

T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİBER TAKVİYELİ YAPIŞTIRICILARIN KULLANILDIĞI TEK
TESİRLİ YAPIŞMA BAĞLANTILARINDA HASAR ANALİZİ

Sinan BARUT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DIYARBAKIR

Şubat - 2021

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
DİYARBAKIR

Sinan BARUT tarafından yapılan “Fiber Takviyeli Yapıştırıcıların Kullanıldığı Tek Tesirli Yapışma Bağlantılarında Hasar Analizi” konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Mete Onur KAMAN

Üye : Prof. Dr. Kadir TURAN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 16/02/2021

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../.....

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım esnasında akademik bilgi ve tecrübelerini samimi bir şekilde paylaşarak beni akademiye teşvik eden danışman hocam Prof. Dr. Kadir TURAN'a, yüksek lisans derslerindeki yardımlarından ötürü Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ÖRÇEN'e ve tez çalışma sürecimde bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevdiklerime, özellikle babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmamı MÜHENDİSLİK 18.014 numaralı proje ile destekleyen DÜBAP birimine teşekkür ederim.

Sinan BARUT

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
ÇİZELGE LİSTESİ	VII
ŞEKİL LİSTESİ	VIII
KISALTMA VE SİMGELER	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. MATERYAL VE METOT	11
3.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı	11
3.1.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler	13
3.1.2. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler	13
3.2. Reçine Çeşitleri	18
3.2.1. Termoplastik Malzemeler	19
3.2.2. Termoset Malzemeler	19
3.3. Kompozit Malzemelerin Birleştirme Yöntemleri	23
3.3.1. Çözülebilir (Mekanik) Bağlantılar	23
3.3.2. Çözülemez Bağlantılar	23
3.4. Yapışma	24
3.4.1. Adhezyon	24
3.4.2. Kohezyon	25
3.4.3. Islanabilirlik	26
3.4.4. Yapıştırıcılar ve Çeşitleri	28

3.4.4.1	Kimyasal Reaksiyon ile Sertleşen Yapıştırıcılar	28
	- Anaerobikler	28
	- Siyanoakrilatlar	30
	- Akrilikler	31
	- Poliüretanlar	32
	- Silikonlar	32
	- Epoksiler	33
3.4.4.2.	Formları Bakımından Yapıştırıcılar	34
3.4.5.	Yapıştırıcı ile Birleştirme Yöntemleri	34
3.4.5.1.	Tek Tesirli Yapışma Bağlantısı	35
3.4.5.2.	Çift Bindirme Bağlantısı	35
3.4.5.3.	Eğimli Bindirme Bağlantısı	35
3.4.5.4.	Alın Bağlantısı	35
3.4.5.5.	Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	36
3.4.5.6.	Çift Tesirli Bindirme Bağlantısı	36
3.4.5.7.	Eğimli Çift Tesirli Bindirme Bağlantısı	36
3.4.5.8.	Basamaklı Bindirme Bağlantısı	36
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	37
4.1.	Giriş	37
4.2.	Problem Modeli	37
4.3.	Numunelerin Hazırlanması	38
4.4.	Deneylerin Yapılışı	42
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	45
5.1.	Tek Yön Cam Fiber Takviyeli Yapıştırıcı için Deneysel Sonuçlar	45
5.2.	Örgülü Cam Fiber Takviyeli Yapıştırıcı için Deneysel Sonuçlar	48
5.3.	Tek Yön Karbon Fiber Takviyeli Yapıştırıcı için Deneysel Sonuçlar	52

5.4.	Örgülü Karbon Fiber Takviyeli Yapıştırıcı için Deneysel Sonuçlar	55
5.5.	Takviyesiz Yapıştırıcı için Deneysel Sonuçlar	59
5.6.	Yapıştırıcının Fiber Takviye Doğrultusuna Göre Karşılaştırılması	59
5.7.	Yapıştırıcının Takviye Türüne Göre Karşılaştırılması	62
5.8.	Sonuç ve Değerlendirme	66
6.	KAYNAKLAR	69
	ÖZGEÇMİŞ	71



ÖZET

FİBER TAKVİYELİ YAPIŞTIRICILARIN KULLANILDIĞI TEK TESİRLİ YAPIŞMA BAĞLANTILARINDA HASAR ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan BARUT

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2021

Bu çalışmada; cam ve karbon fiberlerle takviye edilmiş yapıştırıcılar kullanılarak üretilmiş tek tesirli yapışma bağlantılarının hasar davranışları deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Kompozit levhaların tek tesirli bağlantılar ile birleştirilmesinde epoksi yapıştırıcı emdirilmiş fiberler kullanılmıştır. İki kompozit levha arasına yapıştırıcı emdirilmiş fiber tabakaları kullanılarak bağlantının güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Takviye edilmiş yapıştırıcılar ile elde edilen bağlantıların hasar yükleri, takviye edilmemiş yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların hasar yükleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca fiber takviye açısının etkisini araştırmak için 0°, 15° 30° ve 45° fiber takviye açıları kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda yapıştırıcıların takviye edilmesinin hasar yüklerini %31'e varan oranlarda arttırabildiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit levhalar, yapıştırma bağlantısı, yapıştırıcıların güçlendirilmesi, yapıştırıcı.

ABSTRACT

FAILURE ANALYSIS OF FIBER REINFORCED ADHESIVELY SINGLE LAP JOINTS

MSc THESIS

Sinan BARUT

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE**

2021

In this study; experimental failure analysis was investigated on adhesively single-lap joints produced using adhesives reinforced with glass fibers and carbon fibers. Epoxy adhesive impregnated fiber was used to join composite plates with single-lap joints. It is aimed to strengthen the joint by using fiber layers impregnated with adhesive between the two composite plates. The failure loads of the joints obtained with reinforced adhesives were compared with the failure loads of the joints attached to the non-reinforced adhesive. Also, 0°, 15° 30° and 45° fiber reinforcement angles were used to investigate the effect of fiber reinforcement angle. As a result of the experimental study, it was determined that reinforcing the adhesives can increase the damage loads by up to 31%.

Keywords: Composite boards, bonding joint, reinforcing of adhesive, adhesive

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge No</u>		<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1.	En sık kullanılan fiberlerin karşılaştırılması	15
Çizelge 5.1.	Tek yön fiberlerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	61
Çizelge 5.2.	Örgülü fiberlerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	62
Çizelge 5.3.	Cam fiberlerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	64
Çizelge 5.4.	Karbon fiberlerin hasar yüklerinin karşılaştırılması	65



ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1.	Kompozit malzemelerin en basit şekliyle gösterimi	11
Şekil 3.2.	Kompozit malzeme kesitinin örnek şema görüntüsü	12
Şekil 3.3.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	13
Şekil 3.4.	Fiber dokuma türleri	14
Şekil 3.5.	Karbon fiber örnekleri	17
Şekil 3.6.	Aramid fiber örneği	18
Şekil 3.7.	Farklı iki malzemenin galvanik korozyona uğrama durumu	23
Şekil 3.8.	Pim ve yapıştırma bağlantılarında meydana gelen gerilme dağılımları	24
Şekil 3.9.	Adhezyon ve kohezyon kuvvetleri	25
Şekil 3.10.	Islanabilirlik	27
Şekil 3.11.	Islanabilirlik testi a) Yapıştırma yüzey hazırlığı yetersiz b) Yapıştırma yüzey hazırlığı yeterli	28
Şekil 3.12.	Anaerobik yapıştırıcıların sertleşme mekanizmaları	29
Şekil 3.13.	Kürleşme hızı-malzeme	30
Şekil 3.14.	Kürleşme hızı-boşluk	30
Şekil 3.15.	Kürleşme hızı-sıcaklık	30
Şekil 3.16.	Kürleşme hızı-aktivatör	30
Şekil 3.17.	Bağıl nemin bir foksiyonu olarak siyanoakrilat yapıştırıcıların kürleşmesi	31
Şekil 3.18.	Kürleşme hızı- bağıl nem	33
Şekil 3.19.	Loctite marka epoksi yapıştırıcı	34
Şekil 3.20.	Tek tesirli yapışma bağlantısı	35
Şekil 3.21.	Çift bindirme bağlantısı	35
Şekil 3.22.	Eğimli bindirme bağlantısı	35

Şekil 3.23.	Alın bağlantısı	36
Şekil 3.24.	Tek tesirli bindirme bağlantısı	36
Şekil 3.25.	Çift tesirli bindirme bağlantısı	36
Şekil 3.26.	Eğimli çift tesirli bindirme bağlantısı	36
Şekil 3.27.	Basamaklı bindirme bağlantısı	36
Şekil 4.1.	Deney numunelerinde kullanılan levhaların boyutları ve numune modeli	38
Şekil 4.2.	Deney numuneleri için kesilen kompozit levhalar	39
Şekil 4.3.	Kesilen levhaların yapışma alanının zımparalanması	39
Şekil 4.4.	Zımparalanan levhanın asetonlu üstübüyle temizleme işlemi	40
Şekil 4.5.	Hazırlanan kalıplar ve yapıştırıcıyla ıslatılmış TY cam fiber kumaş kuponlarının kesilme işlemi	41
Şekil 4.6.	Numunenin fiber takviyeli yapıştırıcıyla birleştirilmesinden sonra kalıba oturtulması	41
Şekil 4.7.	Numunelerin özelliklerini gösteren barkodlamalar	42
Şekil 4.8.	Çekme test cihazı ve deney düzeneği	43
Şekil 5.1.	0° tek yön cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	45
Şekil 5.2.	15° tek yön cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	45
Şekil 5.3.	30° tek yön cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	46
Şekil 5.4.	45° tek yön cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	46
Şekil 5.5.	Tek yön cam fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar	47
Şekil 5.6.	0° örgülü cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	48
Şekil 5.7.	15° örgülü cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	49
Şekil 5.8.	30° örgülü cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	49
Şekil 5.9.	45° örgülü cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	50
Şekil 5.10.	Örgülü cam fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar	51

Şekil 5.11.	0° tek yön karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	52
Şekil 5.12.	15° tek yön karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	52
Şekil 5.13.	30° tek yön karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	53
Şekil 5.14.	45° tek yön karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	53
Şekil 5.15.	Tek yön karbon fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar	54
Şekil 5.16.	0° örgülü karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	55
Şekil 5.17.	15° örgülü karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	56
Şekil 5.18.	30° örgülü karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	56
Şekil 5.19.	45° örgülü karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	57
Şekil 5.20.	Örgülü karbon fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar	58
Şekil 5.21.	Takviyesiz yapıştırıcı için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi	59
Şekil 5.22.	Takviyesiz yapıştırıcı ile takviyeli tek yön fiberlerin karşılaştırılması	60
Şekil 5.23.	Takviyesiz yapıştırıcı ile takviyeli örgülü fiberlerin karşılaştırılması	61
Şekil 5.24.	Takviyesiz yapıştırıcı ile cam fiberlerin karşılaştırılması	63
Şekil 5.25.	Takviyesiz yapıştırıcı ile karbon fiberlerin karşılaştırılması	64

KISALTMA VE SİMGELER

Ark.	: Arkadaşları	
A_C	: Kompozit toplam kesit alanı	[mm ²]
A_f	: Fiberlerin toplam kesit alanı	[mm ²]
A_m	: Matrislerin toplam kesit alanı	[mm ²]
V_f	: Fiberlerin toplam hacmi	[%]
V_m	: Matrislerin toplam hacmi	[%]
UV	: Ultraviyole	
Lap	: Bindirme uzunluğu	[mm]
TY	: Tek yön	
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu	
ψ_{LV}	: Sıvı-gaz temas yüzey enerjisi	
ψ_{LS}	: Sıvı-katı temas yüzey enerjisi	
ψ_{SV}	: Katı-gaz temas yüzey enerjisi	
Th_A	: Yapıştırıcı Kalınlığı	[mm]
θ	: Temas açısı	

1. GİRİŞ

Günümüzde kompozit malzemelerin kullanımı geleneksel malzemelere göre oldukça yaygınlaşmıştır. Kompozit malzemelerin hafif olması, yüksek sönümlene kabiliyetine sahip olması, düşük özgül ağırlığına karşılık yüksek mukavemete sahip olması ve yorulmaya karşı dirençli olması gibi üstün özellikleri nedeniyle metal malzemelere göre tercih edilmektedir. Kompozit malzemeler; havacılık, uzay sanayii, otomotiv gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu malzemelerin sahip olduğu üstün özelliklerin keşfedilmesi kompozit malzemelerin daha yaygın kullanılmasına, bununla beraber mekanik birleştirme yöntemlerinden uzaklaşılmasına neden olmuştur. Son yıllarda kompozit malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırıcıların kullanımı hızla artmakta olup, yapıştırıcıların birleştirme işlemine daha iyi sonuç verebilmesi için birçok mühendislik ar-ge çalışması yapılmıştır.

Genellikle yapıştırıcıların mukavemeti kompozit malzemelerden düşük olduğu için yapıştırıcıyla birleştirilmiş kompozit malzemelerin bağlantı bölgeleri herhangi bir yükleme anında potansiyel hasar bölgesidir. Genel anlamda oluşabilecek hasarlar; yapıştırıcıyla birleştirilmiş kompozit yüzeylerinde oluşan hasarlar, yapıştırıcıda ortaya çıkan hasarlar, kompozit yapışma yüzeyi ile yapıştırıcı arasındaki bağın kopması ve yapıştırılmış tabakanın akma sınırını geçmesinden dolayı meydana gelen hasarlar olarak sıralanabilir. Bu hasar türlerinden en yaygın görüleni yapıştırıcıda ortaya çıkan hasar tipidir (Weißgraeber vd. 2013).

Yapışma bağlantılarının mukavemetini arttırmak için birçok yöntem üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Yapışma geometrisinin değiştirilmesi, yapışma bölgesinin etkileri ve yapıştırıcı özelliklerinin değişimleri bağlantı mukavemeti üzerine etkili olmaktadır. Özellikle yapıştırıcı mukavemetinin değişimi için yapıştırıcıların takviye edilmesi önemli bir yöntemdir. Takviye için yapıştırıcının içerisine mikro ve makro moleküller katılabilmekte veya farklı yapıştırıcılar karıştırılabilmektedir.

Yapılan bu çalışmada yapıştırıcının güçlendirilerek adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinin dengeli bir şekilde ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Adhezyon hasarı yapıştırıcının yüzeye tutunması sırasındaki adhezyon kuvvetlerinin aşılarak gerçekleşen hasar olurken, kohezyon hasarı ise yapıştırıcı moleküllerinin birbirleri arasındaki çekme kuvvetlerinin aşılmasıyla gerçekleşen hasar tipidir. Yapıştırıcı emdirilmiş kumaşların iki yapışan levha arasındaki yük transferini arttırıcı yönde hareket etmesi beklenmiştir.

Ayrıca kullanılan kumaşların tipleri ve fiber takviye açıları değiştirilerek bağlantı mukavemetindeki değişimler gözlemlenmiştir. Bu amaçla yapıştırıcı olarak LOCTITE EA 9466 marka epoksi yapıştırıcı, tek yön cam fiber, örgülü cam fiber, tek yön karbon ve örgülü karbon fiberler kullanılmıştır. Fiber takviye açısı olarak ise 0° , 15° , 30° , 45° açıları seçilmiştir. Ayrıca yapıştırıcı emdirilmiş fiberler iki kompozit levha arasında bindirme uzunluğu ($Lap=30$ mm) ve levha genişliği ($w=30$ mm) olacak şekilde tek bir katman halinde yerleştirilmiştir. İlk olarak yapıştırılacak alt kompozit levha kalıp içerisine konularak yapılan bu işlemde üst kompozit levha, kalıp yüksekliğini aşmayacak şekilde yerleştirilerek yapışma işlemi tamamlanmıştır. Fiber kumaş kalınlıklarının farklı olması nedeniyle eşit yapışma kalınlığı sağlanabilmesi için yapıştırıcı kalınlığı ($th_A=0,3$ mm) olacak şekilde kalıp derinliği ayarlanmıştır. Böylece tüm bağlantıların yapışma yüzey alanları ve kalınlığı eşitlenmiştir. Takviye edilmiş bağlantıların mukavemeti ile karşılaştırmak için takviye edilmemiş yapıştırıcı kullanılarak birleştirilen bağlantılar üretilmiştir. Sağlıklı bir karşılaştırma için üretim yöntemi, yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğu gibi parametrelerin eşit olmasına özen gösterilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Udatha ve ark. (2020), 6061 tipi alüminyum levhaların kullanıldığı tek tesirli yapışma bağlantılarını, doğal fiberler ile yapıştırıcıları karıştırarak birleştirmişlerdir. Birleştirilen tek tesirli yapışma bağlantılarının mukavemet değişimini numerik yöntemlerle araştırmışlardır. Araştırma sonucunda doğal fiberlerle güçlendirilmiş yapıştırıcıyla birleştirilen bağlantıların, takviyesiz yapıştırıcıyla birleştirilen bindirme bağlantılarına göre kesme gerilmelerinin arttığını bulmuşlardır.

Moreira ve Nunes (2014), yaptıkları çalışmada esnek yapışkan ve alüminyum yapışandan yapılan tek tesirli yapışma bağlantısının mekanik davranışlarını deneysel yöntemlerle incelemişlerdir. Numuneye statik çekme yükü altında test uygulanmıştır. Her bir yük için numunenin üst üste binme bölgesinin birer görüntüsü alınmıştır. Bindirme bölgesinin tam alan yer değiştirmeleri Dijital Görüntü Korelasyonu yöntemiyle ölçülmüştür. Sonuç olarak %48 düzeyinde kesme gerilimi gözlemlenmiştir.

Aydın ve ark. (2004), yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesini sağlayacak testleri açıklamaya çalışmışlardır. En hassas sonuçların burulma testleriyle elde edileceği, burulma test işlemi için deney düzeneği olmaması durumunda veyahut numune hazırlanması mümkün değilse daha sünek yapıştırıcılar için Arcan Testinin uygun olduğu, şekil değişiminin %20'den fazla olduğu durumlarda ise TAST testinin uygulanması gerektiği tavsiye edilmiştir. Sonuç olarak kayma verileri tespit edilirken en uygun yöntemin, seçilen yapıştırıcının şekil değiştirme oranı, uygun aparatlara ve uygun numunelerin elde edilmesine bağlı olduğunu belirlemişlerdir.

Kırkayak (2018), farklı geometrik şekillerde ve farklı 2 yapıştırıcının rijitliğine göre tek tesirli yapışma bağlantılarında kullanılan yapıştırıcıların üzerindeki gerilme dağılımlarını sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelemiştir. Literatürde kullanılan ve hesaplama kolaylığı ve malzeme modeline göre yapıştırılan tek yönlü kompozit tabakalar, enine izotropik olarak $E_2 = E_3$, $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$ ve $G_{12} = G_{13} = G_{23}$ olacak şekilde modellenmiştir.

Farklı elastisite modüllerine sahip yapıştırıcıların farklı geometrilerde hibrit olacak şekilde tek tesirli yapışma bindirme bölgesindeki kayma ve soyulma gerilmeleri incelenmiş ve sonuç olarak yapıştırma geometrisinin gerilme üzerine %40 oranında az etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Sawyer ve Cooper (1981), yaptıkları çalışmada uygulanan düzlem içi kuvvetin hareket hattı ile bağ çizgisi arasındaki açı azalacak şekilde yapıştırılmış tek tesirli yapışma bağlantısının yük transferini teorik ve deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Numune olarak fotoelastisiteye duyarlı epoksi malzemeden üretilmiş ASTM D 1002-72 test numuneleri kullanılmıştır. Yapıştırıcı olarak PMC-1 tipi yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcının önceden şekillendirilmesi, bindirme bölgesinin kenarındaki yapışmada ortaya çıkan momenti azaltmıştır. Bu da yapıştırıcıdaki hem en büyük soyulma hem de kesme gerilimlerini azaltmıştır ve yapıştırıcıda daha düzgün bir kesme dağılımı sağladığı görülmüştür. Sonuç olarak yapışanların 15°'lik açılara kadar şekillendirilmesiyle yapıştırıcının orta düzlemde görülen en büyük kesme ve soyulma gerilmelerinde en az 3 kat azalma olduğunu, ayrıca statik yük transferinde % 120'ye varan bir artışla yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli yapışma bağlantılarının yorulma ömrünün arttığını tespit etmişlerdir.

Solmaz (2008), yaptığı tez çalışmasında farklı bindirme uzunluklarına ve farklı uç açılara sahip biri diğerinden daha sünek olan yapıştırıcılarla yapıştırılmış tek tesirli yapışma bağlantılarının eksenel çekme yükü altındaki mekanik davranışlarını incelemiştir. Yapıştırılan kompozit malzeme olarak karbon fiber, yapıştırıcı olarak Neoxil CE 92 N8 ve Sikaflex 7710 tipi yapıştırıcılar kullanılmıştır. Kullanılan yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme davranışlarını belirlemek için bulk numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere çekme testi uygulanmış, test sonucuna göre numunelerin hasar kuvvetleri ve hasar tipleri bulunmuştur. Yapıştırıcılar ve yapıştırılan malzemelerin gerilme şekil değiştirme davranışları göz önüne alınarak lineer sonlu elemanlar metoduyla gerilme analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar ve deneysel sonuçların karşılaştırılması neticesinde sonuçların çok iyi bir uyum gösterdiğini tespit etmiştir.

Adin ve ark. (2010), kompozit malzemelerin bir araya getirilmesinde kullanılan yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerini deneysel yöntemlerle bulmaya çalışmışlardır. Yapısal yapıştırıcı olarak VinylesterAtlac 580 ve FlexoTix tipi yapıştırıcılar kullanmışlardır. Kullanılan yapısal yapıştırıcılardan bulk numuneleri üretmişlerdir. Üretilen numunelere çekme testi uygulanmış, test sonuçlarına göre mekanik değerlerini bulmuşlardır. VinylesterAtlac 580 ve FlexoTix tipi yapıştırıcıların şekil değiştirme eğri grafiklerinden elde edilen doğruluk oranları sırasıyla 0.9947 ve

0.9977 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak VinylesterAtlas 580 tipi yapıştırıcının tüm mekanik değerlerinin (Çekme mukavemeti, elastisite modülü, poisson oranı, eğilme mukavemeti, kayma modülü), FlexoTix tipi yapıştırıcının mekanik değerlerinden daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Aydın ve ark. (2005), yaptıkları çalışmada, film tipi bir yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli yapışma bağlantılarının mukavemetini ve hasar tipini non-lineer sonlu elemanlar yöntemini kullanarak tespit etmişlerdir. Malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum plakalar ve FM 73 film tipi yapıştırıcı kullanmışlardır.

Öncelikle üç farklı yapışan kalınlığı ve dört farklı bindirme boyu kullandıkları tek tesirli yapışma bağlantılarına bindirme kayma testi uygulamışlar ve kırılma yüzeylerini SEM aracılığıyla incelemişlerdir. Daha sonra tek tesirli yapışma bağlantılarındaki hem yapıştırıcıların hem de yapışanların doğrusal olmayan geometrik ve doğrusal olmayan malzeme davranışlarını dikkate alarak non-lineer sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme analizlerini yapmışlardır. Tek tesirli yapışma bağlantılarının yüzeylerinin incelenmesiyle iki farklı hasar tipi görmüşlerdir. Kayma gerilmesinin etkisinden dolayı bindirme bölgesinin merkezinde yıkıcı bir hasar görülürken, yapıştırıcı tabakasının serbest uçlarındaki hasarın ise soyulma gerilmesinden kaynaklandığı görülmüştür. Sonuç olarak gerilme analizleri ve deneysel sonuçları arasında uyum olduğunu tespit etmişlerdir.

Goncalves ve ark. (2002), yapışma bağlantılarının üç boyutlu sonlu eleman analizleri için yeni bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, bu modelde kritik bölgeler olarak kabul edilen yapıştırıcı ve yapışanların arasındaki ara yüzeylerdeki gerilmeleri hesaplanmaya çalışmışlardır. Ayrıca, geliştirilen modelin geometrik ve malzeme non-lineerliğiyle birlikte yapıştırıcı tabaka kalınlığı üzerindeki gerilme değişimi dikkate alınmıştır. Yapışan ve yapıştırıcı için katı tuğla elemanlar ve özel ara yüz elemanlarıyla modellenmiş ara yüzeyleri ABAQUS yazılımına tanımlamışlardır. Model olarak ise tek tesirli yapışma bağlantısı kullanmışlardır. Bu tek tesirli yapışma bağlantılarına lineer elastik ve elasto-plastik malzeme davranışlarını göz önünde bulundurarak uygulama gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda yük arttırıldığında ara yüzeylerde oluşan gerilmelerde azalma olduğunu görmüşlerdir ve plastikleşme kritik bölgelerde gerilme yığılmalarında azalmaya neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Reedy ve Guess (1996), yaptıkları çalışmada yapıştırıcı kalınlığı ve oluşan artık gerilmelerin uç bağlantısı üzerindeki mukavemetini etkileme olasılığını araştırmışlardır. Uç bağlantı testlerinde kullanılan yapıştırıcı için gerilme gevşeme testlerini uygulamışlardır. Kullanılan yapıştırıcının akma mukavemetine yaklaşan gerilme değerlerinde oldukça non-lineer, gerilme değerine bağlı viskoelastisite sergilediğini görmüşlerdir. Sonuç olarak uç bağlantısı mukavemeti üzerine oluşan artık gerilmelerin etkisinin lineer analizlerden daha düşük olduğu sonucuna varmışlardır.

Pandey ve ark. (1999), yaptıkları çalışmada yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli yapışma bağlantılarını viskoplastisite dikkate alınarak doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ile modellemişlerdir. Bindirme bağlantısı ara yüzey boyunca soyulma ve kayma gerilmesi üzerine parametrik çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmada viskoplastik etkinin gerilme dağılımları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak yapıştırıcıyla birleştirilmiş malzemelerin bindirme uzunluğundaki bir artışın en büyük soyulma ve kesme gerilmesini azalttığını tespit etmişlerdir.

