

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERDEKİ DAİRESEL
DELİK HASARININ YAMA İLE TAMİRİNİN DENEYSEL
OLARAK ARAŞTIRILMASI**

Şükrü ÇETİNKAYA

Doktora Tezi
Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği
Programı: Konstrüksiyon ve İmalat

Tez Danışman: Doç. Dr. Haşim PIHTILI

ELAZIĞ-2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERDEKİ DAİRESEL
DELİK HASARININ YAMA İLE TAMİRİNİN DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ
Şükrü ÇETİNKAYA

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 23.02.2017

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.02.2017

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Haşim PIHTILI (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ertuğrul DURAK (S.D.Ü)

: Doç. Dr. Mete Onur KAMAN (F.Ü)

: Doç. Dr. Kadir TURAN (D.Ü)

: Doç. Dr. Cihan ÖZEL (F.Ü)

ELAZIĞ-2017

ÖNSÖZ

Çalışmalarım esnasında maddi manevi her türlü desteği ile yanımda olan çok değerli danışman hocam; Sayın Doç. Dr. Haşim PIHTILI'ya, eleştiri ve önerilerinden dolayı tez izleme komitesi üyesi Sayın Doç. Dr. Mete Onur KAMAN Hocama, çalışmalarım esnasında, bana sarf malzemelerini, cihazlarını, atölyelerini ve laboratuvarlarını kullandıran THY TEKNİK A.Ş. yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerinin hazırlanması ve deneylerinin gerçekleştirilmesinde her türlü desteğini esirgemeyen, deneylerin yapılması sürecinde görüş ve önerileri ile çalışmaya katkı sağlayan, Sayın Doç. Dr. Kadir TURAN'a, çalışmada kullanılan tabakalı kompozit malzemelerin temininde ve üretimine yardımcı olan İzoreel Kompozit İzole Malzemeler San. ve Tic. Limited Şirketi'ne çok teşekkür ederim.

Bu çalışmayı 4069 numaralı FÜBAP projesi ile destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Destekleme Birimi'ne ve çalışmalarım esnasında görmüş olduğum anlayış ve desteklerinden dolayı, aileme teşekkürlerimi sunarım.

Şükrü ÇETİNKAYA

Ocak 2017

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	XI
SİMGELER LİSTESİ.....	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	6
3. KOMPOZİT MALZEMELERE GENEL BAKIŞ	15
3.1. Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler.....	17
3.1.1. Termoset Matriksler	18
3.1.2. Termoplastik Matriksler	21
3.2. Takviye Malzemeleri (Elyaf lar)	22
3.2.1. Cam Elyaf ı.....	23
3.2.2. Karbon Elyaf ı	23
3.2.3. Aramid Elyaf ı.....	24
3.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	26
3.3.1. Elle Yatırma Yöntemi	26
3.3.2. Püskürtme Yöntemi.....	26
3.3.3. Elyaf Sarma Yöntemi	26
3.3.4. Reçine transfer kalıplama RTM / Reçine Enjeksiyonu Yöntemi	27
3.3.5. Profil Çekme (Pultruzyon) Yöntemi	27
3.3.6. Hazır Kalıplama Yöntemi	27
3.3.7. Hazır Kalıplama Pestili Yöntemi	27
3.3.8. Hazır Kalıplama Hamuru Yöntemi	27
4. YAPIŞTIRMA OLAYI VE YAPIŞTIRICILARIN ÖZELLİKLERİ	28
4.1. Yapışma Olayı.....	28
4.1.1. Adhezyon Olayı.....	28
4.1.2 Kohezyon Olayı.....	29

4.2. Yüzey Hazırlığı	30
4.2.1. Yapıştırılacak yüzeylerin yağdan ve pisliklerden arındırılması	31
4.2.2. Mekanik ön işlem	33
4.2.3. Aşındırma	33
4.3. Montaj	34
4.4. Yapıştırıcı Çeşitleri	36
4.4.1. Kimyasal Reaksiyon ile Sertleşen Yapıştırıcılar	36
4.4.1.1. Anerobikler	37
4.4.1.2. Siyanoakrilatlar	38
4.4.1.3. Akrilikler	40
4.4.1.4. Silikonlar	40
4.4.1.5. Poliüretanlar	41
4.4.1.6. Epoksiler	42
4.4.1.7. Fenolikler	42
4.4.2. Fiziksel Değişim ile Sertleşen Yapıştırıcılar	42
4.4.3. Basınç Gerektirmeyen Yapıştırıcılar	42
4.4.4. Formları Açısından Yapıştırıcılar	43
4.4.5. Köpükler	43
4.5. Yapıştırıcı ile Birleştirme Tipleri ve Yöntemleri	43
4.6. Yapıştırıcı Bağlantılarında Karşılaşılan Gerilme Halleri	47
4.7. Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Çözölemeyen Bağlantılarla	
Karşılaştırılması	49
4.7.1. Perçin Bağlantıları	49
4.7.2. Kaynak Bağlantıları	49
4.7.3. Lehim Bağlantıları	50
4.7.4. Vida ve Cıvata ile Yapılan Bağlantılar	51
4.7.5. Yapıştırma Bağlantıları	51
4.8. Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Tipleri	52
5. KOMPOZİT MALZEMELERDE GERİLMELER	54
5.1. Gerilme Analizi	54
5.1.1. Fiber Takviye Açısının Gerilme/Şekil Değişirme Bağlılarına Etkisi	59
5.1.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Gerilme Analizi	61

6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	68
6.1. Malzeme Temini ve Üretimi	68
6.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	69
6.2.1. Genişlik/Çap (G/D) Oranlarının Tamirattaki Etkilerinin Araştırılması	71
6.2.2. Yapıştırıcı Kalınlığının Tamirattaki Etkilerinin Araştırılması	72
6.2.3. Malzemedeki Fiber Takviye Açısının Tamirata olan Etkisinin Araştırılması	74
6.2.4. Yama Kalınlığının Tamirattaki Etkilerinin Araştırılması	75
6.2.5. Yama Bindirme Mesafesinin Tamirattaki Etkilerinin Araştırılması	75
6.2.6. Yapıştırıcı Çeşidinin Tamirata olan Etkilerinin Araştırılması	75
6.2.7. Yamadaki Fiber Takviye Açısının Tamirata Olan Etkisinin Araştırılması	76
6.2.8. Yama Tipinin Tamirata olan Etkilerinin Araştırılması	76
6.3. Numunelerin Çekme Testine Tabi Tutulması	77
7. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	80
7.1. Genişlik/Çap (G/D) Oranlarının Yama Yapıştırmalı Tamiratlardaki Etkileri	81
7.2. Yama Yapıştırmalı Tamiratlardaki Yapıştırıcı Kalınlığının Etkisi	82
7.3. Malzemedeki Fiber Takviye Açısının Yama Yapıştırmalı Tamirata olan Etkisi.....	84
7.4. Yamadaki Fiber Takviye Açısının Yama Yapıştırmalı Tamirata olan Etkisi	86
7.5. Yama Yapıştırmalı Tamiratlardaki Yama Kalınlığının Tamirata Etkisi	87
7.6. Yama Bindirme Mesafesinin Yama Yapıştırmalı Tamiratlardaki Etkisi	89
7.7. Tamiratlardaki Yapıştırıcı Çeşidinin Tamirat Üzerindeki Etkisi	91
7.8. Yama Şeklinin Tamirat üzerindeki Etkisi	92
8. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER	94
8.1. Genel Sonuçlar	94
8.2. Öneriler.....	96
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	103

ÖZET

TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERDEKİ DAİRESEL DELİK HASARININ YAMA İLE TAMİRİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Son yıllarda, kompozit malzemeler, teknolojinin gelişmesine paralel olarak sanayinin her alanında kara, hava, deniz ve uzay araçlarında çok yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu tür malzemelerin geri dönüşümleri ve yeniden kullanımları zor olduğundan, çevrede ekolojik olarak problem olmaktadır. Bu yüzden, hasara uğrayan parçaların tekrar kullanılması için, sökülüp yerlerine yeni malzeme montajlarının yapılmasından ziyade, tamiratları yapılmaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin yeni teknolojik malzemeler olmaları ve maliyetlerinin de yüksek olmalarından dolayı, tamiratları tercih edilmektedir. Böylece, bu tür metal dışı malzemelerin tamiratları giderek daha çok ön plana çıkmakta ve önem kazanmaktadır.

Özellikle uçaklarda mukavemet açısından ikinci derecede önemli olan dış gövde ve kanatlardaki parçaların, kaza kurşunları ve sert cisimlerin (kuş vb. gibi) çarpmalarında oluşan hasarların tamiratları, bu tip yama yapıştırması ile yapılmaktadır.

Bu çalışmada, örgülü cam ve karbon fiber takviyeli, 8 tabakalı epoksi matrisli kompozit levhalar üretildikten sonra, 10 mm'lik dairesel hasar oluşturulmuştur. Bu hasarların çevrelerine mekanik işlemler uygulanarak değişik yapıştırıcı ve yamalar tatbik edilerek uygun laboratuvar (çevre) koşullarında tamiratları yapılmıştır.

Yapılan çekme deneylerde, bu tamiratın kalitesine (hasar yükü) etki eden faktörler araştırıldı. Bu faktörler; Delik çapı/Levha genişliğine oranı, yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı çeşidi, yamada ve malzemedeki fiber takviye açısı değişimi (0° , 15° , 30° , 45°), yama kalınlığı ve yama geometrisi olarak ele alındı.

Elde edilen sonuçlar, grafiklerle gösterilerek literatürdeki mevcut çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak yorumlandı.

Anahtar Kelimeler: Fiber takviyeli kompozit malzemeler, hasar, tamirat, yama, yapıştırırmalı bağlantılar

ABSTRACT

INVESTIGATION OF CIRCULAR DAMAGE REPAIRING BY USING ADHESIVE IN LAMINATE COMPOSITE MATERIALS EXPERIMENTALLY

In recent years, composite materials have been used extensively in all areas of the industry parallel to the development of technology in land, air, sea and space vehicles. Since such materials are difficult to recycle and reusing, there are ecological problems in the environment. For this reason, repairs of such materials are carried out in order to reuse damaged parts rather than dismantling and installing new materials. In addition, these materials are new technological materials and their costs are high. That is why, their repairs are preferred. Thus, repairs of such nonmetallic materials are becoming increasingly important.

Especially, repairs of the outer shells and wing parts in the air planes that damaged by accidental bullets and striking objects (such as birds etc.) which are particularly important in terms of strength are carried out by this type of patch bonding repair technique.

In this study, 10 mm circular damage was created after 8 layers of composite sheets with woven glass and carbon fibers reinforcement were produced. Borders of these damages (bonding area) in parent materials were subjected to mechanical operations and then, these damages were repaired by patch bonding technique with different adhesives and different patches in suitable laboratory (environmental) conditions.

In the experiments carried out, the factors affecting the quality of the repair (ultimate damage load) were investigated. These factors include; Diameter/width of composite plate ratio, adhesive thickness, adhesive types, the change of fiber reinforcement angle ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$), patch thickness and patch geometry.

The obtained results were transferred to the graphs and compared and discussed with the existing study results presented in the literature.

Keywords: Fiber reinforced composite materials, damage, patch bonding repair, bonded connections

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme yığılmaları.	3
Şekil 4.1. Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler.	29
Şekil 4.2. Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirler adhezyonu düşürür	31
Şekil 4.3. Vakumtorbası.	35
Şekil 4.5. Bağlı nemin bir fonksiyonu olarak siyanoakrilat yapıştırıcıların kürleşmesi	39
Şekil 4.6. Silikonlarda kürleşme hızı - bağlı nem ilişkisi.....	41
Şekil 4.7. Yaygın olarak kullanılan bağlantı şekilleri	45
Şekil 4.8. Tek tesirli bindirme bağlantısının şekil değiştirmeden önce ve şekil değiştirdikten sonraki görünümü	46
Şekil 4.9. Yüklenmiş haldeki çift tesirli bindirme bağlantısında ve yapıştırıcıda oluşan gerilmeler	46
Şekil 4.10. En yaygın yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları	48
Şekil 4.11. Kaynak, perçin ve yapıştırıcı birleştirmelerinde oluşan gerilme yığılmaları....	50
Şekil 5.1. Tek yönde takviye edilmiş kompozit yapılarda malzeme özelliklerinin üç simetri düzleminin gösterilmesi	54
Şekil 5.2 . Fiber takviye doğrultusunda (1) yapılan yükleme durumu.	58
Şekil 5.3. Fiber takviye doğrultusu ve yüklemeler.....	59
Şekil 5.4. Farklı fiber takviye açılarına sahip tabakalardan oluşturulmuş kompozit yapı ..	62
Şekil 5.5. Kirchhoff deformasyon hipotezine göre plakanın kenarında deformasyona uğrayan ve deforme olmamış kenarlar.....	63
Şekil 5.6. Tabakalı kompozit yapıda simetri düzlemi ve tabaka kalınlıkları	64
Şekil 5.7. Normal kuvvetler, kesme kuvvetleri, eğilme ve burulma momentleri uygulanarak yüklenmiş olan tabakalı kompozit malzeme.....	65
Şekil 6.1. Kompozit plakaların hasarlandırılması için kullanılmış olan matkap ucu (Ultra Tool).....	70
Şekil 6.2. Tamiri yapılmış olan kompozit plakaların geometrik şekli	73
Şekil 6.3. Yama ile tamir edilen test numuneleri	73
Şekil 6.4. Test numunelerinin kürleme görüntüsü ve kürleme cihazı	74
Şekil 6.5. Hazır yama-film yapıştırıcı ile tamiraty yapılmış karbon fiber takviyeli test numunelerinin görünümü.....	77

