sayıda katmanın olması nedeniyle meydana gelir. Çekme hasarı ise yetersiz genişlik veya yük yönünde yetersiz sayıda katmanın olması nedeniyle meydana gelir. Kırılma-çekme hasarı, yetersiz kenar mesafesi ve genişlik veya yetersiz sayıda çapraz katmanın (örneğin  $\pm 45^\circ$  ve  $90^\circ$ ) olması nedeniyle meydana gelebilir. Katman oryantasyonu, kenar uzaklığının delik çapına oranı ve bağlantının kalınlığının delik çapına oranının hasar modlarının gelişmesinde önemli bir etken olduğu birçok çalışmada görülmüştür.



Şekil 5. Cıvatalı bağlantı hasar modları [1]

### 1.2.2. Yapışkanlı Bağlantılar

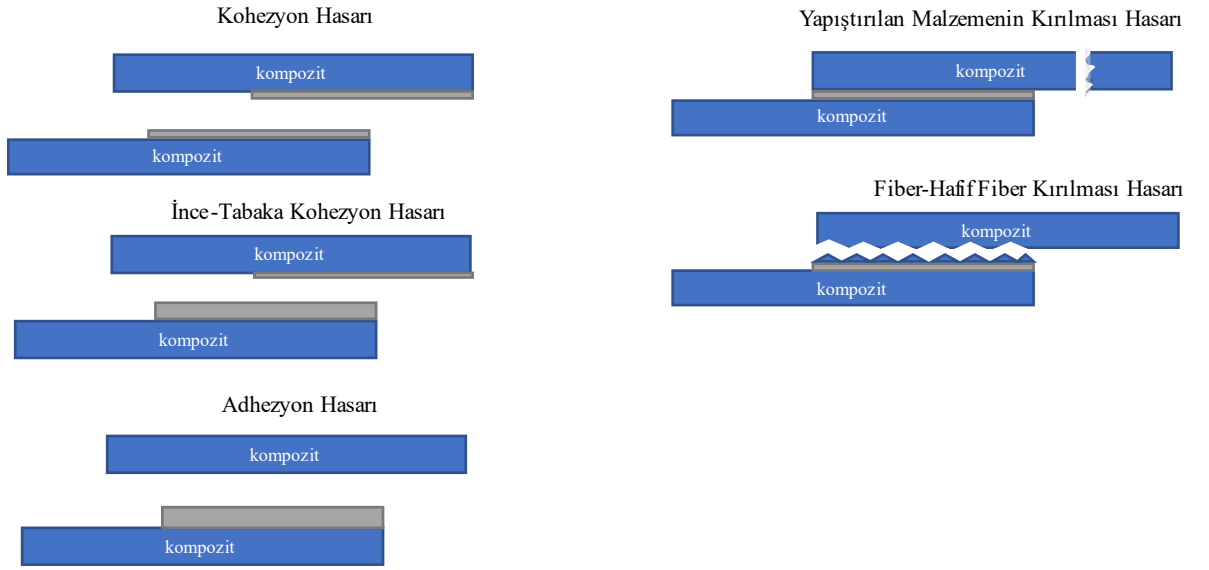
Yapışkanlı bağlantılar, mekanik bağlantılara göre çok daha etkili bir yük transferi sağlamaktadır. Bununla birlikte, yapıştırma için teknik ve kalite kontrol gereksinimleri çok daha fazladır. Yapışkanlı bağlantıların avantajları şöyle sıralanabilir: Yapışkanlı bağlantılar, mekanik bağlantı elemanları tarafından oluşturulan stres konsantrasyonunu ortadan kaldırarak, daha homojen bir gerilim dağılımı sağlar. Mekanik bağlantılara göre daha iyi yorulma ömrü sağlar. Ayrıca yapışkanlı bağlantılar üstün titreşim ve sönümleme yeteneğine sahiptir. Mekanik bağlantı elemanlarının kullanılmaması nedeniyle yapışkanlı bağlantılar genellikle daha hafif ve bazı uygulamalarda daha ekonomiktir. Yapışkanlı bağlantılar, mekanik bağlantılar ile karşılaştırıldığında bir sertleştirme etkisi sağlar. Mekanik bağlantılarda yerel nokta sertleştirme sağlanırken, yapışkanlı bağlantılarda tüm yapıştırılmış alan üzerinde sertleştirme sağlanır. Bu da yapışkanlı bağlantılarda, yapıdaki burkulma dayanımının %30 ila %100 arası artmasını sağlamaktadır [1].

Yapıştırma ile birleştirme yönteminin dezavantajları ise şunlardır: Yapışkanlı bağlantılar kalıcı olarak düşünülmemelidir. Ayrıştırma kolay değildir ve genellikle yapışan malzemelere ve çevre yapıya zarar verir. Yapışkanlı bağlantılar çok daha fazla yüzey hazırlığına ihtiyaç duyar. Güçlü ve dayanıklı bir bağlantı için doğru yüzey hazırlığı kesinlikle gereklidir. Yapışkan malzemeler hassastır. Üretici tarafından önerilen prosedürlere göre depolanmaları gerekir (bu genellikle soğutma içerir). Karıştırıldıktan veya dondurucudan çıkarıldıktan sonra belirli bir süre içinde birleştirilmeli ve iyileştirilmelidir. Yapıştırıcılar çevresel bozulmalara duyarlıdır. Çoğu nem emer ve yüksek sıcaklıkta azalan dayanıklılık ve mukavemet sergilerler. Bazıları ise boya çıkarıcılar ve diğer çözücüler gibi kimyasallar tarafından hasara uğrayabilir.

Kompozit malzemelerin yapışkanlı bağlantılarında gerçekleşebilecek hasar modları, Şekil 6'da gösterilmektedir. Fiber takviyeli polimer (FRP) bağlantılarının hasar türlerinin sınıflandırılması, ASTM D5573 standartlarında tanımlanmıştır. Bu konuda, ASTM D5573 standardı dikkate alınarak genel tanımlamalar yapılmıştır.

Kohezyon hasarı, yapışkanın kütleli malzemesi içindeki hasarı temsil eder (Şekil 6) ve en kabul edilebilir hasar modudur. Soyulma gerilmesi veya düzlem dışı gerilme arttığında meydana gelir. Kohezyon hasarı bağlantı eksantrisitesine ve yapıştırılan yüzeylerde büyük deformasyonlara neden olur. Ayrıca, bağlantı oluşturulurken yapılan eksantrisite hataları kohezyon hasarına neden olabilmektedir. Adhezyon hasarı, Şekil 6'da gösterildiği gibi yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme

arasındaki arayüz boyunca meydana gelir. Bu hasarın genel nedeni yüzey hazırlığının iyi yapılmamasıdır. Kompozit tabakasında meydana gelen hasarlar, yapıştırılan malzemenin kırılması ve fiber/hafif-fiber kırılması şeklinde adlandırılabilir. Bu hasarlar, kompozit malzemenin bir parçasının kopması veya malzemenin tamamen kırılması şeklinde meydana gelebilir. Bu hasarların genel nedeni, yapıştırma bölgelerinde meydana gelen yüksek kayma gerilmeleridir çünkü yapışkanların kayma mukavemeti lamine malzemelere göre daha yüksektir.



Şekil 6. Yapışkanlı bağlantı hasar modları

### 1.2.3. Hibrit Bağlantılar

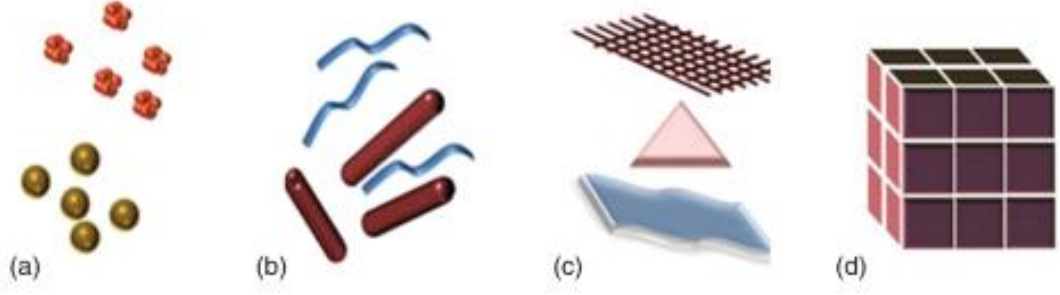
Hibrit cıvatalı/yapışkanlı (HBB) bağlantı teknolojisi, bağlantılarda hem cıvata kullanımını hem de yapıştırmayı bir araya getirir. HBB bağlantıların, cıvatalı bağlantılara kıyasla en temel avantajı HBB bağlantısının bindirme bölgesi boyunca sürekli yük transferi dağılımını sağlaması ve cıvatalar aracılığıyla aktarılan yükün azalmasını engellemesidir. Ayrıca, güvenlik açısından, HBB bağlantılarda cıvataların varlığı, yapışkan tabakanın başarısız olması durumunda bile yapının işlevselliğini sağlar. Birçok cıvata ve perçinli bağlantıların kullanıldığı imalat sektörlerinde, HBB teknolojisinin kullanımı, ağırlığın ve imalat maliyetinin azaltılması için potansiyel bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. HBB bağlantılarda hem cıvatalı hem yapışkanlı bağlantılar da görülen hasar modları ayrı ayrı görülebilir.

### 1.3. Nanoteknoloji

Nanoteknoloji, Yunanca' da "cüce" anlamına gelen bir kelime kökeninden gelmektedir. Bir nanometre, metrenin bir milyarda birine denk gelen son derece küçük bir birimdir. Sadece birkaç hidrojen atomunun uzunluğu kadar küçüktür veya bir saç telinin genişliğinin yüz binde biri kadardır. Nanoteknoloji, temel olarak atomik, moleküler veya makromoleküler düzeyde araştırma ve teknoloji geliştirmeyi içerir. Bu alan, nanometre ölçeğindeki malzemeleri ve bu düzeyde gelişen olayları temel olarak anlamayı ve yeni özelliklere ve fonksiyonlara sahip küçük ve/veya orta boyuttaki yapılar, cihazlar ve sistemler oluşturmayı hedeflemektedir. Nano boyutlarda hassas bir şekilde tasarlanan yeni malzemelerin çok yönlü uygulanmasıyla nano-yapılı malzemelerin olağandışı özelliklerine yönelik akademik ilgi artmıştır. Yeni özellikler ve fonksiyonlar oluşturma fırsatları nedeniyle nanoteknoloji, uzun süredir var olan tıbbi, sosyal ve çevresel sorunlara çözümler sunmaktadır. Nanoteknoloji potansiyeli nedeniyle küresel ilgi çekmektedir. Nanoteknoloji araştırma ve geliştirme çalışmaları, bu yeni özellikleri kullanan, gelişmiş malzemeler, cihazlar ve sistemlerin anlaşılmasına ve oluşturulmasına yöneliktir. Nanoteknoloji, nispeten yeni bir araştırma alanı olmasına rağmen, gelecek on yıllarda hayatımızı tahmin edilemeyen şekillerde değiştirecek olan nanoteknolojilerin ortaya çıktığı bir alandır ve olası uygulama alanları sürekli olarak artmaktadır [3].

#### 1.3.1. Cıvatalı, Yapışkanlı ve Hibrit Bağlantılarda Nanoteknoloji

Nano malzemeler, sıfır boyutlu, bir boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu nano yapılar olarak sınıflandırılabilir. Sıfır boyutlu nano yapılar, küreler ve kümeleşmeleri içerirken, bir boyutlu nano yapılar, lifler, teller ve çubuklar şeklindedir. İki boyutlu nano yapılar ise filmler, plakalar ve matlar olarak ifade edilebilir. Nano malzemelerin sınıflandırılması Şekil 7'de gösterilmiştir. Nano malzemeler cıvatalı, yapışkanlı ve HBB bağlantıları daha dayanıklı hale getirmek için çeşitli yöntemlerle kullanılmaktadır.



**Şekil 7.** Nano malzemelerin sınıflandırılması: a) sıfır boyutlular b) bir boyutlular c) iki boyutlular d) üç boyutlular [4]

Cıvatalı bağlantılarda kullanımına, bağlantı kompozit malzemelerinin nano malzeme takviyesi ile iyileştirilmesi ve daha mukavemetli kompozit malzemeler üretilmesi örneği verilebilir. Üretim aşamasında kompozit malzemenin tabaka içi mukavemetini artırmak amacıyla ara katmanlara nanofiber tabakaları, nano parçacık veya nanotüp takviyesi yapılmaktadır. Hem cıvatalı bağlantıları daha iyi hale getirmek hem de yapışkanlı bağlantıların dezavantajlarını en aza indirmek için kompozit malzemelerin üretiminde çeşitli nano malzemeler kullanılmaktadır. Selüloz nanofiber, aramid nanofiber, karbon nanotüp kullanılan nano malzemelere örnek olarak verilebilir.

Yapışkanlı ve HBB bağlantılarda nano malzemeler, yapışkan madde ile nano parçacık, nanotüplerin belirli oranlarda karışımı şeklinde kullanılabilir. Nanopartiküller, yapışkanın içine katılarak bağlantıların mukavemetini artırabilirler. Örneğin, karbon nanotüpler veya grafen gibi malzemeler kullanılmaktadır. Ayrıca, nanofiber mat, nanofiber film tabakasının yapışkan üzerine serilmesi şeklinde de yapışkanlı ve HBB bağlantılarda nano takviyeler uygulanmaktadır. Kullanılan nano malzemenin türü, üretim yöntemi ve parametreleri nano takviyenin başarısını etkilemektedir. Ayrıca yapıştırılan malzemelerin yüzey hazırlıkları ve yapışkan maddenin hazırlanması da nano malzemenin başarılı olması açısından önemlidir.

### 1.3.2. Elektro-Eğirme Yöntemi ve Nanofiber Üretimi

Elektro-eğirme yöntemi, submikron ölçekteki elyafların üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Polimer çözeltilerden nanoelyaf üretmek için en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde, bir sıvı çözelti veya polimer elektrik alan tarafından indüklenmiş bir nozuldan geçirilerek ince bir jet oluşturulur. Jetin hızlandırılması ve inceltmesi, elektrostatik kuvvetlerin etkisiyle elyafların çekilerek uzamasına ve bir toplayıcı yüzey

üzerinde düzenli bir şekilde birikmesine yol açar. Elektro-eğirme yöntemi sayesinde, nanometre ölçeğindeki elyaf yapısı ve yüksek yüzey alanı sağlanarak çeşitli nano malzemeler elde edilebilir [5].

Elektro-eğirmede elyafların oluşumunu etkileyen iki temel dengesizlik vardır: birincisi, Plateau-Rayleigh dengesizliği, ikincisi ise eksen dışı dalgalanma dengesizliğidir. Rayleigh dengesizliği, çözeltinin yüzey geriliminin, tek tek damlacıklar oluşturarak yüzey alanını en aza indirmeye yönelmesinden kaynaklanır. Eksen dışı dalgalanma dengesizliği ise mevcut elektrostatik alanın bir sonucu olarak ortaya çıkar. Bu, jetin dönme hareketine sebep olur ve elyafın bükülmesine ve uzatılmasına neden olur bu sayede ultra-ince elyafların gelişmesi sağlanır [6].

Elektro-eğirme ile elyaf oluşum süreci üç ayrı aşamaya ayrılabilir: Taylor konisi ve jet başlangıcı, dalgalanma veya bükülme dengesizliği ve elyaf birikimi. Nozul ucundaki elektrostatik yük, sıvı jetinin çıkış noktasında bir Taylor konisi oluşturulması için önemlidir. Elektrik alanın jeti hızlandırması ve inceltmesi, radyal yük itme kuvvetiyle birleşerek, ana jetin birden fazla ipliklere ayrılmasına neden olur. Normal koşullar altında, elektro-eğirme yönteminde jetin dalgalanması oldukça hızlıdır ve bu, nanofiberlerin gelişimi ve metal bir topraklanmış toplama plakasına tabaka tabaka birikimi için gereklidir [7].

Elektro-eğirme sürecini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler, elektro eğirme parametreleri, çözelti ve çevresel parametreler olarak sınıflandırılır. Tüm bu parametreler, pürüzsüz ve boncuklanmayan elektro eğirme elyafının oluşumunu doğrudan etkiler. Elektro-eğirme yönteminde elyaf üretimine etki eden faktörler Çizelge 1'de verilmiştir.

**Çizelge 1.** Elektro-eğirme yönteminde etkili olan faktörler

Çözelti Parametreleri	Elektro-eğirme Parametreleri	Çevresel Parametreler
Moleküler ağırlık-Viskozite	Voltaaj	Sıcaklık
Yüzey gerilim kuvveti	Çözelti akış hızı	Basınç
İletkenlik	Şırınga ucu çapı	Nem
Dielektrik sabiti	Şırınga ucu-toplayıcı mesafesi	

Yüksek voltajlı bir güç kaynağından metal bir iğne aracılığıyla çözeltiye akım sağlandığında, küresel bir damlacık Taylor konisi şekline dönüşerek kritik bir voltajda ultra ince nanofiberler oluşturur. Uygulanan voltajın artmasıyla daha küçük çaplı nanofiberler oluşurken, voltajın kritik değeri aşıldığında boncuk veya boncuklu

nanofiberlerin oluştuğu gözlemlenir. Bu süreçte uygulanan voltajın artması nanofiber çapının ve boncuk oluşumunun artmasına neden olur. Bu durum, polimer çözeltisinin gerilmesi ve jet hızının değişmesiyle ilişkilendirilir. Bu bulgular, elektro eğirme yönteminin voltaj parametresinin nanofiber oluşumu üzerindeki etkisini açıklamaktadır [8,9].

Polimerik çözeltinin metal iğne ucuyla olan akışı, elektro eğirme nanofiberlerinin şeklini belirler. Boncuksuz ve düzgün nanofiberler elde etmek için kritik bir akış hızı gereklidir. Bu kritik değer, kullanılan polimer sistemine göre değişir. Kritik akış hızının üzerine çıkıldığında boncuk oluşumu gözlenir. Örneğin, polistiren örneğinde, akış hızı 0.10 mL/dk'ye çıkarıldığında boncuklar oluşurken, akış hızı 0.07 mL/dk'ye düşürüldüğünde boncuksuz nanofiberler elde edilir. Kritik değer üzerindeki artan akış hızı, gözenek boyutu ve fiber çapında artışa ve boncuk oluşumuna neden olur. Bu boncuk oluşumu, nanofiber jetinin iğne ucu ile metalik toplayıcı arasında tam olarak kurumamasından kaynaklanır [10].

Birçok araştırma grubu, iğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafenin etkisini incelemiş ve bu mesafe küçük tutulduğunda kusurlu ve büyük çaplı nanofiberlerin oluştuğunu, mesafe arttıkça nanofiber çapının azaldığını bulmuştur [11–13]. Bununla birlikte, metalik iğne ucu ile toplayıcı arasındaki mesafede yapılan değişikliklerin nanofiberin morfolojisine etkisi olmayan durumlar da mevcuttur [14].

Elektro eğirme süreci, yüklü bir jetin tek bir yönde gerilmesi olayına dayanır. Polimerik çözeltinin konsantrasyonu, yüklü jetin gerilmesini önemli ölçüde etkiler. Düşük konsantrasyonda, uygulanan elektrik alan ve yüzey gerilimi, polimer zincirlerinin toplayıcıya ulaşmadan parçalanmasına neden olur ve bunun sonucunda boncuklu nanofiberler oluşur [15,16]. Konsantrasyon arttıkça, viskozite artar ve polimer zincirleri arasındaki dolanma artar. Bu dolanmalar yüzey gerilimini aşar ve homojen boncuksuz nanofiberlerin oluşmasını sağlar.

Çözelti iletkenliği, nanofiberlerin çapını kontrol etmede önemli bir rol oynar. Daha düşük iletkenliğe sahip bir çözeltide, damlacığın yüzeyi Taylor konisi oluşturacak yeterli yük taşıyamaz ve sonuç olarak elektro eğirme gerçekleşmez. Çözeltinin iletkenliğini kritik bir değere artırmak, damlacığın yüzeyindeki yükü artırarak Taylor konisi oluşumunu sağlar ve aynı zamanda fiber çapının azalmasına neden olur [17].