Turan ve Kaman (2010), yaptıkları çalışmada yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli yapışma bağlantılarının hasar analizini sayısal ve deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Tek tesirli yapışma bağlantıları yapılırken yapışan olarak karbon fiber takviyeli dört tabakalı kompozit malzeme, yapıştırıcı olarak ise epoksi reçine kullanmışlardır. İlerlemeli hasar analizi için ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılmış, yapışan kompozit levha için Hashin hasar kriteri, yapıştırıcı için ise en büyük asal gerilme kriterini kullanmışlardır. Bindirme uzunluğu, levha genişliği ve yapıştırıcı kalınlığı gibi parametrelerin bağlantı dayanımı üzerine etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak yapışma yüzey alanı değişimiyle hasar yükleri üzerinde ciddi bir etki olduğunu tespit etmişlerdir. Sayısal ve deneysel yöntemlerle elde ettikleri verilerin birbirini desteklediği ve uyum içinde olduğunu görmüşlerdir.

Khalili vd. (2008), yaptıkları çalışmada yapıştırıcı ile takviye edilmiş tek tesirli bağlantıların çekme, eğilme, darbe ve yorulma gibi mekanik yüklere maruz kalması durumunu deneysel olarak araştırmışlardır. Yapıştırma işlemi için yapıştırıcı olarak tek yönlü cam fiber ve mikro cam tozu ile takviye edilmiş epoksi, yapıştırılan kompozit malzeme olarak ise cam takviyeli tabakalı kompozit malzemeleri kullanmışlardır. Yapışma bölgesinde tek yönlü fiberlerdeki fiber oryantasyon açılarını 0° , 45° ve 90° olarak seçmişlerdir. Bütün durumlarda, fiberlerin yapışkan tabakasındaki hacim oranını

% 30, mikro cam tozunun hacim oranları % 20, % 30 ve % 40 olarak belirlemişlerdir. Hazırladıkları numunelere çekme, bükme, darbe ve yorulma testleri ASTM standartlarına göre yapmışlardır. Sonuç olarak, 90° tek yönlü oryantasyon haricinde, yapıştırıcıya cam fiber veya toz ile takviye etmenin bağlantı mukavemetini arttırdığını gözlemlemişlerdir. % 30'luk mikro cam tozu hacim oranının kullanılmasıyla, yukarıdaki yükleme koşullarında en iyi performansı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Yorulma ömrü % 125, gerilmedeki çekme mukavemeti % 72, eğilme mukavemeti % 112 ve çarpma mukavemeti ise % 63 artmıştır. Bağlanan alanın mikro yapısı incelemiştir; kohezif hasarı, fiber kopma hasarı ve ince tabakalı kohezif hasarı olmak üzere üç hasar tipi gözlemlemişlerdir. Ávila vd. (2004), yaptıkları çalışmada dalgalı bindirme bağlantısının avantajlarını ve dezavantajlarını ele almıştır ve tamir edilmiş bir dalgalı bindirme bağlantısının tasarımını incelemiştir. Veri tutarlılığını garanti edebilmek için, sadece numune boyutunu değil, aynı zamanda tek bindirmeli bağlantılar ve dalgalı bindirme bağlantıları arasındaki istatistiksel farklar göz önünde bulundurularak istatistiksel bir çalışma yapmışlardır. Deneysel testlerde, bağlantılardaki gerilme alanlarını analiz etmek için sonlu elemanlar simülasyonu yapmışlardır. Sonuç olarak, yükleme sırasında hasar olarak ortalama %41'e yakın bir artış olduğu görülmüştür. Bu duruma da, dalgalı bindirme bağlantısında gelişen basma gerilmesinin sebep olabileceğini tahmin etmişlerdir. Ek olarak, bu gerilim dağılımı ayrıca dalgalı bindirme bağlantılarında gözlemlenen yapışan delaminasyonun da nedeni olabilir. Tamir edilmiş dalgalı bindirme bağlantılarının daha güçlü bağlantılara emsal olabileceğini tahmin etmişlerdir.

Campilho vd. (2005), yaptıkları çalışmada ABAQUS ticari yazılımı kullanılarak, tek tesirli bindirme ve çift tesirli bindirme bağlantılarının tamiri karbon fiberle takviye edilmiş çekme yükü altındaki kompozit yapıları araştırmışlardır. Yapılan çalışmanın amacı; gerilme dağılımlarını elde etmek, tamir edilmiş tabakaların artık gerilmelerini ve bunun yanı sıra tabaka ve yamalardaki geometrik değişikliklerin etkisini değerlendirmektir. Çalışmada en büyük artık gerilmeyi elde etmek için referans verilen geometrileri en uygun şekilde kullanmayı amaçlamışlardır. Sonuç olarak çalışmada kullanılan numune geometrisi, tabaka dizilimi ve yama kalınlığı tek ve çift tesirli bindirme bağlantılarının tamirini etkilediği, bununla beraber bağlantının elastik hasar davranışları üzerine bindirme uzunluğunun etkili olduğu gözlemlemişlerdir.

Abdelaziz A. vd. (2006), yaptıkları çalışmada bağlantı türü etkisini yapıştırıcı kalınlığı, hasarlar, nem ve çekme testi gibi boyutlarıyla araştırmışlardır. Dört farklı yapışma bağlantı türünü birbirleri arasında karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda yapışma bağlantılarının mukavemetinin bağlantı türüne, yapışan ve yapıştırıcıların sünekliliğine bağlı olduklarını göstermişlerdir.

Her (1999), yaptığı çalışmada yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek ve çift tesirli bindirme bağlantılarının gerilme analizlerini sonlu elamanlar yöntemiyle karşılaştırmıştır. Çalışmada yapıştırıcıdaki kayma gerilmesi ve yapışandaki boyuna gerilmenin analitik çözümleri elde edilmiş, ayrıca numerik bulgular ikiboyutlu sonlu elemanlar metoduyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada; yapıştırıcı kalınlığı, yapışan kalınlığı; yapıştırıcı ve yapışan modülü gibi değişken parametreler kullanmıştır. Çalışma sonucunda yapıştırıcıyla birleştirilmiş bölgenin serbest uçlarında gerilme yığılmalarının meydana geldiği görülmüştür. Bunun yanı sıra yapıştırıcı tabakasının kalınlık artışının; yapışma alanındaki en düşük kayma gerilmesine yol açtığı, böylelikle daha kalın yapıştırıcı tabakası, yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantının mukavemetinin arttırabileceği sonucu öne sürülmüştür.

Vijayakumar vd. (2012), yaptıkları çalışmada yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli kompozit bağlantıların mukavemetini deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. NDE ölçüleri ve yapışma mukavemeti arasındaki bulunan bağı; farklı yapışma kalitesiyle yapışma bağlantılarını tahribatsız deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Malzeme olarak 18 tabakalı tek yönlü karbon/epoxyepreg CP150ns ve otoklav yöntemiyle üretilmiş kompozitler kesim işleminin ardından kullanılmıştır. Numuneler ASTM D 5868 standardına göre fiber takviyeli plastik yapıştırma ve kayma yapışmaya göre hazırlanmıştır. Yapıştırıcı olarak iki farklı epoksi yapıştırıcı kullanmışlardır: Aroldite AV138M/Hordener HV908 yapıştırıcı kalitesi farklı miktarlarda polivinil alkol (PVA) kullanılarak belirlenmiştir. Her bir numune için altı numune hazırlanmıştır ve bu numunelerden “sağlam” olarak nitelendirilen PVA kullanılmayan bir numune kontrol numunesi olarak kullanılmıştır. Numuneler 24 saat oda sıcaklığında ve 1 atm basıncı altında yapıştırılmıştır. Deney sonucunda sağlam numunede %46 hasar yükü gözlemlenmiş, %40 PVA içeren yapışma bağlantılarının hasar yükü ise %5 olarak gözlemlenmiştir.

Turan ve Pekbey (2015), yaptıkları çalışmada takviye edilmiş yapıştırıcıların kullanıldığı tek tesirli yapışma bağlantılarının hasar davranışlarını numerik ve deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Tabaka dizilimi (0/90)₃tek yönlü cam fiber ile takviye edilmiş kompozit levhalar, öğütülmüş atık kompozit parçacıklarla takviye edilmiş yapıştırıcılar kullanılarak birleştirilmiştir. Sayısal çalışmada ANSYS 11.0 programı üzerinden hasar analizi yapmışlardır. Deneysel çalışmada bindirme uzunluğu değişimi, yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırıcı tipi değişiminin bağlantı hasar yüküne etkileri statik çekme deneyiyle elde etmişlerdir. Sonuç olarak karbon fiber takviyeli kompozit malzemenin toz parçacıkları ile takviye edilmiş yapıştırıcının normal yapıştırıcıya göre % 5 ila % 28 aralığında değişen oranda daha yüksek mukavemetli olduğu tespit edilmiştir.

Sayman (2012), yaptığı çalışmada yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli yapışma bağlantısındaki kayma gerilmesini elasto-plastik gerilme analizleriyle saptamıştır. Çalışmada DP460 yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcıda meydana gelen gerilmelerin akma gerilmesi değerine ulaşp ulaşmadığı Von-Mises hasar kriteri belirlenmiştir. Çözümde yapıştırıcı kalınlığı boyunca kayma gerilmesinin sabit olduğu ve eğilme momenti ihmal edilmiştir. Sayısal çözümde ANSYS 10 kullanılmıştır. Sonuç olarak; bağlantı mukavemetlerinin 1.9, 2.4 ve 3.8 mm kalınlıktaki yapıştırıcılardaki artık gerilmeler kullanılarak sırasıyla % 43, % 28 ve % 19 oranında arttığını hesaplamıştır.

Aydın (2003), yaptığı çalışmada farklı yüklere maruz bıraktığı farklı kalınlık ve bindirme uzunluğunda ve farklı iki cins yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli yapışma bağlantılarının mekanik davranışlarını incelemiştir. Yapıştırıcı olarak FM 73 ve SBT 9244 tipi yapıştırıcı kullanmıştır ve bu yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme davranışlarını belirlemek için bulk numuneleri hazırlamıştır. Yapıştırıcıların farklı yükleme şartlarında mekanik performanslarını belirlemek ve karşılaştırmak için çekme ve dört noktadan eğme deneyleri yapılmıştır. FM 73 ve SBT 9244 tipi yapıştırıcılar ile birleştirilmiş tek tesirli yapışma bağlantılarının, iki farklı yükleme durumu için lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerilme analizi yapılmıştır. Sonuç olarak FM 73 tipi yapıştırıcıların SBT 9244 tipi yapıştırıcılardan daha dayanımlı olmasına karşılık, malzeme kalınlığı ve yapıştırıcı kalınlığının artması neticesinde SBT 9244 tipi yapıştırıcıların SBT 9244 tipi yapıştırıcılardan daha fazla yük taşıdığı tespit edilmiştir.

Ayrıca lineer sonlu elamanlar yöntemi ve deneysel yöntemlerin sonuçlarında büyük oranda uyum olduğu gözlemlenmiştir.



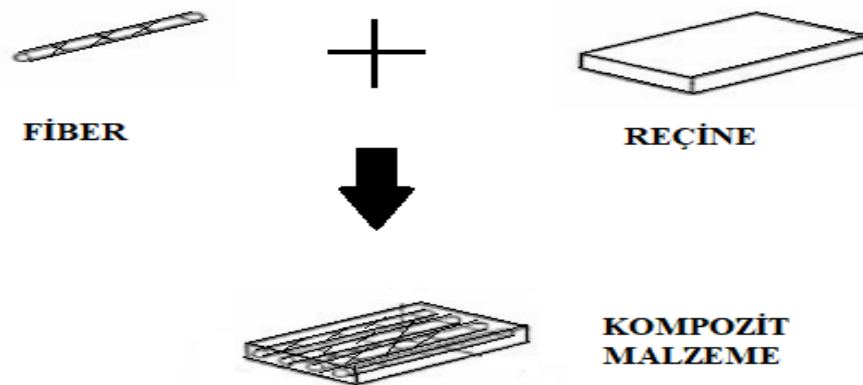
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı

Farklı özellikteki iki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle, arzu edilen daha gelişmiş özellikleri kazanmasını sağlayan yeni yapılara kompozit malzemeler denir. Bu yapılar belli fiziksel oranlar ve şartlar dâhilinde hazırlanmaktadır.

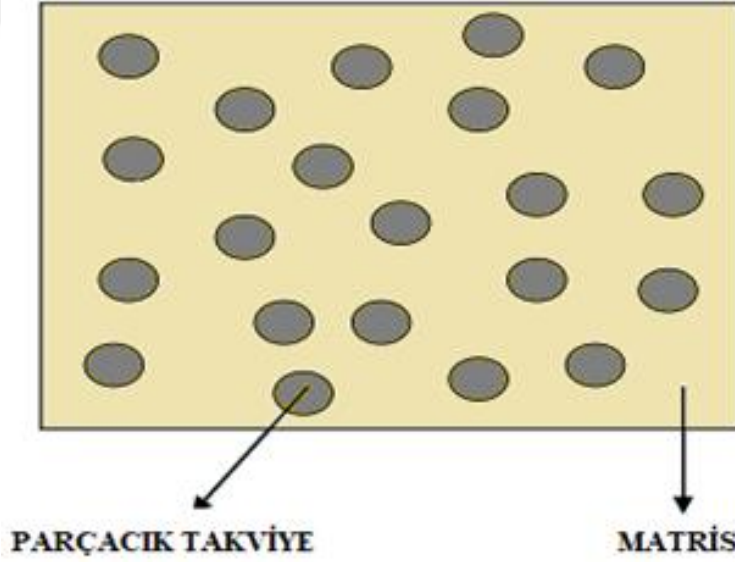
Kompozit malzemelerde ana malzeme olarak fiberler ve bu fiberlere hacim kazandırıp bir arada tutacak matris malzeme bulunmaktadır. Kompozit malzemedeki fiberler, malzemedeki dayanım ve yük taşımayı sağlar. Matrisler ise malzemenin daha geç plastik deformasyona uğramasına ve bu deformasyon öncesinde ortaya çıkabilecek çatlak ilerlemelerini azaltmaya yarar. Matrislerin bir diğer amacı da homojen bir şekilde fiberlere düzgün nüfuz ederek olası bir plastik deformasyon gerçekleştiğinde fiberlerde oluşacak çatlak ilerlemelerine engel olmaktır.

Fiber takviyeli reçineli kompozit malzemeler; matris olarak reçine ve takviye olarak fiber bileşenlerinden oluşur. Kompozitleri oluşturan malzemelerden reçineler fiberleri içine hapsederek kompozit malzemedeki kalıp görevi görür. Bir araya getirilerek oluşturulan bileşenler birbirleri arasında gerek fiziksel gerekse kimyasal yönden çözülüp karışmazlar. Kompozit malzemelerde fiber; sertlik, sağlamlık gibi yapısal özellikleri, plastik reçine malzemesi ise fiberin yapısal bütünlüğü oluşturması için birbirine bağlanması, yükün fiber arasında dağılmasını ve fiberin kimyasal etkilerden ve atmosfer şartlarından korunmasını sağlar. Fiber ve matrislerin en basit haliyle gösterimi Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin en basit şekliyle gösterimi

Kompozit malzemelerde hasar, yüklemenin türü ile bağlantılı olarak yüzeyde oluşabilir veya içyapıda tabakalar arasında ayrılma şeklinde başlayabilir. Polimer matrisli kompozitlerde, uygulanan yük elastik deformasyon veya fiber kopması, delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) gibi hasar mekanizmaları olarak isimlendirilebilirler. Oluşturulan yeni bir kompozit malzemenin özellikleri, kompozit bileşenlerinin hacimsel oranında oluşabilir veya bileşenler birbirleriyle herhangi bir şekilde (fiziksel veya kimyasal) etkileşime girer ki böyle bir durumda ortaya çıkan yeni özellikler, bileşenlerin özelliklerinin hacimsel oranlarının toplamıyla kolayca hesaplanamaz. Bu nedenle bir kompozit malzemeyi sistem olarak tanımlarken, bileşenleri ve özelliklerini ortaya koymanın yanında, takviye geometrisini de parametre olarak göz önüne almak gerekmektedir.



Şekil 3.2. Kompozit malzeme kesitinin örnek şema görüntüsü

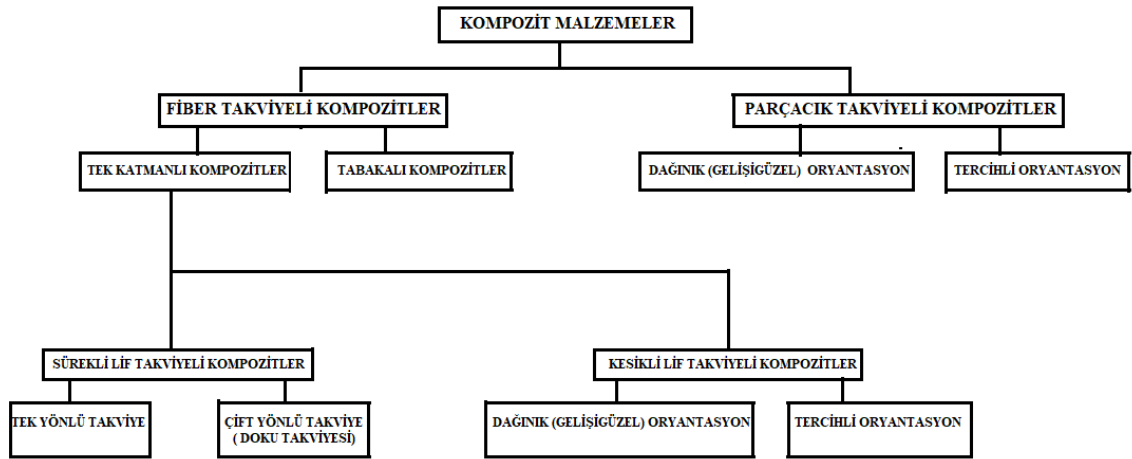
Takviye geometrisi, şekil, boyut ve boyut dağılımı ile tanımlanabilir. Konsantrasyon, genelde hacimsel veya kütle oranla ölçülür. Basitçe fiber ve matris fazlarının hacim veya kütle oranlarını hesaplamak mümkündür (Sevinç 2019).

$$A_c = A_f + A_m \quad \text{olduğuna göre,}$$

$$V_f = A_f / A_c$$

$$V_m = A_m / A_c$$

Fiber elemanlarının fiziksel özellikleri, üretilen kompozit malzemenin özellikleri üzerinde çok etkilidir. Kompozit malzemeler Şekil 3.3'te gösterildiği gibi fiber takviyeli kompozitler ve parçacık takviyeli kompozitler olarak ikiye ayrılır:



Şekil 3.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Agarwal 1980)

3.1.1. Parçacık Takviyeli Kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitler genelde uzun boyda olmazlar hatta mikroskobik boyda olabilirler. Bu kompozitler izotropik malzeme gibi değerlendirilebilir. Ayrıca mekanik özelliklerde takviye boyu önemli derecede fark yaratır. Şöyle ki; eğer takviye boyu uzun ise kompozit malzemeye etkiyen yük bileşenlerle beraber taşınır. Aksi halde takviye boyunun küçük parçacıklar şeklinde olduğu durumda ise dislokasyonların hareketi engelleyerek kompozitin dayanımı artırır. Parçacık takviyeli kompozitlerde parçacıklar yükü taşırlar fakat takviye elemanları dağınık (gelişigüzel) yerleştirildiğinden fiberlerin yük eksenine ters şekilde yerleştirildikleri durumdan çok daha az yük taşırlar. Üretim bakımından parçacık takviyeli kompozit malzemeler fiber takviyeli kompozit malzemelere göre daha az maliyetlidir. Öte yandan fiber takviyeli kompozit malzemeler parçacık takviyeli kompozit malzemelere nazaran daha iyi mekanik özelliklere sahiptir.

3.1.2. Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerde en çok kullanılan kompozit türü fiber takviyeli kompozit malzemelerdir. Bu kompozit türü içinde en sık kullanılan malzeme türü ise camdır. Matris malzeme olarak ise en sık kullanılan matris türü plastik reçinelerdir. Bu reçineler içinde en sık kullanılan reçine ise maliyet bakımından en uygun reçine olan polyeester malzemesidir. Uzay, havacılık, spor aletleri gibi alanlarda sıklıkla kullanılan

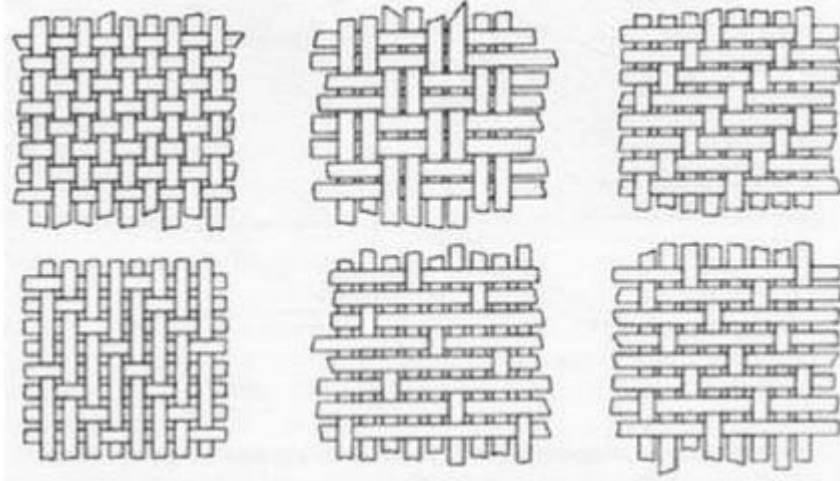
epoksi reçineler ise yüksek mukavemet ve kimyasal dayanım gibi üstün özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir.

Kompozitlerde uygulanan yükü büyük oranda fiberler taşır. Malzeme yapısal içeriğinde ne kadar çok fiber olursa malzeme aynı oranda daha fazla yük taşıma kabiliyeti kazanır. Başka bir deyişle kompozit malzemenin dayanımı fiber yerleştirme doğrultusunun yük eksenine paralel olan doğrultusunda en büyük değere ulaşır. Aynı fiber kesikli ve sürekli değilse kompozit malzemenin mukavemeti, fiberin sürekli olduğu yükleme durumuna göre hayli azalır.

Fiber takviye elemanları kompozit yapının en önemli bileşenidir. Ayrıca kompozit malzemeye rijitlik ve mukavemet kazandırır. Ekseriyetle bor, aramid, cam ve karbon fiberleri takviye elemanı olarak tercih edilmektedir. Standart fiber çapları 5 µm ila 20 µm aralığında değişmektedir.

Uygulamada en çok kullanılan takviye elemanları;

- Cam fiber fitili, sürekli karbon fiber kablosu ve aramid fiber
- Kesikli fiber fiberler
- Dokuma kumaşlar
- Dokuma ve örme 3 boyutlu ön tasarımı yapılmış kumaş parçalarıdır.



Şekil 3.4. Fiber dokuma türleri (MEB 2014)

Cam fiber günümüzde en çok kullanılan ve geçerli takviye malzemesi olmasına rağmen gelişmiş kompozit malzemelerde genellikle saf karbon fiberi kullanılmaktadır. Karbon fiber, cam fibere kıyasla daha güçlü ve hafif olmasına rağmen üretim maliyeti daha fazladır. Hava araçlarının iskeletlerinde ve spor araçlarında metallerin yerine kullanılmaktadır. Karbon fiberlerden daha güçlü ve aynı zamanda daha pahalı olan

takviye elemanı ise bor fiberdir. Polimerler matris olarak kullanılmalarının yanı sıra kompozitler için fiber üretilmesinde de kullanılmaktadır. Kompozit malzemeye çok yüksek mukavemet ve sertlik kazandıran kevlar (aramid) bir polimer fiberidir. Kompozit malzeme yapısal özelliklerinin daha hafif ve daha güvenilir olması için aramid kullanılır. (MEB 2014)

Kompozit Malzemelerde Kullanılan Başlıca Fiber Türleri

- Cam fiber
- Karbon (graphite) fiber (PAN polyacrylonitrile ve zift kökenli)
- Aramid (aromatic polyamid) fiber (ticari ismi; Kevlar-DuPont)
- Bor fiber
- Oksit fiber
- Yüksek yoğunluklu polyetilen fiber
- Poliamid fiber
- Polyester fiber
- Doğal organik fiberler

Bu fiberler arasında en çok cam, karbon ve aramid fiberler kullanılmaktadır. Bu üç fiber türü de güçlü, sert ve sürekli biçimde üretilebilmektedir. En çok kullanılan fiberlerin karşılaştırılması Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. En sık kullanılan fiberlerin karşılaştırılması (MEB 2014)

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Elastisite Modülü (GPa)
E-Cam	2000	2.55	80
S-Cam	4750	2.49	89
Karbon	2900	2.00	525
Kevlar-29	2860	1.44	64
Kevlar-49	3750	1.44	136

Cam Fiber: Cam fiberler; silika, soda, alüminyum oksit, kolemanit gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Bu fiberler, fiber takviyeli kompozitler arasında en çok bilinen ve kullanılandır. Cam fiber özel olarak tasarlanmış ve dibinde küçük deliklerin bulunduğu özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesiyle üretilir. Bu ince fiberler soğutulduktan sonra makaralara sarılarak kompozit ham maddesi olarak nakliye edilir. Fiberler işlem esnasında mukavemetlerinin yarısını kaybetmelerine rağmen son derece sağlamdır. Cam fiberi halen aramid ve karbon fiberden daha yüksek dayanıklılık

özelliğine sahiptir. Genellikle cam fiber kumaşları sürekli cam fiber ipçikleri ile üretilmektedir (MEB 2014).

İşlemler sırasında değişik kimyasalların eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleri ile farklı türde cam fiberler üretilmektedir.

A Cam: Pencereelerde ve şişelerde en çok kullanılan cam çeşididir. Kompozitlerde çok fazla kullanılmaz.

C Cam: Yüksek kimyasal direnç gösterir. Depolama tankları gibi yerlerde kullanılır.

