



**FİBER TAKVİYELİ YAPIŞTIRICIYLA
BİRLEŞTİRİLMİŞ YAPIŞTIRMA
BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
BELİRLENMESİ**

Resül ŞAHİN

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2026

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**FİBER TAKVİYELİ YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ YAPIŞTIRMA
BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Resül ŞAHİN

Danışman: Prof. Dr. Salih AKPINAR

ERZURUM, 2026

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

**FİBER TAKVİYELİ YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ YAPIŞTIRMA
BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Prof. Dr. Salih AKPINAR danışmanlığında Resül ŞAHİN tarafından hazırlanan bu çalışma 27.03.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **Oy birliği ile (5/5)** kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Salih AKPINAR <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	<i>İmza</i>
Üye:	Prof. Dr. Adnan ÖZEL <i>Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi</i>	<i>İmza</i>
Üye:	Prof. Dr. Ahmet GÜRSES <i>Atatürk Üniversitesi</i>	<i>İmza</i>
Üye:	Prof. Dr. İlker KAZAZ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	<i>İmza</i>
Üye:	Prof. Dr. Ahmet ÇALIK <i>Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi</i>	<i>İmza</i>

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. İlker KAZAZ
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Erzurum Teknik Üniversitesi BAP tarafından 2023/005 numaralı proje ile desteklenmiştir.

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etik ilkelere uygun davrandığımı ve tezin hazırlanması sürecinde üretken yapay zekâ programlarından, içeriğin ve sonuçların özgünlük sorumluluğunun tarafıma ait olması ve çalışmanın bilimsel niteliğini etkilemeyecek düzeyde, yalnızca yardımcı bir araç olarak sınırlı düzeyde destek alındığını beyan ederim.

27.03.2025

İmzası

Resül ŞAHİN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana rehberlik eden, engin bilgi ve tecrübesiyle her aşamada yol gösteren; sabrı, anlayışı ve desteğiyle bu süreci daha anlamlı kılan danışmanım Sayın Prof. Dr. Salih AKPINAR'a en derin saygı ve şükranlarımı sunarım. Onun akademik birikimi ve vizyoner yaklaşımı, tezimin şekillenmesinde ve başarıyla tamamlanmasında belirleyici bir rol oynamıştır.

Ayrıca, kimyasal işlemler sırasında engin bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, laboratuvar imkânlarını kullanmamıza olanak sağlayarak çalışmamıza önemli katkılarda bulunan Atatürk Üniversitesi Eğitim Fakültesi Kimya Eğitimi Anabilim Dalı Başkanı Sayın Prof. Dr. Ahmet GÜRSES ve Dr. İclal AVİNÇ AKPINAR'a teşekkür ederim. Tezime değerli bilgiler ve yapıcı önerilerle katkıda bulunan, tezimin kalitesini artırmada büyük rol oynayan ve desteklerini esirgemeyen Tez İzleme Komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. İlker KAZAZ ve Sayın Prof. Dr. Ahmet ÇALIK'a en içten şükranlarımı sunarım.

Bu tezde, süreç boyunca manevi desteğini daima hissettiğim ve her zaman yanımda olan aileme, özellikle babama, anneme, ablama ve abilerime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam, 2023/005 numaralı BAP projesi kapsamında finansal destek sağlayan Erzurum Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim. Ayrıca tez sürecimde sundukları altyapı olanakları ve verdikleri desteklerden dolayı Erzurum Teknik Üniversitesi'nin değerli yöneticilerine, akademik ve idari personeline şükranlarımı sunarım.

Resül ŞAHİN

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FİBER TAKVİYELİ YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Resül ŞAHİN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Salih AKPINAR

Günümüzde hızla gelişen teknolojiler, özellikle havacılık ve ileri mühendislik uygulamaları kapsamında, yüksek performanslı malzemelere ve yenilikçi birleştirme yöntemlerine olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu bağlamda yapıştırıcı ile birleştirme yöntemleri, kompozit malzemelerin bütünleştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında, yapıştırıcı sistemlerinin karbon fiberlerle takviye edilmesi ve söz konusu fiberlere uygulanan çeşitli kimyasal yüzey modifikasyonlarının bağlantı dayanımı üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiştir. Araştırma kapsamında, sert ve esnek karakterde iki farklı yapıştırıcı sistemine ağırlıkça %0,5, 1, 2 ve 3 oranlarında karbon fiber ilavesi yapılmış; bu fiberlere aseton (C_3H_6O), sülfürik asit (H_2SO_4), nitrik asit (HNO_3), hidroklorik asit (HCl) ve nitrik asit/hidroklorik asit (HNO_3/HCl) karışımıyla yüzey işlemleri uygulanmıştır. Ayrıca, cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) ile 15, 30, 60 ve 90 mg/L konsantrasyonlarında adsorpsiyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Optimum üretim parametreleriyle oluşturulan tek tesirli bindirme bağlantıları üzerinde yapılan mekanik testler sonucunda, hem kimyasal yüzey modifikasyonlarının hem de CTAB adsorpsiyonunun bağlantı dayanımında %4 ile %126 arasında değişen oranlarda iyileşme sağladığı belirlenmiştir. FTIR ve SEM analizleri, fiber yüzey morfolojisindeki değişimlerin bağlantı performansına olan etkilerini değerlendirmede kullanılmış olup, özellikle 30–60 mg/L CTAB konsantrasyonlarının en yüksek performansı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karbon fiber, Yapıştırıcı, Kimyasal yüzey işlemi, Bağlantı Dayanımı, CTAB adsorpsiyonu, Yüzey modifikasyonu.

ABSTRACT

PhD THESIS

DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF ADHESIVE JOINTS REINFORCED WITH FIBER-REINFORCED ADHESIVES

Resül ŞAHİN

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Salih AKPINAR

The rapid advancement of technology, particularly in aerospace and other high-tech industries, has intensified the demand for high-performance materials and innovative joining techniques. Adhesive bonding has emerged as a crucial method for assembling composite structures in response to these challenges. This doctoral research investigates the reinforcement of adhesives with carbon fibers and examines the effects of chemical surface treatments on the mechanical performance of adhesive joints. In this study, two types of adhesives-rigid and flexible-were modified by incorporating carbon fibers at weight fractions of 0.5%, 1%, 2%, and 3%. These fibers underwent surface treatments using acetone (C_3H_6O), sulfuric acid (H_2SO_4), nitric acid (HNO_3), hydrochloric acid (HCl), and a nitric acid/hydrochloric acid (HNO_3/HCl) mixture. Additionally, cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) adsorption was performed at concentrations of 15, 30, 60, and 90 mg/L. Mechanical tests conducted on single-lap joints fabricated under optimal processing parameters revealed that both chemical surface modifications and CTAB adsorption enhanced the joint strength by 4% to 126%. FTIR and SEM analyses were employed to characterize the morphological changes in fiber surfaces and to assess their influence on bond performance. The findings indicate that CTAB concentrations between 30 and 60 mg/L yield the most significant improvements in mechanical performance.

Keywords: Carbon fiber, Adhesive bonding, Surface modification, Joint Strength, CTAB adsorption.

İÇİNDEKİLER

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2.1. Yapıştırıcılar ve Özellikleri	2
1.1.1. Soğuma ile oluşan yapıştırıcılar	2
1.1.2. Kimyasal reaksiyon ile oluşan yapıştırıcılar	3
2.2. Fiberler ve Özellikleri	5
1.2.1. Fiber Türleri	6
2.3. Yapışma Mekanizmaları	8
2.4. Yapıştırma Bağlantıları.....	12
2.5. Bağlantılarda Oluşan Gerilme ve Hasar Türleri	15
2.6. Yapıştırma Bağlantılarının Performansını Etkileyen Parametreler	16
2.7. Yapıştırıcıların Mekanik Özellikleri ve Yapısal Davranışları	17
1.7.1. Mekanik testler	18
1.7.2. Yapıştırma bağlantılarında darbe dayanımının belirlenmesi.....	26
2.8. Kimyasal Yüzey İşlemleri	28
1.8.1. CTAB ile yüzey modifikasyonu.....	30
2.9. Yapıştırma Bağlantılarında Ara Yüzey Karakterizasyonu	31
1.9.1. Kohezyon ve adezyon işleri: ara yüzeylerin enerji analizi.....	33
1.9.2. Analitik yöntemler.....	34
2. KAYNAK ÖZETLERİ	37
2.1. Partikül veya Fiber Katkılı Yapıştırma Bağlantıları ve Kompozitler	37
2.2. Yüzey İşlemi Uygulanmış Partikül veya Fiber Katkılı Yapıştırma Bağlantıları ve Kompozitler	44
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	52

3.1. Yapıştırılan Malzemelerin Yüzeylerinin Temizlenmesi.....	54
3.2. Fiber Yüzey İşlemleri	54
3.3. İşlenmiş Fiberlerin Yapıştırıcıya Eklenmesi ve Yapıştırma Bağlantılarının Oluşturulması.....	55
3.4. Mekanik Testler	57
3.5. Kırılma Yüzeylerinin Mikroskopik ve Kimyasal Analizi	59
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	61
4.1. Karbon Fiberlerin Yüzey Modifikasyonlarının Bağlantı Mekanik Performansına Etkileri	62
4.2. Kimyasal Yüzey İşlemleri Sonrası Karbon Fiberler ile Güçlendirilmiş Kompozit Yapıştırıcıların ve Yapıştırma Bağlantılarının Morfolojileri.....	65
4.3. Karbon Fiber Takviyeli ve Takviyesiz Kompozit Yapıştırıcıların FTIR Spektrallerinin Analizi.....	70
4.4. Karbon Fiberlerin Kimyasal Modifikasyonu ve CTAB Adsorpsiyonunun Bağlantı Performansına Etkisi.....	72
4.5. Kimyasal Yüzey Modifikasyonu ve CTAB Adsorpsiyonunun Karbon Fiber ve Yapıştırıcı Yüzeyleri Üzerindeki Morfolojik Etkileri	76
4.6. Karbon Fiber Takviyeli Yapıştırıcıların FTIR Spektrallerinin Analizi: Kimyasal Yüzey Modifikasyonları Sonrası	80
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	83
5.1. Sonuç	83
5.2. Öneriler	86
KAYNAKÇA	87
TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR.....	92
1. Makaleler.....	92

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcıların mekanik özellikleri (Avinc Akpınar, 2023)	54
Tablo 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler.....	58
Tablo 3.3. CTAB işlemi yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler	59
Tablo 4.1. Karbon fiber takviyeli kompozit yapıştırıcı kullanılarak elde edilen birleştirmelerin ortalama hasar yükleri	63



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	a) EVA sıcak yapıştırıcısının otomasyon uygulaması, b) tekstil uygulamaları için kullanılan poliamid sıcak yapıştırıcısı (Anonim, 2024a; Anonim, 2024b).....	3
Şekil 1.2.	Bir Poliimid'in dönüşümünün şematik gösterimi	5
Şekil 1.3.	Temas açısını şematik gösterimi.....	9
Şekil 1.4.	Elektrostatik yapışma teorisinin şematik gösterimi	10
Şekil 1.5.	Mekanik kilitleme teorisinin şematik gösterimi	10
Şekil 1.6.	Difüzyon teorisini şematik gösterimi a) yapıştırıcının b) yapıştırılan malzemenin moleküllerinin iç difüzyonu (Ghanem ve Lang 2017).....	11
Şekil 1.7.	Islatma teorisini şematik gösterimi (Anonim, 2024c)	12
Şekil 1.8.	Zayıf sınır tabaka modeli 1) hava boşlukları; 2 ve 3) toz, kir gibi yabancı maddeler; 4'ten 7'ye ise ortam ve bileşenler arasındaki reaksiyonlar (Ghanem ve Lang 2017)	12
Şekil 1.9.	Yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantı türleri a) tek tesirli bindirme, b) çift tesirli bindirme, c) boyun bindirme, d) açılı bindirme, e) kademeli (teraslama), f) tek takviyeli bindirme, g) çift takviyeli bindirme, h) alın bağlantı, i) silindirik, j) soyulma (Adams 1984).....	13
Şekil 1.10.	Perçin, kaynak ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantıya ait gerilim dağılımı	14
Şekil 1.11.	Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme türleri a) çekme, b) kayma, c) soyulma ve d) ayrılma (Adams 2021).....	15
Şekil 1.12.	Alın bağlantının şematik gösterimi (Pocius 2012)	19
Şekil 1.13.	ASTM D1002 bindirme kesme numunesinin diyagramı	20
Şekil 1.14.	Bindirme uzunluğu boyunca deforme olmuş şekil ve gerilmeler (Özer 2018)	21
Şekil 1.15.	TAST (Thick Adherend Shear Test) deney numunesi.....	22
Şekil 1.16.	T-soyulma test numunesi	22
Şekil 1.17.	Yapıştırıcıyla birleştirilmiş yapıştırma bağlantısına uygulanan üç nokta eğme testi şeması	23
Şekil 1.18.	Darbe test cihazı (Ghanbari vd. 2015)	24
Şekil 1.19.	Blok darbe testleri için numunenin konfigürasyonu ve boyutları.....	26

Şekil 1.20.	Yapıştırıcı bağlantılar için darbe kama soyma testi (ISO 11343).....	28
Şekil 1.21.	Lif yüzeyinin aktivasyonu ve reçine ile etkileşim mekanizmaları a) asitle temizleme b) silanlama c) oksidasyon d) plazma oksidasyonu	30
Şekil 1.22.	Tipik bir FTIR spektrumu (Rahmanian, 2013).....	35
Şekil 2.1.	(a) İşlenmemiş KF'nin ve (b) yüzeyi modifiye edilmiş KF'nin epoksi reçineye göre ıslatılabilirliğinin şeması (Ansari, 2023).....	44
Şekil 2.2.	Yapıştırıcı ile temas etmemiş bir fiber (Behera, 2023).....	51
Şekil 3.1.	Çalışmanın özeti ve yapılan aşamaların şematik gösterimi	53
Şekil 3.2.	a) Zımparalanmış alüminyum parçalar; b) NaOH çözeltisi ile oksit tabakalarının kaldırılması; c) Oksit tabakaları kaldırılmış alüminyum parçalar.....	54
Şekil 3.3.	a) Kırpılmış karbon elyaf (5-7 mm), b) Ultrasonik banyo ile kimyasal yüzey işlemi, c) Fırın kurutma işlemi, d) Beş farklı kimyasal yüzey işlemi uygulanmış elyaf.....	55
Şekil 3.4.	Yapıştırıcıya karbon fiber ekleme yönteminin şematik gösterimi.....	56
Şekil 3.5.	a) Tek tesirli bağlantı geometrisi, b) Numune üretim kalıbı, c)Üretimi yapılmış numuneler.....	57
Şekil 3.6.	a) Üç nokta eğme testi uygulaması b) Darbe testi uygulaması.....	58
Şekil 3.7.	a) Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) cihazı, b) Scanning Electron Microscope (SEM) cihazı.....	60
Şekil 4.1.	Çalışmada sunulan aşamaların tartışmaların şematik olarak gösterimi	62
Şekil 4.2.	Farklı büyütme seviyelerinde asetonsuz temizlenmiş (a) ve asetonla temizlenmiş (b) karbon fiberlerin SEM görüntüleri	66
Şekil 4.3.	Farklı kimyasal yüzey modifikasyonları uygulanmamış karbon fiberlerin SEM görüntüleri: a) aseton, b) sülfürik asit, c) nitrik asit, d) hidroklorik asit, e) nitrik asit/hidroklorik asit	67
Şekil 4.4.	Karbon fiber katkılı ve katkısız DP460 ve DP190 yapıştırıcıların SEM görüntüleri.....	68
Şekil 4.5.	Ağırlıkça %1 karbon fiber katkılı ve katkısız DP460 ve DP190 yapıştırıcı bağlantı yüzeylerindeki hasar bölgeleri	68
Şekil 4.6.	Farklı kimyasal yüzey işlemleri uygulanmış ağırlıkça %1 karbon fiber katkılı ve katkısız DP460 yapıştırıcı bağlantı yüzeylerindeki hasar bölgeleri	69

Şekil 4.7.	Farklı kimyasal yüzey işlemleri uygulanmış ağırlıkça %1 karbon fiber katkılı ve katkısız DP190 yapıştırıcı bağlantı yüzeylerindeki hasar bölgeleri	69
Şekil 4.8.	Saf DP460 yapısal yapıştırıcının ve yüzey modifikasyonu uygulanmamış ve kimyasal yüzey modifikasyonuna tabi tutulmuş karbon fiber içeren yapıştırıcı kompozitlerin FTIR spektralleri	70
Şekil 4.9.	Saf DP190 yapısal yapıştırıcının ve yüzey modifikasyonu uygulanmamış ve kimyasal yüzey modifikasyonuna tabi tutulmuş karbon fiber içeren yapıştırıcı kompozitlerin FTIR spektralleri	71
Şekil 4.10.	Karbon fiber takviyeli yapıştırıcı kullanılarak elde edilen bağlantıların ortalama eğilme kopma yükleri	73
Şekil 4.11.	SEM görüntüleri, asetonla temizlenmemiş (a) ve hem asetonla temizlenmiş hem de CTAB ile işlenmiş (b) karbon fiberler.....	74
Şekil 4.12.	Karbon fiber takviyeli yapıştırıcı kullanılarak elde edilen bağlantıların ortalama kırılma enerjileri	75
Şekil 4.13.	Karbon fiberlerin SEM görüntüleri, a) işlenmemiş KF, b) KF+C30, c) KF+A+S+C30, d) KF+A+N+C30, e) KF+A+H+C30, f) KF+A+N/H+C30	77
Şekil 4.14a.	Karbon fiber katkılı yapıştırıcıların SEM görüntüleri, a) işlenmemiş KF, b) KF+C30, c) KF+A+S+C30, d) KF+A+N+C30, e) KF+A+H+C30.....	78
Şekil 4.14b.	Karbon fiber katkılı yapıştırıcıların SEM görüntüsü f) KF+A+N/H+C30	79
Şekil 4.15.	Karbon fiberlere uygulanan saf ve farklı konsantrasyonlardaki CTAB adsorpsiyonu ile yapıştırma bağlantılarının hasar sonrası kırılma yüzeyleri	80
Şekil 4.16.	Farklı kimyasal yüzey işlemlerine tabi tutulan ve ardından %30 konsantrasyonunda CTAB ile adsorbe edilen yapıştırma bağlantılarının hasar sonrası kırılma yüzeyleri	80
Şekil 4.17.	Farklı CTAB konsantrasyonlarına adsorpsiyon uygulanmış ve işlem görmemiş karbon fiberlerin FTIR spektralleri.....	82
Şekil 4.18.	Asetonla temizlenmiş, farklı asitlerle ve hidroklorik asit/nitrik asit karışımıyla modifiye edilmiş, ardından 30 mg/L CTAB konsantrasyonunda adsorpsiyon uygulanmış karbon fiberlerin FTIR spektralleri.....	82

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

190-ie-a-1	Numune kodu: yapıştırıcı + işlem + solvent + katkı oranı
a	Aseton
A	Moleküler çift başına düşen kesit alanı
AA2024-T3	Uçak sınıfı alüminyum alaşımı
ATR	Attenuated Total Reflectance (FT-IR tekniği)
C ₃ H ₆ O	Aseton'un kimyasal formülü
CTAB	cetyl trimethyl ammonium bromide (yüzey aktif madde)
D	Difüzyon katsayısı
de	Doğrudan ekleme
DP190	Esnek yapısal yapıştırıcı (3M ürünü)
DP460	Sert yapısal yapıştırıcı (3M ürünü)
E (MPa)	Elastik modül (Young modülü)
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
G (MPa)	Kayma modülü
GNP	Graphene Nanoplatelet (Grafen nanoparçacıklar)
h	Hidroklorik asit
H ₂ SO ₄	Sülfürik asit
HCl	Hidroklorik asit
HNO ₃	Nitrik asit
Instron 5982	Üniversal mekanik test cihazı (çekme-kayma testi)
ie	İşlemli ekleme
KEY / EKEY	Kohezif enerji yoğunluğu / eşdeğer kohezif enerji yoğunluğu
KF	Karbon fiber
n	Nitrik asit
n/h	Nitrik asit / Hidroklorik asit karışımı
NaOH	Sodyum hidroksit
s	Sülfürik Asit
s, k, h	Sıvı, katı, hava (temas ortamları)
SEM	Scanning Electron Microscope
SLJ	Single Lap Joint (Tek bindirmeli bağlantı)
t	Zaman

V	Molar hacim
W	İş (enerji)
W_A	Adezyon işi
W_{Koh}	Kohezyon işi
Z	Koordinasyon sayısı
γ (J/m ²)	Yüzey serbest enerjisi
$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{12}$	Malzeme 1, malzeme 2 ve ara yüzey enerjileri
γ_d / γ_p	Dispersif ve polar bileşenler (yüzey enerjisinin alt bileşenleri)
δ	Çözünürlük parametresi
ΔG	Serbest enerji değişimi
ϵ_t (%)	Kopma uzaması
θ (°)	Temas açısı
ν (nu)	Poisson oranı
σ_t (MPa)	Maksimum çekme gerilmesi
τ (tau)	Kayma gerilmesi

1. GİRİŞ

Yapıştırıcılar, yüzyıllardır çeşitli doğal kaynaklardan (kemikler, deriler, balıklar, süt ve bitkiler gibi) elde edilerek farklı amaçlarla kullanılmıştır. Günümüzde ise teknolojik ilerlemelerle birlikte yapıştırıcılar, endüstriyel üretimden ev kullanımına kadar geniş bir yelpazede vazgeçilmez malzemeler haline gelmiştir. Havacılık, otomotiv, raylı sistemler ve gemi endüstrisi gibi mühendislik alanlarında, yapıştırıcılar diğer mekanik bağlantı türlerine göre daha hafif, düşük maliyetli ve düzgün bir yük aktarımı sağlamaları nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Ayrıca yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, geleneksel mekanik bağlantı elemanlarına kıyasla daha yüksek sertlik ve daha homojen bir gerilme dağılımı sunarak mühendislik uygulamalarında önemli bir alternatif oluşturmuştur.

Yapıştırma bağlantılarının performansı, bağlantının geometrisine, yapıştırıcı türüne ve yapışma mekanizmasının etkinliğine gibi parametrelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin, tek tesirli bindirme bağlantısı gibi yaygın geometrilerde, eksantrik yükleme sonucu bindirme bölgesinin uçlarında soyulma gerilmeleri oluşabilmektedir. Bu gerilmelerin azaltılması, bağlantının mukavemetini artırmak açısından kritik öneme sahiptir. Bunun yanı sıra, yüzey modifikasyonları ve yapıştırıcı sistemlerine nano veya mikro ölçekli katkıların eklenmesi, bağlantının mekanik dayanımını güçlendiren yenilikçi yöntemler arasında yer almaktadır. Özellikle, yüzey işlemleri ile yüzey enerjisinin artırılması ve temas açısının düşürülmesi, yapışmayı iyileştiren kritik adımlar olarak değerlendirilmektedir.

Bu bağlamda, son yıllarda yapıştırma bağlantılarının dayanımını artırmaya yönelik araştırmalar, yenilikçi ve etkili yaklaşımlar sunmaktadır. Özellikle, yapıştırılan malzeme yüzeylerinin modifikasyonu ve yapıştırıcıların nano veya mikro ölçekli katkılarla zenginleştirilmesi bu yaklaşımlar arasında dikkat çekmektedir. Nano malzemeler (örneğin karbon nanotüpler, grafen, nanokil vb.), yapıştırıcı matrisine eklendiğinde, çatlak ilerlemesini yavaşlatma, enerji yutma kapasitesini artırma ve bağlantının genel mekanik performansını iyileştirme gibi özellikler sergilemektedir. Mikro ölçekli katkılar ise yapıştırıcıların viskoelastik özelliklerini geliştirerek darbe dayanımı ve yorulma direnci gibi parametrelerde dikkate değer iyileşmeler sağlamaktadır. Ayrıca, bu katkı maddelerinin yapıştırıcı sistemlerinin homojenliğini artırdığı ve arayüz bağlarını güçlendirdiği, yapılan deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Yapıştırıcı sistemlerdeki bu tür yenilikçi katkıların, bağlantıların mekanik performansını ve uzun vadeli dayanıklılığını artırmada önemli bir potansiyele sahip olduğu literatürde geniş bir şekilde vurgulanmaktadır.

Bu bölüm kapsamında, yapıştırıcı türleri ile yapıştırma bağlantılarının kullanım alanlarını ve sınıflandırılmasını kapsamlı bir şekilde ele almayı amaçlamaktadır. Ayrıca, yapışma mekanizmaları (teorileri), yapışma özelliklerini etkileyen temel faktörler ve yapıştırıcı sistemlerde nano ve mikro ölçekli katkıların sunduğu yenilikçi avantajlar ayrıntılı olarak incelenecektir.

1.1. Yapıştırıcılar ve Özellikleri

Yapıştırıcılar, yüzeyleri birbirine bağlayarak ayrılmalarını önleyen özel malzemelerdir. Genellikle organik bir polimerden veya kimyasal reaksiyonlarla polimer oluşturan bir ya da birden fazla bileşenden oluşurlar. Yapıştırıcılar, kullanım türüne (örneğin epoksi, poliüretan yapıştırıcılar), şekline (sıvı, film formundaki yapıştırıcılar) ve uygulama alanlarına (otomotiv, elektronik, havacılık vb.) göre farklılık göstermektedir. Özellikle sıvı yapıştırıcılar, yapışma sürecinde kritik bir rol oynar. Sıvı formdaki yapıştırıcı, yüzeylerle yakın moleküler temas kurarak etkili bir ıslanma sağlar ve böylelikle güçlü bir bağ oluşumuna olanak tanır. Kürleşme (sertleşme) işlemi sonrasında yapıştırıcı, sıvı hâlden katı hâle geçerek kalıcı bir yapışma sağlar (Adams 2021).

Yapıştırıcılar, sertleşme yöntemlerine göre farklı sınıflandırmalara tabi tutulabilir. Sertleşme, soğutma veya kimyasal reaksiyonlar yoluyla gerçekleşir. Bu süreç sonucunda yapıştırıcıdaki polimerler ya doğrusal bir yapıya ya da çapraz bağlı bir yapıya sahip olur. Çapraz bağlama işlemi, polimerlerin çözünmez (çözeltide çözünme özelliğini kaybetmiş) ve infüze edilemez (ısı altında şekil değiştiremeyen ve erimeyen) hâle gelmesini sağlar. Aynı zamanda bu işlem, polimerlerin sünme davranışını önemli ölçüde azaltarak mekanik dayanımlarını artırır. Yapısal yapıştırıcılar, tamamı çapraz bağlı polimerlerden oluşur; bu özellikleri sayesinde yüksek dayanım ve uzun ömür gerektiren uygulamalarda sıklıkla tercih edilir.

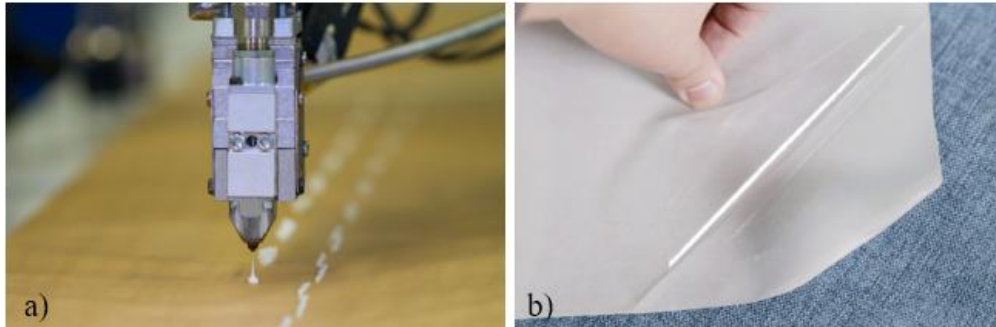
1.1.1. Soğuma ile oluşan yapıştırıcılar

Soğuma yoluyla oluşan yapıştırıcılar, erime sıcaklıklarına yakın ya da bu sıcaklıkların üzerindeki derecelere ısıtılan yapıştırıcıların, daha sonra doğal olarak soğumasıyla elde edilir. Bu tür yapıştırıcılara örnek olarak sıcak yapıştırıcılar verilebilir.

Sıcak yapıştırıcılar, sıcak sıvı formda yüzeylere uygulanır ve soğudukça hızla yapışkan bir bağ oluşturur. Uygulama süreçleri oldukça basittir ve seri üretim alanlarında kolaylıkla kullanılabilir. Kağıt ve karton, birçok plastik ve ahşap gibi malzemelerin yapıştırılması için yaygın olarak kullanılır. Ancak, metal yüzeylerin ısıyı hızlı bir şekilde iletmesi, yapışma süresinin önemli ölçüde kısalmasına neden olur. Sıcak yapıştırıcılara örnek olarak etilen-vinil asetat (EVA) ve poliamid verilebilir.

Etilen-vinil asetat: Etilen-vinil asetat (EVA), sıcak eriyiklerinde %30'a kadar vinil asetat (VA) içeren rastgele kopolimerler olarak kullanılmaktadır. EVA, polietilenin kristalliliğini (bileşikteki zincirlerin dağılımlarını) azaltırken, polaritesini (bileşikteki elektriksel yükleri) artırır. Ayrıca, erime viskozitesi molekül ağırlığına bağlı olarak değişir. Maliyetleri düşürmek ve viskoziteyi artırmak amacıyla mumlar ve kalsiyum karbonat gibi dolgu maddeleri kullanılabilir. EVA sıcak yapıştırıcıları, kitap ciltlemede ve sultanın kenar bantlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (şekil 1.1a).

Poliamid: Monomer karışımları kullanılarak yapılan poliamid sıcak yapıştırıcıları, poliamid plastiklerinden daha düşük erime noktalarına sahiptir. Bu karışım sayesinde zincirler arası hidrojen bağları azalır; bu da erime ısını düşürür. Poliamid sıcak yapıştırıcılar, EVA'lara göre daha iyi ısı direncine sahiptir, ancak daha pahalıdır ve ek katkı maddeleri gerektirmez. Tekstil kumaşlarını yapıştırmak ve buharla yumuşatılabilirler, ancak bu özellikler yıkama dirençlerini düşürürken kuru temizleme dirençleri iyidir (şekil 1.1b).



Şekil 1. 1. a) EVA sıcak yapıştırıcısının otomasyon uygulaması, b) tekstil uygulamaları için kullanılan poliamid sıcak yapıştırıcısı (Anonim, 2024a; Anonim, 2024b)

1.1.2. Kimyasal reaksiyon ile oluşan yapıştırıcılar

Kimyasal bir reaksiyon sonucunda sertleşen bu yapıştırıcı türleri, uygulama sırasında kimyasal reaksiyon meydana gelmesiyle katılarak kalıcı bağlantılar

sağlamaktadır. Epoksi, silikon, metaller için fenolik, yapısal akrilik, yüksek sıcaklık ve poliüretan yapıştırıcılar genellikle kimyasal reaksiyonla sertleşen yapıştırıcı türleridir.

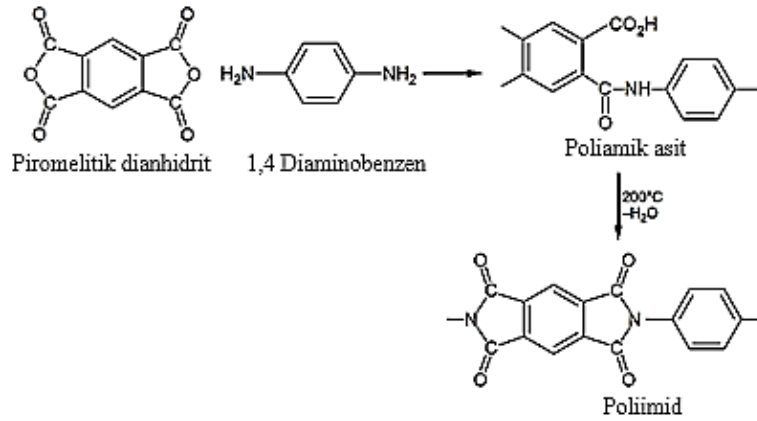
Epoksi yapıştırıcılar: Epoksiler, özellikle yapısal elemanların birleştirilmesinde kullanılan ve sıklıkla bilinen yapıştırıcı türlerinden biridir. Epoksiler, birkaç yaygın türe sahip olmasının yanında, aynı zamanda amine ve anhidrit asitler içeren sertleştiricilerle farklı oranlarda karıştırılarak geniş bir uygulama alanı oluşturmaktadır. Epoksilerin en önemli avantajlarından biri, içerisinde uçucu madde bulunmamasıdır. Öte yandan epoksilerin dezavantajlarından biri deri hastalıklarına sebep olabilir.

Fenolik yapıştırıcılar: Resole, bazik koşullarda fenol ile aşırı formaldehitin su içinde gerçekleşen reaksiyonu sonucunda oluşur. Bu ürün, fenolün eter ve metilen gruplarıyla birleştiği ve benzen halkalarında metilol gruplarının bulunduğu bir oligomerdur. Yapıştırıcı olarak kullanıldığında, ürün 130-160 °C'de ısıtılarak metilol gruplarının yoğunlaşmasıyla çapraz bağlı bir polimer haline gelmektedir. Fenolik yapıştırıcılar, otomobil, inşaat ve ahşap işleme gibi alanlarda kullanılır ve genellikle pres altında kürleşmektedir. Kırılmalarını azaltmak için polivinil formal, polivinil butiral, epoksitler ve nitril kauçuk gibi diğer polimerler de eklenir.

Yapısal akrilik yapıştırıcılar: Akrilik monomerler içeren yapısal yapıştırıcılar, serbest radikal ekleme polimerizasyonu ile ortam sıcaklığında sertleşir. Ana monomer metilmetakrilat (MMA) olup, yapışmayı artırmak ve ısıya direnç kazandırmak için metakrilik asit ve çapraz bağlama için etilen glikol dimetakrilat eklenir. Yapıştırıcılar iki bileşenli olarak sunulur; reçine bir yüzeye, başlatıcı ise diğer yüzeye uygulanır ve 1 dakikada yeterince sertleşir. MMA'nın polimerizasyonu sırasında %20,7 oranında büyük bir hacim azalması meydana gelir, bu da dolgular eklenerek azaltılabilir.

Yüksek sıcaklık yapıştırıcılar: Yüksek sıcaklıklarda çalışabilen bazı yapıştırıcılar vardır; bunlar genellikle pahalıdır ve yüksek kürleşme sıcaklıklarına ihtiyaç duyar. NASA tarafından geliştirilen poliimidler bunlara verilebilecek en iyi örneklerdir. Bir diaminin yoğunlaşma polimerizasyonu ile üretilen bir dianhidrit ile poliimidler; örneğin, piromellitik dianhidritin 1,4-diaminobenzen ile reaksiyona girmesiyle elde edilir. Bu durumda, çözünebilen ve eriyebilen poliamik bir asit oluşur, Oluşan bu poliamik alt tabakalara sıcaklık ve basınç altında uygulanır. Bunun sonucunda çözilemeyen ve eriyemeyen bir poliimid elde edilir (şekil 1.2). Yüksek sıcaklık yapıştırıcıları, havacılık, otomotiv, elektronik, petrokimya ve enerji üretimi gibi

endüstrilerde, yüksek sıcaklık ve dayanıklılık gerektiren bileşenlerin montaj ve onarımında kullanılmaktadır.



Şekil 1. 2. Bir Poliimid'in dönüşümünün şematik gösterimi

Poliüretan yapıştırıcılar: Poliüretan yapıştırıcılar, düşük molekül ağırlıklı polimerlerin iki –OH uç grubu ile bir diizosiyanatın reaksiyona girmesiyle üretilir. Bu polimerler polieterler, alifatik poliesterler veya polibütadien olabilir. İki bileşenli poliüretan yapıştırıcılarda, polimer ve izosiyanat karıştırılarak yapıştırılacak yüzeylere uygulanır ve yüzeydeki hidroksil grupları ile kovalent bağlar oluşturur. Poliüretan yapıştırıcılar otomotiv, mobilya, inşaat ve elektronik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.2. Fiberler ve Özellikleri

Fiberler, kompozit mühendisliğinin temel yapı taşlarından biridir. Yüksek uzunluk/çap oranı (L/D), yüksek spesifik mukavemet ve modül değerleri sayesinde lifler, matris malzemesinin sınırlamalarını aşarak yapısal performansı artırır. Doğru lif seçimi, lif yönelimi ve ara yüzey mühendisliği; elastik modül, çekme mukavemeti, yorulma davranışı, darbe tepkisi, termal genleşme ve boyutsal stabilite gibi kritik performans parametrelerini belirler. Bu nedenle, lif uygulamalarında hem malzeme bazlı hem de proses bazlı kararların alınması disiplinlerarası bir yaklaşım gerektirir. İlerleyen kısımlarda temel fiber türleri, fiberlerin avantajları ve dezavantajları yüzeysel ve odaklı biçimde sunulmuş; daha sonra lif–matris ara yüzeyinin önemi ele alınmıştır. (Sathishkumar, Naveen & Satheeshkumar, 2014; Mallick, 2007).

1.2.1. Fiber Türleri

Farklı türlerde kullanılan lifler, kompozit malzemelerin mekanik performansını büyük ölçüde etkiler. Lifler, mukavemet, elastik modül, yoğunluk ve kimyasal direnç gibi karakteristikleri sayesinde çeşitli mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. Aşağıda, yaygın olarak kullanılan cam, karbon ve aramid liflerinin temel özellikleri ve uygulama alanları özetlenmiştir.

Cam Elyafı: Cam elyafı, silis ağırlıklı cam eriyiğinin filament hâline çekilmesiyle elde edilen amorf inorganik liflerdir. E-cam ve S-cam olarak sınıflandırılır. E-cam lifleri iyi dielektrik özellikleri, uygun kimyasal direnç ve düşük maliyeti nedeniyle tercih edilirken; S-cam lifleri daha yüksek elastik modül ve çekme dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılır (Sathishkumar, Naveen & Satheeshkumar, 2014; Mallick, 2007). Cam elyafının yüzeyleri genellikle silan bazlı sizing ajanlarıyla kaplanır (Park & Kim, 2005).

Karbon Elyafı: Karbon elyafı, PAN veya pitch gibi öncül polimerlerin stabilizasyon ve karbonizasyonu ile elde edilen yüksek kristalin liflerdir. PAN-bazlı üretim yüksek çekme mukavemeti sağlarken, pitch-bazlı yollar daha yüksek elastik modül değerleri sunar (Park & Kim, 2005; Mallick, 2007). Karbon liflerin düşük yoğunluğu, yüksek özgül modül ve üstün yorulma davranışı onları havacılık ve yüksek performans uygulamalarında öne çıkarır (Sathishkumar, Naveen & Satheeshkumar, 2014).