Çözücü seçimi, pürüzsüz ve boncuk olmayan elektro-eğirilmiş nanofiberlerin oluşumu için önemli bir faktördür. Çözücü seçerken iki şey göz önünde bulundurulmalıdır. İlk olarak, elektro-eğirme süreci için tercih edilen çözücü sistemler,

polimerleri tamamen çözebilmelidir. İkinci olarak, çözücünün ılıman bir kaynama noktası olmalıdır. Çözücülerin iletkenlik ve dipol momenti de dikkate alınmalıdır. Jarusuwannapoom vd. tarafından yapılan bir çalışmada, polistiren polimer çözeltilisinin elektro-eğirme için uygun olan beş çözücünün seçildiği tespit edilmiştir: etil asetat, DMF, THF, metil etil keton ve 1,2-dikloroetan. Bu çözücülerin daha iyi iletkenlik ve dipol momenti değerleri olduğu görülmüştür [18].

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, elektro-eğirme ve çözelti parametrelerinin yanı sıra çevresel faktörlerin (nem ve sıcaklık gibi) nanofiberlerin çapı ve morfolojisini etkilediğini göstermektedir [19,20]. Nem, yüklü jetin katılma sürecini kontrol ederek nanofiber çapında değişikliklere neden olur. Pelipenko ve diğer araştırmacılar, PVA, PEO ve bu ikisinin karışımı olan çözeltilerle nemin nanofiber çapına etkisini incelemişlerdir. Nem arttıkça, PVA için nanofiber çapı, 667 nm'den 161 nm'ye ve PEO için, 252 nm'den 75 nm'ye kadar azalmıştır. Karışım çözeltileri için ise çap daha fazla azalmıştır. Ayrıca, nemin gözenekli nanofiberlerin oluşumunda da önemli bir rol oynadığı görülmüştür [20]. Sıcaklık ise, nanofiberlerin ortalama çapını değiştirmek için iki zıt etkiye sahiptir: (1) çözücünün buharlaşma hızını artırır ve (2) çözeltilinin viskozitesini azaltır. Çözücünün buharlaşmasındaki artış ve çözeltilinin viskozitesindeki azalma, ortalama fiber çapının azalmasına yol açan iki zıt mekanizma ile çalışır.

Çeşitli çalışmalarda görüldüğü üzere elektro-eğirme sürecinin optimize edilmesi, istenen nanofiber çapı ve morfolojisinin elde edilmesinde kritik bir etkidir. Bu yöntem, çeşitli uygulama alanlarında kullanılan yüksek performanslı nano materyallerin üretiminde büyük potansiyel sunmaktadır.

#### 1.4. Tezin Amacı

Mühendislik sistemlerinde gelişen teknoloji ile farklı türden veya aynı türden malzemelerin bir arada kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Uçakları bir araya getiren parçaları tek bir parça halinde imal etmek mümkün olmadığından mutlaka ara bağlantı elemanlarına ve birleştirmelere ihtiyaç vardır. Giderek kullanımı artan birleştirme yöntemlerinden olan yapışkanlı bağlantılar, cıvatalı bağlantılara göre yapıya cıvata gibi ekstra ağırlık kazandırmadıkları için havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca hibrit cıvatalı/yapışkanlı bağlantıların da sadece cıvatalı ve yapışkanlı bağlantılara göre daha avantajlı olduğu çeşitli çalışmalarda görülmüştür. Bağlantı yöntemlerinin dezavantajlarını en aza indirmek için araştırmacılar bağlantıları güçlendirici çeşitli takviye yöntemleri geliştirmişlerdir. Bu çalışmada bağlantılarda, geri dönüştürülmüş polistiren (PS) nanofiber, takviye malzemesi olarak kullanılacaktır. Bu kapsamda geri dönüştürülmüş PS'nin bağlantı dayanımına, bağlantının taşıyabileceği maksimum yüke ve bağlantı performansını etkileyen parametrelere etkisinin araştırılması hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasının, havacılıkta kullanımı giderek artan yapışkanlı ve hibrit cıvatalı/yapışkanlı bağlantılar için, geri dönüştürülmüş PS kullanımının, bağlantı performansına etkisini göreceğimiz referans bir çalışma olacağı ve bu kapsamda literatüre katkı sağlaması hedeflenmektedir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Son yıllarda havacılık endüstrisinde, karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler, geleneksel mühendislik malzemelerine göre üstün özgül mukavemet, daha uzun kullanım ömrü, daha iyi kimyasal dayanıklılık ve hafiflikleri nedeniyle ilgi görmüştür [21–23]. Kompozit yapılar, birbirine çeşitli bağlantı teknikleriyle bağlanması gereken birçok parçadan oluşur. Örneğin, uçak kanatları, çeşitli bağlantı teknikleriyle birbirine bağlanmış birçok daha küçük kompozitten oluşur. Kompozitlerin birleştirilmesinde üç yaygın yöntem olarak; cıvatalı, yapışkanlı ve hibrit cıvatalı/yapışkanlı (HBB) bağlantılar kullanılır.

### 2.1. Cıvatalı Yapışkanlı ve Hibrit Bağlantılar

Bağlantıların performansı, birleştirilen kompozitlerin genel yapısal performansını önemli ölçüde etkileyen kritik bir faktördür. Literatürde deneysel ve numerik olarak yaygın olan üç bağlantı yönteminin kıyaslandığı ve bağlantı performansını etkileyen faktörleri ve iyileşmeleri tespit eden bir dizin çalışma yapılmıştır. Kelly [24] deneysel ve numerik olarak kompozit malzemelerde tek taraflı bindirmeli bağlantı (TTBB) çalışmıştır. Numunelerin mukavemeti ve yorulma analizleri sonucunda, düşük elastisite modülüne sahip yapıştırıcı ve numune kalınlığı doğru seçildiği takdirde HBB bağlantıların yapışkanlı bağlantılara göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapıştırıcı seçimi HBB bağlantılarda, yükün cıvata ve yapışkana doğru dağılımı açısından önemlidir. Cıvatalı bağlantının en düşük yük taşıma sağladığı görülmüştür. Kweon vd. [25] kompozit-alüminyum çift taraflı bindirmeli bağlantılarda kırılma yükleri ve hasar modlarını belirlemek için deneysel çalışma yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre, eğer yapışkan madde doğru seçilir ve cıvatanın dayanımı yapışkanın dayanımından fazla olursa, HBB bağlantıların diğer bağlantılara göre daha etkili sonuçlar verdiği görülmüştür. Solmaz vd. [26] numerik olarak cıvatalı, yapışkanlı ve HBB çift taraflı bindirmeli bağlantılarda hasar analizi çalışmışlardır. Sonuçlarında, bindirme uzunluğu arttıkça, bütün bağlantı yöntemlerinde kritik hasar yükünün arttığını ve bütün bindirme uzunluklarında cıvatalı bağlantıların yapışkanlı bağlantılara göre daha güçlü olduğunu görmüşlerdir. Chowdhury vd. [27] deneysel olarak kalın karbon fiber panellerde çift taraflı bindirmeli bağlantı çalışmışlardır. Önceki sonuçlara benzer olarak, cıvatanın yük taşıma gücü yapışkandan daha fazla ise HBB bağlantılar statik dayanım ve yorulma

açısından yapışkanlı bağlantılara göre daha iyi sonuç vermiştir. Yapılan çalışmada, cıvata kullanmanın sadece dayanımı artırdığı değil aynı zamanda HBB bağlantılarda hızlı çatlak büyümesi ve ani kırılmalarında önüne geçtiğine dikkat çekmişlerdir.

Prakash vd. [28] uçak gövdelerinin birleşme yerlerinin yapısal analizini numerik olarak çalışmışlardır. Ek yeri malzemesi olarak karbon fiber ve 2024 alüminyum alaşım cıvata kullanılmıştır. Sonuçlarında, doğru cıvata bağlantı dizilimi ve doğru malzeme seçimi ile HBB bağlantıların yük dağılımı ve yapının deformasyonu açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Solmaz vd. [29] Çift taraflı bindirmeli bağlantılarda, yapışkanlı bağlantıyı cıvatalamanın etkisini görmek için deneysel çalışmalar yapmıştır. Sonucunda HBB bağlantıların daha dayanıklı olduğunu ve bindirme uzunluğu arttıkça dayanımın arttığını görmüşlerdir. Ayrıca bindirme uzunluğunun bağlantının tokluğunda önemli etkisi olduğu görülmüştür. Zaroug vd. [30] deneysel ve numerik olarak tek taraflı bindirmeli cıvatalı, yapışkanlı ve HBB bağlantılarda çekme testi çalışmışlardır. Yapışkan olarak AF163-2K kullanılmış olup, malzeme olarak iki farklı alüminyum kullanılmıştır. Çalışmada, kullanılan malzeme ve malzeme kalınlığı değiştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda; cıvatalı bağlantıda değişen malzemeye göre önce malzeme veya bağlantı hasara uğramıştır, yapışkanlı bağlantıda bütün kalınlıklar ve malzemeler için emilen enerji çok değişmemiş olup her zaman yapıştırıcı ilk hasara uğramış, HBB bağlantılar için ise bütün kalınlıklar ve malzemeler için yapıştırıcı ilk hasara uğramış ve yapışkanlı bağlantıyla hemen hemen aynı yükü taşımıştır. Bu durum kullanılan yapıştırıcının sert olmasından kaynaklanmıştır. Üstelik HBB bağlantılarda, emilen enerji her zaman cıvata ve yapışkanlı bağlantılarda emilen enerjinin toplamına eşit olmamış kullanılan malzemeye göre değişmiştir. Bu bağlamda HBB bağlantının her zaman en güçlü olmadığı gözlemlenmiştir. Patil vd. [31] deneysel ve numerik olarak alüminyum alaşım bağlantılarında çekme testi çalışmışlardır. Sonucunda, HBB bağlantının, sadece cıvatalı bağlantı ile kıyaslandığında deformasyonu %50 oranında azalttığı görülmüştür.

Chen vd. [32] deneysel olarak cıvatalı, yapışkanlı ve HBB tek taraflı bindirmeli kompozit-alüminyum bağlantıları çalışmıştır. Çalışmada bindirme uzunlukları değiştirilmiştir. Numunelerin mekanik davranışları ve hasar mekanizmaları incelenmiştir. Sonucunda; HBB bağlantıların daha fazla enerji emilimi ile yıkıcı bir hasardan koruduğu, cıvatalı bağlantıya göre HBB bağlantılarda, pik yükün %380, enerji emiliminin %434 arttığı görülmüştür. Yapışkanlı bağlantılarla kıyaslandığında ise pik yükün %19, enerji emiliminin %56 arttığı görülmüştür. Üstelik bindirme uzunluğunu da belli bir oranda arttırdıklarında, yapışkanlı bağlantıya kıyasla, HBB bağlantılarda pik yükün %31, enerji

emiliminin %73 arttığını gözlemlemişlerdir. Selahi [33] numerik olarak kompozit malzemelerin tek ve çift taraflı bindirmeli bağlantılarında hasar analizi çalışmıştır. Çalışmada numunelere aksenal, kayma ve bükme yükleri ve bu yüklerin kombinasyonu uygulanmıştır. Sonucunda, aksenal yüke maruz kalan TTBB'lerde, HBB bağlantıların yapışkanlı bağlantılara göre %56 daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Fakat aynı durumdaki çift taraflı bindirmeli bağlantıda, HBB bağlantının yük taşıma kapasitesinde ciddi bir değişme görülmemiştir.

Bodjona vd. [34] TTBB'lerde deneysel olarak yaptıkları çalışmada, yapışkan tabaka uyumunu gözlemek için, yüksek uyumlu ve düşük uyumlu olmak üzere iki farklı yapıştırıcı kullanmışlardır. Bunlar FM300-2M düşük uyumlu yani yüksek elastisite modülüne sahip ve görece ince tabaka yapıştırıcı ve EA9361 yüksek uyumlu yani düşük elastisite modülüne sahip ve görece kalın tabaka yapıştırıcıdır. Deney sonucunda; iki yapıştırıcı içinde yapışkanlı ve HBB bağlantıları başlangıçta aynı tokluğa sahiptir bu da bize başlangıç bölümünde yük transferinde yapışkanın baskın mekanizma olduğunun göstergesidir. HBB bağlantılarda yüksek uyumlu yapıştırıcı kullanıldığında, yapışkandaki hasar başlama dayanımı yapışkanlı bağlantılara göre %81 artmıştır. Xiaoqi vd. [35] deneysel ve numerik olarak tek taraflı bindirmeli kompozit-çelik bağlantısının çekme yükü altındaki davranışları hakkında çalışmışlardır. Sonucunda; HBB bağlantıların çekme yükü altındaki davranışlarını iki bölümde incelemişlerdir bunlar yapışkanın yük taşıdığı bölüm ve civatanın yük taşıdığı bölümdür. Yapışkan hasarlarının çoğunlukla kesme gerilmesi ve boyuna çekme gerilmesinden kaynaklandığı görülmüş olup yapışkanın hasar gören bölgesi diğer bölgelerdeki gerilme durumunu değiştirmemiştir. Hasarın civata deliği yakınında bulunan köşeden başlayıp kalınlık doğrultusunda geliştiği görülmüştür. Civata da oluşan plastik deformasyonun ise bükme kuvveti altında oluştuğu görülmüştür. HBB bağlantıda enerji emilim kapasitesi, hasar başlama yükü ve çekme sertliğinin yapışkanlı bağlantılara göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Kadioğlu [36] deneysel ve numerik olarak tek taraflı bindirmeli yapışkanlı bağlantıların basma kuvveti altında davranışlarını incelemiştir. Çalışmada yapıştırıcı olarak AF163 2K ve iki farklı alüminyum malzeme kullanılmıştır. Bindirme uzunlukları, numune kalınlıkları değişken olarak seçilmiştir. Sonuçlarına baktığımızda; bindirme uzunluğunun bağlantı performansına etkisinin kullanılan numunenin mekanik özelliklerine ve kalınlığına bağlı olduğunu görmüştür. Daha ince numunelerin bindirme uzunluğu artırıldığında, performanslarının artmadığını fakat dayanımı daha güçlü olan numunenin aynı zamanda bindirme uzunluğu artırıldığında performansının önemli ölçüde

arttığı görülmüştür. Du vd. [37] deneysel ve numerik olarak uçak kanatlarında veya gövdelerinde kullanılan L, T, Pi, I konfigürasyonuna sahip kompozit bağlantıların yerine yeni iki farklı birleştirilmiş bağlantı şekli geliştirip üretmişlerdir. Bunlardan bir tanesi yapışkanlı bağlantı kullanılarak diğeri ise cıvatalı bağlantı kullanılarak birleştirilmiş olup çekme yükü altındaki davranışları ve hasar mekanizmaları analiz edilmiştir. Kompozit malzemelerin istifleme sıraları ve kalınlıkları değiştirilmiştir. Sonucunda; yapışkanlı bağlantı ile birleştirilen kompozit bağlantının en yüksek kırılma yükü 168.11kN olurken, cıvatalı bağlantıda 68.22kN olduğu görülmüştür. Numerik simülasyon sonuçları deneysel veriler ile nerdeyse örtüşmektedir, sonuçlarda %2.61-%6.04 oranlarında farklılık bulunmuştur. Tüm kalınlıklar ve malzemenin istifleme sırası değişmeksizin yapışkanlı bağlantı ile birleştirilmiş kompozit yapının dayanımı cıvatalı bağlantıya göre iki kat daha fazladır. Yapışkanlı bağlantı kullanılmış L şeklindeki laminenin istifleme sırası değiştirilerek dayanımının arttığı görülmüş olup aynı durumdaki cıvata kullanılmış yapıdaki dayanım artışı çok az olmuştur.

Cıvatalı, yapışkanlı ve HBB bağlantıların performansı, aynı zamanda, cıvatanın varlığı veya yokluğundan kaynaklanan birçok nedenden etkilenir. Cıvatalar, kompozit yapılarda süreklilik ve bütünlük kaybına neden olarak kenar etkileri ve gerilme konsantrasyonu sorunlarına yol açar [38]. Ayrıca, bağlantı delikleri etrafında yüksek gerilme konsantrasyonu, bağlantıların, kompozit yapıların zayıf bir parçası haline gelmesine neden olur [39]. Üstelik, kompozit malzemeye delme işlemi, malzemede delaminasyon, lif kırıkları ve matris hasarına neden olabilir. Bu hasarlar, cıvata bağlantılı kompozit malzemelerin ömrünün azalmasına yol açabilir [23,40,41]. Öte yandan, cıvatalı bağlantıların diğer dış etkilere karşı direnci yapışkanlı bağlantılardan daha iyidir. Yapışkanlı bağlantılar, bağlantı delikleri olmaması sebebiyle yapısal süreklilik sayesinde cıvatalı bağlantılara göre daha başarılı performans sergileyebilir ve gerilme konsantrasyonu sorununu ortadan kaldırmaktadır [42]. Bununla birlikte, bazı araştırmacılar yapıştırıcı bağlantı bölgesini, yapışkanlı bağlantılarda potansiyel bir zayıflık kaynağı ve belirsizlik olarak değerlendirmişlerdir [43]. Ayrıca, yapışkanlı bağlantılar sert çevre koşullarına daha duyarlıdır [44]. Bu nedenle, sadece cıvatalı veya yapışkanlı bağlantılara kıyasla HBB bağlantılar geniş ölçüde tercih edilmektedir. HBB bağlantılar, cıvatalı ve yapışkanlı bağlantıların avantajlarını birleştirerek yapıların yük taşıma kapasitesini artırabilir [44,45]. HBB bağlantılar, cıvatanın ani kırılmaya karşı koruma sağlaması ve yapıştırmanın etkili yük transferi sağlaması nedeniyle gelişmiş mukavemetli bağlantılardır [46]. Ayrıca yapışkanlı bağlantıyla karşılaştırıldığında,

cıvata, HBB bağlantısının yapıştırıcı hattındaki eğilme momentini azaltır ve bağlantıda çatlak tutma mekanizması olarak çalışır [47]. Ancak yine de cıvata deliği etrafındaki gerilme konsantrasyonları, yapıştırıcının kırılma davranışı ve büzülme, yapıştırıcı tabakada gerçekleşen ikincil bükülme, HBB bağlantının yük taşıma performansını azaltabilir [48]. Bu dezavantajlar, HBB bağlantılarda kompozit yapının güvenilirliği için endişe kaynağıdır. Bu endişeleri azaltmak için bağlantı bölgelerini iyileştirmek, araştırmacıların odak noktası haline gelmiştir.

## **2.2. Cıvatalı, Yapışkanlı ve Hibrit Bağlantılarda Nano Takviye**

### **2.2.1. Kompozit Malzemeye Nanofiber Takviyeleri**

Yapışkanlı bağlantıların dezavantajlarını en aza indirmek için kompozit malzemelerin aralı katman mukavemetini nanofiber tabakalarıyla iyileştirmek de bir motivasyon olmuştur. Zhu vd. [49] kompozitin katmanları arasında selüloz nanofiber (SNF) kullanarak karbon kompozitlerin aralı katman özelliklerinde artış elde etmiştir. Başka bir çalışmada, cam/epoksi kompozit katmanları arasına polisülfon (PSF) nanofiber yerleştirilmesinin çekme ve basma yükleme performansını artırdığı ve darbe direncini artırdığı bulunmuştur [50]. Ayrıca, aramid nanofiber (ANF) tabakalarının karbon kompozitin aralı katman etkileşimlerini güçlendirdiği bilinmektedir [51]. Polyvinil alkol (PVA) ve polivinil pirolidon (PVP) nanofiblerinin nanokompozitlerin aralı katman özelliklerini nasıl etkilediği de incelenmiştir [52].