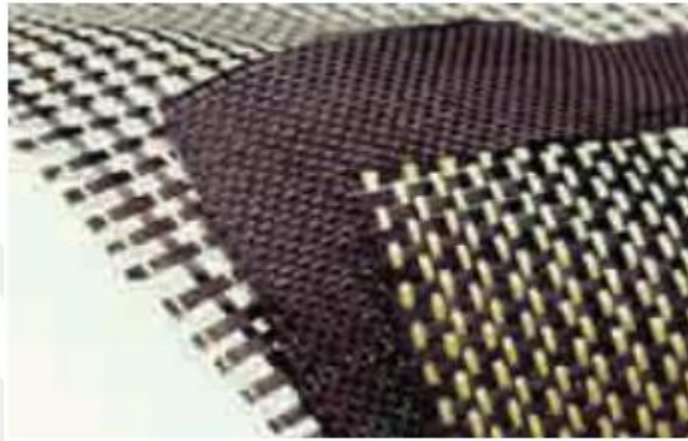
E Cam: Takviye fiberlerin üretiminde en çok kullanılan cam türüdür.

S + R Cam: Yüksek maliyetli ve yüksek performanslı bir malzemedir. Yalnız uçak sanayisinde kullanılır. Fiber içindeki tellerin çapları E Cam'ın yarısı kadardır. Böylelikle fiber sayısı fazlalaşır dolayısıyla birleşme özelliklerinin daha güçlü olması anlamına gelen daha sert yüzey elde edilebilmektedir (MEB 2014).

Karbon Fiber: Karbon fiberler dünyanın bilinen en sağlam malzemelerdendir. Kumaş inceliğinde olan karbon fiberler, gerilmeye karşı Stl çeliğinden 14 kat daha dayanıklı olmasına rağmen ağırlığı çeliğin beşte biri kadardır. Normalde iplik yumuşaklığında olan fiberler kolayca istenilen şekle getirilmekte ve özel epoksi reçinesi ile muamele edilince rijit hale gelmektedir. Üretildiği ham madde orlondur. Bu karbon fiberler, dokunmuş kumaş ya da bobine sarılı iplik olarak pazarlanır. Bu noktadan itibaren ürüne karbon fiber denir. Bu ham maddeden üretilen kullanımdaki malzemeler de karbon fiber kompozit malzeme olur (MEB 2014).

Karbon fiberler, bazı işlemlerden sonra çelikten 4-5 kat daha hafif ama 3 kat daha dayanıklı bir yapı kazanır. Bundan dolayı karbon fiber geleceğin malzemelerinden biri gözüyle bakılmaktadır. Karbon fiberin diğer takviye elemanlarına göre daha farklı avantajları vardır. Nispeten düşük fiber yoğunluğu, yüksek mukavemet ve yüksek modül özelliklerini bir araya getirerek üstün bir kombinasyon özelliği sunmaktadır. Aynı zamanda yüksek ısılarda özelliğini koruma ve yorulma dayanımı özelliklerine sahiptir. Bununla birlikte karbon fiberin kendi yapısal özelliklerinden kaynaklanan bazı olumsuz yanları da mevcuttur. Fiberlerin sınırlı uzama özellikleri bazı darbe sorunlarına neden olmaktadır. Bu açığı kapatmak amacıyla daha yüksek uzama olanaklı fiber ürünleri geliştirilmektedir. Karbon fiberin elektrik iletkenliği de bazı kullanım

alanlarında engel olabilmektedir. Karbon fiber demet, şerit ve kumaş halinde üretilmektedir. Daha çok termoplastik ve termoset hazır kalıplama bileşimlerinde katkı malzemesi olarak kullanılmak üzere kırılmış veya öğütülmüş bir şekilde satılmaktadır. Grafit halinde, çok yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Bakıra göre dörtte bir ağırlıkta olan grafit/karbon fiberin termal iletkenliği bakırın üç, dört katıdır. Bu özellik yeni uygulama alanlarını da beraberinde getirmektedir (MEB 2014).



Şekil 3.5. Karbon fiber örnekleri (MEB 2014)

Karbon fiberler epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbon fiberlerin üretimi çok pahalı olduğu için genellikle uçak sanayinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek değerli uygulamalarında kullanılmaktadır.

Karbon fiberler iki şekilde piyasada bulunmaktadır. Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve prepreglarda kullanılan karbon fiberlere sürekli karbon fiberler denir. Bu fiberler bütün reçinelerle kombine edilebilir. Kırılmış karbon fiberleri ise genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplarda makine parçaları ve kimyasal valf yapımında kullanılır. Elde edilen ürünler mükemmel korozyon ve yorgunluk dayanımının yanı sıra yüksek sağlamlık ve sertlik özelliklerine de sahiptir (MEB 2014).

Aramid Fiberi: Aramid kelimesi bir çeşit naylon olan aromatik poliamitten maddesinden gelmektedir. Aramid fiberi piyasada daha çok ticari isimleri kevlar ve twaron olarak bilinmektedir. Farklı uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için birçok farklı özelliklerde aramid fiberi üretilmektedir. Ekseriyetle renkleri sarıdır. Yüksek

dayanıklılık, yüksek darbe dayanımı, yüksek aşınma dayanımı, yüksek yorulma dayanımı, yüksek kimyasal dayanım gibi birçok üstün özelliğe sahip olan aramid fiber kompozitler düşük yoğunluklu olup, cam fiber kompozitlere göre %35 daha hafiftir. E Cam türü fiberlere yakın basınç dayanıklılığı vardır (MEB 2014).



Şekil 3.6. Aramid fiber örneği (MEB 2014)

Aramid fiberler, UV ışınlarına maruz bırakıldığında bozulabilirler. Dolayısıyla sürekli karanlıkta saklanmaları gerekmektedir. Fiberler çok iyi birleşmeme durumundan ötürü reçinede mikroskobik çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar malzeme yorulduğunda su emilimine yol açmaktadır. Genellikle polimer matrisler için takviye elemanı olarak kullanılan aramid fiberler kurşungeçirmez yelekler, hava araçları gövde parçaları, fiber optik ve elektromekanik kablolar, fren balataları gibi çok geniş alanlarda kullanılmaktadır. En çok bilinen ve kullanılan aramid fiberi Dupont firmasının tescilli ismi olan Kevlar'dır. Kevlar 29 ve Kevlar 49 olarak iki çeşidi bulunmaktadır. Kevlar 29 üstün darbe dayanımı özelliğine sahiptir ve bu nedenle çoğunlukla kurşungeçirmez yelek gibi uygulamalarda kullanılır (MEB 2014).

3.2. Reçine Çeşitleri

Kompozit malzemelerde kullanılan matrisler, polimerlerden (termosetler ve termoplastikler) metal ve seramiklere kadar değişmektedir. Polimerler düşük yoğunluklu göreceli olarak düşük dayanıklılıktadır. Polimer Matris Malzemeleri kendi içinde ikiye ayrılır:

- Termoplastik matrisler
- Termoset matrisler

3.2.1. Termoplastik Malzemeler

Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılanları sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunur, ısıtıldıklarında yumuşar. Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özellikleri, ham maddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme süreci için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir.

Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matris olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni üretimindeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Termoplastiklerin ham maddesi termosetlere kıyasla daha pahalıdır.

3.2.2. Termoset Malzemeler

Polyester, epoksi ve vinilester olmak üzere üç tür termoset reçine çeşidi bulunur. Termoset esaslı kompozit malzeme matrisleri olarak en çok kullanılanlardır. Termoset plastikler sıvı halde bulunur, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşir ve sağlamlaşır. Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklı olarak geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklarda dahi yumuşamaz. Çoğu termoset matris sertleşmemeleri için dondurulmuş olarak depolanmak zorundadır. Dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet (1-4 hafta arası) bekletildiğinde de sertleşmeye başlar ve özelliklerini kaybederek biçim verilmesi zor bir hâl alır ve kullanılamaz duruma gelir. Dondurucu içinde olmak şartıyla raf ömürleri ise 6 ila 18 ay arasında değişmektedir. Termoset reçineler kimyasal etkiler altında çözülmez ve olağandışı hava şartlarında dahi uzun ömürlü olmaktadır. Aşağıda en yoğun kullanılan termoset esaslı matrisler ve genel özellikleri yer almaktadır (MEB 2014).

Polyester Reçine: Koyu kıvamlı zor akan, neredeyse renksiz sıvılardır. İki bileşenli bir reçine olup sertleşmesi için katalizör etkisi gösteren mekp adıyla bilinen organik peroksitlerin ilavesi gerekir. Reaksiyonu yavaşlatmak gerektiğinde inhibitör adı verilen katkıları kullanılır. Reçinenin normal oda sıcaklığında sertleşebilmesi için hızlandırıcı adı verilen malzemeye ihtiyaç duyulur. Hızlandırıcı adı verilen bu malzeme bazen reçinenin içine önceden karıştırılmakta ve reçine bu şekilde piyasaya verilmektedir. Hızlandırıcıyı polyestere karıştırmak dikkat ister. Karışım sırasında oluşan kimyasal reaksiyon bir patlama oluşturabilmektedir. Polyester reçinelerin temel maddesi styrol'dir. Bu madde hafif zehirleyici özellikte ve reaksiyon sırasında buharlaşan bir maddedir. Polyester atölyelerinden veya yeni teknelerde bildiğimiz uçan koku styrol'un kokusudur. Polyester reçineleri soğuk ve rutubete duyarlıdır. Kaliteli tekneler üretmek için yapım işlemi ve teknenin sertleşmesi süresince atölyede sıcaklık ve rutubetin kontrol altında tutulması gerekir. Doymamış polyester reçinelerin ilk pratik uygulama örneği 2. Dünya Savaşı'dır. Fakat cam fiberi ile takviye edilmesi, çok sağlam ve hafif bir malzeme olduğunun anlaşılması 1950'dedir. Günümüzde doymamış polyester reçineler (Kullanılan reçinelerin yaklaşık kabaca yüzde yetmiş beşini temsil eder.) takviyeli plastikler içinde termoset grubunda yer alan bir reçinedir (MEB 2014).

Özellikle denizcilik ve inşaat alanında en çok kullanılan termoset reçinedir. Kompozit malzemelerde kullanılan iki tür polyester reçine vardır: Daha ekonomik olan ortoftalik ve suya dayanım gibi daha iyi özelliklere sahip olan isoftalik polyester. Polyester reçinelerini polimerizasyon süreçlerinin tamamlaması için katalizör ve hızlandırıcı olarak adlandırılan ek maddelere ihtiyaç duyar (MEB 2014).

Polyester Reçinelerin Avantaj ve Dezavantajları

- Kolay kullanım
- Çok düşük maliyet
- Sertleşme sırasında yüksek oranda çekme
- Zehirli sitiren gazı yayma
- Orta mekanik özellikler
- Kısa raf ömrü

Epoksi Reçine: Geniş kullanım alanına sahiptir (prepregs olarak). Örneğin; havacılık, spor, ulaşım, askeri ve deniz araçları elemanlarında kullanılır. Epoksiler iki

ya da daha fazla epoksit içeren bileşenlerden oluşur. Polifenol'ün epikloridin ile bazik şartlarda reaksiyonu sonucu elde edilir. Epoksilere uygulanan kür işlemleri ile yüksek sıcaklıklara dayanımı 150-200 °C a arttırılabilir. Büzülmesi % 2'den azdır. Kalıp birden çok ürün almaya olanak sağladığından kalıbın normal üründen mekanik olarak daha dayanıklı olması gereklidir. Epoksi üstün özelliklere sahip bir reçine olduğundan kalıp imalatında kullanılır (MEB 2014).

Avantajları

- Kopma mukavemetleri yüksektir.
- Fiber yapılarda yüksek bağ mukavemeti sağlar.
- Yüksek aşınma direncine sahiptir.
- Sertleşme sırasında düşük oranda çekme
- Suya dayanım o Islakken 140°C, kuruyken 220°C'ye kadar ısı dayanımı.
- Uçucu değildir ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- Düşük ve yüksek sıcaklarda sertleşebilme özelliğine sahiptir.

Dezavantajları

- Cilde aşırı zararlı
- Doğru karışım son derece önemli (hayati)
- Polyesterle karıştırıldığında pahalıdır.
- Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur.
- Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm fiber malzemelerde kullanılabilme nedeniyle uçak yapısında da yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Genellikle karbon fiberlerle birlikte kullanılır.

Termoset reçineler içinde epoksiler en dayanıklı reçinedir. Isınarak donar. Kanserojen değildir. En iyisi olmasından dolayı en pahalı reçinedir.

Epoksi uygulaması yaparken lastik eldiven kullanmak gerekir. Plastiğe yapışmaz. Kullanacağınız yerleri önceden naylonla kaplamanız işiniz bittikten sonra da orayı kullanabilmeniz için gereklidir. Donmaya başladığı zamanki buharı solumayınız. Gözünüze gelmemesine dikkat ediniz. Zımpara yaparken mutlaka toz maskesi kullanın. Elinize veya başka bir yere gelen epoksiyi asetonla veya kuru bir bez yardımıyla çıkartabilirsiniz, suyla çıkmaz. Epoksi uzun süreli temasta alerjiye neden olabilir.

Vinilester Reçine: Polyestere benzer. En önemli avantajları, fiber ve matris arasında iyileştirilmiş bir bağ mukavemetine sahip olmasıdır. Polyesterle glikolün bir kısmının yerine doymamış hidrosilik bileşenlerin kullanılması ile elde edilir. Korozif ortamlardaki kullanımlar için donatılı plastik bileşenlerin üretiminde yararlanılmaktadır. Bu polimerler kimyasal dayanım gerektiren kimya tesislerinde, borularda ve depolama tanklarında kullanılmaktadır. Vinilester reçineler epoksi reçinelerin avantajları ile doymamış polyester reçinelere özgü “kolay işleme” ve “hızlı sertleşme” gibi özellikleri birleştirmek üzere geliştirilmiştir. Epoksi reçine ile akrilik ya da meta akrilik asidin reaksiyona sokulması sonucu elde edilmektedir. Bu reaksiyon maleik anhidrit kullanıldığında polyester reçinelerde olduğu gibi doymamış bir uç üzerinde meydana gelmektedir. Fakat reaktif kısımların yerleri farklıdır. Bu kısımlar molekül zincirinin uçlarında bulunur. Böylece molekül zincirinin kalan uzun kısmı şok yüklemeleri karşılayacak şekildedir. Böylece vinilesterin polyestere göre daha dayanıklı ve esnek olduğu söylenebilir. Polyester reçinede olduğu gibi benzer bir sıvı elde etmek için üretilen polimer, stiren içinde çözülür. Vinilesterler polyester reçinelerde kullanılan geleneksel organik peroksitlerle sertleştirilebilir. Vinilester, mekanik dayanım ve mükemmel korozyon dayanımı sağlar. Bu üstün özellikleri sayesinde epoksi reçinelerdeki gibi karmaşık proses veya özel kullanım becerisi gerektirmez. Vinilesterde polyestere göre bulunan daha az ester grubu sayesinde reçine hidrolizde daha az zarar görür. Bu özelliği sayesinde vinilester bazen polyester laminasyonunda bariyer kat olarak kullanılır (MEB, 2014).

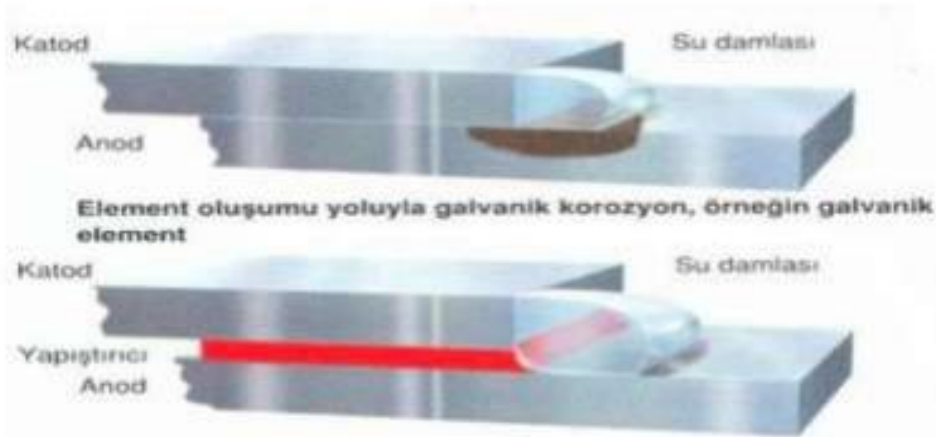
Özellikleri

- Son derece yüksek kimyasal/çevresel dayanım.
- Polyesterden daha yüksek mekanik özellikler.
- Aşırı sitiren içermesi.
- Polyesterden daha pahalıdır.
- İyi özellikler için ikincil kür işlemi gerekir.
- Sertleşme sırasında yüksek oranda çekme

3.3. Kompozit Malzemelerin Birleştirme Yöntemleri

3.3.1. Çözülebilir (Mekanik) Bağlantılar

Vida, cıvata, somun gibi bağlantı elemanları, kompozit levhaların birleştirilmesinde kullanılırken birleştirilecek levhalarda delik açılması gerekmektedir. Kompozit levhalarda açılan deliklere yerleştirilen bağlantı elemanları, levhanın bir parçasıymış gibi davranması beklenir. Bağlantı elemanlarına yük uygulandığında, açılan deliklerin etrafında büyük gerilme yığınları oluşmakta ve bunun neticesinde malzeme deforme olabilmektedir. Bu bağlantıların daha dayanıklı olması için yapılması gereken, kullanılan kompozit levha kalınlığının artırılması veya mukavemet özelliği kullanılan malzemeden daha üstün malzeme tercih edilmesi gerekmektedir. Bağlantı bölgesinde arzu edilen bağlantı mukavemeti malzeme cinsinin ya da kalınlığının artmasıyla beraberinde daha fazla maliyeti getirmektedir. Bu istenmeyen bir durumdur. Ayrıca mekanik bağlantılarda açılan deliklerde meydana gelen gerilemelerden ötürü bu bağlantılarda zaman geçtikçe yorulma oranı daha da artmaktadır. Bununla beraber açılan delikler sıvı girişine müsait bir alan olmaktadır. Su alan bölge istenmeyen galvanik korozyona neden olabilmektedir (Çelik 2015).



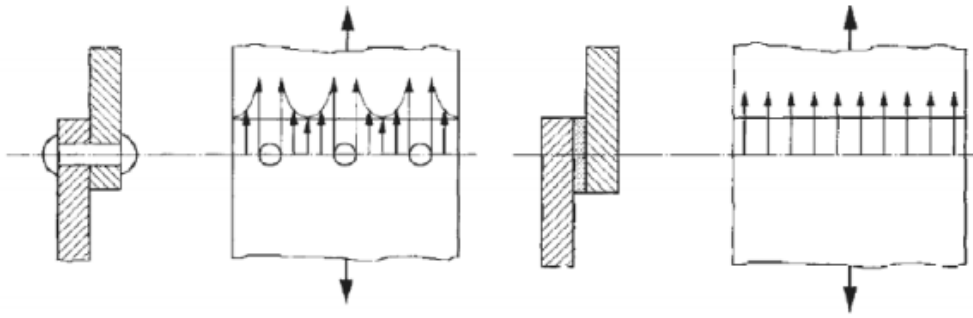
Şekil 3.7. Farklı iki malzemenin galvanik korozyona uğrama durumu (Demir 2016)

3.3.2. Çözülemez Bağlantılar

Çözülemez bağlantılar termal ve kimyasal birleştirme yöntemleriyle birleştirilen bağlantı türüdür. Termal bağlantılara kaynak, lehim gibi işlemler örnek olarak verilebilirler. Termal bağlantı türünde kaynak ve lehim işlemleri için kullanılan malzemelerin aynı cins olması gerekmektedir. Bu birleştirme yöntemi sökülebilir

olmamakla birlikte birleştirme için uygulanan yüksek sıcaklık arzu edilmeyen gerilmelere yol açmaktadır.

Kimyasal birleştirme yöntemine örnek olarak yapıştırıcıyla birleştirme yöntemi örnek verilebilir. Bu çalışmada yapıştırıcıyla birleştirme yöntemini malzemelerimize tatbik edeceğiz. Yapıştırıcıyla birleştirme işlemi düzgün gerilme dağılımı, arzu edilen mukavemet değerleri, malzemelerin yapısal anlamda değişime uğramaması ve farklı cinsten malzemelerin birleştirilmesine müsaade etmesinden ötürü son yıllarda sık sık tercih edilmektedir. Genel anlamda çözölemeyen bağlantıların şok emici olması, yorulma direncinin çok iyi olması, istenilen farklı türdeki malzemelerin yapıştırmasına imkan vermesi, nispeten daha dar alanda gerilme yoğunluğunun az olması gibi üstün özellikleri bu bağlantı türlerini kullanmak için tercih sebebi sayılabilir. Çözölebilen ve çözölemeyen bağlantı türlerinin gösterdiği gerilme dağılımlarına örnek Şekil 3.8. deki gibidir (Temiz 2003).



Şekil 3.8. Pim ve yapıştırma bağlantılarında meydana gelen gerilme dağılımları (Temiz 2003)

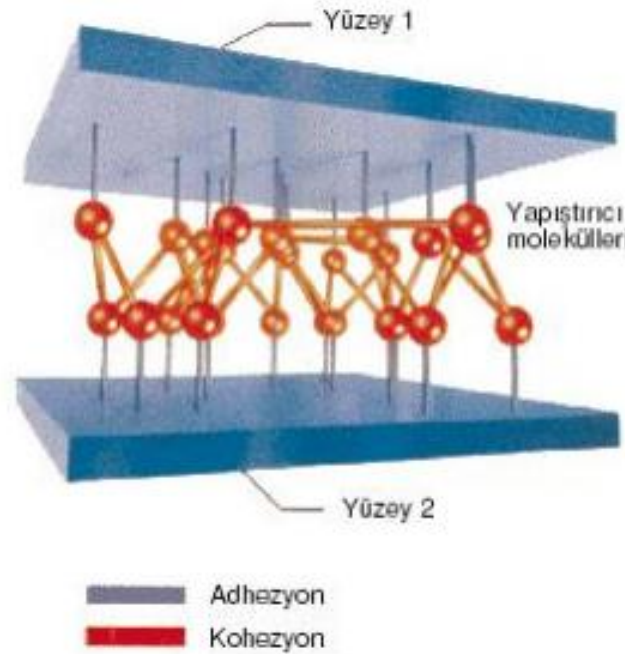
3.4. Yapışma

Yapışma işlemi yapıştırıcı ile yapışan malzeme arasında meydana gelen adezyon ve yapışıcının kendi arasında meydana gelen kohezyon kuvvetleri sonucunda meydana gelen fiziksel ve kimyasal bir işlemdir. Anlaşıldığı üzere yapışma olayını daha iyi idrak edebilmemiz için adhezyon ve kohezyon kuvvetlerini anlamamız gerekir.

3.4.1. Adhezyon

İki maddenin temas yüzeylerinde oluşan yapışma kuvvetine adezyon kuvveti denir. “Van der Waals kuvvetleri” denilen çekim ve yüzeye tutunma fiziksel kuvvetleri yapışma için çok önemli bir faktördür. Yapışkan, mekanik yönden işlenmiş yüzeylere

tam anlamıyla temas edemediği takdirde bu moleküller arasındaki kuvvetler aşırı derecede zayıflar. Mekanik yönden işlenmiş yapıştırıcı yüzey pürüzlüğüne uygulanan yapıştırıcıların tam anlamıyla nüfuz etmesi ve yüzeyin tamamını tam anlamıyla ıslatması arzu edilen iyi yapışma işlemi için elzemdir. Diğer bir deyişle yapıştırmanın kuvveti gerek yüzeyin yapışma özelliklerine gerekse yüzeyin ıslatılmasına bağlıdır. Yüzeydeki ıslana bilirlık kapasitesi, yapıştırıcı uygulanan yüzeylerin gerilimine ve yapıştırıcının viskozitesine bağlıdır. Yapıştırıcı sürülen yüzeyin temizlenmiş olması da yüzeylerin daha iyi yapışmasına doğrudan etki eder. Yapışma yüzeylerinde meydana gelen kuvvetler Şekil 3.9. da gösterilmiştir (Wake 1986).



Şekil 3.9. Adhezyon ve kohezyon kuvvetleri
(Loctite Handbook 1988)

3.4.2. Kohezyon

Yapıştırıcının içeriğindeki malzemelerin kimyasal (bağ kuvvetleri) ve/veya fiziksel (Van der Waals kuvvetleri) etkisiyle birbirlerine tutunma durumudur. Yapıştırıcıları oluşturan moleküller arasında bulunan ve bu yapıştırıcıları bir arada tutan kuvvete kohezyon denir (Çelik 2015).

Van der Waals Bağı: Boyutları farklı herhangi bir molekül referans alındığında, o molekülün farklı yüklerine denk gelen farklı kutuplar görülebilir. Farklı kutuplar beraberinde mıknatıs etkisini getirir. Yani farklı dipoller birbirlerine elektromanyetik

kuvvetlerle tutunmaktadır. Bununla beraber oluşan yeni bağlara Van der Waals bağları denir ve bu bağlar yapısı gereği zayıftır (Çelik 2015).

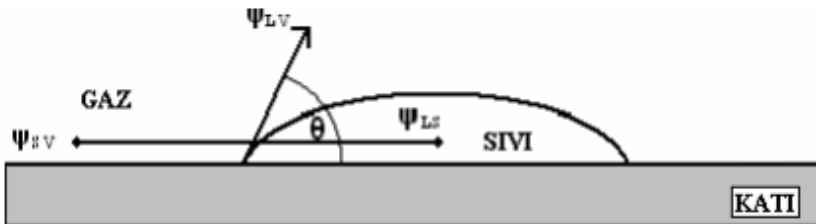
Kovalent Bağ: Atomların birbirleri arasında elektron köprüleri kurarak birbirlerine tutunmaları sonucunda meydana gelen bağlara kovalent bağ denir. Oluşan kuvvetlerle, birbirine zıt yönde hareket eden elektronlar vasıtasıyla elektromanyetik alanlar meydana gelir. Bu alanlar bir mıknatısın farklı kutupları gibi birbirlerini çekerler (Çelik 2015).