Aramid Lifleri: Aramidler (Kevlar), aromatik poliamid yapıda örgütlenmiş olup yüksek çekme mukavemeti ile dikkat çeker. Düşük yoğunlukları ve yüksek darbe enerjisi soğurma kapasiteleri nedeniyle balistik koruma ve takviye uygulamalarında uygundur (Sathishkumar, Naveen & Satheeshkumar, 2014; Mallick, 2007). Ancak nem emilimi ve bazı reçinelerle uyum sorunları performansı etkileyebilir (Park & Kim, 2005).

Lif Formları, Yönelimi ve Kompozit Davranışı: Liflerin fiziksel biçimi ve yönelimi, kompozit malzemelerin mekanik anizotropisini belirlemede kritik bir rol oynar. Sürekli lifler maksimum mukavemet sağlarken, kısa lifler üretim kolaylığı ve düşük maliyet gibi avantajlar sunar (Sathishkumar, Naveen & Satheeshkumar, 2014; Mallick, 2007). Laminat tasarımında katman dizilimi ve lif açısı, bileşenin yük taşıma mekanizmalarını doğrudan etkiler (Park & Kim, 2005). Lifler, mekanik yükler doğrultusunda belirgin şekilde dayanım kazanır; bu nedenle, kompozitlerin üretiminde lif

yönelimi, yük taşıma kapasitesini optimize edecek şekilde stratejik olarak belirlenir. Lif yöneliminden kaynaklanan bu performans avantajları yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlar; ancak üretim süreçlerinde karmaşıklık ve maliyet artışı gibi sınırlamalar da beraberinde gelir. Bu bağlamda, liflerin fiziksel özellikleri ve yönelimi, kompozit tasarımında hem fırsatları hem de kısıtları değerlendirmek için merkezi bir öneme sahiptir.

Avantajlar

- **Yük Taşıma ve Yüksek Özgül Mukavemet:** Lifler, doğrultularına paralel yüklere karşı yüksek direnç gösterir; uygun yönlendirme ile kompozitin taşıyabileceği maksimum gerilme artırılabilir. Bu, özellikle unidirectional (tek doğrultulu) laminatlarda belirginleşir.
- **Artmış Rijitlik ve Boyutsal Stabilité:** Yüksek modüllü lifler, kompozitin elastik modülünü artırarak rijitlik sağlar ve termal genleşme kontrolünü kolaylaştırır.
- **Yorulma ve Darbe Dayanımı:** Lifler çatlak büyümesini geciktirir, enerji dağılımını sağlar ve böylece yorulma ömrü ile darbe performansı iyileşir.
- **Fonksiyonel özelleştirme (termal, elektriksel, EMI):** Karbon lifler ve metal kaplı lifler ile elektriksel ve termal iletkenlik özellikleri entegre edilebilir; nano katkıları ise EMI koruması veya termal iletkenliği artırır.
- **Korozyon Direnci:** Uygun seçilmiş polimer matrislerde lif takviyeli kompozitler, metalik malzemelere kıyasla korozyon duyarlılığını azaltır.
- **Tasarım esnekliği ve yerel optimizasyon imkânı:** Katmanlama, lif yönelimi ve yerel takviye ile belirli bölgelerde mekanik özellikleri artırmak mümkündür; bu, hafif ve performanslı tasarıma olanak tanır.

Dezavantajlar

- **Yerel Kırılabilirlik ve Ani Hasar Modu:** Özellikle yüksek modüllü karbon lifli kompozitlerde hasar lokalize olabilir; iç çatlaklar görünür yüzey hasarı olmadan ilerleyebilir.
- **Yüksek Maliyet:** PAN-bazlı karbon lif ürünleri ve ileri yüzey işlemleri maliyetleri artırır; büyük hacimli uygulamalarda ekonomik değerlendirme kritiktir.
- **Nem ve çevresel yaşlanma etkileri:** Matrisin ve bazı liflerin nem emilimi, ara yüzeyde plastifikasyon veya kimyasal bozunma yoluyla performans kaybına neden olabilir.

- **İşlenebilirlik ve ıslanma problemleri:** Termoplastik reçinelerin yüksek viskozitesi veya yüksek performanslı reçinelerin düşük penetrasyonu, lifleri tam olarak ıslatmayabilir; bu da boşluk, zayıf bağ ve lokal gerilme toplanmasıyla sonuçlanır.
- **Sağlık ve güvenlik riskleri:** Lif tozu, serbest lif parçacıkları ve bazı kimyasal yüzey ajanları solunum ve deri yoluyla risk oluşturabilir.
- **Geri dönüşüm ve atık yönetimi zorlukları:** Termoset bazlı kompozitlerin geri dönüşümü teknik ve ekonomik zorluklar içerir; atık yönetimi tasarım döngüsünde göz önünde bulundurulmalıdır.

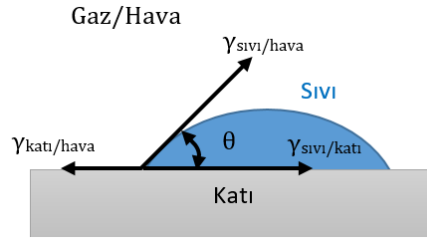
Bu avantajlar ve dezavantajlar göz önüne alındığında, liflerin kompozit malzemelerin performansını artırmada önemli olduğu görülmektedir. Ancak bazı olası olumsuz etkileri azaltmak için yüzey modifikasyonu ve kimyasal yüzey işlemleri önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, kimyasal yüzey işlemleri incelenecektir.

1.3. Yapışma Mekanizmaları

Yapıştırıcıların malzemelerin yüzeylerine tutunma işlemi genellikle fiziksel ve kimyasal tutunma olmak üzere iki ana şekilde ifade edilir. Fiziksel tutunma, tüm yapıştırma işlemlerinde görülen ve yapıştırıcı ile yüzey arasındaki ara yüzeyde bir veya birden fazla molekül katmanı kadar etki gösteren bir tutunma mekanizmasıdır. Bu etki, yüzeyler arasındaki uzaklıkların çok küçük olduğu durumlarda, atom ve moleküller arasındaki zayıf çekim kuvvetlerine, yani Van der Waals bağlarına dayanır. Van der Waals kuvvetleri, moleküller arasındaki etkileşimleri tanımlar ve genellikle kısa mesafelerde, yüzeylerin çok yakın olduğu durumlarda önemli bir rol oynar. Bu tür fiziksel tutunma, yapıştırıcıların malzeme yüzeylerine yapışmasını sağlayan temel mekanizmalardan biridir.

Fiziksel tutunma olayı, sıvıların temas açılarının gözlemleriyle kolayca incelenebilir. Yüzeylere uygulanan farklı sıvıların temas açısı ölçümleri, bu yüzeylerin serbest enerji değerlerini belirlemede önemli bir araçtır (şekil 1.3). Yüzey serbest enerjileri, genellikle dispersif ve polar bileşenlerin toplamı olarak ifade edilir (Denklem 1.1 ve 1.2). Bu serbest enerji bileşenleri, sıvının katı yüzey üzerindeki temas açısını hesaplamak için kullanılan Young denklemi (Denklem 1.3) ile belirlenebilir. Temas açısı ölçümleri aynı zamanda, Owens-Wendt grafiklerinin kullanıldığı bir yöntemle de sunulmaktadır. Örneğin, bir yapıştırıcının kurutulmuş filmlerinin temas açılarının

ölçülmesiyle, yüzey serbest enerjisinin dispersif ve polar bileşenleri tespit edilebilir. Bu ölçümler, yapıştırıcının yüzeyle etkileşimi hakkında daha fazla bilgi sağlar ve böylece mekanik performansı hakkında yorum yapmayı mümkün kılar. Temas açısının küçük olması, yapıştırıcının yüzeyle daha fazla teması olduğunu ve bu durumun yapıştırıcının mekanik performansının yüksek olduğunu gösterir. Bu tür ölçümler, özellikle farklı malzeme yüzeyleri ve yapıştırıcıların etkileşimlerini anlayarak daha verimli ve dayanıklı yapıştırma sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanır.



Şekil 1.3. Temas açısını şematik gösterimi

$$\gamma_k = \gamma_k^d + \gamma_k^p \quad (1.1)$$

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (1.2)$$

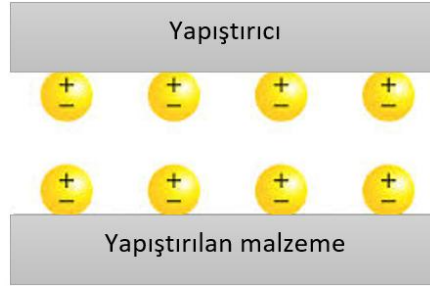
$$\gamma_{k/h} = \gamma_{k/s} + \gamma_{s/h} \cos \theta \quad (1.3)$$

s: sıvı, k: katı yüzey, h: hava γ : serbest enerji (J/m^2), d:dispersyon, p: polar, θ : temas açısı($^\circ$)

Diğer bir açıdan kimyasal tutunma işlemini incelediğimizde, yüzey ile yapıştırıcı ara yüzeyinde kovalent, iyonik, hidrojen ve Lewis asit-baz etkileşimlerinin oluşması gerekmektedir. Hidrojen bağları her ne kadar fiziksel bir tutunma olarak ele alınsa da, yapışma işlemlerinde esas olan bir bağ türüdür. Kovalent bağlar, genellikle silan işlemlerinde ve diğer kaplama işlemlerinde ortaya çıkar. Yapılan silan işlemi sonrası hem yüzey hem de yapıştırıcı ile kimyasal reaksiyona girerek güçlü ve dayanıklı bir bağ oluşturur. İyonik bağlar ise metal oksitler ve karboksil iyonları arasındaki etkileşimlerle yapışma performansını etkiler.

Hidrojen bağları, özellikle formaldehit ve selüloz bazlı yapıştırıcılarda yapışma performansına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Lewis asit-baz etkileşimleri ise elektron alan ve veren moleküller arasındaki etkileşimlerle yapışma performansına katkı sağlamaktadır. Bu kimyasal bağlar, özellikle farklı malzemeler arasındaki etkileşimlerle yapışma dayanımı sağlamada son derece önemlidir.

Elektrostatik yapışma teorisi: Bu teori, yapıştırıcı ile taban malzeme arasında temas oluştuğunda elektronların birinden diğerine geçerek ince bir elektriksel çekim kuvveti tabakasının oluşmasına dayanır. Bu tabakada oluşan elektriksel yükler yapıştırıcının taban malzemeden ayrılmasını engellemekte ve mekanik performansını etkilemektedir. Yapıştırıcıların yüzeyden soyulması sırasında gözlemlenen elektriksel deşarj bu teoriyi desteklemektedir. Bu teorinin etkisinin, kimyasal bağlanmaya kıyasla metal olmayan malzemeler için daha küçük olduğu söylenmektedir.



Şekil 1. 4. Elektrostatik yapışma teorisinin şematik gösterimi

Mekanik kilitleme teorisi: Bu teoriye göre yapışma, yapıştırıcının taban malzemenin yüzeyinde bulunan gözeneklere, boşluklara ve diğer düzensizliklere nüfuz ederek gerçekleşmektedir. Yüzeyde bulunan düzensizlikler yapıştırıcı ile dolarak yapışma kuvvetine önemli derecede katkı sağlamaktadır. Taban malzemenin yüzey pürüzlülüğünün fazla olması, yapıştırıcının bu düzensizliklere nüfuz ederek mekanik kilitleme olayına yardımcı olmasını sağlar. Genellikle yüzeye uygulanan mekanik aşındırma işlemlerinden sonra hem temiz bir yapışma yüzeyinin olması hem de yüksek reaktif bir yüzey oluşumu ve temas yüzey alanının artması ile yapışma performansının iyileşmesi mekanik kilitleme ile açıklanabilmektedir.



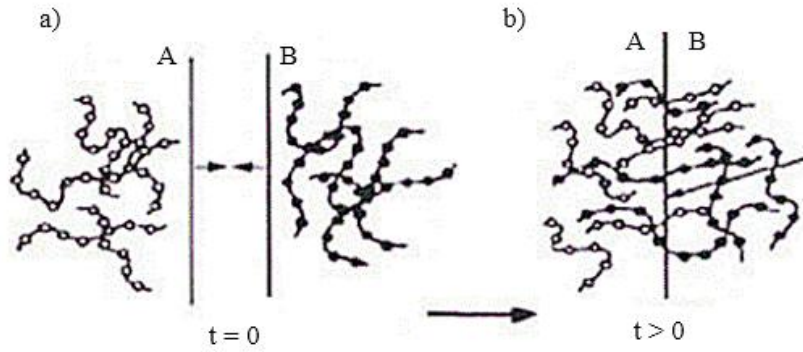
Şekil 1. 5. Mekanik kilitleme teorisinin şematik gösterimi

Difüzyon teorisi: Bu teoride, yapışma yapıştırıcı ve yapıştırılan taban malzeme arasındaki moleküllerin karşılıklı difüzyonu yoluyla gerçekleşmektedir. Bu olay genellikle uzun molekül zincirlerine sahip polimer yapıştırıcılar ve yüzeylerde görülür. Malzemenin kendi doğasına ve bağlanma koşullarına göre difüzyonun oluşup oluşmayacağı tespit edilmektedir. Difüzyon sonrasında oluşan tabaka genellikle 1 – 100 nm arasında bir kalınlığa sahiptir.

Kohezif enerji yoğunluğu (KEY), difüzyon bağıny yorumlamak için kullanılan bir ifadedir. E_{KEY} , molekülleri sonsuz mesafeye ayırmak için gereken enerji değeridir; V molar hacim ve δ ise çözünürlük çarpanıdır. Örneğin, polietilen ve polipropilenin bütadien kauçuğuna yapışması, yüksek sıcaklıklarda daha güçlü bir bağ oluşturur. Polimerlerin erime noktalarının üzerinde gerçekleşen yapışma işlemi, bağ kuvvetini önemli ölçüde etkiler. Artan sıcaklıklarla birlikte poliolefinler ve bütadien kauçuğu arasındaki difüzyon artar ve bağ kuvveti azalır. Benzer şekilde, termoplastiklerin çözücü bir madde ile yapıştırılması veya ısı ile kaynak yapılmasıyla benzerlik göstermektedir.

$$KEY = \frac{E_{KEY}}{V} \quad (1.4)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{E_{KEY}}{V}} \quad (1.5)$$



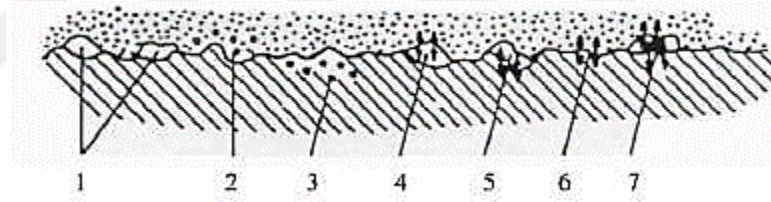
Şekil 1. 6. Difüzyon teorisini şematik gösterimi a) yapıştırıcının b) yapıştırılan malzemenin moleküllerinin iç difüzyonu (Ghanem ve Lang 2017)

Islanma teorisi: Bu teoriye göre yapışma kuvveti, iki malzemenin moleküler teması ve gelişen yüzey kuvvetlerinden kaynaklanır. Yapıştırıcının katı yüzeyin ıslatabilmesi için yüzey geriliminin, katının yüzey gerilimi değerinden küçük olması gerekmektedir. Yapıştırıcının katı yüzeyi tam ıslatması için yapıştırıcının katı yüzeydeki çukurlara ve girintilere dolması gerekirken, yetersiz ıslatmada yüzeydeki düzensizliklerin yeterli şekilde yapıştırıcı ile dolmaması demektir (şekil 1.7).



Şekil 1. 7. Islatma teorisini şematik gösterimi (Anonim, 2024c)

Zayıf sınır tabaka teorisi: Zayıf sınır tabaka teorisi, Bikerman tarafından ileriye sürülen yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme, ortam veya bu üç faktörün birleşiminden oluşmaktadır. Bu teoride, ara yüzeydeki yapışma hasarının oluşabilmesi için ya kohezif kırılma olduğu ya da zayıf sınır tabakadan kaynaklandığı ileri sürülmektedir. Ayrıca, zayıf sınır tabakaları; yapıştırılan malzeme veya yapıştırıcı tarafından da oluşan yabancı maddeler nedeniyle oluşmaktadır. Yapıştırılan malzeme yüzeyinde bulunan yağ, kir ve toz gibi yapışmayı etkileyen maddeler zayıf sınır tabaka oluşturur (şekil 1.8). Yapıştırıcı, yapıştırılan malzemeyi uygun olmayan şartlardan dolayı ıslatamayacağından, burada zayıf bir sınır tabakasının oluşmasına sebep olacaktır.

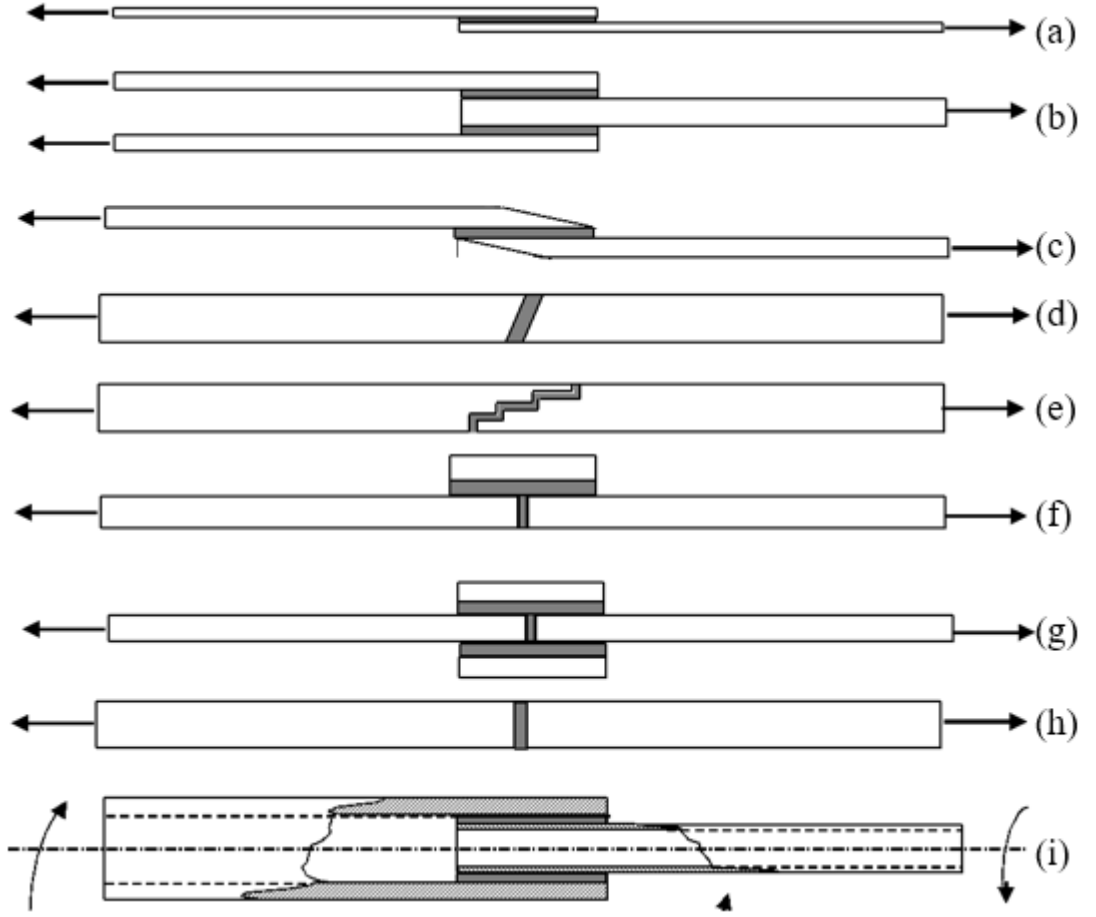


Şekil 1. 8. Zayıf sınır tabaka modeli 1) hava boşlukları; 2 ve 3) toz, kir gibi yabancı maddeler; 4'ten 7'ye ise ortam ve bileşenler arasındaki reaksiyonlar (Ghanem ve Lang 2017)

1.4. Yapıştırma Bağlantıları

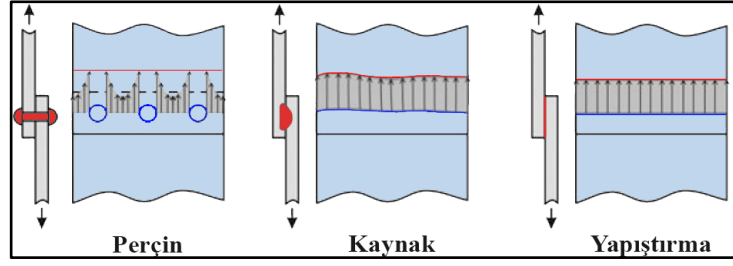
Yapıştırma bağlantıları, bir veya daha fazla malzemenin, yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesiyle oluşturulan bağlantı türleridir. Yapıştırma bağlantıları, mekanik bağlantı türlerine kıyasla daha uniform bir gerilme dağılımına sahip olmaları nedeniyle havacılık, otomotiv ve inşaat gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıştırma bağlantılarının performansı, kullanılan malzemenin ve yapıştırıcının mekanik özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebildiği gibi, uygulama alanına göre de farklılık arz edebilmektedir. Bunun yanı sıra, yüzey hazırlama işlemleri ve kimyasal yüzey modifikasyonları da bu bağlantıların performansını etkileyen önemli faktörler arasındadır. Günümüzde, kullanım amaçlarına ve tasarımlarına göre pek çok farklı yapıştırma bağlantı türü bulunmaktadır ve bu türler hem endüstriyel uygulamalarda hem

de akademik çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir (şekil 1.9). Özellikle tek tesirli bindirme (TTB) bağlantısı, geometrik yapısının basitliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle en yaygın kullanılan bağlantı türlerinden biridir.



Şekil 1. 9. Yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantı türleri a) tek tesirli bindirme, b) çift tesirli bindirme, c) boyun bindirme, d) açılı bindirme, e) kademeli (teraslama), f) tek takviyeli bindirme, g) çift takviyeli bindirme, h) alın bağlantı, i) silindirik, j) soyulma (Adams 1984)

Yapıştırma bağlantıları kullanım alanlarına göre birçok avantaj ve dezavantaja sahiptir. Örneğin; perçinli bağlantılardaki gibi önceden bir delik açma işlemi gerektirmez. Ayrıca perçinli bağlantılarda açılan delik gerilme yığılmalarına ve kuvvet hattında süreksizliklere sebep olmaktadır (Şekil 1.10). Ek olarak; farklı malzemelerin birleştirilmesi, hafif ve yüksek mukavemetli yapıların oluşturulması gibi avantajlar sağlamaktadır.



Şekil 1. 10. Perçin, kaynak ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantıya ait gerilim dağılımı

Yapıştırma bağlantıların kullanım sınır ve alanlarına bağlı olarak avantaj ve dezavantajları şu şekildedir (Pocius 2012).

Avantajları;

- Bağlantıların dayanımı yüksektir; özellikle kesme dayanımı çok iyidir.
- Yapışma bölgesindeki gerilme düzgün bir şekilde dağılır, bu da bağlantının genel dayanımını artırır.
- Farklı malzemelerin birleştirilmesini sağlar, kompozit-metal veya kompozit-kompozit gibi malzemeler birleştirilebilir.
- Korozyon direnci sağlar, metal bağlantılarda korozyon riskini azaltır.
- Elektriksel ve termal yalıtım sağlarken aynı zamanda sıvı ve gaz sızdırmazlığı da sağlar.
- Darbe ve titreşimlere karşı sönümleme sağlar, bağlantıyı bu tür etkilerden korur.
- Yüzey hazırlama işlemi diğer bağlantı yöntemlerine göre daha düşük maliyetlidir.

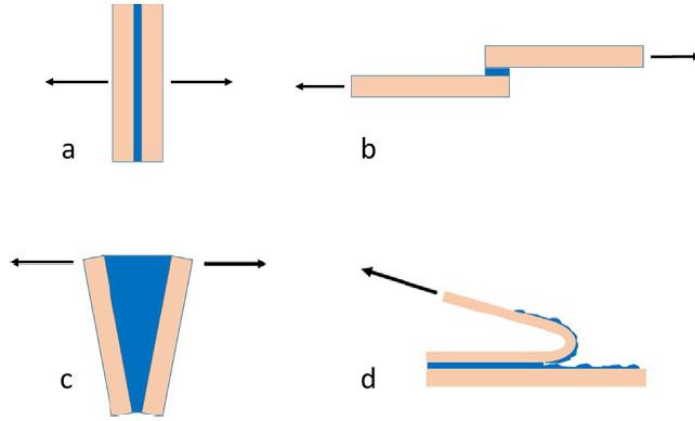
Dezavantajları;

- Bağlantıların dayanımı, yüzey performansına bağlıdır.
- Termal ve soyulma dayanımları düşüktür.
- Üretim hızı ve üretim sırasında sıvı yapıştırıcıların sabitlenmesi gereklidir.
- Çevresel faktörlere bağlı olarak performans değişkenlik gösterebilir.
- Yapıştırıcıların kürlenmesi için ısı kaynağı gereklidir.
- Yüzey temizliği için kullanılan malzemeler sağlık sorunlarına yol açabilir.

Bu tür etkiler göz önünde bulundurulduğunda ve uygun yapıştırıcı sistemi ile ortam hazırlandığında, pek çok endüstriyel uygulamada yapıştırma bağlantıları yaygın olarak kullanılmaktadır.

1.5. Bağlantılarda Oluşan Gerilme ve Hasar Türleri

Yapıştırma bağlantıları, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasının yanı sıra, çalışma koşulları sırasında belirli yükleme türlerine de maruz kalmaktadır. Bu bağlamda, bağlantıların, söz konusu yükleri etkili bir şekilde karşılayacak şekilde performans sergilemesi beklenmektedir. Yapıştırma bağlantılarında, temel yükleme türlerinden kaynaklanan gerilme çeşitleri; çekme, kayma, soyulma ve ayrılma olarak tanımlanabilir (Şekil 1.11). Yapıştırıcılar, özellikle kayma gerilmesine karşı gösterdikleri yüksek direnç nedeniyle, tasarım aşamasında bağlantıların öncelikli olarak kayma yüklemesine maruz kalacak şekilde optimize edilmesi tercih edilmektedir. Bu yaklaşım, yapısal dayanıklılığın artırılması ve bağlantıların uzun ömürlü olmasının sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 1. 11. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme türleri a) çekme, b) kayma, c) soyulma ve d) ayrılma (Adams 2021)

Çekme gerilmesi: Çekme gerilmesi neredeyse yapışma hattına düzgün bir şekilde uygulanmakta ve bu koşulda yapıştırıcı tabakasında herhangi bir eğilme momentine maruz kalmamaktadır (şekil 1.11a).

Kayma gerilmesi: Yapıştırma bağlantıları düzlem içi kayma yüklerine maruz kaldığında, yapıştırıcı tabakasında kayma gerilmeleri oluşur. Bu durumda, teorik olarak yapıştırıcı tamamen bağlantının yükünü eşit bir şekilde taşıyabilmektedir (şekil 1. 11b). Fakat pratik uygulamalarda yapıştırıcı tabakası boyunca sadece kayma gerilmesi oluşturacak bağlantılar tasarlamak kolay değildir. Örneğin, tek tesirli bindirme bağlantısı incelendiğinde, bağlantının geometrisinden kaynaklanan kayma yüklemesinin yanı sıra eksantriklik nedeniyle ortaya çıkan moment nedeniyle bindirme bölgesinin uçlarında soyulma gerilmesi de oluşmaktadır.

Soyulma gerilmesi: Yapıştırılan malzeme esnek olduğunda genellikle yapıştırıcı tabakasında soyulma gerilmesi oluşmaktadır. Aslında hem çekme hem de soyulma gerilmesi oluşur; fakat ikisi arasındaki temel fark, gerilmenin yapıştırıcı tabakasında dağılımıdır. Çekme gerilmesi yapıştırıcı içerisinde düzgün olarak dağılırken, soyulma gerilmesi ise genellikle bindirme ucunda yoğunlaşır (şekil 1.11c). Bu durumda bindirme bölgesinin ucunda soyulma gerilmesi, çekme gerilmesinden çok daha fazladır. Genelde bir bağlantı elemanı tasarlanırken uçlarda soyulma gerilmesinin oluşumundan kaçınılmaktadır.

Ayrılma gerilmesi: Bu tür gerilmeler, çoğunlukla kalın yapıştırılan malzemelere sahip bağlantı türlerinde uygulanan bir eğilme momenti neticesinde meydana gelir. Soyulma gerilmesine benzemekle birlikte, bu tür yüklemeler yapışma hattı boyunca düzensiz gerilme dağılımlarına neden olmaktadır (şekil 1.11d). Ayrıca, bindirme bölgesinin uçlarında önemli bir gerilme yığılmasına neden olur. Ek olarak, yapıştırma bağlantı tasarımlarında, bu tür yüklemelerden kaçınılacak şekilde tasarım yapılması büyük önem taşımaktadır.

1.6. Yapıştırma Bağlantılarının Performansını Etkileyen Parametreler

Birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantıları, bir önceki bölümde de belirtildiği üzere, çeşitli gerilme türlerine maruz kalmaktadır. Bağlantıların daha iyi performans göstermesi ve fonksiyonlarını etkin bir şekilde yerine getirmesi için, bu bağlantılarda oluşabilecek temel yüklemelerin doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu yüklemelerin bağlantı tasarımlarındaki önemi göz önünde bulundurulduğunda, yapıştırma bağlantılarında dikkate alınması gereken temel unsurlar şunlardır:

- Yapıştırıcı tabakasının kalınlığı
- Yapıştırılan malzemenin türü
- Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki ara yüzey etkileşimi
- Yapıştırılacak yüzeylerin temizliği

Yapıştırıcı kalınlığı, bağlantıların dayanımını doğrudan etkileyen önemli bir parametredir. Yapıştırıcı kalınlığının yetersiz olması, bağlanacak yüzeyler arasında zayıf bir yapışma meydana getirebilirken, kalınlığın fazla olması ise bağlantılarda gerilme yığılmalarına yol açmakta ve aynı zamanda yapıştırıcı fazının, alt malzemelere kıyasla

daha esnek olması nedeniyle bağlantıların genel dayanımını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

Yapıştırıcı ve yapıştırılan taban malzeme arasındaki ara yüzeyde oluşan üçüncü bir ara yüzey, bağlantıların dayanımını önemli derecede etkileyebilmektedir. Yapışma işleminden önce, bu tür olumsuz etkilerin önlenmesi amacıyla yapıştırılan malzemelerin yüzeyleri, kimyasal (örneğin; dağlama, kimyasal aşındırma vb.) veya mekanik (zımpara, taşlama, kumlama vb.) yöntemlerle temizlenir ve yüzeydeki organik kalıntılar uzaklaştırılır. Temizleme işleminden sonra, yüzeyde mikro veya nano seviyede dağlama kalıntıları oluşabilir. Bu yüzeyler, yüksek enerji seviyelerine sahip olup, oldukça yüksek ıslanabilirlik özellikleri gösterir. Ancak, kimyasal işlemler sırasında uygulanan asitler, yüzeyde ince bir oksit tabakası bırakabilir. Bu oksit tabakası, yüzeyin hidrolojik stabilitesini (yapışma yüzeyinin topografik yapısını) etkileyerek, bağlantıların dayanımını uzun vadede olumsuz yönde etkileyebilir.

1.7. Yapıştırıcıların Mekanik Özellikleri ve Yapısal Davranışları

Yapıştırıcıların yapısal davranışı, mekanik yüklemeler altında gösterdikleri tepkiyi ifade eder ve bu tepki genellikle lineer elastik aralıkta belirli özelliklerle tanımlanır. Lineer elastik malzemeler, genellikle küçük deformasyonlarla sınırlıdır. Bununla birlikte, daha gevrek malzemeler, mekanik kırılma noktasına çok yakın bir aşamaya kadar lineer davranış gösterebilir. Lineer elastik davranış sergileyen bir malzemenin özellikleri, genellikle dört temel parametreyle tanımlanır: *Young modülü*, *Poisson oranı*, *kayma modülü* ve *hacim modülü*. Bu özelliklerden ikisi bilindiğinde, diğerleri türetilir. Bu parametreler, yapıştırıcının mekanik performansını ve bağlantı elemanlarının dayanımını belirlemede kritik rol oynar. Yapıştırıcıların yapısal davranışlarını anlamak, özellikle yapıştırma bağlantılarının tasarımını ve uzun ömürlü performansını optimize etmek açısından önemlidir.

- **Young Modülü (E)**, uygulanan gerilmeye bağlı olarak oluşan şekil değiştirme oranıdır ve malzemenin sertliğini ifade eder.
- **Kayma Modülü (G)**, ise kayma gerilmesi ile kayma şekil değiştirmesi arasındaki orandır ve malzemenin kaymaya karşı direncini ifade eder (Denklem 1.6).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1.6)$$

- **Poisson Oranı (ν)**, yükleme doğrultusuna dik yönde oluşan şekil değiştirmenin, yükleme doğrultusundaki şekil değiştirmeye oranıdır ve malzemenin sıkıştırılabilirliğinin bir ölçüsüdür. Poisson oranı 0,5 olan bir malzeme sıkıştırılmaz olarak kabul edilir. Kauçuk benzeri malzemeler (örneğin, cam geçiş sıcaklığının üzerindeki termosetler), Poisson oranı açısından bu değere yaklaşırken, cam geçiş sıcaklığının altında olan termoset yapıştırıcılar genellikle 0,25 ile 0,45 arasında değişen Poisson oranlarına sahiptir.
- **Hacim Modülü (Bulk Modulus)**, bir malzemenin sabit sıcaklıkta hidrostatik basınçla hacim değişimi karşısındaki direncini ifade eder. Hacim modülü, uygulanan hidrostatik basıncın hacim değişimine oranıdır ve malzemenin sıkıştırılabilirliğiyle doğrudan ilişkilidir. İzotropik malzemeler için hacim modülü, elastik modül ve Poisson oranı ile doğrudan ilişkilidir (Denklem 1.7).

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (1.7)$$

Bu bağıntılardan, Poisson oranı 0,5'e yaklaştıkça hacim modülünün sonsuz büyüklüğe ulaşabileceği sonucuna varılmaktadır.

Yapıştırıcıların yapısal davranışı, yalnızca malzeme özelliklerine değil, aynı zamanda yük altında geçen süre, yükleme hızı ve sıcaklık gibi faktörlere de bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu bağımlılıklar, yapıştırıcıların viskoelastik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Viskoelastik malzemeler, hem elastik hem de viskoz özellikler sergilerler, bu da onların zamanla değişen ve hızla farklı tepki verdikleri anlamına gelir. Bu nedenle, yapıştırıcıların mekanik analizlerinde sıcaklık ve yükleme hızının etkileri dikkatlice değerlendirilmelidir. İzotropik malzemelerde, bu modüller arasındaki ilişkiler, hem deneysel hem de teorik analizlerde önemli bir yere sahiptir ve yapıştırıcıların mekanik performansını değerlendirmek için temel oluşturmaktadır (Adams 2021). Bu faktörlerin etkilerinin doğru bir şekilde anlaşılması, yapıştırıcıların uzun vadeli dayanımını ve işlevselliğini artırmak açısından kritik öneme sahiptir.

1.7.1. Mekanik testler

Çekme Testi: Yapıştırma bağlantılarında çekme testi, yapıştırıcıya homojen bir gerilme durumu uygulanarak mekanik dayanımı tespit edilmektedir. ASTM standartlarına uygun olarak farklı çekme test yöntemleri geliştirilmiştir. Bu testlerden

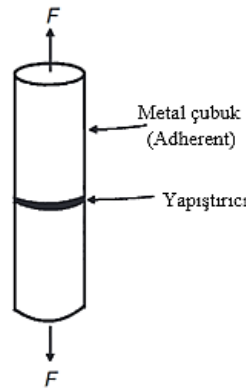
bazıları doğrudan çekme dayanımı ölçümüne odaklanırken, diğerleri yapışkanlık veya kayma dayanımı gibi özellikleri incelemektedir. Örneğin:

ASTM D897: Ahşap veya metal yüzeylerde yapıştırma bağlantılarının nihai çekme dayanımını ölçer.

ASTM D2095: Çubuk veya çubuk benzeri numunelerin uçlarından yapıştırılarak çekme dayanımı ölçülür.

ASTM D2979 ve D3121: Basınca duyarlı yapıştırıcıların yapışkanlık özelliklerini incelemek için özel prob uçları ve çelik bilyeler kullanılır.

Örneğin, tipik bir çekme testi numunesi, metal çubukların uçlarından yapıştırılmasıyla hazırlanır (ASTM D2095) (şekil 1.12). Çubukların yüzeyleri, yapıştırıcı boşluğunu kapatabilecek çapaklar (dolgu, yapışma sırasında oluşan fazla yapıştırıcının dışarı taşması) içermemeli ve yüzeyler birbirine paralel olacak şekilde işlenmelidir. Paralellik hataları, testin gerilme yerine ayrılma moduna kaymasına neden olabileceğinden, bu hatalara dikkat edilmelidir. Yapıştırıcı sertleştikten sonra, numune gerilme altında yüke tabi tutulur ve hasar dayanımı ve hasar sonrasındaki yüzeyler incelenir. Bu hasar yüzeylerinin tespit edilmesi yapıştırma bağlantılarının dayanım sonuçlarını yorumlamada kritik bir öneme sahiptir. Kırılma sonrası oluşan yüzey türleri ise adezyon hasarı, kohezyon hasarı ve karışık hasar olarak üç şekilde en yaygın şekilde görülmektedir (ISO 10365 1992).



Şekil 1. 12. Alın bağlantısının şematik gösterimi (Pocius 2012)

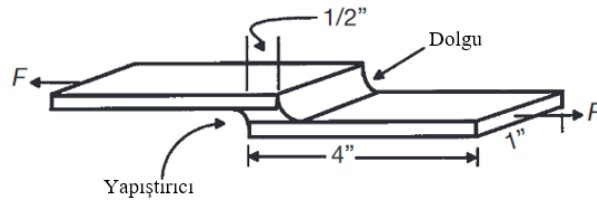
Yapıştırma bağlantıların mekanik dayanımlarını tespit etmek için yapılan çekme testleri, güvenilirlik ve dayanıklılık açısından büyük önem taşır; bu testlerden elde edilen veriler de tasarımlarda kritik bir rol oynamaktadır.