### **2.2.2. Nanoparçacık ve Nanotüp Takviyeleri**

Araştırmacılar, farklı malzemelerden üretilmiş nanoparçacık ve nanotüp takviyeleri ile yapışkanlı ve HBB bağlantıların performanslarını geliştirmişlerdir. Scarselli vd. [53] yapışkanların mekanik özelliklerini artırmak amacıyla deneysel ve numerik çalışmışlardır. Kompozit malzemelerde çalışmışlar ve yapışkan olarak geleneksel epoksi ve nano grafit doldurulmuş epoksi kullanmışlardır. Deneysel ve numerik analiz sonuçlarına göre; nano grafit epoksinin, kayma dayanımı, kopma uzaması, maksimum kesme gerilimi ve kritik kırılma enerjisi açısından geleneksel epoksi yapıştırıcıya göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ekrem vd. [54] Al 2024-T3 alüminyum alaşım plakaları ile oluşturulan TTBB'de kullanılan çok katmanlı karbon

nanotüpler (MWCNT) ve gümüş (Ag) nanopartiküller içeren nanohibrit yapıştırıcıların kesme mukavemeti ve elektriksel iletkenlik özelliklerini araştırmıştır. En iyi elektriksel iletkenlik, %1 ağırlıkça MWCNT-%2 ağırlıkça Ag içeren numune için elde edilmiştir. %0.5 ağırlıkça MWCNT-%0.5 ağırlıkça Ag nanopartiküller içeren numuneler en yüksek kesme mukavemetine sahip olmuştur. Çekme testi sonuçlarına göre, nanopartiküllerin epoksi reçineye eklenmesi, yapıştırıcının dayanıklılığını artırmıştır.

Bir başka deneysel çalışmada [55], fonksiyonelleştirilmiş altıgen boron nitrit ve altıgen boron karbür nanopartiküllerinin yapışkanlı bağlantıların dayanıklılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu nanopartiküller, farklı viskozite değerlerine sahip iki farklı epoksi ile kullanılmıştır. Çekme testi yapılarak bağlantıların dayanıklılık değerleri belirlenmiştir. Maksimum artış oranı, yüksek viskoziteli Araldite 2011 yapıştırıcıya %1 ağırlıkça fonksiyonelleştirilmiş boron nitrit eklenerek ve düşük viskoziteli MGS-LR285 yapıştırıcıya %2 ağırlıkça boron nitrit eklenerek elde edilmiştir. Başarısızlık yükünde artış oranı sırasıyla %31 ve %63 olmuştur. Ayrıca, Araldite 2011 ve MGS-LR285 yapıştırıcılara %2 ağırlıkça fonksiyonelleştirilmiş boron karbür nanopartikülleri eklenerek bağlantıların dayanıklılığı sırasıyla yaklaşık %27 ve %70 artmıştır. Rao vd. [56] yaptıkları çalışmada, epoksi yapıştırıcıya MWCNT ve grafen nanoplatelet (GNP) takviyelerini sonikasyon yöntemiyle takviye etmişlerdir. Bu nanomalzemelerin, kompozit malzemelerin TTBB'lerinde kesme mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Test sonuçları, MWCNT'ler ve GNP'lerin TTBB'lerde kesme mukavemetini ve uzama özelliklerini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. En yüksek artış, %0.75 ağırlıkça MWCNT/GNP hibritlerinin kullanıldığı durumda elde edilmiş olup sırasıyla kesme mukavemetinde %36.6 ve uzamada %33.2'lik en yüksek artış sağlanmıştır. Ayrıca, nanomalzemelerin epoksi yapıştırıcının termal stabilitesini iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Diğer bir çalışmada [57], epoksi reçinesi sol-jel yöntemiyle modifiye edilmiş ve inorganik nanoparçacıklarla takviye edilmiştir. Farklı epoksi/sol-jel sistemleri oluşturulmuş ve nano katkıların yapışma mukavemeti üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Yapılan mekanik testler, inorganik nanoparçacıkların eklenmesinin, yapışma performansını önemli ölçüde artırdığını göstermiş olup modifiye edilmiş epoksi/hibrit sol-jel yapıştırıcının, saf epoksiye göre daha yüksek bir kesme mukavemetine sahip olduğunu kanıtlamıştır. Farklı bir çalışmada [58], alpha-alümina nanoparçacıklarının dokuma cam/epoksi kompozit ve Araldite 2015 yapıştırıcısına eklenmesinin kompozit yapışkanlı bağlantılardaki mekanik özellikleri üzerindeki etkileri

deneysel olarak incelenmiştir. Mukavemet, uzama, dayanıklılık ve Young modülü için maksimum değerlerin sırasıyla ağırlıkça %0.43, %1, %1 ve %2.1 oranlarına sahip numunelerde olduğu görülmüştür. Ayrıca kesme gerilme testi sonuçlarına göre, yapıştırıcıya ağırlıkça %0.74 nanoparçacık katılmasının bağlantı mukavemetini yaklaşık %14 artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Başka bir çalışmada [59], MWCNT ve grafen oksit nanoplatelet (GONP) takviyeli yapışkanlı bağlantıların akma davranışı üzerinde hidrotermal yaşlanmanın etkisi araştırılmıştır. Saf, MWCNT ve GONP takviyeli yapışkanlı TTBB'ler üretilmiş ve 24 saat boyunca üç farklı sıcaklıkta de-iyonize suda bekletildikten sonra akma yüklemesi altında test edilmiştir. Sonuçlar, su sıcaklığının artmasıyla saf yapışkanlı bağlantıların elastik ve akma kayma deformasyon değerlerinin sırasıyla %14 ve %25 arttığını göstermiştir. Ağırlıkça %0.1 MWCNT ve GONP takviyelerinin, sıcak suya maruz kalmış yapışkanlı bağlantılarda elastik ve akma deformasyonlarını belirgin şekilde azaldığı görülmüştür.

Çakır vd. [60] cam fiber takviyeli polimer levhaların yapışkanlı bağlantılarında, grafen nanopartikül içeren epoksi yapıştırıcının bağlantıda kesme ve bükülme davranışları üzerine etkisini incelenmiştir. Ağırlıkça %0.3 GNP ilavesinin daha iyi yük aktarımı gösterdiğini ve kesme mukavemetinde %145 iyileşme sağladığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, ağırlıkça %0.2 GNP içeren numunelerin bükülme mukavemetinde %100 artış olduğu belirlenmiştir. Diğer bir çalışmada [61], havacılık montajlarında, kuyruk, kanat ve gövdenin alt bileşenlerini birleştirmek için kullanılan yüksek performanslı yapışkanlı bağlantıların mekanik ve titreşimsel davranışları üzerinde MWCNT etkisi incelenmiştir. Deney sonuçları, ağırlıkça %0.25 MWCNT katılmasının birleştirilmiş kompozit bağlantıların mukavemetini %34.52 oranında artırdığını göstermektedir. Ancak, daha yüksek MWCNT yüklemesi, bağlantıların kesme mukavemetini azaltmıştır. Mikroskopik inceleme, daha düşük MWCNT içeriğinin arayüzey bağımlı iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, MWCNT takviyesinin bağlantıların hasar modunu değiştirdiği ve titreşim davranışını etkilediği görülmüştür. Sonuç olarak, ağırlıkça %0.25 MWCNT takviyeli bağlantıların daha yüksek mukavemete ve en yüksek doğal frekansa sahip olduğu belirlenmiştir.

Bir başka çalışmada [62], ticari bir epoksi yapıştırıcıya nano-silika, nano-kil ve MWCNT gibi üç farklı nanopartikül eklenmiş ve alüminyum ile cam fiber takviyeli polimerden oluşan TTBB'lerin kesme mukavemeti araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar, nanopartikül eklemenin bağlantıların mukavemetini artırdığını göstermiştir. En iyi sonuç, ağırlıkça %0.5 MWCNT eklenen bağlantılarda %62'lik bir artış olarak

belirlenmiştir. Aynı şekilde, ağırlıkça %1.5 nano-kil eklenen bağlantılarda %37.8, ağırlıkça %1.5 nano-silika eklenen bağlantılarda ise %43.3'lük bir iyileşme tespit edilmiştir. NajiMehr vd. [63] çalışmalarında çelik yapışkanlı bağlantılarda, MWCNT ve GNP takviyesini araştırmışlardır. Takviyesiz, MWCNT ve GNP ile güçlendirilmiş üç ayrı örnek grubu hazırlanmış ve bu gruplar farklı takviye ağırlık yüzdelerine sahip bağlantılardan oluşmaktadır. Statik kesme testleri yapıldıktan sonra her örnek grubu belirli bir yorulma ömrü için sınırlı yorulma yüklemelerine tabi tutulmuş ve ardından kalıntı dayanıklılık değerlendirmesi için ikinci bir statik test yapılmıştır. Sonuçlar, MWCNT ve GNP ile güçlendirilmiş bağlantıların en iyi statik dayanım artışının belirli bir parçacık içeriğiyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Ağırlıkça %0.2 ve %0.5 MWCNT ile güçlendirilmiş bağlantılar aynı ağırlıkça takviye edilmiş GNP ile güçlendirilmiş olanlara göre daha düşük statik dayanıma sahiptir. Ancak ağırlıkça %1 ve %2 içerikler için MWCNT ile güçlendirilmiş olanlar, GNP ile güçlendirilmiş olanlardan daha yüksek dayanıma sahiptir çıkmıştır. Ayrıca, MWCNT ve GNP parçacıklarının yapıştırıcıya eklenmesiyle yorulma ömrü artışları elde edilmiştir.

Diğer bir çalışmada [64], epoksi yapıştırıcıya nano- $Al_2O_3$ , nano- $TiO_2$  tozları eklenerek katkısız epoksi yapıştırıcıyla karşılaştırılmış ve TTBB'ler oluşturulmuştur. Bağlantıların mekanik özellikleri, farklı bindirme uzunlukları altında kesme yüküyle deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda, nanopartikül takviyeli yapıştırıcı kullanılan bağlantılarda genel olarak hasar yükünün önemli ölçüde arttığı görülmüştür. 20 mm bindirme uzunluğunda ve ağırlıkça %4 nano- $Al_2O_3$  katkılı örneklerde en yüksek hasar dayanım artışının olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, nanopartikül geriniminin yapışkanlı bağlantıların çekme dayanımında önemli bir faktör olduğu ve nanopartikül katkısının bağlantıların uzama miktarını artırdığı görülmüştür. Quan vd. [65] MWCNT ve çekirdek-kabuk kauçuk (CSR) nanoparçacıkları epoksi yapıştırıcıya ekleyerek, iletken ve dayanıklı yapısal yapıştırıcılar elde etmiştir. MWCNT-CSR-epoksi yapıştırıcıların termo-mekanik özellikleri, elektriksel iletkenlik, kırılma dayanıklılığı ve kesme mukavemeti üzerine araştırmalar yapılmıştır. MWCNT ve CSR nanoparçacıklarının epoksiye eklenmesi, kırılma enerjisini büyük ölçüde artırmıştır. Eklenen CSR nanoparçacıkları, kauçuk parçacıklarının çökmesi ve plastik boşluk büyümesi gibi dayanıklılığı artıran mekanizmalara sahiptir. MWCNT ise çatlak köprüleme ve çatlak yolu sapması gibi etkilerle dayanıklılığı artırmıştır. CSR nanoparçacıklarının epoksiye eklenmesi, bindirmeli bağlantıların hasar modlarını değiştirmiştir. MWCNT takviyesi ile kesme dayanımı önemli ölçüde artmış ve çatlak sapması etkisi gözlemlenmiştir. Bir başka

çalışmada [66], ağırlıkça %1-%7 boron nitrit nanotüpleri (BNNT) içeren epoksi nanokompozitler değerlendirilmiştir. Elastik modül ve kırılma dayanıklılığı, yükleme oranına bağlı olarak artmış ve ağırlıkça %5 BNNT yüklemesine kadar ilerleyici bir şekilde artış göstermiştir. Yapışkanlı bağlantı testleri, ağırlıkça %2 BNNT içeren yapışkanlı bağlantıda ortalama olarak %10'luk bir dayanıklılık artışı göstermiştir, ancak ağırlıkça %5 BNNT içeren yapışkanlı bağlantıda dayanıklılık önemli ölçüde azalmıştır. Hasar yüzeylerinin incelenmesi, BNNT takviyesinin çatlak yayılmasını engellediğini ve yapışkanlı bağlantı performansını artırdığını göstermiştir.

### 2.2.3. Nanofiber Takviyeleri

Araştırmacılar, farklı tipte nanofiber modifikasyonları ile de yapışkanlı yapıların mekanik performansını önemli ölçüde artırmışlardır. Hickman vd. [67] karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) laminenin yapışma arayüzüne özgü olarak karbon nanofiberi (CNF) hem yapışkan ara katmanında hem de matriste takviye olarak kullanılmasının etkilerini araştırmıştır. TTBB numuneleri hazırlanmış ve her bir tür numunenin kesme dayanıklılıklarının test edilmesi yoluyla deneysel karşılaştırmalar sunulmuştur. CNF ile güçlendirilmiş yapışkan ile bağlanan CFRP lamine de %35.7'ye kadar ve CNF ile güçlendirilmiş yapışkan ile bağlanan CNF yüzey güçlendirilmiş CFRP lamine de ise %42,6'ya kadar yapışma iyileştirmeleri bulunmuştur. Bir başka çalışmada [68], mekanik performansı iyileştirmek için elektrospun polivinil alkol (PVA) nanofiber matları epoksi yapışkan birleşim bölgesine dahil edilmiştir. Epoksi reçine ile ıslatılan elektrospun PVA nanofiber matları, alüminyum yapıştırılacak yüzeylerin arasına yerleştirilmiştir. Alüminyum birleşimlerin mekanik performansı, TTBB ve çift kirişli kantilever (DCB) testleri kullanılarak incelenmiştir. PVA nanofiber matların epoksi yapıştırıcıya eklenmesiyle Mod I kırılma dayanıklılığı ve bağlantı kesme dayanıklılığı artmıştır. Ayrıca [69], poliakrilonitril (PAN) nanofiber ile takviye edilen yapışkanlı bağlantılı yapının, 2 g/m<sup>2</sup> PAN nanofiberin yapışkan tabakaya dahil edilmesiyle yapışkanın Mod I kırılma enerjisinde %127'ye kadar maksimum bir iyileştirme elde edilmiştir. Neisiany vd. [70] tarafından yapılan bir çalışmada, stiren-akrilonitril (SAN) nanofiber ile modifiye edilen hibrit kompozitinde kırılma enerjisinde önemli bir iyileşme gözlenmiş ancak çekme mukavemetini etkili bir iyileşme görülmemiştir.

Yapışkanlı bağlantıların dezavantajlarını azaltmak amacıyla araştırmacıların bir diğer motivasyonu ise, nanofiber modifikasyonu ile yorgunluk yüklemesi altındaki

kompozit yapıların özelliklerini iyileştirmektedir. Polat vd. [71] GNP katkılı naylon 6.6 (N6.6) nanofiber matların yapıştırılmış yapıların yorgunluk performansını artırdığını bulmuşlardır. Ayrıca [72], nanofiberlerin mod I delaminasyon direnci üzerindeki etkileyici katkısı DCB testleri aracılığıyla belirlenmiştir. Dahası [73], nanofiberlerin yapışkan ve yapıştırılan yüzey arasında daha iyi bir bağ oluşturarak yüzey pürüzlülüğünü artırdığı bildirilmiştir. Sonuç olarak, nanofiberler adhezyon hasarını kohezyon hasarına dönüştürmüş ve bağlantı performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bugüne kadar, literatürde yapışma bölgesine nanofiber matının takviyesinin kısmi statik çekme yüklemesi altındaki bağlantılara etkisi yeterince dikkate alınmamıştır; ayrıca, nanofiber matın yapışkan arayüzünde nasıl etkileşime girdiği ve hangi mekanizmaların gerçekleştiği açıklığa kavuşturulmalıdır.

Yapıştırma uygulamalarında, poliamid, selüloz nanofiber (SNF), polivinil alkol (PVA), poliakrilonitril (PAN), naylon 6,6 (N66) gibi incelenen benzer nanofiber türlerinin yanı sıra daha avantajlı nanofiberlerin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Polistiren (PS), ambalaj ve oyuncak gibi geniş bir kullanım alanı nedeniyle en yaygın atık kaynağına sahiptir. PS'nin piyasada devam eden talebi, çöplüklerde çöp birikimine yol açmaktadır ve çevreye zarar vermektedir [74]. Atık PS'nin geri dönüştürülmesi doğa dostu bir uygulama olacaktır. PS yüksek dayanıklılık, ısı direnci, hafiflik ve geri dönüştürülebilme gibi değerli özelliklere sahiptir [74]. Avantajları sayesinde, PS nanofiberler farklı mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Örneğin, grafen ile kaplanmış PS nanofiber matlar ve grafen-polianilin nanokompozitler gaz sensörleri için kullanılmaktadır [75]. Başka bir çalışmada, yüksek termal iletkenliği nedeniyle hızlı ısı transferi için ısı radyatörü malzemesi olarak grafen nanoplateletleri ve karbon nanofiber içeren PS kompozitlerinin kullanılması önerilmiştir [76]. Ayrıca, uygun nanopartiküllerle birleştirildiğinde, PS iyi bir iletken nanofibere dönüştürülebilir, bu da bu polimer atıkların dönüştürülmesi için ekonomik açıdan uygulanabilir bir alan sağlamaktadır [77]. PS'nin elverişlilik, performans ve ekonomik pratiklik nedeniyle çeşitli alanlarda kullanıldığı anlaşılmıştır.

Mükemmel özgül dayanıklılık, enerji emme yeteneği, çatlak direnci, hasar tolere edebilme ve yük taşıma kapasitesi nedeniyle karbon kompozitler (KK), uçak yapı tasarımında sıkça kullanılmaktadır [27,78,79]. Örneğin, uçak kanatları ve gövde yapıları genellikle KK'lerden oluşur. Uçak kanat ve gövde yapıları, manevralar ve rüzgâr nedeniyle ömrü boyunca sürekli statik ve dinamik yüklemelere maruz kaldığı için mükemmel mekanik performansla sahip KK'lerin kullanılması önemlidir. Bu anlamda,

geri dönüştürülmüş PS nanofiber modifikasyonunun karbon/karbon kompozit yapıştırma performansını nasıl etkileyeceği merak edilmektedir.

Bu tezde, PS nanofiber takviyesinin, yapışkanlı ve HBB bağlantılı KK'lerin yük taşıma performansı üzerindeki etkisi, yarı-statik yüklemeler altında incelenmiştir. Ayrıca, TTBB'lerin rijitlik ve kırılma enerjisi belirlenmiş ve PS nanofiberin yük altındaki TTBB'lerin davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. PS nanofiber takviyesinin kırık yüzeyleri üzerindeki etkisi, makro/mikro görüntü analizi ve Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Bu deneysel çalışma, PS nanofiber takviyesinin HBB bağlantılara nasıl etki ettiği konusunda yeni düşünceler sunmayı ve gelecekte yapışkanlı bağlantı uygulamalarında PS nanofiber takviyesi hakkında bilgi oluşturmayı amaçlamaktadır.