Yapıştırma işleminde adezyon ve kohezyon kuvvetleri birbirlerine mümkün olduğunca eşit olmalıdır. Adezyon kuvveti; malzeme yüzeyinin kir ve yağlardan arındırılması, yüzey pürüzlülüğünün artırılması gibi opsiyonlar kullanılarak artırılabilir. Kohezyon kuvveti ise doğrudan yapıştırıcı olarak seçilen malzemenin kendi özellikleriyle ilişkilidir (Çelik 2015).

Düzgün bir yüzey hazırlığı beraberinde adhezyon kuvvetinin ve yapışma performansının artmasını getirir. Yapışan olarak seçilen parça yüzey olarak, uygun pürüzlülükte, temiz ve mekanik olarak düzgün olmalıdır. Bu yüzeyler arzu edilen dayanım ve parça kullanım ömrünü artmasını beraberinde getirmektedir.

3.4.3. Islanabilirlik

Yapışmaya yardımcı olan mekanizmaların başında ıslanabilirlik gelir. Islanabilirlik, sıvının katı yüzeye yayılma durumunu tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Atmosferde düzlem katı yüzey içinde kalan damlalardan oluşan bir sistem içindeki kuvvetlerin dengesini göz önüne alarak bir sıvı damlası yardımıyla verilen bir katının ıslanabilirliği ölçülebilir. Sistemin serbest enerjisinin net olarak azalması ile damla yüzeye tamamen yayılır ve yüzeyi ıslatır. Şekil 3.10 şematik olarak bu durumu göstermektedir (Çelik 2015).



Şekil 3.10. Islanabilirlik (Çelik 2015)

Katı yüzey üzerindeki damla, katı ve sıvı arasında temas açısı yapar. Şekil 3.11’de, ψ_{LS} , ψ_{LV} ve ψ_{SV} , sırasıyla katı-sıvı, sıvı-gaz, katı-gaz temaslarının yüzey enerjisini temsil etmektedir. Tamamen ıslanabilirlik için aşağıdaki denklemler yazılabilir (Çelik 2015).

$$\psi_{LS} + \psi_{LV} < \psi_{SV} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’deki; S, L ve V sırasıyla, katı (solid), sıvı (liquid) ve gazı (vapor) temsil ederken, ψ yüzey enerjisini temsil eder. Yüzey üzerindeki kuvvetler dengeleninceye kadar sıvı, katı yüzeye yayılır. Bunun anlamı kısmi bir ıslanmadır. Yukarıdaki şekilden de görülebildiği gibi θ açısına, temas açısı denir. Kuvvetlerin dengesinden,

$$\psi_{LS} + (\psi_{LV} \cos\theta) = \psi_{SV} \quad (3.2)$$

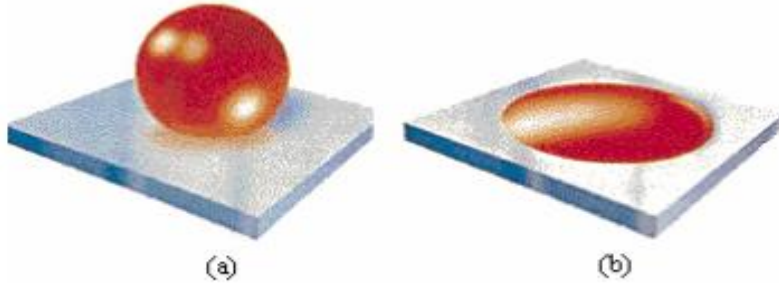
veya

$$\theta = \cos^{-1}[(\psi_{SV} - \psi_{LS}) / \psi_{LV}] \quad (3.3)$$

yazılabilir. $\theta = 180$ için küresel damla yada ıslanma olmadığı anlamına gelir. Ters olarak $\theta = 0$ için mükemmel ıslanma oluşur. $0 < \theta < 180$ için ise kısmi ıslanma oluşur. Temas açısı θ , yüzeyin yapısına bağlıdır. Yüzeyin pürüzlülüğü θ temas açısını azaltır. Emilmiş gazlar θ temas açısını artırır.

Şekil 3.10’da gösterildiği gibi, yüksek temas açısı yetersiz bir ıslanabilirliği temsil ederken, düşük temas açısı yüksek ıslanabilirliği temsil eder.

Yapışma olayı için yüzey hazırlıklarını “su kopma testi” ile görebiliriz. Yüzeye damıtılan saf su eğer şeklini koruyorsa ve dağılmıyorsa yetersiz yüzey temizliğinin göstergesidir. Burada dikkat edilmesi gereken husus farklı yüzeyler için farklı test sıvıları kullanılması gerekliliğidir. Çünkü suyun sertliği yüzey gerilimini etkiler. Bu nedenle kritik testlerde, belirli yüzey gerilmelerine sahip sıvılar kullanılmalıdır. Şekil 3.11’de ıslanabilirlik testinde yüzey hazırlığının yeterlilik durumu gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Islanabilirlik testi a) Yapıştırma yüzey hazırlığı yetersiz b) Yapıştırma yüzey hazırlığı yeterli (Çelik 2015)

3.4.4. Yapıştırıcılar ve Çeşitleri

En az iki malzemenin yapıştırma yöntemiyle arzu edilen birleştirme şekillerinin epoksi, polyamid, silikon gibi malzemelerin kimyasal olarak karıştırılıp birleştirilmesiyle meydana gelen malzemeye yapıştırıcı denir. Yapıştırıcılar, birleştirilme işlemlerinde kullanılmadan önce film, toz, sıvı gibi türlü formlarda olabilirler. Kimyasal reaksiyonlar neticesinde sertleşen yapısal yapıştırıcılar, esnek, yük taşıma kabiliyetine sahip, yüksek kesme mukavemeti ve ısı dayanımına sahip yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılar otomotiv, denizcilik, uzay sanayi gibi birçok sektörde kullanılmaktadır (Solmaz 2008).

Günümüzde kullanılan yapıştırıcılar, formları ve kimyasal tipleri bakımından iki ana gruba ayrılır:

- a. Kimyasal tipleri bakımından yapıştırıcılar
- b. Formları bakımından yapıştırıcılar

3.4.4.1. Kimyasal Reaksiyon ile Sertleşen Yapıştırıcılar

En kuvvetli yapıştırıcılar olan yapısal yapıştırıcılar, kimyasal reaksiyon sonucu sertleşirler. Son zamanlarda kullanılan kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcıların türleri ve özelliklerini inceleyelim.

- Anaerobikler

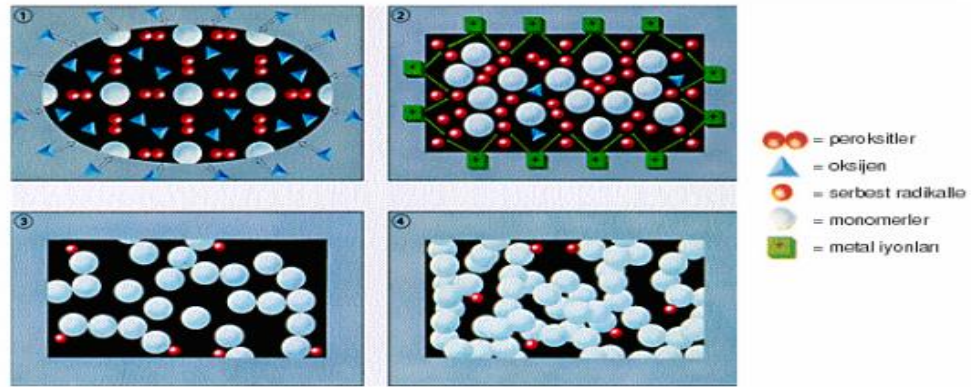
Anaerobik yapıştırıcılar, oda sıcaklığında oksijenle temasları kesilmesi durumunda katılaşıp sertleşen tek bileşenli malzemelerdir. Yapıştırıcı, sıvı haldeyken içinde barındırdığı kürleştirici bileşen, havadaki oksijen ile temasta olduğu süre boyunca etkisiz kalır. Örneğin yapıştırıcı uygulanacak yapışan yüzeyleri arasında yapıştırıcı hapsolacağı için kürleşme daha çabuk gerçekleşecektir. Oksijenle temas

kesildiğinde oluşan serbest radikaller, metal iyonlarının tesiriyle Şekil 3.12'deki gibi serbest radikal polimerizasyonunu başlatır.

Sıvı formdaki yapıştırıcı, kılcallık etkisiyle en küçük boşluklara girerek ek yerini doldurur. Böylece kürleşen yapıştırıcı yüzey pürüzlerinin tam olarak şeklini almış olur. (Solmaz 2008).

Anaerobik reaksiyon ile katılan yapıştırıcıların genel özellikleri şunlardır:

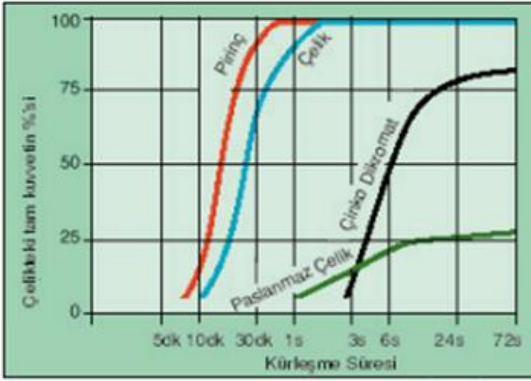
- Aşırı yüksek kayma mukavemeti
- Yüksek sıcaklık dayanımı (-55 °C'den en büyük +230 °C'ye kadar)
- Yapıştırmayla birlikte sızdırmazlık ve mükemmel kimyasal dayanım
- Parça yüzeylerinin parlatılması gerekmez
- Kürleşmenin hızlı gerçekleşmesi
- Yüksek dinamik yük ve titreşim mukavemeti



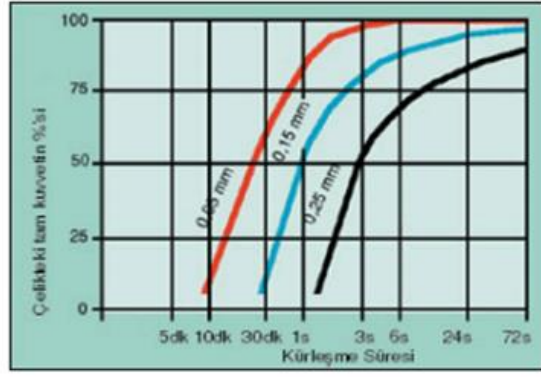
Şekil 3.12. Anaerobik yapıştırıcıların sertleşme mekanizmaları (Solmaz 2008)

Anaerobik ürünlerin kürleşme durumu ve kürleşme hızı Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da belirtilen parametrelerden etkilenir. Bu parametreler sırasıyla; yapıştırılacak malzemeler, yapıştırılacak parçalar arasındaki boşluk, sıcaklık ve aktivatördür.

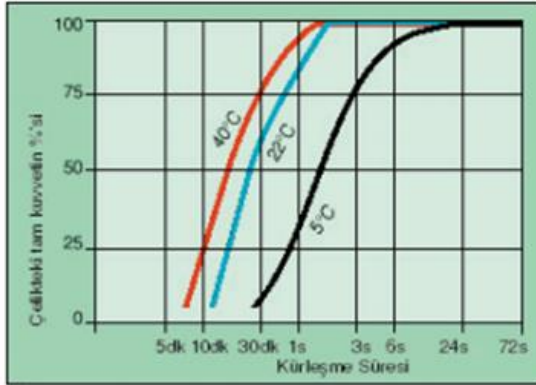
1. Yapıştırılacak malzemeler (Şekil 3.13)
2. Yapıştırılacak parçalar arasındaki boşluk (Şekil 3.14)
3. Sıcaklık (Şekil 3.15)
4. Aktivatör (Şekil 3.16)



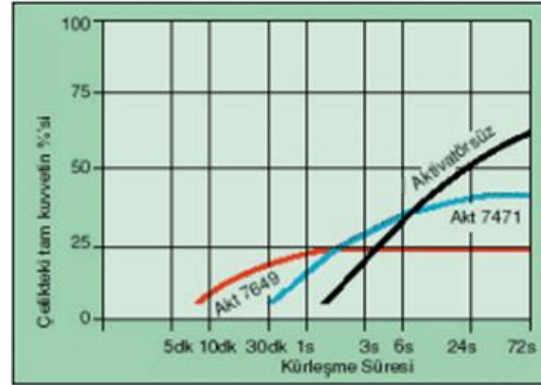
Şekil 3.13. Kürleşme hızı-malzeme



Şekil 3.14. Kürleşme hızı-boşluk



Şekil 3.15. Kürleşme hızı-sıcaklık



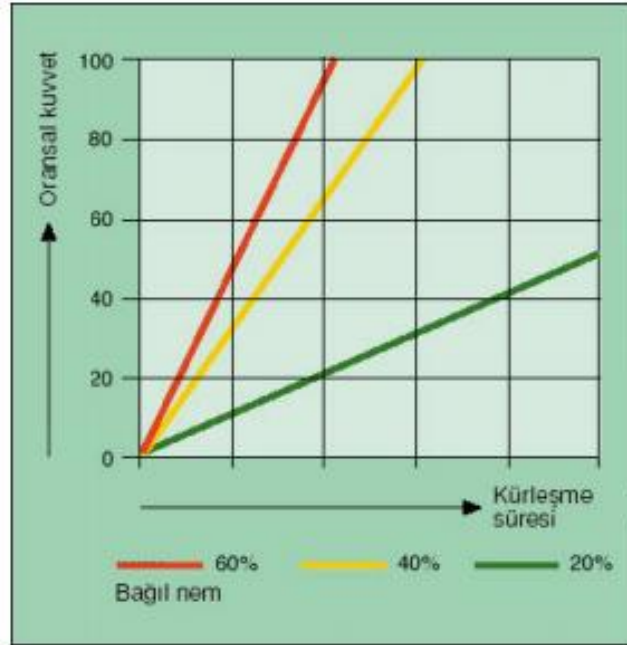
Şekil 3.16. Kürleşme hızı-aktivatör (Solmaz 2008)

Genellikle yapıştırıcılar oda sıcaklığında etkili olurlar. Fakat yüksek sıcaklıkla birlikte yapıştırıcı daha etkili olur ve yapışma süresi kısalır. Çoğu kimyasal reaksiyonda olduğu gibi sıcaklıkla reaksiyon hızında bir artış olur. Ancak sıcaklığın kontrolü yapılmalıdır. Aksi durumda yapıştırıcıyı oluşturan polimer maddenin bozunması olasılığı ile karşılaşılabilir. Yapışmayı en çok etkileyen faktör sıcaklık faktörüdür.

- Siyanoakrilatlar

Siyanoakrilat tipi yapıştırıcılar tek bileşenli olup, çok az alkalın özellik gösteren yüzeyler ile temas etme durumunda kürleşirler. Kürleşme aşaması, genellikle ortamdaki ve yapıştırılacak parça yüzeyinde bulunan nem ile başlar. Polimerizasyon bir yüzeyden diğerine olacak şekilde gerçekleşir. Çünkü yapıştırma işlemi yapılacak yüzey üstündeki nem, yapıştırıcının içerisindeki dengeleyiciyi nötralize etmektedir. En hızlı kürleşmeyi elde etmek için mümkünse sıfır boşluk gereklidir. Çalışmanın yapılacağı ortam sıcaklığı 25 °C olacak şekilde %40 ila %60 bağıl nem bulunması arzu edilen neticenin elde edilmesi için en uygun parametrelerdir. Kürleşmeyi azaltan en önemli faktör düşük

nemdir. Buna karşın yüksek nem ise kürleştirmeyi hızlandırır. Ancak yapıştırıcının nihai tutma kuvvetini negatif yönde etkiler. Şekil 3.18’de bağıl nemin bir foksionu olarak siyanoakrilat tipi yapıştırıcıların kürleşmesi grafik şeklinde gösterilmiştir (Solmaz 2008).



Şekil 3.17. Bağıl nemin bir foksionu olarak siyanoakrilat yapıştırıcıların kürleşmesi (Solmaz 2008)

Siyanoakrilat yapıştırıcıların genel özellikleri şunlardır;

- Hızla kürleşebilmesi
- Uzun ömürlü olması
- Yüksek kayma ve çekme mukavemetine sahip olması
- Birçok malzemeyi yapıştırabilme özelliğine sahip olmasıdır.

- Akrilikler

Bu tür yapıştırıcılar, 25 °C de aktivatör ile kürleşmektedir.

Modifiye akrilik yapıştırıcıların genel özellikleri şunlardır:

- Yüksek kayma ve çekme mukavemetine sahip olması
- Birçok malzemeyi yapıştırabilme özelliğine sahip olması
- Yüksek darbe mukavemeti
- Üstün boşluk doldurma yeteneği
- Geniş sıcaklık aralığında çalışmaya uygun olmasıdır (Solmaz 2008).

- Poliüretanlar

Bu tip yapıştırıcılar, su ile izosiyanat içeren bir tür katkı maddesiyle tepkimesi sonucu meydana gelir. Poliüretanlarda kürleşme, su molekülünün yapıştırıcının her noktasına eşit derecede yayılmasıyla meydana gelmektedir. Ortamın bağıl nemi, kürleşme hızına doğrudan etki etmektedir.

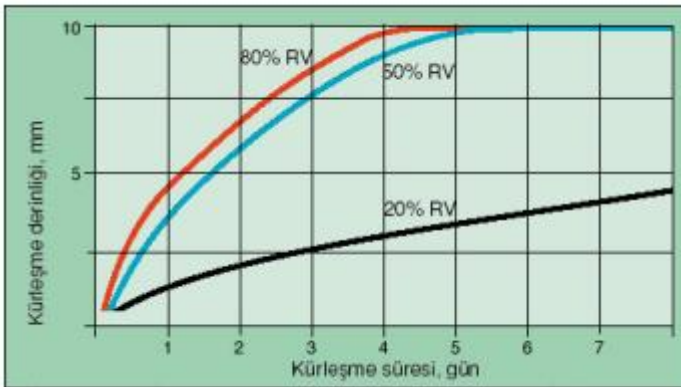
Poliüretanların genel özellikleri şunlardır:

- Üstün boşluk doldurma yeteneği
- Yüksek dayanım
- Kimyasal direcin fazla olması
- İyi elastisitee sahip olmasıdır (Solmaz 2008).

- Silikonlar

Silikonlar, oda sıcaklığındaki ortam nemiyle sertleşirler. Poliüretanlar gibi silikonlar da yapıştırıcının her noktasına su molekülünün eşit derecede yayılmasıyla oluşur. Yani silikonlar su molekülü sayesinde kenetlenme gerçekleşir. Dolayısıyla, su ile silikonların birleşimi vulkanizasyon denen sertleşme olayının gerçekleştiği yere nüfuz edilmesi gerekmektedir.

Bu tip yapıştırıcılarda da kürleşme hızı ortamın bağıl nemine bağlıdır. Silikonlar, kürleşme mekanizmasının doğası gereği yapışma yüzeyinin dış kenarlarından iç kısma doğru vulkanize olmaktadır. Vulkanizasyonun gerçekleştiği her noktaya nemin ulaşması gerekmektedir. Bu nedenle kürleşme derinliği 10-15 mm ile sınırlıdır (Solmaz 2008).



Şekil 3.18. Kürleşme hızı- bağıl nem (Solmaz 2008)

Silikon elastomerlerin genel özellikleri şunlardır:

Üstün boşluk doldurma yeteneği.

Etkili sızdırmazlık (Birçok akışkan için).

Dayanıklı olması.

Esnek ve yüksek uzama katsayısına sahip olması.

Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmasıdır (Solmaz 2008).

- Epoksiler

Bu çalışmada da kullandığımız yapıştırıcı türü olan epoksiler, sertleştirici ile epoksi reçinenin birleşiminden meydana gelmektedir. Epoksi yapıştırıcılar kullanılarak yüksek mukavemetli yapışma bağlantıları elde edebiliriz. Birçok çeşit malzeme bu tip yapıştırıcı kullanılarak birleştirilebilir. Bu tip yapıştırıcılar üç çeşit formda olup bunlar; tek bileşenli, çift bileşenli ve film olarak sıralanabilir. Her iki bileşen birleştirildiğinde kovalent bağlar meydana gelir. Ardından termoset polimere dönüşür.

Epoksiler ısıya maruz kaldıkça sertleşirler ve olduğundan daha fazla çapraz bağlar oluştururlar. Dolayısıyla daha mukavim yapışmalar meydana gelir. Ayrıca silikonlara göre derinliğine sertleşme miktarı çok daha iyidir (Solmaz 2008).



Şekil 3.19. Loctite marka epoksi yapıştırıcı

3.4.4.2. Formları Bakımından Yapıştırıcılar

Günümüz yapıştırıcıları, kullanılmadan önce sıvı, macun, toz ve film gibi birçok formda olabilirler. Formları bakımından yapıştırıcılar kullanılacakları alanlara göre gruplanabilir. Bu gruplar:

- Film tipi yapıştırıcılar
- Reçineler
- Köpükler
- Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar
- Macun tip yapıştırıcılar
- Düşük viskoziteli yapıştırıcılar olarak değerlendirilebilir (Solmaz 2008).

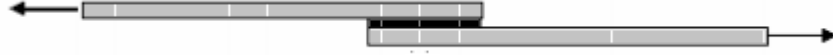
3.4.5. Yapıştırıcı ile Birleştirme Yöntemleri

Uygun bir tasarım, yapıştırıcı bağlantılarındaki gerilme dağılımı ve bağlantının hasar mukavemeti hakkında yeterli bilgiye sahip olmayı gerektirir. Bağlantının davranışı, geometri ve malzeme davranışı gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu parametreler beraberinde bağlantının ortalama mekanik davranışını tahmin etmeyi de güçleştirir. Karşılaşılan güçlükler özellikle yapıştırıcıların kontrol mekanizmalarının karşılaştırılmalarındaki eksikliklerden dolayıdır. Yapısal mühendislik tasarımın temeli, herhangi bir yükleme durumunda yükleri belirleyebilmek ve oluşacak gerilmeleri pratik olarak hesaplayabilmektir. Bir malzemede çizilme, aşınma, kesilme, delinme ya da malzemenin plastik deformasyona karşı oluşturduğu dirence sertlik denir. Bir malzemenin sertlik değeri malzemenin diğer mekanik özellikleri ile paralel olduğu için sertlik testi malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan yaygın bir uygulamadır.

Yapıştırıcı ile birleştirme yöntemlerini aşağıda şekillerle gösterilmiştir:

3.4.5.1. Tek Tesirli Yapışma Bağlantısı

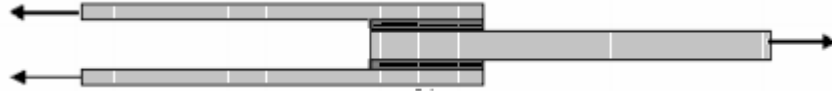
Bu bağlantı tipinde, birleştirilmesi arzulanan levhaların, belirlenen kesit alanlarını üst üste getirmek suretiyle yapıştırılarak elde edilen bağlantılardır. Tek tesirli yapışma bağlantıları denilen bu bağlantılar aynı zamanda tez çalışmasında kullanılan bağlantı türüdür.



Şekil 3.20. Tek tesirli yapışma bağlantısı

3.4.5.2. Çift Bindirme Bağlantısı

Çift bindirme bağlantı tipinde bir elemanın hem altına hem de üstüne gelecek şekilde iki ayrı elemanın üst üste bindirme olayının gerçekleştiği bindirme bağlantı türüdür.



Şekil 3.21. Çift bindirme bağlantısı

3.4.5.3. Eğimli Bindirme Bağlantısı

Bu bağlantı türünde bindirme bağlantısında kullanılacak alt ve üst levha elemanlarının bindirme bağlantılarının üst kısımlarına eğim verilmek suretiyle yapışma olayının gerçekleştiği bağlantı türüdür.



Şekil 3.22. Eğimli bindirme bağlantısı

3.4.5.4. Alın Bağlantısı

Bu bağlantı türünde birleştirilecek levha elemanları alın kısımlarından birbirlerine doğrudan yapıştırılarak bağlantı oluşturulur.



Şekil 3.23. Alın bağlantısı

3.4.5.5. Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı

Bu bağlantı türünde alın altına getirilen iki levha elemanının altına veya üstüne gelecek destek elemanının bağlantıya yerleştirilmesiyle tek destek elemanlı bindirme bağlantısı oluşturulur.



Şekil 3.24. Tek tesirli bindirme bağlantısı

3.4.5.6. Çift Tesirli Bindirme Bağlantısı

Bu bağlantı türünde alın altına getirilen iki levha elemanının hem altına hem de üstüne birer destek elemanı gelecek şekilde bağlantıya yapıştırılarak yerleştirilmesiyle çift destek elemanlı bindirme bağlantısı oluşturulur.



Şekil 3.25. Çift tesirli bindirme bağlantısı

3.4.5.7. Eğimli Çift Tesirli Bindirme Bağlantısı

Bu bağlantı türünde alın altına getirilen iki levha elemanının hem altına hem de üstüne eğimli birer destek elemanı gelecek şekilde bağlantıya yapıştırılarak yerleştirilmesiyle eğimli çift destek elemanlı bindirme bağlantısı oluşturulur.



Şekil 3.26. Eğimli çift tesirli bindirme bağlantısı

3.4.5.8. Basamaklı Bindirme Bağlantısı

Bu bağlantı türünde birbiri üzerine tam anlamıyla oturtulmak istenen levhaların üzerine basamak şeklinde boşluklar açılır. Yapılan işlemlerden basamak oluşturulan levhaların bir araya getirilmesi sonucunda basamaklı bindirme bağlantıları oluşturulur.