Kayma Testi: Yapıştırıcılar, kayma yüklemesi altında en yüksek dayanımlarını sergiler. Bu nedenle, yapıştırıcı bağlar genellikle kayma gerilmesine maruz kalacak

şekilde tasarlanır. ASTM standartlarında kayma dayanımını ölçmek için birçok test yöntemi geliştirilmiştir. Öne çıkan testlerden bazıları:

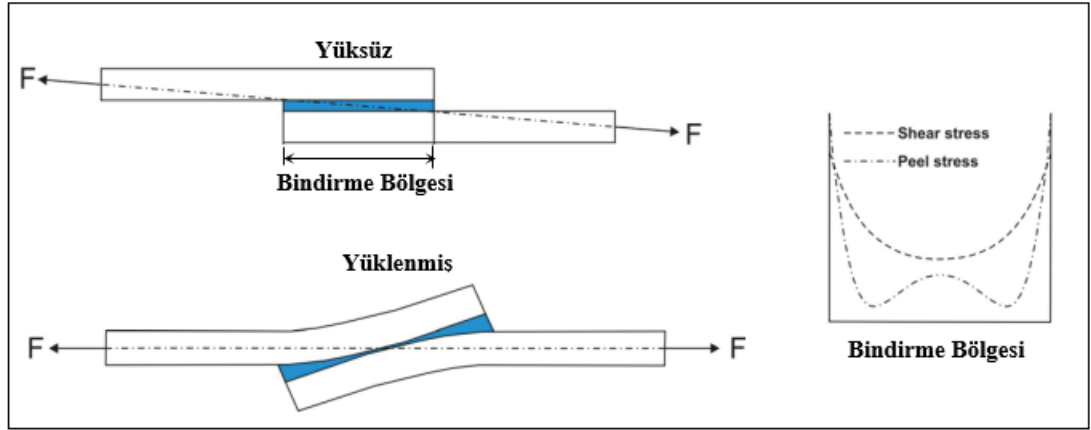
- **ASTM D1002:** Yapıştırıcıların gerilme yüklemesi altındaki kayma dayanımını ölçmek için en yaygın kullanılan yöntemdir.
- **ASTM D1780 ve D2293:** Metal-metal yapışkanların sabit yük altındaki sürünme özelliklerini inceleyen testlerdir.
- **ASTM D3528:** Çift taraflı lap kayma testi ile yapıştırma bağlantılarının doğrusal olmayan yüklem yollarını düzeltmeyi amaçlar.
- **ASTM D5656:** Kalın adherendler kullanılarak yapıştırıcıların kayma-gerilme-şekil değiştirme davranışını belirlemek için kullanılır.

ASTM D1002, yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımını değerlendirmek için en yaygın ve en detaylı çalışılmış test yöntemlerinden biridir. Bu testte, yapıştırılacak malzemeler uygun bir yüzey hazırlığı işleminden geçirildikten sonra yapıştırıcı yalnızca birleştirme bölgesine uygulanır. Yapıştırıcı, taşıyıcıların birleştirileceği bölgede akarak dolgu (dışa taşan yapıştırıcı) oluşturur. Dolgular, bağlantının dayanımını artırabilir ve uç bölgelerdeki özelliklerin sürekliliğini sağlamaktadır (şekil 1.13).



Şekil 1. 13. ASTM D1002 bindirme kesme numunesinin diyagramı

ASTM D1002 testi, yapıştırıcıların dayanımını karşılaştırmak ve kalite kontrolü sağlamak için etkili yöntemlerden biridir. Ancak, mühendislik uygulamalarında kullanılan yapıştırma bağlantılarının tasarımını tam olarak temsil etmediği eleştirilmektedir. Mühendislik uygulamalarında kullanılan bağlantıların bindirme uzunlukları ve alanları, D1002 test numunelerine kıyasla genellikle daha büyüktür. Ayrıca, küçük numunelerdeki kayma gerilmesi durumu homojen değildir ve test sırasında tek tesirli bindirme bağlantısının geometrik özelliklerinden dolayı oluşan eksantrik durum, bindirme bölgesinin uçlarında normal gerilmeler oluşturmaktadır (şekil 1.14)



Şekil 1. 14. Bindirme uzunluğu boyunca deforme olmuş şekil ve gerilmeler (Özer 2018)

Bu gerilme durumu, yapıştırıcıların saf kayma durumunda olmadığını ve uç bölgelerde normal kuvvetlerin de bulunduğunu gösterir. Bu durum, yapıştırıcı formülasyonlarının tasarımında dikkate alınması gereken önemli sonuçlar ortaya koymaktadır. Ayrıca, bindirme bölgesi içinde yüklerin analizi için daha ileri çalışmalar gereklidir.

Bu kapsamda sınırlamalar göz önüne alındığında, Krieger ve Hart-Smith tarafından geliştirilen yapıştırıcıların kayma davranışını daha doğru bir şekilde değerlendirmek için ASTM D5656 standardı kullanılmaktadır (şekil 1.15). Bu test, özellikle yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların tasarımı için önemli olan kayma gerilme-şekil değiştirme özelliklerini belirlemeyi amaçlamakta ve D1002 test numunesine benzer olsa da üç önemli fark içermektedir:

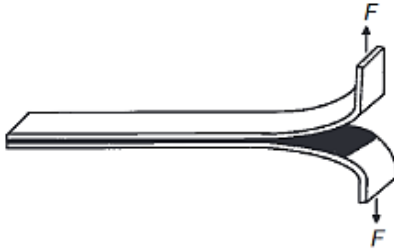
- **Taşıyıcıların Kalınlığı:** Test numunesindeki adherendler çok daha kalındır (örneğin, uçak alüminyumu için 0,5 ila 1 inç). Bu artırılmış kalınlık, adherendlerin sapmasını minimize ederek yapıştırıcı üzerinde oluşabilecek normal yükleri ortadan kaldırmaktadır.
- **Dolguların Kaldırılması:** Dolgular numuneden çıkarılmıştır. Böylece, yapıştırıcı yalnızca birleştirilmiş alanda yük taşır, bindirme bölgesi dışında oluşabilecek etkilerden arındırılmıştır.
- **Hassas Ölçüm Cihazları:** Numune, birleşme hattındaki deformasyonu ölçmek için ekstansometrelerle donatılmıştır. Bu cihazlar, adherendlerin sapmalarını ölçerek kayma gerilmesi (yükün bağ alanına bölünmesi) ile kayma şekil değiştirmesi (taşıyıcı sapmasından belirlenir) arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır.



Şekil 1. 15. TAST (Thick Adherend Shear Test) deney numunesi

Bu test ile kayma modülü, kayma-akma gerilmesi ve kayma şekil değiştirme enerji yoğunluğu gibi kritik mekanik özellikler belirlenebilmektedir. Özellikle kayma ve şekil değiştirme enerjisi yoğunluğu, Hart-Smith'in yapıştırma bağlantısı tasarımı kriterlerinde önemli bir rol oynamaktadır. ASTM D5656, yapıştırıcı üreticilerinin yapısal yapıştırıcılar için daha ayrıntılı ve anlamlı veriler sunmasını sağlamakta ve mühendislik uygulamalarında daha güvenilir tasarım verileri sağlamaktadır.

Soyulma Testi: Soyulma testi, yapıştırma bağlantıların ayrılma dayanımını ölçmek için kullanılan bir test yöntemidir ve en az bir taban malzeme (adherend) esnek olup test sırasında plastik deformasyona uğrayabilmektedir. Bu testler genellikle ASTM D1876 standardında tanımlanan T-soyulma testi ile gerçekleştirilmektedir. T-soyulma testinde, eşit kalınlıktaki iki taban malzeme bir yapıştırıcı ile birleştirilir ve numunenin uçları (şekil 1.16) çekme test cihazının çenelerine yerleştirilir. Numune, belirli bir hızda ya da farklı hızlarda ayrılarak test edilir. Ayrıca bu test, farklı sıcaklıklarda da uygulanabilir.

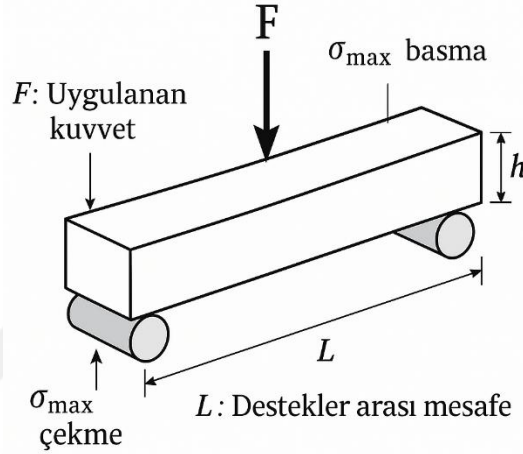


Şekil 1. 16. T-soyulma test numunesi

Eğer taban malzemeler aynı kalınlığa, eğilme modülüne ve akma dayanımına sahipse, soyulma simetrik olur ve çatlak yapıştırıcı hattının merkezinden ilerler. Ancak, taban malzemelerden biri diğerine göre daha ince veya farklı mekanik özelliklere sahipse, yapıştırma bağlantısı eğilir ve çatlak, daha ince taban malzemeye doğru hareket etmektedir. T soyulma testi, esnek taban malzemelerle kullanılan yapıştırıcıların soyulma davranışını değerlendirerek yapışma dayanımı ve modları hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır (Pocius 2012).

Eğme Testi: Yapıştırma bağlantılarının eğilme altındaki davranışını değerlendirmek için uygulanan eğme testleri, bağlantının rijitliği, enerji sönümleme

kapasitesi ve hasar gelişimi hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Bu testlerde, numuneye belirli bir noktadan veya noktalar arasında dağıtılmış şekilde moment uygulanarak, yapıştırıcının ve bağlantının eğilme gerilmeleri altındaki performansı gözlemlenir. ASTM D790 standardı, yapıştırıcılar ve polimer bazlı kompozitlerin üç nokta eğme testleri için en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu test, yapıştırıcı hattı boyunca oluşan eğilme gerilmeleri, çatlak başlatma ve ilerleme davranışları hakkında bilgi verir (Şekil 1.17).



Şekil 1. 17. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş yapıştırma bağlantısına uygulanan üç nokta eğme testi şeması

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş numunelerde uygulanan eğme testleri, özellikle farklı elastisite modülüne sahip taban malzemeler arasında oluşan yük aktarımı ve arayüz davranışlarını incelemek için kullanılır. Test sırasında numune, iki destek üzerine yerleştirilir ve ortadan aşağı doğru yükleme yapılır. Bu yöntemle, özellikle yapıştırma hattının ortasında oluşan maksimum eğilme gerilmeleri belirlenebilir. Eğilme sırasında yapıştırıcının yalnızca normal gerilmelere değil, aynı zamanda eğilmeden kaynaklanan kesme ve soyulma bileşenlerine de maruz kalması, bu testin karmaşık gerilme durumlarını ortaya koymasını sağlar.

Eğme testinde gözlemlenen tipik hasar modları, yapıştırıcı hattında oluşan adezyon veya kohezyon kaynaklı çatlak ilerlemeleri ile taban malzemenin deformasyonuna bağlı ayrılmalardır. Test sonrasında, hasar yüzeylerinin incelenmesiyle yapışma başarısı değerlendirilebilir. Özellikle yapıştırıcının sünek ya da gevrek davranış gösterip göstermediği, yük-deformasyon eğrisinin analizi ile belirlenebilir. Bu analiz, enerji emilimi, kırılma tokluğu ve eğilme sertliği gibi kritik mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Ayrıca, yapıştırma bağlantılarında eğilme altındaki çatlak ilerleme davranışı ve kırılma mekaniği çalışmaları için ASTM D5045 standardı kapsamında da deneyler yapılabilmektedir. Bu test yöntemi, yapıştırıcı ile birleştirilmiş numunelerde çatlak başlatma tokluğunu (K_{IC}) belirlemek için kullanılmaktadır. Bu sayede, yapıştırıcı sistemlerinin yapısal uygulamalarda güvenli bir şekilde tasarlanmasına olanak tanıyan veriler elde edilmektedir. Eğme testleri, yapıştırıcı sistemlerinin karmaşık yükleme altındaki davranışlarını anlamada tamamlayıcı bir rol oynamakta ve özellikle çok modlu gerilme durumlarının simülasyonu açısından önemli bir araç sunmaktadır.

Yüksek hızlı yükleme ve darbe: Yapıştırma bağlantıları genellikle statik yükleme altında kullanılırken, darbe yüklemeleri altında uygulanması nadir olsa da gelişen teknoloji ve farklı kullanım alanlarından dolayı bu yükleme türleri de önem kazanmaktadır. Son yıllarda otomotiv ve havacılık sektörlerinde bu bağlantıların darbe dayanımına olan talebi artarken, mobil cihazlar gibi düşme durumlarında darbelere maruz kalan sistemlerde de yapıştırıcıların kritik rol oynadığı bilinmektedir. Ancak darbe dayanımı konusunda yapılan deneysel çalışmalar genellikle pratik sorunlara odaklanmış olup, bilimsel ve akademik ilerleme sınırlı kalmaktadır. Bu alandaki araştırmaların çoğu, yapıştırma bağlantılarının dayanımını artırmak için yeni yöntemler geliştirmeyi amaçlamakta; ancak bu konuda daha derinlemesine ve sistematik analizlere ihtiyaç vardır.



Şekil 1. 18. Darbe test cihazı (Ghanbari vd. 2015)

Darbe, genellikle nesnelerin çarpışmasıyla oluşan dinamik etkilerin ve gerilme dalgalarının yayılımını ifade eder. Yüksek deformasyon hızlarında atalet etkisi ve gerilme dalgalarının yayılımı dikkate alınması gereken temel unsurlar arasındadır. Atalet etkisinin ve gerilme dalgası yayılımının göz ardı edilebildiği olaylar "yarı-statik" olarak ifade

edilirken, şok dalgaları daha yüksek hızlarda gerçekleşmekte ve genellikle sıcaklık artışıyla ilişkilendirilmektedir. Şok dalgaları, genellikle askeri uygulamalarda karşılaşılan bir durum olup, yapıştırma bağlantılarıyla nadiren ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle, yüksek hızlı yükleme durumları, atalet etkileri, gerilme dalgası yayılımı ve malzeme özelliklerinin deformasyon hızına bağlılığı gibi faktörler üzerinden sınıflandırılmaktadır. Bu bölümde, gerilme dalgaları ve deformasyon hızına bağlı malzeme özellikleri ele alınmış olup, titreşim benzerliği konusu göz ardı edilmiştir.

Gerilme dalgaları: Dinamik yükleme altında malzeme mekaniği, statik durumdan farklıdır ve bu koşullarda cisimde meydana gelen atalet kuvvetleri dikkate alınmalıdır. Dinamik koşullarda, gerilme bir noktada zamanla değişir ve katı içinde iletilir. Bu zaman ve mekân boyutlarında gerilme değişimine "gerilme dalgaları" denir.

$$\rho \frac{\partial^2 \phi(x, t)}{\partial t^2} = (\lambda + 2G) \nabla^2 \phi(x, t) \quad (1.8)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial t^2} = G \nabla^2 \psi(x, t) \quad (1.9)$$

Gerilme dalgalarının yayılımını tanımlayan temel denklemler (Denklem 1.8 ve 1.9), genişleme (dilatasyon) dalgaları (ϕ) ve kayma dalgaları (ψ) için ayrı ayrı ifade edilir. Bu dalgaların hızları, Lamé sabitleri (λ ve G), malzeme yoğunluğu (ρ) ve kayma modülü (G) gibi parametrelere bağlıdır.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = c_1^2 \nabla^2 \phi \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c_1^2 \nabla^2 \psi \quad (1.11)$$

Genişleme dalgalarının yayılma hızı ($c_1 = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho}$) kayma dalgalarının hızından ($c_2 = \sqrt{G/\rho}$) daha yüksektir, bu da genişleme dalgalarının katı içindeki yayılmasının daha hızlı olduğunu göstermektedir. Bu denklemler, yüksek hızlı yüklemeler sırasında malzeme davranışını anlamak ve modellemek için temel teşkil etmektedir.

1.7.2. Yapıştırma bağlantılarında darbe dayanımının belirlenmesi

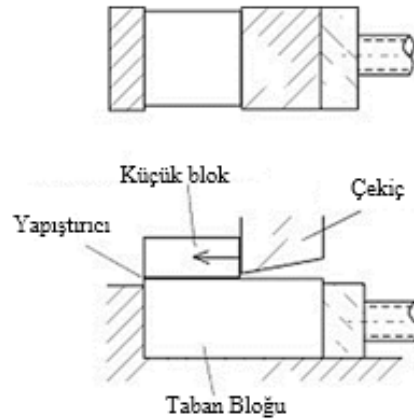
Yapıştırma bağlantılarının darbe dayanımını belirlemek amacıyla çeşitli mekanik test yöntemleri geliştirilmiştir. Bu testler, bağlantıların ani yükler altında gösterdiği performansı değerlendirerek hem malzeme seçiminde hem de yapısal tasarım sürecinde önemli girdiler sağlar. Darbe testleri genel olarak sarkaç tipi sistemler kullanılarak gerçekleştirilmekte olup, test sırasında numuneye belirli bir enerjiyle çarpılarak kırılma anında harcanan enerji ölçülmektedir.

Charpy ve Izod testleri

Charpy ve Izod testleri, geleneksel olarak plastik ve metal malzemelerin darbe dayanımını değerlendirmek için kullanılır. Bu testlerde, çentikli veya çentiksiz numunelere sarkaç tipi çekiçle belirli bir yükü darbe uygulanır. Numunenin kırılması sırasında absorbe edilen enerji, çekiç yüksekliğindeki farktan hesaplanır ve malzemenin darbe dayanımını temsil eder (Şekil 1.18). Her iki test yöntemi de farklı numune yerleşimleri ve çekiç konumlarıyla çalışır; ancak temel prensip, enerji absorpsiyonunun ölçülmesidir.

Blok darbe testi

Yapıştırıcılar için özelleştirilmiş bir yöntem olan **blok darbe testi**, yapıştırma bağlantılarının düşük hızlı darbe yükleri altındaki dayanımını belirlemek için kullanılır. Bu testte, büyük ve küçük boyutlu bloklar arasında oluşturulan yapıştırılmış bağlantıya sarkaçla ani darbe uygulanır (Şekil 1.19). Test, özellikle yapıştırıcıların enerji absorpsiyon kabiliyetlerinin karşılaştırılmasında etkilidir.



Şekil 1. 19. Blok darbe testleri için numunenin konfigürasyonu ve boyutları

Blok darbe testinin sonucunu etkileyen başlıca faktörler şunlardır:

- Yapıştırıcının mekanik özellikleri (tokluk, sertlik vb.)
- Yapıştırıcı tabakasının kalınlığı
- Yüzey hazırlık derecesi
- Çevresel koşullar (sıcaklık, nem vs.)

Tok yapıştırıcılar genellikle daha yüksek darbe enerjisini absorbe ederken, gevrek yapıştırıcılar kırılmaya daha yatkındır. Ayrıca, bazı sünek yapıştırıcılar, tek bir darbede kırılmayabilir, bu da testin tekrarlanabilirliğini sınırlandırabilir.

Darbe kama soyulma testi

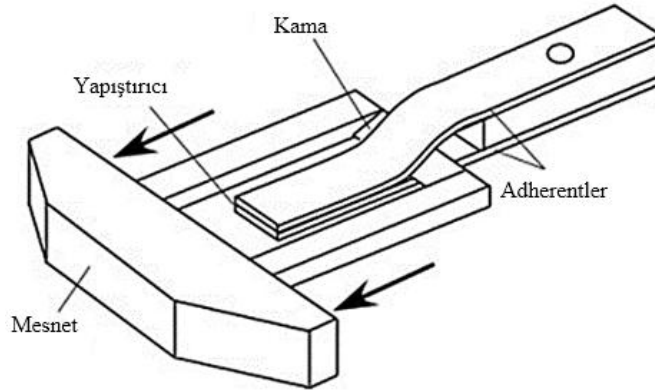
Blok darbe testine alternatif olarak geliştirilen **Darbe Kama Soyulma (DKS)** testi, ISO 11343 standartına dayanmaktadır ve yapıştırma bağlantılarının darbe altındaki soyulma davranışını değerlendirmede kullanılır (Şekil 1.20). Testte, birbirine yapıştırılmış iki metal levha arasına kama yerleştirilir ve bu kama, sarkaç mekanizmasıyla belirli bir hızda (3–5,5 m/s) darbeye çekilir. Bu sırada yük ve yer değiştirme verileri zamanla kaydedilerek bağlantıdan kopma sırasında absorbe edilen enerji hesaplanır. Bu enerji, bağlantının kırılma tokluğunun bir ölçüsüdür.

DKS testinin avantajları:

- Enerji temelli analiz ile bağlantının darbe altındaki davranışı daha ayrıntılı olarak değerlendirilebilir.
- Çatlakın ilerleme yönü ve türü hakkında bilgi verir.
- Bununla birlikte, testin bazı sınırlılıkları da mevcuttur:
- Metal taşıyıcılarda plastik deformasyon kaçınılmazdır ve bu durum enerji hesaplamalarını etkiler.
- Kama ve taşıyıcılar arasındaki sürtünme, ölçülen toplam enerjiye katkıda bulunur.

Bu nedenlerle, ölçülen enerji sadece yapıştırıcı tabakasının kırılma enerjisini değil, aynı zamanda sistemdeki diğer kayıpları da içermektedir. Bu durum, hesaplanan kırılma tokluğu değerlerinin gerçek değerlere kıyasla daha yüksek olmasına yol açabilir.

Ek olarak, kaynak ve yapıştırma ile birleştirilmiş açık uçlu silindirlerde yapılan çalışmalarda, her iki bağlantı türünün de darbe altında deformasyon gösterdiği ancak bağlantı bölgelerinde kırılma meydana gelmediği görülmüştür. Bu bulgular, yapıştırma teknolojilerinin darbe dayanımında ciddi bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.



Şekil 1. 20. Yapıştırıcı bağlantılar için darbe kama soyma testi (ISO 11343)

1.8. Kimyasal Yüzey İşlemleri

Lif–matris ara yüzeyinin mekanik ve kimyasal performansı, kompozit malzemelerin dayanımı ve uzun ömürlülüğü üzerinde kritik rol oynar. Kimyasal yüzey işlemleri, lif yüzeyinde fonksiyonel gruplar oluşturarak matris polimerle güçlü kimyasal bağlar kurulmasını sağlar. Bu işlemler, lifin morfolojisini minimal ölçüde değiştirirken kimyasal reaktivitesini artırır (Mazumdar, 2001; Mallick, 2007).

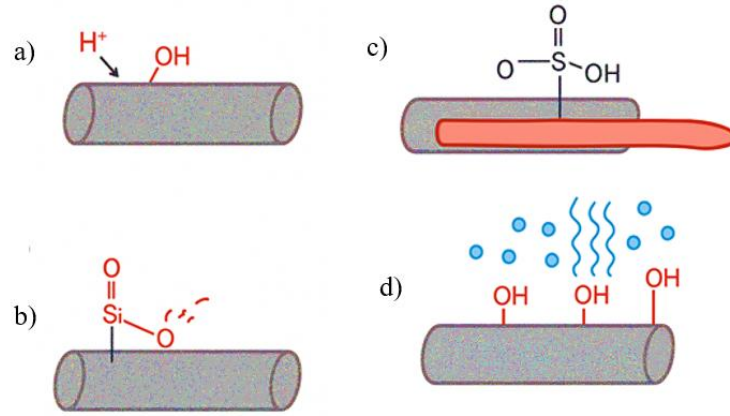
Kimyasal yüzey işlemleri, lif–matris ara yüzeyinin yapısını ve kimyasal karakterini optimize ederek kompozit malzemelerin mekanik performansını artırmayı amaçlar. Bu işlemler, lif yüzeyini temizlemek, aktivite kazandırmak ve fonksiyonel gruplar eklemek gibi görevleri içerir. En yaygın uygulamalar arasında asitle temizleme, alkalın yıkama, silan bağlayıcıların kullanımı ve plazma ile kimyasal aktivasyon yer alır. Yüzey işlemleri, lif ile reçine arasındaki kimyasal bağlanmayı güçlendirerek mekanik dayanım, darbe performansı ve yorulma ömrü gibi kritik özellikleri iyileştirir (Bunsell, 2010; Mittal, 2000).

- **Asitle Temizleme:** Lif yüzeyinde organik kirleri, reçine kalıntılarını ve doğal yağları uzaklaştırmak için kullanılır. Bu işlem genellikle nitrik asit, sülfürik asit veya perasetik asit gibi güçlü oksitleyici asitler ile gerçekleştirilir. Asit uygulaması, lif yüzeyinde mikroporozite oluşturarak yüzey alanını artırır ve hidrofilik grupların ortaya çıkmasını sağlar. Sonuç olarak, matris ile lif arasındaki yapışma kuvveti artar

ve mekanik performans iyileşir. Bu yöntemin avantajı, liflerin temel mekanik özelliklerini bozmadan yüzey reaktivitesini artırabilmesidir. Oluşan kimyasal reaksiyon: $-OH + H^+ \rightarrow -OH_2^+$ şeklindedir ve bu reaksiyon, fiber yüzeyinde aktif yüzey gruplarının oluşmasına neden olur. Ayrıca Karbon liflerdeki $C=C$ bağları oksitlenerek $C=O$ ve $COOH$ gruplarına dönüşür, böylece yüzey fonksiyonel gruplarla aktive edilir.

- **Silan Kaplamalar:** Lif yüzeyini organik reçinelerle kimyasal olarak uyumlu hâle getirmek için tercih edilir. Silan molekülleri, bir ucu ile lif yüzeyindeki hidroksil gruplarına bağlanırken, diğer ucu ile polimer matrisle reaksiyona girer. Bu bağlayıcı katman, ara yüzeyde hem mekanik hem de kimyasal bağlanmayı güçlendirir, darbe ve yorulma dayanımını artırır. Silan uygulamaları, özellikle cam ve karbon lifli kompozitlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. $Si-(OR)_3 + H_2O \rightarrow Si-(OH)_3$ ve ardından $Si-(OH)_3 + -OH_{lif} \rightarrow Si-O-lif$ reaksiyonlarıyla lif yüzeyinde silan köprüleri oluşur.
- **Plazma ile Kimyasal Aktivasyon:** Lif yüzeyini fonksiyonel gruplarla modifiye ederek yüzey enerjisini artırır. Bu işlem sırasında oksijen, azot veya hidrojen plazmaları kullanılarak lif yüzeyinde hidroksil ($-OH$), karboksil ($-COOH$) ve amin ($-NH_2$) grupları oluşturulur. Bu gruplar, lif ile polimer matris arasındaki kimyasal bağlanmayı güçlendirirken, lifin temel yapısını ve mekanik özelliklerini korur. Plazma uygulamaları vakum altında veya atmosferik koşullarda gerçekleştirilebilir; işlem parametreleri (gaz türü, basınç, süre ve güç) optimize edilerek yüzey modifikasyonunun etkinliği artırılabilir. Bu yöntem, reçine penetrasyonu ve lif-matris ara yüzeyinin performansını iyileştirmek için tercih edilmektedir (Bunsell, 2010; Mittal, 2000; Mazumdar, 2001). Plazma muamelesi lif yüzeyinde $-OH$, $-COOH$ ve $-NH_2$ gruplarının oluşmasını sağlayarak yüzey enerjisini artırır.

Kimyasal yüzey işlemleri, kompozit üretiminde ara yüzey kalitesini doğrudan etkileyen kritik bir adımdır. Asitle temizleme, silan bağlayıcılar ve plazma uygulamaları birbirini tamamlayan yöntemler olarak düşünülebilir; her biri farklı lif türleri ve matris sistemleri için optimize edilebilir. Bu yöntemlerin doğru uygulanması, mekanik performansı artırmak, darbe dayanımını iyileştirmek ve lif-matris etkileşimini güçlendirmek için temel bir stratejidir (Şekil 1. 21.).



Şekil 1.21. Lif yüzeyinin aktivasyonu ve reçine ile etkileşim mekanizmaları a) asitle temizleme b) silanlama c) oksidasyon d) plazma oksidasyonu

1.8.1. CTAB ile yüzey modifikasyonu

CTAB (Cetyltrimethylammonium Bromide), katyonik bir yüzey aktif madde olarak, lifli ve adsorbent malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. CTAB molekülünün amfifilik yapısı, hem hidrofobik hem de katyonik özellikler göstererek malzeme yüzeyine etkileşim sağlar ve ara yüzeylerde önemli değişikliklere yol açar (Aksakal, 2008). Doğal olarak negatif yüke sahip fiberler veya kil, CTAB ile muamele edildiğinde yüzeyde katyonik gruplar oluşur. Bu süreç, malzeme yüzeyini pozitif yüklü hâle getirir ve özellikle anyonik kirleticilerin veya bileşenlerin adsorpsiyon kapasitesini artırır. Katyonik CTAB moleküllerinin yüzeyde organize bir şekilde dizilmesi, mikroskobik düzeyde yüzey morfolojisini ve etkileşim özelliklerini değiştirir; böylece malzemenin suyla etkileşim yeteneği ve kimyasal bağlanma kapasitesi artar (Furst et al., 1996).

CTAB ile modifiye edilen fiber veya adsorbent malzemeler, özellikle anyonik yapıdaki moleküller için adsorpsiyon veriminde belirgin bir artış gösterir. Örneğin kil veya diğer lifli adsorbentler, CTAB sayesinde hem boyar maddeleri hem de iyonik kirleticileri çok daha yüksek kapasiteyle tutabilir. Bu artış, yüzeydeki yük değişimi ve ara yüzey etkileşimlerinin optimizasyonu ile doğrudan ilişkilidir (Aksakal, 2008). CTAB modifikasyonu, malzeme yüzeyinde karakteristik kimyasal bağ değişikliklerini de ortaya koyar. Örneğin, FTIR analizlerinde alkilamonyum gruplarının varlığına işaret eden pikler gözlemlenir; bu da CTAB'ın yüzeyde kimyasal olarak etkin olduğunu gösterir (Furst et al., 1996). Bu tür modifikasyonlar, malzeme ara yüzeylerini daha aktif hâle getirerek hem çevresel arıtım hem de ileri kompozit uygulamaları için avantaj sağlar.

Sonuç olarak, CTAB ile yapılan yüzey modifikasyonu, fiberler veya adsorbent malzemelerde aşağıdaki özelliklerin iyileşmesini sağlar:

- Yüzey yükünü negatiften pozitive çevirir,
- Anyonik kirleticiler ve bileşenler için adsorpsiyon kapasitesini artırır,
- Yüzeyin kimyasal etkileşim yeteneğini güçlendirir.

Bu özellikler, CTAB'ı hem çevresel arıtım uygulamaları hem de lifli malzemelerin performansını optimize etme açısından değerli bir modifikasyon aracı hâline getirir.

1.9. Yapıştırma Bağlantılarında Ara Yüzey Karakterizasyonu

Yapıştırma bağlantıları, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin (adherend) bir arada olduğu bir bağlantı sistemidir. Bu sistemde, yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki ara yüzey yer almaktadır. Bağlantıların performansı, her bir bileşenin özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Özellikle, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin kalitesi yüksek olsada, eğer ara yüzey yeterince güçlü değilse, bağlantı sisteminin genel performansı düşük olacaktır. Bu sebeple, ara yüzey, yapıştırıcı ile malzeme arasındaki yük aktarımında kritik bir rol oynamaktadır.

Ara yüzeyin karakterizasyonu, malzemeler arasındaki etkileşimlerin gücünü ve kalitesini belirlemek için oldukça önemlidir. Bu, genellikle fiziksel ve kimyasal analiz teknikleriyle yapılır. Ara yüzeyin mekanik özellikleri, yapıştırıcı ve malzeme arasındaki bağın türünü ve şiddetini belirler. Bu bağlar, mekanik testlerle (örneğin, çekme ve kayma testleri) ve yüzey enerjisi ölçümleriyle değerlendirilebilir. Ayrıca, kimyasal etkileşimlerin analiz edilmesi için, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) gibi teknik kullanılabilir.

Ara yüzeydeki topografik yapılarda, bağlantıların kalitesini etkileyen önemli faktörlerdendir. Yüzey profil ölçümü ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) gibi teknikler, ara yüzeyin mikro ve nano seviyedeki yapısını incelemeye olanak tanır. Bu sayede, yüzeydeki pürüzlülük, mikroskobik çatlaklar veya diğer kusurlar tespit edilebilir. Sonuç olarak, yapıştırma bağlantılarında ara yüzey karakterizasyonu, bağlantıların dayanıklılığını artırmaya yönelik en önemli araştırma alanlarından biridir. Ara yüzeyin doğru tanınması, bağlantıların mekanik performansını nasıl değiştireceği veya etkileyeceği hakkında doğrudan bilgi sağlar. Yapıştırıcıların performanslarını artırmak için ara yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Ara yüzey, yapışma mekanizmasının gerçekleştiği ve yük transferinin sağlandığı bir bölge olarak, bağlantının performansını belirleyen temel bir unsurdur. Ara yüzeyin özellikleri, malzemenin yüzey enerjisi, pürüzlülüğü ve kimyasal fonksiyonel gruplarının varlığı ile doğrudan ilişkilidir. Bu faktörler, yapıştırıcı ile malzeme arasındaki etkileşimi ve bağın gücünü belirleyerek, bağlantının dayanıklılığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

- **Yüzey Enerjisi:** Yapıştırıcının taban yüzeye tutunmasını sağlayan önemli bir parametredir. Yüksek yüzey enerjisi, yapışmanın daha güçlü olması demektir.
- **Termodinamik Kararlılık:** Termodinamik yasalarına göre, ara yüzeyin enerji dengesi, daha düşük potansiyel enerji ve yüksek entropi durumuna ulaşma eğilimindedir. Bu eğilim, ara yüzeyin kimyasal stabilitesini etkilemektedir.

Ara yüzeyin özelliklerinin tespit edilmesi ve optimize edilmesi, yapışma performansını artırmaya yardımcı olmaktadır. Ara yüzeye baktığımızda, yapışma mekanizmalarının temel unsurları şunlardır:

- **Elektrostatik Kuvvetler:** Coulomb kuvvetleri olarak bilinen bu kuvvetler, zıt yüklü atomlar veya moleküller arasında çekim oluştururken, benzer yüklü partiküller arasında itme etkisi yaratır. Bu kuvvetler, iyonik bağlar olduğunda yüksek dayanımlı bağların oluşmasını sağlamaktadır. Örneğin, ara yüzeyde bulunan iyonik ara yüzey davranışı, yapışmanın kimyasal dayanımını artırabilmektedir.
- **Van der Waals Etkileşimleri:** Moleküller arasında görülen bu çekim kuvvetleri, özellikle zayıf yapışma bölgelerinde etkilidir. Bu kuvvetler, her ne kadar zayıf bağlar olsa da ara yüzeydeki mikro boşlukların doldurulması ve yük aktarımının dengelenmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır.
- **Kimyasal Bağlar:** Kovalent bağlar, hidrojen bağları veya yüzey modifikasyonları sonucunda oluşan diğer kimyasal bağlar, ara yüzey dayanımını büyük ölçüde artırmaktadır.

Ara yüzeyde oluşan kimyasal etkileşimlerin veya bağların optimize edilmesi, yüzey modifikasyonları ve nano katkı maddelerinin kullanımı gibi yöntemlerle mümkün hale gelmektedir. Özellikle taban malzemeye uygulanan yüzey işlemleri, yüzey enerji değerlerini artırarak bağlantıların mekanik performansında iyileşmelere yol açmaktadır. Benzer şekilde, yapıştırıcı içerisine eklenen nano veya mikro katkıları, ara yüzey enerjisini

artırmanın yanı sıra, yapıştırıcı içerisinde oluşabilecek çatlaklara karşı fiziksel bir bariyer oluşturarak bağlantıların mekanik performansını olumlu yönde etkilemektedir.

1.9.1. Kohezyon ve adezyon işleri: ara yüzeylerin enerji analizi

Yapıştırma bağlantılarda kohezyon ve adezyon yüzey enerji seviyelerine bağlı olduğundan dolayı bu ifadeler iş olarak tanımlanmaktadır. Bu kohezyon ve adezyon işleri, yüzey ve ara yüzeylerin mekanik performansını anlaşılmasında kritik yere sahiptir. Bu parametreler, yeni yüzeylerin oluşumu veya farklı malzemelerin ayrılması sırasında harcanan enerjiyi değerlerini ifade etmektedir. Kohezyon ve adezyon işlerinin kavranması, yapıştırma bağlantılarının tasarımında yüzey enerjisinin nasıl yönetilmesi gerektiğine dair önemli noktalara değinmektedir.

Kohezyon İşi (W_{Koh}): Kohezyon işi, homojen bir elastik malzemenin iki yeni yüzey oluşturacak şekilde ayrılması sırasında harcanan enerjiyi ifade eder. Tamamen elastik bir malzemede, bu enerji yalnızca yeni yüzeylerin oluşumuna harcanmaktadır. Kohezyon işi

$$W_{Koh} = 2\gamma \quad (1.12)$$

Denklem 1.8'deki gibi ifade edilmektedir. Burada γ , malzemenin yüzey enerjisini temsil eder. Bu denklem, her iki yeni yüzeyin de aynı malzemeden oluştuğu varsayarak, Griffith kırılma kriterine göre, bir çatlak yalnızca malzemenin gerilme enerjisi yüzey enerjisini aştığında büyümektedir. Ancak, çoğu malzeme bu şekilde gevrek ve elastik davranmaz; bunun yerine viskoelastik olarak enerji absorbe eder.