Şekil 6.6. Çekme test cihazı.	78
Şekil 6.7. Çekme cihazını kontrol eden bilgisayarda ekrana yansıyan ara yüz.....	78
Şekil 6.8. Çekme cihazından elde edilen örnek gerilme-%uzama grafikleri	79
Şekil 7.1. Cam ve karbon fiber takviyesi yapılan ve prepreg yöntemi ile tamir edilen fiber açısı 0° olan malzemelerde G/D Oranları-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik	82
Şekil 7.2. Karbon fiber takviyesi yapılan malzemelerde, $G/D=3$, fiber takviye açısı 0° olan yama yapıştırırmalı tamiratlarda kullanılan yapıştırıcı kalınlığı-maksimum hasar yüğü değişimini gösteren grafik	83
Şekil 7.3. Cam fiber takviyeli, $G/D=4$ olan prepreg ve ıslak yapıştırma yöntemi ile tamir edilen levhalardaki Fiber Takviye Açısı-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik	85
Şekil 7.4. Cam fiber takviyesi yapılan, (a) prepreg ve (b) ıslak yapıştırma yöntemi ile tamir edilen levhalardaki fiber takviye açısına bağılı olarak görülen hasar şekilleri.....	85
Şekil 7.5. Karbon fiber takviyeli malzemelerde, $G/D=4$, malzeme fiber takviye açısı 0° olan prepreg ve ıslak yapıştırma yöntemi ile tamir edilen yama yapıştırırmalı tamiratlardaki Yama Fiber Takviye Açısı-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik	86
Şekil 7.6. Karbon fiber takviyesi yapılan, $G/D=4$, malzeme fiber takviye açısı 0° olan prepreg yöntemi ile tamir edilen levhalardaki yama fiber takviye açısına bağılı olarak görülen hasar şekilleri	87
Şekil 7.7. Cam fiber takviyesi yapılan malzemelerde, $G/D=3$, fiber takviye açısı 0° olan prepreg ve ıslak yapıştırma yöntemi ile yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlarda Yama Kalınlığı-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik	88
Şekil 7.8. Cam fiber takviyesi yapılan malzemelerde, $G/D=2$, malzeme fiber takviye açısı 0° olan prepreg ve ıslak yapıştırma yöntemi ile yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlarda Bindirme Mesafesi-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik	90
Şekil 7.9. Cam fiber takviyesi yapılan, (a) ıslak yapıştırma ve (b) prepreg yöntemi ile tamir edilen levhalardaki bindirme mesafesine bağılı olarak görülen hasar şekilleri.....	91

- Şekil 7.10.** $G/D=2$, malzeme fiber takviye açısı 0° olan yama yapıştırırmalı tamiratlarda kullanılan yapıştırıcı çeşidinin tamiratların hasar yüklerine etkisini gösteren grafik 92
- Şekil 7.11.** Cam fiber takviyeli malzemelerde, $G/D=5$, malzeme fiber takviye açısı 0° olan prepreg ve ıslak yapıştırma yöntemi ile yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlarda Yama Şekli-Hasar Yükü değişimini gösteren grafik 93



TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Matriks, takviye elemanı ve kompozit malzeme yapı tipleri.	18
Tablo 3.2. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	21
Tablo 3.3. Bazı termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri	22
Tablo 3.4. Belli başlı elyafların karşılaştırılması	25
Tablo 4.1. En önemli solventler ve temizleme kapasiteleri	32
Tablo 4.2. Temel Hasar Tipleri (ISO 10365).	53
Tablo 6.1. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan örgülü cam/karbon fiber ve epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri.	69
Tablo 6.2. Tabakalı kompozit malzeme tamiratlarında kullanılan malzemeler	70
Tablo 7.1. Çalışmada kullanılan yama yapıştırırmalı tamiratlarının deney test numunelerinin özellikleri.	80

KISALTMALAR LİSTESİ

DIC : Dijital şekil ilişkilendirme tekniği

PR : Prepreg

SEM : Sonlu elemanlar metodu

W.L : Islak yapıştırma



SİMGELER LİSTESİ

$[C_{ij}]$	: Elastiklik matrisi	
D	: Hasar deliği çapı	[mm]
E_{11}	: Fibere paralel doğrultuda elastisite modülü	[MPa]
E_{22}	: Fibere dik doğrultuda elastisite modülü	[MPa]
G_{12}	: Kayma modülü	[MPa]
L	: Levhanın boyu	[mm]
N_x	: x yönünde normal kuvvet bileşenleri	[N]
M_x	: x-y düzleminde eğilme momenti bileşenleri	[N.mm]
N_i	: Şekil değiştirme fonksiyonu	
σ_{ij}	: Gerilme vektörü	[MPa]
ν	: Poisson oranı	-
X_c	: Fibere paralel doğrultuda çekme mukavemeti	[MPa]
X_b	: Fibere paralel doğrultuda basma mukavemeti	[MPa]
Y_c	: Fibere dik doğrultuda çekme mukavemeti	[MPa]
Y_b	: Fibere dik doğrultuda basma mukavemeti	[MPa]
S	: Kayma mukavemeti	[MPa]
$[Q_{ij}]$	: İzotrop malzemeler için iki boyutlu elastiklik matrisi	
$[S_{ij}]$	: Elastiklik matrisinin tersi	
T	: Levha kalınlığı	[mm]
u, v, w	: x, y, z kartezyen koordinatlarındaki yer değiştirmeler	[mm]
U_e	: Eğilmeden kaynaklanan şekil değiştirme enerjisi	
V_f	: Fiber hacim oranı	[%]
W_e	: Dış kuvvetler etkisi ile cisimde meydana gelen potansiyel enerji	
G	: Levha genişliği	[mm]
$\emptyset$	: Fiber Takviye açısı	[°]

1. GİRİŞ

İki veya daha fazla malzemenin uygun özelliklerini bir araya getirerek yeni bir malzeme üretmek veya gerekli olan farklı bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi işlemi ile elde edilen malzemelere kompozit (karma) malzemeler denir. Bu tür malzemelerin mekanik özellikleri iyi olduğundan; endüstrinin birçok alanında tercih edilmektedirler. Kompozitler, aynı zamanda geleneksel malzemelere göre hafiflik, rijitlik, elektriksel ve ısı yalıtkanlık, korozyona dayanıklılık gibi avantajlara da sahiptirler [1].

Günümüzde, özellikle hava taşımacılığında ve uzay çalışmalarındaki kullanımlarının artmasıyla beraber, bu tür malzemelerde hasarların oluşması da aynı oranda artmıştır. Bu yüzden, kompozit malzemelerdeki tamiratın önemi giderek artmıştır. Metal parçalarda yapılan tamiratlarda, hasarlı parçalar sökülerek yerlerine yenileri takılarak tamirat işlemleri yapılmaktadır. Kompozit malzemelerin, teknolojik olarak, yüksek maliyetli olmaları ve artıklarının uzun süre çevrede bozulmadan kaldıklarından ve geri dönüşüm tesislerinin ve imkânlarının mevcut olmamalarından dolayı, bu parçalarda tamirat yapılarak, hem tasarruf yapılır, hem de, çevre kirliliğinin en düşük seviyeye inmesi sağlanabilir. Metal parçaların artıkları, eritilerek sanayide yeni parçalara dönüştürülmeleri rahatlıkla yapılabilmektedir. Kompozit malzemelerin bu durumları göz önünde bulundurulduğunda, tamiratın önemi daha çok artmaktadır. Son zamanlarda, fiber takviyeli kompozit malzemelerde yapılan tamiratların kalitesini artırmak ve standartları belirlemek için birçok çalışma yapılmıştır.

Tabakalı kompozit yapılar, aynı ya da daha farklı mekanik özelliklere sahip olan birden fazla tabakanın bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Bu tür yapılardaki her bir tabakanın değişik özelliklere sahip olması, kompozit yapıdaki istenilen özelliklerin elde edilebilmesi için bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır [2].

Kompozit malzemelerin kullanımlarında ve onların üretim yöntemlerinde, son yıllarda önemli artışlar olmuş ve yeni imalat teknolojileri geliştirilmiştir. Bu durum, hava taşıtlarının birçok parçalarında polimer matris kompozitlerin yeni uygulama alanı bulmasına sebep olmuştur. Kompozit malzemelerde meydana gelen bu hızlı gelişim, konstrüksiyonları meydana getiren yapısal elemanların birleştirme yöntemlerinin de gelişimine sebep olmuştur. Bundan dolayı, mekanik birleştirme yöntemleri ile yapılan birleştirmeler ve tamiratlar giderek azalmaktadır [4].

Genellikle birçok elemanın uygun bir şekilde birleştirilmesi ile elde edilen konstrüksiyonlarda, konstrüksiyonu oluşturan elemanların birbirlerine bağlanması gerekir. Bu bağlama işlemleri bağlama elemanları adı verilen makine elemanları kullanılarak yapılır.

Bağlama elemanları, çözülebilen ve çözilemeyen bağlama elemanları olarak iki ayrı ana bölümde incelenmektedir. Çözilemeyen bağlantılar rijit, ulaşımın güç olduğu bölgelerde kullanılan, tamirat gerektirmeyen yerlerde kullanılmaktadır. Çözülebilen bağlama elemanları ise hareketli, tamirat gerektiren, dış ortamın olumsuz etkilerinin olabildiği yerlerde ve özellikle, hareket iletiminin söz konusu olduğu bölgelerde kullanılmaktadır.

Kompozit malzemeler, her yönde aynı özellikler gösteren “izotrop” malzemelerden bir takım farklılıklarının olması nedeni ile birleştirmelerinde ve tamiratlarında çeşitli problemlerle karşılaşılabilir. Kompozit malzemelerin birleştirilmesindeki maksat, kompozit malzeme ile başka bir kompozit malzemenin, ya da farklı herhangi bir metalik malzemenin bir araya getirilerek yük taşımasını sağlamaktır. Tamiratlarındaki amaç ise, hasara uğramış olan kompozit bir yapının bazı işlemlerden geçirilerek tekrar kullanımlarının sağlanmasıdır.

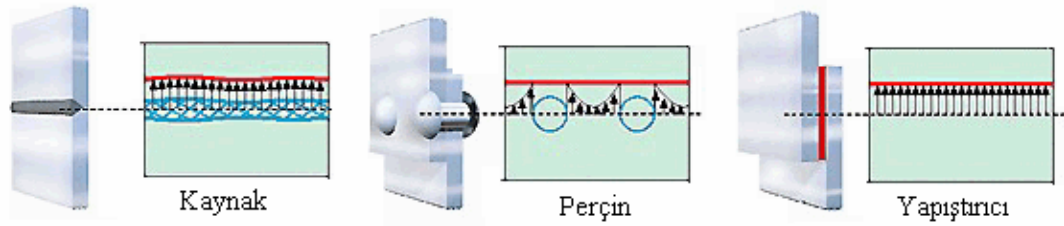
Genel olarak kompozit malzemelerin birleştirmelerinde iki farklı yöntem kullanılmaktadır.

1. Yapışan (adhesive) malzemeler kullanılarak yapılan birleştirmeler
2. Mekanik bağlayıcılar kullanılarak yapılan birleştirmeler

Yapıştırıcı kullanılarak yapılan birleştirmeler, iki kompozit yapı arasında herhangi bir fiziksel bağlayıcıya gerek duymadan tamamen kimyasal özelliklerle çalışan bir bağlayıcı kullanılarak yapılır. Bu bağlantı türünde çözülme durumu çok zordur ve çözüldüğünde ise yapı kullanılmaz.

Mekanik bağlayıcılar olarak adlandırılan birleştirme şekli ise, çözülebilen ve tekrar birleştirmelerde kullanılabilen makine elemanları ile yapılan bağlantılardır. Bu elemanlara örnek; pimler, civatalar vb. makina elemanlarıdır. Bu tür bağlayıcılar, yapılan bağlantıların karmaşık yapılarda olması, tamiratlardan kaynaklanan güçlüklerin aşılmasından ve düşük maliyetlerinden dolayı tercih edilmektedirler. Buna ek olarak, mekanik birleştirmelerin yapılabilmesi için, plakaya açılan delikler ve bağlama elemanından kaynaklanan ağırlık artışı, bu bağlantı türü için en büyük dezavantajlardır. Bağlantı için oluşturulan delikler geometrik süreksizlik oluştururlar ve bu süreksizlik gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır

[3]. Her iki birleştirme türünün de kendisine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Önemli olan doğru birleştirme tipinin seçilmesi ve en ideal şartlarda bu işlemin gerçekleştirilmesidir. Mekanik birleştirmelerde tamir edilecek parçada delik açılması gerekli olduğundan; parçanın delinmesi sırasında, delik çevresinde çentik etkisine ve sonrasında ise gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır. Bu gerilme yığılmaları ve çentiklerin önüne geçmek için yapıştırıcı kullanılarak yapılan tamirler oldukça avantajlıdır. Şekil 1.1. de de görüldüğü gibi, mekanik olarak birleştirilen bağlantılara göre, yapıştırıcı ile yapılan birleştirmeli bağlantılar daha az gerilme yığılması, daha düzgün yük dağılımı, daha fazla tasarım esnekliği ile imalat kolaylığı, hafiflik, sızdırmazlık, korozyon direnci, ısı ve ses yalıtımı, sönümleme ve daha mükemmel yorulma özelliklerine sahip olmaktadır. Bununla birlikte, kırılan ve kopan malzemeleri tekrar kullanabilmek için, mekanik birleştirme yöntemleri kullanılabilir.