Şekil 3.27. Basamaklı bindirme bağlantısı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Giriş

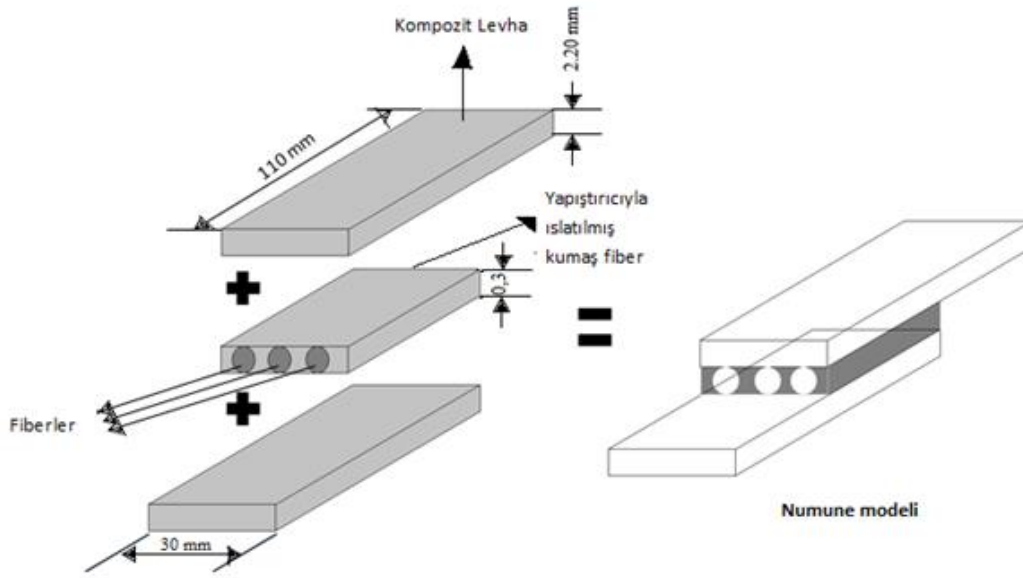
Fiberle takviye edilmiş kompozit malzemeler birçok endüstri dalında geniş kullanım alanına sahiptir. Bu malzemeler epoksi ve polyester gibi yapıştırıcılar aracılığıyla birbirine tutturulmaktadır.

Kompozit malzemelerin en önemli özellikleri; yüksek mukavemet, yüksek sönümleme, termal sıcaklığa dayanım özgül elastisite modülüne sahip olmalarıdır. Bu üstün özelliklerinden ötürü günümüzde hava ve uzay sanayiinde sıklıkla tercih edilmektedir.

Bu bölümde çalışmada deney yapılacak tek tesirli yapışma bağlantılarında kullanılan kompozit levhalar, yapıştırıcıya takviye edilen dört farklı kumaş tipi fiberin dört farklı açı ile kesimi hakkında bilgi verilecektir. Bu çalışmada $[0^0]_8$ tabakalı örgülü cam fiber/epoksi kompozit levhalar tek tesirli yapışma bağlantıları ile birleştirilmiştir. Yapıştırıcı olarak fiber kumaşlar ile takviye edilmiş epoksi esaslı yapıştırıcılar kullanılmıştır. Kompozit levhalar İzoreel firmasından temin edilmiştir. 300 gr/m^2 yoğunluğuna sahip örgülü cam fiber kumaşlar epoksi reçine ile levha haline getirilmiştir. Yapıştırıcı olarak LOCTITE EA 9466 marka epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapışma bölgesinde 250 gr/m^2 örgülü cam fiber, 300 gr/m^2 tek yön cam fiber, 300 gr/m^2 tek yön karbon fiber ve 250 gr/m^2 yoğunluğa sahip örgülü karbon fiber kumaşlara emdirilen yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcıyı takviye etmek üzere tek kat olarak kullanılan fiber kumaş tabakaları $0^0, 15^0, 30^0$ ve 45^0 açılarında kullanılmıştır.

4.2. Problem Modeli

Çalışmada kullanılan $[0]_8$ düzeninde sekiz tabakadan oluşan cam fiber takviyeli kompozit levhalar İzoreel firmasından temin edilmiştir. Bu levhaların fiber hacim oranı %60 iken, matris olarak kullanılan epoksi reçine oranı ise %40'tır. Kompozit levhalar, tek tesirli yapışma bağlantısı üretilmek üzere $110\text{mm} \times 30\text{mm} \times 2.20\text{mm}$ boyutlarında hassas testere ile Şekil 4.1'deki gibi kesilmiştir.



Şekil 4.1. Deney numunelerinde kullanılan levhaların boyutları ve numune modeli

Kesilen levhaların bindirme bölgesi için kumaş fiberler epoksi yapıştırıcıyla ıslatılıp 0° , 15° , 30° , 45° 'lik fiber takviye açılarına göre kuponlar kretuar maket bıçağı kullanılarak kesilmiştir. Hazırlanan kuponlar vasıtasıyla levhalar yapıştırılmıştır.

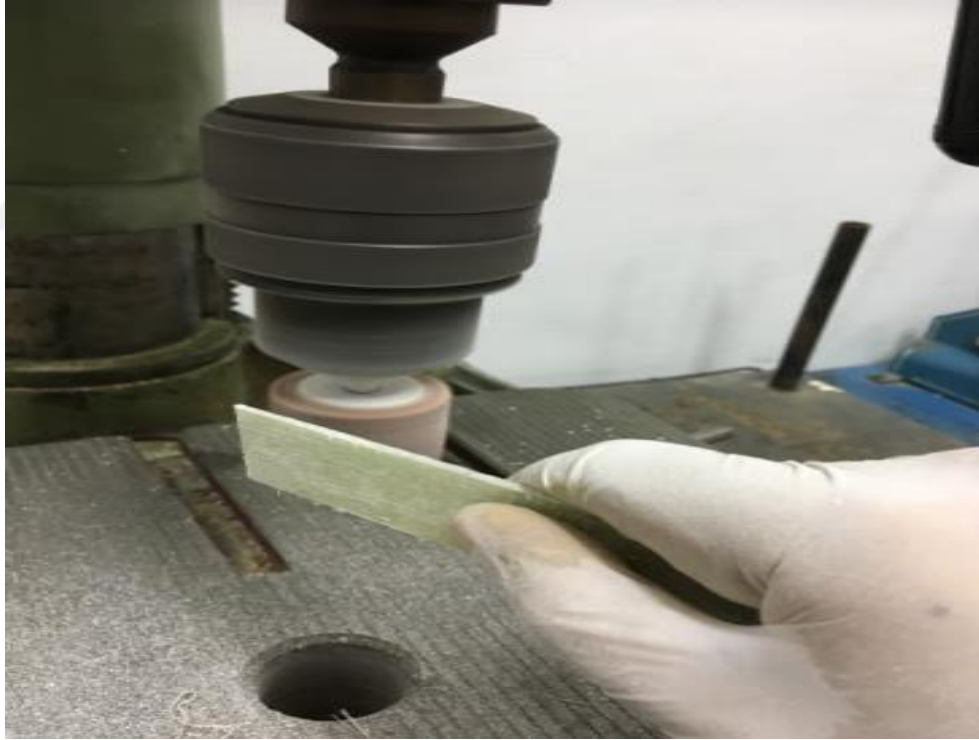
4.3. Numunelerin Hazırlanması

Yapıştırma bağlantısının yapışma verimini etkileyen en önemli faktör yapışma alanının yüzeyinin temiz olup olmamasıdır. Bindirme alanının yapışma alanı yağ, toz, talaş gibi maddelerden temizlenmesi yapıştırma bağlantısından daha sağlıklı sonuçlar almamıza ve istenmeyen problemlerin minimize edilmesine yardımcı olacaktır. Ayrıca numuneler yapıştırıcıyla ıslatılarak kullanılan kumaş fiberler ve bu fiberlerin takviye açılarına göre markalandı. Aşağıda numunelerin hazırlıkları aşama aşama anlatılmıştır.

Öncelikle çalışmada kompozit levhalar belirlenen ölçülerde toplam 96 adet olacak şekilde Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan hassas testere yardımıyla kesildi.



Şekil 4.2. Deney numuneleri için kesilen kompozit levhalar



Şekil 4.3. Kesilen levhaların yapışma alanının zımparalanması

Bindirme alanındaki yapışma bölgesi, ince zımpara kullanılarak zımpara işlemi yapıldı.



Şekil 4.4. Zımparalanan levhanın asetonlu üstübüyle temizleme işlemi

Zımpara işlemi gören yüzeyler asetonlu temiz üstübüyle teker teker temizlendi.

Asetatlı kalemle çizilen 30x30 yapışma bindirme bölgeleri zımpara ve asetonlu bezle temizlendikten sonra tekrar çizildi.

Levhaların istenilen ölçülerde yapıştırma işlemi için özel kalıplar hazırlandı. Bu kalıplar 3D Printer ile üretilmiştir. Kalıplar, yapıştırıcı kalınlığı ve yapışma bölgesine uygun yapışma ortamını elde etmek amacıyla üretilmiştir. Yapıştırma işlemi yapmadan önce üretilen kalıp yüzeylerine kalıp ayırıcı yağ sürülmüştür.

Bu işlemlerin ardından yapıştırıcıya takviye edilecek olan tek yön karbon, tek yön cam ve örgülü karbon, örgülü cam fiber kumaşları LOCTITE EA 9466 marka epoksi yapıştırıcıyla ıslatılarak ayrı ayrı beyaz şeffaf ciltlere bantlarla sabitlenmiştir.

Bir kompozit levha referans alınarak $\text{Fi } 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ takviye açılarıyla yapıştırıcıya takviye elemanı olarak kullanılan kumaş fiber kuponları her bir kumaş ve takviye açısına göre 3'er tane olacak şekilde hızlıca hazırlanmıştır.



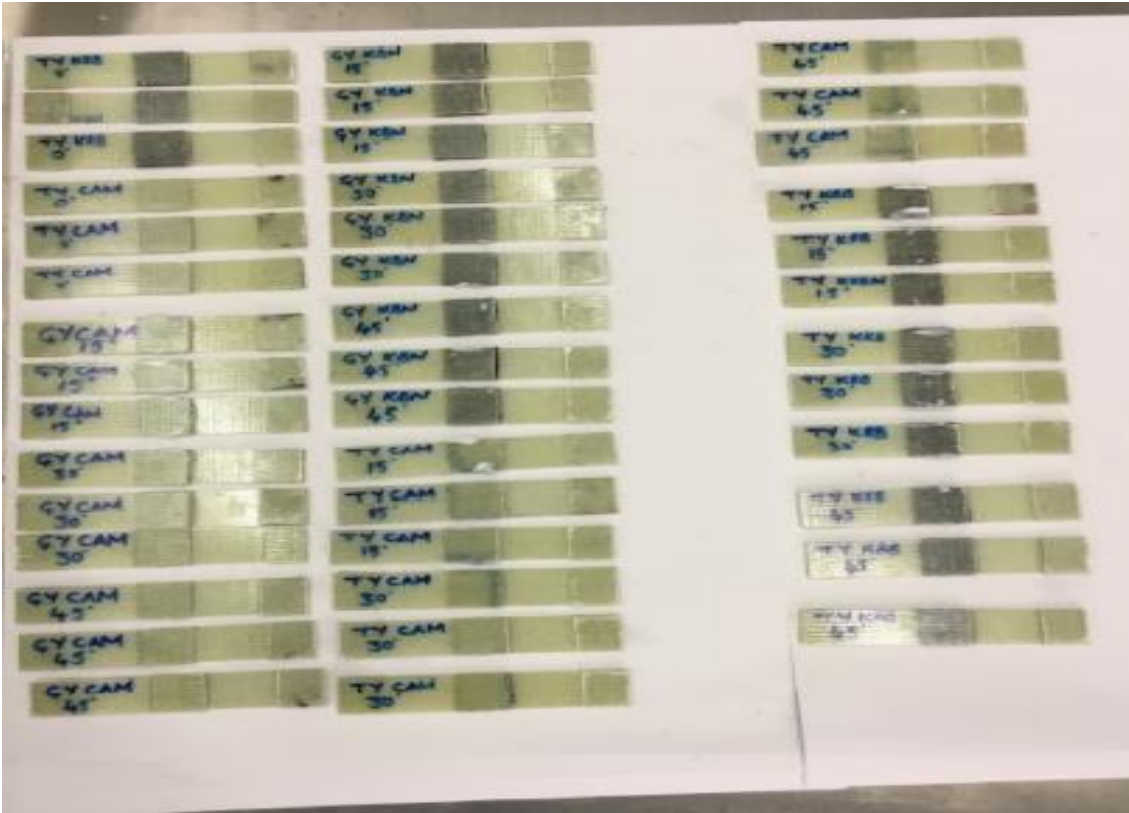
Şekil 4.5. Hazırlanan kalıplar ve yapıştırıcıyla ıslatılmış cam fiber kumaş kuponlarının kesilme işlemi

Hazırlanan kuponlar bindirme bağlantılarını birleştirme işlemi sırasında kullanılmıştır. Yapıştırılan bindirme bağlantıları ivedi bir şekilde kalıplara yerleştirilmiştir. Yapıştırıcıyla birleştirme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6. Numunenin fiber takviyeli yapıştırıcıyla birleştirilmesinden sonra kalıba oturtulması

Daha sonra yapılan numunelerin yapıştırıcısına takviye olacak kumaşların cinsi ve takviye açılarını belirten yazılarla barkod işlemi tamamlanmıştır. Bindirme bağlantıları 1 hafta kürleşmesi için oda sıcaklığında bekletilmiştir.



Şekil 4.7. Numunelerin özelliklerini gösteren barkodlamalar

4.4. Deneylerin Yapılışı

Deneyler, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekaniik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Her fiber kumaş ve takviye açısı için üçer numune hazırlanmıştır. Çekme cihazı olarak Şekil 4.15'de gösterilen 100 kN kapasiteli Instron BS 8800 çekme test cihazı kullanılmıştır. Çekme test cihazının üst çenesi sabit, alt çenesi hareketlidir. Bütün numuneler uç kısımlarından çenelere sabitlenerek ASTM standartlarına göre oda sıcaklığında statik çekme testine tabi tutulmuştur. Ortamdaki nem dikkate alınmamış, ihmal edilmiştir. Çekme işlemi 1mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir. Numuneler test cihazına bağlanırken eksenlemeye dikkat edilmiştir. Hata oluşumunu önlemek için numunelerin serbest uçları eşit sıkıştırma basınçlarına maruz bırakılmıştır. Ayrıca tek tesirli yapışma bağlantılarında eksantrik yük oluşumunu önlemek için bağlantı serbest uçlarına yapıştırılmak üzere 30mm x 30 mm ebatlarında pabuç üretilmiş, böylece elde edilen sonuçların daha sağlıklı olması amaçlanmıştır. Numuneler test edilirken hasar yükleri ve uzamalar bilgisayara otomatik olarak kaydedilmiş olup, alınan veriler grafik ve çizelgeler halinde sunulmuştur.



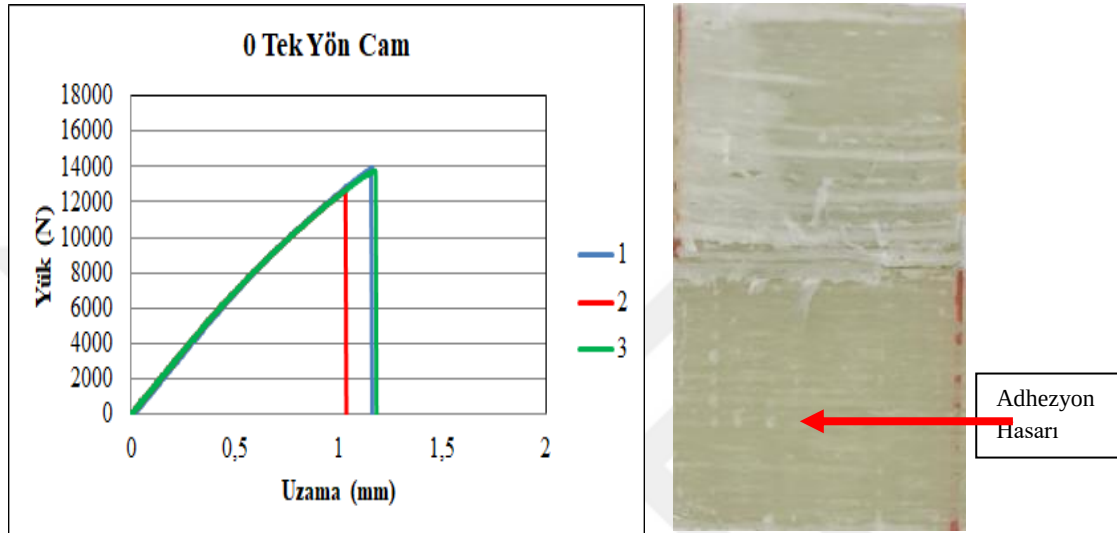
Şekil 4.8. Çekme test cihazı ve deney düzeneği



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

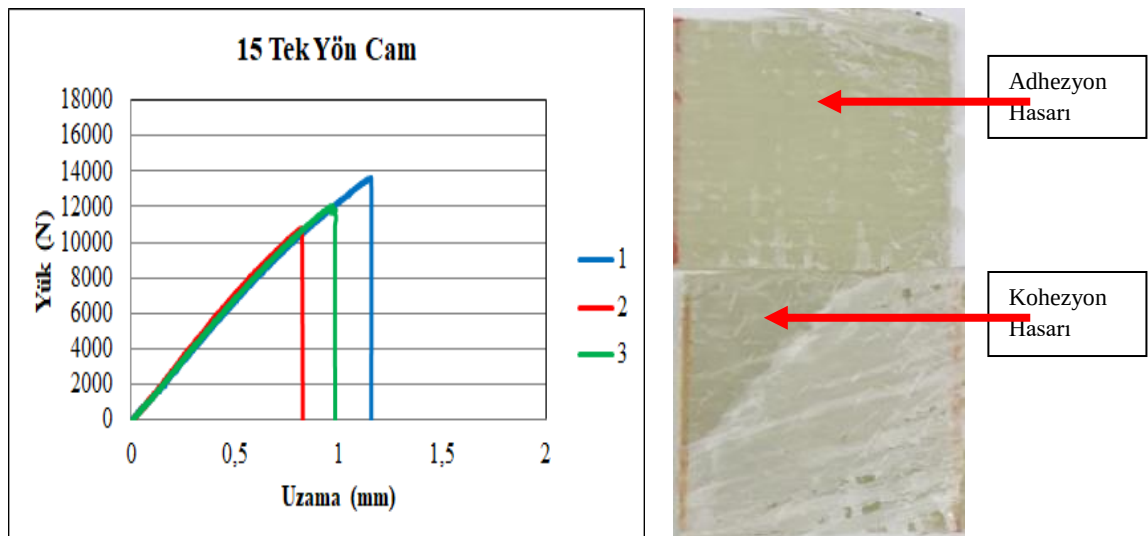
5.1. Tek Yön Cam Fiber Takviyeli Yapıştırıcı için Deneysel Sonuçlar

Tek yön cam fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.1 , Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de sunulmuştur. Fiber takviye açısı için 0° , 15° , 30° ve 45° açıları kullanılmıştır.



Şekil 5.1. 0° tek yön cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

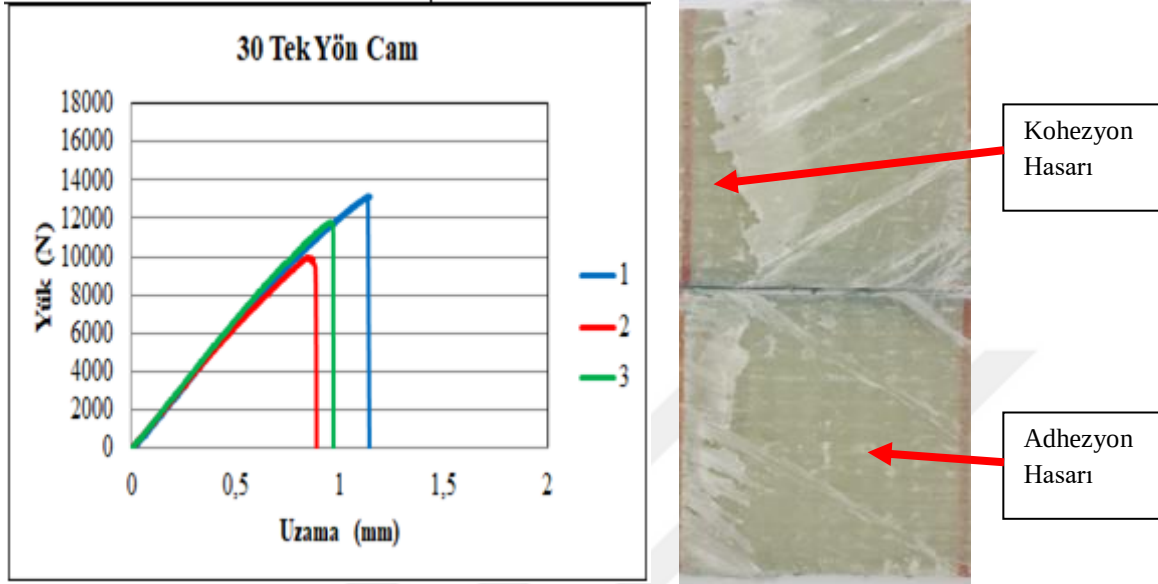
Grafik eğrileri 12700 N civarına kadar birlikte lineer olarak artmakta. 12700 N’ da ikinci numune anlık kırılma ile hasara uğrarken birinci ve üçüncü numune yaklaşık 14000 N yükü taşıyabilmiş ve hasara uğramıştır.



Şekil 5.2. 15° tek yön cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

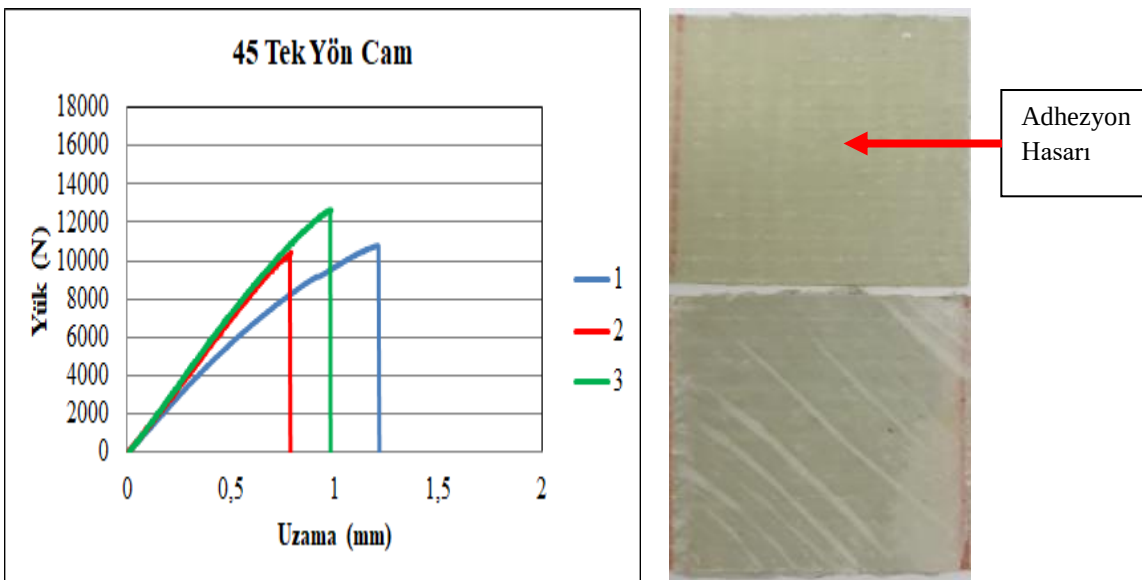
5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Grafik eğrileri 10800 N civarına kadar lineer olarak artmakta, 10800 N'dan sonra kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı ve ortalama 12000 N civarında anlık kırılmasıyla numunelerin hasara uğradığı görülmektedir.



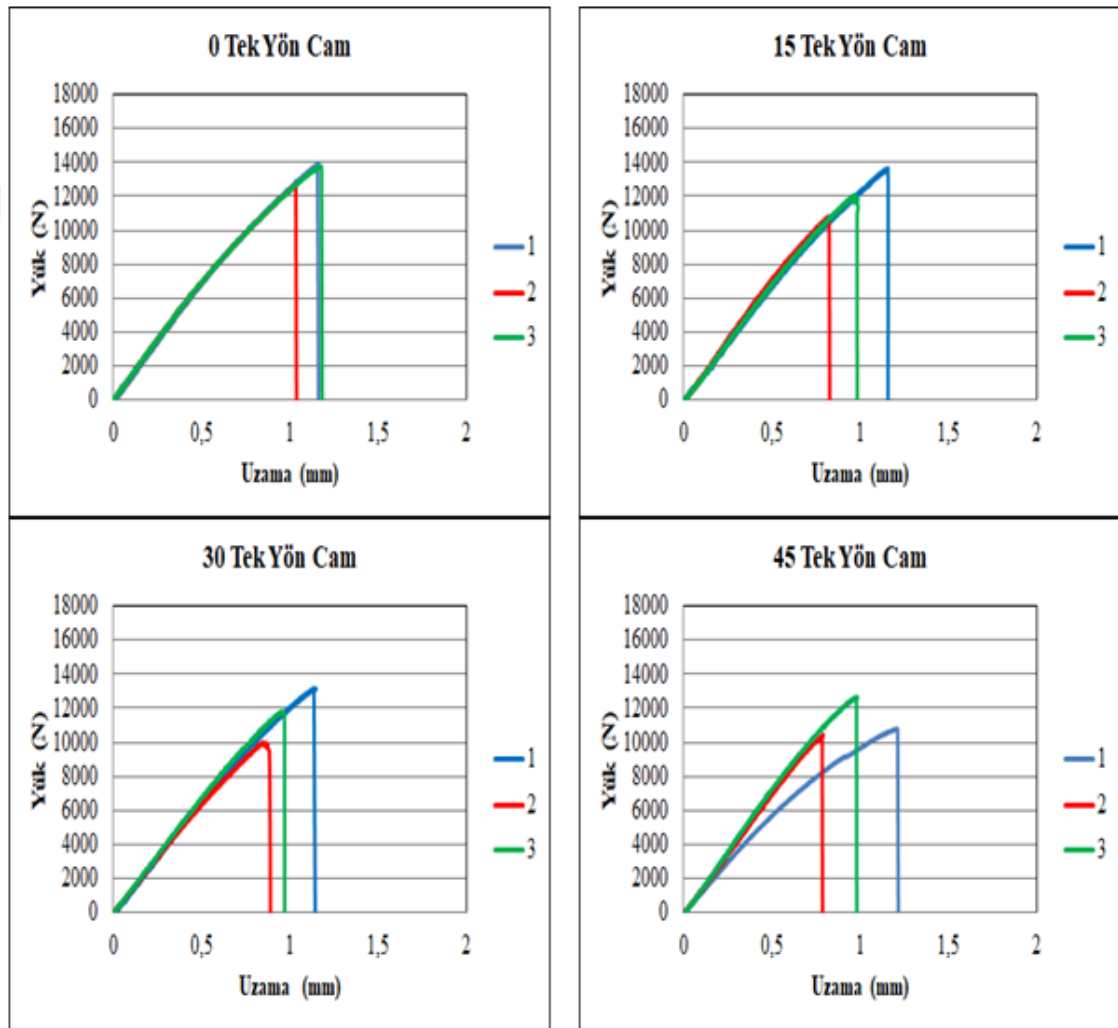
Şekil 5.3. 30° tek yön cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

Grafik eğrileri 10000 N civarına kadar birlikte lineer artmakta, 10000 N'dan sonra kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı ve bununla beraber kırılma hasar yükünün de azaldığı ve ortalama 11500 N civarında anlık kırılmayla numunelerin hasara uğradığı görülmüştür.