Adezyon İşi (W_A): Adezyon işi, farklı iki malzemenin birbirinden ayrılması sırasında harcanan enerji olarak tanımlanır. Bu durumda, iki yeni yüzeyin oluşturulması için gereken enerji, ara yüzeydeki moleküller arası kuvvetlerin kaybindan etkilenmektedir. Bu enerji, Dupré denklemi (Dupre 1869) (Denklem 1.13) ile ifade edilir:

$$W_A = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (1.13)$$

Burada γ_1 ve γ_2 ayrılan malzemelerin yüzey enerjisi, γ_{12} ise iki malzeme arasındaki ara yüzey enerjisini temsil etmektedir. Ara yüzey enerjisi, iki malzemenin bir araya gelmesi sırasında oluşan moleküller arası kuvvetlerin bileşkesidir ve birim alan başına enerji (J/m^2) olarak ifade edilir. Bu denkleme göre, ara yüzey enerjisinin (γ_{12}) düşük olduğu durumlarda, adezyon işi (W_A) daha yüksek olacağı görülmektedir. Ara

yüzey enerjisini daha iyi anlaşılması için bunun molekül düzeyinde, moleküller arasında etkileşimleri ve koordinasyon sayısına bağlı olduğu bilinmelidir. İki farklı malzemenin temas ettiği ara yüzeyde moleküller arasındaki enerji kaybı şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\gamma_{AB} = \frac{N_{Z_i}}{2a}(X_{AA} + X_{BB} - 2X_{AB}) \quad (1.14)$$

Denklemdaki ifadelerle bakıldığında X_{AA} ve X_{BB} homojen moleküller arasındaki etkileşim enerjileri, X_{AB} ise farklı moleküller arasındaki etkileşim enerjisi, Z_i ara yüzeydeki koordinasyon sayısı ve a ise Moleküler çift başına düşen kesit alanı temsil etmektedir. Bu ifade, ara yüzey enerjisinin genellikle yüzey enerjisinden daha düşük olduğunu ifade etmektedir, çünkü ara yüzey enerjisi, iki malzemenin temasındaki moleküller arası etkileşimlerden kaynaklanan enerji kayıplarını yansıtmakta ve bu hesaplama sırasında enerjiler birbirinden çıkarılmaktadır.

1.9.2. Analitik yöntemler

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda yapışmanın moleküler düzeyde gerçekleştiği ve bu süreci etkileyen çok sayıda parametre bulunduğu bilinmektedir. Mekanik test yöntemleri, bu bağlantıların dayanımlarını inceleyerek tasarım süreçlerinde kullanılsa da, yapışma mekanizmasının doğasını anlamak ve yapıştırıcı ile taban malzeme arasındaki yüzey özelliklerini değerlendirmek için analitik yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemlerin önemi, yapıştırıcı ile malzemenin birleşimi sonucu oluşan ve "üçüncü faz" olarak adlandırılan ara yüzeydeki etkileşimlerin incelenmesinden kaynaklanmaktadır. Ara yüzeyin zayıf olması veya yapışmayı engellemesi, bağlantıların mekanik performansını doğrudan olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

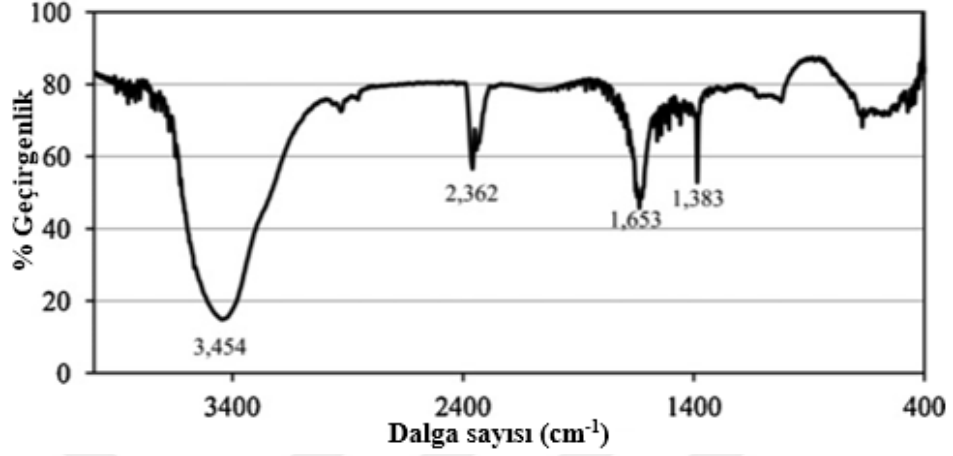
FTIR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi): Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) organik, polimerik ve bazen inorganik malzemeleri tanımlamak için kullanılan analitik bir yöntemdir. FTIR analizi, test numunelerinin kimyasal özelliklerini incelemek için kızılötesi ışık kullanır. Ayrıca yüzey işlemler uygulandığında malzemeye yapısına bağlı olarak yüzeyde var olan bazı molekül gruplarının tekrardan aktive edilmektedir. Bu aktive edilmiş molekülleri ve konsantrasyonunu belirlemek için kızılötesi spektroskopi analizlerinde biri olan ve sıklıkla kullanılan FTIR kullanılmaktadır.

Yakın kızılötesi bölgesi (12000-4000) cm^{-1}

Orta kızılötesi bölgesi (4000-400) cm^{-1}

Uzak kızılötesi bölgesi ($400-100\text{ cm}^{-1}$)

Şeklinde olup, genelde uygulamalar için kullanılan $4000-400\text{ cm}^{-1}$ arası olan spektrum bölgesidir (Smith, 2011, Yücel, 2019).



Şekil 1. 22. Tipik bir FTIR spektrumu (Rahmanian, 2013)

Verilen grafikte x eksenini dalga boyunu, y eksenini ise test edilen numune tarafından emilen veya geçirilen kızılötesi ışık miktarını ifade etmektedir (şekil 1.22). Genel olarak bir FTIR grafiği iki bölgeye ayrılır. 1500 cm^{-1} üzerindeki bölge fonksiyonel grup (Functional group region), altındaki bölge ise parmak izi (Fingerprint region) olarak isimlendirilmektedir. Yüzeyde bulunan fonksiyonel grupların ve yüzeyde yeniden aktive edilen molekül gruplarının fazlalığı, yüzey enerjisinin de yüksek olduğunu göstermekte; bu da dolaylı olarak ara yüzey etkileşimini önemli derecede etkilemektedir. Örneğin; Sun vd. (1989) yaptığı araştırmada oksijen plazması kullanarak fiber ve matris arayüzeyinde bulunan karboksilik asit (COOH) ve karbon grupları (--C--OH , =C=O) artırmıştır. Bu artan reaktif grupların varlığının temas açısını azalttığı ve fiber ile matris arasındaki ıslanabilmeyi artırdığı görülmektedir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM): Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), numunelerin yüksek çözünürlüklü görüntülerini ve yüzey bilgilerini elde etmek için kullanılan çok yönlü bir tekniktir. Ayrıca SEM, odaklanmış bir elektron demetiyle bir numunenin yüzeyini tarar ve optik mikroskoplardan çok daha yüksek bir çözünürlük sağlar. SEM cihazlarının çözünürlüğü nanometre seviyelerine kadar değişebilmektedir. SEM, özel dedektörler kullanılarak çeşitli sinyalleri toplar. Bu sinyaller, elektronların örnek atomlarla etkileşime girmesiyle oluşur. Bu sinyaller, yüzeyin bileşimini ve topografyasını göstermektedir. Yüzdeki bileşimlerin mikro analizini yapmak için enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) dedektörleri de kullanılabilir.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile mikro yapı analizi, malzemelerin iç yapısını nanometre seviyesinde detaylı bir şekilde incelememize olanak tanıyan ileri bir karakterizasyon yöntemidir. Bu teknik, malzemelerin tane boyutu, tane sınırları, fazların dağılımı, gözeneklilik, çatlak oluşumu ve çeşitli kusurlar gibi mikroyapısal özelliklerini yüksek çözünürlükte görüntüleme imkânı sunar. SEM, metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler gibi geniş bir malzeme yelpazesinin mikroyapısal karakterizasyonunda kullanılmakta olup, özellikle malzeme geliştirme ve kalite kontrol süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle yapıştırıcı sistemlerde, yapıştırıcılara eklenen nano veya mikro ölçekli katkı maddelerinin ara yüzey üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılır. Bu maddeler, yapıştırıcıların mekanik performansını artırmak, çatlak ilerlemesini yavaşlatmak ve enerji yutma kapasitesini yükseltmek amacıyla eklenir. SEM analizi, bu katkı maddelerinin ara yüzeye *nasıl dağıldığını, matrisle etkileşimlerini ve bağlanma bölgesindeki homojenliklerini* inceleme imkânı sağlar. Örneğin, karbon nanotüpler, grafen veya nanokil gibi nano bileşenlerin ara yüzeydeki varlığı ve etkisi, SEM görüntüleriyle detaylı bir şekilde analiz edilebilmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tez çalışmasında, fiber takviyeli kompozitlere uygulanan ara yüzey işlemleri ve bunların yapıştırıcılar ile türevlerindeki uygulamalarının mekanik performans üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Literatür taramasında, öncelikle güçlendirmede kullanılan nano ve mikro partiküllere sahip yapıştırıcı sistemleri incelenmiş; ardından fiber takviyeli bağlantılar ile fiberlere uygulanan ara yüzey işlemlerinin mekanik performansa etkileri değerlendirilmiştir. Özellikle fiber yüzeyine uygulanan işlemlerin, fiber yüzey enerjisinin artırılmasına, ıslanma davranışının iyileştirilmesine ve yüzey oksijen grupları ile reçine bileşenleri arasındaki etkileşimlerin değişmesine yol açtığı ortaya konmuştur. Son olarak, yapıştırıcı sistemlerine eklenen partiküller ve lifli yapılar ile bu yapılara uygulanan yüzey işlemlerinin bağlantıların mekanik performansına etkileri incelenmiştir.

2.1. Partikül veya Fiber Katkılı Yapıştırma Bağlantıları ve Kompozitler

Khayamdar ve Khoramishad (2021) tarafından yapılan çalışmada, farklı geometrilere sahip alüminyum fiberlerle takviye edilmiş kompozit yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında, çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) farklı geometrik yapılara (düz, bükülmüş ve yay şeklinde) ve uzunluklara sahip alüminyum fiberlerle birlikte kullanılmasıyla kompozit yapıştırma bağlantıları oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, çok duvarlı karbon nanotüp ve alüminyum fiber kombinasyonunun bağlantı dayanımını %171 oranında artırdığını göstermektedir. Bunun yanı sıra, bükülmüş alüminyum fiberlerin düz fiberlere kıyasla bağlantı dayanımını artırdığı, yay şeklindeki fiberlerin ise dayanımı azalttığı belirlenmiştir.

Sistani ve Shariati (2024) tarafından yapılan çalışmada, grafen nanoparçacıklarının (GNP) epoksi yapıştırıcılara ilave edilmesiyle mod-I ve mod-II kırılma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Mod-I ve Mod-II testlerini gerçekleştirmek amacıyla, epoksi yapıştırıcı (Axson-Sika Adekit A 140-1) kullanılarak alüminyum ve cam elyaf takviyeli polimer kompozit bağlantılar üç farklı test grubu hâlinde hazırlanmıştır: katkısız (Neat) ve ağırlıkça %0,05, %0,1 ve %0,2 oranında GNP ile güçlendirilmiş bağlantılar. Elde edilen sonuçlar, her iki mod için de en yüksek kırılma tokluğunun %0,1 GNP eklenmesi ile elde edildiğini göstermektedir. GNP takviyesi, mod-

I kırılma tokluğunu %115, mod-II enerji yayılım oranını ise %83 oranında artırmıştır. Kırılma yüzeyleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve mikroyapı ile hasar mekanizmaları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Cetkin (2023) tarafından yapılan bu çalışmada, epoksi yapıştırıcı içerisine nanoparçacıkların ilave edilmesiyle oluşturulan bağlantıların mekanik performansları incelenmiştir. Çalışma kapsamında, DP410, DP460 ve DP490 epoksi yapıştırıcılarına farklı oranlarda (%0,1, %0,2, %0,3 ve %0,4) GNP eklenerek bu takviye türünün çekme mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapıştırma ve yama malzemesi olarak AA5754 alüminyum alaşımları ile cam elyaf takviyeli kompozitler kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, nanoparçacık takviyesi yapılan tüm bağlantılarda çekme mukavemetinin, takviye yapılmayan bağlantılara kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. En yüksek çekme mukavemeti, DP460 epoksi yapıştırıcısında %0,3 ağırlık oranında GNP kullanıldığında 6154 MPa olarak ölçülmüştür. Hasar analizleri, GNP ile epoksi yapıştırıcı yüzeyleri arasında homojen bir bağ oluştuğunu ve bu etkileşimin özellikle cam elyaf takviyeli kompozitlerde lif kırılmalarına neden olduğunu göstermiştir.

Bali ve Topkaya (2023) tarafından yapılan çalışmada GNP ile modifiye edilmiş yapıştırıcıların, tek tesirli yapıştırma bağlantılarının çekme yükleri altında yorulma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapıştırılan malzeme olarak karbon fiber takviyeli plastik (KFTP) ve yapıştırıcı olarak 3M DP460 kullanılmıştır. Yapıştırıcıların içerisine %0,25, %0,5 ve %1,0 GNP takviye edilmiş ve edilmemiş bağlantılar üretilerek test edilmiştir. Çekme testi sonuçları, GNP oranındaki artışın bağlantıların çekme mukavemetini artırdığını göstermektedir. %0,5 GNP takviyeli yapıştırıcılarla yapılan bağlantılar en yüksek yorulma ömrü performansı sergilediği, düşük yük seviyelerinde kohezif ve yapıştırıcı hataların gözlemlendiği, yük seviyesi arttıkça farklı hasar türlerinin meydana geldiği belirtilmiştir.

Gao vd. (2016) tarafından yapılan bu çalışmada, karbon fiber yüzeyinin grafen oksit (GO) ve karbon nanotüpler (CNT'ler) ile takviye edilen güçlendirilmiş karbon/karbon kompozitlerinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Karbon nanotüpler ve grafen oksit, karbon fiber yüzeyine kimyasal grafting yöntemiyle nüfuz ettirilmiş ve bu modifikasyon, karbon fiberin kutupsal fonksiyonel gruplarını ve yüzey enerjisini önemli ölçüde artırmıştır. Elde edilen kompozitlerin mekanik test sonuçlarına bakıldığında, aratabaka kayma mukavemetinin %48,12 ve arayüzey kayma mukavemetinin ise %83,39 oranında arttığı görülmektedir. GO ve CNT'lerin varlığı, fiber yüzeyinin alanını ve

ıslanabilirliğini artırarak, güçlendirilmiş kompozitlerin mekanik özelliklerinde önemli bir iyileşme sağladığını açıkça göstermektedir.

Zamani vd. (2020) tarafından yapılan bu çalışmada, alüminyum ve kompozit yapıştırılan malzemeler arasında kullanılan Araldite 2015 yapıştırıcıya grafen ve nano-silika nanoparçacıklarının eklenmesinin yorulma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dört farklı yapıştırıcı grubu hazırlanmıştır: saf, nanosilika takviyeli, nanografen takviyeli, ve her iki nanoparçacığın karışımı (%0,5 her bir parçacık). Deney sonuçlarına göre, grafen takviyeli bağlantıların, silika takviyelilere göre %0,5 ve %1 katkı oranlarında daha yüksek çekme dayanımı sağladığını, ancak %1,5 oranında silika takviyeli bağlantıların daha iyi performans gösterdiğini ortaya konulmuştur. Her iki nanoparçacığın karışımıyla yapılan takviyenin, yalnızca tek başına kullanılan %1 ağırlık oranındaki takviyeli örneklerle kıyasla daha uzun bir yorulma ömrü sağladığı tespit edilmiştir. Arka yüzey gerilmesi ölçümleri, nanoparçacıkların çatlak başlatma aşamasını geciktirme üzerindeki etkilerinin belirgin olduğunu göstermektedir. Ayrıca, optik mikroskopik incelemeler, nanoparçacıkların eklenmesinin hasar modunu adezif hasardan kohezif hasara dönüştürdüğünü göstermiştir.

Nemati Giv vd. (2018) Metal makro fiberlerin yapıştırıcı içerisine eklenmesiyle oluşturulan tek tesirli yapıştırma bağlantılarının (SLJ) mekanik performansları incelenmiştir. Boyuna yönde yerleştirilen metal makro fiber sayısının artırılmasının, kayma mukavemetini ve kopma gerilmesindeki uzama değerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Ancak bu iyileşmenin, metal makro fiberler arasındaki yatay mesafe oranının 1 olarak seçilmesi durumunda en uygun seviyeye ulaştığı ifade edilmiştir. Bir diğer yandan, yatay yönde yerleştirilen makro fiberlerin bağlantıların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Sonlu eleman analizleri, fiber yönelimi ve yatay mesafenin yapıştırıcıdaki soyulma ve kayma gerilmesi dağılımlarını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Boyuna yönde yerleştirilen fiberler arasındaki mesafenin azalmasının bağlantı mukavemetini artırdığı, yatay yönde ise mesafenin azalmasının mukavemeti azalttığı tespit edilmiştir.

Zhao vd. (2024) tarafından yapılan bu çalışmada, bazalt fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin ara katmanına bir bazalt fiber tabaka daha ilave edilerek kırılma dayanımı deneysel olarak incelenmiştir. Çift konsol kiriş (DCB, Double Cantilever Beam) testleri sonucunda, bazalt fiber takviyesi ile elde edilen kırılma enerjisi (G_{IC}) değerlerinin, takviye edilmemiş olanlara kıyasla %157 oranında arttığı tespit

edilmiştir. Çalışma sonuçlarına bakıldığında, bazalt fiber ara katmanın çatlakların yayılmasını önemli ölçüde engellediği ve bu sayede kompozitlerin mekanik dayanımını artırdığı görülmektedir. Hasar yüzeyleri incelendiğinde, takviyeli tabakaların maksimum ve ortalama yük değerlerinde sırasıyla %73 ve %72,7 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular, bazalt fiber tabakasının termoplastik kompozitlerin tabakalar arası (interlaminar) kırılma dayanımını artırmada etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Long ve Li (2022) tarafından sunulan bu çalışmada, epoksi yapıştırıcıların içerisine SiO_2 nanoparçacıkları ilave edilerek oluşturulan bağlantıların mekanik performansları incelenmiştir. Çalışmada, 20 nm boyutundaki SiO_2 nanoparçacıkları inaktif gruplar, NH_2 aktif grupları ve C_4H_8 aktif grupları ile modifiye edilmiştir. SEM analizlerine göre, aktif gruplarla modifiye edilen nanoparçacıkların epoksi içerisinde daha homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. SiO_2 - C_4H_8 nanoparçacıkları %0,05 kütle oranında kullanıldığında, yapıştırıcının mekanik özelliklerinin (çekme ve eğilme dayanımı, uzama, darbe dayanımı) önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. NH_2 ve C_4H_8 gruplarıyla modifiye edilen SiO_2 nanoparçacıklarının, CFRP/çelik çift tesirli bağlantıların ek yerlerindeki hasar yük kapasitesini artırarak bağlantı performansını iyileştirdiği görülmüştür.

Khalili vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli yapıştırma bağlantılarında kullanılan yapıştırıcıya farklı türlerde cam fiberler (uzun, kırılmış ve öğütülmüş cam tozu) ve bu katkıların bağlantı dayanımına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Yapıştırıcı içerisine %30 oranında cam fiber ve %20, %30, %40 oranlarında cam tozu eklenmiş, ardından çekme, eğilme, darbe ve yorulma testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, cam fiberlerin yapıştırıcı içindeki yönelme açılarına bağlı olarak bağlantıların dayanımını ve şekil değiştirmesini etkilediği, ancak rijitliğini değiştirmediği görülmüştür. Cam tozu eklemenin, bağlantıların dayanımını ve rijitliğini artırdığı, ancak şekil değiştirme üzerinde çok fazla etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, cam tozu eklemenin yorulma dayanımını %125 oranında artırdığı ve diğer mekanik özelliklerde de önemli iyileşmeler sağladığı bulunmuştur. Bu bulgular, cam fiberlerin ve tozlarının yapıştırıcıda kullanılmasının, bağlantıların performansını artırabileceğini göstermektedir.

E. Esmaceli vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli yapıştırma bağlantılarının bindirme bölgesine metal fiberler eklenerek bağlantıların eğilme davranışı

hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Metal fiberlerin yapıştırıcı içerisine eklenmesiyle farklı yapıştırıcı kalınlık oranları oluşturulmuş ve bu değişimlerin bağlantı dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlara bakıldığında, metal fiberler arasındaki mesafe azaldıkça soyulma gerilmesinin azaldığı ve gerilme dağılımının daha düzgün hale geldiği görülmektedir. Ayrıca, metal fiber eklemenin, yüksek yükleme hızlarında bağlantının kesme dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir.

Hamza (2024) tarafından sunulan çalışmada, paslanmaz çelik dokuma tel örgü (PÇDTÖ) takviyesinin yapıştırıcı katman üzerindeki etkisi, tek tesirli bağlantıların yük taşıma kapasitesi üzerinden incelenmiştir. Farklı örgü sıklıkları (20, 40, 60, 80) ve PÇDTÖ alanlarının bağlantı dayanımına etkilerini incelemiştir. Ayrıca, PÇDTÖ'nün yapıştırıcı katmanında stratejik olarak ortada ve uçlarda yerleştirilmesinin bağlantı dayanımına katkısını da ele almıştır. Sonuçlara göre, PÇDTÖ takviyesinin örgü sıklığı, alanı ve konumuna bağlı olarak tek tesirli bağlantıların dayanımını %7 ile %46 arasında artırdığı görülmektedir. Özellikle PÇDTÖ'nün uçlara yakın yerleştirilmesi ve alanının artırılması, bağlantı dayanımını önemli derecede artırmıştır.

Khakpour vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, yıllık budama işlemiyle elde edilen doğal hurma ağacı lifleri, yapısal yapıştırıcıların içerisine ilave edilerek oluşturulan yapıştırma bağlantılarının mekanik performansları deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada lifin işlenme durumu, uzunluğu ve miktarına bağlı olarak yapıştırıcıların mekanik performansları araştırılmıştır. Farklı türdeki liflerin ham ve işlem görmüş halleri karşılaştırılmış, lif yüzeylerinin morfolojisi ise ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, bu biyolojik uyumlu liflerin kullanımının bazı durumlarda dayanımları %64'e kadar artırdığı görülmektedir. Ayrıca, lif uzunluğunun artışı mukavemetin daha da iyileşmesine yol açarken, belirli bir ağırlık oranının üzerinde lif ilave edildiğinde bu etkinin azaldığı gözlemlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla, lif yüzeylerinin işlenme koşullarının yüzey morfolojisine etkisi de incelenmiştir.

Akhavan-Safar vd (2022) tarafından yapılan bu çalışmada, doğal hurma palmyesi liflerinin (DPTF) E-cam/epoksi dokuma kompozit tabakalarının Mod II kırılma enerjisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, DPTF türleri (Mesh, Rachis, Petiole, Bunch) %6 NaOH çözeltisiyle işlenmiş ve ardından kompozit reçinelerine %1,5 ve %5 oranında eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar, DPTF'lerin dokuma kompozit tabakalarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirdiğini göstermektedir. En belirgin iyileşmenin ise, %5

oranında Petiole liflerinin eklenmesiyle çatlama dayanımının başlangıcında %61'lik bir artış, %5 oranında Bunch liflerinin eklenmesiyle ise kararlı durum çatlama dayanımında %73 oranında bir artış elde edilmiştir. Ayrıca, delaminasyon bölgesindeki hasar mekanizmaları makro ve mikro görsellerle analiz edilerek, DPTF'lerin çatlak büyümesini engelleyici etkisi ve daha fazla enerji absorbe ettiği kanıtlanmıştır.

Thirunavukarasu ve Sikarwar (2024b) tarafından yapılan bu çalışmada, tek tesirli kompozit yapıştırma bağlantılarda (TTKYB) yapıştırıcıya eklenen ağ yapıların bağlantıların mekanik performansı ve rijitliği üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında, elle yatırma yöntemiyle üretilen TTKYB tabakalı kompozitler yapıştırılan malzeme olarak kullanılmış ve yapıştırıcı içerisine paslanmaz çelik 304 ile örgü kumaş ağ yapıları eklenmiştir. Deney sonuçlarına göre, ağ yapısı ile takviye edilmiş yapıştırma bağlantısının, sadece yapıştırıcı kullanılarak elde edilene kıyasla çekme mukavemeti ve üç nokta eğme mukavemeti sırasıyla %25,06 ve %18,73 oranında arttığı, üç nokta eğme testinde ise %30 ve %10,1 iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, rijitlik %18,6 ve %12,62 oranında artmıştır. Paslanmaz çelik ağ yapı takviyeli bağlantılar, yapının ani kırılmasını geciktirirken yapısal ağırlığı azaltma potansiyeli de olduğunu göstermektedir.

Shanshan Shi vd. (2024) tarafından yapılan bu çalışmada, epoksi reçine yapıştırıcısına kısa Kevlar elyafı eklenerek elde edilen elyaf takviyeli yapıştırıcının, karbon fiber takviyeli taban malzemelerden oluşturulan tek tesirli yapıştırma bağlantılarının statik dayanımı ve kopma uzaması üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Farklı ağırlık oranlarında (%1, %2, %3, %4) Kevlar elyafı eklenerek, bu elyaf miktarlarının yapıştırma performansına etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, uygun miktarda Kevlar elyafı eklenmesinin, çatlak yayılmasını yavaşlatarak bağlantı dayanımını artırdığını göstermiştir. Hasar yüklerine göre en iyi performans, %2 Kevlar elyafı içeren bağlantılardan elde edilmiştir; bu bağlantılarda maksimum yük %30,52, uzama ise %25,78 oranında artmıştır. DIC (Dijital Görüntü Korelasyonu) ve SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) teknikleriyle yapılan mikroskobik incelemeler, kısa Kevlar elyaflarının fiber köprüleme mekanizmasıyla çatlak oluşumunu azalttığını ve yapışma özelliklerini iyileştirdiğini doğrulamaktadır.

Akpınar vd (2023) tarafından yapılan bu çalışmada, kompozit yapıştırıcıların yapısal bağlantıların mekanik dayanımına olan etkileri deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Tek tesirli yapıştırma bağlantıları, DP460 sertleştirilmiş yapıştırıcı

içerisine karbon ve cam elyaf kumaş takviyeleri kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, elyaf takviyeli yapıştırıcıların bağlantılarda oluşan çatlak ilerlemesini engelleyerek kopma yükünü artırdığı görülmektedir. Kopma yükündeki artış oranının, yapıştırıcı kalınlığına ve elyaf türüne bağlı olarak %5 ile %41 arasında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, sayısal analiz sonuçlarının deneysel bulgularla uyumlu olduğu görülmüştür.

Thirunavukarasu ve Sikarwar (2024a) tarafından yürütülen bu çalışmada, tek tesirli kompozit yapışma bağlantılarında yapıştırıcıya fiber kumaşlar ilave edilerek bağlantıların mekanik performans üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, tek ve çift yönlü cam fiberlerin yanı sıra çift yönlü karbon fiber kumaşlar da kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, yapıştırıcı içerisine eklenen karbon fiber kumaşın, bağlantıların yük taşıma kapasitesini, eğilme dayanımını ve rijitliğini önemli ölçüde artırdığını görülmektedir. Karbon fiber takviyesi, ani bağlantı kopmalarını önleyerek bağlantının rijitliğini artırmış ve ayrıca, bu takviyelerle oluşturulan bağlantıların doğal frekansları ve sönümlenme özellikleri de iyileştirilmiştir.

Ozdemir vd. (2017) tarafından sunulan çalışmada, farklı malzemelerden oluşan tek tesirli yapıştırma bağlantılarına, yapıştırıcıya kumaş takviyeleri ilave edilerek bağlantıların hasarı ve enine darbe davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada AA6082-T6 alüminyum ve cam elyaf takviyeli polimer kullanılmış, yapıştırıcı olarak sıcak kürleşme özelliklerine sahip bir epoksi yapıştırıcı tercih edilmiştir. Yapıştırma yüzeyine eklenen iki katman cam elyaf takviyesi, oda sıcaklığında %33,6'lık bir kopma yükü artışı sağlamıştır. Ancak test sıcaklığının 75 °C'ye yükselmesiyle kopma yüklerinde azalma gözlemlenmiştir. Düşük hızlı enine darbe sonrası yapılan çekme testlerinden ise, darbenin kopma yükünü önemli ölçüde azalttığı, ancak çift katman karbon ve cam elyaf takviyeli bağlantıların sırasıyla 1875 N ve 1270 N üzerinde dayanım gösterdiği belirlenmiştir.

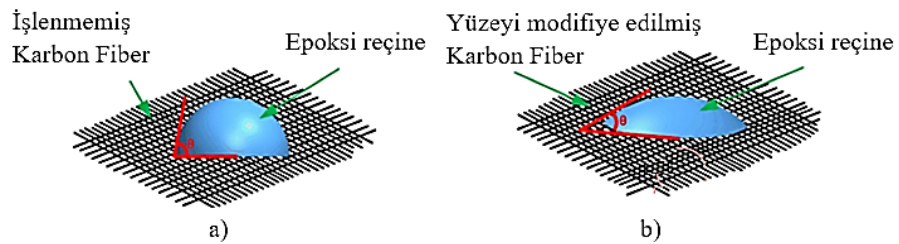
Çalık vd. (2023) tarafından yapılan bu çalışmada, yapıştırma bağlantılarında kullanılan fiber takviyeli kompozit yapıştırıcıların bağlantı dayanımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araştırmada, AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve DP460 yapısal yapıştırıcı kullanılarak tek tesirli yapıştırma bağlantıları üretilmiş, karbon, cam ve aramid fiber kumaşlar yapıştırıcı bölgesine takviye olarak eklenmiştir. Farklı bindirme uzunluklarına (%100, %80, %40 ve %20) sahip fiber kumaş boylarının, bağlantının hasar yükü üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlara bakıldığında, fiber takviyeli

yapıştırıcının bağlantı kopma yükünü %16 ile %90 arasında artırdığı görülmektedir. Ayrıca, hasar yükündeki artış oranı, fiber kumaşın türüne ve uzunluğuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir; çalışmada en yüksek hasar yükünün karbon fiber takviyeli bağlantılarda elde edildiği bildirilmiştir.

2.2. Yüzey İşlemi Uygulanmış Partikül veya Fiber Katkılı Yapıştırma Bağlantıları ve Kompozitler

Karbon fiber (KF), yüksek mukavemet-ağırlık oranı, kimyasal ve aşınma direnci nedeniyle yapısal kompozitlerde çoğunlukla takviye olarak kullanılmaktadır. Ancak, fiberin inert yüzeyi nedeniyle elde edilen karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP), sınırlı hasar dayanımlarına ve delaminasyona eğilimli olup zayıf ara yüzey dayanımı sunmaktadır. Bu nedenle, havacılık, uzay ve otomotiv gibi farklı sektörlerde kullanılan karbon fiberlerin kullanılabilmesi için fiber yüzeyinin modifikasyonu gerekmektedir.

Yapılan bir derleme çalışmasında (Ansari, 2023), KF yüzeyinde fiziksel ve kimyasal değişiklikler yaratmak için kullanılan yüzey modifikasyon teknikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Yüzey modifikasyonunun, KF'nin matrisle uyumunu artırarak kompozitlerin performansını iyileştirdiği vurgulanmıştır. Çalışma, plazma, kimyasal, nanoparçacık büyümesi, kaplama ve mikrodalga gibi çeşitli yüzey modifikasyon tekniklerini uygun görsellerle aktarmıştır. Burada esas olan şudur ki; yapılan işlem türüne bağlı olarak KF'nin yüzeyine işlem uygulandığında yüzey enerjisi artmakta ve temas açısı değeri azalmaktadır (şekil 2.1). Bu da fiberin reçine veya yapıştırıcılarla olan ara yüzeyini iyileştirmekte olup, kompozitlerin mekanik performansını da etkilemektedir.



Şekil 2. 1. (a) İşlenmemiş KF'nin ve (b) yüzeyi modifiye edilmiş KF'nin epoksi reçineye göre ıslatılabilirliğinin şeması (Ansari, 2023)

Dai vd (2011) tarafından sunulan çalışmada, yüzey işlemi uygulanmış ve uygulanmamış T300B ve T700SC karbon fiberleri karşılaştırılarak, yüzey işleminin fiberlerin yüzey özellikleri ile fiber/epoksi ara yüzey yapışması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada, yüzey işlemi görmemiş fiberlerin, ticari yüzey işlemi görmüş

fiberlere kıyasla daha yüksek dispersif yüzey enerjisine ve daha düşük aktif karbon atomu konsantrasyonuna sahip olduğu, ancak buna rağmen daha yüksek ara yüzey kayma dayanımı sergilediği belirlenmiştir. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) analizleri, yüzey işlemi uygulanmamış fiberlerin düşük aktif karbon atomu içeriğine sahip olduğunu, buna karşın ticari işlem görmüş fiberlerin ara yüzey kayma dayanımı sağladığını ortaya koymuştur. Çalışma, ara yüzey kayma dayanımındaki farklılıkların elyaf yüzey özelliklerinden kaynaklandığını ve karbon fiber takviyeli kompozitlerde yüzey işlemleri ile yapışma dinamikleri arasındaki karmaşık etkileşimlere önemli bir bakış açısı sunduğunu göstermektedir.

Dai vd. (2012) tarafından yapılan bu çalışmada, kompozitlerin kürleşme süreci boyunca PAN (poliakrilonitril) bazlı karbon fiberlerin yüzeyindeki fonksiyonel gruplar ile fiber yüzey boyutlandırması (boyutlandırma, bir malzemenin yüzeyine uygulanan kimyasal bir işlem veya kaplama) arasındaki etkileşimler incelenmiş ve bu etkileşimlerin sızdırmazlık ile yapışma performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, artan ısı işlem sıcaklıklarının epoksi grubu konsantrasyonunda kademeli bir azalmaya neden olduğunu ve bu grupların 200 °C'de tamamen kaybolduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, çalışma karbon fiberler ile yüzey boyutlandırması arasındaki reaksiyon hızının, boyutlandırma sisteminin sınırlarını aşarak daha fazla etkileşim sağladığını göstermiştir. XPS analizleri, özellikle 150°C'de uygulanan haşıl sökme işlemi sonrasında fiber yüzeylerinde CO bağlarının ve aktif karbon atomlarının varlığında belirgin bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Bu araştırma, kürleşme süreci boyunca fiber yüzeylerinde meydana gelen önemli değişimlerin kompozit malzemelerin mekanik performansı ve ara yüzey özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu vurgulayarak, bu alana ilişkin yeni bir perspektif sunmaktadır.

Moosburger-Will vd. (2018) tarafından sunulan bu çalışma, karbon fiberler ve epoksi bazlı polimer ile boyutlandırmalar (boyutlandırma, bir malzemenin yüzeyine uygulanan kimyasal bir işlem veya kaplama) arasındaki etkileşimlerin farklı yönlerini incelemektedir. Özellikle, ıslatma davranışı, fiber ile boyutlandırma arasındaki yapışma mukavemeti ve boyutlandırma tabakasının termal stabilitesi araştırılmıştır. Karbon fiber yüzey kimyası ve boyutlandırma reaktivitesinin etkisi, farklı derecelerde anodik oksidasyon uygulanmış fiberler kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, farklı reaktif epoksi gruplarına sahip boyutlandırmaların bu etkiler üzerindeki rolü değerlendirilmiştir. Fiberlerin boyutlandırma ile ıslanması, fiber aktivasyonu ve boyutlandırma reaktivitesi

tarafından belirlenirken, yapışma gücünün esas olarak fiber yüzeyindeki oksijen gruplarının miktarına bağlı olduğu saptanmıştır. 600 °C'de uygulanan termal işlem sırasında, hem boyutlandırma hem de anodik oksidasyonla indüklenen ek işlevselliklerin fiber yüzeyinden kaybolduğu ve karbonizasyon sonrası fiberin orijinal haline döndüğü gözlemlenmiştir.

Ho vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada, atmosferik basınç plazma florlama (ABPL) yöntemi kullanılarak karbon fiberlerin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla flor gruplarının eklenmesinin etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda, yığın ve sürekli ABPL yöntemleri, özellikle tek ve çift taraflı florlama uygulamalarıyla karşılaştırılmıştır. XPS analizleri, sürekli ve çift taraflı ABPL uygulamasının karbon fiber yüzeyine %4,9'a kadar flor eklediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, hem yığın hem de sürekli uygulanan ABPL'nin benzer yüzey fonksiyonelleştirmesi sağladığı ve SEM ile BET (Brunauer-Emmett-Teller) yüzey alanı analizlerine göre yüzeyde herhangi bir hasar oluşturmadığı belirlenmiştir. Raman spektroskopisi sonuçları, sürekli ABPL sonrası düşük seviyede grafit bozulması ve fiberlerin kütle özelliklerinde minimal değişiklik olduğunu göstermiştir. Tek lif çekme testleriyle yapılan mekanik incelemeler, Weibull istatistikleri kullanılarak analiz edilmiş ve ABPL ile modifiye edilen yüzeylerin fiberlerin çekme dayanımı ve elastik modülü üzerinde minimal bir etkiye sahip olduğu doğrulanmıştır.

Ozun vd. (2022) tarafından sunulan bu çalışmada, hem yapıştırıcıya nanopartiküller (alüminyum oksit, silisyum oksit ve karbon nanotüp (MWCNT)) eklenerek güçlendirilmiş hem de taban malzemesi üzerinde farklı yüzey işlemleri yapılmıştır. Elde edilen yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada yapıştırılan malzeme olarak alüminyum kullanılmış ve alüminyum için mekanik (zımpara) ve kimyasal (dağlama) aşındırma işlemlerinin uygulanmasıyla yüzey pürüzlülükleri ve temas açıları gibi özellikleri belirlenmiştir. Her bir yüzey işlemi için farklı oranlarda nano katkı kullanılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, kimyasal aşındırma uygulanan yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinde önemli derece bir artış olduğu görülmektedir. Bu artışın nano katkı türüne ve oranına bağlı olarak değiştiği ve bunun yanı sıra, nano katkı ilave edildiğinde hasarın adezyon hasarından kohezyon hasarına dönüştüğü görülmektedir.

Pawlik vd. (2020) tarafından sunulan bu çalışmada, hem GNP katkısı hem de yapıştırılan malzeme olarak kullanılan alüminyum alaşımlarına farklı yüzey işlemleri uygulanarak oluşturulan bağlantıların mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapıştırılan

malzemenin, alüminyum, yüzeyi aseton, kumlama, kimyasal aşındırma ve fosforik asit anodizasyonu gibi farklı yüzey işlemlerine tabi tutulmuştur. Yüzey işlemleri uygulanmış alüminyum alaşımların yüzey enerjileri ve temas açıları belirlenmiştir. Ardından, yapıştırma bağlantıları oluşturmak için GNP ile güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, uygulanan yüzey işlem türüne göre, temas açılarında azalma olduğu ve benzer şekilde yüzey enerji değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bağlantıların dayanımlarının hem yüzey işleminden hem de GNP katkısından önemli ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir.