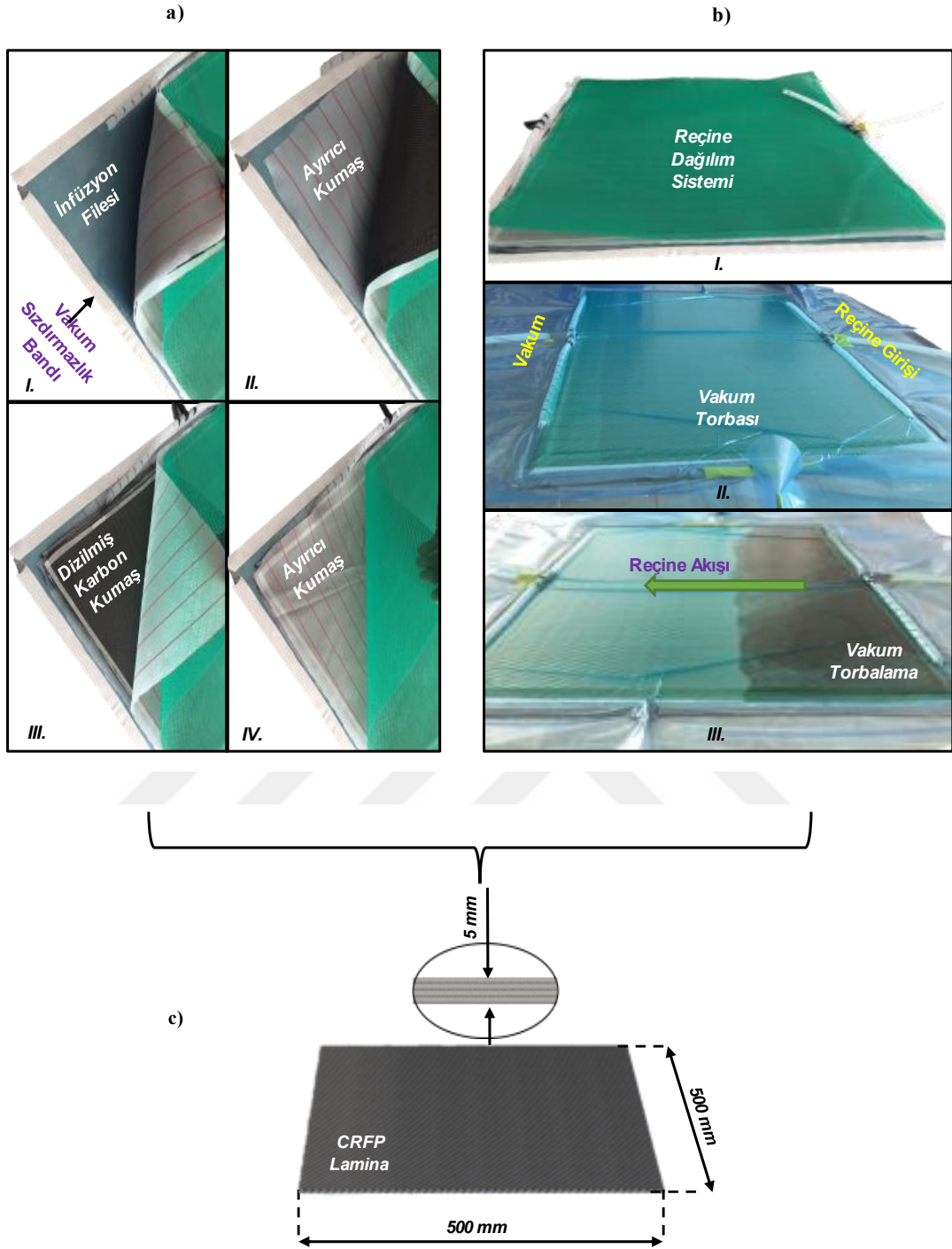
### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1. Malzemeler

DowAksa tarafından sağlanan karbon düz dokuma kumaşları (12 K), 530 g/m<sup>2</sup> yüzey yoğunluğuna, 0.6 mm kalınlığa ve 4900 MPa çekme mukavemetine sahiptir. Üretici önerilerine göre matris ve yapıştırıcı malzemeler olarak MGS L160/H160 ve MGS L285/H285 reçine sistemleri kullanılmıştır. Nanofiber malzeme olarak, Eraktek İnovasyon tarafından sağlanan nanofiber elektro-eğirme ünitesi ile üretilen geri dönüştürülmüş PS nanofiber kullanılmıştır. Cıvata, somun ve rondela gibi mekanik bağlantı elemanları ticari olarak temin edilmiştir.

#### 3.2. Karbon Kumaş Epoksi Kompozit ve Nanofiber Üretimi

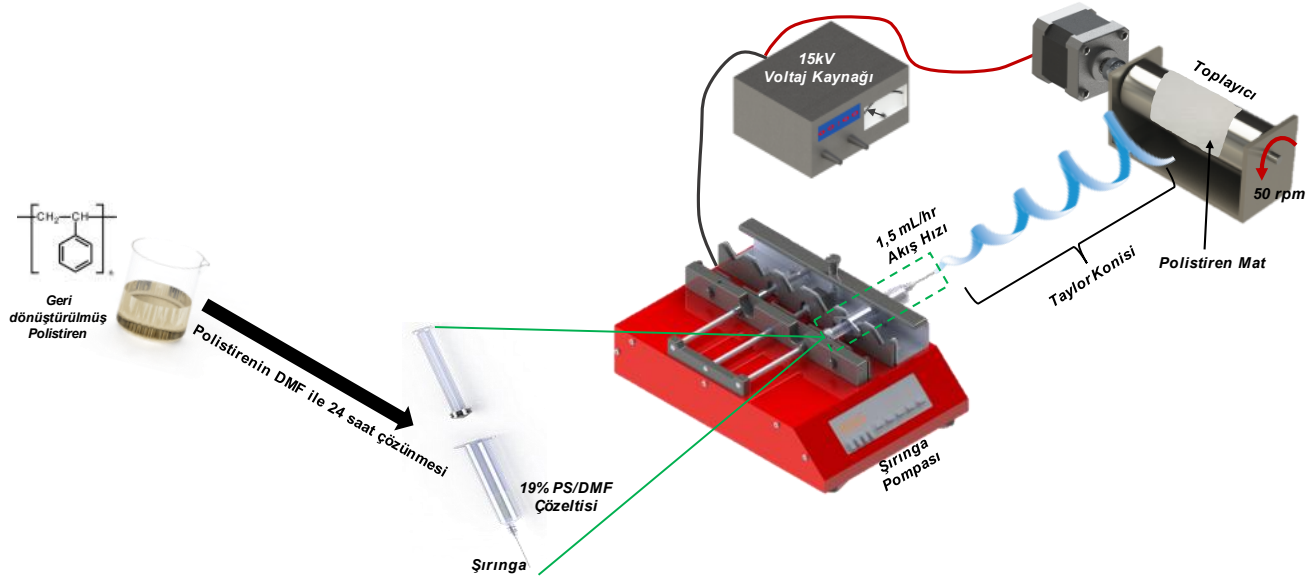
El yapımı 8 katmanlı karbon kumaş kompozit laminalar üretmek için vakum infüzyon metodu (VİM) uygulandı. Üretim adımları, karbon fiber kumaş ve ayırıcı kumaşların istiflenmesi, epoksi karışımının hazırlanması ve vakum torbasına alınmasını içermektedir. Karbon kumaşlar bir metre genişliğinde 100 metre uzunluğunda olup 50cm x 50cm boyutlarında kesilmiştir. Karbon kumaşları ayırmak için kullanılan ayırıcı kumaşlar ise 55cm x 55cm boyutlarında kesilmiştir. Epoksinin ilerlemesini sağlamak için kullanılan infüzyon filesi ise 50cm x 50cm boyutlarında kesilmiştir. Vakum torbası ise 60cm x 60cm boyutlarında kesilmiştir. İlk olarak, önceden hazırlanan infüzyon filesi VİM makinesine yerleştirildi. İnfüzyon filesinin üzerine ayırıcı kumaş yerleştirildi. Ayırıcı kumaşın üstüne, 8 kat karbon kumaş yerleştirildi. Bu şekilde, sandviç benzeri bir yapı oluşturuldu; üzerine tekrar ayırıcı kumaş ve infüzyon filesi yerleştirildi. Kenarları sızdırmaz bantla kapatıldı ve sızdırmaz bandın üzerine bantla desteklenmiş vakum hortumu ve önüne spiralli bir parça takıldı. Son olarak, en üste vakum torbası yerleştirildi ve bütün sızıntıları önlemek için vakum torbası sızdırmaz bantla yapıştırıldı. Sızdırmazlıktan emin olduktan sonra vakum pompası çalıştırıldı ve fazla epoksi kumaştan uzaklaştırılarak atık olarak toplandı. KK laminaların (500 x 500 x 5 mm<sup>3</sup>) üretimine dair şematik gösterim Şekil 8'de sunulmuştur. Üretilen kompozit paneller, 0.6 bar vakum altında, 70 °C'de 1 saat ve 120 °C'de 4 saat kürleme işlemine bırakılmıştır.



Şekil 8. KK lamina imalatının şematik gösterimi: a) istifleme b) vakum torbalama ve reçine enjeksiyonu c) üretilen kompozit lamina

Polistiren nanofiberler, elektro-eğirme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Elektro-eğirme, polimer çözeltilerini elektrik yükü kullanarak nanofiberlere dönüştüren bir süreçtir. PS, atık olarak bol miktarda bulunması ve geri dönüştürülebilmesi nedeniyle nanofiber malzemesi olarak seçilmiştir. Elektro-eğirme sistemi, güç kaynağı, şırınga,

şırınga pompası ve silindirik döner toplayıcıyı içerir. İlk olarak, PS, dimetilformamid (DMF) ile 24 saat boyunca oda sıcaklığında çözülmüştür. PS/DMF polimer çözeltisi, 19:100 hacim oranıyla şırıngaya alınmış ve şırınga pompası kullanarak 1.6 ml/saat akış hızına ulaşılmıştır. Şırınga pompası sayesinde çözeltinin süreç boyunca düzenli ve kontrollü bir şekilde dağıtılması sağlanmıştır. Ardından, 15 kV voltaj uygulanarak, 500 x 100 mm<sup>2</sup> boyutunda polistiren nanofiber mat, silindirik döner toplayıcı üzerine sarılarak elde edilmiştir. Elektro-eğirme ile PS nanofiber üretiminin şematik gösterimi Şekil 9'da sunulmaktadır. Daha sonra, 11.7 g/m<sup>2</sup> yüzey yoğunluğa sahip PS nanofiber mat, numunelerin bağlantı yüzeyleri için 36 x 36 x 0.2 mm<sup>3</sup> boyutlarında kesilmiştir.

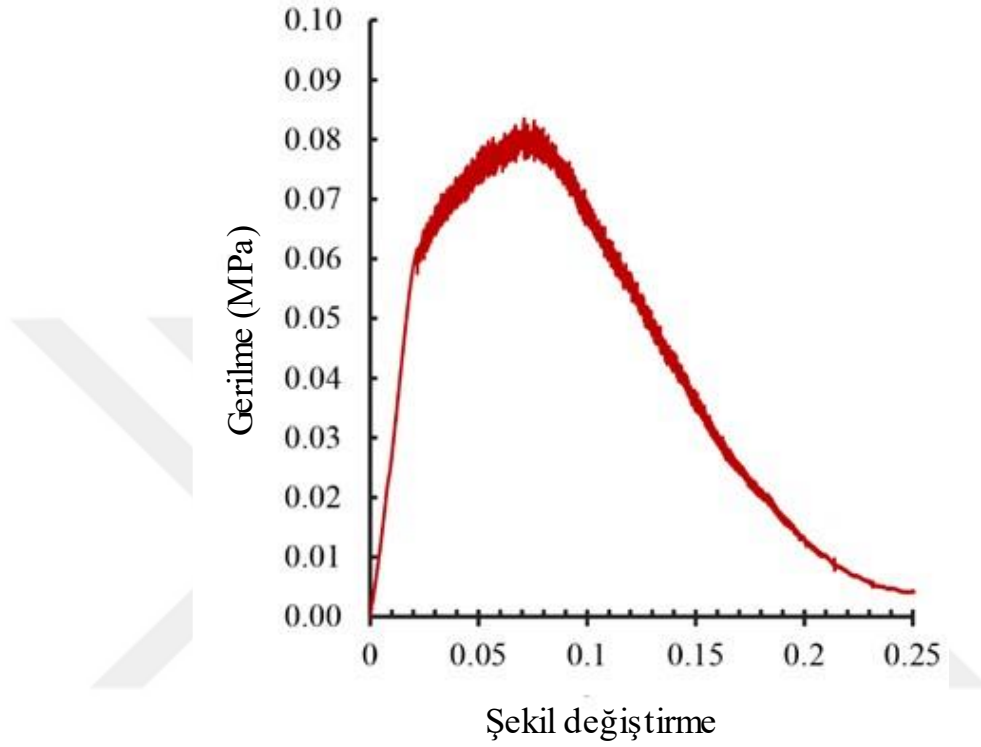


**Şekil 9.** Elektro-eğirme yöntemiyle PS nanofiber imalatının şematik gösterimi

PS nanofiber malzemeye (200 x 20 mm<sup>2</sup>) ASTM D882-02 standartlarına göre çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi için, Shimadzu AGS-X masaüstü test cihazı, 500 N yük hücresi ve pnömotik tutucular kullanılmıştır. PS nanofiber malzemenin dayanıklılığını ortaya çıkarmak için 1 mm/dk hızda beş örnek test edilmiş olup PS nanofiber malzemenin gerilme-gerinim eğrisi Şekil 10'da verilmiştir. Kullanılan malzemelerin çekme dayanıklılıkları Çizelge 2'de sunulmuştur.

**Çizelge 2.** Kullanılan malzemelerin çekme özellikleri

Malzeme	Çekme Mukavemeti (MPa)
KK Plaka	460
Epoksi	60
Bağlantı Elemanları	515
PS Nanofiber	0.084

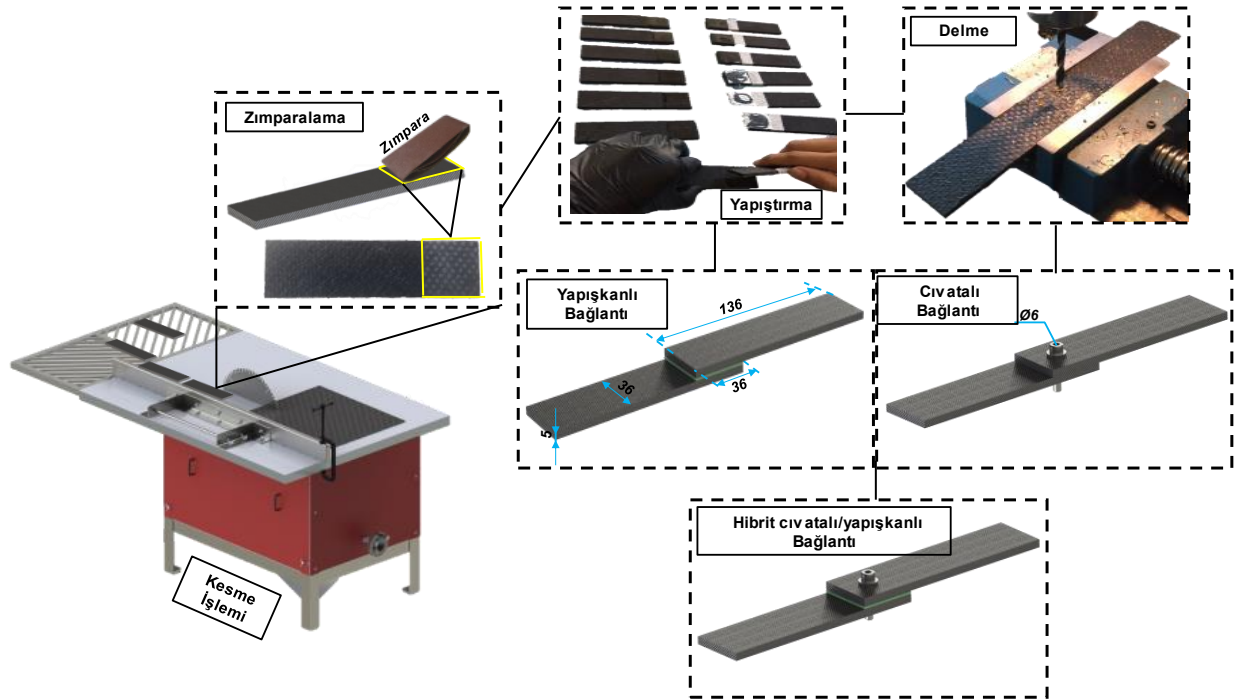


**Şekil 10.** Geri dönüştürülmüş PS nanofiber matın gerilme-şekil değiştirme eğrisi

### 3.3. Tek Taraflı Bindirmeli Cıvatalı, Yapışkanlı ve Hibrit Bağlantılı Numunelerin Hazırlanması

Geri dönüştürülmüş PS nanofiberin etkisi, cıvatalı, yapışkanlı ve HBB konfigürasyonları ile TTBB yöntemi kullanılarak incelenmiştir. TTBB'lerin hazırlanması ASTM D5961 standartlarına göre yapılmış olup yapıştırılacak parçalar  $136 \times 36 \times 5 \text{ mm}^3$  boyutlarında dairesel testere ile kesilmiştir. Yapışkanlı ve HBB bağlantılarda, yapıştırıcı malzeme olarak epoksi reçine (MGS L-285) kullanılmıştır. Parçalar arasındaki ıslanabilirlik ve yük transferini artırmak için numunelerin bağlantı yüzeyleri ( $36 \times 36 \text{ mm}^2$ ) 100 numaralı zımpara kâğıdı ile zımparalandı. Zımparalama sırasında oluşan yüzey kirleri aseton ile temizlendi. Epoksi yapıştırıcı bağlantı yüzeyine uygulandı ve yapıştırıcı kalınlığı cam küreler ile 0.2 mm olarak ayarlandı. Nanofiber takviyeli bağlantılar için,

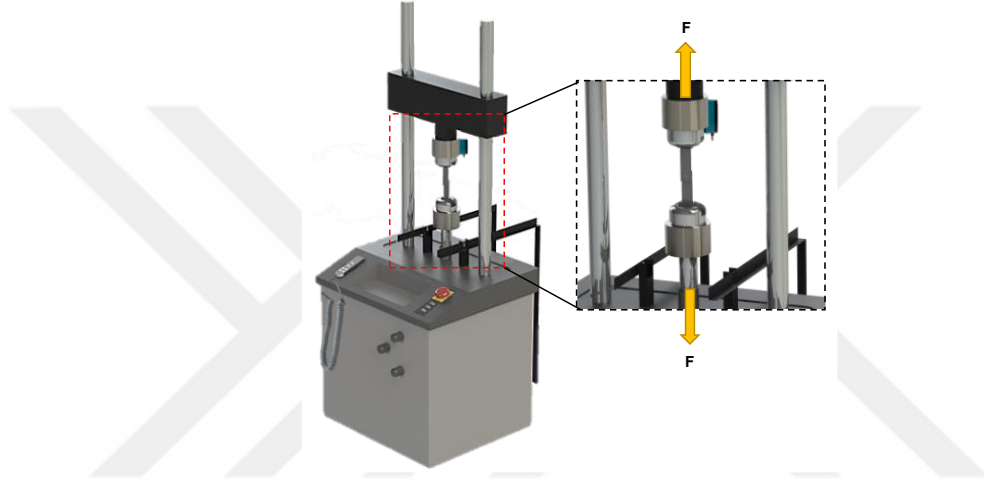
epoksi reçine uygulamasından sonra, geri dönüştürülmüş PS nanofiber, epoksi yapıştırıcı filmi üzerine yerleştirildi. Daha sonra KK plakalar birbirine yapıştırıldı ve bağlayıcı klipsler kullanılarak baskı uygulandı. Daha sonra numuneler 0.6 bar vakum basıncı altında, 70 °C'de 1 saat ve 120 °C'de 4 saat boyunca kürlenme işlemine tabi tutuldu. Delme işlemleri 6 mm çapında sinterlenmiş karbür matkap ucu kullanılarak Takuma JHV-710 CNC makinesi kullanılarak gerçekleştirildi. Delme işlemi, kesme hızı 90 m/dk ve besleme hızı 0.005 mm/devir olarak gerçekleştirildi. M6 cıvata, somun ve rondelalar kullanıldı ve birleşimleri monte etmek için 15 Nm sıkma torku uygulandı. Matris çatlağı, delaminasyon başlangıcı ve gerilim yoğunlaşması gibi olumsuz koşulları önlemek için cıvata numunesi ve vidalı somun numunesi arasına iç çapı 6.25 mm ve dış çapı 18 mm olan rondelalar yerleştirildi [22,40]. Cıvatalı bağlantıların hazırlanması için, 18 mm kenar mesafesi olan 6 mm çapında bir delik delindi ve ardından KK plakalar M6 paslanmaz çelik cıvata ile birleştirildi ve 15 Nm sıkma torku uygulandı. Öte yandan, HBB ve nanofiber takviyeli-HBB bağlantılar için, yapışkanlı bağlantılarında uygulanan prosedür uygulandı, ardından aynı delme işlemi yapıldı ve M6 paslanmaz çelik cıvata ile birleştirildi aynı şekilde sıkma torku uygulandı. Son olarak, tüm numunelerde, yük altında gerçekleşebilecek eksantrisiteyi önlemek için TTBB numunelerinin her iki tarafına KK plakalar (36x36x5 mm<sup>3</sup>) yapıştırıldı. TTBB numune hazırlanmasının şematik gösterimi Şekil 11'de sunulmuştur.