Şekil 1.1. Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme yığılmaları [8].

Genel olarak, tabakalı kompozit malzemelerin tamiratlarında kullanılan yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların mukavemeti; birleştirilen yama parçalarının büyüklüğüne, kalınlığına, geometrisine, elastisite modülüne, yapıştırıcının kayma modülüne, yapışma bölgesi yüzey alanına, yapışma bölgesi uzunluğuna, tamirattaki yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine, yapıştırıcı çeşidine ve yapıştırılan birleştirmeli bağlantının maruz kalacağı çevre şartlarına bağlıdır.

Mekanik bağlantılar yerine, bu çalışmanın da konusu olan yapıştırıcı kullanarak yapılan tamiratlar, günümüzde önem arz etmektedir. Sert bir cisim çarpması sonucunda zarar gören tabakalı kompozit malzemeler; benzer bir kumaş malzeme ile kontrollü bir ortamda (uygun nem ve sıcaklıkta) yapıştırıcı kullanılarak yama ile tamir edilebilirler. Bu tamiratlarda öncelikle zarar gören kısımlar düzeltilir ve hasar bölgesi, standart bir şekle

getirilir. Bu söküm işlemi, yeterince itinalı yapılmalı ve hasara uğramış bölge, en az seviyede malzeme çıkartılarak yamalama işlemine hazır hale getirilmelidir.

Günümüzde, sistemlerin enerji tüketimini azaltmak için birçok yöntem mevcuttur. Örneğin, yakıtta tasarrufa gitmenin başlıca yollarından bir tanesi sistemlerin ağırlığını azaltmaktır. Sistem elemanlarını birleştirmek için kullanılan geleneksel bağlantı yöntemlerinin yerine daha hafif bir bağlantı şekli olan yapıştırıcıların kullanımı, sistemleri daha hafif hale getirmiştir. Aynı zamanda deniz araçlarında ve hava araçlarında yapılan tamir, kesit alanını fazla büyütmediğinden oluşturacağı direnç ise az olacak ve enerji tasarrufu daha fazla sağlanacaktır.

Temel bir birleştirme ve onarım metodu olan yapıştırıcıların kullanımları ile yapılan yapışma bağlantılarının diğer metotlara göre bir takım avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Avantaj olarak aşağıda belirtilen özellikler sayılabilir [56]:

- Metaller ve polimerler gibi oldukça farklı malzemeler rahatlıkla birleştirilebilir,
- Bağlantı bölgesinde düzgün gerilme dağılımı elde edilir.
- Sızdırmazlık sağlarlar ve bundan dolayı sızdırmazlık elemanı olarak kullanılabilirler,
- İnce metal parçaların birleştirilmelerinde etkili bir şekilde kullanılabilirler,
- Bağlantılara çok iyi dinamik-yorulma direnci sağlarlar,
- Etkili ve maliyeti düşük bir tekniktir,
- Kompleks ve ayrı geometrili şekiller rahatlıkla birleştirebilir,
- Daha pürüzsüz yüzeyler elde edilebilir ve böylece yapının rüzgar direnci azaltılabilir,
- Korozyon direnci mevcuttur,
- Birleştirme malzemeleri uygun oranda kullanılır ise sistemin ağırlığını azaltır,
- Titreşimi sönümler ve rijit yapılar elde edilebilir.

Bununla birlikte bazı dezavantajları aşağıdaki şekilde sayılabilir:

- Bağlantının sağlıklı yapılabilmesi için tecrübeli ve el becerileri yüksek elemanlara ihtiyaç vardır.
- Yüksek ısının mevcut olduğu çevre şartlarında kullanıldıklarında, ısıya karşı dayanımları düşük olduğundan dolayı yük taşıma kapasitelerinde düşme meydana gelir.

- Yapıştırma olayı öncesinde, yapıştırıcı kullanılacak olan yüzeylerde detaylı bir yüzey temizliğine ihtiyaç vardır.
- Bağlantının gerçekleşmesi için yapıştırıcının kuruması gerekir ve bu bekleme süresi, bağlantının durumuna göre bazen uzun olabilir.
- Bazı durumlarda, uygun bağlantı için basınç ve ısı kullanılması gerekebilir.
- Bazı yapıştırmalı bağlantılarda, özellikle köşe bağlantılarının tamiratlarında tamir edilme güçlükleri yaşanabilir.
- Bağlantı ara birimleri veya aparatları gerekebilir.
- Bağlantının tahribatsız muayenesi zordur.
- Bağlantı işlemi esnasında uygun çevre şartları gereklidir.
- Düşük sıcaklıklarda bazı ürünlerde kolay kırılabilirlik görülebilir.
- Bükülebilir ürünlerde sürünme dayanımı düşüktür.
- Bu tür bağlantılarda kullanılan malzemeler, zehirleyici ve alev alma problemleri içermektedir.

Yapıştırma bağlantısının tasarımında hasar kriterlerini belirlemek ve yüklü bağlantılardaki gerilme dağılımlarını hesaplayabilmek için, yapısal yapıştırıcıların doğru olarak tespit edilmiş mekanik özelliklerine ihtiyaç duyulur. Bu özellikler, bulk numuneler ve plastikler için geliştirilmiş standart deney yöntemleri veya yapıştırıcı tabakasında uniform ve tek eksenli gerilme durumunu temin edecek önlemler almak şartıyla yapıştırma bağlantıları kullanılarak belirlenir.

Bu tez çalışmasında, ortasında dairesel delik bulunan cam ve karbon fiber/epoksi farklı tabakalı kompozit levhalar, kompozit yama ve yapıştırıcı kullanılarak ıslak yapıştırma ve prepreg (önceden hazırlanmış kompozit yama ve film yapıştırıcı) yöntemleri ile tamir edilmiştir. Yapılan tamirat işlemi esnasında, farklı bindirme bölgesi geometrisi ve mesafeleri, farklı özelliğe sahip yapıştırıcı türleri, yama ve malzemelerdeki lif takviye açısı ile tamiratta kullanılan yama ve yapıştırıcı kalınlığı gözetilerek deney test numuneleri hazırlanmıştır. Daha sonra test numuneleri çekme testlerine tabi tutularak, tamiratı yapılmış olan parçalardaki farklı özelliklerin yapılan tamiratların hasar yüklerine etkileri tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Tabakalı kompozit malzemelerdeki tamirat işlemlerinin önem kazanması nedeni ile son yıllarda bu alanlarda çok önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu, öncelikle yapıştırıcı kullanarak yapılan tamirat işlemlerinin temeli olarak kabul edilmiştir. Genel olarak bu çalışmalar, iki adet tabakalı kompozitin tek veya çift yönlü yapıştırması ile oluşturulmuş olan deney numunelerine, uygulanan mekanik testler sonucunda, yapıştırırmalı bağlantıların hasar yüklerinin belirlenmesi ile ilgilidirler. Yapılmış olan bu çalışmalar ile yapıştırıcı kullanımı ile oluşturulmuş olan bağlantıların temel kriterleri ve hasar yüklerine etki eden faktörler tespit edilmeye çalışılmıştır. Temel olarak sayabileceğimiz bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir. Eğer, bu konu detaylı olarak ele alınıp temel kriterler tespit edilebilir ise; yapıştırıcı kullanarak yapılmış olan tabakalı kompozit malzeme tamiratları kolaylıkla ve kaliteli bir şekilde yapılabilecektir.

Yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların analitik analizinin ilk çalışmaları, 1938 yılında Volkersen tarafından yapılmıştır [9]. Volkersen tarafından yapılmış olan bu çalışmada, tek bindirme bağlantısında yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi dağılımını araştırmıştır. Yapmış olduğu çalışmada, yapışan malzemelerin mukavemetinin yapıştırıcıdan yüksek olduğunu ve çekme yükü uygulandığında çok fazla şekil değişikliğine uğradığını kabul etmiştir. Ayrıca yaptığı analizlerde eğilme momentini ihmal etmiştir. Aynı zamanda, kullanılan yapıştırıcının lineer elastik bir katı malzeme olduğunu ve yalnızca kayma gerilmelerinden dolayı deforme olduğunu kabul etmiştir. Volkersen, yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmelerinin bindirme hattının her iki ucunda en yüksek değeri aldığını göstermiştir [9].

X. Liu ve G. Wang, yapmış oldukları çalışmada kompozit malzemelerde yama ile yapılmış olan tamiratta ilerlemeli hasar analizini, deneysel ve numerik olarak çalışmışlardır [5]. Bu çalışmada, değişik tamirat parametreleri kullanılarak hasara uğramış olan kompozit malzemelerinin tamiratları yapılmıştır. Statik çekme testleri ile yapılmış olan deneyler sonucunda; hasar yükleri belirlenmiş ve çeşitli hasar tipleri gözlemlenmişlerdir. Bu çalışma sonucunda; yama yapıştırılarak tamiratu yapılmış bir malzemede üç temel hasar tipi ve dört adet yüksek gerilme bölgesi olduğunu gözlemlenmişlerdir. Çift taraflı yapılmış olan tamiratlarda çok nadir olarak soyulmanın meydana geldiğini ve farklı yama çeşidi ile

yapılmış olan tamiratların bazen aynı dayanıma sahip olabileceklerini, ancak son kopma tiplerinin oldukça farklı olabileceğini vurgulamışlardır [5].

P. Papanikos vd. tarafından yapılmış olan bir çalışmada; metalik bir levhada mevcut olan hasar, yapıştırıcı ve yama kullanılarak tamir edilmiş ve uygulanmış olan çekme testleri ile yamanın ana malzemeden sökülmesi ve ilerlemesi incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda; soyulma olayı yapışma alanını daraltacağı için, bu işlemin tamiratta kritik hasar olduğunu belirterek, sonlu elemanlar tabanlı hasar modeli kullanılarak geometrik faktörlerin soyulma üzerindeki etkileri araştırılmıştır [6].

Önceki klasik çalışmalarda, yapıştırılan bölgenin orta kısımları boyunca kayma ve normal gerilmelerinin sabit, uçlarında ise maksimum değere sahip olduğunu gösterilmiştir. Bu nedenle, daha sonra yapılan çalışmalarda, yapıştırıcı tabakasının uçlarındaki yüksek gerilmeler büyük önem kazanmış ve bu durum sonraki çalışmalarda genellikle uç etkileri olarak anılmıştır.

Ayrıca Wah, anizotropik malzemelerin yapıştırıcı ile bağlandığı bir bindirme bağlantısındaki gerilme dağılımını, bağlantıyı düzlem şekil değiştirme hali kabulü ile analiz etmiştir. Yapıştırılan malzemelerdeki eğilme momentlerinin uç bölgelerinde en yüksek değere ulaştığını göstermiştir [10].

Adams tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bindirme bağlantıları için klasik lineer çözümler tartışılmış ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapıştırma bağlantılarının analizinin yapılabileceği ileri sürülmüştür. Bu çalışma neticesinde, kompozit malzemeler için yeni bir sayısal model geliştirilmiştir [11].

Kompozit yapılar cıvata, perçin ya da yapıştırıcı kullanılarak birleştirilebilir. Bu mekanik bağlantı tiplerinin performansları, tabakalı kompozit malzemelerin karakteristikleriyle etkilenmektedir. Yapıştırıcı kullanılarak yapılan birleştirmeli bağlantılar, mekanik olarak birleştiren bağlantılardan çok daha etkili bir şekilde yük transferi sağlamaktadır.

Kompozitlerin yapıştırma bağlantıları üzerine Mazumdar ve Mallick tarafından gerçekleştirilen deneysel bir çalışmada, epoksi yapıştırıcı ile birleştirilen iki kompozit malzemenin statik kopma yükü ve yorulma dayanımları araştırılmış ve kopma yükünün yapıştırıcı kalınlığı kadar bindirme uzunluğuna da bağlı olduğu sonucuna varılmıştır [12].

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların analizinde analitik ve sayısal olmak üzere, iki temel yaklaşım kullanılmaktadır. Sayısal modeller arasında sonlu elemanlar modeli

geniş olarak kullanılmaktadır. Basitliğinden ve pratik uygulamalarından dolayı, çalışmaların çoğunda basit bindirme bağlantıları kullanılmıştır.

Birçok çalışmada, değişik malzemeler, farklı yapıştırıcı çeşitleri kullanılarak yapıştırılmış ve bu bağlantıların sonlu elemanlar analizi yapılarak, yapışma bölgesi geometrisi, malzeme ve yapıştırıcı çeşitleri gibi parametrelerin, bağlantının mukavemetine ve gerilme dağılımına etkileri araştırılmıştır.

Karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerin, yama gömülerek ve yapıştırıcı kullanılarak yapılan tamiratlarının çekme yükü altındaki hasar mekanizması, Xiaoquan tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada, tamiratyapılmış numunelerin sonlu elemanlar yöntemi ile modellemeleri yapılmış ve bu numunelere çekme yükü altında ilerlemeli hasar modeli uygulanmıştır. Ayrıca, değişik tamirat parametrelerinin, çekme yükü altındaki tamiratyapılmış parçanın dayanımına olan etkileri araştırılmıştır [13].

Kompozit plakaların tamiri, 2000 yılında ABD Ulaştırma Federal Havacılık İdaresi, tarafından yayınlanan bir sonuç raporu ile, bu konunun temel esasları ve yapılan tamirlara etki eden faktörler belirlenmeye çalışılmıştır [14].