Marzena Pawlik vd. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada ise, farklı yüzey işlemlerine tabi tutulan kompozit yapıştırma bağlantılarının mekanik performansları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre, uygulanan yüzey işlemlerine bağlı olarak temas açılarında ve buna bağlı olarak yüzey enerji değerlerinde önemli farklılıklar olduğu görülmektedir. Yüzey enerjisindeki bu değişiklikler, bağlantı dayanımlarını doğrudan etkilemiş ve en yüksek dayanımın metal ağ kullanılarak modifiye edilen bağlantılarda elde edildiği görülmüştür. Geleneksel yüzey işlemlerinde ise dayanımlar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark gözlenmemiştir. Bu bulgular, yüzey enerjisinin ve işlemlerinin yapıştırma mukavemeti üzerinde belirleyici bir rol oynadığını vurgulamaktadır.

Delzendehrooy vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, palmiye ağacının farklı bölgelerinden alınan doğal liflerin, yapıştırıcı içerisine eklenerek yapıştırma bağlantılarının hasar yükleri üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, palmiye lifleri (0,5–2 mm arasında) ve NaOH çözeltisi ile yüzey işlemi uygulandıktan sonra, lifler %2, %5 ve %10 oranlarında yapıştırıcıya dahil edilerek tek tesirli bindirme bağlantıları üretilmiştir. Sonuçlar, doğal lif oranına bağlı olarak yapıştırma bağlantılarının dayanımını artırdığını göstermektedir. Özellikle, %2 oranında Rachis lifleri ile yapılan takviyenin, NaOH çözeltisi ile yapılan işlemten sonra dayanımda %140'lık bir artış sağladığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, doğal liflerin çatlak yayılmasını yavaşlatma, enerji emme ve yük dayanımı sağlama gibi özellikler de gösterdiği bilinmektedir.

Barut (2021) tarafından yapılan yüksek lisans tezinde, cam ve karbon fiberlerle takviye edilmiş yapıştırıcılar kullanılarak tek tesirli yapıştırma bağlantılarının hasar dayanımları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, kompozit levhaların bağlanması, epoksi yapıştırıcı emdirilmiş fiberler kullanılarak bağlantıların güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Fiber takviyesi yapılmış ve yapılmamış bağlantıların

hasar yükleri karşılaştırılmış, ayrıca fiber takviye açıları olarak 0°, 15°, 30° ve 45° kullanılarak açının etkisi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, fiber takviyesi ile bağlantıların hasar yüklerinde %31'e kadar artış sağlandığını göstermektedir. Yapıştırıcı içerisine eklenen fiber türü ve yönlenme açısı, bağlantının dayanımını artırmada önemli bir rol oynamaktadır.

Gürses vd. (2005) tarafından yapılan bu çalışmada, toz aktif karbon (PAC) üzerinde CTAB (cetiltrimetilamonyum bromür) adsorpsiyon kinetikleri incelenmiştir. Çalışmada, farklı başlangıç CTAB konsantrasyonlarında adsorpsiyonun pseudo-birinci mertebe, pseudo-ikinci mertebe ve intrapartikül difüzyon modelleri ile açıklanabilirliği araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, adsorpsiyon sürecinin ağırlıklı olarak psödo-ikinci mertebe kinetik mekanizmasına uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca, CTAB adsorpsiyon hızının tek bir adım tarafından değil, hem dış kütle transferi hem de intrapartikül difüzyon mekanizmaları tarafından kontrol edildiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, PAC'nin katyonik surfaktanların uzaklaştırılmasındaki kinetik davranışını anlamak için önemli bilgiler sunmaktadır.

Mindivan ve Gürses (2021) tarafından yapılan çalışmada, resol fenolik reçine/organokil (ROC) kompozitleri, 50 °C'de ve 1,3 F/P (Formaldehit/Fenol) oranında sentezlenen resol fenolik reçine kullanılarak hazırlanmıştır. Organokil (OC) üretiminde, Na-montmorillonit (MMT) kilinin 2:1 katmanlı yapısı ile CTAB surfaktanı kullanılmış ve farklı başlangıç konsantrasyonlarındaki CTAB çözeltileri ile modifikasyon gerçekleştirilmiş, OC parçacıklarının yüzey yükü zeta potansiyeli ölçümleri ile kontrol edilmiştir. Kompozitler in situ polimerizasyon tekniği ile hazırlanmış ve optik mikroskop (OM) kullanılarak morfolojik ve yapısal olarak karakterize edilmiştir. Mikrosertlik analizleri, kompozitlerin mekanik davranışının, organokil katmanlarının yüzey yükünün işareti ve yoğunluğuna bağlı olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, organokil modifikasyonunun kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki kritik rolünü ortaya koymakta ve nanokompozitlerin tasarımında yüzey yükü kontrolünün önemini vurgulamaktadır.

Liu, Luo ve Liang (2016) tarafından yapılan çalışmada, polifenilen sülfür (PPS) matrisi ile cetiltrimetilamonyum bromür (CTAB) ile fonksiyonelleştirilmiş grafen oksit (CGO) kullanılarak polimer nanokompozitler hazırlanmıştır. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi, X-ışını kırınımı ve Raman spektroskopisi ile CGO'nun yapısı incelenmiştir. Sonuçlar, CTAB'ın GO'nun düzenli yapısını bozduğunu ve CGO'da

interkatalizasyon nedeniyle tabaka aralığının arttığını göstermiştir. Mekanik testler, 0,1 wt% CGO/PPS kompozitinin çekme mukavemeti ve Young modülünün sırasıyla %45,4 ve %171,8 oranında arttığını ortaya koymuştur. Dinamik mekanik analiz, CGO eklenmesiyle PPS'nin cam geçiş sıcaklığının (T_g) arttığını ve 0,5 wt% CGO/PPS kompozitinde T_g 'nin saf PPS'e göre yaklaşık 10°C yükseldiğini göstermiştir. Termogravimetrik analiz sonuçları, CGO'nun termal stabiliteyi artırdığını ve 0,5 wt% CGO/PPS kompozitinin 800 °C'deki kalıntı kütlesinin saf PPS'e göre 1,22 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Lu, Xiao, Liu, Li, Li ve Sun (2018) tarafından yapılan çalışmada, karbon liflerinin çimento matrisi içerisindeki ara yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla lifler ince bir SiO_2 tabakası ile kaplanmıştır. Bu kaplama, tetraetil ortosilikatın alkali koşullar altında kondenzasyonu ve polimerizasyonu yoluyla gerçekleştirilmiştir. Yüzeyde oluşan SiO_2 tabakasının morfolojisi ve kimyasal bileşimi karakterize edilmiştir. Kaplama, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluşumuna yol açmış ve lif-matris ara yüzeyini güçlendirmiştir. Tek lif çekme testleri ile ara yüzey özellikleri değerlendirilmiş ve kimyasal ayrılma enerjisi ile sürtünme bağ kuvveti ölçülmüştür. Sonuçlar, modifiye edilmiş karbon liflerinin kimyasal ayrılma enerjisinde ve sürtünme bağ kuvvetinde düz liflere kıyasla belirgin artış gösterdiğini ve bunun başlıca SiO_2 kaplaması ile $\text{Ca}(\text{OH})_2$ arasındaki reaksiyondan kaynaklanan ara yüzey hidrasyon ürünlerinin iyileşmesine bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Dong Quan vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, yapıştırıcı içerisine çelik fiberler eklenerek, yapıştırma bağlantılarının kırılma özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, 22 μm çapında, yüksek gerilme dayanımına sahip çelik fiberler kullanılmış ve iki farklı yapıştırıcı (sert ve yumuşak) uygulanmıştır. Fiberler, kırılma yönüne paralel ve dikey olarak yerleştirilmiştir. Mod I ve Mod II kırılma davranışlarını belirlemek için çift konsol giriş (DCB) ve ucu çentikli ayrılma (ENF) testleri yapılmıştır. Sonuçlara göre, çelik fiberlerin yapıştırıcıya ilavesinin kırılma enerjisini artırdığı ve Mod II testlerinde hasarın genellikle taban malzemede delaminasyon şeklinde görüldüğü gösterilmektedir. Fiberlerin kırılma yönüne dik yerleştirilmesi, kırılma enerjisindeki artışın daha da belirgin olduğunu göstermektedir.

Ma vd. (2016) tarafından sunulan çalışmada, T700 sınıfı yüksek mukavemetli karbon fiberlere anodik oksidasyon elektrolizi, yüzey işlemi ve ısıtma işlemi (200 °C) uygulanarak fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmektedir. Çalışmada, fiber yüzey

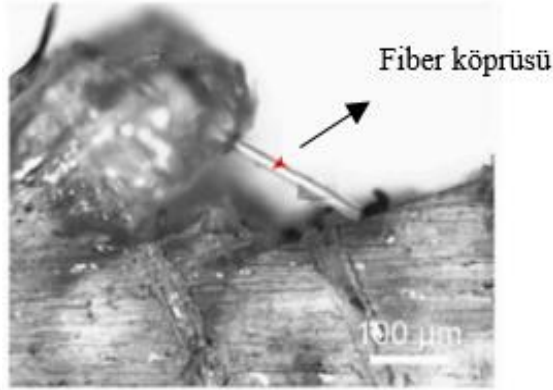
pürüzlülüğü, yüzey enerjisi ve kimyasal gruplar farklı yüzey işlemleriyle analiz edilmektedir. Sonuçlar, anodik oksidasyon ve yüzey işlemlerinin fiber yüzeyindeki pürüzlülüğü, yüzey enerjisini ve aktif kimyasal grupları artırdığını, ısıtılmanın ise bu özellikleri azalttığını göstermektedir. Farklı yüzey işlemleriyle üretilen tek yönlü epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmekte ve elektroliz ile yüzey işlemiyle takviye edilen kompozitlerin daha güçlü ara yüzey bağlanma kuvvetine sahip olduğu tespit edilmektedir. Isıl işlem uygulanan fiberlerle yapılan kompozitlerde ise mekanik özelliklerin düşük olduğu, bunun fiber-matris arasındaki bağlanmanın azalmasından kaynaklandığı belirtilmektedir.

Drożdziel-Jurkiewicz ve Bienias (2022) tarafından sunulan bu çalışmada, fiber metal laminalarda (FML) metal yüzey ile kompozit arasındaki adezyonun artırılması amacıyla farklı yüzey işlemleri uygulanmıştır. Alüminyum 2024-T3 ve titanyum (Grade 2) yüzeyleri, mekanik (zımpara), kimyasal (fosfat-florür, kimyasal aşındırma), elektrokimyasal (kromik ve sülfürik asit anodizasyonu) ve plazma işlemleriyle modifiye edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve enerjisi üzerine yapılan analizlerde, kromik asit anodizasyonunun fiber ile metal arasındaki yapışmayı en etkili şekilde artıran işlem olduğu bulunmuştur. Ayrıca, sol-jel kaplama işleminin yüzey serbest enerjisini artırarak adezyonu artırabileceği ifade edilmiştir. Çalışma, fiber metal laminalarda uygun yüzey işlemleriyle yüksek adezyon sağlanmasında etkili yöntemleri belirlemektedir.

Behera vd. (2023) tarafından yapılan bu çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bağlantıların dayanım ve uzamasının artırılması amacıyla epoksi yapıştırıcıya cam elyafı güçlendirmeleri eklenmiştir. Deneysel çalışmada, ticari olarak temin edilebilen Araldite epoksi yapıştırıcı kullanılmakta ve alüminyum levha ile cam elyafı takviyeli plastik (GFRP) malzemeler metal ve kompozit yapıştırılan malzemeler olarak seçilmiştir. Cam elyaflarının uzunlukları, boyutları ve yerleşimi gibi faktörlerin yapıştırıcıdaki güçlendirme üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Sonuçlara göre, özellikle kısa ve uzun cam elyaflarının eklenmesinin, hem dayanımda hem de uzamada önemli iyileşmeler sağladığı görülmektedir. SEM ile yapılan incelemeler, adezyon ve kohezyon hasarları, fiber kopması gibi farklı hasar modlarını ortaya koymuş ve fiberlerin yapıştırıcı ile etkileşiminin güçlendirilmesinin önemini vurgulamıştır.

Fakat Behera (2023) çalışmasında, oluşan bazı hasarların fiber ile yapıştırıcı ara yüzeyinin iyi olmaması veya fiberin yapıştırıcı tarafından ıslanmamasından kaynaklandığı; bu nedenle mikro ve makro kusurların oluştuğu vurgulanmaktadır (şekil

2.2). Bu kapsamda, yapıştırıcı ve fiber ara yüzeyi etkileşimlerinin dikkate alınması gerektiği ve bu etkileşimlerden dolayı bağlantıların veya kompozit malzemelerin mekanik performanslarında iyileşmelerin, yukarıdaki literatür çalışmalarında da etkili olduğu görülmektedir. Bu noktada, yapılan yüzey işlemleri sayesinde yapıştırıcı ile fiber arasındaki etkileşimin güçlendiği ve böylece daha dayanıklı yapıştırma bağlantıları elde edilmesine olanak sağlandığı vurgulanabilmektedir.



Şekil 2. 2. Yapıştırıcı ile temas etmemiş bir fiber (Behera, 2023)

Bu tez çalışması, yapıştırıcı içerisine katılan fiberlerin yüzey işlemleri ile ıslanabilirliğini artırarak, fiber-yapıştırıcı etkileşimini güçlendirmeye odaklanan özgün bir yaklaşım sunmaktadır. Literatürde yaygın olarak incelenen fiber yüzey modifikasyonlarının ötesine geçerek, bu modifikasyonların yapıştırıcı matris içerisindeki fiberlerin bağlanma mekanizmalarına etkisini detaylı şekilde ele almaktadır. Böylece, fiber takviyeli yapıştırıcıların performansını artırmaya yönelik önemli bir adım atılmış ve eksikliği hissedilen yapıştırıcı-fiber ara yüzü optimizasyonuna katkı sağlanmıştır. Çalışma, bu etkileşimlerin mekanik bağlantılar üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde inceleyerek, yapıştırıcı sistemlerinde daha dayanıklı ve güvenilir bağlantılar elde edilmesine olanak tanımayı amaçlamıştır.

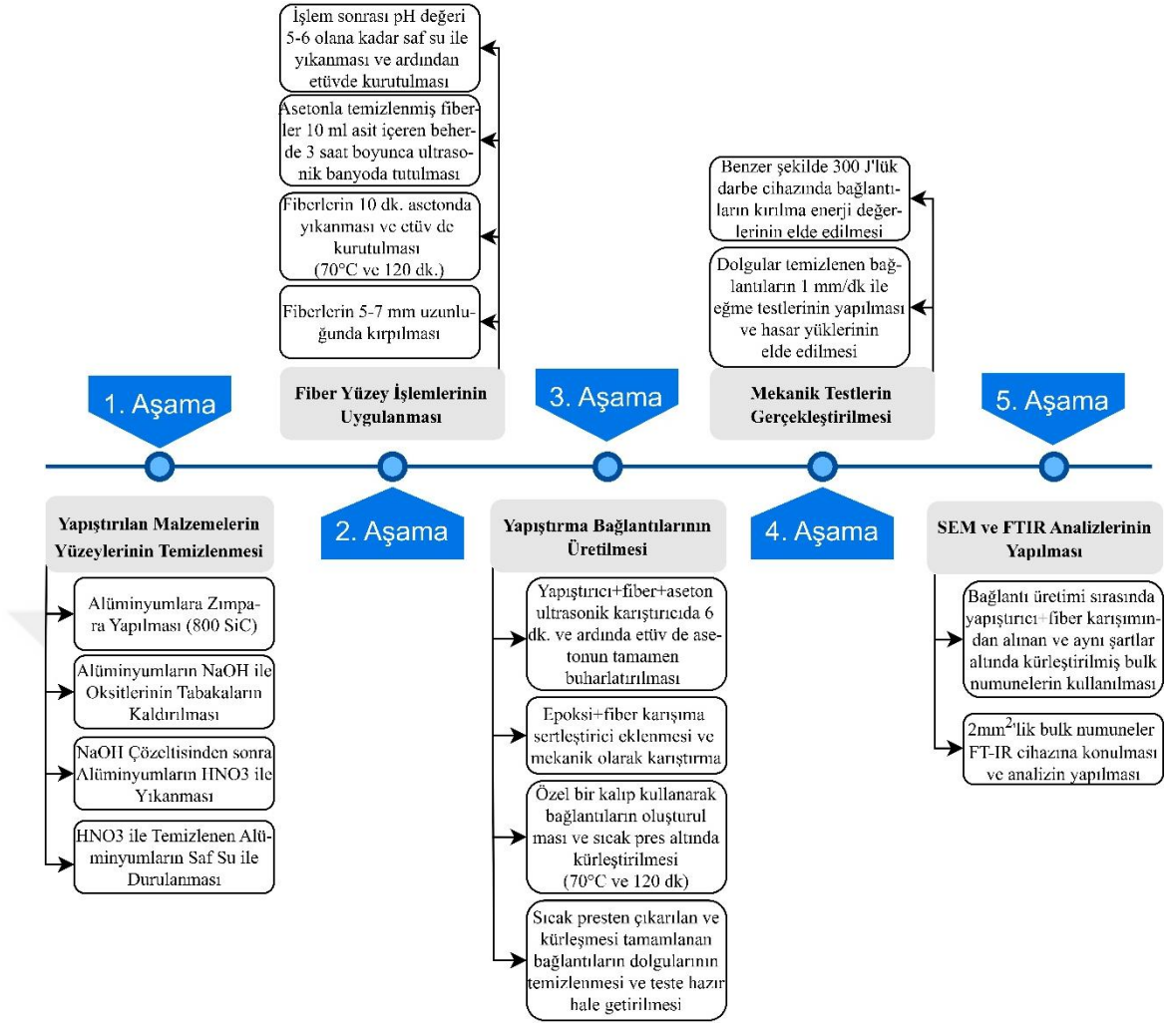
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında; kullanılan malzemeler, yüzey işlemleri, bağlantıların üretilmesi, bu bağlantıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve kırılma sonrası yüzeylerin incelenmesi ele alınmıştır. İlk olarak, yapıştırıcıya eklenecek fiberlere yüzey işlemleri uygulanmıştır. Fiber yüzey işlemleri tamamlandıktan sonra, yapıştırılan malzemelerin yüzeylerinin yapışma işlemine hazırlanması işlemleri yapılmıştır. Daha sonra yüzey işlemi uygulanmış fiberler ve yüzeyleri yapışma için temizlenen alüminyum taban malzemeleri kullanılarak yapıştırma bağlantıları üretilmiş ve bunların mekanik testleri yapılmıştır.

Mekanik performansları belirlendikten sonra, fiber ile yapıştırıcı arasındaki ara yüzeyleri incelemek için bağlantıların kırılma yüzeyleri dikkate alınmış; ayrıca kırılma yüzeyleri SEM ve FT-IR analizleriyle incelenerek fiber ve yapıştırıcı arasındaki etkileşimler sunulmuştur. Şekil 3.1'de sunulan görsel, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen adımların genel hatlarını görsel olarak ortaya koymaktadır. Deneysel çalışmaların adımları ise şu şekilde sıralanabilir:

- Yapıştırılacak malzemelerin hazırlanması,
- Fiber yüzey işlemlerinin uygulanması,
- Yapıştırma bağlantılarının üretilmesi,
- Mekanik testlerin gerçekleştirilmesi,
- SEM ve FTIR analizlerinin yapılması

Tez çalışmasında bu adımlar detaylı bir şekilde ele alınmış olup, her bir işlem süreci ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Şekil 3. 1. Çalışmanın özeti ve yapılan aşamaların şematik gösterimi

Bu çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak Al2024-T3, yapıştırıcı olarak DP460 (sert) ve DP190 (yumuşak) yapısal yapıştırıcılar ve katkı türü olarak ise karbon ve cam kısa fiberler kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Yapıştırıcılar 3M’in Türkiye distribütörü olan BESTEK firmasından temin edilmiştir. Fiber yüzeylerine uygulanan yüzey modifikasyonu için aseton (%99, C₃H₆O), nitrik asit (%65, HNO₃), sülfürik asit (%95, H₂SO₄) ve hidroklorik asit (%37, HCl) kimyasalları kullanılmış olup bunlar Sigma-Aldrich Chemical Company (USA)’dan temin edilmiş; alüminyum malzemelerin yüzeylerini temizlemek için kullanılan NaOH peletleri ise FGS Kimya’dan temin edilmiştir. Çalışmadaki fiberler (karbon fiber kumaş 200 gr/m² 3k - düz (plain) ve cam fiber kumaş 200 gr/m² - plain) ise kompozit.net firmasında temin edilmiştir.

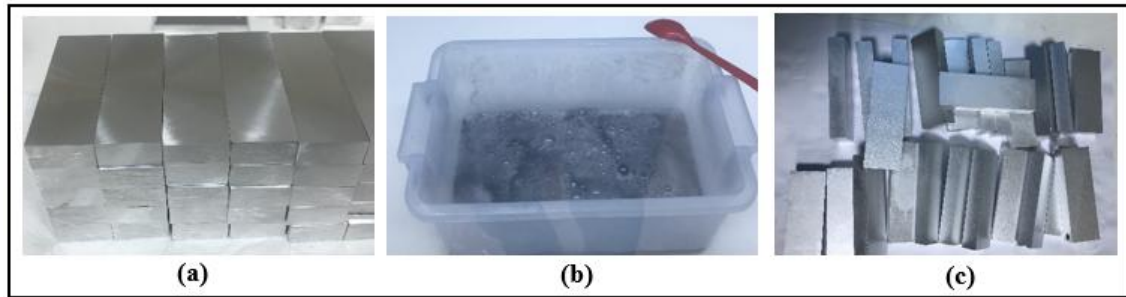
Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcıların mekanik özellikleri (Avinc Akpınar, 2023, Avinc Akpınar, 2025)

	DP 460	DP 190	AA2024-T3	Karbon fiber
E (MPa)	1984 ±43	21 ±3,2	70410 ±615	228000 ±2500
v	0,37	0,35	0,33	-
σ_t (MPa)	38,4 ±1,1	19,3 ±1,4	476 ±17	3800 ±350
ϵ_t (%)	4,7	58,2	16	1,9

E: Elastisite modülü; v: Poisson oranı; σ_t : Maksimum çekme gerilmesi; ϵ_t : Maksimum şekil değiştirme

3.1. Yapıştırılan Malzemelerin Yüzeylerinin Temizlenmesi

Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, AA2024-T3 alüminyum alaşımı metal malzemeler 75×25×12 mm boyutlarında kesilmiştir. Single-lap joints (SLJ)'de alüminyum metal malzemeler ile yapıştırıcının tutunma performansını artırmak için, ilk olarak alüminyum malzemeler üzerindeki kiri, pası ve yağı zımparalama ile gidermek gerekmektedir. Bu nedenle alüminyum malzemelerin yüzeyleri, zımparalama cihazında P800 SIC zımpara kâğıdı ile yaklaşık 10 dakika zımparalanmış ve ardından saf su ile temizlenmiştir. Daha sonra alüminyum parçaların yüzeyindeki oksit tabakasının çıkarılması için, ağırlıkça %15 sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ile kimyasal dağlama işlemi uygulanmıştır. Alüminyum parçalar NaOH çözeltisinde 15 dakika bekletilmiş (Şekil 3.2b) ve ardından saf su ile yıkanmıştır. Daha sonra, alüminyum parçalar üzerindeki NaOH kalıntısının giderilmesi için, ağırlıkça %20 HNO₃ çözeltisinde 3 dakika bekletme ve saf su ile yıkama işlemi yapılmıştır (Şekil 3.2c).



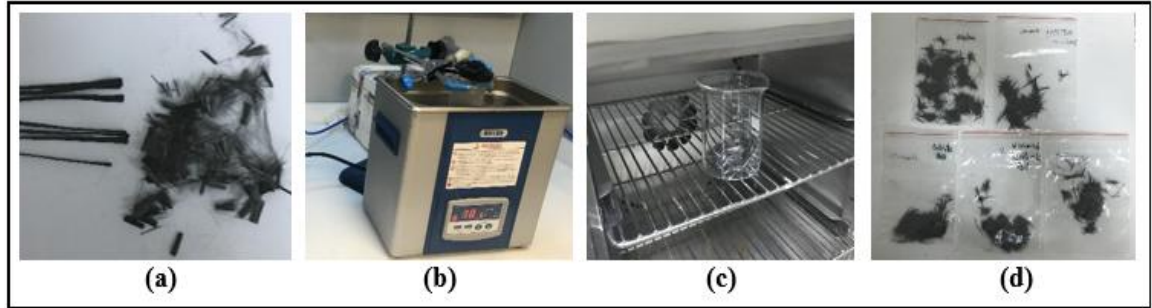
Şekil 3.2. a) Zımparalanmış alüminyum parçalar; b) NaOH çözeltisi ile oksit tabakalarının kaldırılması; c) Oksit tabakaları kaldırılmış alüminyum parçalar

3.2. Fiber Yüzey İşlemleri

Bu çalışmada, epoksi ile karbon fiberlerin arayüz etkileşimlerini iyileştirmek amacıyla karbon fiberlere 5 farklı kimyasal yüzey işlemi uygulanmıştır. İlk aşamada, karbon fiberler yaklaşık 5-7 mm uzunluğunda kesilmiş (Şekil 3.3a) ve ardından yüzey temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem kapsamında, 2 g kesilmiş fiber, yaklaşık

10 ml aseton içeren boş bir behere eklenmiş ve ultrasonik banyoda 20 dakika süreyle işleme tabi tutulmuştur. Asetonla yapılan yüzey temizleme işleminin ardından fiberler, etüvde 70 °C sıcaklıkta 120 dakika boyunca kurutulmuştur. Bu işlem "aseton ile yüzey temizleme" olarak tanımlanmıştır. Kimyasal yüzey modifikasyonları için, sülfürik asit (H_2SO_4), nitrik asit (HNO_3) ve hidroklorik asit (HCl) kullanılmıştır. Her bir modifikasyon için, asetonda temizlenmiş 2 g karbon fiber, 10 ml asit içeren bir behere eklenmiş ve 65 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle ultrasonik banyoda yüzey modifikasyonu işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3b). Modifikasyon işlemi sonrasında fiberler saf su ile yıkanarak pH değeri 5-6 seviyesine getirilmiş, ardından 70°C'de 120 dakika süreyle etüvde kurutulmuştur (Şekil 3.3c). Nitrik asit ve hidroklorik asit (HNO_3/HCl) karışımıyla yapılan modifikasyon işlemi, diğer asitlerle yapılan işlemlere benzer şekilde uygulanmış olup, asit karışımı oranı hacimce 3:1 olarak ayarlanmıştır.

Bu işlemler sonucunda, bir çözücü ile yüzey temizleme ve dört farklı asit modifikasyonu uygulanmış karbon fiberler elde edilmiştir (Şekil 3.3d). Her bir modifikasyon işlemi, karbon fiberlerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik olarak tasarlanmış olup, bu işlemler sayesinde fiber-epoksi arayüzü bağlanmasının mekanik performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.



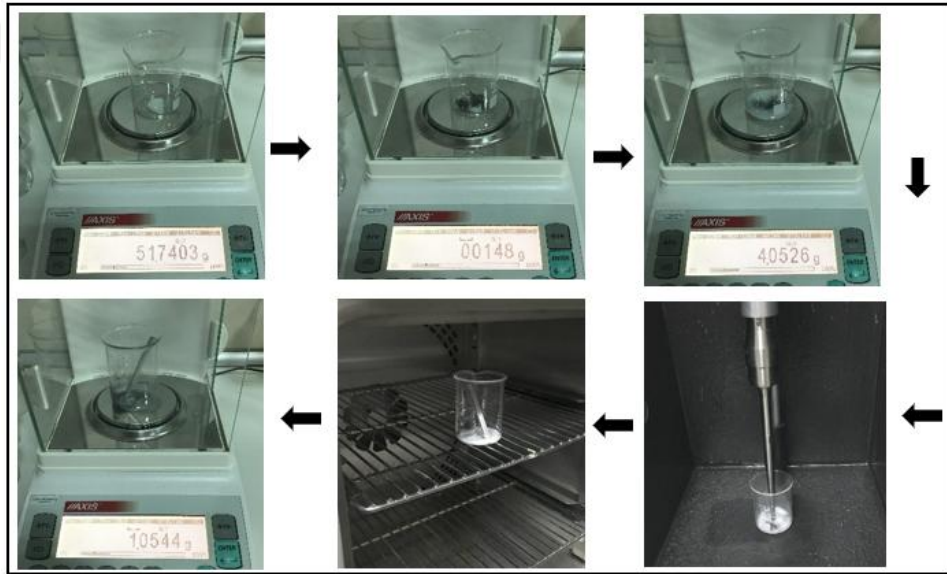
Şekil 3. 3. a) Kırpılmış karbon elyaf (5-7 mm), b) Ultrasonik banyo ile kimyasal yüzey işlemi, c) Fırın kurutma işlemi, d) Beş farklı kimyasal yüzey işlemi uygulanmış elyaf

3.3. İşlenmiş Fiberlerin Yapıştırıcıya Eklenmesi ve Yapıştırma Bağlantılarının Oluşturulması

Sunulan çalışmada yapıştırıcıya karbon fiberleri ilave etmek için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilki, boş bir behere 2 g DP460 yapıştırıcısının birinci bileşeni (epoksi) ve 0,015 g kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış fiber konularak ultrasonik karıştırıcıda 30 kHz'de 10 dakika karıştırılmasıdır. Daha sonra, aynı karışıma yapıştırıcının 1 g ikinci bileşeni (amin sertleştirici) eklenerek 10 dakika boyunca mekanik

olarak karıştırıldı. Böylece ağırlıkça %0,5 karbon fiber katkılı karışım elde edildi ve bu yöntemle elde edilen kompozit yapıştırıcı *doğrudan ekleme* yöntemi olarak adlandırıldı.

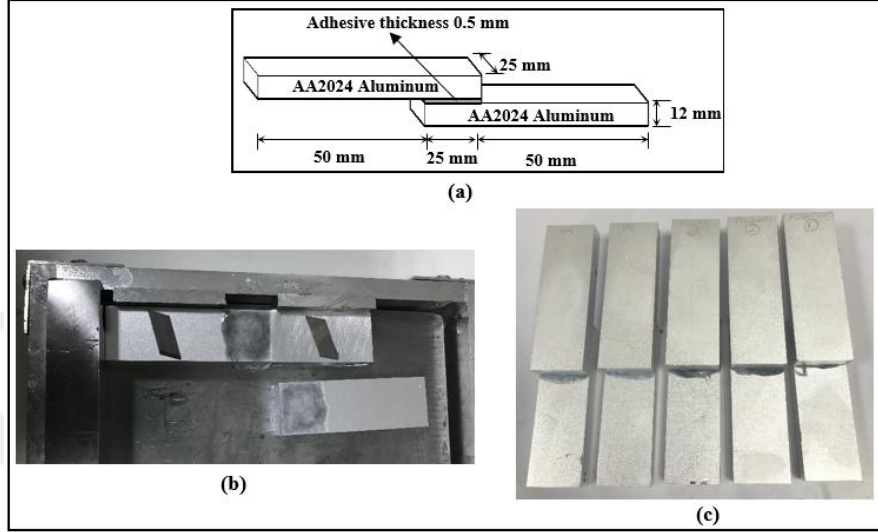
Diğer yöntemde ise, epoksi ve sertleştirici ile oluşan çift bileşenli yapısal yapıştırıcıların (DP460 ve DP190) epoksi kısmının viskozitesi aseton ile düşürülerek fiberlerin epoksi ile daha etkin etkileşiminin sağlanması amaçlanmıştır. Bunun için bir beherde, 2 g DP460 yapıştırıcısının birinci bileşeni (epoksi), 0,015 g kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış fiber ve yaklaşık 4 g aseton eklenerek ultrasonik karıştırıcıda 30 kHz’de 10 dakika karıştırıldı. Karıştırma işleminden sonra 50 °C’de etüvde mekanik olarak karıştırılarak asetonun buharlaşması sağlanmıştır. Hassas terazi yardımıyla asetonun tam olarak buharlaşmasının sağlandığı görüldüğünde, behere yapıştırıcının 1 g ikinci bileşeni (amin, sertleştirici) eklenerek 10 dakika mekanik olarak karıştırıldı (Şekil 3.4). Bu yöntem, Avinc Akpınar (2024) tarafından yapılan çalışmada nanoyapıların yapıştırıcıya eklenmesinde kullanılan yöntem ile benzerdir. Sunulan çalışmada, bu yöntemle elde edilen kompozit yapıştırıcı, *işlemlile ekleme* olarak adlandırıldı. Ayrıca çalışmada kullanılan yapıştırıcıların (DP460 ve DP190) epoksi/sertleştirici oranları aynı olmayıp, bu durum karbon fiber eklenmesinde göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 3. 4. Yapıştırıcıya karbon fiber ekleme yönteminin şematik gösterimi

Şekil 3.5’te geometrik boyutları verilen tek tesirli bağlantının üretiminde, yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğunu istenilen ölçüde ayarlanması için özel tasarlanmış bir kalıp kullanılmıştır (Şekil 3.5b). Numunelerin bindirme bölgelerine kompozit yapıştırıcı uygulanmış ve yapıştırıcı kalınlığının 0,5 mm olması için aynı kalınlıkta metal parçalar numunelerin serbest uçlarına yerleştirilmiştir. Numunelerin

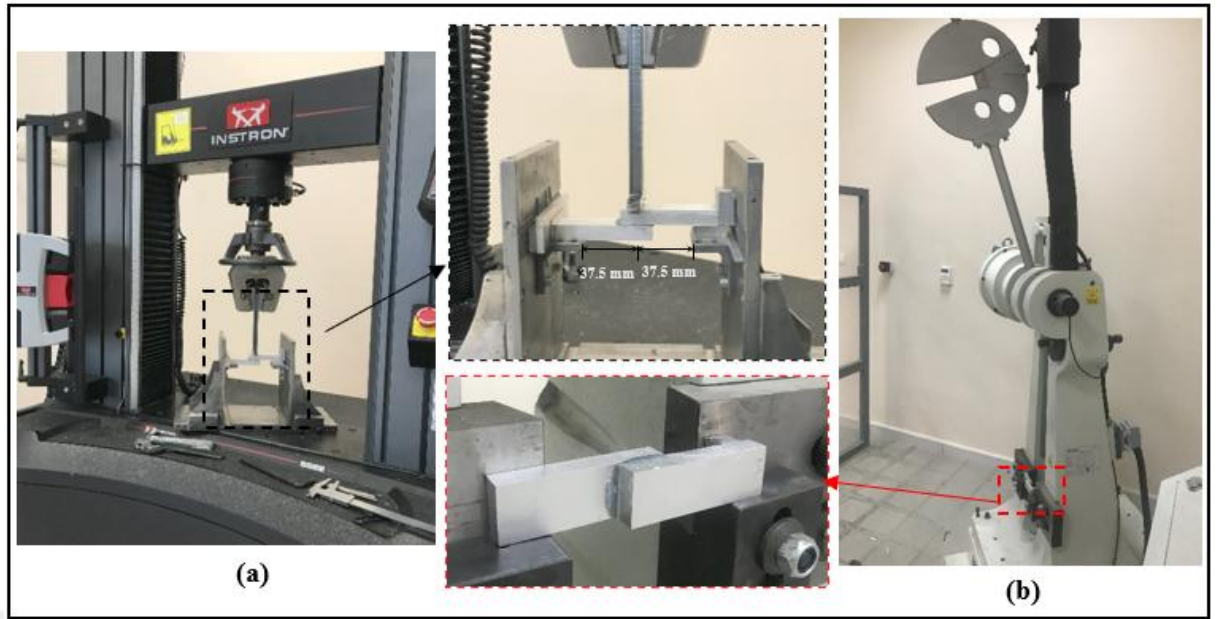
bindirme uzunluğunun ayarlanması ve numuneler üzerine gelen basıncın eşit şekilde dağıtılması için numune kalınlığında alüminyum parçalar yerleştirilmiştir. Daha sonra DP460 ve DP190 yapısal yapıştırıcılarının kürleşme şartı olan 70 °C’de 120 dakika sıcak preste bekletilmiştir. Tablo 3.2’de verilen her bir parametreden üçer numune olmak üzere toplam 66 numune üretilmiştir (Şekil 3.5c).