Şekil 5.4. 45° tek yön cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

Grafik eğrileri 4000 N civarına kadar lineer olarak birlikte artmakta, birinci numune 10700 N civarında hasara uğrayıp kırılmasına karşın 1.20 mm uzama göstermiştir. İkinci ve üçüncü numune ise 10300 N civarına kadar birlikte lineer olarak artmaya devam etmiş, 10300 N'dan kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı, ayrıca hasar yükünün ortalama 11200 N civarında anlık kırılmasıyla numuneler hasara uğradığı gözlemlenmiştir.



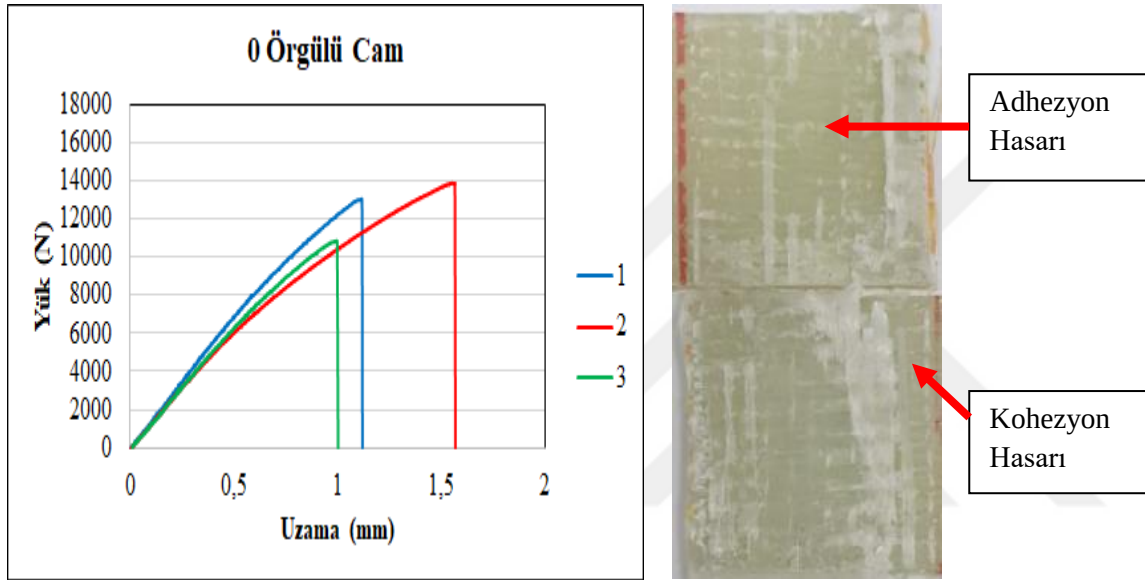
Şekil 5.5. Tek yön cam fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar

Grafik eğrileri incelendiğinde genel olarak ortalama 9375 N civarı olan çekme yükü lineer olarak artmakla beraber ortalama 9375 N'dan sonra kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı görülmüştür. En büyük kırılma hasar yükleri ortalama 12175 N olarak hesaplanmış, takviye açısı 0° iken ortalama hasar yükü 14000 N, 15° iken 12000 N, 30° iken 11500 N ve 45° iken 11300 N olduğu görülmüştür. Tek

yön cam fiber takviye açısı arttıkça kırılma hasar yüklerinin büyüklüğü azalmış olduğu görülmüş, özetle takviye açısı arttıkça çekme yükünün azaldığı tespit edilmiştir.

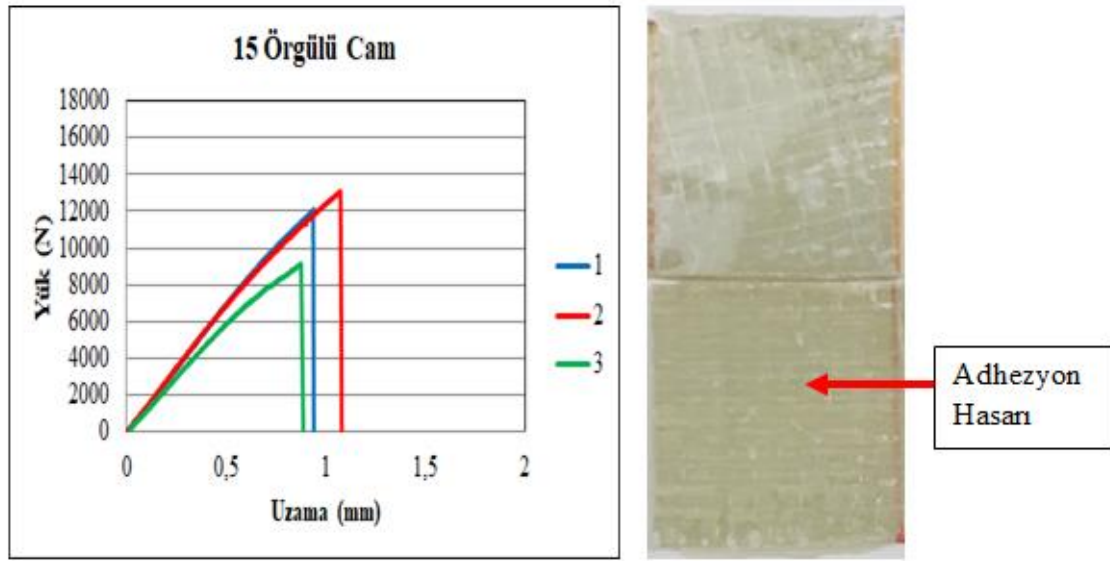
5.2. Örgülü Cam Fiber Takviyeli Yapıştırıcı için Deneysel Sonuçlar

Örgülü cam fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da sunulmuştur. Fiber takviye açısı için 0° , 15° , 30° ve 45° açıları kullanılmıştır.



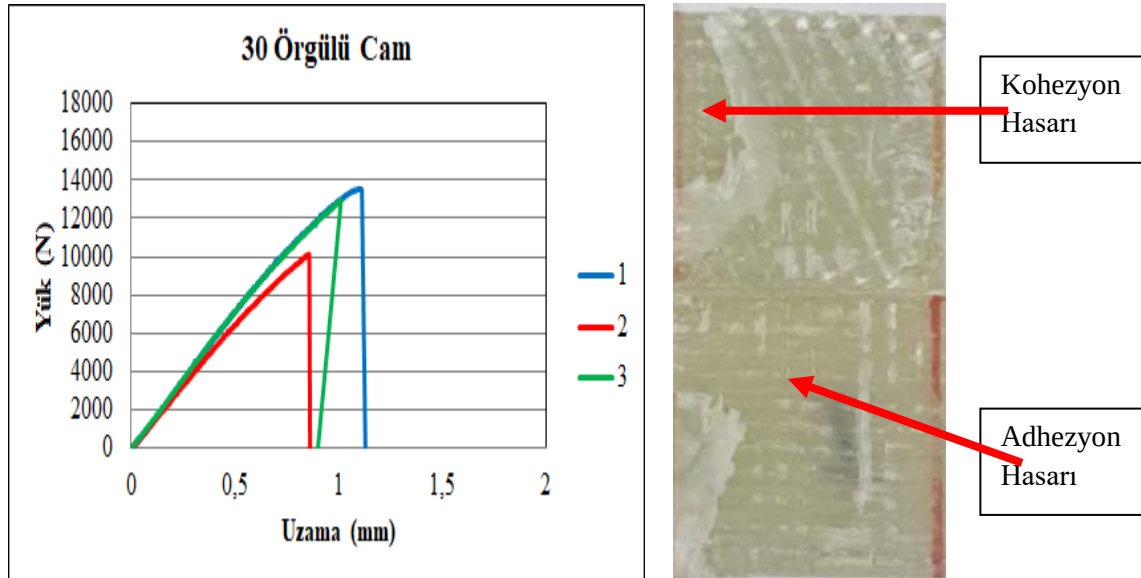
Şekil 5.6. 0° örgülü cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

Grafik eğrileri ortalama 4000 N yüke kadar lineer olarak artmakta, birinci numune 13000 N üçüncü numune ise 10800 N civarında hasara uğrayıp kırılmasına karşın sırasıyla 1.10 mm ve 1 mm uzama göstermişlerdir. Üçüncü numune ise yaklaşık 14000 N yükü taşıyabilmiş ve taşıdığı yüke karşılık ortalama 1.56 mm uzama ile hasara uğramıştır.



Şekil 5.7. 15° örgülü cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

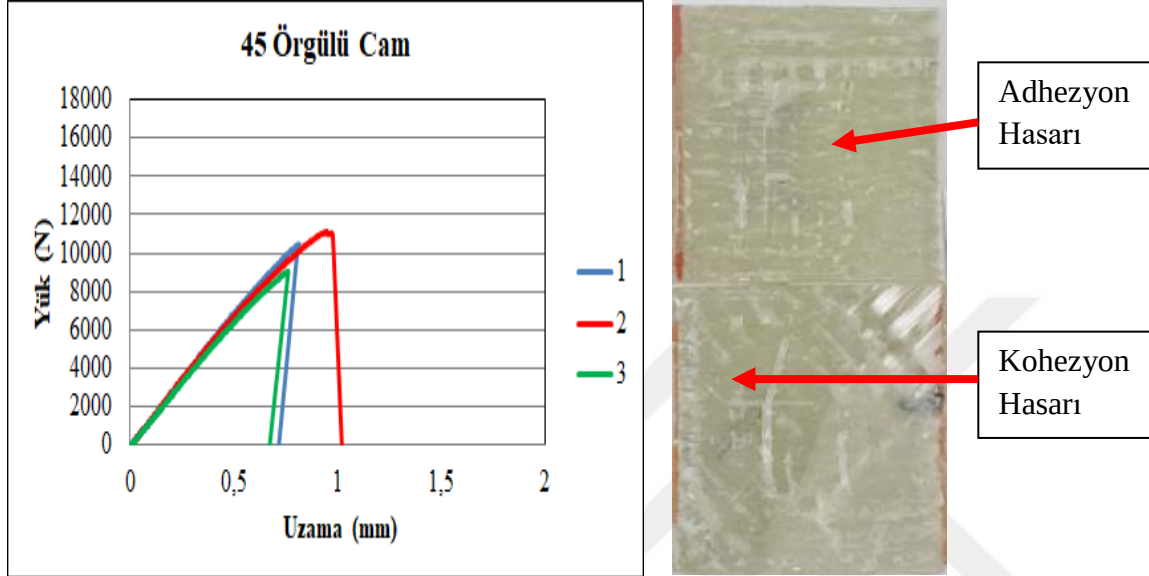
Grafik eğrileri 4000 N civarına kadar lineer olarak birlikte artmakta, üçüncü numune 9130 N civarında anlık kırılma ile hasara uğramıştır. Birinci ve ikinci numune 12000 N civarına kadar birlikte lineer olarak artmaya devam etmiş 12000 N'dan kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı görülmüş, bununla beraber hasar yükünün ortalama 12500 N civarında anlık kırılmasıyla numuneler hasara uğramıştır.



Şekil 5.8. 30° örgülü cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

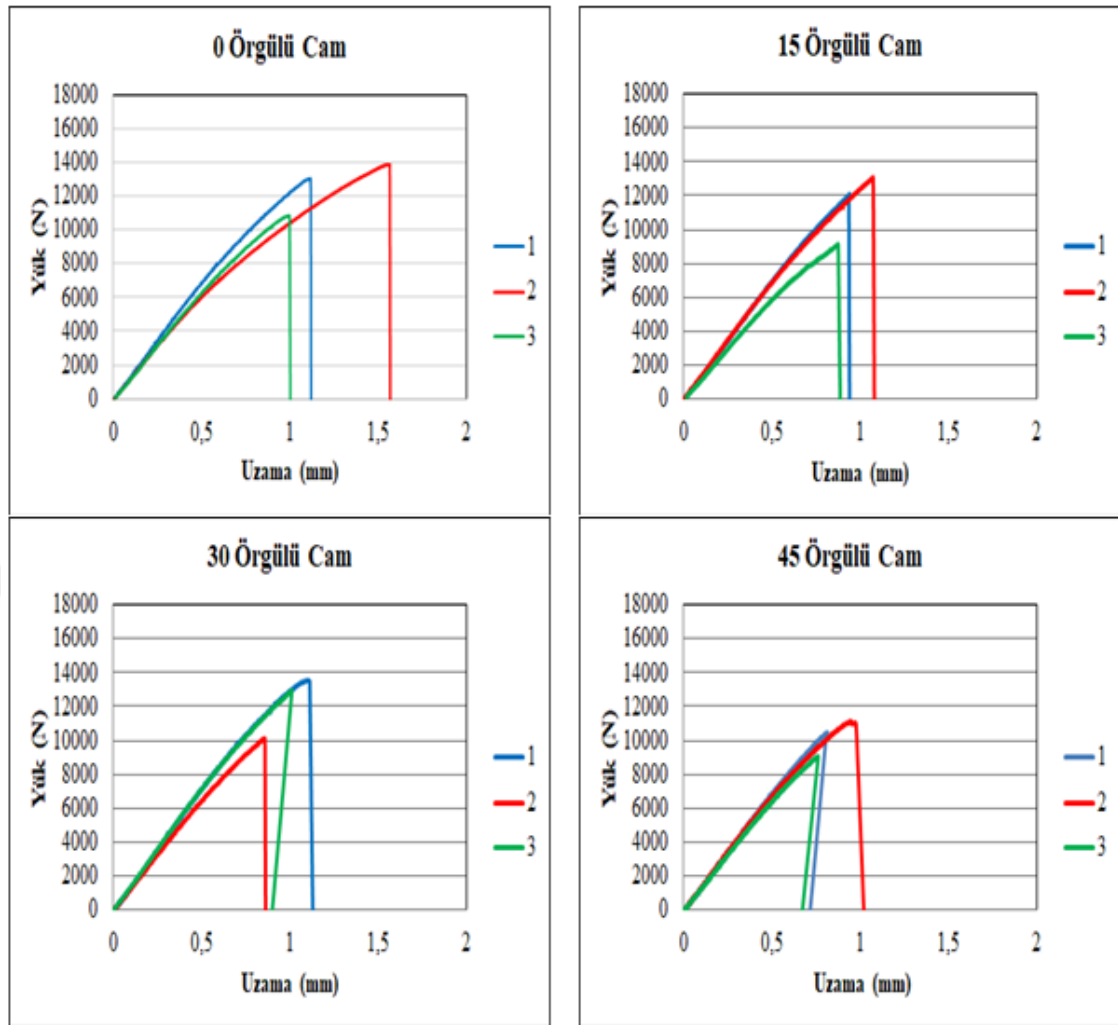
Grafik eğrileri 6000 N civarına kadar lineer olarak birlikte artmakta, ikinci numune 10100 N civarında hasara uğrayıp kırılmasına karşın 0.85 mm uzama

göstermiştir. Birinci ve üçüncü numune ise 12950 N civarına kadar birlikte lineer olarak artmaya devam etmiş, 12950 N'dan kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı görülmüş, ayrıca hasar yükünün ortalama 13225 N civarında anlık kırılmasıyla numuneler hasara uğramıştır.



Şekil 5.9. 45° örgülü cam için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

Grafik eğrileri 8000 N civarına kadar lineer olarak artmakta, üçüncü numune 9050 N civarında hasara uğrayıp 0.76 mm civarında uzama gösterirken birinci numune 10400 N civarında hasara uğramış ve 0,80 mm civarında uzama göstermiştir. İkinci numune ise yaklaşık 11000 N'a kadar yük taşıyabilmiş ve kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı görülmüştür.

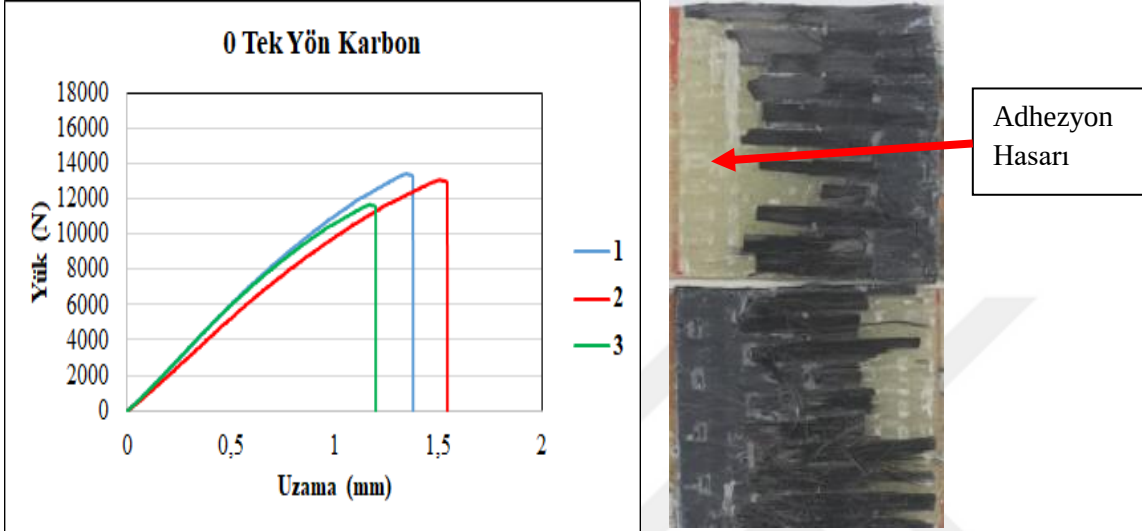


Şekil 5.10. Örgülü cam fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar

Grafik eğrileri incelendiğinde genel olarak ortalama 5500 N civarı olan çekme yükü lineer olarak artmakla beraber ortalama 5500 N'dan sonra kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı görülmüştür. En büyük kırılma hasar yükleri ortalama 12680 N olarak hesaplanmış, takviye açısı 0 iken ortalama hasar yükü 11000 N, 15 iken 13225 N, 30 iken 12500 N ve 45 iken 14000 N olduğu görülmüştür. Örgülü cam fiber takviye açısı 30 iken elde edilen 12500 N'luk çekme yükü istisna olacak şekilde, takviye açısı arttıkça kırılma hasar yüklerinin büyüklükleri azalmış olduğu görülmüş, bilcümle takviye açısı arttıkça çekme yükünün azaldığı tespit edilmiştir.

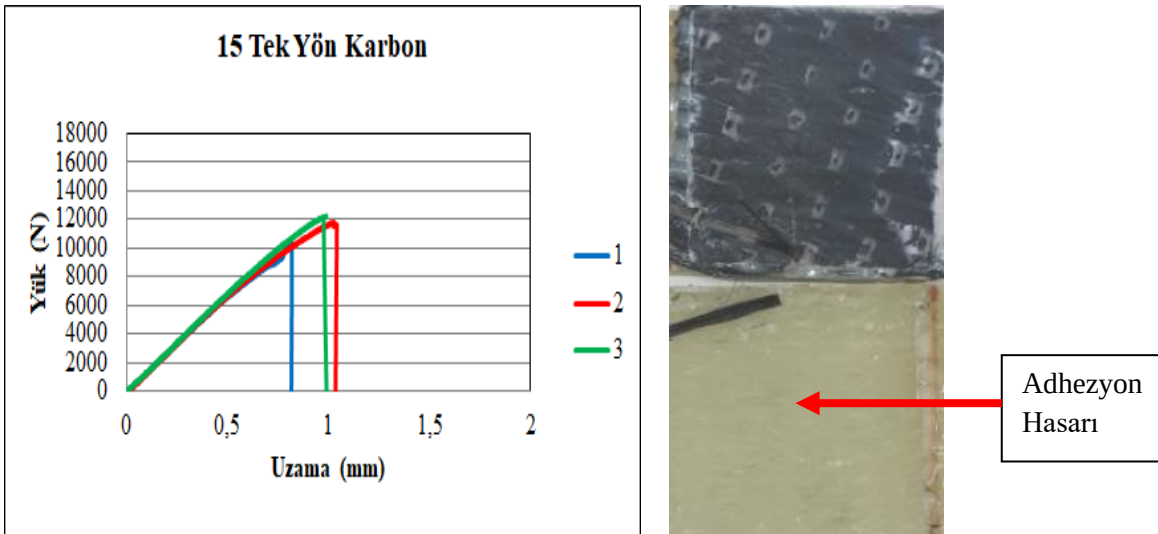
5.3. Tek Yön Karbon Fiber Takviyeli Yapıştırıcı için Deneysel Sonuçlar

Tek yön karbon fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 de sunulmuştur. Fiber takviye açısı için 0° , 15° , 30° ve 45° açıları kullanılmıştır.



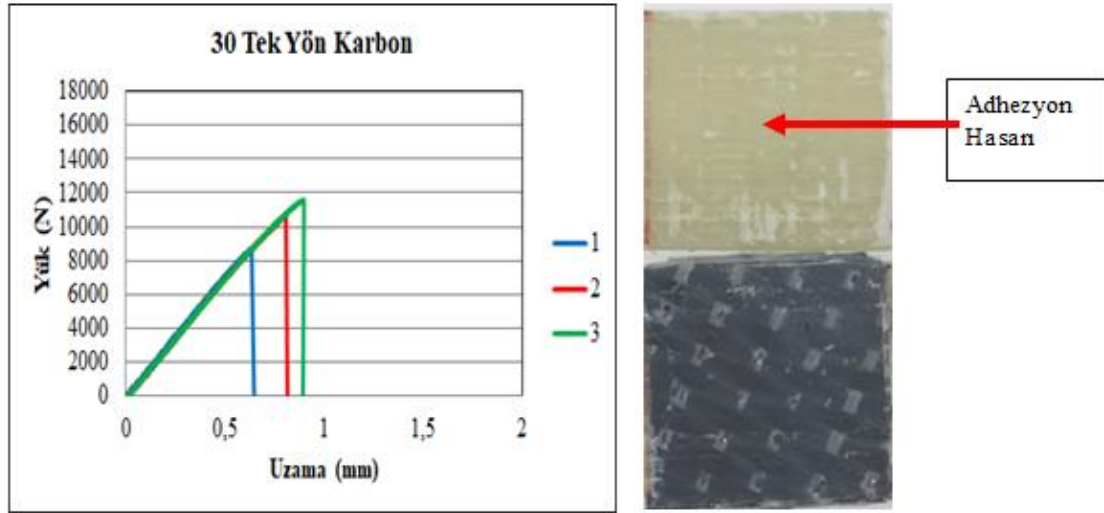
Şekil 5.11. 0° tek yön karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

Grafik eğrileri 2000 N civarına kadar lineer olarak birlikte artmakta, üçüncü numune 11540 N ikinci numune ise 12925 N civarında hasara uğrayıp kırılmasına karşın sırasıyla 1.20 mm ve 1.55 mm uzama göstermişlerdir. Birinci numune ise yaklaşık 13275 N yükü taşıyabilmiş ve taşıdığı yüke karşılık ortalama 1.37 mm uzama ile hasara uğramıştır.