Breitzman, çekme yükü altında kullanılan tabakalı kompozit malzemelerde, yapıştırıcı kullanarak optimum gömmeli yama tamiratyapılması konusunu çalışmışlardır. Bu çalışmada üç boyutlu lineer olmayan analiz yapılarak, çekme yükü altında yapıştırıcıda oluşabilecek olan hasar yükleri ve tipleri tahmin edilmeye çalışılmıştır [15].

Örgülü fiber takviyesi yapılmış olan ve merkezi dairesel delikli olan tabakalı kompozit malzemelerin gerilme ve hasar analizi araştırılmıştır. Tsee ve vd. tarafından yapılan çalışmada, üç boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılarak, delik çapı değişiminin etkileri analiz edilmiştir [16].

Tabakalı kompozit malzemelerde yapılmış olan tamiratların hasar analizi, Jones ve vd. tarafından yapılarak, tüm tamiratların uçuşa elverişliliği araştırılmıştır [17].

Karbon fiber takviye edilmiş ve yapıştırıcı kullanarak yama ile tamiratyapılmış olan plakaların çekme yükü altındaki davranışları, Cheng ve vd. tarafından hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak optimum bir tamiratin yama parametreleri belirlenmiş ve tamiratyapılmış parçanın, sağlam parçanın dayanımına %90 oranında yakınsayabileceğini ortaya koymuşlardır [18].

Her tek tesirli yapışma bağlantılarının gerilme analizini sayısal (SEM) olarak çalışmıştır. Bu çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş serbest uçlarda, yüksek gerilme yığılmalarının mevcut olduğunu, yapıştırıcı kalınlığının artması ile yapıştırılan bölgedeki

kayma gerilmesinin azalacağını, böylelikle yapıştırıcı tabakasının kalın olmasının yapışma bağlantı dayanımını artırdığını göstermiştir. En büyük kayma gerilmelerinin bağlantı uç noktalarında oluştuğunu ve eğer yapıştırılan parçaların kalınlıkları farklı ise, maksimum kayma gerilmesinin ince parçaya yapışan yapıştırıcı ucunda oluşacağını belirtmiştir [19].

Karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde, farklı geometri değişimleri altındaki çekme dayanımlarının tahmin edilmesi çalışması Campilho (2008) ve vd. tarafından sayısal çalışmalarla araştırılmıştır. Bu çalışmada, uygun yapışma şeklinin kalıcı bağlantı dayanımını, tek tesirli bindirmede %27, çift tesirli bindirmede %12 artırabildiğini göstermişlerdir [20].

Kompozit panellerdeki geometrik süreksizliklerin tamir tekniği Madani ve vd. tarafından, sayısal ve deneysel yöntemlerle araştırılmıştır [21].

Yapıştırıcı ile yapıştırılmış kompozit malzeme bağlantılarının hasar tahmini için Goyal yeni bir sayısal model geliştirmiştir. Bu model sonlu elemanlar modeline entegre edilerek bağlantının hasarı tahmin edilmiştir [22].

Yapıştırıcı kullanılarak yapılmış olan tamiratların ve yapısal bağlantıların temel prensipleri ve pratiği Davis ve Bond tarafından belirlenmeye çalışılmıştır [23].

Çift tesirli bindirmeli yapışma bağlantılarının lineer olmayan analitik yöntemli hasar kriterleri, Volkersenin bilinen “Shear Lag” teorisi temelinde, Chataigner ve vd. tarafından çalışılmıştır. Farklı parametrelili (değişik yüzey kalitesi, yapıştırıcı ve yama kalınlığı, yapışma uzunluğu, farklı yama ve bağlantı şekilleri) yapışma bağlantıları hazırlanarak, geliştirilmiş olan analitik yöntemle hasar durumları belirlenmeye çalışılmış ve bu sonuçlar sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş olan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemle elde edilmiş olan sonuçlar uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir [24].

Yama ve yapıştırıcı kullanılarak tamir edilmiş olan kompozit panellerin hasar analizleri, Caminero vd. tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada, yama ve yapıştırıcı kullanılarak, karbon lif takviyeli kompozit levhalar tamir (gömme yama ve normal dıştan tek ve çift taraflı yama yapıştırılmış) edilmiş olan paneller incelenmiştir. Bu paneller, çekme testlerine tabi tutularak; kompozit panellerdeki tamiratların çekme yükü altındaki performansları, dijital şekil ilişkilendirme tekniği (DIC) kullanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Bu teknik ile elde edilmiş olan sonuçlar, numerik yöntem ile elde edilmiş olan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [25].

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde yapılan testlerde kullanılan numune ölçülerinin mukavemete ve hasar mekanizmasına olan etkisi konusu, Wisnom tarafından araştırılmıştır [26].

Uçaklarda kullanılan yapısal kalın tabakalı kompozit malzemelerde yapılmış olan gömmeli yama yapıştırılması ile yapılmış olan tamiratların mikro analizi, Whittingham vd. tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, kalın kompozit tamiratları için sert-yama tekniği kullanılmıştır. Bu sert yama tekniğinin yumuşak yama tekniğinden daha avantajlı olduğunu, önceden hazırlanmış (prepreg) yamaların, daha kolay bir şekilde hazırlanmış olan yuvaya yapıştırılıp kürlenebileceğini savunmuşlardır. Kalın kompozitlerde tamirat için hazırlanmış olan basamaklı yuvaya yerleştirilecek olan yamanın, iki şekilde üretilebileceğini; bunlardan birincisinin döküm tekniği ile, ikincisinin ise kalın tabakalı kompozitten yamanın mekanik işlemesi ile hazırlanabileceğini belirtmişlerdir [27].

Rider vd., yüksek ısılarda kullanılan carbon/BMI kompozit malzemelerde yapılan yapışmalı tamiratların yüksek ısılarda da performanslarını (yük taşıma kapasitelerini) artırmak için, vakum yardımcı basınç kürlleme tekniğinin etkilerini araştırmışlardır. Uygulanmış olan bu teknik sayesinde, yapılmış olan tamiratların, 220 C° de rahatlıkla kullanılabileceğini kanıtlamışlardır [28].

Basamaklı yama gömme tamiraty yapılmış kompozit panellerin, üç boyutlu yarı analitik modellemesi Li vd. tarafından yapılan çalışmada incelenmiştir [29].

Ramji vd. tarafından, üç boyutlu sonlu elemanlar metodu kullanılarak, yama şekli optimizasyonunun, yama yapıştırmalı kompozit malzemelerin tamir performansına olan etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, dairesel, dikdörtgen, kare, elips ve sekizgen şekilli yamalar kullanılarak, yapılmış olan yapışmalı kompozit malzeme tamiratlarının analizleri yapılmış ve bu yama şekillerinin tamir performansına olan etkileri araştırılmıştır [30].

İnfrared görüntüleme yöntemi kullanılarak kompozit yamaların teknolojileri ve yapısal kararlılıkları çalışması, Avdelidis vd. tarafından yapılmıştır. Yapılmış olan çalışmada; son yıllardaki tabakalı kompozit malzemelerin tamiratlarında kullanılan yamaların teknolojileri hakkındaki bilgileri tekrar çalışma şeklinde sunmuşlardır. Uçak kanatlarında kullanılan Al 2024-T3 malzemesinde, yapıştırılan yamada veya iki kompozit tabaka arasında soyulma, infrared ısı grafikleme yöntemi kullanılarak hasar ya da çatlak tanımlanmaya çalışılmıştır. Son olarak, uçak tamirindeki gerçek zamanlı yorulma hasarı, termografik yöntemi ile anlık görüntülenmiştir [31].

Karbon-epoksi yapılarıdaki tek ve çift tesirli yapışma bağlantılarının eğilme dayanımları, Campilho vd. tarafından, sonlu elemanlar modelleme yöntemini kullanarak araştırılmıştır. Bu çalışmada; SEM yöntemi ile doğru hasar koşulları tahmin edilmiş ve böylelikle; eğilme etkisi altında çalışan karbon-epoksi malzeme tamiratları için iyi bir tamirat tasarım klavuzu belirlemişlerdir [32].

Tabakalı kompozit malzemelerdeki çatlakların gerçek ve pratik tamiri için bir çalışma, Ahn ve Basu tarafından yapılmıştır [33].

Gerilme fonksiyonları kullanılarak, yama ile tamir edilmiş olan kompozitlerin üç boyutlu sonlu eleman analizleri, Kim vd. tarafından yapılmıştır [34].

Hava araçlarında kullanılan, kompozit malzemelerdeki yapışmalı tamiratlarda kullanılan yama şeklinin tamir performansına etkileri nümerik olarak Rachid vd. tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada, çatlak ucundaki gerilme yoğunluk faktörü, hasar kriteri olarak kullanılmıştır. Bu faktörün hesaplanması, tamiratın verimliliği hakkında bilgi verdiği öne sürülmüştür. Yapıştırıcıdaki gerilme dağılımı analizlerinin tamiratyapılmış hasarlı plaka ile yamanın dayanıklılığı hakkında bilgi vereceğini vurgulamışlardır [35].

Albedah vd. tarafından yapılan çalışmada; tabakalı kompozit malzemelerin tamiratında kullanılan yuvarlak şekilli yamaların, tek ve çift yüze uygulanması ile meydana gelen değişim incelenmiştir [36].

Karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerdeki yama tamiratlarının basma dayanımlarının tahmin edilmesi çalışması Hu ve Soutis tarafından yapılmıştır [37].

Tek ve çift yama ile tamir edilmiş tabakalı kompozit malzemelerdeki tamiratların, gerilme yoğunluk faktörünün hesaplanması ve çatlak açılma mesafesinin hesaplanması, Madani vd. tarafından sayısal olarak analiz edilmiştir [38].

Tek eksenli çekme yükü altındaki, kompozit malzemelerde tek tesirli yapışma bağlantılarıdaki ilerlemeli hasar analizi, G. Apalak ve K. Apalak tarafından yapılmıştır [39].

Boron/epoksi ve grafit/epoksi malzemelerdeki yarı dairesel çentikli köşelerdeki yama tamiratlarının etkilerinin karşılaştırılması, Ouinas vd. tarafından araştırılmıştır [40].

Yapışmalı bağlantılardaki, numune konfigürasyonlarının, yapıştırıcı kalınlığının, yapıştırıcı taşması ve yapıştırıcı mukavemetinin etkileri Taib vd. tarafından deneysel yöntemlerle araştırılmıştır [41].

Kürleşme basıncının, yapıştırma bağlantılarının dayanımına olan etkisi, Aydın vd. tarafından yapılmış olan çalışmada araştırılmıştır. Bu çalışmada esnek ve basınç hassasiyetli yapıştırıcı ile yapıştırılmış tek tesirli bindirme bağlantılarının yük taşıma

kapasitelerinin, k rle me boyunca uygulanan basınc   ile değişimi deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar sayısal çalışma ile kar ıla tırılmı tır [42]. Esnek karakterli yapıştırıcılar için k rle me esnasında uygulanan basınçta meydana gelen artışın bağlantının dayanımında artı a neden olduğu ve yapıştırılan malzeme kalınlığındaki artış daha fazla eşdeğer gerilmenin bindirmenin serbest uçlarından merkeze doğru iletilmesine sebep olacağını, bu durumun aynı bindirme uzunluğunda yapıştırılan malzeme kalınlığındaki ve bağlantı dayanımındaki artışın da sebebi olduğunu belirtmişlerdir.

Hava ara larındaki kritik kompozit malzeme yapılarındaki yapı malı tamiratlarının sertifikasyonlarında yeni bir yaklaşım Baker tarafından önerilmiştir [43].

Yapı tırmalı tamiratlardaki artık termal gerilmeler Daverschot ve vd. tarafından çalışılmıştır [44].

Tabakalı kompozit malzemelerdeki yapı tırmalı tamiratlardaki ilerlemeli hasar modeli, Papanikos vd. tarafından sayısal olarak yapılmıştır [45].

Tabakalı kompozit malzemelerdeki tek ve çift taraflı yama yapı tırmalı tamiratların modellemeleri, 2005 yılında, Campilho vd. tarafından, ABAQUS paket programı kullanarak sayısal yöntemle yapılmıştır [46].

Tek tesirli yapışma bağlantılarının elasto-plastik gerilme analizi, Sayman tarafından yapılmıştır [47].

Karbon fiber takviyeli, tabakalı kompozit malzemelerdeki yapıştırıcı kullanarak dıştan yama yapıştırma ile yapılmış olan tamiratların basma davranışları 1999 yılında C. Soutis ve arkadaşları tarafından çalışılmıştır[48].

Tsamasphyros vd. tarafından akıllı yama tekniği geliştirilmiş ve bu teknik ile yapılmış olan tamiratlar için hesaplamalı analizler ve optimizasyonlar yapılmıştır [49].

Temiz vd. viskoelastik ve basınç hassassiyetli bir yapıştırıcının ya lanması incelemişlerdir.  alı malarında elde ettikleri yapıştırma bağlantılarını 20 C  oda sıcaklığında laboratuvar ortamında ve 20 C  oda sıcaklığında ve %100 bağıl nem ortamında toplam 90 gün bekletmi lerdir. Çalışma sonucunda yapıştırıcı bağlantılarının dayanımlarında %100 nem ortamında zamanla önemli derecede azalma gözlenirken, oda sıcaklığı ortamında ise önemli bir değişim olmamıştır [50].