Şekil 3. 5. a) Tek tesirli bağlantı geometrisi, b) Numune üretim kalıbı, c) Üretimi yapılmış numuneler

3.4. Mekanik Testler

Yapıştırma bağlantıların üç nokta eğme testi, bilgisayar kontrollü Instron-5982 (USA) universal eğme cihazında 1 mm/dk eğme hızında yapılmıştır. Üç nokta eğme testinde Şekil 3.6a’da verilen özel tasarlanmış eğme test aparatı kullanılmıştır. Ayrıca, numunelerin darbe testleri ise, J darbe test cihazı (Alşa/Turkey) ile yapılmıştır (Şekil 3.6b). Sadece yüzey işlemleri yapılarak oluşturulan bağlantılara eğme testleri uygulanmıştır. Hem yüzey işlemleri uygulandıktan sonra, hem de farklı konsantrasyonlarda CTAB işlemleri uygulandıktan sonra oluşturulan bağlantılara ise hem eğme testi hem de darbe testi yapılmıştır. Yapılan testler için her bir bağlantının parametreleri sırasıyla Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’te sunulmuş olup her bir parametre için 3 numune test edilmiştir. Yapılan testler sonrasında eğme testlerinde hasar yükleri, darbe testlerinden ise kırılma enerji değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3. 6. a) Üç nokta eğme testi uygulaması b) Darbe testi uygulaması

Tablo 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler

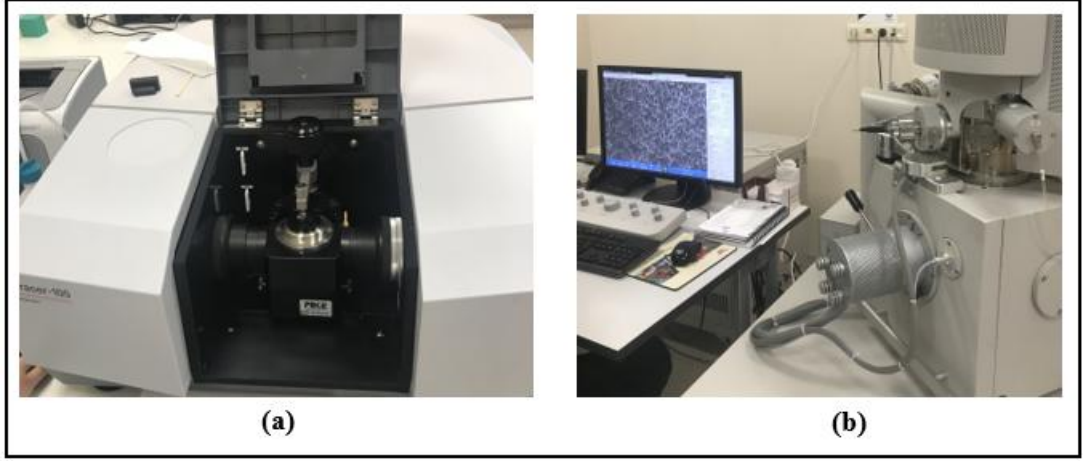
Numune kodları	Yapıştırıcı türü	Fiber ekleme yöntemi	Yüzey işlemi	Fiber oranı (ağırlıkça%)
460	DP460	-----	-----	-----
460-de-a-0.5	DP460	doğrudan ekleme	aseton	0.5
460-de-a-1	DP460	doğrudan ekleme	aseton	1
460-de-a-2	DP460	doğrudan ekleme	aseton	2
460-de-a-3	DP460	doğrudan ekleme	aseton	3
460-ie-a-0.5	DP460	işlemlı ekleme	aseton	0,5
460-ie-a-1	DP460	işlemlı ekleme	aseton	1
460-ie-a-2	DP460	işlemlı ekleme	aseton	2
460-ie-a-3	DP460	işlemlı ekleme	aseton	3
190	DP190	-----	-----	-----
190-ie-a-0.5	DP190	işlemlı ekleme	aseton	0,5
190-ie-a-1	DP190	işlemlı ekleme	aseton	1
190-ie-a-2	DP190	işlemlı ekleme	aseton	2
190-ie-a-3	DP190	işlemlı ekleme	aseton	3
460-ie-sa-1	DP460	işlemlı ekleme	sülfürik asit	1
460-ie-na-1	DP460	işlemlı ekleme	nitrik asit	1
460-ie-ha-1	DP460	işlemlı ekleme	hidroklorik asit	1
460-ie-n/ha-1	DP460	işlemlı ekleme	nitrik asit / hidroklorik asit	1
190-ie-sa-1	DP190	işlemlı ekleme	sülfürik asit	1
190-ie-na-1	DP190	işlemlı ekleme	nitrik asit	1
190-ie-ha-1	DP190	işlemlı ekleme	hidroklorik asit	1
190-ie-n/ha-1	DP190	işlemlı ekleme	nitrik asit / hidroklorik asit	1

Tablo 3. 3. CTAB işlemleri yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler

Numune kodları	Fiber yüzey işlemi	Konsantrasyon (mg/L)
İşlemsiz KF	-----	-----
KF+C15	CTAB	15
KF+C30	CTAB	30
KF+C60	CTAB	60
KF+C90	CTAB	90
KF+A+C15	Aseton+CTAB	15
KF+A+C30	Aseton+CTAB	30
KF+A+C60	Aseton+CTAB	60
KF+A+C90	Aseton+CTAB	90
KF+A+S+C15	Aseton+Sülfürik+CTAB	15
KF+A+S+C30	Aseton+Sülfürik+CTAB	30
KF+A+S+C60	Aseton+Sülfürik+CTAB	60
KF+A+S+C90	Aseton+Sülfürik+CTAB	90
KF+A+N+C15	Aseton+Nitrik+CTAB	15
KF+A+N+C30	Aseton+Nitrik+CTAB	30
KF+A+N+C60	Aseton+Nitrik+CTAB	60
KF+A+N+C90	Aseton+Nitrik+CTAB	90
KF+A+H+C15	Aseton+Hidroklorik+CTAB	15
KF+A+H+C30	Aseton+Hidroklorik+CTAB	30
KF+A+H+C60	Aseton+Hidroklorik+CTAB	60
KF+A+H+C90	Aseton+Hidroklorik+CTAB	90
KF+A+N/H+C15	Aseton+Nitrik/Hidroklorik+CTAB	15
KF+A+N/H+C30	Aseton+Nitrik/Hidroklorik+CTAB	30
KF+A+N/H+C60	Aseton+Nitrik/Hidroklorik+CTAB	60
KF+A+N/H+C90	Aseton+Nitrik/Hidroklorik+CTAB	90

3.5. Kırılma Yüzeylerinin Mikroskopik ve Kimyasal Analizi

Çalışmada mekanik testlerin tamamlanmasının ardından bağlantıların kırılma yüzeyleri incelenmiştir. Burada fiberlere uygulanan yüzey işlemlerinin türlerine bağlı olarak aralarında ilişkiyi değerlendirmek ve karbon fiber katkılı ve katkısız yapıştırıcıların yüzey fonksiyonel gruplarının dağılımını incelemek için Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) spektrumları alınmıştır (Şekil 3.7a). FT-IR analizleri, bulk numunelerden alınan 2 mm²'lik parçalar cihazın reflektans ünitesine yerleştirilmiştir. Spektrumlar, 4000–400 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında Nicolet iS10 model FT-IR/ATR cihazı kullanılarak alınmıştır. Aynı zamanda, kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış ve uygulanmamış fiberlerin yüzey morfolojileri, taramalı elektron mikroskobu (SEM, FEI-Quanta 250) görüntüleri alınarak incelenmiştir (Şekil 3.7b).



Şekil 3.7. a) Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) cihazı, b) Scanning Electron Microscope (SEM) cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışmasında ele alınan fiber yüzey işlemleri ve işlemsiz fiberlerin bağlantıların mekanik performansına etkileri tartışılmıştır. Bu çalışma iki temel başlık altında ele alınmıştır. Birinci kısımda, Tablo 3.2’de verilen parametreler 4 grup altında ele alınmıştır.

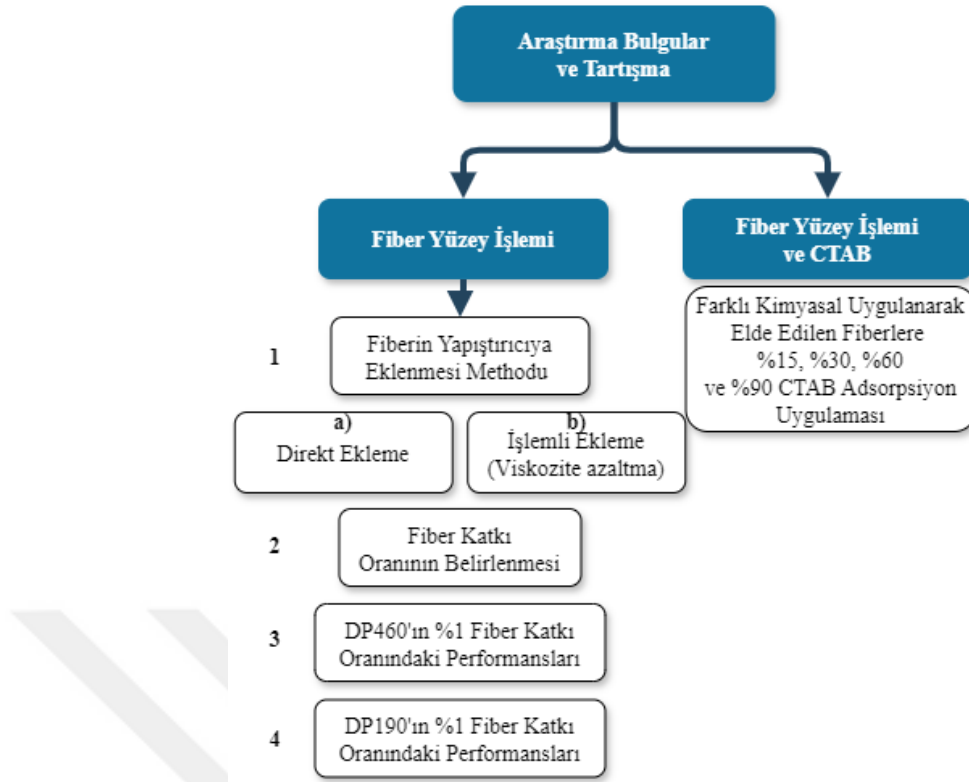
İlk grupta, yapıştırıcıya eklenen karbon fiberlerin yapıştırıcı içerisine doğrudan ya da epoksinin viskozitesini düşürmesiyle ilave edilmesinin bağlantı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

İkinci grupta, esnek yapıştırıcıya ilave edilen farklı oranlardaki fiber katkı miktarının bağlantı performansına etkisi incelenmiştir.

Üçüncü grupta, DP460 yapısal yapıştırıcıya ağırlıkça %1 oranında farklı bir kimyasal yüzey modifikasyonunun uygulanmış karbon fiberlerin ilave edilmesinin bağlantı performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Dördüncü grupta ise, esnek DP190 yapısal yapıştırıcıya ağırlıkça %1 sülfürik, nitrik, hidroklorik ve nitrik/hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış karbon fiberlerin ilave edilmesinin bağlantı performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

İkinci kısımda ise, yüzey işlemi uygulanmış ve uygulanmamış fiberler farklı konsantrasyon oranlarında CTAB ile kaplanmış olup bunun bağlantı performansı üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Bu kısımda ise, işlem yapılmış ve yapılmamış fiber içeren bağlantıların üç nokta eğme performansları ve darbe dayanımları adı altında iki grup altında incelenmiştir.



Şekil 4. 1. Çalışmada sunulan aşamaların tartışmaların şematik olarak gösterimi

4.1. Karbon Fiberlerin Yüzey Modifikasyonlarının Bağlantı Mekanik Performansına Etkileri

Bu kısımda yapılan çalışmaların 4 grup adı altında yapılması ve en uygun üretim adımının belirlenmesi aşamasında büyük önem arz etmektedir. Farklı kimyasal yüzey işlemlerine maruz kalan fiberlerin, yapıştırıcı içerisine nasıl ilave edileceği tespit edilmiştir. Birinci kısımda, karbon fiberlerin yapıştırıcıya doğrudan ilave edilmesi veya epoksinin viskozitesini azaltarak eklenmesi yöntemlerinin bağlantı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tablo 3.2’de sunulan, birinci kısımda belirtilen parametreler ve fiber ekleme yöntemleri dikkate alınarak üç nokta eğme testi yapılacak tek tesirli yapıştırma bağlantıları her birinden üçer tane olacak şekilde üretilmiştir. Üç nokta eğme testlerinde bağlantıların ortalama hasar yükleri ve yer değiştirme değerleri elde edilmiştir (Tablo 4.1).

Bu inceleme sonucuna göre, karbon fiberlerin epoksiye doğrudan ilave edilmesi durumunda bağlantıların standart sapması yaklaşık %7 ile %11 arasında değişmektedir. Ancak epoksinin viskozitesi düşürüldükten sonra fiberlerin ilave edilmesi bu standart sapmayı yaklaşık %1 ile 2 arasında düşürmektedir. Standart sapmanın %1 civarına düşmesi, hem farklı parametrelerin birbiriyle doğru karşılaştırılmasında önemli bir rol

oynamakta hem de fiberlerin iyi ıslanabilirliğinin ve belli bir ölçüde homojen dağılımının bir göstergesi olmaktadır. Ayrıca ilk ve ikinci grupta yapıştırıcıya eklenen karbon fiberlerin ağırlıkça en ideal oranı belirlenmiştir. Fiber yapı katkısız bağlantıdan (460) elde edilen hasar yüküne göre, ağırlıkça %0,5 fiber katkılı bağlantıların (460-ie-a-0.5) hasar yükü yaklaşık %60, ağırlıkça %1 fiber katkılı bağlantıların (460-ie-a-1) hasar yükü yaklaşık %63, ağırlıkça %2 fiber katkılı bağlantıların (460-ie-a-2) hasar yükü yaklaşık %52 ve ağırlıkça %3 fiber katkılı bağlantıların (460-ie-a-3) hasar yükü yaklaşık %33 artmaktadır. Hem ilk hem de ikinci grupta elde edilen test sonuçlarına göre, yapıştırıcıya ilave edilen ağırlıkça en ideal fiber yapı oranı %1 olduğu görülmüştür. Bu nedenle farklı kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış karbon fiberin yapıştırıcıya ilavesinde (üçüncü ve dördüncü grup), ağırlıkça fiber oranı %1 olarak seçilmiştir.

İkinci grupta, DP460'a göre daha esnek bir yapıştırıcı olan DP190'ın, yapısal yapıştırıcıya ilave edilen ağırlıkça farklı oranlardaki karbon fiberin bağlantı performansına etkisi incelenmiştir. Karbon fiber katkısız yapıştırıcı ile elde edilen bağlantıya (190) göre, ağırlıkça %0,5 karbon fiber ilave edilmesi (190-ie-a-0.5) bağlantının performansını %22, ağırlıkça %1 karbon fiber ilave edilmesi (190-ie-a-1) bağlantının performansını %27, ağırlıkça %2 karbon fiber ilave edilmesi (190-ie-a-2) bağlantının performansını %15 ve ağırlıkça %3 karbon fiber ilave edilmesi (190-ie-a-3) bağlantının performansını %9 artırmaktadır (Tablo 4.1). Buna göre bağlantı performansı açısından sert yapıştırıcıya aseton ile muamele ve kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış karbon fiberlerin ilave edilmesi daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 4.1. Karbon fiber takviyeli kompozit yapıştırıcı kullanılarak elde edilen birleştirmelerin ortalama hasar yükleri

Numune kodları	Hasar yükü (N)	Yer değiştirme (mm)	2000 N'da yer değiştirme (mm)
460	4674 ^{±56}	0,97	0,428
460-de-a-0,5	5581 ^{±486}	1,34	0,434
460-de-a-1	6219 ^{±763}	1,42	0,527
460-de-a-2	4861 ^{±692}	1,09	0,483
460-de-a-3	6190 ^{±458}	1,47	0,520
460-ie-a-0,5	7462 ^{±68}	1,88	0,516
460-ie-a-1	7640 ^{±106}	2,04	0,589
460-ie-a-2	7124 ^{±128}	1,59	0,458
460-ie-a-3	6221 ^{±144}	1,54	0,419
190	2514 ^{±85}	0,98	0,656
190-ie-a-0,5	3069 ^{±76}	1,09	0,673
190-ie-a-1	3208 ^{±92}	1,16	0,784

Tablo 4.1. (devamı)

Numune kodları	Hasar yükü (N)	Yer değiştirme (mm)	2000 N'da yer değiştirme (mm)
190-ie-a-3	2735 ^{±87}	1,03	0,627
460-ie-sa-1	8658 ^{±114}	1,44	0,365
460-ie-na-1	9062 ^{±122}	1,55	0,442
460-ie-ha-1	9285 ^{±106}	1,62	0,468
460-ie-n/ha-1	8383 ^{±131}	1,56	0,453
190-ie-sa-1	2572 ^{±91}	0,88	0,542
190-ie-na-1	3647 ^{±83}	0,87	0,699
190-ie-ha-1	2063 ^{±77}	0,85	0,823
190-ie-n/ha-1	4176 ^{±98}	1,06	0,574

Üçüncü grupta, DP460 yapısal yapıştırıcıya ağırlıkça %1 oranında farklı kimyasal yüzey modifikasyonlarının uygulanmış karbon fiberlerin ilave edilmesinin bağlantı performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Katkısız temel bağlantının (460) performansına göre, karbon fiberlere sülfürik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanması bağlantının performansını %85, nitrik asit ile kimyasal yüzey işlemi uygulanması bağlantının performansını %94 ve hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanması bağlantının performansını %99 artırmaktadır (Tablo 4.1). Ayrıca karbon fiberlere 3:1 (v/v) oranında nitrik ve hidroklorik asit birleşimiyle hazırlanan asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanması, bağlantının performansını %79 artırmaktadır. Buna göre elde edilen önemli bir sonuç, bağlantının performansını artırmak için DP460 yapısal yapıştırıcıya ilave edilen karbon fiberlere hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmasının, asetonla muameleye göre bağlantının performansını %36 kadar daha fazla artırmasıdır.

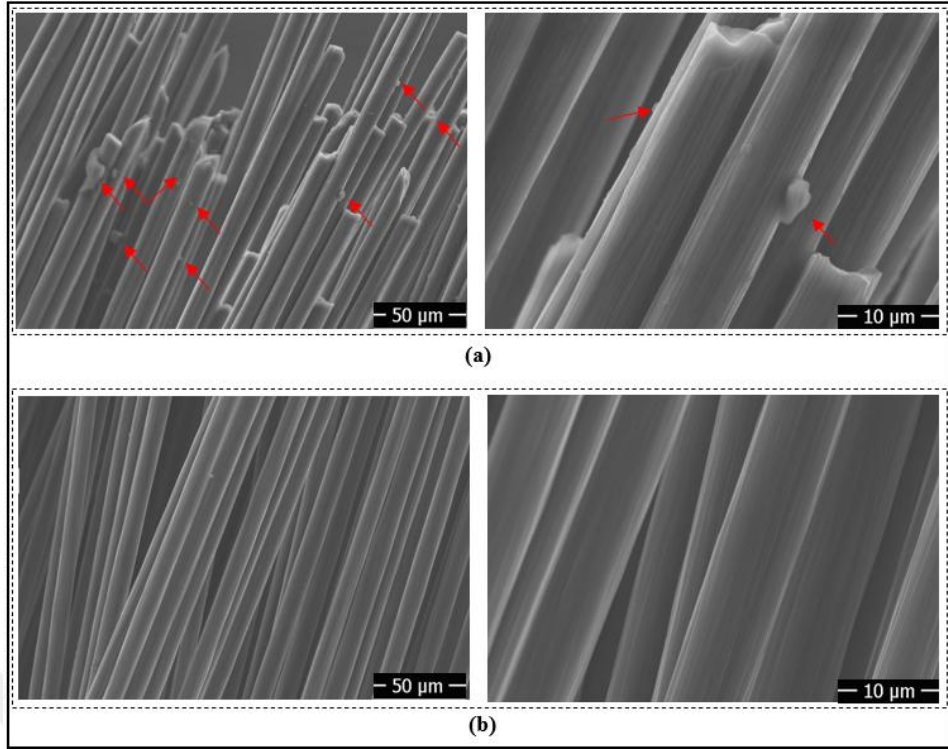
Dördüncü grupta ise, esnek DP190 yapısal yapıştırıcıya ağırlıkça %1 sülfürik, nitrik, hidroklorik ve nitrik/hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış karbon fiberlerin ilave edilmesinin bağlantı performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir, Katkısız temel bağlantının (190) performansına göre, karbon fiberlere sülfürik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanması bağlantının performansını %2 ve nitrik asit ile kimyasal yüzey işlemi uygulanması bağlantının performansını %45 oranında artırmaktadır (Tablo 4.1), Ancak hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanması bağlantının performansını %18 azaltmaktadır, Nitrik asidin bağlantı performansını artırması ve hidroklorik asidin ise azaltması durumu göz önüne alınarak, karbon fiberlere 3:1 (v/v) oranında nitrik asit ve hidroklorik asit karışımı ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış ve bu uygulama sonucunda bağlantının

performansı %66 artırılmıştır. Bu sonuçlara göre, sert yapıştırıcıda (DP460) karbon fiberlere hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanması optimum etki yaparken, esnek yapıştırıcıda ise nispeten daha az etki yapmaktadır,

Tablo 4.1’de verilen hasar yüklerinin tümü göz önüne alındığında, en az hasar yükünün ortalama 2063 N ile 190-ie-ha-1 bağlantıda olduğu görülmektedir. Bu nedenle bağlantılardan elde edilen yer değiştirmelerin doğru kıyaslanması için tüm bağlantı tiplerinde 2000 N’da oluşan yer değiştirmeler dikkate alınmıştır. Aseton muamelesi yapılmış karbon fiber katkılı DP460 sert yapıştırma bağlantılardan elde edilen yer değiştirmeler incelendiğinde, yapıştırıcıya eklenen fiber oranının %1’in üzerinde olması bağlantının yer değiştirme kapasitesini azaltmaktadır. Ayrıca asetonla muamele edilmiş bağlantıdan (460-ie-a-1) elde edilen yer değiştirmeye göre, sülfürik, nitrik, hidroklorik ve nitrik/hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış bağlantıların hasar yükleri artmasına rağmen yer değiştirme kapasiteleri azalmıştır. Üç nokta eğme testinde eğilme rijitliği (k), uygulanan kuvvetin (P) yer değiştirmeye (δ) bölünmesiyle ($k=P/\delta$) elde edildiği göz önüne alındığında, karbon fiberlere sırasıyla sülfürik, nitrik, hidroklorik ve nitrik asit/hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanması bağlantının eğilme rijitliğini önemli derecede artırmaktadır. Bu durum, farklı kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış, ağırlıkça %1 karbon fiber katkılı esnek yapıştırıcı DP190 ile elde edilen bağlantılar için de aynı şekilde kabul edilmektedir.

4.2. Kimyasal Yüzey İşlemleri Sonrası Karbon Fiberler ile Güçlendirilmiş Kompozit Yapıştırıcıların ve Yapıştırma Bağlantılarının Morfolojileri

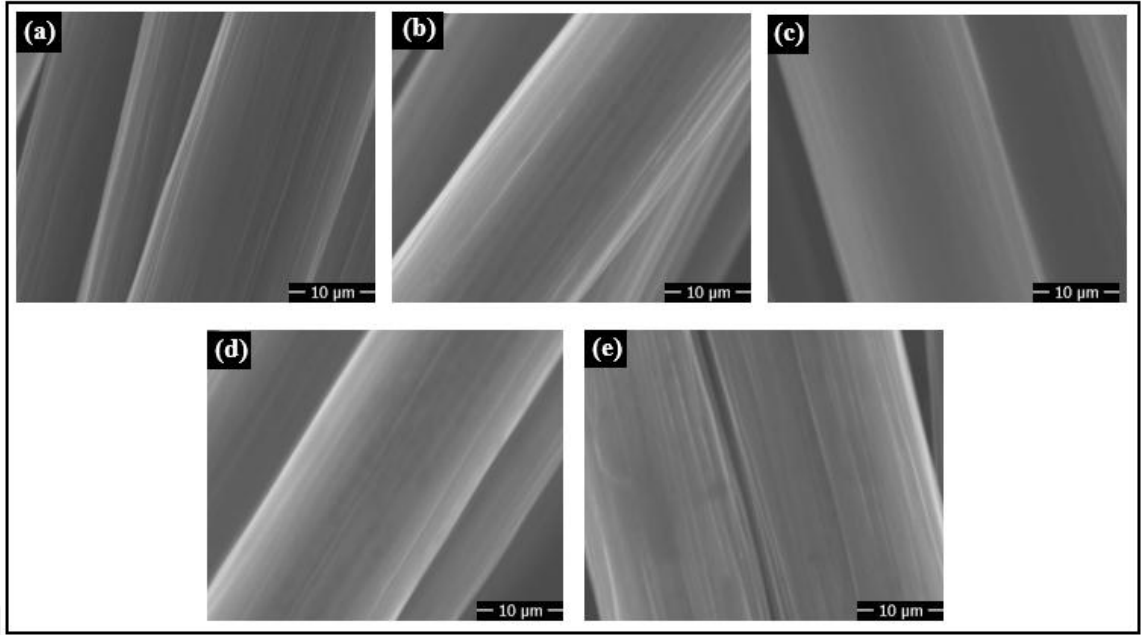
Kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış karbon fiberlerin ve fiber katkılı kompozit yapıştırıcıların yüzey morfolojisi, doğrudan 90° görüş açısında scanning electron microscope (SEM) ile incelenmiştir. Yapıştırıcıya eklenen karbon fiberlerin aseton ile yıkanması veya yıkanmaması durumunu karşılaştırmak için, karbon fiberlerin SEM görüntüleri alınmış ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde, aseton ile yıkanmamış karbon fiberlerin yüzeylerinde birçok kirletici maddenin bulunduğu (Şekil 4.2a) ve fiberlerin aseton ile yıkanmasının bu kirletici maddelerin yüzeyden uzaklaşmasını sağladığı açıkça görülmektedir. (Şekil 4.2b). Bu kirletici yabancı maddelerin karbon fiberlerin yüzeyinden uzaklaşması, etkin fiber-epoksinin etkileşimi ve fiberlere uygulanan kimyasal yüzey modifikasyonunun etkililiği açısından oldukça önemlidir.



Şekil 4.2. Farklı büyütme seviyelerinde asetonsuz temizlenmiş (a) ve asetonla temizlenmiş (b) karbon fiberlerin SEM görüntüleri

Şekil 4.3'te karbon fiberlerin sülfürik, nitrik, hidroklorik ve nitrik asit/hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış örneklerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülerden, fiberlerin yüzeyinde ince bir film tabakasının oluştuğu anlaşılmaktadır. (Şekil 4.3b, c, d, e). Nitrik asit/hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonunda oluşan bu film tabakasının daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu, karbon fiberlere uygulanan kimyasal yüzey modifikasyonunun başarıyla gerçekleştirildiğini göstermektedir. Ayrıca fiberlerin yüzeyinde oluşan ince film tabakası, yapıştırıcı tipine bağlı olarak fiberler ile epoksinin iyi bir ara yüzey etkileşimi oluşturarak fiberlerin yapıştırıcıdan sıyrılmasını engellediği ve böylece bağlantının performansını iyileştirdiği sonucu çıkarılabilmektedir.

Yapıştırıcıya karbon fiberlerin doğrudan eklenmesinde (epoksinin viskozitesinin aseton ile düşürülmeden eklenmesi), fiberlerin homojen dağılmadığı ve bölgesel olarak topaklaştığı (460-de-a-1), Şekil 4.4'teki SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra, karbon fiberlerin homojen dağılmaması hem bağlantının performansını azaltmakta hem de standart sapmayı artırmaktadır (Tablo 4.1). Ancak aseton ile viskozitesi düşürülen epoksiye fiberlerin ilave edilmesi (işlemli ekleme) yapıştırıcı matrisinde fiberlerin hemen hemen homojen dağılmasına (Şekil 4.4) ve bağlantının performansının iyileşmesine yol açmaktadır.



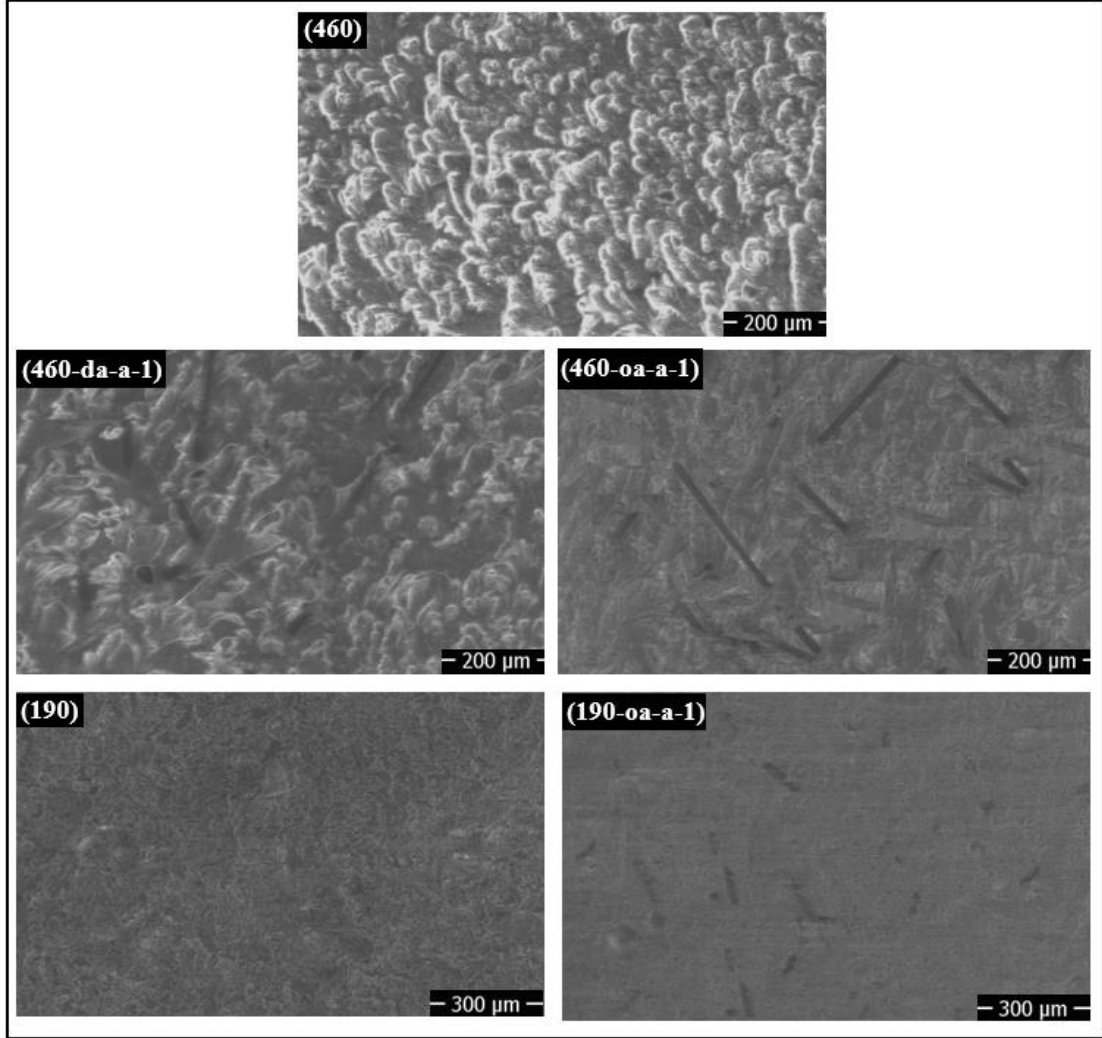
Şekil 4.3. Farklı kimyasal yüzey modifikasyonları uygulanmamış karbon fiberlerin SEM görüntüleri: a) aseton, b) sülfürik asit, c) nitrik asit, d) hidroklorik asit, e) nitrik asit/hidroklorik asit

Kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış karbon fiber katkılı ve katkısız bağlantı performanslarının daha iyi değerlendirilebilmesi için, bağlantıların test sonrası hasar tiplerinin incelenmesi gerekmektedir. Yapıştırılan malzemenin metal olması durumunda oluşan hasar tipleri ISO 10365 (ISO 10365, 1992) standardında tanımlanmıştır. Bu standarda göre yapıştırma bağlantılarında; adezyon (yapıştırıcı ile yapıştırılan metal malzeme arayüzeyinde gözle görülen ayrılmanın olduğu hasar), kohezyon (yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı tabakasında gözle görülen hasarın olduğu kopma olayı) ve karışık (adezyon-kohezyon) hasar modları oluşmaktadır.

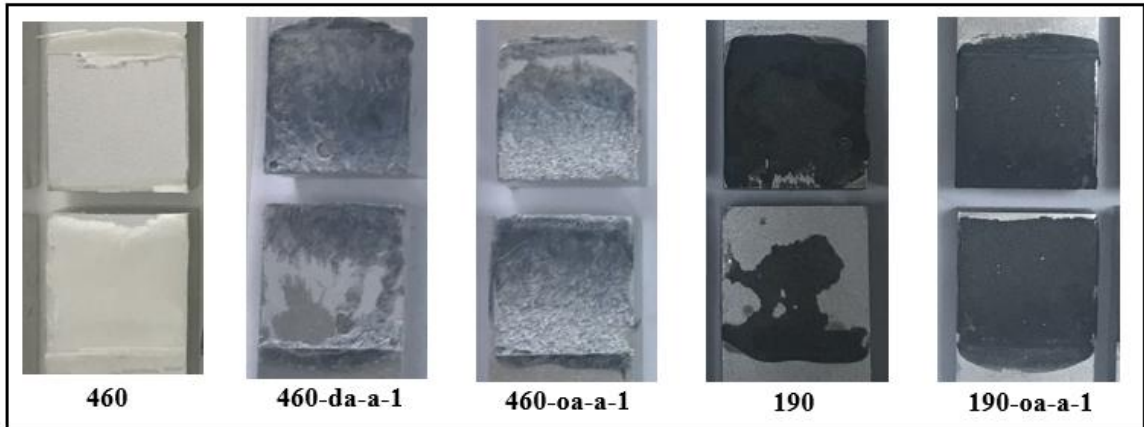
Şekil 4.5'te verilen katkısız ve karbon fiber katkılı bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, DP460 katkısız bağlantıda adezyon hasarının olduğu, direkt karbon fiber katkılı bağlantıda (460-da-a-1) ise karışık hasar modu olduğu görülmektedir. Ancak işlemlile ekleme yöntemiyle fiberlerin eklenmesi (460-ie-a-1) bağlantılarda oluşan hasar modunu kohezyon hasar moduna dönüştürmektedir. Bağlantıların performansları açısından hasar modları göz önüne alındığında, testlerden elde edilen veriler ile oluşan hasar modlarının birbiriyle oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca DP190 katkısız bağlantılarda karışık hasar modu oluşurken, işlemlile ekleme yöntemiyle fiberlerin eklenmesi (190-ie-a-1) durumunda kohezyon hasar modu oluşmaktadır.

Ayrıca DP460 yapıştırıcısına eklenen karbon fiberlere sülfürik, nitrik ve hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulaması, bağlantılarda kohezyon

hasar modunu oluşturmaktadır (Şekil 4.6). Ancak hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantılarında (460-ie-sn/ha-1) az da olsa karışık hasar modu oluşmaktadır.

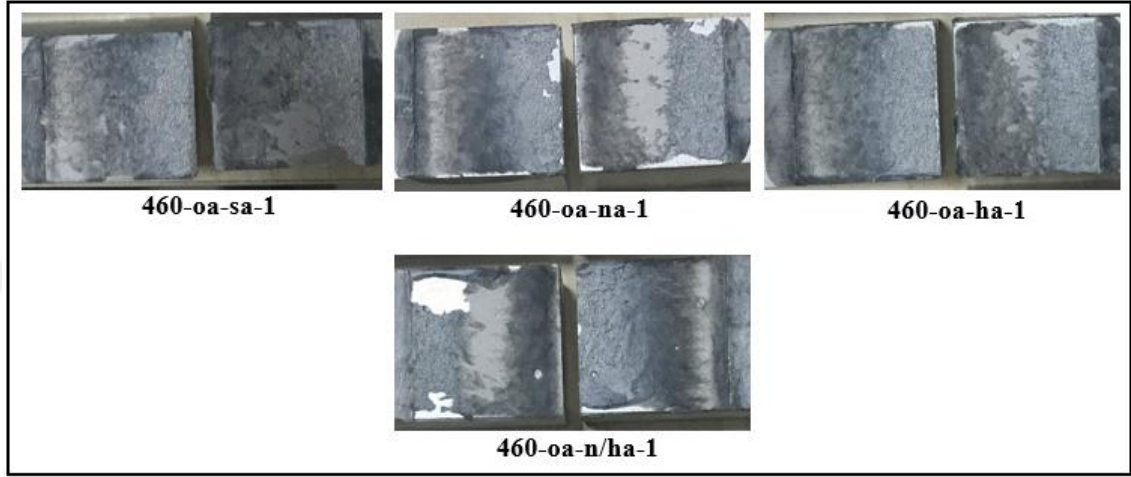


Şekil 4.4. Karbon fiber katkılı ve katkısız DP460 ve DP190 yapıştırıcıların SEM görüntüleri



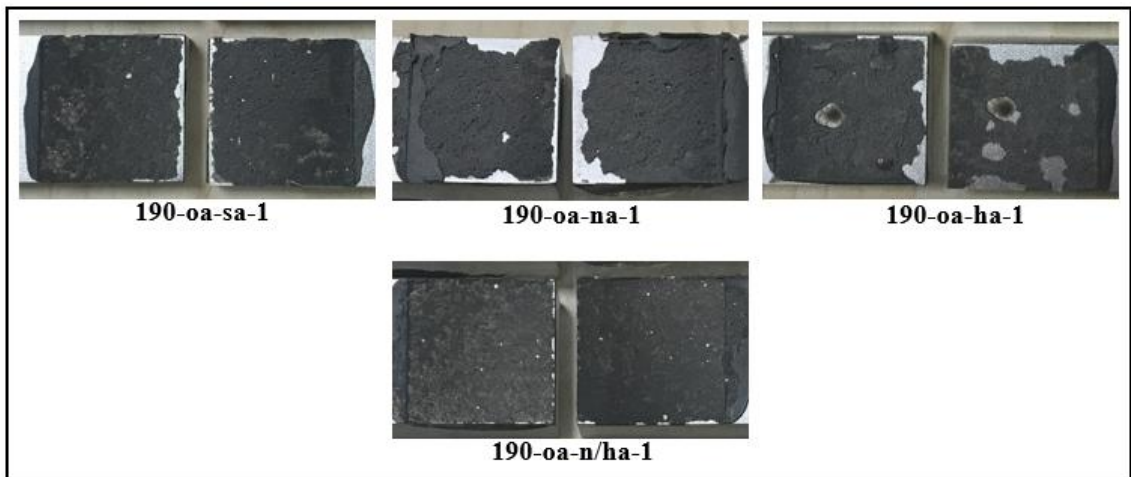
Şekil 4.5. Ağırlıkça %1 karbon fiber katkılı ve katkısız DP460 ve DP190 yapıştırıcı bağlantı yüzeylerindeki hasar bölgeleri

Tablo 4.1’de 460-ie-sa-1, 460-ie-na-1, 460-ie-ha-1 ve 460-ie-sn/ha-1 bağlantılardan elde edilen hasar yükleri incelendiğinde, bu bağlantılardan elde edilen hasar modlarının uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Buradaki önemli sonucun, fiberlere farklı kimyasal modifikasyonların uygulanmasının yapıştırıcı ile alüminyum arasındaki ara yüzey etkileşimlerini önemli ölçüde iyileştirmesi ve böylece kohezyon hasar modunun oluşması olduğu söylenebilir.



Şekil 4. 6. Farklı kimyasal yüzey işlemleri uygulanmış ağırlıkça %1 karbon fiber katkılı ve katkısız DP460 yapıştırıcı bağlantı yüzeylerindeki hasar bölgeleri

Ayrıca Şekil 4.6’da verilen hasar yüzeyleri incelendiğinde, DP190 esnek yapıştırıcıya sülfürik ve nitrik asit/hidroklorik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonu uygulanmış fiber katkılı bağlantılarda (190-ie-sa-1 ve 190-ie-na/ha-1) tamamen kohezyon hasarının olduğu görülmektedir.