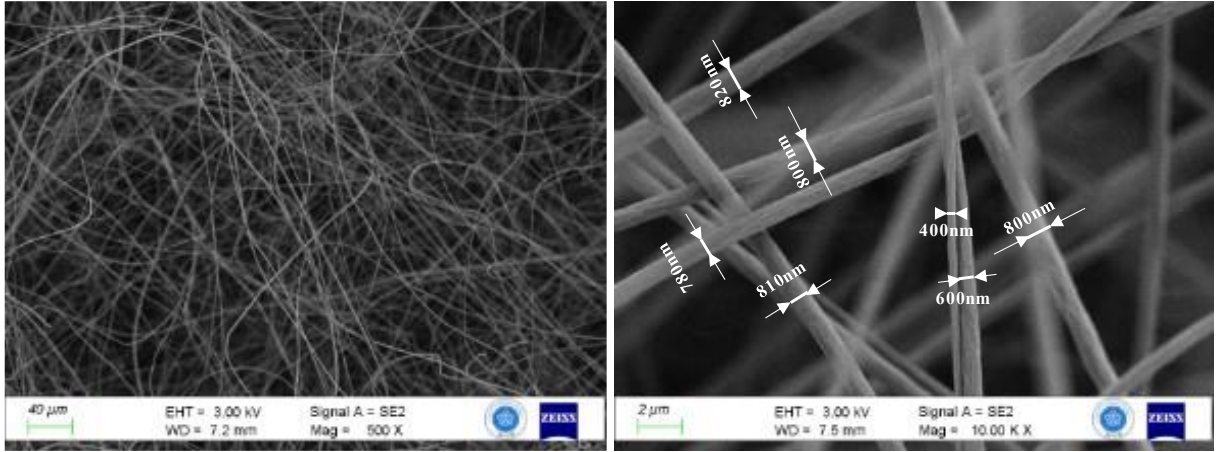
Şekil 11. TTBB numune hazırlığının şematik gösterimi

### 3.4. Üretilen Numunelere Çekme Testinin Yapılması ve Karakterizasyon

Üretilen numunelere ASTM D5961 standartlarına uygun olarak, Instron 8801 test cihazı kullanılarak, 2 mm/dk hızında çekme testi uygulandı ve kırılma anına kadar devam ettirildi (bkz. Şekil 12). Her bir bağlantı tipi için en az üç numune test edildi. Geri dönüştürülmüş PS nanofiber çapı ve bağlantıların yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak ZEISS Evo LS 10 ile incelendi. Geri dönüştürülmüş PS nanofiberlerin ortalama çapı yaklaşık 716 nm olarak ölçülmüştür (Şekil 13).



Şekil 12. Instron 8801 test cihazı kullanılarak gerilme testinin şematik gösterimi

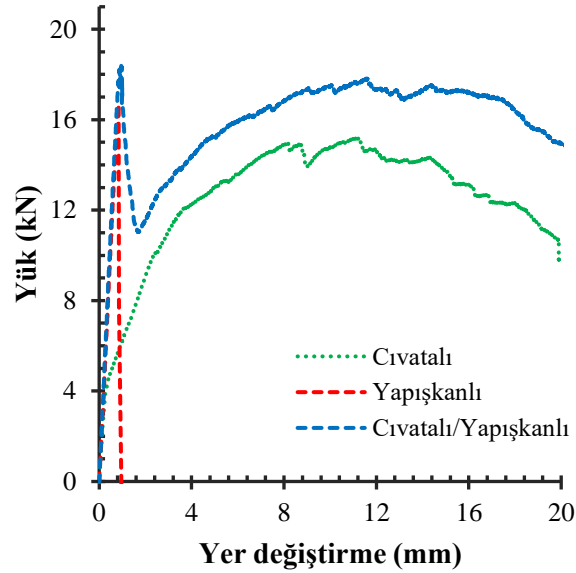


Şekil 13. Geri dönüştürülmüş PS nanofiberlerin SEM görüntüsü

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

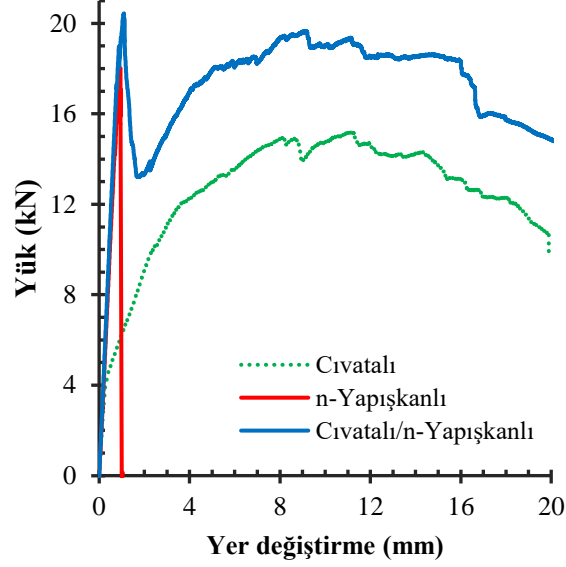
### 4.1. Üretilen Numunelerin Çekme Testi Sonuçları

PS takviyesiz numunelerin yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 14'te verilmiştir. Yapışkanlı bağlantının yük taşıma performansı cıvatalı bağlantıdan daha yüksektir, ancak yapışkanlı bağlantının yük değeri kırılmalı yapıştırıcının ani kırılması nedeniyle ani bir şekilde düştü ve daha az yer değiştirme gösterdi [34,46]. Cıvatalı bağlantı, cıvata yatağı hasar mekanizmasına bağlı olarak 15.19 kN maksimum yük değerine ulaştı ve 19.9 mm boyutunda belirgin bir yer değiştirme gerçekleştirdi. Ayrıca yapıştırıcının zarar görmesinden sonra, HBB bağlantının sadece cıvatalı bağlantı gibi davrandığı görülmektedir.



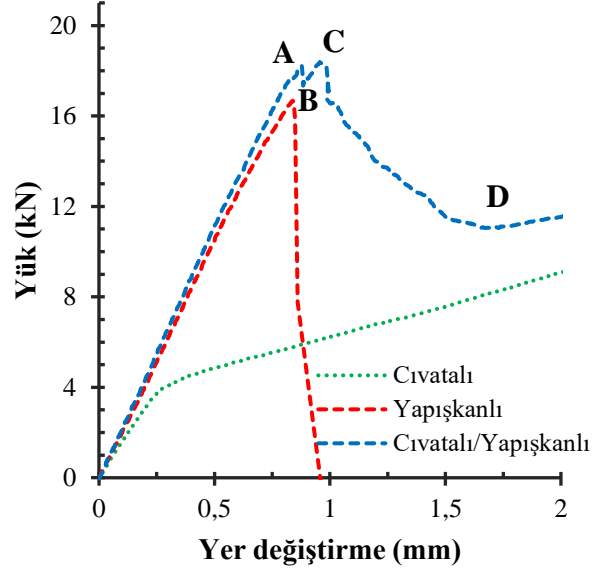
Şekil 14. PS takviyesiz TTBB'lerin yük-yer değiştirme eğrileri

Şekil 15'te, nanofiber-yapışkanlı ve nanofiber-HBB bağlantılarının eğrileri sunulmaktadır. Yapıştırıcının hasara uğramasından sonra, nanofiber-HBB, nanofiberlerin sertleştirme mekanizmalarının etkisi nedeniyle HBB muadiline (nanofibersiz) kıyasla daha dalgalı bir eğri sergilemiştir. Ayrıca, nanofiber takviyeli yapışkanlı bağlantılı numunenin eğrisinin, nanofibersiz yapışkanlı bağlantılı numunenin eğrisine karakteristik olarak benzer olduğu görüldü. Ancak, PS nanofiber, yapışkanlı ve HBB numunelerinde hasarı ertelediğinden, maksimum yük noktası daha yüksek bir değere ulaşmıştır [80].



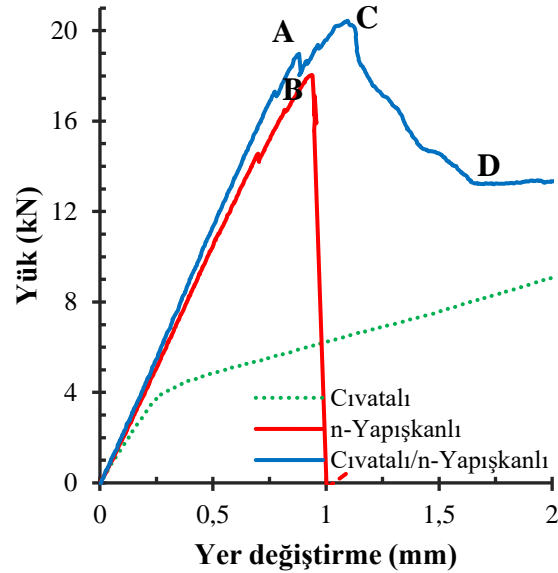
Şekil 15. PS takviyeli TTBB'lerin yük-yer değiştirme eğrileri

PS takviyesiz TTBB eğrilerinin başlangıç bölümü, testler sırasında gelişen kritik olayların daha ayrıntılı olarak incelenebilmesi için Şekil 16'da sunulmuştur. Tüm numunelerin başlangıçta lineer bir davranış sergilediği açıkça görülmektedir. Eğrilerin lineer bölgelerinin eğimi, TTBB sertliğini temsil eder. Cıvatalı numune en düşük eğime sahipken, HBB numunesi en yüksek eğime sahiptir. Burada, yüklenme sırasında gelişen hasar aşamaları HBB bağlantıda A, B, C ve D olarak tanımlanmıştır. A noktasında, bindirme bölgesinde çatlak oluşur ve yük uygulandıkça hasar ilerler. B noktasına kadar yapıştırıcı neredeyse yükün tamamını taşırken, burada delik genişlemesi başlayarak cıvatanın yükü taşıma rolü artar ve cıvatanın etkisiyle C noktasında HBB bağlantının yükü maksimum düzeye ulaşır. D noktasında yapıştırıcı tamamen hasara uğramış olur ve kopmaya kadar yük sadece cıvata tarafından taşınır [81]. D noktasına kadar, farklı yapışma bölgelerinde adhezyon veya kohezyon hasarları ile cıvata yatağı hasarı başlangıcı oluşmuş olabilir. D noktasından sonra, sadece cıvatalı bağlantı hasar mekanizmaları oluşur ve cıvata deliğinin yüzeyinde yerel sıkıştırma yüklemeleri ve/veya sürtünme etkileşimleri meydana gelir. A noktasından B noktasına kadar olan HBB eğri davranışının yapışkanlı bağlantının eğrisine benzer olduğu söylenebilir. B noktasından sonra HBB bağlantı davranışı, cıvatanın etkisi ile yapışkanlı bağlantı eğrisinden ayrılarak D noktasına kadar devam eder.



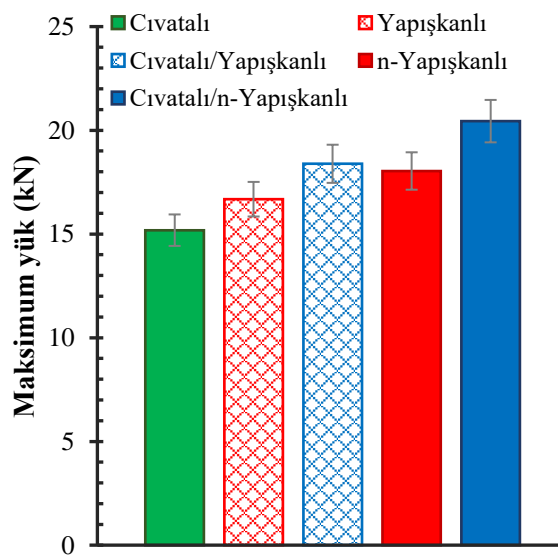
Şekil 16. PS takviyesiz TTBB'lerin yük-uzama eğrilerinin yakınlaştırılmış görünümü

Şekil 17'de, nanofiber-HBB bağlantısı, nanofibersiz numune ile aynı hasar aşamalarını (A, B, C ve D) sergilemiştir. Ancak, eğrilerde nanofibersiz eğrilere göre daha fazla dalgalanmaların olduğu görülmüştür. Ayrıca, nanofiberlerin sertleştirici mekanizmalarının, bağlantı bölgesindeki çatlak oluşumlarını sınırlayarak hasarı geciktirdiği için B ve C noktaları arasındaki mesafenin HBB eğrisine göre daha uzun olduğu gözlemlenmiştir.



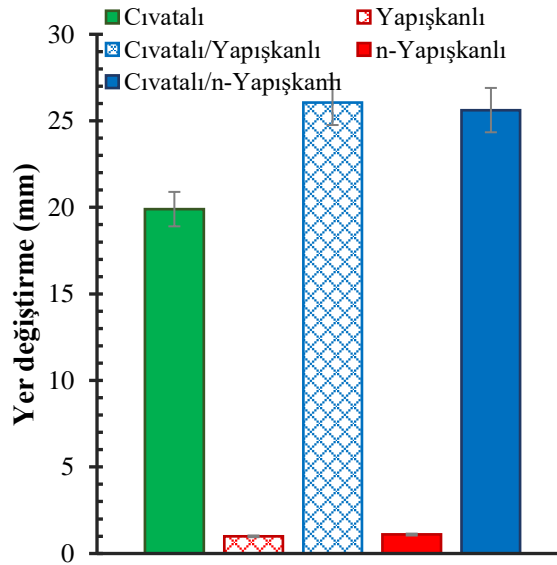
Şekil 17. PS takviyeli TTBB'lerin yük-uzama eğrilerinin yakınlaştırılmış görünümü

TTBB numunelerinin maksimum yük değerleri sütun grafiği olarak Şekil 18'de sunulmuştur. Cıvatalı bağlantı en düşük yükü, 15.19 kN'yi gerçekleştirmiş, yapışkanlı bağlantı ise yaklaşık %10 daha yüksek, 16.68 kN yük taşımıştır. HBB bağlantısı, yapışkanlı bağlantıya göre %10 daha yüksek olan 18.39 kN yük taşıma kapasitesi ile, nanofiber içermeyen TTBB'ler arasında en yüksek yük taşıyan numune olmuştur. HBB bağlantı, cıvatanın çatlak büyümesinin azaltılmasına neden olan bir çatlak durdurma görevi görmesi sayesinde sadece yapışkanlı bağlantıya karşı daha iyi sonuç vermiştir [82]. Nanofiber içeren yapışkanlı bağlantının maksimum yükü 18.04 kN olarak bulunmuş ve sadece yapışkanlı bağlantıya göre yaklaşık %8 daha yüksek olmuştur. Dahası, nanofiber içeren HBB bağlantısı 20.44 kN'ye ulaşarak, HBB bağlantısına göre %10'dan daha fazla ve diğer tüm bağlantılar arasında en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olmuştur (Şekil 18). Benzer şekilde, Polat vd. [71] grafit nano tabaka katkılı naylon 6.6 nanofiber takviyesinin hasar yükünü yaklaşık %7 artırdığını bulmuştur. Çetkin vd. [83] polivinil bütrol (PVB) nanofiber takviyesinin hasar yükünü yaklaşık %5 artırdığını gözlemlemişlerdir. On vd. [84] ise meta-aramid nanofiber matların maksimum kesme dayanımında %10'a kadar artış sağladığını söylemişlerdir. Ayrıca başka bir çalışmada [68], polivinil alkol nanofiber matın kesme dayanımını %13 artırdığı görülmüştür. Bu nedenle, sonuçlarımız literatürle uyumlu olup, PS nanofiberlerin yük transferinde aktif bir rol oynadığını ve sade epoksi ile bağlanmış numunelere kıyasla geliştirilmiş yük taşıma performansı sergilediğini kanıtlamaktadır.



Şekil 18: TTBB'lerin maksimum yük sonuçları

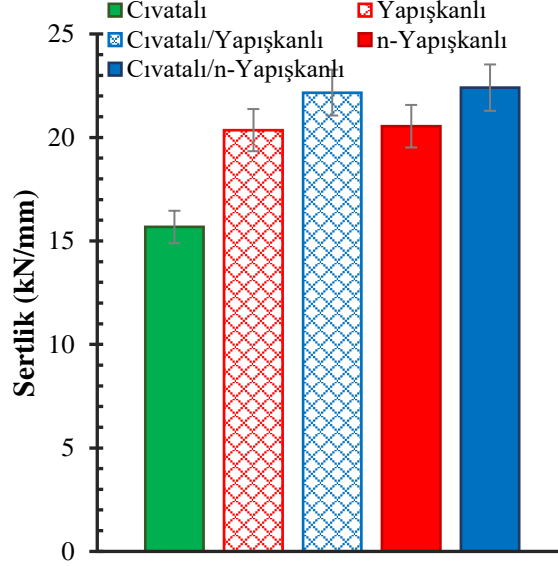
Şekil 19 numunelerin yer değiştirme sonuçlarını göstermektedir. Yapışkanlı bağlantı 0.99 mm'lik en düşük yer değiştirmeyi gösterirken, cıvatalı bağlantı 19.90 mm ve HBB bağlantısı en yüksek değer olarak 26.06 mm yer değiştirdi. Nanofiber takviyeli yapışkanlı bağlantı ise, 1.1 mm yer değiştirmeye, yapışkanlı bağlantıya göre %10'dan daha fazla bir yer değiştirme göstermiştir. PS nanofiberin yer değiştirmeyi artırdığı açıkça görülmektedir. Benzer şekilde, grafit nano plakalarla doldurulmuş naylon 6.6 nanofiber takviyesi, tüm test örnekleri için uzamayı %10'dan fazla artırmıştır [71]. Ancak, Çetkin vd. [83] PVB nanofiber takviyesinin tüm test örnekleri için uzama miktarını azalttığını bildirmişlerdir. Yapışkanlı ve nanofiber-yapışkanlı bağlantılar, cıvata yokluğundan dolayı kaynaklanan hasar mekanizması farklılıklarından dolayı en düşük yer değiştirmeye sahiptirler. Nanofiber-HBB ve HBB bağlantıları ise yaklaşık olarak aynı yer değiştirmeyi göstermiş olup cıvatalı bağlantıya göre %25'ten daha fazla bir yer değiştirmeye ulaşmışlardır (Şekil 19). Bu nedenle, yer değiştirme açısından HBB bağlantının yalnızca cıvatalı bağlantıdan daha üstün olduğu kanıtlanmıştır.



Şekil 19: TTBB'lerin yer değiştirme sonuçları

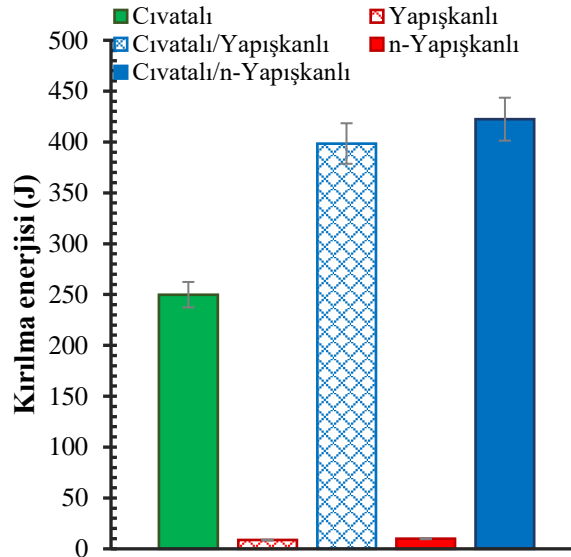
TTBB numunelerinin bağlantı sertlikleri Şekil 20'de sunulmuştur. Bağlantı sertlikleri, tüm konfigürasyonlar için 0-0.15 mm yer değiştirme arasındaki yük-yer değiştirme eğrilerinin eğimi hesaplanarak bulunmuştur. Cıvatalı, yapışkanlı ve HBB bağlantıların sertlikleri sırasıyla 15.68 kN/mm, 20.36 kN/mm ve 22.17 kN/mm olarak bulunmuştur. Yapışkanlı bağlantının sertliği, cıvatalı bağlantıdan yaklaşık %30 daha yüksek olarak ölçülmüştür ve HBB bağlantının sertliği ise yapışkanlı bağlantıdan

yaklaşık %10 daha yüksek bulunmuştur. Nanofiber-yapışkanlı ve nanofiber-HBB bağlantı sertlikleri sırasıyla 20.54 kN/mm ve 22 kN/mm olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, nanofiber polistirenin bağlantı sertliği üzerinde önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 20: TTBB'lerin sertlik sonuçları

Şekil 21, yük-yer değiştirme eğrileri altındaki alanlarla hesaplanan TTBB'lerin kırılma enerjilerini temsil eder. Yapışkanlı, cıvatalı ve HBB bağlantıların kırılma enerjisi değerleri sırasıyla 8.61 J, 249.87 J ve 398.48 J olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, HBB bağlantı cıvatalı bağlantıya göre yaklaşık %60 daha fazla enerji emmiştir. Yalnızca cıvatalı bağlantıya göre HBB bağlantının kırılma enerjisinin yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Benzer şekilde, çeşitli TTBB çalışmalarında, HBB bağlantıların kırılma enerjisi, yalnızca cıvatalı bağlantılara göre daha yüksek bulunmuştur [30,32,85]. Ayrıca, nanofiber-yapışkanlı bağlantının kırılma enerjisi 9.95 J olup, yapışkanlı bağlantıdan %15'ten fazla yüksek hesaplanmıştır. Nanofiber-HBB bağlantısı, 422.40 J kırılma enerjisi ile tüm TTBB numuneleri arasında en yüksek kırılma enerjisine ulaşmış olup HBB bağlantısından %5 daha fazla enerji emmiştir.