Smith titanyum ve karbon fiber takviyeli plastikler kullanarak yapıştırıcı/cıvata ile birle tirilmi  bindirme bağlantılarının teorik bir çalışmasına  nc luk etmiştir. Yapı tırılmı  bağlantılar için basma durumunda önemli bir mukavemet avantajı sağlanmazken, yapıştırıcı ve cıvata ile birle tirilmi  bağlantılarda hasar ilerlemesinde avantaj elde

edilmiştir. Oda sıcaklığı ve çevre nem şartları altında uygulanan yükün %98'inin yapıştırıcı tarafından transfer edildiği anlaşılmıştır [51,52].

Turan (2016), kompozit malzemelerdeki yama fiber takviye açısı değişiminin, bu malzemelerdeki yapışma bağlantılarının mukavemeti üzerine etkisini çalışmıştır. Çalışmasında, bağlantı mukavemetinin yama fiber takviye açısı ile önemli oranda değiştiğini ve yama uzunluğu artışının bağlantı mukavemetini %10 ile %45 arasında değişen oranlarda artırdığını belirtmiştir [53].

Aşağıda ülkemizde yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların analiz ve tasarımları konusunda yapılmış olan çeşitli yüksek lisans ve doktora tezleri incelenmiştir.

Kaya, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çekme yükü uygulanmış tek ve çift tesirli yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılardaki gerilme dağılımlarını araştırmıştır. Çalışmasında söz konusu gerilme dağılımına farklı parametrelerin etkilerini bulmak için, başlangıçta yapıştırıcı kalınlığı dikkate almış, sonrasında ise benzer ve farklı yapıştırılmış olan malzemeler için yapıştırıcı kalınlığını dikkate almamıştır. Çalışmasında statik model kullanmıştır [54].

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi konusu, Aydın tarafından çalışılmıştır. Bu tezde, yapışma bölgesindeki uç kısım geometrisi farklı olan karbon fiber takviyeli polyester matristen oluşan kompozit malzemelerin, iki farklı şekil değiştirme kabiliyetine sahip olan yapıştırıcı kullanarak oluşturulmuş bağlantıların, doğrusal çekme yükü altındaki mekanik davranışlarını araştırmıştır [55].

Solmaz, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik analiz ve tasarımlarını araştırmıştır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik davranışlarının, birçok parametreye bağlı olduğunu, bu parametrelerin; bağlantının geometrik şekli, bağlantıyı oluşturan malzemelerin özellikleri ve bağlantılarda kullanılmış olan yapıştırıcı özellikleri olduğunu belirtmiştir. Bu farklı parametreler, bağlantının mekanik davranışını tahmin etmeyi zorlaştırdığını, bundan dolayı, çalışmasında yapıştırıcı ile birleştirilmiş birçok farklı model üzerinde çalışma yapmıştır. Çalışmasında, farklı bindirme uzunluklarında ve farklı uç açılarında, biri yüksek diğeri düşük dayanımlı iki yapıştırıcı kullanarak birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının eksenel çekme yükü altındaki mekanik davranışlarını deneysel ve sayısal olmak üzere iki yöntemle incelemiştir [56].

Çalık, tek tesirli bindirme yapışma bağlantılarının analitik gerilme analizi ve köşeleri yuvarlatılmış yapıştırıcı bindirme bağlantısında sonlu elemanlar gerilme analizini

alışmıştır. alışmasında; temel yapıştırma şekli olan tek tesirli yapışma bağlantısının gerilme analizi analitik yolla yapılmış ve gerilme durumlarının malzeme parametreleri ile nasıl değişim gösterdiğini grafikler ile belirlemiştir [57].

Polat, hasarlı tabakalı kompozit plakalara yama yapıştırarak değişik şartlarda tamir etmiş ve bu tamirler arasından en uygun yöntemi araştırmıştır [58]. Yapıştırmalı bağlantılarda, st üste bindirilen levhaların ucunda eksen kaıklığından dolayı açılma meydana gelerek atlağa neden olmakta ve bağlantı kopmaktadır. Bundan dolayı, bu durumu engellemek için, çalışmasında cam fiber levhaların ucuna 2400 texlik fiber atılmıştır.

Mevcut çalışmada, örgülü cam ve karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler üretilerek, hasarlanmış (ortalarına dairesel 10 mm delik delinmiş) deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanmış olan bu numuneler değişik koşullarda yapıştırıcı ve yama kullanılarak tamir edilerek, eksenel çekme testine tabi tutulmuştur. Maksimum hasar yükleri belirlenmiştir. Böylelikle, yamalı tamiratlar için belirlenmiş olan bu değişik koşulların, yapılmış olan tamiratın performansına olan etkileri araştırılmıştır.

3. KOMPOZİT MALZEMELERE GENEL BAKIŞ

Sanayide kullanımları bakımından malzemeler; metaller, seramikler ve plastikler olarak bilinmektedirler. Bununla birlikte, aynı ya da farklı gruplardan iki veya daha fazla malzemelerin bir araya getirilip yeni özellikler kazandırmak için makro düzeyde birleştirilmesiyle elde edilen bu yeni malzemelere de "Kompozit Malzemeler" adı verilmektedir.

Kompozit malzemelerin üretimleri çok eski zamanlara dayanmaktadır. İlk yıllarda kompozit malzemelerin üretimleri herhangi bir mühendislik çalışmasına dayanmadan, tamamen deneme yanılma sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu malzemelerin özellikleri denemeler sonucunda kazanılmış olan tecrübeler sonucunda bulunmuştur. İlk olarak 1940'lı yılların başında "Kompozit Malzeme" kavramı ortaya atılmış ve bundan sonra bu konu, bilimde ve endüstride bir mühendislik çalışması olarak ele alınmıştır. Bu çalışmalar için temel gereksinimler; malzemelerdeki yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastisite modülü/yoğunluk oranını elde etmek amacına dayanır. Kompozit malzemeler bu özelliklerinden dolayı, özel uygulama alanlarında, askeri ve uzay çalışmalarında zamanla çok sık kullanımları sonucunda önemleri giderek artmıştır. Bu malzemelerin farklı alanlarda kullanımları için, yüksek kalitede mekanik ve fiziksel özellikler elde etmek amacıyla değişik fazdaki farklı malzemeler bir araya getirilerek çok farklı malzemeler üretilmektedir.

Bu bölümde, kompozit malzemeler hakkında genel bir bilgi verilerek, mevcut çalışmada da kullanılan tabakalı kompozit malzemelerin üretim yöntemleri, avantaj ve dezavantajları ve kullanım alanları konusu açıklanmıştır.

Gerçek bir kompozit malzeme tanımlaması yapmak için, malzemelerin yapısal biçim ve malzeme bileşenlerinin kompozisyonunu da hesaba katmak gerekir. Bu durumda, kompozit malzeme tanımlaması şu şekilde yapılabilir. "Kompozit malzeme, özel karakteristikler ve özellikler elde etmek amacıyla, makro ölçekte, farklı kompozisyon veya formdaki malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen malzemedir. Kompozit malzemelerde, malzemeyi meydana getiren bileşenler, yapı içerisinde kendi özelliklerini korurlar, fiziksel olarak belirlenebilirler ve bileşenleri arasındaki ara yüzeyler kolaylıkla gözlenebilir" [56].

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan malzeme bileşimleri sınırsızdır. Ancak, bu yapıyı meydana getiren bileşenlerin şekilleri sınırlı olmaktadır. Kompozit

malzemelerin yapısı fiberler ve matrislerden meydana gelmektedir. Genelde fiberler, kompozit yapıda takviye elemanı olarak kullanılırlar. Fiberlerin bu şekildeki kullanımları kompozit yapının mukavemetli olmasını sağlar. Kompozit yapıda takviye elemanı olarak kullanılan bu fiberler genellikle iplikçikler halinde bulunurlar. Fiber malzemesinin kompozit malzeme içerisindeki uzunluğu, tipi ve yayılım açısı, kompozit malzemelerin aşağıda belirtilen özelliklerini değiştirmektedir [70,71].

- Yoğunluğunu
- Çekme dayanımını ve çekme kuvveti altındaki elastisite modülünü
- Basma dayanımını ve basma kuvveti altındaki elastisite modülünü
- Yük altındaki kırılma ve yorulma performansını
- Darbe yükü dayanımını
- Elektriğe karşı göstereceği direnç özelliğini
- Termal iletkenlik ve yalıtkanlık özelliğini
- Paslanma direncini
- Ses yalıtım özelliğini
- Titreşim sönümleme özelliğini
- Kompozit yapının toplam maliyetini

Kompozit malzemelerde kullanılan matris malzemesi ise fiberleri bir arada tutar, fiberler arasında oluşan gerilme aktarımını sağlar ve böylelikle mekanik yapının oluşumunu sağlayarak, fiberleri fiziksel ve kimyasal dış etkilere korur. Matris malzemesi, kompozit yapının bir sistem olarak ortaya çıkmasını sağlayan temel yapı olarak bilinir. Genelde matris malzemesi olarak metal alaşımları kullanılabildiği gibi, endüstride yaygın olarak kullanılan reçinelerin kullanımları her yönden daha uygundur ve çok sık olarak tercih edilmektedirler.

Genelde karbon lifleri, çelik, cam lifleri, kevlar, grafit gibi mukavemeti yüksek olan malzemeler fiber malzemesi yani takviye elemanı olarak seçilmektedir. Matris malzemesi olarak da, termoset reçineler (epoksi, polyester, vinilester, fenolikler, poli üreanlar, bismaleimides, poliamids, polibenzimidazoles), termoplastikler, metaller (Alüminyum, Titanyum, Magnezyum alaşımları, Bakır temelli alaşımlar, Nikel temelli alaşımlar), seramikler (silicon carbide, alüminyumoksit) kullanılmaktadır [72].

Polyester ve epoksi matris malzemeleri, kompozit malzemelerde en çok kullanılan reçinelerdir. Pek çok alanda kullanılabilmek özelliği, düşük üretim maliyetleri ve imalat işlemlerinin kolay olması gibi özellikler, matris malzemelerinin en önemli ve istenen

özelliklerindendir. Ayrıca, bu malzemelerin mekanik özellikleri de oldukça iyidir. Kullanılan matrikse bağlı olarak kompozit malzemeler, polimer matriks kompozitler, metal matriks kompozitler ve seramik matriks kompozitler olmak üzere, üç genel sınıfa ayrılmıştır [72]. Polimer matriksli kompozit malzemeler, genelde ticari olarak tercih edilmekte oldukları ve çok sık kullanıldıkları bilinmektedirler. Ancak, metal matriksli kompozitler ve seramik matriksli kompozitler; genelde, yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır [73].

3.1. Polimer Esaslı Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme denildiğinde genel olarak, elyaf fiberleri takviye edilmiş plastik malzemeler akla gelmektedir. Modern olarak ilk sentetik plastikler 1900'lerin başında geliştirilmiştir. 1930'ların sonunda plastik malzemelerin genel özellikleri diğer malzeme çeşitleri ile boy ölçüşür düzeyde gelişmeye başlamıştır. Kolay şekil verilebilir olması, metallere oranla daha düşük yoğunlukta olması, düzgün yüzey kalitesine sahip olması ve paslanmaya karşı dirençli olma özellikleri, plastiğin yükselmesindeki en önemli faktörler olarak öne çıkmaktadırlar. Plastiklerde bu üstün özelliklerinin görülmesinin yanı sıra, sertlik ve dayanıklılık özelliklerinin düşük olmasından dolayı plastik malzemelerin güçlendirilmesi işlemleri en temel bir gereksinim olarak ortaya çıkmış ve bu alanda çalışmalar yapılmasına neden olmuştur. Bu çalışmalar sonucunda, 1950'li yıllarda polimer esaslı kompozit malzemelerin geliştirilmesi ile plastiklerde görülen bu eksiklikler giderilmiştir. Kompozitler, özellikle polimer esaslı kompozitler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, sertlik, mekanik aşınmaya karşı dayanıklılık gibi özelliklerde ön plana çıkmakta ve yapılarda kullanımları sonucunda pek çok avantajlar göstermektedirler. Ayrıca, kompozit malzemeler hem dayanıklıdırlar (takviye elemanlarının dayanıklı seçimi ile) hem de istenilen sertliklerde üretilebilirler. Bu özellikleri yönünden metallerle yarışabilecek durumdadırlar ve aynı zamanda metallerden çok daha hafiftirler [56].

Kompozit malzemeler reçine (matriks) ve takviye bileşenlerinden (fiberler) oluşmaktadırlar. Kompozitler temel olarak reçine içine gömdürülmüş sürekli veya kırılmış elyaflardan oluşmaktadır. Kullanılan reçine kalıp görevi görerek malzemenin fiziksel ana şeklini belirler. Matriks içine kullanılan bileşenler birbirleri içinde çözülmeyle ayrı dururlar. Kompozit malzemelerde sertlik, sağlamlık gibi yapısal özellikleri fiberler belirler. Plastik reçine malzemesi ise fiberin yapısal bütünlüğü

oluşturması için birbirine bağlanmasını, yükün fiberler arasında dağılmasını ve fiberlerin kimyasal etkilerden ve atmosfer şartlarından korunmasını sağlar. Matriks ve takviye malzemelerine göre kompozit yapı tipleri, Tablo 3.1 de görülmektedir.

Kompozit malzemelerde kullanılan matrisler, polimer esaslı (termosetler ve termoplastikler), metal veya seramik esaslı olabilmekte ve bunların seçimi, malzemenin kullanım alanlarına göre değişmektedir. Polimer esaslı matrisler, düşük yoğunluklu ve genel olarak daha düşük dayanıklılık özelliğine sahiptirler [56].