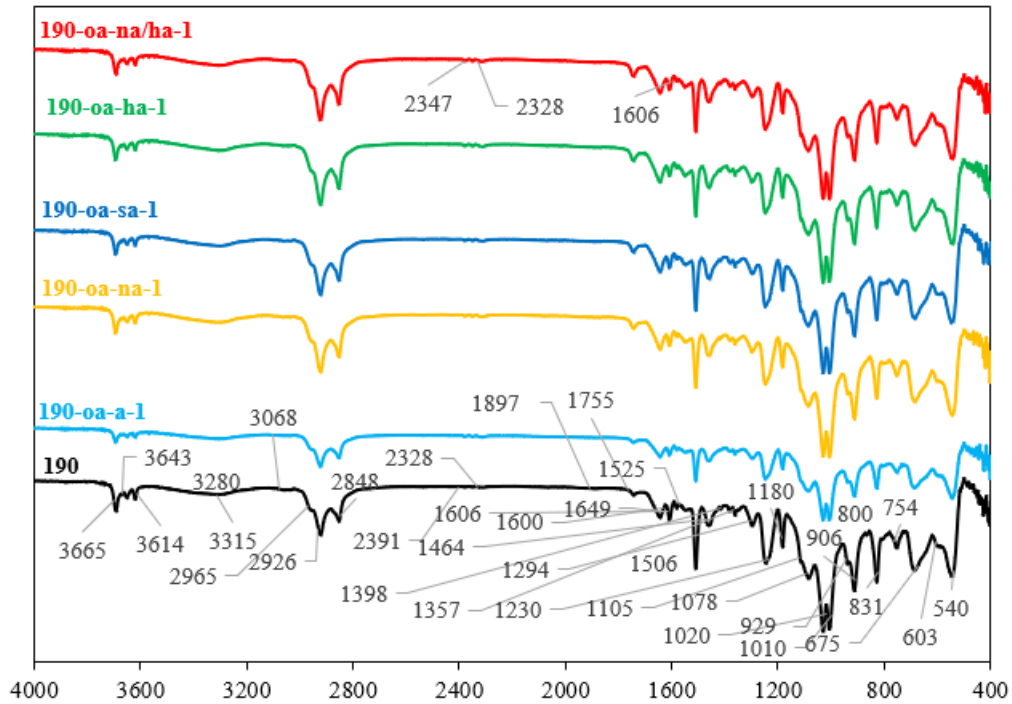


Şekil 4. 7. Farklı kimyasal yüzey işlemleri uygulanmış ağırlıkça %1 karbon fiber katkılı ve katkısız DP190 yapıştırıcı bağlantı yüzeylerindeki hasar bölgeleri

C-O gerilmesi, asimetrik ve simetrik aromatik -COO gerilmesi ve amin titreşimlerine işaret etmektedir. Öte yandan, 962 ve 885 cm^{-1} 'de görülen pikler epoksi halka titreşimlerine, 825 ve 553 cm^{-1} 'deki pikler ise sırasıyla aromatik -CH'nin düzlem dışı deformasyonuna ve C=C bükülme titreşimlerine karşılık gelmektedir.

Aynı şekilde, farklı kimyasal yüzey modifikasyonlarına tabi tutulan karbon fiberlerin belirli oranlarda kullanıldığı örneklerin spektrallerinin, asetonla temizlenmiş karbon fiber içeren örnek ve saf yapıştırıcının spektrumları ile benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak, modifiye edilmiş liflerin bulunduğu spektrumlarda, 2328-2397 cm^{-1} aralığında asidik -OH ve birleşik C=C titreşimlerine karşılık gelen pikler gözlenmiştir. Bununla birlikte, pik şiddetlerinin modifikasyon türüne göre hafifçe değiştiği ve en etkili modifikasyonun nitrik asit ile hidroklorik asit karışımıyla elde edildiği ileri sürülebilir.

Şekil 4.9'da, saf DP190 yapısal yapıştırıcının yanı sıra yüzey modifikasyonu uygulanmamış ve kimyasal yüzey modifikasyonuna tabi tutulmuş karbon fiber içeren yapıştırıcı kompozitlerin FTIR spektrallerinin gösterildiği görülmektedir.



Şekil 4. 9. Saf DP190 yapısal yapıştırıcının ve yüzey modifikasyonu uygulanmamış ve kimyasal yüzey modifikasyonuna tabi tutulmuş karbon fiber içeren yapıştırıcı kompozitlerin FTIR spektralleri

Bu spektrumlarda, saf DP190 yapıştırıcının spektrumunda 3614-3665 cm^{-1} ve 3280-3315 cm^{-1} aralığında görülen piklerin sırasıyla alkol hidroksil (-OH) ve amin N-H

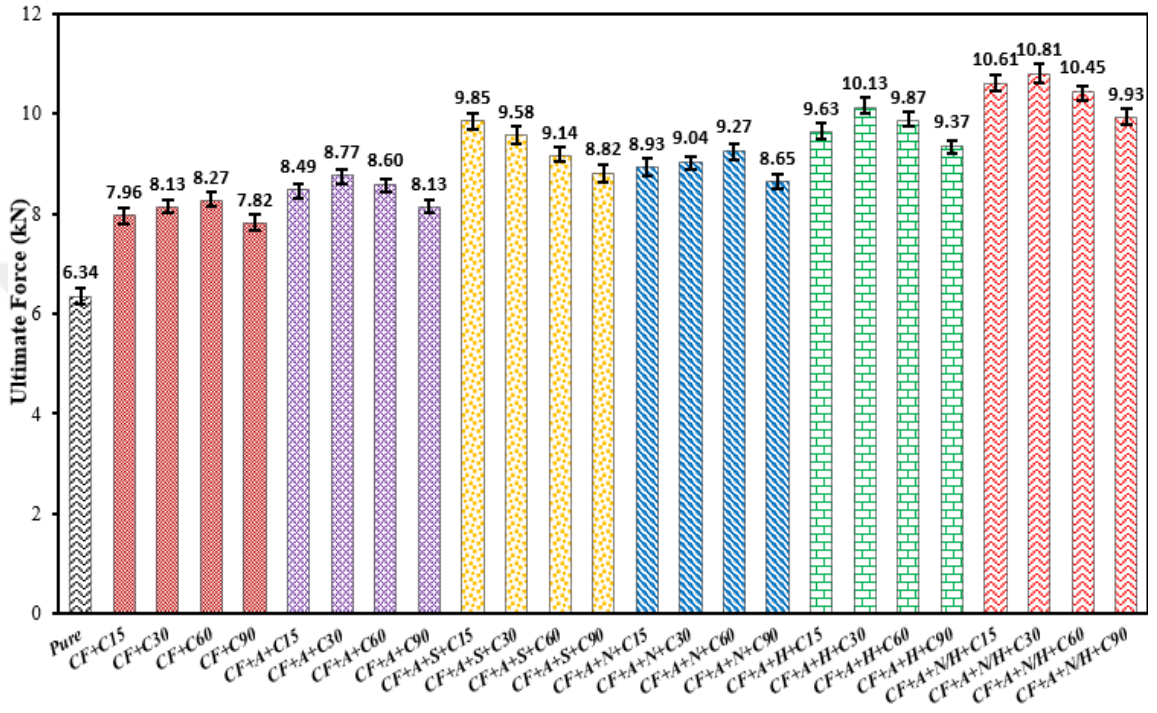
titreşimlerine karşılık geldiği belirtilmiştir. 3068-2965 cm^{-1} ve 2328-2398 cm^{-1} aralığında, ayrıca 2848 ile 2926 cm^{-1} 'de görülen pikler sırasıyla aromatik C-H titreşimine, asidik O-H gerilmesine ve asimetrik ile simetrik C-H gerilmelerine karşılık gelmektedir. 1600 cm^{-1} 'deki pik ve 1450-1500 cm^{-1} ile 1649-1755 cm^{-1} aralığında gözlenen piklerin ise sırasıyla aromatik C=C titreşimlerine, alkan C=C titreşimlerine ve ester ile amid C=O titreşimlerine atfedildiği belirtilmiştir. Ayrıca, 1897, 1464, 1357, 1398 ve 1020 cm^{-1} 'deki piklerin ve 1294-1010 cm^{-1} ile 920-603 cm^{-1} aralığında oluşan piklerin sırasıyla C=O gerilmesine, alifatik CH_2 bükülmesine, C-N titreşimlerine, CH_3 deformasyonuna, C-O gerilmesine, C-O-C gerilmesine ve aromatik C-H bükülmesine işaret ettiği ifade edilmiştir.

Buna göre, çapraz bağlı epoksi matrisinin oluştuğu ve modifiye edilmemiş veya farklı asit modifikasyonlarına tabi tutulmuş karbon fiber yapısına etkili bir şekilde entegre olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca, oksitlenmiş karbon fiber yüzeyindeki -COO ve -N-H gruplarının etkileşimleriyle amid bağlarının oluştuğu öne sürülmektedir.

4.4. Karbon Fiberlerin Kimyasal Modifikasyonu ve CTAB Adsorpsiyonunun Bağlantı Performansına Etkisi

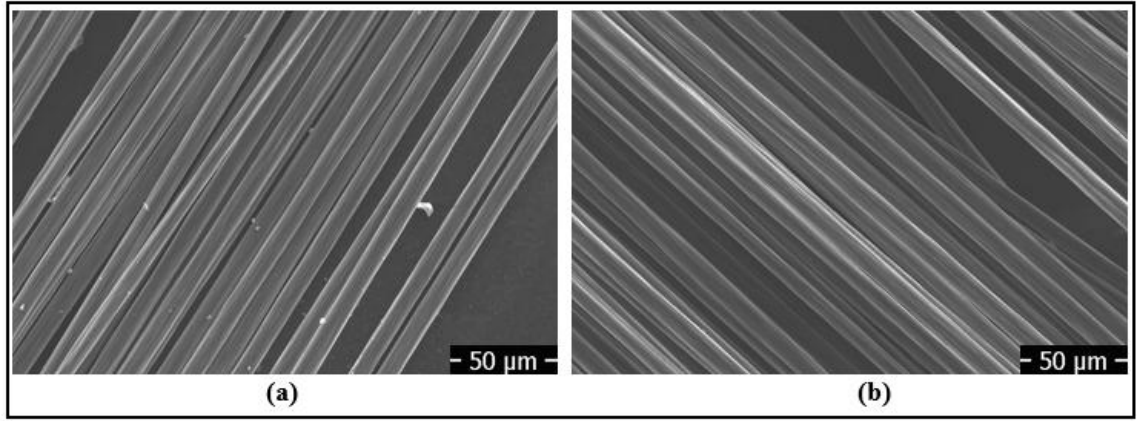
Farklı yüzey modifikasyonları uygulanmış karbon fiberler, ağırlıkça %1 yapıştırıcıya ilave edilerek elde edilen kompozit yapıştırıcılar ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılar üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Her bir parametreden üç numunenin test sonuçlarının ortalaması alınarak oluşturulan maksimum eğme hasar yükleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, yapıştırıcıya eklenen karbon fiberlerin yüzey işleminin fiber-epoksi ara yüzey adezyonunu etkileyerek mekanik performansı artırdığı açıkça görülmektedir. Grafikte, işlem görmemiş karbon fiberle başlayan ve farklı kimyasal işlemlere tabi tutulan örnekler arasında belirgin bir fark gözlemlenmektedir. İşlem görmemiş karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantısının hasar yüküne göre, 15, 30, 60 ve 90 mg/L konsantrasyonlarda CTAB adsorpsiyonuna maruz bırakılmış karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantılarının hasar yükleri sırasıyla yaklaşık %25, %28, %30 ve %23 oranlarında artmaktadır. Bu durum, amfifilik özelliğe sahip katyonik bir yüzey aktif madde olan CTAB'ın hidrofobik kuyruk kısmıyla, karbon fiber yüzeyine van der Waals etkileşimleri üzerinden adsorpsiyonu ve hidrofilik ucuyla da epoksi matrisindeki negatif yük merkezleri ile elektrostatik etkileşimine () ve böylece daha etkili bir yapışma rejiminin ortaya çıkmasına dayandırılabilir. Bu etkileşim, karbon

fiberlerin yüzey enerjisini değiştirerek epoksi ile daha iyi bir adezyon sağlar. CTAB konsantrasyonunun artırılmasıyla, CTAB molekülünün yüzeye daha fazla adsorpsiyon gösterdiği ve bağlantının hasar yükünün arttığı sonucuna varılabilir. Çok yüksek CTAB konsantrasyonunda ise pozitif yüklü gruplar arasında itmelerin etkinlik kazanmasıyla adeziv etkileşimleri kısmen azalmasıyla, hasar yük artışında bir miktar azalmanın olduğu ileri sürülebilir



Şekil 4. 10. Karbon fiber takviyeli yapıştırıcı kullanılarak elde edilen bağlantıların ortalama eğilme kopma yükleri

Ayrıca işlem görmemiş karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantısının hasar yüküne göre, aseton ile yüzeyi temizlenmiş ve sonrasında 15, 30, 60 ve 90 mg/L konsantrasyonlarda CTAB adsorpsiyon işleminin uygulandığı karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantılarının (KF+A+C15, KF+A+C30, KF+A+C60 ve KF+A+C90) hasar yükleri sırasıyla yaklaşık %34, %38, %35 ve %28 oranlarında artmaktadır. Bu artışlar aseton yüzey temizleme işlemi uygulanmamış bağlantıların hasar yükleri ile karşılaştırıldığında, yaklaşık %5 ile %10 arasında artış olduğu anlamına gelmektedir. Bu artış ile birlikte Şekil 4.11’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, karbon fiberlere uygulanacak farklı kimyasal yüzey işlemleri öncesi asetonla temizleme işleminin, yüzeydeki yabancı maddelerin giderilmesini sağladığı ve daha temiz bir yüzey oluşturduğu anlaşılmaktadır.



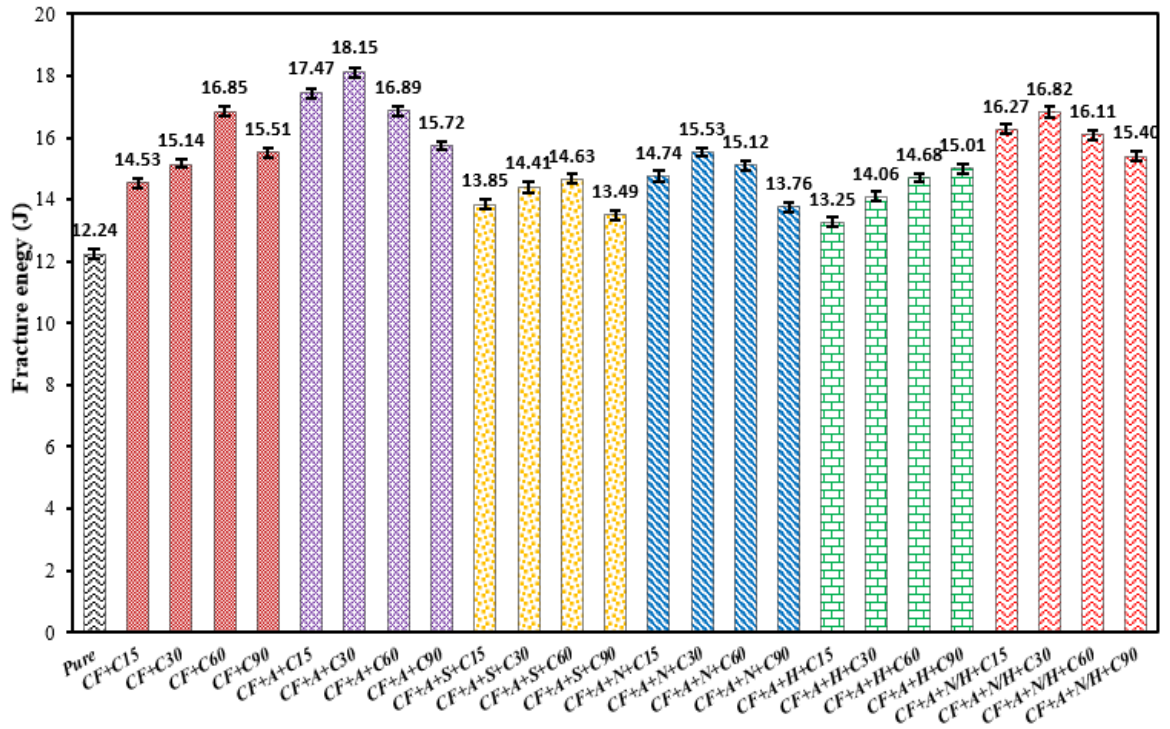
Şekil 4. 11. SEM görüntüleri, asetonan temizlenmemiş (a) ve hem asetonan temizlenmiş hem de CTAB ile işlenmiş (b) karbon fiberler

İşlenmemiş karbon fiberlere uygulanan sülfürik asit ile kimyasal yüzey işlemi ve sonrasında 15, 30, 60 ve 90 mg/L konsantrasyonda CTAB adsorpsiyonuyla karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantılarının (KF+A+S+C15, KF+A+S+C30, KF+A+S+C60 ve KF+A+S+C90) eğme hasar yüklerinin sırasıyla yaklaşık %55, %51, %44 ve %39 arttığı görülmüştür. Ayrıca nitrik asit ile kimyasal yüzey işlemi uygulanmasında (KF+A+N+C15, KF+A+N+C30, KF+A+N+C60 ve KF+A+N+C90) hasar yüklerindeki bu artışlar sırasıyla yaklaşık %41, %43, %46 ve %36 olmaktadır. Karbon fiberlere sülfürik ve nitrik asit ile yapılan kimyasal yüzey işlemleri, yüzeydeki fonksiyonel karboksil, karbonil ve hidroksil gruplarını artırır. Bu oksidasyon reaksiyonları ($C + 2H_2SO_4 \rightarrow COOH + 2SO_2 + 2H_2O$ ve $C + 4HNO_3 \rightarrow COOH + 4NO_2 + 2H_2O$) epoksi fiber ile etkileşimi artırmakta ve yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır. Bu durum kimyasal bağlanmanın yanı sıra dokusal kararlılığı artırarak, bağlantının yük taşıma performansını iyileştirmektedir.

Ayrıca karbon fiberlere uygulanan yüzey modifikasyonunda nitrik asit ve hidroklorik asit kombinasyonunun (hacimce 3:1 oranında) kullanılması, bağlantılara eğme yükü altında en yüksek performansı sağlamıştır. İşlem görmemiş karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantısının eğme hasar yüküne göre, aseton ile yüzeyi temizlenmiş karbon fiberlere uygulanan nitrik ve hidroklorik kombinasyonu ile kimyasal yüzey işlemi ve sonrasında 15, 30, 60 ve 90 mg/L konsantrasyonlarda CTAB adsorpsiyonuna maruz bırakılmış karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantılarının (KF+A+N/H+C15, KF+A+N/H+C30, KF+A+N/H+C60 ve KF+A+N/H+C90) eğme hasar yükleri sırasıyla yaklaşık %67, 70, 65 ve 57 artmıştır. Bu artış, asit kombinasyonlarının tek başına asit uygulamalarından daha etkili olabildiğini göstermektedir. Bu durum, farklı asitlerin

oksidatif ve çözme etkileriyle daha etkin yüzey modifikasyonu ve böylece daha iyi bir yapışma özelliği sağlamasıyla açıklanabilir.

Sunulan çalışmada ayrıca işlenmemiş ve kimyasal yüzey işlemleri uygulanmış karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantısının darbe davranışı incelenmiştir. Tek tesirli bağlantıların darbe test dayanım sonuçları Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.12’den, işlem görmemiş karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantısının kırılma enerjisine göre, 15, 30, 60 ve 90 mg/L konsantrasyonlarda CTAB ile adsorpsiyon işlemine tabi tutulmuş karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantılarının (KF+A+C15, KF+A+C30, KF+A+C60 ve KF+A+C90) kırılma enerjileri sırasıyla yaklaşık %19, 24, 38 ve 27 oranında artmaktadır. Ayrıca, yapıştırıcıya ilave edilen, karbon fiberlere aseton ile temizleme işlemi sonrası 15 ve 30 mg/L’lık konsantrasyonlarda CTAB adsorpsiyonuyla, bağlantıların kırılma enerjilerindeki bu artışın yaklaşık sırasıyla %43 ve %48 oranında arttığı görülmüştür.



Şekil 4. 12. Karbon fiber takviyeli yapıştırıcı kullanılarak elde edilen bağlantıların ortalama kırılma enerjileri

Ancak, işlenmemiş karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantısının hasar yüküne göre, aseton ile yüzeyi temizlenmiş karbon fiberlere uygulanan sülfürik asit, nitrik asit ve hidroklorik asitler ile kimyasal yüzey işlemi ve sonrasında farklı konsantrasyonda CTAB adsorpsiyonu uygulanması, bağlantıların kırılma enerjilerindeki artışın azaltılmasına yol açmaktadır. Sülfürik asit ile kimyasal yüzey işlemlili bağlantılarda artış yaklaşık %10 ile %19 arasında, nitrik asit ile kimyasal yüzey işlemlili bağlantılarda artış yaklaşık %12 ile

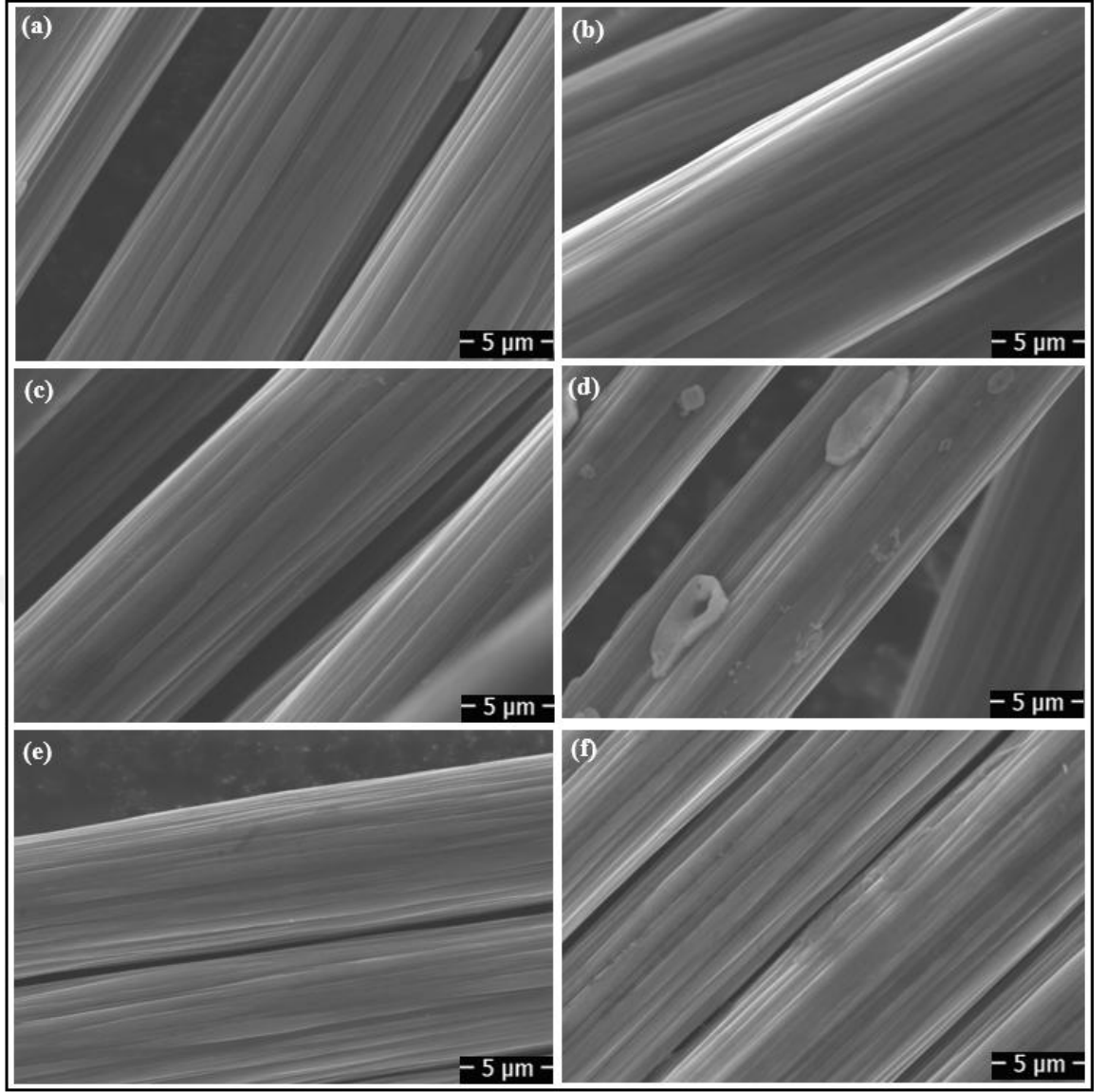
%27 arasında ve hidroklorik asit ile kimyasal yüzey işlemli bağlantılarda artış yaklaşık %8 ile %23 arasında olmaktadır. Karbon fiberlere uygulanan yüzey modifikasyonunda nitrik asit ve hidroklorik asit karışımının kullanılması halinde, bağlantıların kırılma enerjilerinin CTAB konsantrasyonuna bağlı olarak yaklaşık %26 ile %37 arasında arttığı görülmüştür.

Şekil 4.10'da verilen bağlantıların eğme hasar yükleri ile Şekil 4.12'de verilen bağlantıların kırılma enerjileri birlikte incelendiğinde, karbon fiberlere uygulanan CTAP adsorpsiyonunun etkili olduğu, ancak bu etkinin %30 ile %60 arasındaki konsantrasyonlarda daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır.

4.5. Kimyasal Yüzey Modifikasyonu ve CTAB Adsorpsiyonunun Karbon Fiber ve Yapıştırıcı Yüzeyleri Üzerindeki Morfolojik Etkileri

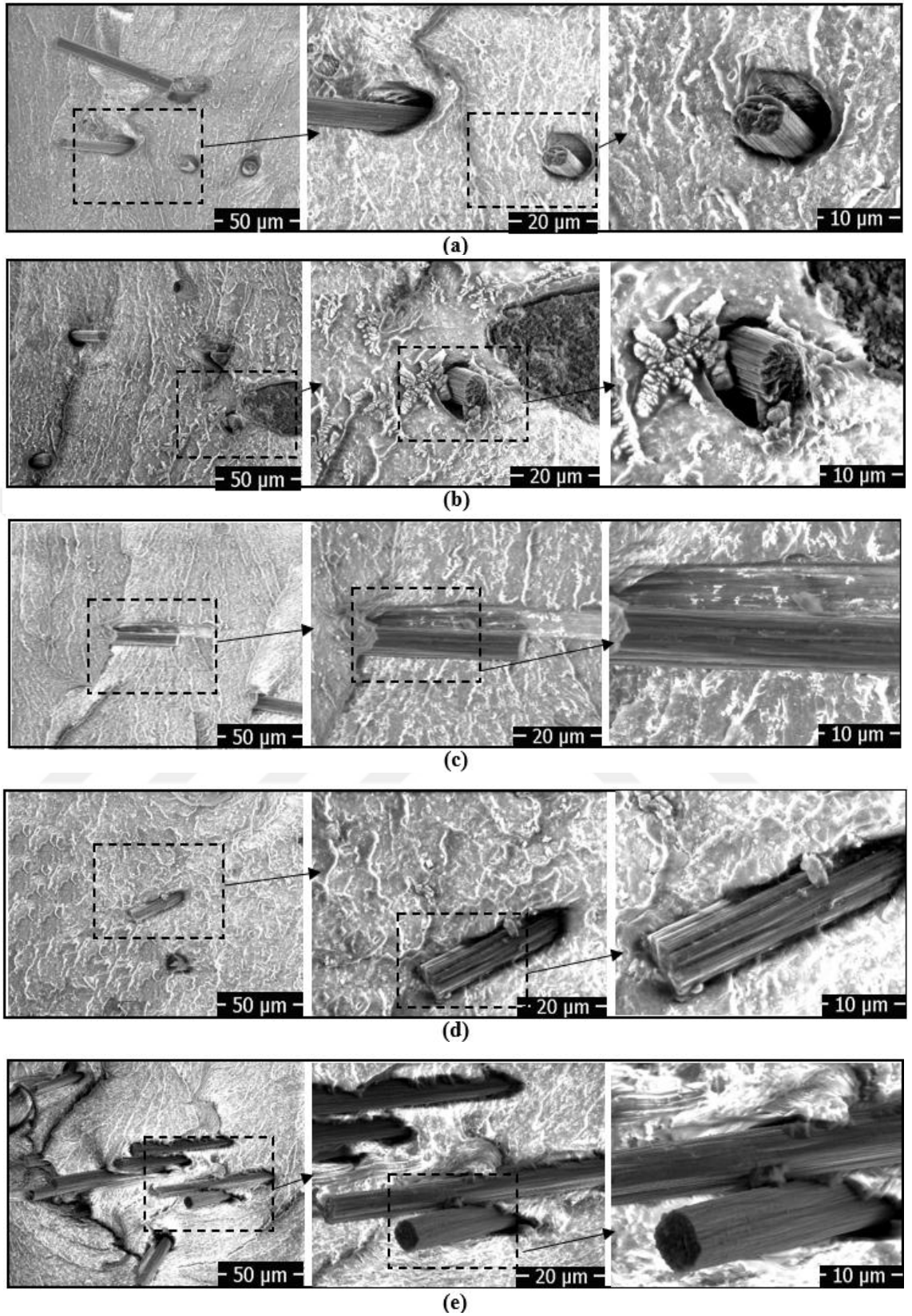
İşlem görmemiş ve sülfürik asit, nitrik asit, hidroklorik asit ve nitrik asit/hidroklorik asit karışımı ile kimyasal yüzey modifikasyonu ile yanı sıra 30 mg/L konsantrasyonda CTAB adsorpsiyonuna tabi tutulmuş karbon fiberlerin yüzey morfolojileri Şekil 4.13'te verilmiştir. SEM görüntülerinden, kimyasal yüzey modifikasyonu ve CTAB adsorplanmış fiberlerin yüzeyinde morfolojik değişim belirgin olarak görülmektedir. Ancak nitrik asit ve nitrik/hidroklorik asit karışımıyla modifiye edilmiş karbon fiberlerde, bu değişimin daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığı görülebilir (Şekil 4.12d ve e). Bu değişim, uygulanan kimyasal yüzey modifikasyonlarının ve CTAB adsorpsiyonunun muhtemelen oluşmuş oksit gruplarıyla belirgin yüzey deformasyonlarına neden olduğunu göstermektedir.

Ayrıca farklı kimyasal yüzey modifikasyonları ile 30 mg/L konsantrasyonda CTAB adsorpsiyonuna tabi tutulmuş karbon fiber katkılı kompozit yapıştırıcıların yüzey morfolojisi de doğrudan 90⁰ görüş açısında taramalı elektron mikroskopi görüntüleri alınarak (SEM) incelenmiştir. Şekil 4.14'teki bu görüntülerden, yapıştırıcıya eklenen kimyasal yüzey modifikasyonlarına maruz kalmış karbon fiberlerin içerdikleri yoğun oksit grupların (Şekil 4.14a), karbon fiber ve epoksi matrisi arasındaki ara yüzey enerjisinin artmasına yol açtığı ve böylece adezif etkileşimlerin zayıfladığı görülmektedir. Ancak CTAB adsorplanmış karbon fiberlerin (Şekil 4.14b) ve özellikle sülfürik asit, nitrik asit ve hidroklorik asit ile modifiye edilmiş (Şekil 4.14c, d, ve e), karbon fiberlerin epoksi matrisiyle ara yüzey etkileşimlerinin daha etkili olduğu ve böylece azalan ara yüzey enerjisine paralel olarak daha iyi bir adezyon gözlenmiştir.

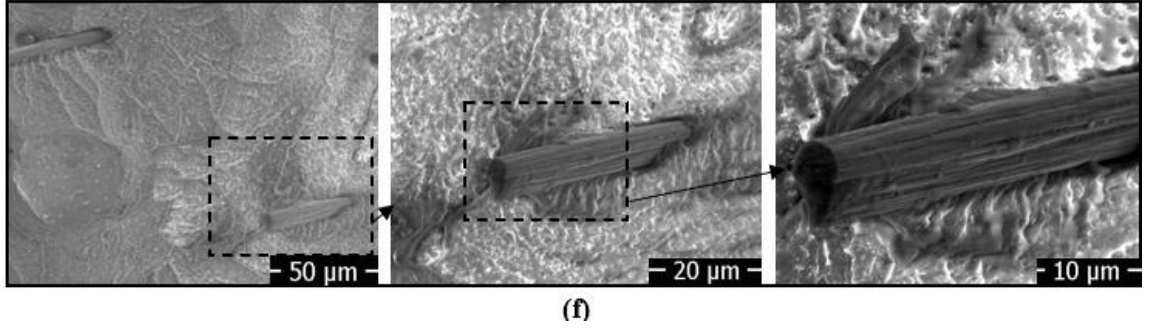


Şekil 4. 13. Karbon fiberlerin SEM görüntüleri, a) işlenmemiş KF, b) KF+C30, c) KF+A+S+C30, d) KF+A+N+C30, e) KF+A+H+C30, f) KF+A+N/H+C30

Ayrıca karbon fiberler ile epoksi matrisi arasında ara yüzey etkileşimleri açısından, karbon fiberlere nitrik asit/hidroklorik asit karışımı ile yapılan modifikasyonun (Şekil 14 f) diğer asidik modifikasyonlara kıyasla daha etkili olduğu SEM görüntülerinden görülebilmektedir. Bu, oksidasyon ve çözme etkilerinin kombinasyonunun daha kolay erişilebilir oksigrupların ortaya çıkmasına yol açması ve böylece daha etkin adezyonun gerçekleşmesiyle ilişkilendirilebilir. Dolayısıyla, bağlantıların mekanik performansı da artmaktadır.



Şekil 4. 14a. Karbon fiber katkılı yapıştırıcıların SEM görüntüleri, a) işlenmemiş KF, b) KF+C30, c) KF+A+S+C30, d) KF+A+N+C30, e) KF+A+H+C30



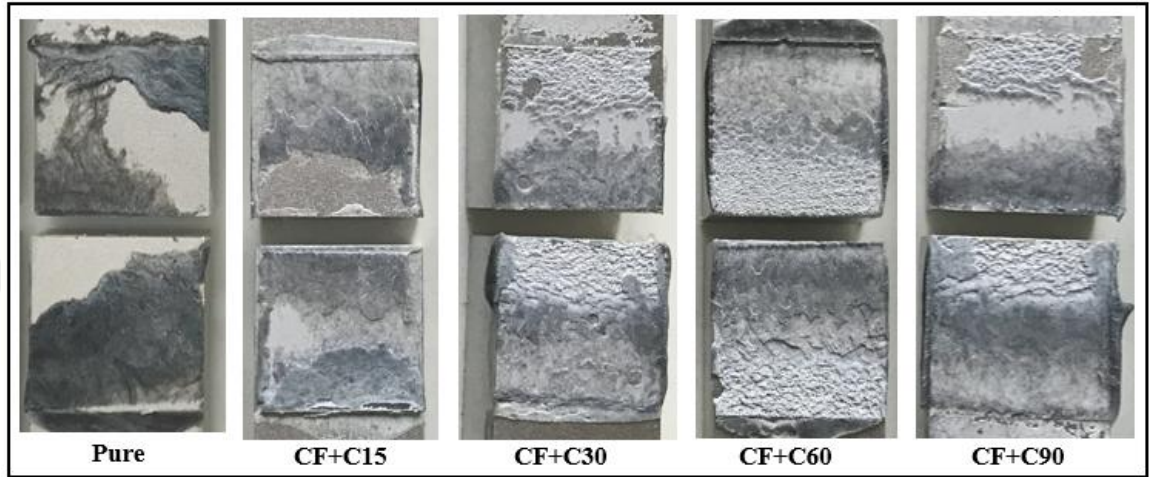
Şekil 4. 15b. Karbon fiber katkılı yapıştırıcıların SEM görüntüsü f) KF+A+N/H+C30

Yapıştırıcıya ilave edilen karbon fiberlere uygulanan kimyasal yüzey modifikasyonlarının, bağlantı performansları üzerine etkisini daha açık bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla, test sonrası meydana gelen hasar türlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi önemlidir. Şayet yapıştırılan malzeme metal ise, oluşan hasar türleri ISO 10365 (ISO 10365, 1992) standardı ile belirlenmiştir. Bu standart, yapıştırma bağlantılarında görülen hasar modlarını şu şekilde sınıflandırır; adezyon hasarı (yapıştırıcı ve metal malzeme arasındaki ara yüzeyde açıkça görülebilen ayrışma), kohezyon hasarı (yapıştırma işleminde yapıştırıcı katmanında gözle görülür bir kopma) ve karışık hasar türü (hem adezyon hem de kohezyon hasarlarını içeren durumlar).