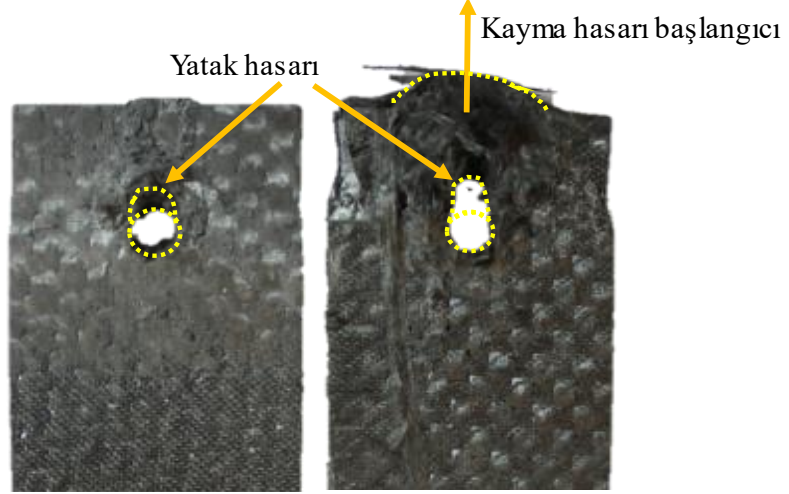


Şekil 21: TTBB'lerin kırılma enerjisi sonuçları

#### 4.2. Çekme Testi Sonrası Numune Yüzeyinde Oluşan Hasarların İncelenmesi

TTBB'lerin hasarlı yüzeylerinin morfolojisi analiz edilmeden önce, her bir bağlantı konfigürasyonu için hasar modları belirlenmelidir. Yapışkanlı bağlantılarda yaygın olarak adhezyon ve kohezyon hasarları meydana gelir. Adhezyon hasarı, yapışkanın yapıştırılan malzemenin bir tarafından tamamen ayrılması ve diğer yüzeyde kalmasıyla gerçekleşir. Kohezyon hasarı, yapışkan içinde meydana gelir ve yapışkan birbirinden ayrılır, ardından yapışkan tabakaları yapıştırılan malzemelerin her iki yüzeyinde de kalır. Ayrıca, yapışkanlı bağlantılarda hasarlar, ince tabaka kohezyon hasarı, fiber yırtılması, hafif fiber yırtılması, yapıştırılan malzeme kırılması ve karışık hasarlar şeklinde meydana gelebilir [86]. Cıvatalı bağlantılarda hasarlar genellikle, yatak hasarı, çekme hasarı ve kayma hasarı olarak ortaya çıkabilir [87].

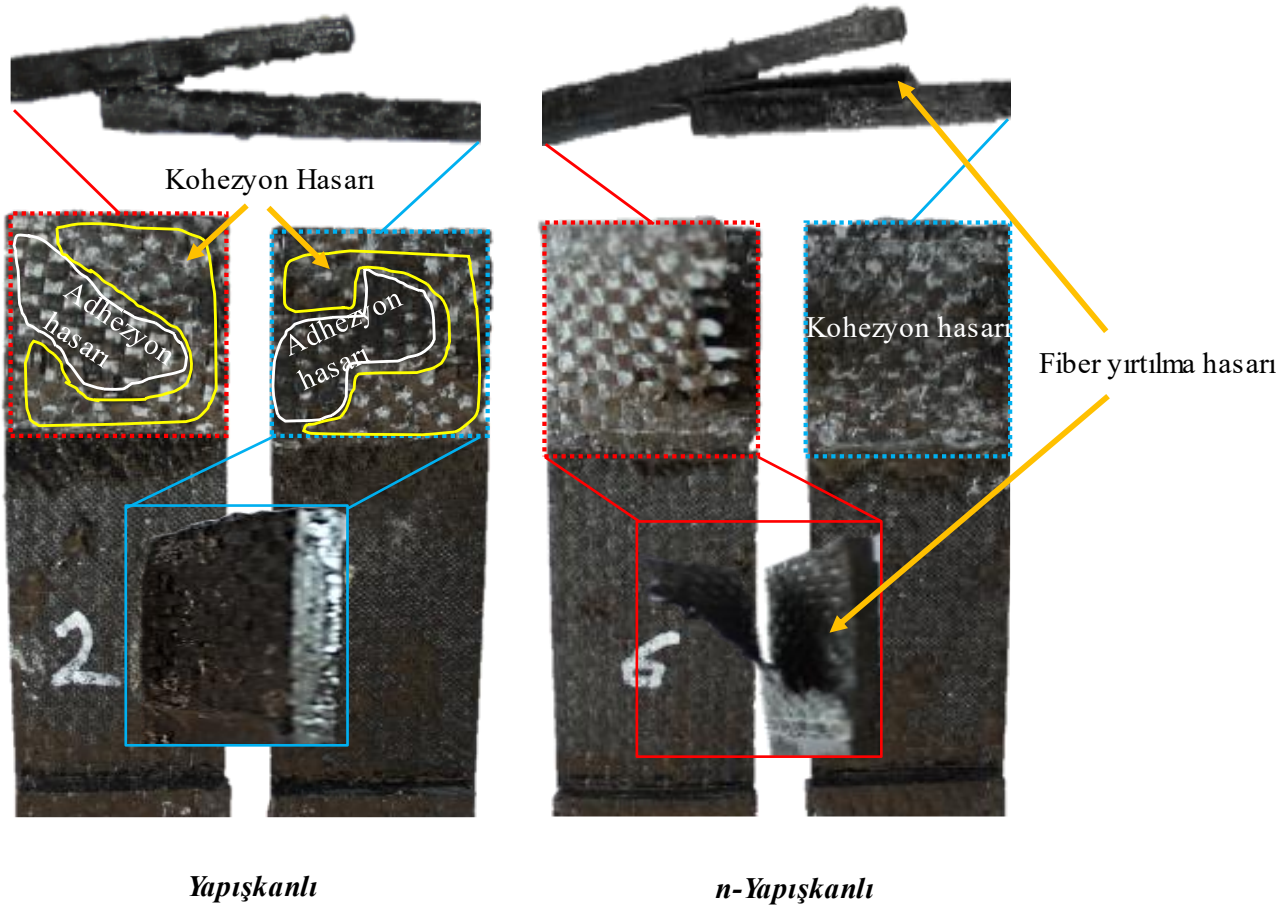
Şekil 22'de cıvatalı bağlantıların hasar yüzeyleri sunulmaktadır. Cıvatalı bağlantıda yatak hasarı ile kayma hasarı başlangıcı görülmektedir.



### *Cıvatalı*

Şekil 22. Cıvatalı TTBB numunelerin makroskobik hasar görüntüleri

Şekil 23'te yapışkanlı ve nanofiber-yapışkanlı bağlantıların hasar yüzeyleri sunulmaktadır. Takviyesiz yapışkanlı bağlantı yüzeyinde adhezyon hasarı açıkça görülebilir. Ayrıca, kohezyon hasarları yaygın olarak görülebilir. Bununla birlikte, nanofiber-yapışkanlı bağlantı yüzeyinde kohezyon hasarının yanı sıra, fiber-yırtılma hasarı açıkça görülmektedir. Bu hasar, yapışkan-yapıştırılan malzeme arayüzünde iyi bir bağlanma olduğunu gösterir; dolayısıyla, nanofiber yapışma performansını artırmış ve hasar, yapıştırılan malzeme boyunca ilerlemiştir. Ayrıca, nanofiber-yapışkanlı bağlantıda, nanofibersiz bağlantıya göre ekstra olarak görülen elyaf-yırtılma hasarının varlığı, nanofiberin yapışkanlı bağlantıda yer değiştirme, maksimum yük ve enerji emilimi sonuçlarındaki artışı desteklemektedir. PS nanofiber, yapışkanlı bağlantıda hasar modunun gelişmesine neden olmuştur. Ayrıca, nanofiber-yapışkanlı bağlantı yapışkanlı bağlantı ile kıyaslandığında, kohezyon hasarının adhezyon hasarına galip geldiği görülmektedir.



**Şekil 23.** Yapışkanlı ve n-Yapışkanlı TTBB numunelerin makroskobik hasar görüntüleri

Şekil 24'te HBB ve nanofiber-HBB bağlantıların hasar yüzeyleri sunulmaktadır. HBB bağlantı yatak hasarı sergilemiş; ancak, nanofiber-HBB bağlantısında net bir şekilde kayma hasarı başlangıcı ile yatak hasarı görülmüştür. Ayrıca, bu daha gelişmiş hasar modu, nanofiber-HBB bağlantısı için HBB bağlantıya göre mekanik performansın geliştirilmesine yönelik sonuçları desteklemiştir. Bağlantıların hasar modları ve mukavemetleri arasındaki güçlü ilişki burada görülmektedir; PS nanofiber, hasar modlarının daha gelişmiş hasar mekanizmalarına dönüşmesine neden olmuştur. Nanofiber-HBB bağlantısında kayma hasarı başlangıcı ve nanofiber-yapışkanlı bağlantıda fiber-yırtılması hasarları, geri dönüştürülmüş PS nanofiberin yapışkanın adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinin iyileştirilmesini sağlayarak hasar mekanizmalarını karmaşık hale getirdiği ve bu bağlamda bağlantı performansını artırdığını kanıtlamaktadır. Benzer şekilde, karbon nanofiber takviyeli epoksi yapıştırıcılarla yapılan bir çalışmada, kohezyon hasar oranı daha düşük performans gösterirken, delaminasyon

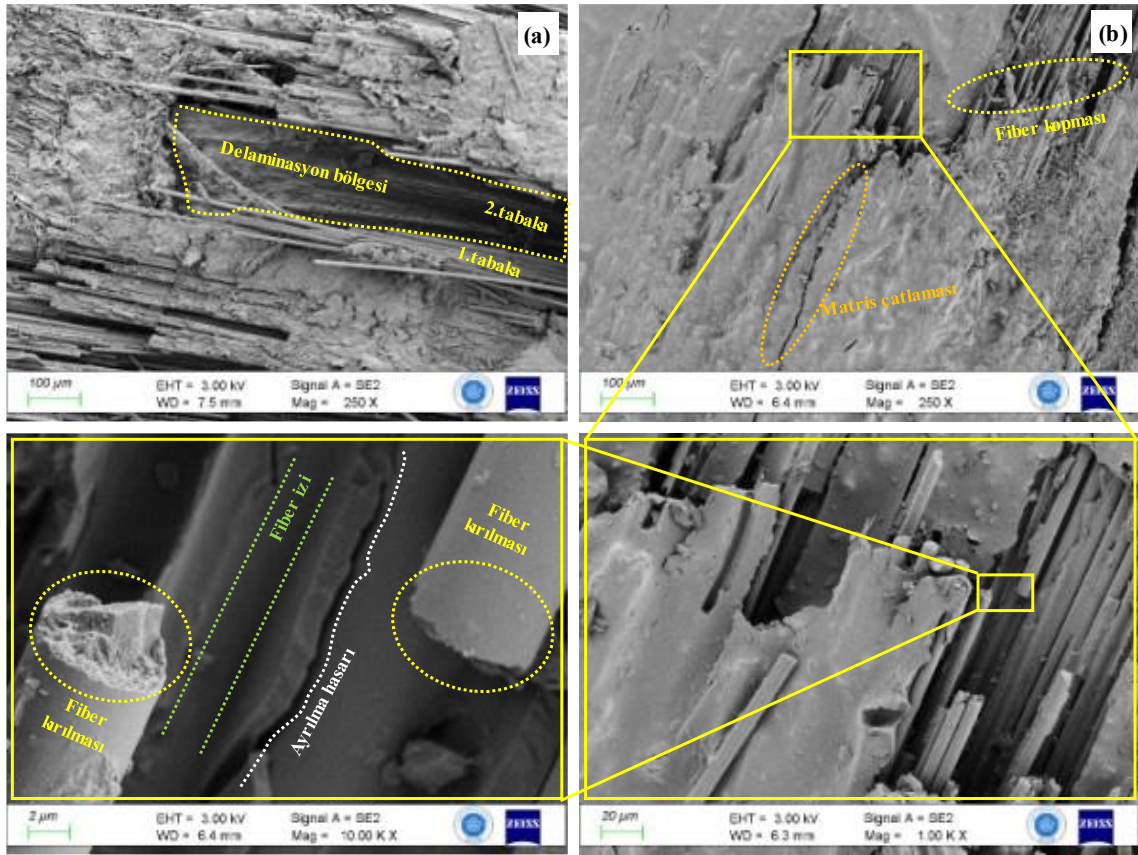
oranı sade epoksiye sahip bağlantılara göre artmıştır [72]. Başka bir çalışmada ise karbon nanofiber eklenen epoksi yapıştırıcılar da benzer şekilde hasar modlarını değiştirmiştir [88].



Şekil 24. HBB ve n-HBB TTBB numunelerin makroskobik hasar görüntüleri

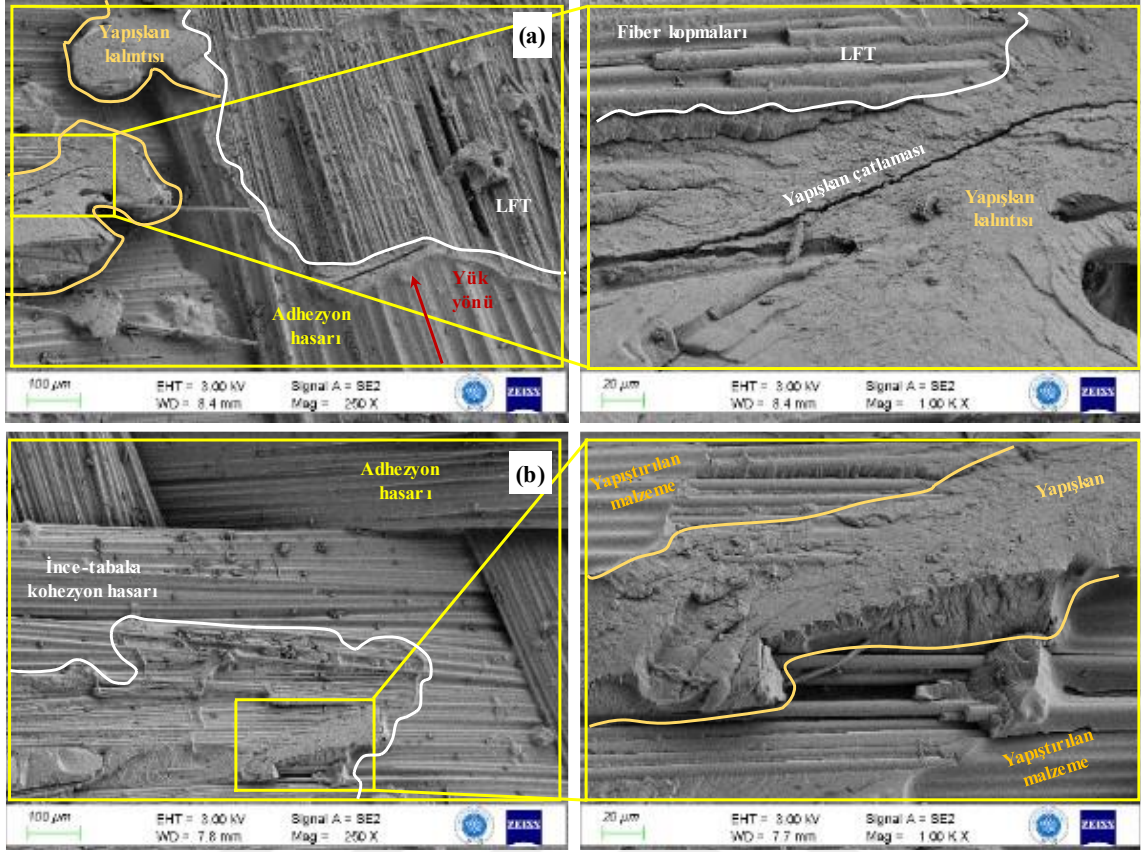
#### 4.3. SEM Görüntüleri ile Hasar Analizi

Cıvatalı bağlantıların kırılma morfolojileri Şekil 25'te gösterilmiştir. Şekil 25.a'da cıvatanın kayma gerilmesine maruz kalması nedeniyle oluşan delaminasyonun net bir görüntüsü verilmiştir. Sayfa düzlemine paralel katmanların ardışık bir şekilde sıralanması, delaminasyonun varlığını göstermektedir. Şekil 25.b'de, çekme yüklemesi altında meydana gelen tipik kompozit hasarları görülmektedir. Yüklemenin ilk aşamasında kompozitin dış yüzeyinde matris çatlakları oluşmuş; ardından bu çatlaklar fiber-matris arayüzünde ilerlemiş ve ayrılma hasarına neden olmuştur. Bundan sonra, yük fiberlerde yoğunlaştığı için fiber kırılmaları ve fiber kopma hasarları meydana gelmiştir. Fiber-matris arayüz etkileşimlerinin azalması nedeniyle fiber kopma ve fiber izi hasar mekanizmalarının meydana geldiği söylenebilir.