Tablo 3.1. Matriks, takviye elemanı ve kompozit malzeme yapı tipleri [56].

Matris Malzemeleri	Takviye Elemanları	Kompozit Yapının Şekli
Polimerler	Lifler	Tabakalar
Metaller	Granül	Kaplamalar
Seramikler	Whiskers	Film-Folya
	Pudra	Bal peteği
	Yonga	Filaman Sarılmış Yapılar

Başlıca polimer esaslı matris malzemeleri polyester, epoksi, fenol ve vinil esterdir.

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanları ise,

1. Doğal elyaflar,
2. Sentetik organik elyaflar (naylon, aramid)
3. Sentetik inorganik, elyaflar (cam, karbon, boron vb.)'dir.

Çalışmada kullanılan kompozit malzemelerin matris malzemesi olarak epoksi reçine, takviye malzemesi olarak ise karbon ve cam fiberler seçilmiştir. Kompozit malzemelerde plastik matriks olarak kullanılan genelde üç tip plastik mevcut olup bunlar; termosetler, termoplastikler ve elastomerler'dir. Aşağıda sırası ile bunların bazı özellikleri belirtilmiştir [56].

3.1.1. Termoset Matriksler

Termoset esaslı matriksler kompozit malzemelerde matriks olarak en çok kullanılan malzemeler arasındadır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar. Bu malzemelerin ısıtılmasıyla meydana gelen kimyasal tepkimeler sonucunda sertleşirler ve sağlamlaşırlar.

Termoset polimerlerin polimerizasyon süreci termoplastiklerden farklıdır. Bu malzemelerdeki polimerizasyon süreci geri dönüşümü olmayan bir süreç olarak ortaya çıkar ve yüksek sıcaklıklarda dahi bu malzemeler yumuşamazlar. Çoğu termoset matriks malzemeleri, sertleşmemeleri için dondurulurlar ve bu şekilde muhafaza edilmek zorundadırlar. Dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet (1-4 hafta arası) bekletildiğinde ise sertleşmeye başlarlar ve özelliklerini kaybederler. Bu durumda, bu tip malzemelere şekil verilmesi güç olur ve kullanılamayacak duruma düşerler. Genel olarak dondurucu içinde olmak şartıyla raf ömürleri ise 6 ila 18 ay arasında değişmektedir. Termoset reçineler kimyasal etkili çevre şartlarında çözülmezler ve olağandışı hava şartlarında dahi uzun ömürlü olmaktadır. En yoğun olarak kullanılan bazı matriksler ve genel özellikleri aşağıda verilmiştir. Tablo 3.2'de ise bazı termoset plastik malzemelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri yer almaktadır [56].

Polyester: Özellikle denizcilik ve inşaat alanlarında 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 reçinelerin polimerizasyon süreçlerini tamamlaması için bazı ek maddelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar katalizör ve hızlandırıcı olarak adlandırılan ek maddelerdir.

Reçinelerin özellikleri;

1. Üretimde kolay kullanım sunarlar.
2. Çok düşük maliyetlidirler (0.5 - 1 \$/kg).
3. Sertleşme sırasında yüksek oranda çekme özelliğini gösterirler.
4. Zehirli sitiren gazı yayma özellikleri vardır.
5. Orta ölçekli mekanik özelliklere sahiptirler.
6. Kısa raf ömürlerinin mevcut olmasından dolayı çok çabuk bozulurlar ve böylelikle kısa sürede kullanılamayacak duruma düşerler [56].

Epoksiler: Geniş kullanım alanına sahiptirler.

1. İyi mekanik özelliklere sahiptirler.
2. Suya karşı dayanımları yüksektir.
3. Islakken 140 C°, kuruyken 220 C° 'ye kadar ısı dayanımı sağlarlar.
4. Sertleşme sırasında düşük oranda çekme özelliği gösterirler.
5. Yüksek maliyetlidirler (5 - 25 \$/kg).

6. Cilde aşırı zararlı olabilirler.
7. Doğru oranlarda karışımları son derece önemlidir.

Vinil ester:

1. Son derece yüksek kimyasal/çevresel dayanımı vardır.
2. Polyesterden daha iyi mekanik özelliklere sahiptir.
3. Aşırı sitiren içermesi nedeni ile zararlıdır.
4. Polyesterden daha pahalıdır (4 - 7 \$/kg).
5. İyi mekanik özellikler için uygun kür işlemleri gerekir.
6. Sertleşme sırasında yüksek oranda çekme yapar.

Bismaleimid: Uçak motorlarında ve yüksek ısıya maruz kalan parçalarda kullanılır

1. Son derece yüksek ısı dayanımı, yaşken 230 C°, kuru halde 250 C°
2. Çok yüksek maliyet (80 \$/kg).

Fenolikler: Ateşe dayanım ihtiyacı olan yerlerde kullanılır. Kür işleminin buharlaşma özelliği hava boşlukların oluşmasına ve yüzey kalitesinin düşmesine neden olur. Uçakların iç bölümlerinde, deniz araçlarının motorlarında ve demiryollarında kullanılır.

1. Yüksek ateş dayanımı vardır,
2. Düşük maliyetlere sahiptirler (4 - 8 \$/kg)
3. Yaş halde son derece zararlıdır.
4. Oldukça kırılgan forma sahiptirler
5. Düşük yüzey kalitesine sahiptirler.

Silikon:

1. Yüksek ateş dayanımı vardır.
2. Yüksek ısılarda dahi ürün özelliklerini koruyabilir.
3. Kür işlemi için yüksek ısı gereklidir.
4. Maliyeti 30 \$/kg'dan azdır.

Cynate Esters: Esas olarak, uçak endüstrisinde kullanılır. Mükemmel yapışkanlık özelliğine sahiptir. Yaş durumda 200 C° ye kadar dayanımı vardır.

Tablo 3.2. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [56].

Malzeme cinsi	Epoksi	Polyester	Fonelik
Yoğunluk (g/cm ³)	1.11	1.04-1.46	1.24-1.32
Elastisite modülü (MPa)	7000	3400	4800
Çekme dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	42	1.5-2.0
Isıl iletkenlik	0.19	0.19	0.15
Isı genleşme katsayısı (1/°C)	45-65	55-100	68

3.1.2. Termoplastik Matrisler

Termoplastik polimerlerin çeşitleri çok fazla olmasına rağmen matriks olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler, düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ve ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termosetlere göre matriks olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme işlemi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı, güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine de sahiptirler. Tablo 3.3.'de bazı termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri verilmektedir. Termoplastiklerin kompozit malzemelerde matriks olarak tercih edilmemelerinin başlıca nedeni, üretimindeki zorlukların yanı sıra yüksek maliyetidir. Oda sıcaklığında düşük işleme kalitesi sağlarlar, bu onların üretimde zaman kaybına yol açmasına neden olur. Bazı termoplastikleri istenilen şekillere sokabilmek için çözücülere ihtiyaç duyulabilir. Termosetlere kıyasla termoplastiklerin hammaddesi daha pahalıdır [56].

Tablo 3.3. Bazı termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [56].

Malzeme özellikleri	Polietilen	Politetratken	PA6.6	Polipropilen
Yoğunluk (g/cm ³)	0.95	0.92	1.14	0.90
Elastisite modülü (MPa)	1000	22	700	1400
Çekme dayanımı (MPa)	30	14-34	70	35
Kopma uzaması (%)	10-1200	100-650	300	10-500
Termal iletkenlik	0.48	0.33	0.25	0.12
Isı genleşme katsayısı	60-110	100-220	70-120	80-100
Ergime sıcaklığı (°C)	-	-	260	175

3.2. Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemelerde kullanılan fiberlerin fiziksel biçimleri, oluşturulan yeni malzemenin özellikleri açısından çok önemli bir faktördürler. Takviye malzemeleri genel olarak 3 farklı biçimde bulunmaktadır. Bunlar parçacıklar, süreksiz elyaflar ve sürekli elyaflar şeklindedirler. Parçacıklar, genelde küresel bir biçimde olmamalarına rağmen her yönde yaklaşık olarak eşit boyutadırlar. Çakıl, mikro balonlar ve reçine tozları parçacık takviyelerine bazı örnekler olarak sayılabilir. Takviye malzemelerinin herhangi yöndeki bir boyutu, diğer yönlerdeki boyutlarına göre daha büyük olduğunda, bu tip malzemelere elyaflar adı verilmektedir. Süreksiz elyaflar (doğranmış elyaflar, öğütülmüş elyaflar veya püskül şeklindeki) birkaç milimetreden birkaç santimetreye kadar değişen ölçü aralıklarında olabilmektedir. Çoğu fiberin çapı birkaç mikrometreyi geçmemektedir. Bu nedenle, elyafın parçacık halden fiber haline geçişi için çok fazla bir uzunluğa gerek yoktur [56].

Sürekli elyaflar ise, tel sarma yöntemi gibi yöntemler ile kesilmeden sürekli ip şeklinde kullanılmaktadır. Elyaflar, en yüksek mekanik özelliklerini boylamasına gösterirler. Bu özellikler, kompozit malzemelerin aşırı anizotropik malzeme özelliğini göstermelerine neden olur. Metallerde bu özellik görülememektedir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin tasarımları aşamasında, fiberlerin reçine içindeki yerleşimleri ve geometrilerini göz önünde bulundurmak çok önemlidir. Bu tür malzemelerde görülen bu anizotropik özellik, tasarım aşamasında konstrüksiyonun uygun yerinde kullanılarak avantaja dönüştürülebilir.

Bazı durumlarda ve konstrüksiyonlarda, malzemelerde tüm yönlerde eşit mukavemet elde etmek ve dayanımlarını artırmak için, takviye edilen fiberler kumaş halinde dokunmaktadır. Sürekli fiberlerle hazırlanan bu dokuma elyafı kumaşların kullanım yerine göre farklı amaçlar için geliştirilmiş türleri tasarlanabilir.

3.2.1. Cam Elyafı

Cam elyafı silika, kolemanit, alüminyum oksit, soda gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Cam elyafı, maliyetinin düşük olmasından dolayı, fiber takviyeli kompozitler arasında en çok bilinen ve en çok kullanılan elyaflar arasındadır. Elyaflar, işlenmeleri sırasında dayanıklılıklarının %50'sini kaybetmelerine rağmen, son derece sağlamdırlar. Elyaf kumaşları genellikle sürekli cam elyafının lifleri ile üretilmektedir. Cam elyafının üretilmesi esnasında değişik kimyasalların eklenmesi ve farklı bazı özel üretim yöntemleri ile farklı türde cam elyafları üretilebilmektedirler. Bu türler;

A -Cam: Bor ilaveli veya ilavesiz alkali-kireç camlarıdır. Pencereelerde ve şişelerde en çok kullanılan cam çeşididir. Kompozitlerde çok fazla kullanılmaz.

S- Cam: Yüksek kimyasal direnç ve dayanım gösterirler. Depolama tankları gibi yerlerde kullanılmaktadır.

C- Cam: Korozyon ve asidik koşullara karşı kimyasal stabilite sağlayan kalsiyum borosilikat camlarından oluşmaktadır.

E- Cam: Takviye elyaflarının üretiminde en çok kullanılan cam türüdür. %0.8'den daha az oranda alkali oksit bileşenleri içeren alüminyumbor silikat camlarıdır. Sentetik liflerin takviyesinde yüksek mukavemet ve elektrik dayanımı gereken durumlarda kullanılmaktadır. Düşük maliyet, iyi yalıtım ve düşük su emiş oranı özelliklerine sahiptir.

S + R Cam: Yüksek maliyetli ve yüksek performanslı bir malzemedir. Yalnız uçak sanayisinde kullanılır. Elyaf içindeki tellerin çapları E cam'ın yarısı kadardır. Böylece elyaf sayısı fazlalaşılarak birleştirmelerde daha sert yüzeyler elde edilebilmektedir. Bu da, birleşme özelliklerinin daha güçlü olması anlamına gelmektedir.

3.2.2. Karbon Elyafı

Karbon fiberi ilk olarak, karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni özelliğinin mevcut olduğunun bilinmesinden sonra üretilmiştir. Eskiden, karbon elyaflarına çok yüksek ısı

işlem uygulandığında, elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlardı ve bu elyaflara grafit elyafı denilirdi. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmıştır. Artık karbon elyafı da grafit elyafı da aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon elyafı, epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özelliklerini gösterir. Karbon fiber üreticileri devamlı bir araştırma ve gelişim içerisindeyler. Bundan dolayı, endüstride üretilen karbon elyaflarının çeşitleri sürekli değişmektedir. Karbon elyaflarının üretimi çok pahalı olduğu için, ancak uçak sanayisinde, spor gereçlerinde veya tıbbi malzemelerin yüksek katma değerli uygulamalarında kullanılmaktadır [56].

Karbon elyafları piyasada iki biçimde bulunmaktadır:

Sürekli Elyaflar: Dokuma, örgü, tel bobin uygulamalarında, tek yönlü bantlarda ve prepreg'lerde kullanılmaktadır. Bütün reçinelerle rahatlıkla kombine edilebilirler.

Kırılmış Elyaflar: Genellikle enjeksiyon kalıplamada ve basınçlı kalıplardaki makine parçalarının imalatlarında ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı olan valflerin yapımında kullanılırlar. Bu yöntem ile elde edilen ürünler, mükemmel paslanma direncine ve yorulma dayanımına sahip olurlar ve kullanımlarında yüksek sağlamlık ve sertlik özellikleri gösterirler.