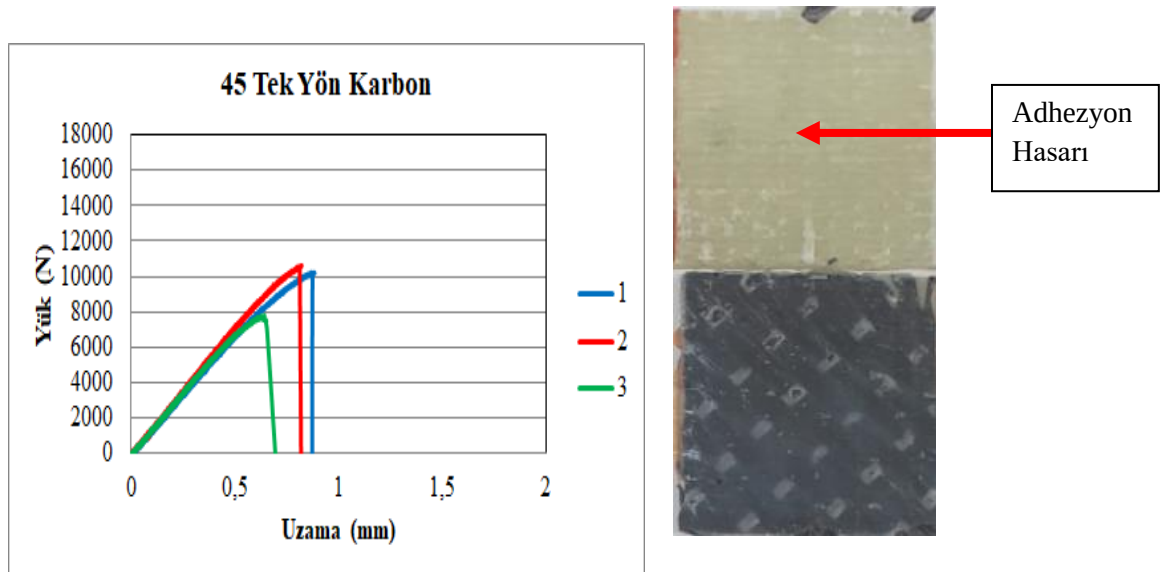
Şekil 5.12. 15° tek yön karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

Grafik eğrileri 10000 N civarına kadar birlikte lineer artmakta, birinci numune 10340 N civarında anlık kırılma ile hasara uğramıştır. Diğer iki numune ortalama 12000 N civarında anlık kırılmayla hasara uğramış, ayrıca kırılmalar gerçekleşene kadar mukavemet artış oranlarının azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.13. 30° tek yön karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

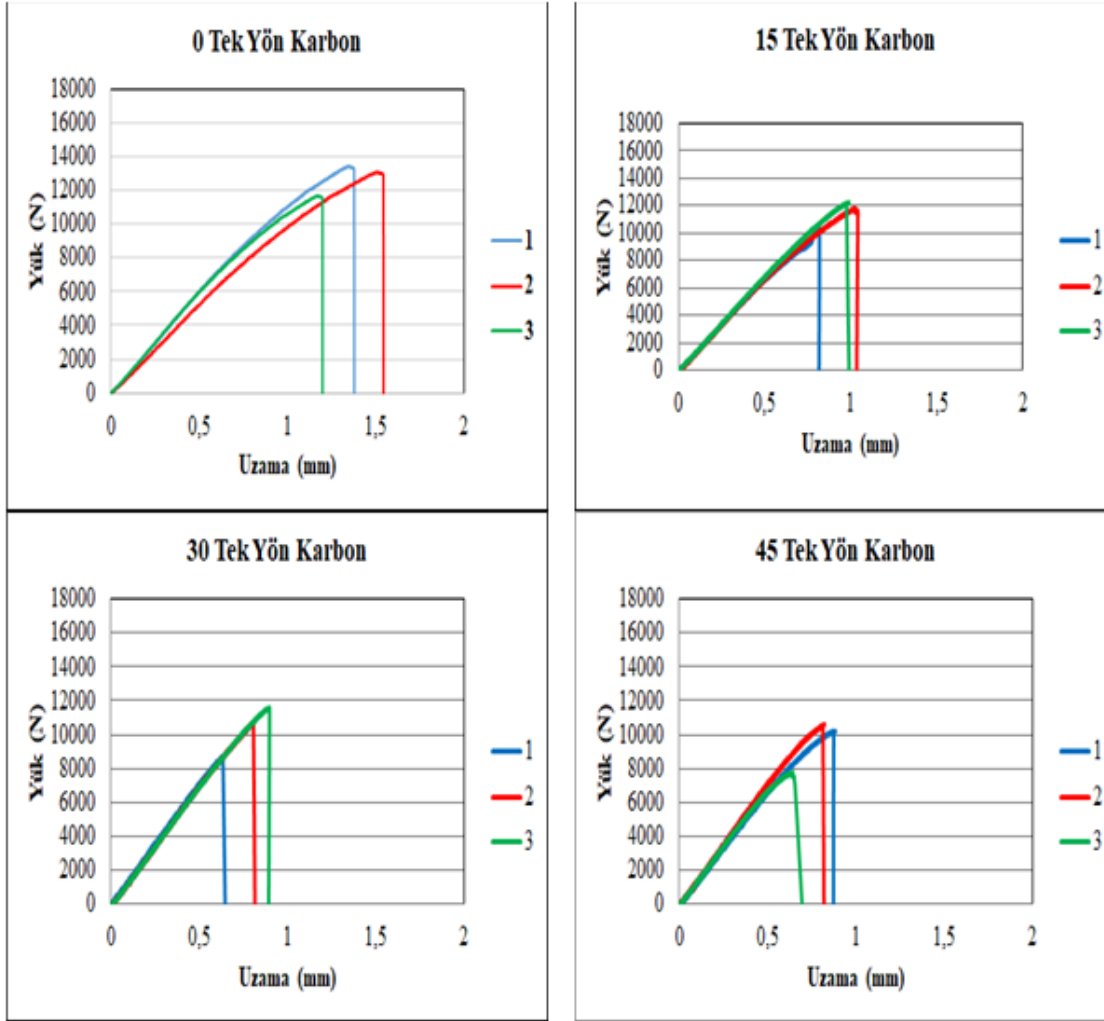
Grafik eğrileri 8600 N civarına kadar birlikte lineer artmakta, 8600 N'dan sonra kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının ve kırılma hasar yükünün azaldığı görülmüştür. Birinci numune 8687 N civarında anlık kırılma hasarına uğramıştır. İkinci ve üçüncü numune 10650 N civarına kadar birlikte lineer olarak artmaya devam etmiş, sırasıyla ortalama 10655 N ve 11600 N civarında anlık kırılmalarla numuneler hasara uğramışlardır.



Şekil 5.14. 45° tek yön karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Grafik eğrileri 7000 N civarına kadar birlikte lineer artmakta, üçüncü numune 7062 N civarında anlık kırılmayla hasara uğramıştır. Birinci ve ikinci numunelerin 7000 N'dan kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranlarının azaldığı görülmüş, bununla beraber hasar yükünün ortalaması 10250 N civarında hesaplanmıştır.



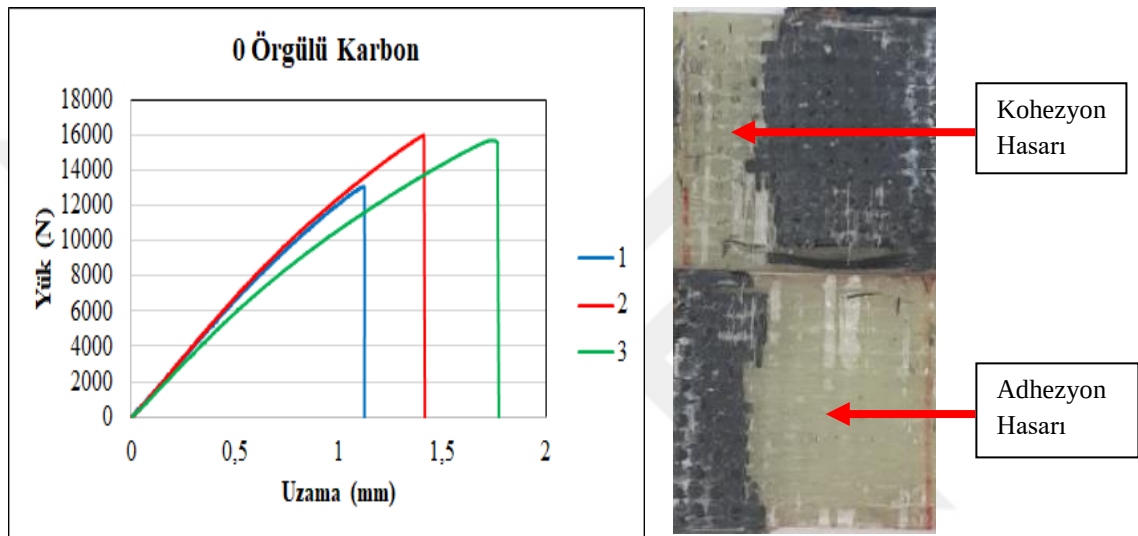
Şekil 5.15. Tek yön karbon fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar

Grafik eğrileri incelendiğinde genel olarak ortalama 6900 N civarı olan çekme yükü lineer olarak artmakla beraber ortalama 6900 N'dan sonra kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı görülmüştür. En büyük kırılma hasar yükleri ortalama 11780 N olarak hesaplanmış, takviye açısı 0 iken ortalama hasar yükü 13275 N, 15 iken 12000 N, 30 iken 11600 N ve 45 iken 10250 N olduğu görülmüştür. Tek yön karbon fiber takviye açısı arttıkça hasar yükleri büyüklüklerinin azalmış olduğu

görülmüştür. Diğer bir deyişle takviye açısı arttıkça çekme yükünün azaldığı tespit edilmiştir.

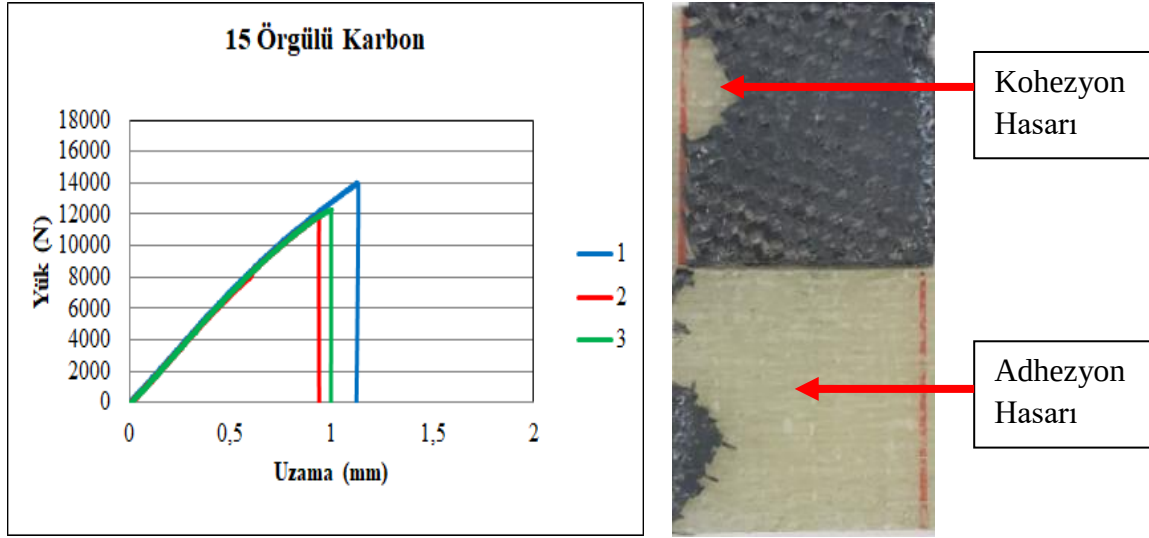
5.4. Örgülü Karbon Fiber Takviyeli Yapıştırıcı için Deneysel Sonuçlar

Örgülü karbon fiber ile takviye edilmiş yapıştırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de sunulmuştur. Fiber takviye açısı için 0° , 15° , 30° ve 45° açıları kullanılmıştır.



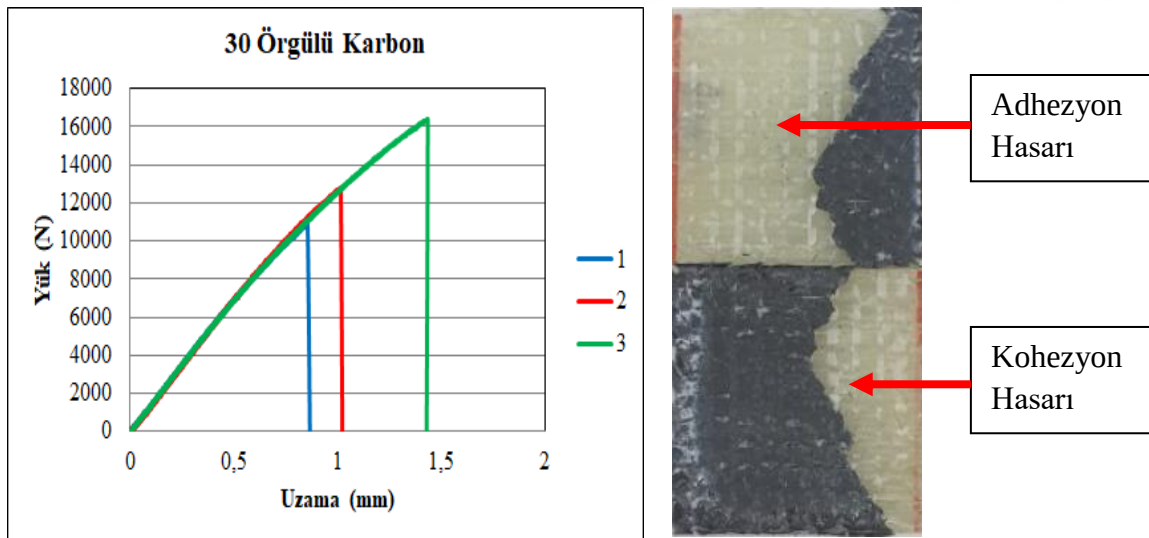
Şekil 5.16. 0° örgülü karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

Grafik eğrileri ortalama 4000 N civarına kadar birlikte lineer artmakta, 4000 N’den sonra üçüncü numune 15450 N civarında hasara uğrayıp kırılmasına karşın 1.77 mm uzama göstermiştir. Birinci ve ikinci numune 12250 N civarına kadar birlikte lineer olarak artmaya devam etmiş, birinci numunenin 13056 N, ikinci numunenin ise 16000 N’a yakın yükü taşıyabildiği görülmüştür.



Şekil 5.17. 15° örgülü karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

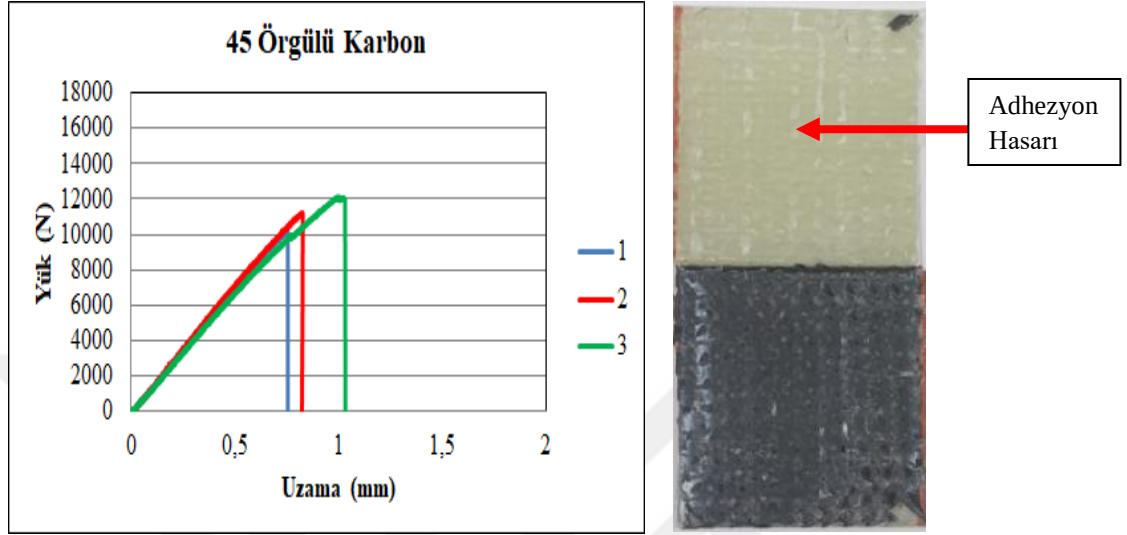
Grafik eğrileri 11900 N civarına kadar lineer olarak artmakta, 11900 N'dan sonra kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı görülmüştür. İkinci numune 11920 N civarında anlık kırılmayla hasara uğramıştır. Birinci ve üçüncü numune ise 12285 N civarına kadar birlikte lineer olarak artmaya devam etmiş, sırasıyla ortalama 13935 N ve 12295 N civarında anlık kırılmalarla hasara uğramışlardır.



Şekil 5.18. 30° örgülü karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

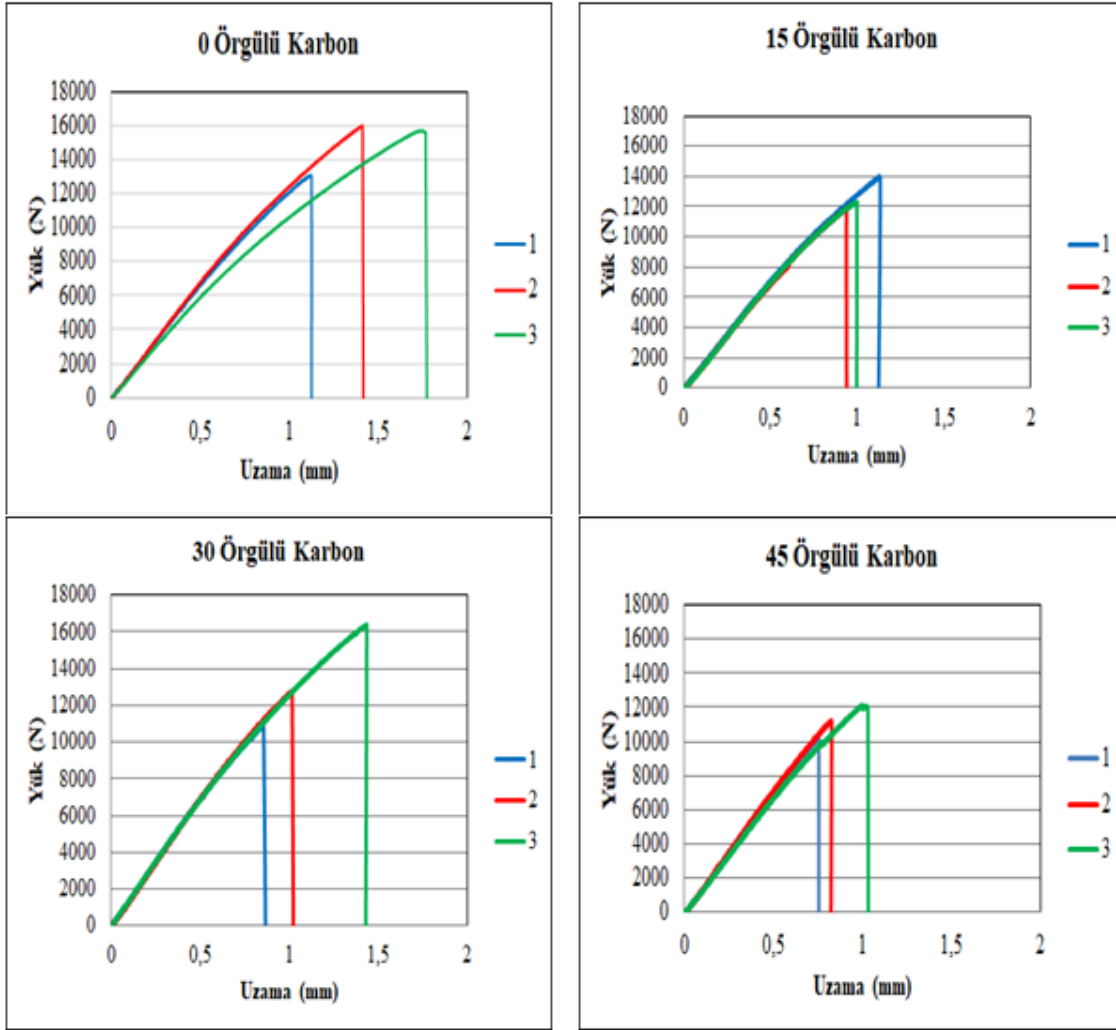
Grafik eğrileri 10900 N civarına kadar lineer artmakta, 10900 N'dan sonra kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının ve kırılma hasar yükünün azaldığı görülmüştür. Birinci numune 11955 N civarında anlık kırılma hasarına uğramıştır.

İkinci ve üçüncü numune ise 12735 N civarına kadar birlikte lineer olarak artmaya devam etmiş, sırasıyla 12740 N ve 16400 N civarında anlık kırılmalarla hasara uğramışlardır.



Şekil 5.19. 45° örgülü karbon için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

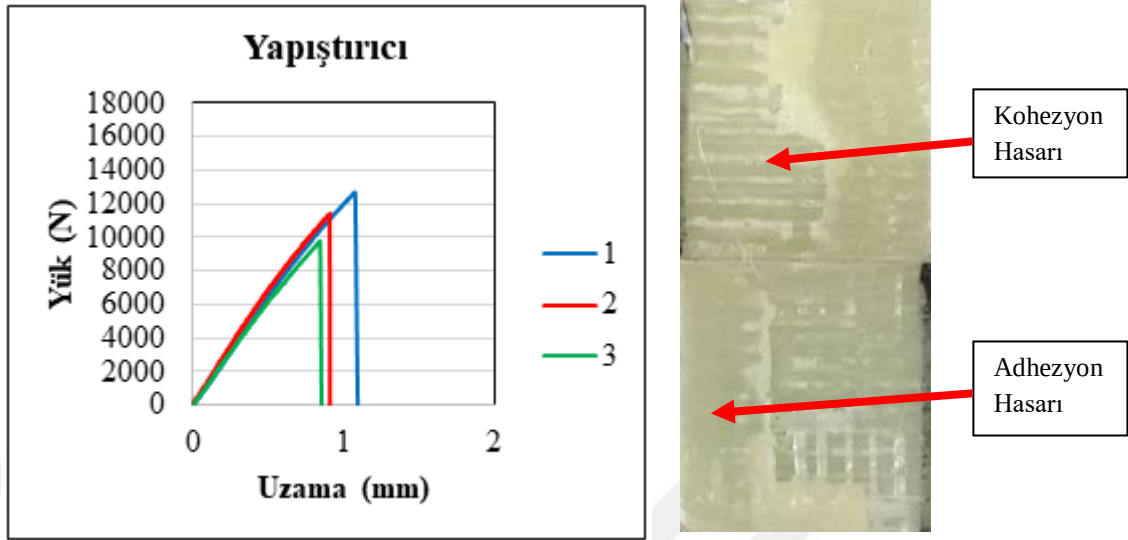
Grafik eğrileri 10000 N civarına kadar birlikte lineer artmakta, 10000 N'dan sonra kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının ve kırılma hasar yükünün azaldığı görülmüştür. Birinci numune 10206 N civarında anlık kırılma hasarına uğramıştır. İkinci ve üçüncü numuneler ise lineer olarak artmaya devam etmiş, sırasıyla ortalama 11200 N ve 12000 N civarında anlık kırılmalarla numuneler hasara uğramışlardır.



Şekil 5.20. Örgülü karbon fiber ile takviye edilmiş yapıstırıcı için elde edilen deneysel sonuçlar

Grafik eğrileri incelendiğinde genel olarak ortalama 9200 N civarı olan çekme yükü lineer olarak artmakla beraber ortalama 9200 N'dan sonra kırılma gerçekleşene kadar mukavemet artış oranının azaldığı görülmüştür. En büyük kırılma hasar yükleri ortalama 14585 N olarak hesaplanmış, takviye açısı 0 iken ortalama hasar yükü 16000 N, 15 iken 13935 N, 30 iken 16400 N ve 45 iken 12000 N olduğu görülmüştür. Örgülü karbon fiber takviye açısı 0 ve 30 iken elde edilen hasar yüklerinin, fiber takviye açısının 15 ve 45 iken elde edilen hasar yüklerinden daha fazla olduğu görülmüştür.

5.5. Takviyesiz Yapıştırıcı İçin Deneysel Sonuçlar

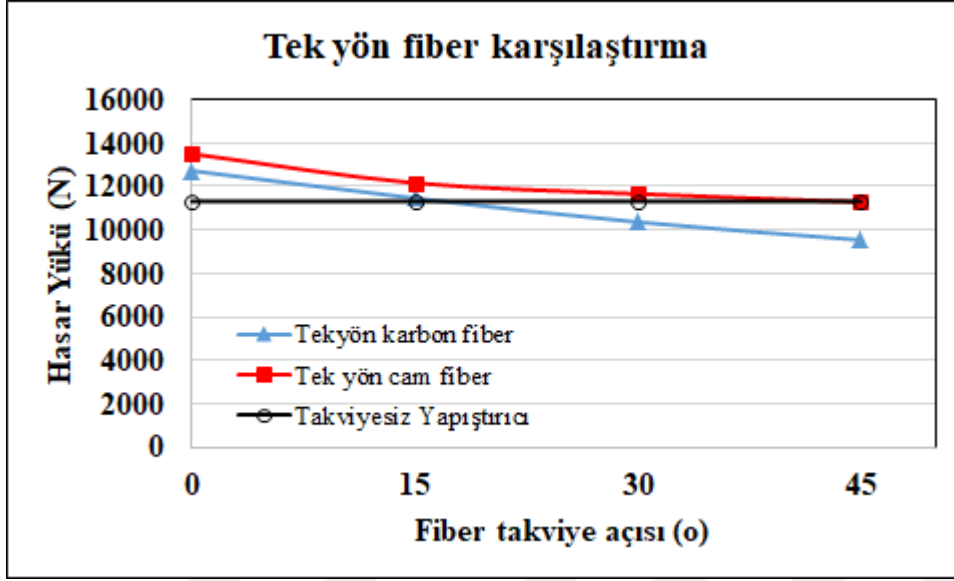


Şekil 5.21. Takviyesiz yapıştırıcı için yük-uzama değerler grafiği ve hasar gösterimi

Grafik eğrileri ortalama 4000 N civarına kadar birlikte lineer artmakta, 4000 N'dan sonra üçüncü numune 9790 N civarında hasara uğrayıp kırılmasına karşın 0.84 mm uzama göstermiştir. Birinci ve ikinci numune 9940 N civarına kadar birlikte lineer olarak artmaya devam etmiş, birinci numunenin 12670 N, ikinci numunenin ise 11385 N'a yakın yükü taşıyabildiği görülmüştür.