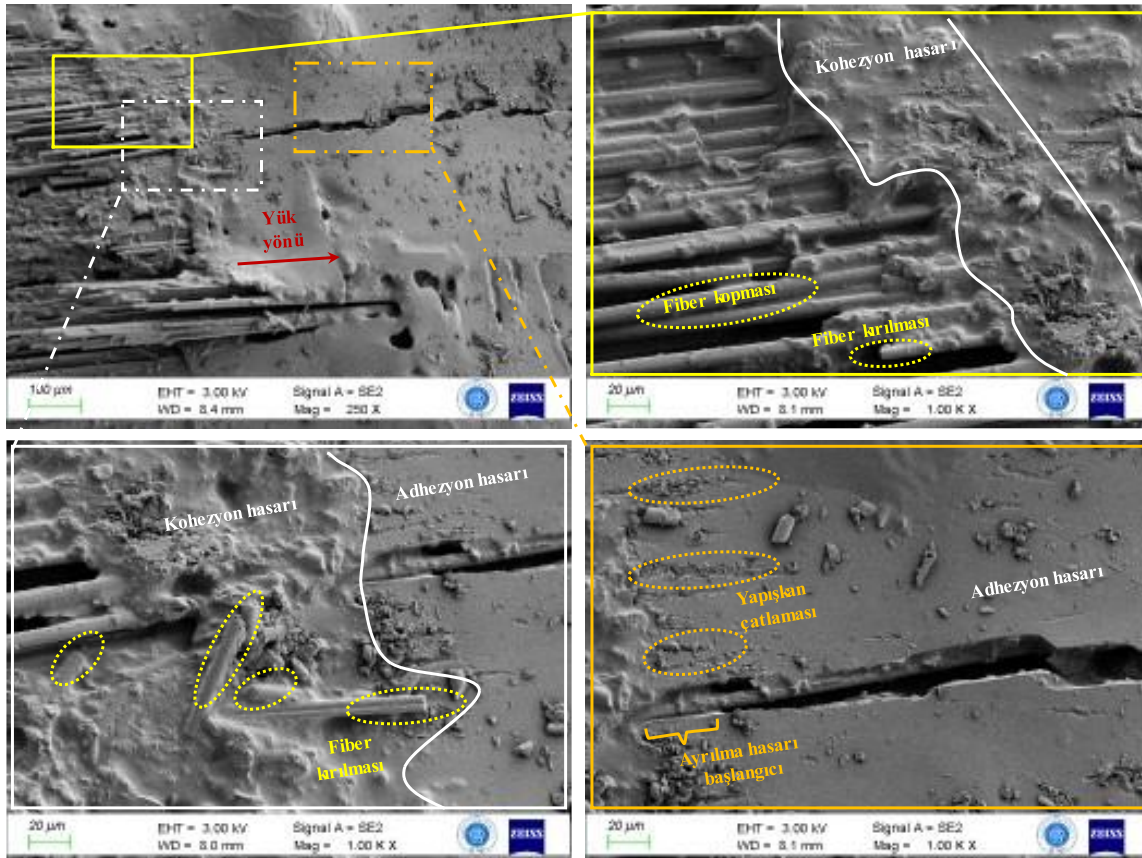
Şekil 25. Cıvatalı bağlantıların kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri

Yapışkanlı bağlantıların kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 26'da sunulmuştur. Yapışkan tabakadaki kırık lifler ve yapışkan tabakanın yapıştırılan malzeme üzerinde soyulması, hafif-fiber yırtılma (LFT) hasarını gösterir. Öte yandan, kırık yüzeyde matris tabakasıyla kaplı liflerin varlığı, adhezyon hasarının tipik bir sonucudur. Şekil 26.a'da, kırık yüzeyde bazı bölgelerde görülen LFT hasarı, yapıştırılan malzemeler arasında güçlü lokal yapışmanın olduğunu gösterir. Ancak geri kalan bölgelerde geniş ölçüde adhezyon hasarı görülmüştür. Benzer şekilde, Şekil 26.b'de hasar yaygın olarak adhezyon hasarı olarak ilerlemiş, ancak lif yüzeylerindeki ince yapışkan kalıntıları, ince tabaka kohezyon hasarının gerçekleştiğini göstermektedir.



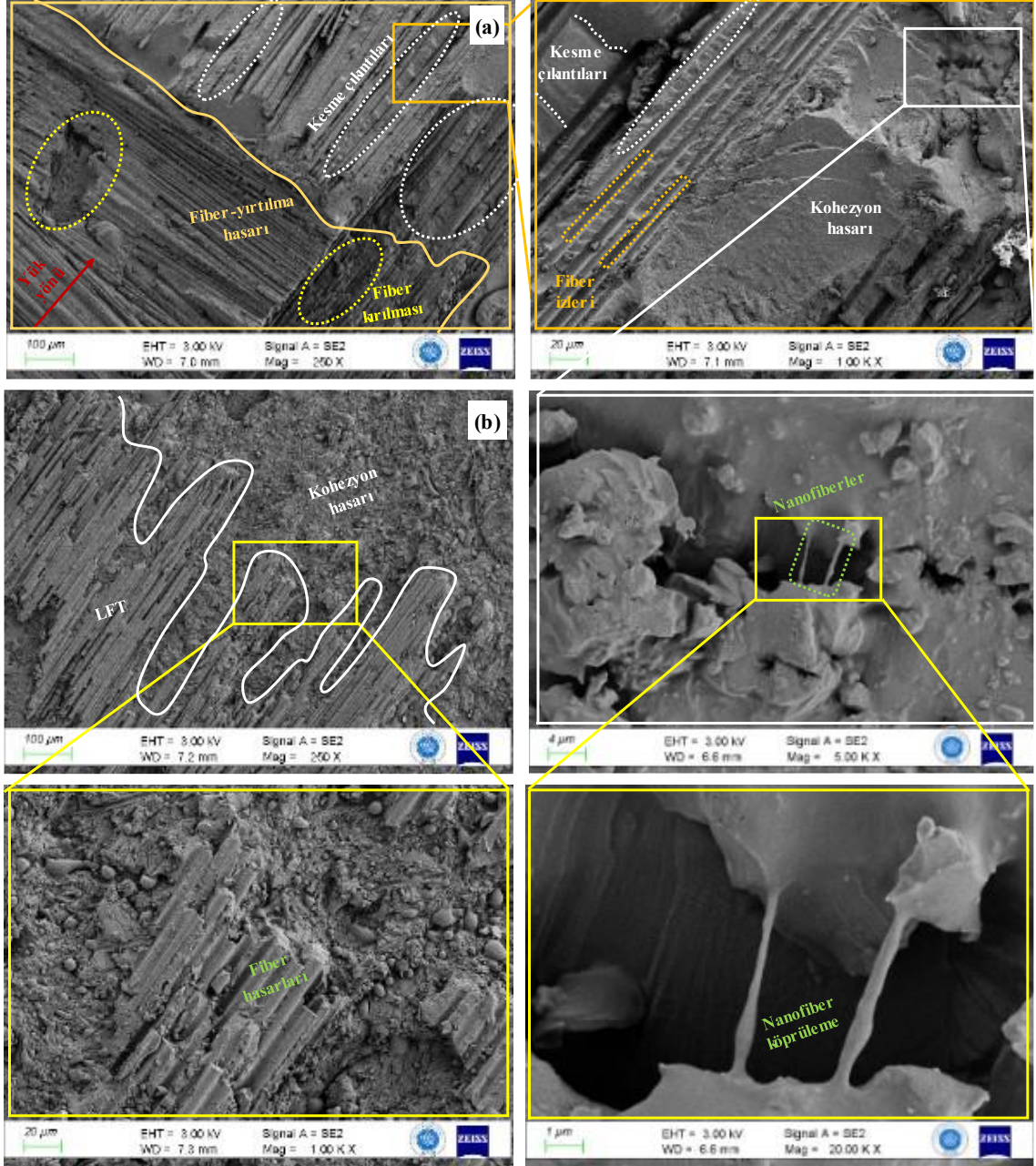
Şekil 26. Yapışkanlı bağlantıların kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri

Şekil 27, HBB bağlantıların kırık yüzeylerini göstermektedir. Kırık yüzeylerde, tipik olarak hem yapışkanlı bağlantıların hem de cıvatalı bağlantıların hasar modları ayrı ayrı görülmektedir. Fiber kopma, ayrılma ve kırılma gibi tipik cıvatalı bağlantı hasarlarına ek olarak, kompozit dış yüzeyini kaplayan yapıştırıcı tabakanın dış yüzey katmanının delaminasyonunu sınırlandırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, Şekil 27'de adhezyon-kohezyon hasarları ve yapıştırıcı çatlakları gözlemlenebilir. Adhezyon ve kohezyon hasar bölgeleri ile yapışkan çatlakları, HBB numunesinin sadece cıvatalı veya sadece yapışkanlı bağlantılara kıyasla daha yüksek bir hasar enerjisi emdiğini gösterir. Nanofiber takviyesi, hasar mekanizmalarını geciktirmiş ve HBB numunesinin yük taşıma performansını artırmıştır. Ayrıca hem cıvatalı hem de yapışkanlı bağlantı hasar mekanizmalarının ayrı ayrı varlığı, kompozit ve yapıştırıcının uygulanan yüke karşı birlikte direnç sağladığını göstermektedir [23].



Şekil 27. HBB bağlantının kırık yüzeyine ait SEM görüntüsü

Nanofiber-yapışkanlı numunelerin kırılma yüzeyleri Şekil 28'de sunulmuştur. Şekil 28.a'da, nanofiber takviyesi nedeniyle hasar genellikle kompozit boyunca ilerlemiş ve fiber yırtılma hasarı meydana gelmiştir. Ayrıca, kesme deformasyonu altında gelişen ve kohezyon hasarından kaynaklanan kesme çıkıntıları gözlemlenebilir. Şekil 28.b, LFT hasarından bağımsız olarak, çatlak nanofiber matına doğru ilerlemiş olup, bu da kohezyon hasarının LFT hasarına üstün geldiğini göstermektedir. Nanofiber matındaki kohezyon hasarı, epoksi ve nanofiber arasındaki güçlü bağlanmayı göstermektedir; ayrıca fiber kırılmaları ve hasarları kompozit hasarlarını kanıtlamaktadır ve bu da iyi yapışma mukavemeti olduğunu göstermiştir [80]. Yapışkan-kompozit arayüzü arasında hasar yayılımının yerine, kohezyon hasarı olarak meydana gelen hasarlar, nanofiber takviyeli bağlantıların yüksek enerji emiliminde en önemli neden olarak düşünülmüştür. Ayrıca, nanofiberler, nanofiber kopmalarının ve nanofiber köprüleme mekanizmaları ile yapışkanda çatlak ilerlemesini sınırlayarak bağlantı performansını artırmada önemli bir rol oynamaktadır. Benzer şekilde, nano kırıkların, nanofiber köprüleme ve kopmaların kırılma enerjisini emdiği ve çatlak yayılmasını sınırladığı gözlemlenmiştir [71].

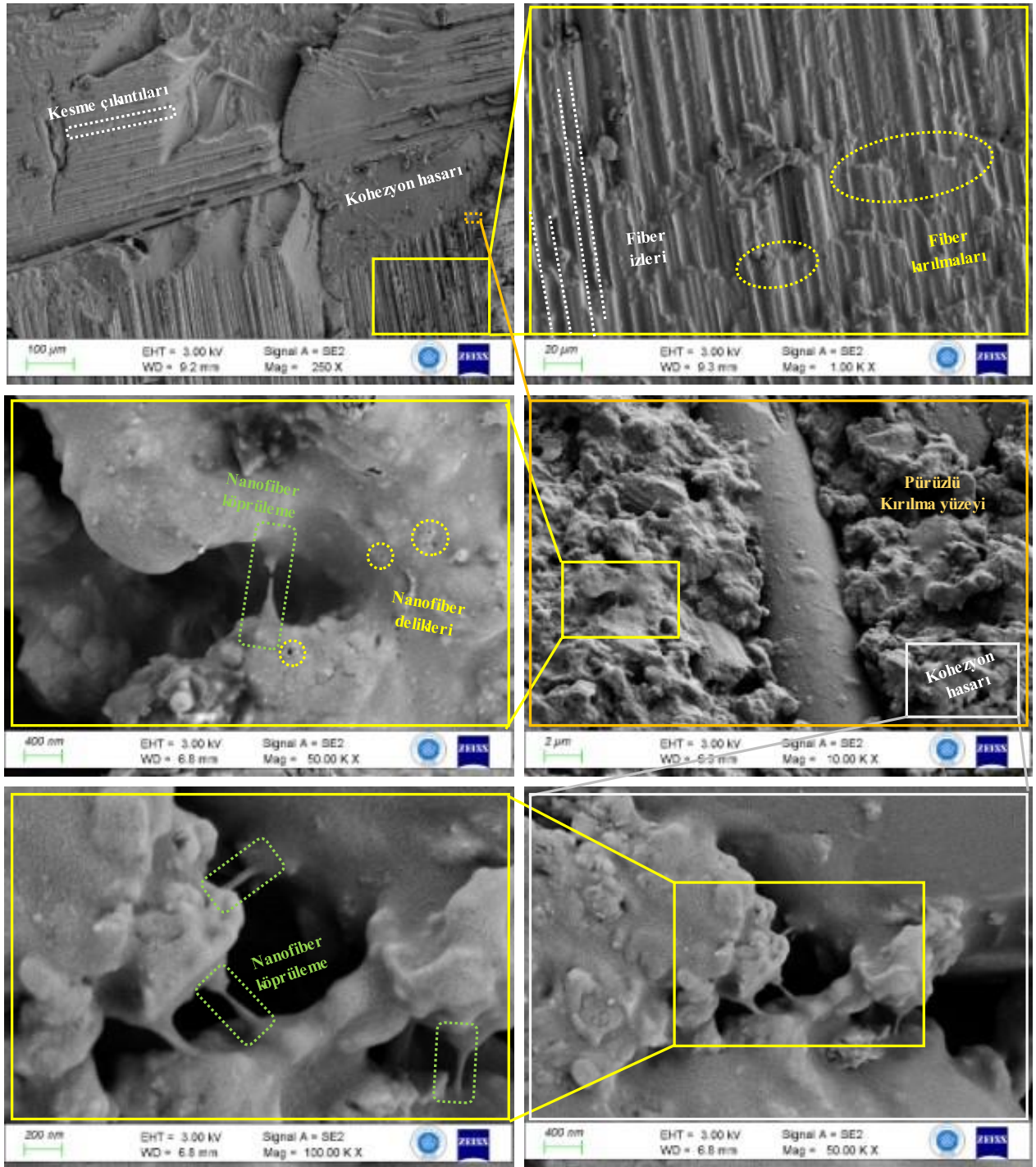


Şekil 28. Nanofiber-yapışkanlı bağlantıların kırık yüzeylerine ait SEM görüntüleri

Nanofiber-HBB bağlantı parçalarının kırık yüzeyleri Şekil 29'da sunulmuştur. Yapıştırıcı tabakada meydana gelen kesme çıkıntıları ve diğer bağlanan kompozit tarafından bırakılan fiber izleri, kompozit ve yapışkan arasındaki güçlü yapışmayı kanıtlamakta, ayrıca kırılma direncinin arttığını göstermektedir [89]. Nanofiber delikleri de nanofiber-HBB bağlantı parçalarının kırık yüzeylerinde görülmüştür. Nanofiber deliklerinin, nanofiberlerin matristen ayrılması ve çıkmasının sonucunda oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca, Şekil 29'da yüzey pürüzlülüğünün sade epoksi bağlantıya göre önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Pürüzlü kırık yüzeyleri, adhezyon ve kohezyon

hasarlarının gelişmesiyle oluşan yoğun deformasyonu göstermektedir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü, nanofiberlerin mikro çatlakların yayılmasını önlediğini ve çatlak yolunu değiştirdiğini, böylece çatlama direncinin arttığını doğrular [90]. Ayrıca, fiber kırıklarının bulunması iyi bir yapışma olduğunu göstermiştir. Ek olarak, kırık yüzeyinde bulunan nanofiber kırılması, nanofiber kopması ve nanofiber köprüleme mekanizmalarının bulunmasının yapıştırıcı tokluğunu arttırdığı düşünülmektedir [80,90]. Nanofiberlerin lif kırılması, lif kopması ve sürtünme kuvvetleri ile çatlak yayılmasını yavaşlattığı bilinmektedir [71,90,91]. Bu tokluk mekanizmalarının, nanofiber-HBB bağlantıların enerji emiliminde ve maksimum yükte, HBB bağlantıya göre daha iyi olmasının ana nedenleri olduğu sonucuna varılmıştır.





Şekil 29. Nanofiber-HBB bağlantısının kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, geri dönüştürülmüş PS nanofiber takviyesinin yapışkanlı ve HBB TTBB'ler üzerindeki etkinliğini detaylı bir şekilde açıklamıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

TTBB uygulamaları için, geri dönüştürülmüş PS nanofiberin epoksi yapıştırıcı ile kullanımı uyumlu bulunmuştur. Nanofiber-HBB bağlantısının maksimum yük değeri, nanofiber kullanılmayan HBB bağlantıya göre %10 iyileşmiştir. Benzer şekilde, yapışkanlı bağlantılarda geri dönüştürülmüş PS nanofiber maksimum yükü yaklaşık %8 artırmıştır. Ayrıca, PS modifikasyonu, yapışkanlı ve HBB numunelerinin kırılma enerjilerini sırasıyla %15 ve %5 oranında artırmıştır. Numunelerin makroskobik hasar görüntüleri, PS nanofiber modifikasyonu ile birlikte hasar modlarının daha gelişmiş modlara dönüştüğünü göstermiştir. Ayrıca, geri dönüştürülmüş PS nanofiberin yapışkanlı bağlantıya eklenmesiyle birlikte hasar mekanizmaları fiber yırtılması ve hafif fiber yırtılması hasarına kadar geniş ölçüde değişmiştir. Bu hasarlar, nanofiberin yapışma performansını artırdığını ve hasarın kompozit malzemeye yayıldığını göstermektedir. Ayrıca, SEM görüntülerinde, nanofiberlerin kopma ve köprüleme mekanizmalarının hem yapışkanlı hem de HBB bağlantılarda görüldüğü gözlenmektedir. Bu mekanizmalar, PS nanofiberlerin, bu tokluk mekanizmalarıyla malzemeye hasar yayılımını engelleyerek bağlantı performansını artırdığını göstermektedir.

Polistiren, güçlü, hafif ve düşük maliyetli bir malzemedir. Ayrıca, geri dönüştürülebilir bir malzemedir. Bu çalışma, elektro-eğirme yöntemiyle üretilen geri dönüştürülmüş PS nanofiberin avantajlı ve önemli bir malzeme olduğunu ve yapışkanlı ve HBB uygulamalarında kullanılabileceğini göstermiştir. Gelecek çalışmalar için, geri dönüştürülmüş PS, farklı PS nanoparçacık ağırlık oranları ve farklı yapıştırıcılar ile yapışkanlı ve HBB bağlantı uygulamalarında kullanılabilir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] Campbell, F. C. (2010). Structural Composite Materials. Asm International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.sc.9781627083140>
- [2] Journal Of Young Investigators. The Boeing 787 Dreamliner: Designing An Aircraft For The Future. 2020.
- [3] Fulekar, M. H. (2013). Nanotechnology: Importance And Applications. I.K. International Publishing House Pvt. Ltd.
- [4] A. Alagarasi, "Introduction To Nanomaterials," In B. Viswanathan (Ed.), Nanomaterials, Narosa Publishing House, 2009.
- [5] Ahmadian A, Shafiee A, Aliahmad N, Agarwal M. Overview Of Nano-Fiber Mats Fabrication Via Electrospinning And Morphology Analysis. *Textiles* 2021;1:206–26. <https://doi.org/10.3390/textiles1020010>.
- [6] King, M.W.; Gupta, B.S.; Guidoin, R. *Biotextiles As Medical Implants*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2013.
- [7] Cosio, M.S.; Benedetti, S.; Scampicchio, M.; Mannino, S. Electroanalysis In Food Process Control. In *Agricultural And Food Electroanalysis*; John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, Uk, 2015; Pp. 421–441.
- [8] Laudenslager, M. J., & Sigmund, W. M. (2012). Electrospinning. *Encyclopedia Of Nanotechnology*; Bhushan, B., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 769-775.
- [9] Sill Tj, Von Recum Ha. *Electrospinning: Applications In Drug Delivery And Tissue Engineering*. *Biomaterials* 2008;29:1989–2006. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.01.011>.
- [10] Megelski S, Stephens Js, Bruce Chase D, Rabolt Jf. Micro- And Nanostructured Surface Morphology On Electrospun Polymer Fibers. *Macromolecules* 2002;35:8456–66. <https://doi.org/10.1021/ma020444a>.
- [11] Baumgarten, P.K., 1971. Electrostatic Spinning Of Acrylic Microfibers. *J. Colloid Interface Sci.* 36 (1), 71–79.
- [12] Wang, T., Kumar, S., 2006. Electrospinning Of Polyacrylonitrile Nanofibers. *J. Appl. Polym. Sci.* 102 (2), 1023–1029.
- [13] Matabola, K.P., Moutloali, R.M., 2013. The Influence Of Electrospinning Parameters On The Morphology And Diameter Of Poly (Vinyledene Fluoride) Nanofibers-Effect Of Sodium Chloride. *J. Mater. Sci.* 48 (16), 5475.
- [14] Zhang, C., Yuan, X., Wu, L., Han, Y., Sheng, J., 2005. Study On Morphology Of Electrospun Poly(Vinyl Alcohol) Mats. *Eur. Polym. J.* 41 (3), 423–432.
- [15] Haider, S., Al-Zeghayer, Y., Ahmed Ali, F., Haider, A., Mahmood, A., Al-Masry, W., Imran, M., Aijaz, M., 2013. Highly Aligned Narrow Diameter Chitosan Electrospun Nanofibers. *J. Polym. Res.* 20 (4), 1–11.
- [16] Pillay, V., Dott, C., Choonara, Y.E., Tyagi, C., Tomar, L., Kumar, P., Du Toit, L.C., Ndesendo, V.M.K., 2013. A Review Of The Effect Of Processing Variables On The Fabrication Of Electrospun Nanofibers For Drug Delivery Applications. *J. Nanomater.* 2013, 22.
- [17] Sun B, Long Yz, Zhang Hd, Li Mm, Duvail JI, Jiang Xy, Et Al. *Progress In Polymer Science Advances In Three-Dimensional Nanofibrous Macrostructures Via Electrospinning* 2014;39:862–90. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.06.002>.
- [18] Jarusuwannapoom T, Hongrojjanawiwat W. European Polymer Effect Of Solvents On Electro-Spinnability Of Polystyrene Solutions And Morphological Appearance Of Resulting Electrospun Polystyrene Fibers 2005;41:409–21.