3.2.3. Aramid Elyafı

Aramid kelimesi bir çeşit naylon olan aromatik poliamid maddesinden gelmektedir. Aramid elyafının piyasadaki ticari isimleri Kevlar (DuPont) ve Twaron (Akzo Nobel) olarak bilinmektedir. Tablo 3.4'de piyasada bulunan bazı elyafların mekanik özellikleri ve yoğunluk değerleri verilmektedir. Endüstride görülen farklı uygulamalardaki ihtiyaçları karşılamak için, farklı özelliklere sahip olan birçok aramid elyafı üretilmektedir. Bu tip elyaflarda görülen önemli bazı özellikler şunlardır;

- Renkleri genelde sarı olmaktadır.
- Yoğunlukları düşüktür.
- Yüksek dayanıklılığa sahiptirler.
- Darbelere karşı oldukça yüksek dayanım gösterirler.
- Yüksek aşınma dayanımına sahiptirler.
- Yorulma dayanımları yüksektir.
- Yüksek kimyasal dayanıma sahiptirler.
- Kevlar elyaflı kompozitler cam elyaflı kompozitlere göre % 35 daha hafiftir.

Tablo 3.4. Belli başlı elyafların karşılaştırılması [56].

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
E-Cam	2.55	2000	80000
S-Cam	2.49	4750	89000
Aluminyum	3.28	1950	297000
Karbon	2.00	2900	525000
Kevlar 29	1.44	2860	64000
Kevlar 49	1.44	3750	136000

Kompozit malzemelerin günümüzde, karayolu ve demiryolu taşımacılığı, havacılık ve uzay taşıtları, denizyolları, inşaat, kimya, elektrik ve nükleer endüstri sektörleri, otomotiv sanayi, iş makineleri, ev aletleri, şehircilik ve tarım sektöründe geniş bir kullanım alanları mevcuttur [56].

Uygulamada, kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıda belirtilen özelliklerden birinin veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanarak malzemeyi avantajlı hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaca yönelik olarak, kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden hemen hemen tamamı, ilkel şekilde de olsa başlangıçtan beri kullanılagelen yöntemlerdir. Ancak, hepsinde değişmeyen temel ilke, bileşenlerin zayıf yönlerinin istenilen amaç doğrultusunda iyileştirilerek daha nitelikli ve dayanıklı bir yapının elde edilmesidir. Bu özelliklerin başlıca olanları şunlardır [56];

- Mekanik dayanımları, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımları,
- Yorulma dayanımı, aşınma direnci,
- Paslanmaya karşı göstereceği direnç,
- Kırılma tokluğu,
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık özelliği,
- Isı iletkenlik özelliği (ısı direnci),
- Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnç,
- Ses iletkenliği, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu,
- Rijitlik, ağırlık,
- Görünüm ve benzeri özellikler,
- Birim maliyetinin düşürülmesidir.

3.3. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

İstenilen özelliklere ve biçimlere sahip olan kompozit malzemelerin üretimleri için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazı temel olanları aşağıda verilmiştir [56].

3.3.1. Elle Yatırma Yöntemi

Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları, hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılarak sıvı reçine fiber katmanlarına emdirilir. Fiberler yatırılmadan önce kalıp temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra fiber katları yatırılır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. Elle yatırma tekniğinde en çok kullanılan polyester ve epoksinin yanısıra vinil ester ve fenolik reçineler de tercih edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen, düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur.

3.3.2. Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemi, elle yatırma yönteminin aletli ve otomasyonlu şeklidir. Kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi, tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırıcı sayesinde yapılır. Püskürtme işlemi sonrasında yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur.

3.3.3. Elyaf Sarma Yöntemi

Bu yöntem, özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilirler. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşmeye bırakılır. Ardından döner kalıp çıkartılır. Bu yöntem ile üretilen ürünler genellikle silindirik borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınçlı tanklardır.

3.3.4. Reçine transfer kalıplama / Reçine Enjeksiyonu Yöntemi

Bu üretim yöntemi, diğer yöntemlere göre daha hızlı ve uzun ömürlü olmasına rağmen iki parçalı kalıp kullanımını gerektirir. Kalıbın kompozit malzemeye yapılması çelik kalıba nazaran maliyetin daha düşük kalmasına neden olmaktadır.

3.3.5. Profil Çekme (Pultrüzyon) Yöntemi

Pultrüzyon işlemi sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretilebildiği düşük maliyetli seri üretim yöntemidir. Pull ve Extrusion kelimelerinden türetilmiştir. Sisteme beslenen sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirildikten sonra 120-150 C° ısıtılmış şekillendirme kalıbından geçilerek sertleşmesi sağlanır.

3.3.6. Hazır Kalıplama Yöntemi

Hazır kalıplama, bünyesinde kalıplama bileşenleri olarak cam elyafı, reçine, katkı ve dolgu malzemelerini içeren kalıplanmaya hazır, kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır.

3.3.7. Hazır Kalıplama Pestili Yöntemi

SMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan pestil biçiminde bir malzemedir. Sürekli lifler, 25-50 mm kırılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında kullanılır. Genellikle 1m genişliğinde ve 3mm kalınlığında üretilirler.

3.3.8. Hazır Kalıplama Hamuru Yöntemi

BMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan hamur biçiminde bir malzemedir. Bu yöntem reçine transfer kalıplamaya benzer bir yöntemdir. Farklılığı reçine/elyaf karışımının kalıp dışarısında karışmış ve eritilerek basınç altında boş kalıp içine enjekte ediliyor olmasındadır. Sadece düşük viskoziteye sahip termoset reçineler bu yöntemde kullanılabilir [56].

4. YAPIŞTIRMA OLAYI VE YAPIŞTIRICILARIN ÖZELLİKLERİ

Son zamanlarda kimya sanayisinde görülen büyük gelişmelere paralel olarak, plastiklerde, kompozit malzemelerde ve yapıştırıcılarda da aynı hızda gelişmeler olmuştur. Çelik, seramik, cam, ağaç, kâğıt, deri ve tekstil gibi malzemelerin yerine plastikler ve kompozit malzemeler kullanılmaya başladıktan sonra, bu malzemelerin yapışkanlık özellikleri de dikkate alınarak, değişik özelliklerde yapıştırıcılar üretilmiştir.

Bu bölümde, yapışma olayı ve yapıştırıcı teknolojisinin temelleri ele alınmış, yapıştırıcılar ve çeşitleri hakkında genel bilgi verilerek, yapıştırıcı ve yama kullanılarak hasar tamirâtı yapılan mevcut çalışmaya temel oluşturulmaya çalışılmıştır.

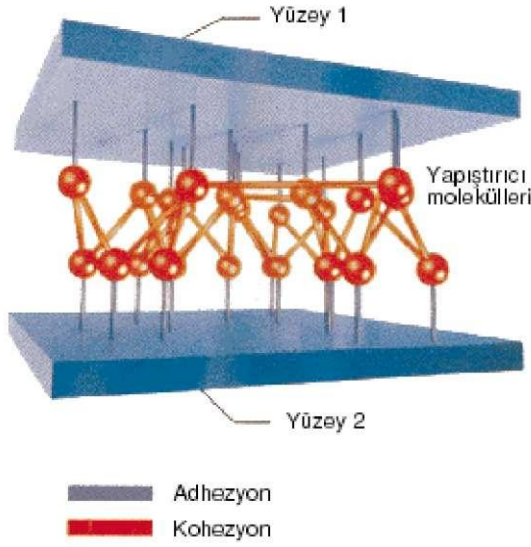
4.1. Yapışma Olayı

Yapışma olayı, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında meydana gelir. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki yapışma kuvvetine adhezyon kuvveti, yapıştırıcının kendi içinde meydana gelen kuvvetlere ise kohezyon kuvvetleri denilmektedir. Bu iki kuvvetlerin oluşması için meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaya yapışma denir. Yapışma olayının daha iyi anlaşılabilmesi için, adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinin anlaşılması gerekmektedir. Aşağıda adhezyon ve kohezyon kuvvetleri ile ilgili kısaca bilgi verilmiştir [56].

4.1.1. Adhezyon Olayı

"Adhezyon" iki malzemenin birbirlerine temas eden yüzeylerindeki yapışma kuvvetidir. Burada mevcut olan ve "Van der Waals kuvvetleri" olarak ta adlandırılan çekim ve yüzeye tutunma kuvvetleri, yüzeylerin birbirlerine yapışmasını sağlayan en önemli faktörlerdir. Yapıştırma olayı öncesinde bu malzemelerin birbirlerine temas eden yüzeyleri, mekanik olarak işlenmesi gerekmektedir. Eğer yapıştırıcı, yüzeylerde oluşturulan bu pürüzlere tam olarak temas edemezse, bu moleküller arası kuvvetler oldukça zayıf kalır. Bu nedenle, yapıştırmada kullanılan yapıştırıcının yüzey pürüzlerine tam olarak nüfuz etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gerekmektedir. Bundan dolayı, yapışmanın kuvveti, hem yüzeylerin ıslatılmasına, hem de yüzeyin yapışma özelliklerine bağlıdır. Bu işlemler, moleküller arası maksimum temas için gereklidirler. Islatma,

yapıştırıcı sürülen yüzeyin yüzey gerilimine ve yapıştırıcının viskozitesine bağlıdır. Yapışma için, belirli bir yapıştırıcı yüzey geriliminin oluşması gerekmektedir. Yapışma olayının gerçekleşeceği yüzeylerde kir ve yabancı maddelerinin bulunması da ıslatmayı olumsuz etkiler ve meydana gelecek olan yapışmanın kalitesini bozar. Şekil 4.1. yapıştırma bölgesinde meydana gelen kuvvetleri göstermektedir [6].



Şekil 4.1.Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler [8,56].

4.1.2 Kohezyon Olayı

Kohezyon, yapıştırıcıyı meydana getiren kütle bileşenlerinin, yapıştırıcının polimerizasyonu esnasında meydana gelen ve kimyasal olarak gerçekleşen bağ kuvvetleri ile fiziksel olarak oluşan “Van der Waals kuvvetleri” nin bir arada tutulmasıdır. "Kohezyon", yapıştırıcının kendi bünyesindeki moleküller arasında oluşur ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvet olarak adlandırılmaktadır [56].

Van der Waals Kuvvetleri: Maddelerdeki moleküller küçük ya da büyük boyutlarda olabilir. Bu moleküllerin farklı yüklerine tesadüf eden pozitif ve negatif kutuplar bulunmaktadır. Böylece her molekülden ibaret olan küçük mıknatıslar ortaya çıkar. Aynen mıknatıslarda olduğu gibi, burada da çeşitli dipoller elektromanyetik kuvvetlerle birbirlerine bağlanmaktadır. Bu arada oluşan bağlar, Van der Waals kuvvetleri

olarak adlandırılmaktadır. Oluşan bu Van der Waals bağları diğer bağlar kadar kuvvetli olmamakla beraber, oluşumları yapışmanın gerçekleşmesi için gereklidir.

Kovalent Bağ: Bu bağlar, atomlar arasında elektron köprüleri kurularak kenetlenmeleri durumunda oluşmaktadır. Buradaki kuvvetler, ortak kullanılan elektronların kendi eksenleri etrafında birbirlerine zıt yönde dönmeleri sonucu ortaya çıkan elektromanyetik kuvvetlerdir. Zıt yönde dönen elektronların oluşturacağı elektromanyetik alanlar, birbirlerini bir mıknatısın artı ve eksi kutupları gibi çekerler.

Zincirin en zayıf halkası tarafından bir zincirin kuvvetinin belirleneceği ilkesi gereği, yapıştırma işleminde, adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinin yaklaşık olarak eşit olması gerekir. Kohezyon kuvvetleri, genelde yapıştırıcı malzemesinin sahip olduğu özellikler ile ilişkili bir durumdur ve yapışma olayından önce tahmin edilebilmektedir. Ancak, adhezyon kuvveti aşağıda belirtilen uygulamalar ile arttırılabilmektedir [56].

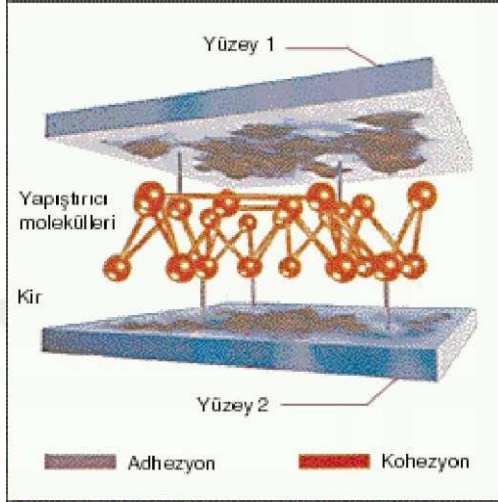
- Yağ alma veya mekanik aşındırma ile istenmeyen yüzey tabakalarının temizlenmesi işlemi,
- Yapıştırılacak yüzeyleri primer koruyucu ile kaplayarak yeni, aktif bir yüzey oluşturulması işlemi,
- Aşındırma, korona işlemi, düşük plazma işlemi vs. ile yapıştırılacak yüzeyin aktivitesinin değiştirilmesi.