5.6. Yapıştırıcının Fiber Takviye Doğrultusuna Göre Karşılaştırılması

Şekil 5.5 ve Şekil 5.15'de gösterilen deneysel sonuç grafiklerindeki her bir numuneye ait en büyük yük değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak hasar yükü değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar kullanılarak Şekil 5.22'de gösterilen tek yön fiber karşılaştırma grafiği grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.22. Takviyesiz yapıştırıcı ile takviyeli tek yön fiberlerin karşılaştırılması

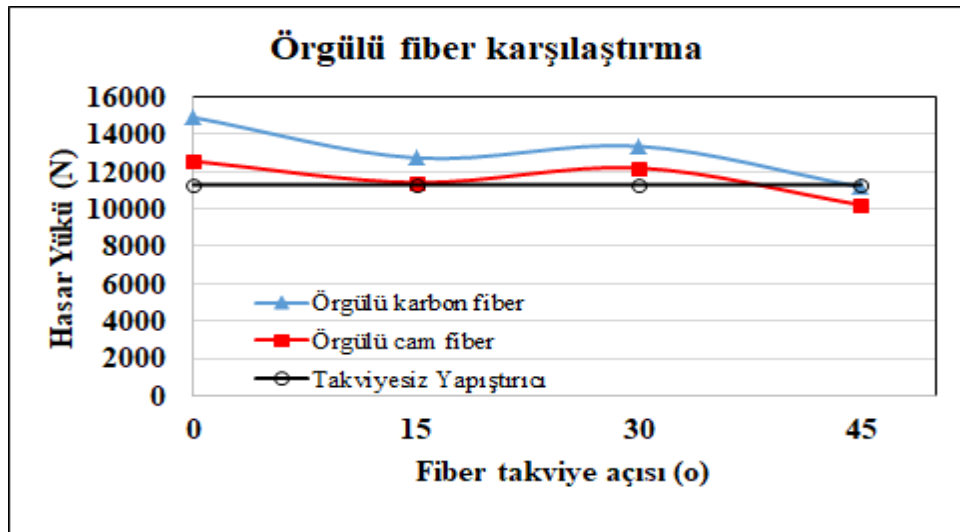
Şekil 5.22’de görüldüğü gibi yapıştırıcının tek yön cam fiber ve tek yön karbon fiber kullanılarak takviye edilmesi sonucunda hasar yüklerinin değiştiği görülmektedir. Hasar yüklerinin takviye açısından değerlendirilmesinde 30° ve 45° fiber takviye açısı değerleri için yapışma bağlantısı mukavemetinin sadece yapıştırıcı kullanılmış numunelere göre düşük olduğu, 0° ve 15° fiber takviye açıları içinse hasar yüklerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek hasar yükünün 0° cam fiber takviye açılı yapıştırıcı için 13450.61 N, 0° karbon fiber takviye açılı yapıştırıcı için ise 12579.87 N olarak elde edilirken, en düşük hasar yükü ise 45° cam fiber takviye açısına sahip yapıştırıcı için 11260,43 N, 45° karbon fiber takviye açısına sahip yapıştırıcı için ise 9215,16 N olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarındaki sonuçların daha iyi anlaşılması açısından elde edilen değerler Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Tek yön fiberlerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

Fiber takviye açısı (°)	Tek Yön Cam Fiber Takviyeli Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	STD Sapma %	Takviyesiz Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	Değişim Oranı %
0	13450.61	4.86	11308.9	+18.94
15	12163.47	11.59	11308.9	+7.56
30	11377.46	15.77	11308.9	+0.61
45	11260.43	10.71	11308.9	-0.43
Fiber takviye açısı (°)	Tek Yön Karbon Fiber Takviyeli Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	STD Sapma %	Takviyesiz Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	Değişim Oranı %
0	12579.87	7.04	11308.9	+11.24
15	11330,22	7.85	11308.9	+0.19
30	10312,45	14.38	11308.9	-8.81
45	9215,16	20.30	11308.9	-18.51

Çizelge 5.1 incelendiğinde fiber takviye açısının bağlantı dayanımına tek yön cam fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda % 19 civarında, tek yön karbon fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda ise %11 civarında değişen oranlarda arttırabildiği görülmüştür.

Şekil 5.10 ve Şekil 5.20’de gösterilen deneysel sonuç grafiklerindeki her bir numuneye ait en büyük yük değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak hasar yükü değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar kullanılarak da Şekil 5.23’de gösterilen örgülü fiber karşılaştırma grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.23. Takviyesiz yapıştırıcı ile takviyeli örgülü fiberlerin karşılaştırılması

Şekil 5.23’de görüldüğü gibi yapıştırıcının örgülü cam fiber ve örgülü karbon fiber kullanılarak takviye edilmesi sonucunda hasar yüklerinin değiştiği görülmektedir. Hasar yüklerinin takviye açısından değerlendirilmesinde 45° fiber takviye açısı değerleri için yapışma bağlantısı mukavemetinin sadece yapıştırıcı kullanılmış numunelere göre düşük olduğu, 0°, 15° ve 30° fiber takviye açıları içinse hasar yüklerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek hasar yükünün 0° cam fiber takviye açılı yapıştırıcı için 12537,87 N, 0° karbon fiber takviye açılı yapıştırıcı için ise 14832,98 N olarak elde edilirken, en düşük hasar yükü ise 45° cam fiber takviye açısına sahip yapıştırıcı için 10140,82 N, 45° karbon fiber takviye açısına sahip yapıştırıcı için ise 11144,07 N olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarındaki sonuçların daha iyi anlaşılması açısından elde edilen değerler Çizelge 5.2’de sunulmuştur.

Çizelge 5.2 Örgülü fiberlerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

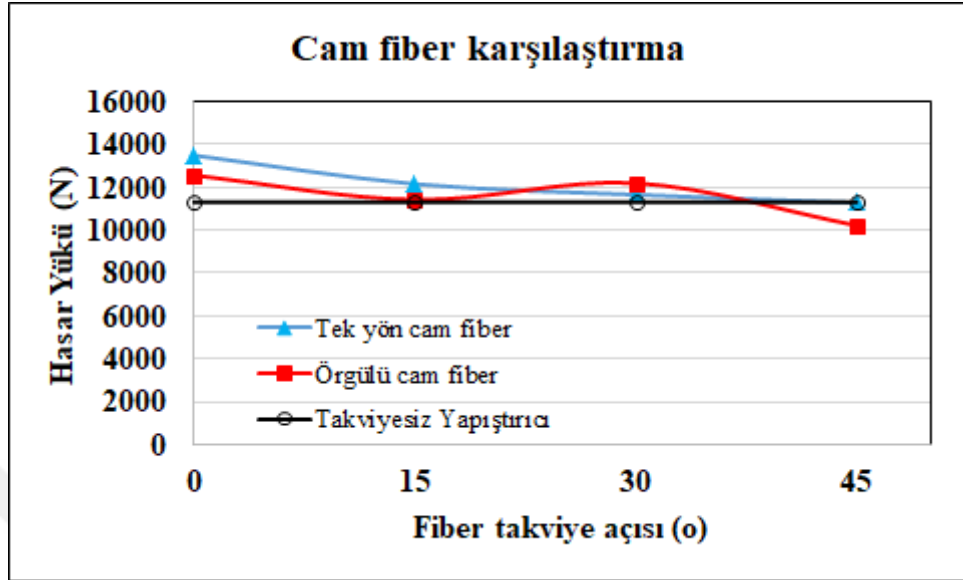
Fiber takviye açısı (°)	Örgülü Cam Fiber Takviyeli Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	STD Sapma %	Takviyesiz Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	Değişim Oranı %
0	12537.87	12.14	11308.9	+10.86
15	11424.59	17.91	11308.9	+1.02
30	12180.56	14.94	11308.9	+7.70
45	10140.82	9.70	11308.9	-10.32
Fiber takviye açısı (°)	Örgülü Karbon Fiber Takviyeli Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	STD Sapma %	Takviyesiz Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	Değişim Oranı %
0	14832.98	10.53	11308.9	+31.16
15	12714.47	8.43	11308.9	+12.43
30	13337.07	20.83	11308.9	+17.93
45	11144.07	8.12	11308.9	-1.45

Çizelge 5.2 incelendiğinde fiber takviye açısının bağlantı dayanımına örgülü cam fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda % 10 civarında, örgülü karbon fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda ise % 31 civarında değişen oranlarda arttırabildiği görülmüştür.

5.7. Yapıştırıcının Takviye Türüne Göre Karşılaştırılması

Şekil 5.5 ve Şekil 5.10’da gösterilen deneysel sonuç grafiklerindeki her bir numuneye ait en büyük yük değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak hasar yükü

değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar kullanılarak Şekil 5.24’de gösterilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.24. Takviyesiz yapıştırıcı ile cam fiberlerin karşılaştırılması

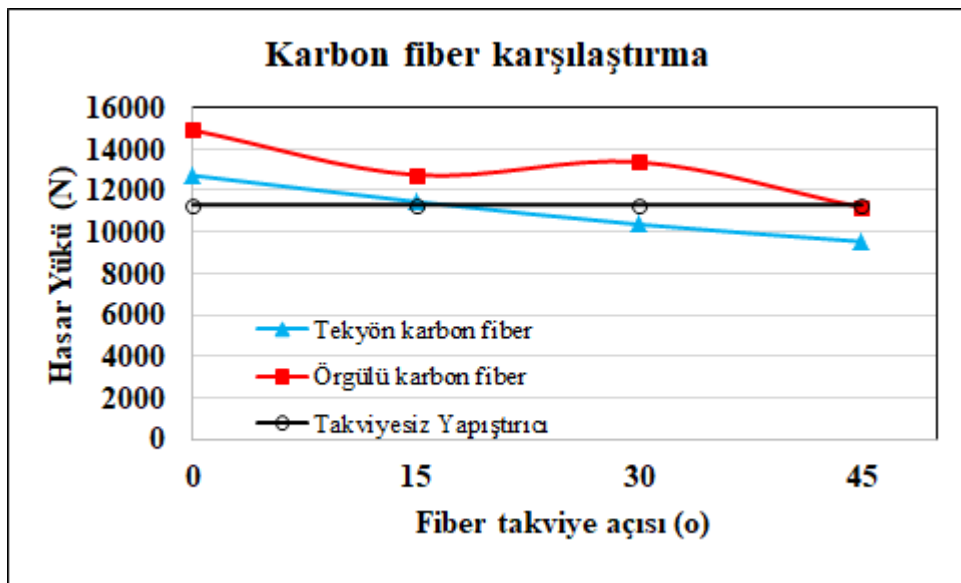
Şekil 5.24’de görüldüğü gibi yapıştırıcının tek yön cam fiber ve örgülü cam fiber kullanılarak takviye edilmesi sonucunda hasar yüklerinin değiştiği görülmektedir. Hasar yüklerinin takviye açısından değerlendirilmesinde 45° fiber takviye açısı değerleri için yapışma bağlantısı mukavemetinin sadece yapıştırıcı kullanılmış numunelere göre düşük olduğu, 0°, 15° ve 30° fiber takviye açıları içinse hasar yüklerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek hasar yükünün 0° tek yön cam fiber takviye açılı yapıştırıcı için 13450,61 N, 0° örgülü cam fiber takviye açılı yapıştırıcı için ise 12537,87 N olarak elde edilirken, en düşük hasar yükü ise 45° tek yön cam fiber takviye açısına sahip yapıştırıcı için 11260,43 N, 45° örgülü cam fiber takviye açısına sahip yapıştırıcı için ise 10140,82 N olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarındaki sonuçların daha iyi anlaşılması açısından elde edilen değerler Çizelge 5.3’de sunulmuştur.

Çizelge 5.3. Cam fiberlerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

Fiber takviye açısı (°)	Tek Yön Cam Fiber Takviyeli Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	STD Sapma %	Takviyesiz Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	Değişim Oranı %
0	13450.61	4.86	11308.9	+18.94
15	12163.47	11.59	11308.9	+7.56
30	11377.46	15.77	11308.9	+0.61
45	11260.43	10.71	11308.9	-0.43
Fiber takviye açısı (°)	Örgülü Cam Fiber Takviyeli Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	STD Sapma %	Takviyesiz Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	Değişim Oranı %
0	12537.87	12.14	11308.9	+10.86
15	11424.59	17.91	11308.9	+1.02
30	12180.56	14.94	11308.9	+7.70
45	10140.82	9.70	11308.9	-10.32

Çizelge 5.3 incelendiğinde fiber takviye türünün bağlantı dayanımına tek yön cam fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda % 19 civarında, örgülü cam fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda ise %10 civarında değişen oranlarda arttırabildiği görülmüştür.

Şekil 5.15 ve Şekil 5.20’de gösterilen deneysel sonuç grafiklerindeki her bir numuneye ait en büyük yük değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak hasar yükü değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlar kullanılarak Şekil 5.25’de gösterilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 5.25. Takviyesiz yapıştırıcı ile karbon fiberlerin karşılaştırılması

Şekil 5.25’de görüldüğü gibi yapıştırıcının tek yön karbon fiber ve örgülü karbon fiber kullanılarak takviye edilmesi sonucunda hasar yüklerinin değiştiği görülmektedir. Hasar yüklerinin takviye açısından değerlendirilmesinde 45° fiber takviye açısı değerleri için yapışma bağlantısı mukavemetinin sadece yapıştırıcı kullanılmış numunelere göre düşük olduğu, 0°, 15° ve 30° fiber takviye açıları içinse hasar yüklerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. 30° fiber takviye açılı tek yön karbon fiberin hasar yükü değeri için yapışma bağlantısı dayanımı da takviyesiz yapıştırıcı kullanılmış numunelere göre düşük olduğu tespit edilmiştir. En yüksek hasar yükünün 0° tek yön karbon fiber takviye açılı yapıştırıcı için 12579,87 N, 0° örgülü karbon fiber takviye açılı yapıştırıcı için ise 14832,98 N olarak elde edilirken, en düşük hasar yükü ise 45° tek yön karbon fiber takviye açısına sahip yapıştırıcı için 9215,16 N, 45° örgülü karbon fiber takviye açısına sahip yapıştırıcı için ise 11144,07 N olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarındaki sonuçların daha iyi anlaşılması açısından elde edilen değerler Çizelge 5.4’de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Karbon fiberlerin hasar yüklerinin karşılaştırılması

Fiber takviye açısı (°)	Tek Yön Karbon Fiber Takviyeli Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	STD Sapma %	Takviyesiz Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	Değişim Oranı %
0	12579.87	7.04	11308.9	+11.24
15	11330.22	7.85	11308.9	+0.19
30	10312.45	14.38	11308.9	-8.81
45	9215.16	20.30	11308.9	-18.51
Fiber takviye açısı (°)	Örgülü Karbon Fiber Takviyeli Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	STD Sapma %	Takviyesiz Yapıştırıcı Hasar Yükü (N)	Değişim Oranı %
0	14832.98	10.53	11308.9	+31.16
15	12714.47	8.43	11308.9	+12.43
30	13337.07	20.83	11308.9	+17.93
45	11144.07	8.12	11308.9	-1.45

Çizelge 5.4 incelendiğinde fiber takviye türünün bağlantı dayanımına tek yön karbon fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda % 11 civarında, örgülü karbon fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda ise % 31 civarında değişen oranlarda arttırabildiği görülmüştür.

5.8. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmanın amacı sürekli fiberler kullanılarak takviye edilmiş yapıştırıcıların tek tesirli yapışma bağlantıları ile birleştirilmiş kompozit levhalarda hasar davranışlarının araştırılmasıdır. Çalışmada;

1. Sürekli fiber kullanılarak takviye edilmiş yapıştırıcıların kullanıldığı bağlantılarda kullanılan sürekli fiber çeşidine göre mukavemetinin değiştiği görülmüş, takviyesiz yapıştırıcıya göre hasar yüklerinin arttığı tespit edilmiştir.

2. Fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıların 0° , 15° , 30° ve 45° lik açılarla tek tesirli yapıştırma bağlantılarında hasar yüklerini değiştirdiği görülmüştür.

3. Tek yönlü cam ve tek yön karbon fiberlerin takviye edildiği yapışma bağlantı hasar yüklerinin takviye açısından değerlendirilmesinde 30° ve 45° fiber takviye açısı değerleri için yapışma bağlantısı mukavemetinin sadece yapıştırıcı kullanılmış numunelere göre düşük olduğu, 0° ve 15° fiber takviye açıları içinse hasar yüklerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Çizelge 5.1 incelendiğinde fiber takviye açısının bağlantı dayanımına tek yön cam fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda % 19 civarında, tek yön karbon fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda ise %11 civarında değişen oranlarda arttırabildiği görülmüştür.

4. Örgülü cam ve örgülü karbon fiberlerin takviye edildiği yapışma bağlantı hasar yüklerinin takviye açısından değerlendirilmesinde 45° fiber takviye açısı değerleri için yapışma bağlantısı mukavemetinin sadece yapıştırıcı kullanılmış numunelere göre düşük olduğu, 0° , 15° ve 30° fiber takviye açıları içinse hasar yüklerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Çizelge 5.2 incelendiğinde fiber takviye açısının bağlantı dayanımına örgülü cam fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda % 10 civarında, örgülü karbon fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda ise %31 civarında değişen oranlarda arttırabildiği görülmüştür.

5. Takviyesiz yapıştırıcı ile tek yön cam fiber ve örgülü cam fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıların kullanıldığı yapışma bağlantıları karşılaştırılmış, hasar yüklerinin takviye açısından değerlendirilmesinde 45° fiber takviye açısı değerleri için yapışma bağlantısı mukavemetinin sadece yapıştırıcı kullanılmış numunelere göre düşük olduğu, 0° , 15° ve 30° fiber takviye açıları içinse hasar yüklerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Çizelge 5.3 incelendiğinde fiber takviye türünün bağlantı dayanımına tek

yön cam fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda % 19 civarında, örgülü cam fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda ise %10 civarında değişen oranlarda arttırabildiği görülmüştür.

6. Yapıştırıcının tek yön karbon fiber ve örgülü karbon fiber kullanılarak takviye edilmesi sonucunda hasar yüklerinin değiştiği görülmüştür. Hasar yüklerinin takviye açısından değerlendirilmesinde 45° fiber takviye açısı değerleri için yapışma bağlantısı mukavemetinin sadece yapıştırıcı kullanılmış numunelere göre düşük olduğu, 0°, 15° ve 30° fiber takviye açıları içinse hasar yüklerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. 30° fiber takviye açılı tek yön karbon fiberin hasar yükü değeri için yapışma bağlantısı dayanımı da takviyesiz yapıştırıcı kullanılmış numunelere göre düşük olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 5.4 incelendiğinde fiber takviye türünün bağlantı dayanımına tek yön karbon fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda % 11 civarında, örgülü karbon fiberle takviye edilmiş yapıştırıcıda ise %31 civarında değişen oranlarda arttırabildiği görülmüştür.

6. Hasar yükleri incelendiğinde en yüksek hasar yükünün 0° takviye açılı örgülü karbonla takviye edilmiş yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda olduğu tespit edilmiştir.

7. Hasar yükleri ile bağlantıda oluşan hasar tiplerinin değişimi arasında bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

8. Deneysel çalışma sırasında kırılmış yüzeylerdeki hasarlar incelenmiş, yüzeylerde görülen adhezyon ve kohezyon hasarların hasar yükleriyle bağlantılı olduğu görülmüştür. Adhezyon hasarının görüldüğü yapışma bağlantıları ile hem adhezyon hem de kohezyon bağlantılarının bir arada görüldüğü yapışma bağlantıları karşılaştırıldığında sadece adhezyon hasar tipinin görüldüğü bağlantılarda hasar yükünün azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın adhezyon ve kohezyon hasar tipinin bir arada görüldüğü bağlantılarda ise hasar yükünün ciddi oranda arttığı görülmüştür.

9. Sürekli fiberlerle takviye edilen yapıştırıcılarda yapılan seçimler ile takviye elemanı olarak örgülü karbon, takviye açısı olarak 0° seçilen örgülü karbonun, yapıştırıcının hasar yükünü %31 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.



6. KAYNAKLAR

- Adin, H., İşcan, B.,Turgut, A., 2010. Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Bulk Numuneler Yardımıyla Belirlenmesi, e-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences, Article number: 1A0101, Volume: 5, Number: 5, 507-514 sayfa
- Agarwal, B.D., 1980. Analysis and performance of fiber composites, Wiley- Interscience, New York, 355.
- Avila, A.F., Bueno, P.O., 2004. An experimental and numerical study on adhesive joints for composites, **Composite Structures**, 64, (2004), 531-537
- Aydın, M.D., 2003. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli yapışma bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Aydın, M.D., Özel, A., Temiz, Ş., 2005. The effect of yapışan thickness on the failure of adhesively-bonded single-lap joints, Journal of Adhesion Science and Technology, 19:8, 705-718, DOI: 10.1163/1568561054890499
- Aydın, M.D., Temiz, Ş., Özel, A., 2004. Yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlendiği deneysel yöntemler, **MMO Mühendis ve Makine Dergisi** (Eylül 2004), 18-23 sayfaları
- Campilho, R.D.S.G., Moura, M.F.S.F., Domingues, J.J.M.S., 2005. Modelling single and double-lap repairs on composite materials, **Composites Science and Technology** 65, (2005), 1948-1958
- Çelik, A., 2015. Yama ve yapıştırıcı kullanılarak tamir edilmiş çentikli kompozit levhaların hasar davranışlarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır.
- Demir, M.E., 2016. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının üç boyutlu gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Batman.
- Gonçalves, J.P.M., Moura, M.F.S.F., Castro, P.M.S.T.,2002. A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints, **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 22 (2002) 357–365
- Her, S.C.,1999. Stress analysis of adhesively-bonded lap joints, **Composite Structures**, 47,(1999), 673-678
- Khalili, S.M.R., Shokuhfar, A. ,Hoseini, S.D., Bidkhor, M., Khalili, S., 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 & Adhesives**, 28, (2008), 436-444
- Kırkayak, L., 2019. Yapıştırma bağlantılı kompozitlerde yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımına etkisi, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 25(1), 27-33, 2019, doi: 10.5505/pajes.2018.54289
- Loctite Worldwide Design Handbook, 1988.
- M.E.B. 2014. Gemi yapımında kullanılan malzemeler, Ankara.
- Moreira and Nunes, 2014. Experimental analysis of bonded single lap joint with flexible adhesive. Applied Adhesion Science 2:1, doi:10.1186/2196-4351-2-1
- Pandey, P.C., Shankaragouda, H., Singh, A.Kr.,1999. Nonlinear analysis of adhesively bonded lap joints considering viscoplasticity in adhesives, **Computers and Structures**, 70 (1999) 387±413

- Reedy, E.D., Guess, T.R.,1996. Butt joint strength: effect of residual stress and stress relaxation, **Journal of Adhesion Science and Technology**, 10:1, 33-45, DOI: 10.1163/156856196X00436
- Sawyer, J.W., Cooper, P.A., 1981. Analytical and Experimental Results for Bonded Single Lap Joints with Preformed Yapışans, **AIAA Journal**, VOL. 19, NO. 11,
- Sayman, O., 2012. Elasto-plastic stress analysis in an adhesively bonded single-lap joint, Elsevier Composites: **Part B**, 43, 204-209.
- Sevinç, E., 2019. Sürekli fiber takviyeli termoplastik kompozit esaslı çok katmanlı piramit kafes çekirdekli çok hafif sandviç plakaların statik ve dinamik incelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Solmaz, M.Y., 2008. Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
- Taib, A.A., Boukhili, R., Achiou, S., Gordon, S., Boukehili, H., 2006. Bonded joints with composite yapışans part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and yapışan stiffness on fracture, **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 26, (2006), 226-236
- Temiz, V., 2003. İtü Ders Notları.
- Turan, K., Kaman, M.O. 2010. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ilerlemeli hasar analizi, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, Cilt 16, Sayı 3, 2010, Sayfa 315-323
- Turan, K., Pekbey, Y., 2015. Progressive failure analysis of reinforced- adhesively single- lap joint, The Journal of Adhesion, 91, 962–977.
- Udatha P., Babu Y.N., Satyadev M., Bhagavathi L.R., 2020. Effect of natural fibers reinforcement on lap-shear strength of adhesive bonded joints, **Materials Today: Proceedings**, 23, 541-544.
- Vijayakumar, R.L., Bhat, M.R., Murthy C.R.L.,2012. Non destructive evaluation of adhesively bonded carbon fiber reinforced composite lap joints with varied bond quality, **American Institute of Physics Conf. Proc.**, 1430, 1276-1283, DOI: 10.1063/1.4716365
- Wake, W.C.,1986. Adhesion and the Formulation of Adhesives, Structural Adhesives in Engineering, **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, 151/86, 161-168
- Weißgraeber, P., Becker, W.,2013. Finite Fracture Mechanics model for mixed mode fracture in adhesive joints, International Journal of Solids and Structures, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.03.012>



DİCLE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ TEZ İNTİHAL FORMU

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ

ADI VE SOYADI	Sinan BARUT
ÖĞRENCİ NO	17818010
EĞİTİM – ÖĞRETİM YILI	2020/2021
YARIYIL	☒ Güz ☐ Bahar
ANABİLİM DALI	Makine Mühendisliği
PROGRAM	Yüksek Lisans
TEZ KONUSU	Fiber Takviyeli Yapıştırıcıların Kullanıldığı Tek Tesirli Yapışma Bağlantılarında Hasar Analizi

İNTİHAL RAPORU BİLGİLERİ

RAPOR TÜRÜ	Tez Savunma Sınavı Sonrası
SAYFA SAYISI	87
BENZERLİK ORANI	% 22
RAPORLAMA TARİHİ	03/03/ 2021

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın kapak sayfası, giriş, ana bölümler, sonuç ve tartışma kısımlarından oluşan toplam 87 sayfalık kısmına ilişkin, 03/03/2021. tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 22 ‘dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☐ Kabul/Onay sayfaları hariç,
- ☐ Kaynakça hariç
- ☒ Alıntılar dâhil
- ☐ Diğer

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Programlarda Tez Çalışması İntihal Raporu Uygulama Esasları’nı inceledim ve bu Uygulama Esasları’nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Sinan BARUT

Prof.Dr. Kadir TURAN
Tez Danışmanı

Prof.Dr. Vedat ORUÇ
Anabilim Dalı Başkanı