- <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2004.10.010>.
- [19] Huan S, Liu G, Han G, Cheng W, Fu Z, Wu Q, Et Al. Effect Of Experimental Parameters On Morphological, Mechanical And Hydrophobic Properties Of Electrospun Polystyrene Fibers 2015;2718–34. <https://doi.org/10.3390/ma8052718>.
- [20] Pelipenko J, Kristl J, Jankovi B, Kocbek P. The Impact Of Relative Humidity During Electrospinning On The Morphology And Mechanical Properties Of Nanofibers 2013;456:125–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2013.07.078>.
- [21] Çetin Me, Tatar Ac, Demir O, Önal G, Avcı A. Effects Of Cryogenic And Warm Temperatures On Quasi-Static Penetration Resistance Of Carbon-Aramid Hybrid Nanocomposites Reinforced Using Halloysite Nanotubes. *Mech Mater* 2021;155. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103780>.
- [22] Kaybal Hb, Ulus H, Avcı A. Seawater Aged Basalt/Epoxy Composites: Improved Bearing Performance With Halloysite Nanotube Reinforcement. *Fibers Polym* 2021;22:1643–52. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0671-0>.
- [23] Ulus H. An Experimental Assessment Of Hybrid Bolted/Bonded Basalt Fiber Reinforced Polymer Composite Joints' Temperature-Dependent Mechanical Performances By Static And Dynamic Mechanical Analyses. *Int J Adhes Adhes* 2022;114:103120. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103120>.
- [24] Kelly G. Quasi-Static Strength And Fatigue Life Of Hybrid (Bonded/Bolted) Composite Single-Lap Joints. *Compos Struct* 2006;72:119–29. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2004.11.002>.
- [25] Kweon Jh, Jung Jw, Kim Th, Choi Jh, Kim Dh. Failure Of Carbon Composite-To-Aluminum Joints With Combined Mechanical Fastening And Adhesive Bonding. *Compos Struct* 2006;75:192–8. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.013>.
- [26] Solmaz My, Topkaya T. Progressive Failure Analysis In Adhesively, Riveted, And Hybrid Bonded Double-Lap Joints. *J Adhes* 2013;89:822–36. <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.765800>.
- [27] Chowdhury N, Chiu Wk, Wang J, Chang P. Static And Fatigue Testing Thin Riveted, Bonded And Hybrid Carbon Fiber Double Lap Joints Used In Aircraft Structures. *Compos Struct* 2015;121:315–23. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.11.004>.
- [28] Udaya Prakash R, Raj Kumar G, Vijayanandh R, Senthil Kumar M, Ramganesht. Structural Analysis Of Aircraft Fuselage Splice Joint. *Iop Conf Ser Mater Sci Eng* 2016;149. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/149/1/012127>.
- [29] Kocabaş İ, Solmaz My, Gür M. Effect Of Riveting On The Joint Strength Of Adhesively Bonded Double Lap Joints. *Anadolu Univ J Sci Technol A - Appl Sci Eng* 2017;1–1. <https://doi.org/10.18038/aubtda.330521>.
- [30] El Zaroug M, Kadioglu F, Demiral M, Saad D. Experimental And Numerical Investigation Into Strength Of Bolted, Bonded And Hybrid Single Lap Joints: Effects Of Adherend Material Type And Thickness. *Int J Adhes Adhes* 2018;87:130–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.10.006>.
- [31] Patil Mkp. Experimental And Finite Element Analysis Of Adhesively Bonded Riveted Joint. *Int J Res Appl Sci Eng Technol* 2019;7:258–65. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.11042>.
- [32] Chen Y, Yang X, Li M, Wei K, Li S. Mechanical Behavior And Progressive Failure Analysis Of Riveted, Bonded And Hybrid Joints With Cfrp-Aluminum Dissimilar Materials. *Thin-Walled Struct* 2019;139:271–80. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.007>.

- [33] Selahi E. Failure Study Of Hybrid Bonded-Bolted Composite Single 2019;3:2588–97.
- [34] Bodjona K, Fielding S, Heidari-Rarani M, Lessard L. Effect Of Adhesive Layer Compliance On Strength Of Single-Lap Hybrid Bonded-Bolted Joints. *Compos Struct* 2021;261. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113324>.
- [35] Li X, Cheng X, Cheng Y, Wang Z, Huang W. Tensile Properties Of A Composite–Metal Single-Lap Hybrid Bonded/Bolted Joint. *Chinese J Aeronaut* 2021;34:629–40. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.03.042>.
- [36] Kadioglu F. Effects Of Compressive Applied Load On The Adhesive Single Lap Joint With Different Parameters. *J Adhes* 2020;00:1–22. <https://doi.org/10.1080/00218464.2020.1834390>.
- [37] Du Y, Ma Y, Wang Z, He Y, Wang Z. Assessment Of Tensile Behavior And Failure Mechanism In The Two Integrated Composite Joints. *Eng Fail Anal* 2021;129. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105628>.
- [38] Gamdani F, Boukhili R, Vadean A. Fatigue Behavior Of Hybrid Multi-Bolted-Bonded Single-Lap Joints In Woven Composite Plates. *Int J Fatigue* 2022;158:106738. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106738>.
- [39] Ekh J, Schön J, Zenkert D. Simple And Efficient Prediction Of Bearing Failure In Single Shear, Composite Lap Joints. *Compos Struct* 2013;105:35–44. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.04.038>.
- [40] Burak Kaybal H, Unuvar A, Kaynak Y, Avcı A. Evaluation Of Boron Nitride Nanoparticles On Delamination In Drilling Carbon Fiber Epoxy Nanocomposite Materials. *J Compos Mater* 2020;54:215–27. <https://doi.org/10.1177/0021998319860245>.
- [41] Jeevi G, Nayak Sk, Abdul Kader M. Review On Adhesive Joints And Their Application In Hybrid Composite Structures. *J Adhes Sci Technol* 2019;33:1497–520. <https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1543528>.
- [42] Chen Y, Li M, Yang X, Luo W. Damage And Failure Characteristics Of Cfrp/Aluminum Single Lap Joints Designed For Lightweight Applications. *Thin-Walled Struct* 2020;153:106802. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106802>.
- [43] Chen Y, Yang X, Li M, Wei K, Li S. Mechanical Behavior And Progressive Failure Analysis Of Riveted, Bonded And Hybrid Joints With Cfrp-Aluminum Dissimilar Materials. *Thin-Walled Struct* 2019;139:271–80. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.007>.
- [44] Moroni F, Pirondi A, Kleiner F. Experimental Analysis And Comparison Of The Strength Of Simple And Hybrid Structural Joints. *Int J Adhes Adhes* 2010;30:367–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.01.005>.
- [45] Lopez-Cruz P, Laliberté J, Lessard L. Investigation Of Bolted / Bonded Composite Joint Behaviour Using Design Of Experiments. *Compos Struct* 2017;170:192–201. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.084>.
- [46] Gamdani F, Boukhili R, Vadean A. Tensile Behavior Of Hybrid Multi-Bolted/Bonded Joints In Composite Laminates. *Int J Adhes Adhes* 2019;95:102426. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102426>.
- [47] Romanov Vs, Heidari-Rarani M, Lessard L. A Parametric Study On Static Behavior And Load Sharing Of Multi-Bolt Hybrid Bonded / Bolted Composite Joints. *Compos Part B* 2021;217:108897. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108897>.
- [48] Li X, Xu B, Hong Y, Luo H. A Detailed Experimental Parametric Analysis Of Bolted And Hybrid Bolted/Bonded Composite Joints. *J Appl Polym Sci* 2023;140:1–12. <https://doi.org/10.1002/app.53394>.

- [49] Zhu X, Li Y, Yu T, Zhang Z. Enhancement Of The Interlaminar Fracture Toughness And Damping Properties Of Carbon Fiber Reinforced Composites Using Cellulose Nanofiber Interleaves. *Compos Commun* 2021;28:100940. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2021.100940>.
- [50] Metin F, Avcı A. In-Plane Quasi-Static And Out-Of-Plane Dynamic Behavior Of Nano Fiber Interleaved Glass / Epoxy Composites And Finite Element Simulation 2021;270. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114085>.
- [51] Nasser J, Zhang L, Sodano H. Aramid Nanofiber Interlayer For Improved Interlaminar Properties Of Carbon Fiber / Epoxy Composites. *Compos Part B* 2020;197:108130. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108130>.
- [52] Uyaner Mesut Ay. Nano Elyaf Takviyeli Nanokompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilim Derg* 2019;1:10–9.
- [53] Scarselli G, Corcione C, Nicassio F, Maffezzoli A. Adhesive Joints With Improved Mechanical Properties For Aerospace Applications. *Int J Adhes Adhes* 2017;75:174–80. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.03.012>.
- [54] Ekrem M, Ataberk N, Avcı A, Akdemir A. Improving Electrical And Mechanical Properties Of A Conductive Nano Adhesive. *J Adhes Sci Technol* 2017;4243:0. <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1229881>.
- [55] Yazici Me. Mechanical Properties Of Aluminum Bonded Joints Reinforced With Functionalized Boron Nitride And Boron Carbide Nanoparticles 2022. <https://doi.org/10.1177/14644207211056020>.
- [56] Rao Q, Huang H, Ouyang Z, Peng X. Synergy Effects Of Multi-Walled Carbon Nanotube And Graphene Nanoplate Filled Epoxy Adhesive On The Shear Properties Of Unidirectional Composite Bonded Joints. *Polym Test* 2020;82:106299. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106299>.
- [57] May M, Wang Hm, Akid R. International Journal Of Adhesion & Adhesives Effects Of The Addition Of Inorganic Nanoparticles On The Adhesive Strength Of A Hybrid Sol – Gel Epoxy System. *Int J Adhes Adhes* 2010;30:505–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.05.002>.
- [58] Ghabezi P, Farahani M. Composite Adhesive-Bonded Joint Reinforcement By Incorporation Of Nano-Alumina Particles 2017;47:231–9. <https://doi.org/10.22059/jcamech.2017.223354.124>.
- [59] Ashofteh Rs, Khoramishad H. International Journal Of Adhesion And Adhesives The Influence Of Hygrothermal Ageing On Creep Behavior Of Nanocomposite Adhesive Joints Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes And Graphene Oxide Nanoplatelets. *Int J Adhes Adhes* 2019;94:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.03.017>.
- [60] Çakır Mv, Erkiş A, Ahmed Bf. Graphene Nanoparticle Effect On Flexural And Shear Behaviors Of Adhesively Bonded Single Lap Joints Of Gfrp Composites. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2021;43:1–11. <https://doi.org/10.1007/S40430-021-02920-X>.
- [61] Dhilipkumar T, Rajesh M. Enhancing Shear Strength And Structural Stiffness Of Composite Joint With Carbon Nanotube Reinforced Adhesive Through Co-Bonding Technique. *J Adhes Sci Technol* 2022;36:2143–57. <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.2002066>.
- [62] Çakır Mv. Mwcnt , Nano-Silica , And Nano-Clay Additives Effects On Adhesion Performance Of Dissimilar Materials Bonded Joints 2021:5880–92. <https://doi.org/10.1002/Pc.26268>.
- [63] Najimehr H, Shariati M. Investigating On The Influence Of Multi-Walled Carbon

- Nanotube And Graphene Nanoplatelet Additives On Residual Strength Of Bonded Joints Subjected To Partial Fatigue Loading 2022:1–15.  
<https://doi.org/10.1002/App.52069>.
- [64] Saraç İ, Adin H, Temiz Ş. Powders On Strength Of Single Lap Joints Bonded With Epoxy Adhesive 2019;166:472–82.  
<https://doi.org/10.1016/J.Compositesb.2019.02.007>.
- [65] Quan D, Carolan D, Rouge C, Murphy N, Ivankovic A. Carbon Nanotubes And Core – Shell Rubber Nanoparticles Modified Structural Epoxy Adhesives. *J Mater Sci* 2017;52:4493–508. <https://doi.org/10.1007/S10853-016-0695-9>.
- [66] Jakubinek Mb, Ashra B, Martinez-Rubi Y, Rahmat M, Yourdkhani M, Su K, Et Al. International Journal Of Adhesion And Adhesives Nanoreinforced Epoxy And Adhesive Joints Incorporating Boron Nitride Nanotubes 2018;84:194–201.  
<https://doi.org/10.1016/J.Ijadhadh.2018.03.008>.
- [67] Hickman Gjs, Wallace Lf, Burks Va, Hsiao Kt. Effects Of Carbon Nanofiber Reinforcements In Adhesive Bonding Of Cfrp. *Int Sampe Tech Conf* 2012.
- [68] Ekrem M, Avcı A. Effects Of Polyvinyl Alcohol Nanofiber Mats On The Adhesion Strength And Fracture Toughness Of Epoxy Adhesive Joints. *Compos Part B Eng* 2018;138:256–64.  
<https://doi.org/10.1016/J.Compositesb.2017.11.049>.
- [69] Razavi Smj, Neisiany Re, Ayatollahi Mr, Ramakrishna S, Khorasani Sn, Berto F. Fracture Assessment Of Polyacrylonitrile Nanofiber-Reinforced Epoxy Adhesive. *Theor Appl Fract Mech* 2018;97:448–53.  
<https://doi.org/10.1016/J.Tafmec.2017.07.023>.
- [70] Neisiany Re, Khorasani Sn, Lee Jky, Naeimirad M, Ramakrishna S. Interfacial Toughening Of Carbon/Epoxy Composite By Incorporating Styrene Acrylonitrile Nanofibers. *Theor Appl Fract Mech* 2018;95:242–7.  
<https://doi.org/10.1016/J.Tafmec.2018.03.006>.
- [71] Polat S, Avcı A, Ekrem M. Fatigue Behavior Of Composite To Aluminum Single Lap Joints Reinforced With Graphene Doped Nylon 66 Nanofibers. *Compos Struct* 2018;194:624–32. <https://doi.org/10.1016/J.Compstruct.2018.04.043>.
- [72] Gude Mr, Prolongo Sg, Ureña A. Toughening Effect Of Carbon Nanotubes And Carbon Nanofibres In Epoxy Adhesives For Joining Carbon Fibre Laminates. *Int J Adhes Adhes* 2015;62:139–45.  
<https://doi.org/10.1016/J.Ijadhadh.2015.07.011>.
- [73] Esenoğlu G, Barisik M, Tanoğlu M, Et Al. Improving Adhesive Behavior Of Fiber Reinforced Composites By Incorporating Electrospun Polyamide-6,6 Nanofibers In Joining Region. *Journal Of Composite Materials*. 2022;56(29):4449-4459. [doi:10.1177/00219983221133478](https://doi.org/10.1177/00219983221133478)
- [74] Maafa, I. (2021). Pyrolysis of Polystyrene Waste: A Review. *Polymers*, 13(2), 225. <https://doi.org/10.3390/polym13020225>
- [75] Bhadra J, Popelka A, Abdulkareem A, Ahmad Z. Nanocomposites For Fl Exible Gas Sensors 2019:12496–506. <https://doi.org/10.1039/C9ra00936a>.
- [76] Bai Q, Jin X, Yang J, Qi X, Wang Y. Constructing Network Structure Of Graphene Nanoplatelets / Carbon Nano Fi Bers In Polystyrene And The Resultant Heat Resistance , Thermal And Conductive Properties. *Compos Part A* 2019;117:299–307. <https://doi.org/10.1016/J.Compositesa.2018.12.002>.
- [77] Okparaocha Fj, Ipeaiyeda Ar, Makhatha E, Alayande So. Morphology And Functional Properties Of Electrospun Expanded Polystyrene ( Eps )/ Reduced Graphene Oxide ( Rgo ) Nanofiber Composite. *Fullerenes, Nanotub Carbon Nanostructures* 2019;27:939–46.

- <https://doi.org/10.1080/1536383x.2019.1666365>.
- [78] Yang G, Yang T, Yuan W, Du Y. The Influence Of Surface Treatment On The Tensile Properties Of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites-Bonded Joints. *Compos Part B Eng* 2019;160:446–56. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.095>.
- [79] Jouyandeh M, Moini Jazani O, Navarchian Ah, Saeb Mr. High-Performance Epoxy-Based Adhesives Reinforced With Alumina And Silica For Carbon Fiber Composite/Steel Bonded Joints. *J Reinf Plast Compos* 2016;35:1685–95. <https://doi.org/10.1177/0731684416665248>.
- [80] Ulus H, Burak H, Erdem N, Caner A, Ekrem M. An Experimental Evaluation On The Dynamic Response Of Water Aged Composite / Aluminium Adhesive Joints : Influence Of Electrospun Nanofibers Interleaving. *Compos Struct* 2022;280:114852. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114852>.
- [81] Li X, Cheng X, Guo X, Liu S, Wang Z. Tensile Properties Of A Hybrid Bonded/Bolted Joint: Parameter Study. *Compos Struct* 2020;245:112329. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112329>.
- [82] Sachse R, Pickett Ak, Middendorf P. Analysis Of Crack-Arrest Design Features For Adhesively Bonded Composite Joints: An Experimental And Numerical Study. *Compos Struct* 2021;274:114301. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114301>.
- [83] Çetkin E. Determination Of The Effects Of Gnp And Nano-Fibers On Bonding Joints. *J Manuf Process* 2021;71:27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.09.013>.
- [84] On Sy, Kim Ms, Kim Ss. Effects Of Post-Treatment Of Meta-Aramid Nanofiber Mats On The Adhesion Strength Of Epoxy Adhesive Joints. *Compos Struct* 2017;159:636–45. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.016>.
- [85] Zhang H, Zhang L, Liu Z, Zhu P. Research In Failure Behaviors Of Hybrid Single Lap Aluminum-Cfrp (Plain Woven) Joints. *Thin-Walled Struct* 2021;161:107488. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107488>.
- [86] D5573. D5573 - Standard Practice For Classifying Failure Modes In Fiber-Reinforced-Plastic ( Frp ). *Astm Stand* 1999;15:3–5.
- [87] El-Sisi A, Hassanin A, Alsharari F, Galustanian N, Salim H. Failure Behavior Of Composite Bolted Joints: Review. *Civileng* 2022;3:1061–76. <https://doi.org/10.3390/Civileng3040060>.
- [88] Vietri U, Guadagno L, Raimondo M, Vertuccio L, Lafdi K. Nanofilled Epoxy Adhesive For Structural Aeronautic Materials. *Compos Part B Eng* 2014;61:73–83. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.032>.
- [89] Ulus H, Kaybal Hb, Eskizeybek V, Avcı A. Significantly Improved Shear, Dynamic-Mechanical, And Mode Ii Fracture Performance Of Seawater Aged Basalt/Epoxy Composites: The Impact Of Halloysite Nanotube Reinforcement. *Eng Sci Technol An Int J* 2021;24:1005–14. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.005>.
- [90] Razavi Smj, Neisiany Re, Khorasani Sn, Ramakrishna S, Berto F. Effect Of Neat And Reinforced Polyacrylonitrile Nanofibers Incorporation On Interlaminar Fracture Toughness Of Carbon/Epoxy Composite. *Theor Appl Mech Lett* 2018;8:126–31. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2018.02.008>.
- [91] Ahmadloo E, Gharehaghaji Aa, Latifi M, Mohammadi N, Saghafi H. How Fracture Toughness Of Epoxy-Based Nanocomposite Is Affected By Pa66 Electrospun Nanofiber Yarn. *Eng Fract Mech* 2017;182:62–73. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.07.011>.