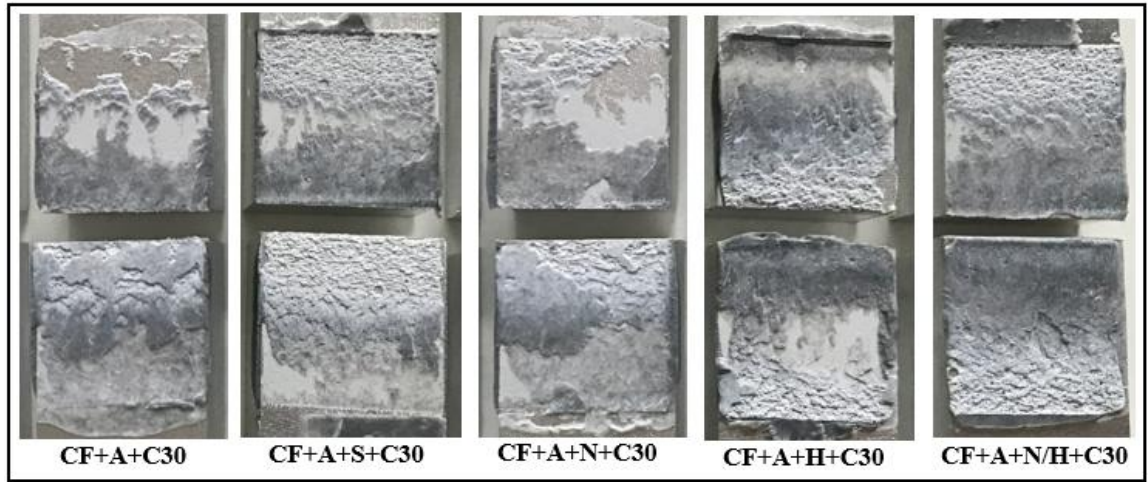
Şekil 4.15'te verilen kimyasal yüzey işlemsiz karbon fiber katkılı bağlantılarda oluşan hasar modu adezyon iken, 5, 30 ve 90 mg/L'lik CTAB konsantrasyonlarında adsorpsiyona tabi yutulmuş karbon fiber katkılı bağlantılarda karışık hasar modu olduğu görülmektedir. Ancak 60 mg/L'lik CTAB konsantrasyonunda adsorpsiyona tabi tutulmuş karbon fiber katkılı bağlantılarda, hasar modunun kohezyon hasar moduna dönüştüğü açıkça görülmektedir. Bu bağlantıların hem eğme hem de darbe yükü altındaki performansları göz önüne alındığında, bağlantılarda oluşan bu hasar modları testlerden elde edilen sonuçları desteklemektedir. Çünkü yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar modlarının adezyon hasar modundan kohezyon hasar moduna dönüşmesi bağlantıların performansını artırdığı gerçeğiyle örtüşmektedir.

Ayrıca yapıştırıcıya eklenen karbon fiberlere asetonla temizleme ve nitrik asit ile kimyasal yüzey modifikasyonunun ardından 30 CTAB adsorpsiyonu uygulandığında bağlantılarda karışık hasar modunu oluşturmaktadır (Şekil 4.16). Ancak karbon fiberlere sülfürik asit, hidroklorik asit ve nitrik asit/hidroklorik asit karışımı ile kimyasal yüzey modifikasyonu takiben 30 mg/L'lik CTAB konsantrasyonunda adsorpsiyonun uygulanmasıyla, bağlantılarda oluşan hasar modunu kohezyon hasar moduna

dönüştürmektedir. Böylece, bağlantılardan elde edilen hasar yükleri ile bu bağlantılardan oluşan hasar modları karşılaştırıldığında, deneysel sonuçlarla yüksek bir uyum gözlenmiştir. Bağlantılarda oluşan hasar modlarından, karbon fiberlere farklı kimyasal modifikasyonların uygulanmasıyla paralel olarak CTAB adsorpsiyonunun uygulanmasının hem fiber ile epoksi matrisi hem de yapıştırıcı ile alüminyum arasındaki ara yüzey etkileşimlerini önemli ölçüde iyileştirdiği anlaşılmaktadır (Şekil 4.16).



Şekil 4. 16. Karbon fiberlere uygulanan saf ve farklı konsantrasyonlardaki CTAB adsorpsiyonu ile yapıştırma bağlantılarının hasar sonrası kırılma yüzeyleri



Şekil 4.17. Farklı kimyasal yüzey işlemlerine tabi tutulan ve ardından %30 konsantrasyonunda CTAB ile adsorbe edilen yapıştırma bağlantılarının hasar sonrası kırılma yüzeyleri

4.6. Karbon Fiber Takviyeli Yapıştırıcıların FTIR Spektrallerinin Analizi: Kimyasal Yüzey Modifikasyonları Sonrası

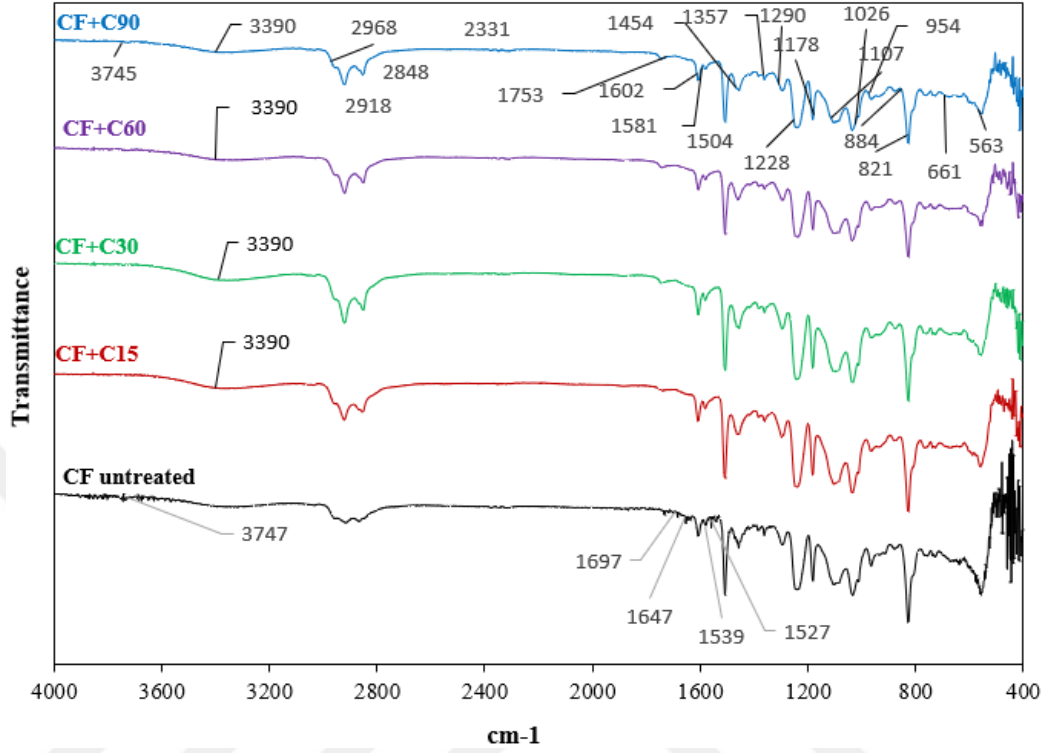
Karbon fiberlerin yüzey modifikasyonu sürecine ilişkin FTIR spektralleri; işlem görmemiş karbon fiberlere farklı CTAB (Sefalosporin Tetrabutyl Ammonium Bromide)

konsantrasyonlarında adsorpsiyon uygulanmış, aseton ile temizlenmiş ve farklı asitler ile hidroklorik asit/nitrik asit karışımıyla modifiye edilmiş, ardından 30 mg/L CTAB konsantrasyonunda adsorpsiyon uygulanmış karbon fiberler için Şekil 4.17 ve 4.18'de verilmiştir.

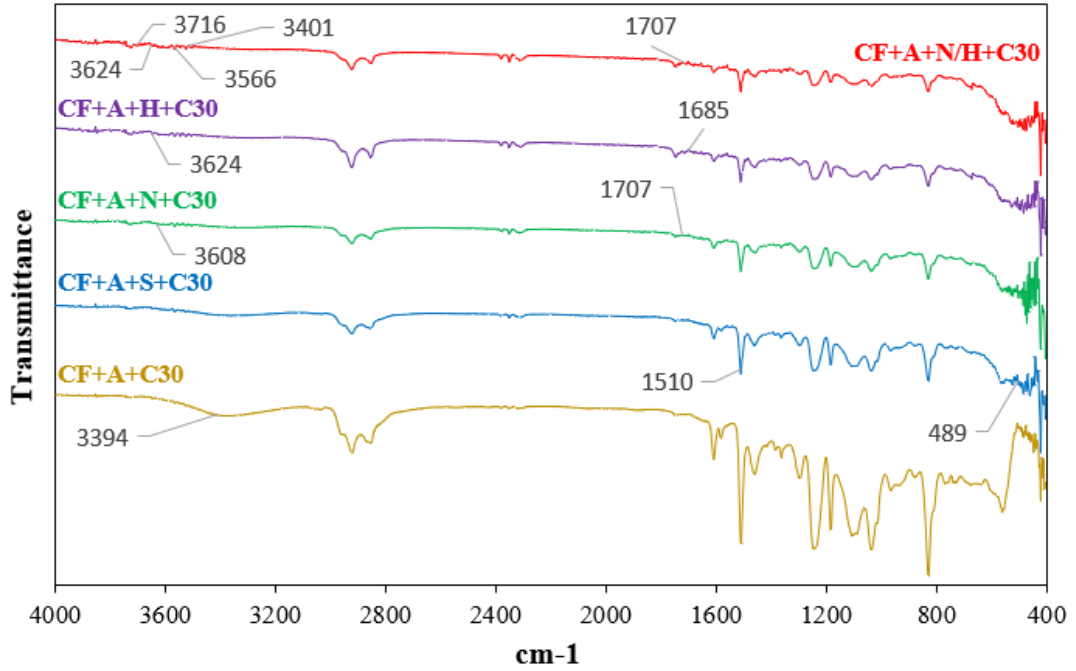
Şekil 4.17'de, farklı CTAB konsantrasyonlarında işlem görmüş karbon fiber numunelerinin spektrumlarında 3390 cm^{-1} civarında gözlemlenen pikler, hidroksil grubu (-OH) ile ilişkilendirilmiştir. $2968\text{-}2848\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki pikler ise sırasıyla asimetrik ve simetrik C-H gerilmeleri, -CH_3 grubunun asimetrik C-H gerilmesi ve -CH_2 grubunun asimetrik C-H gerilmesi olarak tanımlanmıştır. Bunun yanı sıra, 1674 ve 1602 cm^{-1} , 1581 ve 1454 cm^{-1} , ile 1571 ve 1504 cm^{-1} aralığında gözlemlenen pikler sırasıyla aromatik C=O, C=C ve aromatik C-C gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir. $1228\text{-}1357\text{ cm}^{-1}$ ve $1178\text{-}1026\text{ cm}^{-1}$ aralıklarında ortaya çıkan pikler ise asimetrik aromatik C-O gerilmelerini, asimetrik ve simetrik aromatik -COO gerilmelerini ve amin titreşimlerini temsil etmektedir. Ayrıca, 954 ve 884 cm^{-1} 'deki pikler C-O ve N=O titreşimleriyle, 821 ve 563 cm^{-1} 'deki pikler ise aromatik -CH'nin düzlem dışı deformasyonu ve C=C bükülme titreşimleriyle ilişkilendirilmiştir.

Aynı şekilde, 2968 , 2918 ve 2818 cm^{-1} 'deki piklerin alifatik C-H gerilmesiyle ilişkili olduğu; işlem görmemiş ve farklı CTAB konsantrasyonlarıyla yüzey modifikasyonu yapılmış karbon fiberlerde, CTAB konsantrasyonu arttıkça bu piklerin şiddetinin de arttığı görülmektedir. Bu durum ise, CTAB'ın fiber yüzeyine başarıyla adsorplandığını göstermektedir. CTAB ile işlem görmüş numunelerde, 3390 cm^{-1} civarında geniş ve zayıf bir N-H gerilme piki gözlemlenmiş olup bu da CTAB'ın fiber yüzeyine adsorpsiyonunu doğrulamaktadır. İşlem görmemiş karbon fiberlerin spektrumunda, 1647 ve 1697 cm^{-1} aralığında ortaya çıkan orta yoğunluklu pikler CO gerilmesiyle ilişkilendirilmiştir. Ancak bu piklerin CTAB işleminden sonra kaybolduğu görülmüş, bu da CTAB'ın bu gruplarla dipol-dipol etkileşimleri yoluyla bağlandığını göstermektedir. Benzer şekilde, işlem görmemiş karbon fiberlerde 1539 ve 1527 cm^{-1} aralığında gözlemlenen düşük yoğunluklu piklerin aromatik C=C gerilmesi ve C-O gerilmesiyle ilişkili olduğu, bu piklerin CTAB ile işlem görmüş numunelerde kaybolmasının ise söz konusu grupların CTAB ile etkileşimde bulunduğunu ortaya koyduğu sonucuna varılmaktadır. Şekil 4.18'de, 3624 ve 3401 cm^{-1} 'deki pikler sırasıyla N-H ve O-H gerilmeleriyle ilişkilendirilmiştir. Bu piklerin, 30 mg/L konsantrasyonda CTAB ve farklı yüzey modifikasyonları ile işlem görmüş karbon fiberlerde düşük

yoğunluklarda da olsa ortaya çıktığı, ancak işlem görmemiş karbon fiberlerde gözlemlenmediği tespit edilmiştir. Ayrıca, 1685 ve 1707 cm^{-1} 'deki piklerin sırasıyla ester ve C=O titreşimlerine karşılık geldiği belirlenmiştir.



Şekil 4. 18. Farklı CTAB konsantrasyonlarına adsorpsiyon uygulanmış ve işlem görmemiş karbon fiberlerin FTIR spektralleri



Şekil 4. 19. Asetonla temizlenmiş, farklı asitlerle ve hidroklorik asit/nitrik asit karışımıyla modifiye edilmiş, ardından 30 mg/L CTAB konsantrasyonunda adsorpsiyon uygulanmış karbon fiberlerin FTIR spektralleri

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuç

Bu tez çalışmasında, yapıştırma bağlantılarının mekanik performansını artırmak için yapıştırıcıya farklı yüzey işlemleri uygulanmış fiberler eklenmiştir. Sonrasında fiber yüzeyleri, farklı CTAB absorsiyonları içeren yapıştırma bağlantıları oluşturularak eğme ve darbe testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmanın detaylarına bakıldığında, ilk olarak sert ve esnek olmak üzere iki farklı yapıştırıcıya ağırlıkça %0,5, 1, 2 ve 3 oranında karbon fiber takviyesi uygulanmış; ayrıca karbon fiberlere aseton (C_3H_6O), sülfirik asit (H_2SO_4), nitrik asit (HNO_3), hidroklorik asit (HCl) ve nitrik/hidroklorik asit (HNO_3/HCl) ile kimyasal yüzey işlemi yapılmıştır. Farklı oranlarda karbon fiber takviyeli kompozit yapıştırıcılar ile birleştirilen tek tesirli bağlantılar üç nokta eğme testine maruz bırakılarak bağlantıların hasar yükleri ve hasar yüzeyleri belirlenmiştir. Çalışma sonrasında elde edilen sonuçlar ise şöyledir:

- Yapıştırıcıya ilave edilen karbon fiberlerin epoksiye doğrudan ilave edilmesiyle bağlantılar arasındaki standart sapma yaklaşık %7 ile %11 arasında değişmektedir. Ancak yapıştırıcı epoksinin viskozitesi düşürüldükten sonra fiberlerin ilave edilmesi durumunda bağlantılar arasındaki standart sapma %1 ile 2 arasında oluşmaktadır. Standart sapmanın yaklaşık %1 civarına indirilmesi, farklı parametrelerin birbiriyle doğru karşılaştırılmasında oldukça önemlidir.
- Yapıştırıcıya ağırlıkça %0,5 fiber ilave edilmesi bağlantının performansını yaklaşık %60, ağırlıkça %1 fiber ilave edilmesi bağlantının performansını yaklaşık %63, ağırlıkça %2 fiber ilave edilmesi bağlantının performansını yaklaşık %52 ve ağırlıkça %3 fiber ilave edilmesi bağlantının performansını yaklaşık %33 artırmaktadır. Bu test sonuçlarına göre, yapıştırıcıya ilave edilen ağırlıkça en ideal fiber yapı oranı %1'dir.
- Sert yapıştırıcıya ilave edilen karbon fiberlere kimyasal yüzey işlemi uygulanması bağlantı performansını önemli derecede etkilemektedir. Şöyle ki: karbon fiberlere uygulanan kimyasal yüzey işleminde sülfirik asit kullanılması bağlantının performansını %85, nitrik asit kullanılması bağlantının performansını %94, hidroklorik asit kullanılması ise bağlantının performansını %99 artırmaktadır.

- Nitrik asit ile kimyasal yüzey işlemi uygulanması, esnek yapıştırıcıya (DP190) birleştirilmiş bağlantıların performansını %45 artırırken, hidroklorik asit ile kimyasal yüzey işlemi uygulanması bağlantının performansını %18 azaltmaktadır. Ancak nitrik ile hidroklorik asidin 3:1 (v/v) oranında birleştirilmesiyle oluşturulan asit ile karbon fiberlere kimyasal yüzey işlemi uygulanması durumunda, bağlantının performansı %66 artmaktadır.
- Ek olarak SEM ile hem kimyasal yüzey işlemli karbon fiberlerden hem de yapıştırıcı yüzeylerden yapılan analizler ve test sonrası hasar yüzey analizleri, bağlantıların performanslarındaki artışları desteklemekte ve sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir.
- FT-IR analizi, kimyasal yüzey işlemlerine tabi tutulan liflerle birleştirilen DP 460 yapıştırıcısının spektrumlarında, saf yapıştırıcı spektrumunda bulunmayan 2328-2397 cm^{-1} aralığında asidik -OH ve birleşimi C=C titreşimlerine karşılık gelen zirvelerin olduğunu göstermektedir. Bu, kimyasal olarak işlenmiş liflerin başarılı bir şekilde entegrasyonunu, özellikle hidroklorik asit ve nitrik asit karışımı ile, bu bölgelerdeki titreşimlerin güçlenmesiyle ortaya koymaktadır.
- DP 190 yapıştırıcısının spektrumları da sırasıyla 3614-3665 cm^{-1} ve 3280-3315 cm^{-1} aralıklarında amine N-H ve alkol hidroksil (-OH) titreşimleri için belirgin zirveler göstermektedir. Ayrıca, ester ve amid C=O bağlarının oluşumu, yapıştırıcı matris ile kimyasal olarak modifiye edilmiş karbon fiber yüzeyleri arasında etkili bir çapraz bağlanma sağlandığını ve bu durumun genel bağlama performansını artırdığını göstermektedir.

Daha sonra, yapıştırıcıya ağırlıkça %1 eklenen karbon fiberlere ilk olarak aseton, sülfürik asit, nitrik asit, hidroklorik asit ve nitrik asit/hidroklorik asit karışımı ile kimyasal yüzey işlemleri uygulanmış; sonrasında bu fiberlere 15, 30, 60 ve 90 mg/L'lik konsantrasyonlarda CTAB adsorpsiyonu uygulanmıştır. Sonraki adımda ise, kimyasal yüzey işlemleri uygulanmış karbon fiberler yapıştırıcıya eklenerek tek tesirli yapıştırma bağlantıları elde edilmiş ve bu bağlantılar eğme ve darbe testlerine tabi tutularak bağlantı performansları incelenmiştir. Bunlardan elde edilen sonuçlar ise şöyledir:

- Kimyasal yüzey işlemsiz (saf) karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantısının eğme hasar yüküne göre, farklı konsantrasyonda CTAB adsorpsiyonlu karbon fiber katkılı yapıştırma bağlantılarının eğme hasar yükü %23 ile %30 arasında artmaktadır. CTAB'ın yapısında bulunan hidrofobik setil grubu karbon fiber

yüzeyine nüfuz ederken, hidrofilik trimetilamonyum grubu ise epoksi ile etkileşime girer. Bu etkileşim, karbon fiberlerin yüzey enerjisini değiştirerek epoksi ile daha iyi bir adezyon sağlar.

- Ancak yapıştırıcıya ilave edilen karbon fiberlere CTAB adsorpsiyonu uygulanmadan önce fiberler aseton ile yüzey temizleme işlemi yapıldığında, bağlantıların eğme hasar yükleri %28 ile %38 arasında artmaktadır. Bu sonuç, fiberlerin aseton ile yüzey temizleme işleminin yapılmasıyla bağlantı performansının yaklaşık %10 arttığını göstermektedir.
- Ayrıca yapıştırıcıya ilave edilen karbon fiberlerin sülfürik, nitrik ve hidroklorik asit ile kimyasal yüzey işlemlerinin ardından farklı konsantrasyonlarda CTAB adsorpsiyonunun uygulanması, uygulanan asit türüne bağlı olarak bağlantıların eğme hasar yüklerini yaklaşık %36 ile %60 arasında artırmaktadır. Sülfürik ve nitrik asit ile yapılan kimyasal yüzey işlemleri, yüzeydeki fonksiyonel karboksil ve hidroksil gruplarını artırır. Bu durum, epoksi ile iyi bir kimyasal bağ oluşmasına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olur.
- Karbon fiberlere uygulanan yüzey modifikasyonunda nitrik ve hidroklorik asit kombinasyonunun kullanılması, bağlantıların eğme yükü altındaki performansını maksimum seviyeye çıkararak bağlantıların dayanımını yaklaşık %57 ile %70 arasında artırmaktadır. Bu artış, asit kombinasyonlarının tek başına asit uygulamalarından daha etkili olabileceğini ve farklı asitlerin etkileşimleri neticesinde daha fazla yüzey modifikasyonu oluştuğunu göstermektedir.
- Yapıştırıcıya ilave edilen karbon fiberlere kimyasal yüzey işlemi ve farklı oranlarda CTAB adsorpsiyonu uygulanması, bağlantıların darbe yükü altında kırılma enerjilerini önemli ölçüde artırmaktadır. Bağlantıların eğme ve darbe testlerinin sonuçlarına göre, karbon fiberlere uygulanan CTAB adsorpsiyonunun etkili olduğu, ancak bu etkinin %30 ile %60 arasındaki konsantrasyonlarda daha belirgin olduğu anlaşılmıştır.
- Yapıştırma bağlantılarından elde edilen test sonuçları ile bu bağlantılardan alınan SEM yüzey morfolojileri ve oluşan hasar modlarının görüntüleri karşılaştırıldığında, deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Karbon fiberlere farklı kimyasal modifikasyonların uygulanmasıyla birlikte CTAB adsorpsiyonunun uygulanması, hem fiber ile epoksi hem de yapıştırıcı ile alüminyum arasındaki ara yüzey etkileşimlerini önemli ölçüde iyileştirmektedir.

- 30 mg/L konsantrasyonda CTAB adsorpsiyonu ve farklı yüzey modifikasyonları ile işlenmiş karbon liflerinde, düşük yoğunluklarda da olsa gözlenen ve ester ve C=O titreşimleriyle ilişkilendirilen 1685 ve 1707 cm^{-1} 'deki piklerin, işlenmemiş karbon liflerinde ortaya çıkmaması modifikasyonunun etkililiğine atfedilebilmektedir.

5.2. Öneriler

Bu doktora tez çalışması ve eşzamanlı olarak Erzurum Teknik Üniversitesi 2023/05 numaralı BAP projesi, karbon fiberlerin yapıştırıcıya eklenmesinin, özellikle kimyasal yüzey modifikasyonları ve CTAB adsorpsiyonu ile yapıştırma bağlantılarının mekanik performanslarındaki değişimleri ortaya koymaktadır. Gelecek çalışmalarda, özellikle farklı kimyasal aşındırıcıların (asitler) ve yüzey işlemlerinin etkilerinin daha kapsamlı biçimde incelenmesi faydalı olacaktır. Çalışma bulgularına dayanarak, nitrik ve hidroklorik asitlerin birleşiminin etkileri ile bu asitlerin farklı oranlarda kullanılmasının bağlantı performansları üzerindeki etkileri araştırılabilir. Ayrıca, daha geniş bir karbon fiber türü yelpazesi kullanılarak, farklı yüzey modifikasyon tekniklerinin karşılaştırılması, endüstriyel uygulamalarda optimize edilmiş yapıştırıcı performansını artırma potansiyeline sahip olabilir.

Bir diğer önemli öneri, bu çalışmada kullanılan CTAB adsorpsiyonunun farklı konsantrasyonlarının ve yüzey işlemleriyle olan etkileşiminin bağlama performansını ne ölçüde artırabileceğinin belirlenmesidir. Bu etkileşimin, özellikle düşük konsantrasyonlarda bile önemli etkiler gösterdiği anlaşılmaktadır. Gelecek çalışmalarda, karbon fiberlerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik farklı kimyasal ve fiziksel yüzey işleme tekniklerini birleştirerek, daha etkili ve dayanıklı yapıştırma bağlantıları üretilebileceğine dair yeni stratejiler geliştirilebilir. Ayrıca, bu tür modifikasyonların endüstriyel uygulamalardaki verimliliğini test etmek amacıyla, uzun dönem dayanıklılık testleri yapılabilir.

KAYNAKÇA

- Adams, R. D. (Ed.). 2021. Adhesive bonding: science, technology and applications. Woodhead Publishing series in materials (Second edition.). Oxford: Woodhead Publishing.
- Akhavan-Safar, A., Salamat-Talab, M., Delzendehrooy, F., Zeinolabedin-Beygi, A. ve Da Silva, L. F. M. 2022. Effects of natural date palm tree fibres on mode II fracture energy of E-glass/epoxy plain-woven laminated composites. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44(10), 457. doi:10.1007/s40430-022-03717-2
- Akpınar, S. ve Akpınar, İ. A. 2023. Influence of carbon and glass fiber reinforced composite adhesive on the strength of adhesively bonded joints. *Materials Testing*, 65(5), 802-814. doi:10.1515/mt-2022-0284
- Aksakal, F. (2008). CTAB'ın Kıl/Su Ara Yüzeyine Monomerik ve Miseler Adsorpsiyonu (Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü). Erzurum.
- Ansari, M. S., Zafar, S., & Pathak, H. (2023). A comprehensive review of surface modification techniques for carbon fibers for enhanced performance of resulting composites. *Results in Surfaces and Interfaces*, 12, 100141.
- Avinç Akpınar, İ. (2025). Investigation of electrochemical oxidation process time and glycidoxypopyl trimethoxy silane coating in glass fiber reinforced composite adhesive bonded joints. *European Mechanical Science*, 9(3), 221-233. <https://doi.org/10.26701/ems.1702654>
- Bali, G. ve Topkaya, T. 2023. Effect of graphene nano-particle reinforcement on the fatigue behavior of adhesively bonded single lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 120, 103279. doi:10.1016/j.ijadhadh.2022.103279
- Barut, S. 2021. Fiber takviyeli yapıştırıcıların kullanıldığı tek tesirli yapışma bağlantılarında hasar analizi. (Master Thesis). <https://acikerisim.dicle.edu.tr/xmlui/handle/11468/7276> adresinden erişildi.
- Behera, R. K., Parida, S. K. ve Das, R. R. 2023. Effect of using fibre reinforced epoxy adhesive on the strength of the adhesively bonded Single Lap Joints. *Composites Part B: Engineering*, 248, 110358. doi:10.1016/j.compositesb.2022.110358
- Bunsell, A. R., Joannès, S., & Thionnet, A. (2021). *Fundamentals of fibre reinforced composite materials*. CRC Press.
- Cetkin, E. 2023. Determination of the effects of nanoparticle reinforcements on mechanical and composite surface fractures in joints bonded with epoxy adhesives. *PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART E-JOURNAL OF PROCESS MECHANICAL ENGINEERING*. doi:10.1177/09544089231193937
- Çalık, A. ve Akpınar, S. 2023. The effect of fiber length and structure on joint strength in bonded joints with fiber-reinforced composite adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 124, 103365. doi:10.1016/j.ijadhadh.2023.103365
- Dai, Z., Shi, F., Zhang, B., Li, M. ve Zhang, Z. 2011. Effect of sizing on carbon fiber surface properties and fibers/epoxy interfacial adhesion. *Applied Surface Science*, 257(15), 6980-6985. doi:10.1016/j.apsusc.2011.03.047

- Dai, Z., Zhang, B., Shi, F., Li, M., Zhang, Z. ve Gu, Y. 2012. Chemical interaction between carbon fibers and surface sizing. *Journal of Applied Polymer Science*, 124(3), 2127-2132. doi:10.1002/app.35226
- Delzendehrooy, F., Ayatollahi, M. R., Akhavan-Safar, A. ve da Silva, L. F. M. 2020. Strength improvement of adhesively bonded single lap joints with date palm fibers: Effect of type, size, treatment method and density of fibers. *Composites Part B: Engineering*, 188, 107874. doi:10.1016/j.compositesb.2020.107874
- Drożdźiel-Jurkiewicz, M. ve Bieniaś, J. 2022. Evaluation of Surface Treatment for Enhancing Adhesion at the Metal–Composite Interface in Fibre Metal-Laminates. *Materials*, 15(17), 6118. doi:10.3390/ma15176118
- Esmacili, E., Razavi, S. M. J., Bayat, M. ve Berto, F. 2018. Flexural behavior of metallic fiber-reinforced adhesively bonded single lap joints. *The Journal of Adhesion*, 94(6), 453-472. doi:10.1080/00218464.2017.1285235
- Furst, E. M., Pagac, E. S., & Tilton, R. D. (1996). Coadsorption of polylysine and the cationic surfactant cetyltrimethylammonium bromide on silica. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35(5), 1566–1574.
- Gao, B., Zhang, R., He, M., Sun, L., Wang, C., Liu, L., Zhao, L., Cui, H. ve Cao, A. 2016. Effect of a multiscale reinforcement by carbon fiber surface treatment with graphene oxide/carbon nanotubes on the mechanical properties of reinforced carbon/carbon composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 433-440. doi:10.1016/j.compositesa.2016.08.012
- Ghanbari, E., Sayman, O., Pekbey, Y. ve Özdemir, O. 2015. Experimental analysis of single-lap composite joints with two different adhesives at various conditions. *Journal of Composite Materials*, 50. doi:10.1177/0021998315595532
- Ghanem, A., & Lang, Y. (2017). Introduction to polymer adhesion. Department of process engineering and applied science, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Ho, K. K. C., Lee, A. F., Lamoriniere, S. ve Bismarck, A. 2008. Continuous atmospheric plasma fluorination of carbon fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(2), 364-373. doi:10.1016/j.compositesa.2007.10.008
- ISO 11343:2003. (t.y.).Adhesives - Determination of dynamic resistance to cleavage of high-strength adhesive bonds under impact conditions — Wedge impact method. <https://www.iso.org/standard/34855.html> adresinden erişildi.
- Javanmard Sistani, A., Shariati, M., Zamani, P. ve Da Silva, L. F. 2024. Mode-I and II fracture behavior of metal-to-composite bonded interfaces with a graphene nanoplatelet-reinforced structural epoxy adhesive. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 238(8), 1538-1556. doi:10.1177/14644207241226609
- Khakpour, H., Ayatollahi, M. R., Akhavan-Safar, A. ve da Silva, L. F. M. 2020. Mechanical properties of structural adhesives enhanced with natural date palm tree fibers: Effects of length, density and fiber type. *Composite Structures*, 237, 111950. doi:10.1016/j.compstruct.2020.111950
- Khalili, S. M. R., Shokuhfar, A., Hoseini, S. D., Bidkhori, M., Khalili, S. ve Mittal, R. K. 2008. Experimental study of the influence of adhesive reinforcement in lap joints for composite structures subjected to mechanical loads. *International Journal of*

Adhesion and Adhesives, Special Topic Issue on Structural Adhesive Joints, 28(8), 436-444. doi:10.1016/j.ijadhadh.2008.04.009

- Khayamdar, M. ve Khoramishad, H. 2021. The effect of metallic fiber geometry and multi-walled carbon nanotubes on the mechanical behavior of aluminum fiber-reinforced composite adhesive joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 235(5), 949-957. doi:10.1177/1464420720981404
- Liu, Q., Luo, W., & Liang, M. (2016). Enhanced mechanical and thermal properties of CTAB-functionalized graphene oxide–polyphenylene sulfide composites. *High Performance Polymers*, 29(8). <https://doi.org/10.1177/0954008316663810>
- Long, J., Li, C. ve Li, Y. 2022. Enhancement of Mechanical and Bond Properties of Epoxy Adhesives Modified by SiO₂ Nanoparticles with Active Groups. *Polymers*, 14(10), 2052. doi:10.3390/polym14102052
- Lu, M., Xiao, H., Liu, M., Li, X., Li, H., & Sun, L. (2018). Improved interfacial strength of SiO₂ coated carbon fiber in cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 91, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.04.007>
- Ma, Q., Gu, Y., Li, M., Wang, S. ve Zhang, Z. 2016. Effects of surface treating methods of high-strength carbon fibers on interfacial properties of epoxy resin matrix composite. *Applied Surface Science*, 379, 199-205. doi:10.1016/j.apsusc.2016.04.075
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. CRC press.
- Masuelli, M. A. (2013). Introduction of fibre-reinforced polymers– polymers and composites: concepts, properties and processes. In *Fiber reinforced polymers-the technology applied for concrete repair*. IntechOpen.
- Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. CrC press.
- Mindivan, F., & Gürses, A. (2021). Microhardness and surface charge correlation in resol phenolic resin/organoclay composites. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 7(3). ISSN: 2277–5668.
- Moosburger-Will, J., Bauer, M., Laukmanis, E., Horny, R., Wetjen, D., Manske, T., Schmidt-Stein, F., Töpker, J. ve Horn, S. 2018. Interaction between carbon fibers and polymer sizing: Influence of fiber surface chemistry and sizing reactivity. *Applied Surface Science*, 439, 305-312. doi:10.1016/j.apsusc.2017.12.251
- Nemati Giv, A., Ayatollahi, M. R., Ghaffari, S. H. ve da Silva, L. F. M. 2018. Effect of reinforcements at different scales on mechanical properties of epoxy adhesives and adhesive joints: a review. *The Journal of Adhesion*, 94(13), 1082-1121. doi:10.1080/00218464.2018.1452736
- Ozdemir, O. ve Oztoprak, N. 2017. An investigation into the effects of fabric reinforcements in the bonding surface on failure response and transverse impact behavior of adhesively bonded dissimilar joints. *Composites Part B: Engineering*, 126, 72-80. doi:10.1016/j.compositesb.2017.06.005
- Ozun, E., Ceylan, R., Bora, M. Ö., Çoban, O. ve Kutluk, T. 2022. Combined effect of surface pretreatment and nanomaterial reinforcement on the adhesion strength of

- aluminium joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 119, 103274. doi:10.1016/j.ijadhadh.2022.103274
- Park, S. J., & Kim, B. J. (2005). Roles of acidic functional groups of carbon fiber surfaces in enhancing interfacial adhesion behavior. *Materials Science and Engineering A*, 408, 269–273.
- Pawlik, M., Cheah, L. Y. Y., Gunpath, U., Le, H., Wood, P. ve Lu, Y. 2022. Surface engineering of carbon fibre/epoxy composites with woven steel mesh for adhesion strength enhancement. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. doi:10.1016/j.ijadhadh.2022.103105
- Pawlik, M., Lu, Y. ve Le, H. 2020. Effects of surface modification and graphene nanoplatelet reinforcement on adhesive joint of aluminium alloys. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 99, 102591. doi:10.1016/j.ijadhadh.2020.102591
- Pocius, A. V. 2012. *Adhesion and adhesives technology: an introduction* (3. ed.). Munich Cincinnati, Ohio: Hanser.
- Quan, D., Urdániz, J. L., Rouge, C. ve Ivanković, A. 2018. The enhancement of adhesively-bonded aerospace-grade composite joints using steel fibres. *Composite Structures*, 198, 11-18. doi:10.1016/j.compstruct.2018.04.071
- Rahmanian, S., Suraya, A. R., Zahari, R. ve Zainudin, E. S. 2013. Synthesis of vertically aligned carbon nanotubes on carbon fiber. *Applied Surface Science*, 271, 424-428. doi:10.1016/j.apsusc.2013.01.207
- Sathishkumar, T. P., Naveen, J. A., & Satheeshkumar, S. (2014). Hybrid fiber reinforced polymer composites—a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(5), 454-471.
- Sato, C. ve Marzi, S. 2021. 9 - High-rate loading and impact in adhesively bonding joints. R. D. Adams (Ed.), *Adhesive Bonding (Second Edition)* içinde , Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies (ss. 257-293). Woodhead Publishing. doi:10.1016/B978-0-12-819954-1.00015-0
- Shi, S., Liu, Z., Lv, H., Zhou, X., Sun, Z. ve Chen, B. 2024. The tensile properties of adhesively bonded single lap joints with short kevlar fiber. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 134, 103794. doi:10.1016/j.ijadhadh.2024.103794
- Shi, S., Liu, Z., Lv, H., Zhou, X., Sun, Z., & Chen, B. (2024). The tensile properties of adhesively bonded single lap joints with short kevlar fiber. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 134, 103794.
- Taş, H. 2024. Effects of Stainless Steel Woven Wire Mesh Reinforcement on the Load-Bearing Capacity of Adhesively Bonded Aluminium Alloy Single-Lap Joints. *Arabian Journal for Science and Engineering*. doi:10.1007/s13369-024-09652-9
- Thirunavukarasu, A. ve Sikarwar, R. S. 2024a. Influence of meshes on mechanical performance and stiffness of single-lap adhesive bonded composite joints. *Materials Letters*, 367, 136587. doi:10.1016/j.matlet.2024.136587
- Thirunavukarasu, A. ve Sikarwar, R. S. 2024b. Enhancing the strength of adhesively bonded single-lap composite joints using fiber fabrics. *Materials Letters*, 357, 135664. doi:10.1016/j.matlet.2023.135664

- Thomas, M., & Mittal, K. L. (Eds.). (2013). Atmospheric pressure plasma treatment of polymers: relevance to adhesion. John Wiley & Sons.
- Yalçın, M., Gürses, A., Doğar, Ç., & Sözbilir, M. (2005). The adsorption kinetics of cethyltrimethylammonium bromide (CTAB) onto powdered active carbon. *Adsorption*, 10, 339–348. <https://doi.org/10.1007/s10450-005-2181-9>
- Yang, G., Park, M., & Park, S. J. (2019). Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: A review. *Composites Communications*, 14, 34-42.
- Yang, G., Park, M., & Park, S. J. (2019). Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: A review. *Composites Communications*, 14, 34-42.
- Zamani, P., Jaamialahmadi, A. ve da Silva, L. F. M. 2021. The influence of GNP and nano-silica additives on fatigue life and crack initiation phase of Al-GFRP bonded lap joints subjected to four-point bending. *Composites Part B: Engineering*, 207, 108589. doi:10.1016/j.compositesb.2020.108589
- Zhao, G., Li, M., Wang, S., Peng, X., Wang, L., Li, X., Zhao, Y., Gao, Y., Zhang, Y. ve Zheng, J. 2024. Effect of interlaminar basalt fiber veil reinforcement on mode I fracture toughness of basalt fiber composites. *Polymer Composites*, 45(6), 4985-4993. doi:10.1002/pc.28103

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR

1. Makaleler

Akpınar, S., **Sahin, R.**, Gürses, A., & Akpınar, I. A. (2025). The effect of different chemical surface-modified carbon fiber structure and ratio on bond strength in adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 138, 103954.

Akpınar, I. A., **Sahin, R.**, Gürses, A., & Akpınar, S. (2025). Investigation of the effects of incorporating modified carbon fibers with different chemical surface treatments and cationic surfactant adsorption on adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 104258.