Yapışmadaki adhezyon kuvvetini ve yapışma performansını belirgin bir ölçüde arttırmak için, yapıştırılacak yüzeylerde uygun bir yüzey hazırlığının yapılması gerekmektedir. Doğru şekilde yüzey hazırlığı yapılmış bir parçanın, temiz olması, mekanik işlem olarak düzgün ve uygun pürüzlülükte işlenmiş bir yüzeye sahip olması gerekmektedir. Bu şekilde hazırlanmış olan yüzeylerde gerçekleşen yapışma olayı, sağlam ve uzun ömürlü olur. Bu işlemlerin yapılması, sağlıklı bir yapışmanın gerçekleşmesini sağlamak açısından çok önemlidir.

4.2. Yüzey Hazırlığı

Sağlam bir yapışma olayının gerçekleşmesi için, yapıştırıcı ile yapıştırılacak yüzeylerin yüzey hazırlama işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Bu işlem ne kadar iyi yapılır ise, bu yüzeylerdeki yapıştırıcının kullanımı ile gerçekleşen yapışma olayı da o derece sağlıklı olur. Yapışma kuvveti, büyük ölçüde yapıştırılacak yüzeyler ile yapıştırıcı arasında oluşan adhezyon kuvveti tarafından belirlenmektedir. Yapıştırılacak olan bu

yüzeyler iyi temizlenerek uygun bir yüzey hazırlama işlemi uygulanmalıdır. Bu işlemler ne kadar standartlara uygun ve iyi yapılır ise, birleştirilecek yüzeylerin yapışma kuvveti de o derece artacaktır. Eğer birleştirilecek yüzeylerde kirler mevcut olur ise, yapışmadaki birleşme kuvveti de Şekil 4.2 de görüldüğü gibi zayıf olacaktır.



Şekil 4.2. Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirler adhezyonu düşürür [8,56].

Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirler ve istenmeyen malzemeler yapışmanın kalitesini düşürmektedir. Bu da, yapılacak tamiratın kalitesini ve yük taşıma kapasitesini düşürür.

Yapıştırılacak yüzeylerinin temizlikleri ve mekanik işlemleri, yapıştırıcı kullanarak yapılacak olan tamirattaki en önemli olaydır ve yapışmanın kalitesini etkiler. Bundan dolayı, özellikle havacılık ve uzay sanayisinde bu işlemler için, kimyasal temizleme ve aşındırma işlemleri geliştirilmiştir. Aşağıda birçok yüzey hazırlama metotları, genel hatlarıyla özet olarak verilmiştir [56].

4.2.1. Yapıştırılacak Yüzeylerin Yağdan ve Pisliklerden Arındırılması

İyi bir yapışma olayının gerçekleşmesi için, yapıştırılacak yüzeyler yağ, gres ve toz benzeri her türlü kalıntılardan tamamen arındırılması ve temizlenmesi gerekmektedir. Bu temizleme işlemleri için, kullanıldıkları yüzeylerde kalıntı bırakmadan buharlaşan bazı solventler uygun bir temizleme malzemeleri olarak öne çıkmaktadırlar. Günümüz endüstrisinde bu temizleme amacı için kullanılan bazı solventleri ve bunların temizleme kapasiteleri Tablo 4.1.' de verilmiştir.

Alkalın veya asit bazlı sulu temizleyiciler her zaman korozyon önleyici bileşenleri içermektedirler. Eğer yeterince iyi temizlenmeyen yüzeylerde, bu malzemeler temizleme sonrası yapıştırılacak yüzeylerde kalırsa, tamiratlardaki yapışma kuvvetini azaltabilir veya yapıştırıcının kürleşmesini engelleyebilirler. Eğer bu tür temizlik malzemeleri kullanılacaksa, mutlaka önceden testler yapılmalıdır. Her kullanımlarından sonra, tüm yüzeyler iyice silinmeli ve durulanmalıdır.

Tablo 4.1. En önemli solventler ve temizleme kapasiteleri [8,56].

Solvent Çeşidi	Temizleme Kapasitesi	Yanıcı veya parlayıcı mı?
Hidrokarbonlar (izoparafinler)	İyi	Evet
Ketonlar (aseton)	İyi	Evet
Alkoller	Orta	Evet
Su bazlı	İyi	Hayır

Bazı durumlarda, çok kirli yüzeylere ön-temizlik yapılması tavsiye edilmektedir. Bu işlem, temizlik banyosunun aşırı kirlenmemesi için gereklidir. Günümüzde, bu temizleme işlemlerinde buharlı yağ alma sistemleri çok sıklıkla kullanılmaktadırlar. Bu yöntemde solventler kaynama noktasına kadar ısıtılarak buharlaştırılırlar. Soğuk parçalar buharlaşmış temizleyici ile temas ettiğinde, temizlenecek yüzeyler üzerinde yoğunlaşırlar ve bu işlem sonucunda açığa çıkan sıvı yüzeylerden akarak burada mevcut kalmış kir ve yağ parçacıklarını temizler [56].

Yağ alma işlemi, çoğunlukla tamamen kapalı makinalarda, yağ alma solventleri ile yapılır. Birçok uygulamada yüzeylere hızlı etkili bir temizleyici ile ön-işlem yapılmaktadır ve genelde bu işlem yeterli olarak görülmektedir. Bu şekilde yüzeyler yağ, gres, kir ve diğer kalıntılardan temizlendikten sonra, tamiratlar için yüzeyler yapıştırmaya hazır hale getirilir. Genelde solventler kullanılarak yüzeylerden kiri ayıran kimyasal işlem ile temizlik yapılırken daha iyi netice almak için, bu temizleme işlemi mekanik olarak ta desteklenmelidir [56].

4.2.2. Mekanik Ön İşlem

Atmosferde bekletilen metal yüzeyler çoğunlukla kirli bir oksit tabakasıyla kaplanırlar. Bu oksit tabakası normal temizleme sistemleri ile temizlenemez. Bu tür durumlarda, temizleme işlemleri için zımparalama, taşlama veya tel fırça ile fırçalama gibi mekanik ön-işlemler gerekmektedir.

Zımparalama işlemi geniş yüzeyleri temizlemek için oldukça iyi bir yöntemdir. Çok kalın zımpara kullanmamak kaydıyla, bu işlem sonucu elde edilen yüzey pürüzlüğü sayesinde, tamirat için yapıştırılacak yüzeylerde çok iyi yapıştırma sağlanmaktadır. Taşlama işlemi ile de aynı şekilde iyi bir yüzey pürüzlüğü elde edilir. Fakat bu işlem ile yüzey pürüzlülüğünün kontrolü zordur. Bu yöntemde yüzey pürüzlüğünü iyi seçmek önemlidir. Taşlama, zımparalama veya fırçalama işlemleri sonrası, yüzeylerdeki tüm kalıntıların temizlenmesi için bu parçalara yağ alma işlemi uygulanmalıdır. Çok kirli yüzeyler, mekanik işlem öncesinde de yağdan arındırılmalıdır. Böylelikle, kullanılan zımpara veya taşlar, yüzeylerde mevcut olan kirleri diğer noktalara bulaştırmaz [56].

4.2.3. Aşındırma

Aşındırma işleminin amacı, yama yapıştırmalı tamiratlarda yapıştırılacak yüzeylerde iyi bir yapışma kalitesi için, uygun bir yüzey elde etmektir. Yani yapıştırılacak yüzeylerdeki toz, oksit ve gevşek malzemelerin kazıtılarak temizlenmesidir. Aşındırma işleminden sonra, yapıştırılacak yüzeylerin üzerindeki istenmeyen parçalar, daha sonra gerilme çatlağı sonucunu oluşturacaklarından, yapışma yüzeyleri üzerinde mevcut bulunan toz, oksit ve gevşek malzemelerin temizlenmesi gerekir [56].

Zımparalama işlemi, el ile ve makine ile olmak üzere, iki şekilde yapılmaktadır. Makine ile yapılan zımparalama işleminde, su ve hava ile yapılan iki türü vardır. Su ile beraber kullanılan tipinde, demir malzemelerin aşındırılması için kullanıldığında, aşındırma işleminden hemen sonrasında ya parçaların tamamen kurutulması gerekir ya da kullanılan suya korozyon önleyici ilave edilmesi gerekmektedir. Plastik malzemelerin zımparalanmasında makine kullanılırsa, zımparalama süresinin çok kısa tutulması gerekmektedir. Aksi takdirde, zımparalama işlemi esnasında açığa çıkan yüksek ısıdan dolayı plastik malzemelerin erimeleri söz konusu olmaktadır. Eğer zımpara makinesi

mevcut değilse, yapıştırılacak yüzeylerin işlenmesinde, 125 ile 315 µm arasındaki zımparalar kullanılarak el ile aşındırılmaları tavsiye edilmektedir.

El ile aşındırmada en uygun zımpara çeşidi yapılan denemeler sonucu bulunur. Genelde yapılmış denemeler sonucunda, 125 µm' lik zımparalar en uygun çeşit olarak seçilmektedir. Aşındırma işleminin nemli ortamda yapılması, yapışacak parçaların toz tutmasını ve lekelenmesini önlemektedir. Aşındırma işleminden hemen sonra parçaların temiz ve sıcak hava ile kurutulması gerekmektedir [56].

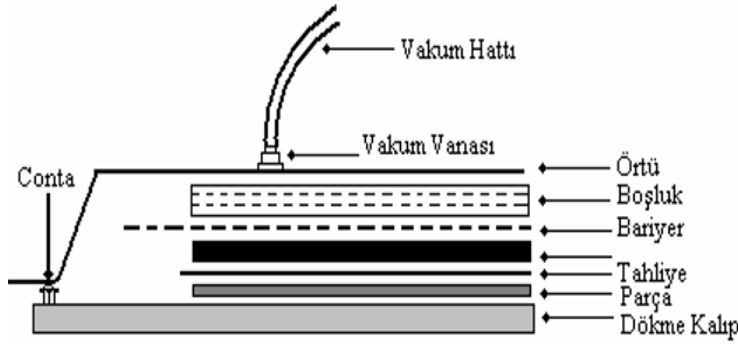
4.3. Montaj

Yapıştırıcı kullanılarak birleştirilen parçalarda, kullanılan yapıştırıcı kuruma sıcaklığına erişinceye kadar, yapıştırıcının akma ve erime potansiyeli vardır. Tamiratlarda, iyi bir yapışma kalitesi elde etmek için birleştirilen parçaların, burada kullanılan yapıştırıcı sertleşinceye kadar hareketsiz, dengeli ve hiçbir gerilmeye maruz kalmadan sabitlenmeleri gerekmektedir. Tamiratlardaki imalat miktarına, birleştirilecek parçaların geometrisine, çevre şartlarına ve yapıştırıcının formuna bağlı olarak bu işlemler değişmektedir.

Çeşitli aparatlar kullanılarak tamiratlardaki yapışma işlemleri değişik yöntemler aracılığı ile yapılabilir. Bu yöntemler;

1. Hidrolik / pnömatik basınç ile basınçlandırılan levhaların kullanılması ve bu levhaların ısıtılması ile beraber kullanımları
2. Sabit aparatların kullanılması
3. Vakum torbası kullanımı
4. Basınçlı fırın (Autoclave) yöntemi
5. Kaynak ve perçin yardımı ile yapıştırma yöntemi

şeklinde sıralanabilir. Genelde kompozit parçaların imalatında iki yöntem kullanılır. Birincisi ıslak metot, ikincisi ise prepreg metodudur. Her iki metot ile kompozit parça imalatında, vakum torbası vazgeçilmez bir ekipman (Şekil 4.3) olarak kullanılmaktadır [59].



Şekil 4.3. Vakumtorbası [56, 59].

İlk modern kompozit parçalarının imalatında kullanılan yöntem ıslak metot yöntemidir. Bu yöntemde, takviye malzemesi olarak kullanılan fiberler önceden hazırlanmış bir kalıba serilerek, üzerine fırça ile reçine sürülerek emdirilir. Böylece hazırlanan ilk katın üzerine parçada istenilen kalınlığı sağlayacak şekilde diğer katlar serilmekte ve bu işlemler bittikten sonra, katmanlar sertleşmeye bırakılır. Sertleştirme işlemleri, çoğu zaman oda sıcaklıklarında gerçekleştirilir. Bu yöntem, genelde cam elyafı polyesterden üretilen kompozit parçaların imalatlarında kullanılmaktadır.

Kompozit parça imalatında kullanılan prepreg metodu, oldukça basit ve hızlı bir metottur. Yöntemin basit olmasından kaynaklanan bazı avantajları vardır. Örneğin reçine önceden fibere emdirildiğinden, imalat esnasında fiberin kullanımı son derece kolaydır. Islak metot ile kompozit parçaların imalatında, reçinenin fiberi ıslatabilme özelliği iyi olmayabilir. Bundan dolayı, reçinenin kalınlığının ayarlanması oldukça zordur ve çaba gerektirir. Buda sertleşme sonrasında kompozit parçaların üzerlerinde çok kalın ya da çok ince bölgelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Prepreg metodu ile kompozit parça üretiminde böyle bir dezavantaj yoktur.

Eğriliğe sahip ya da düz parçalar sıcak hava ile ya da fırında sertleşmesi esnasında vakum uygulamasının iki temel büyük amacı vardır. Birincisi yapışmayı hızlandırmak, ikincisi ise yapışan katlar arasında yapıştırıcının sertleşmesi esnasında oluşan hava kabarcıklarını gidermektir. Tamirat için yapıştırılan yüzeyler, hava çantası denilen çantalar içine alınarak vakum uygulanmaktadır. Bu yöntem, çok yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Büyük, karmaşık ve eğriliğinden dolayı yüksek basınç gerektiren parçalar, basınçlı fırın aracılığıyla sertleştirilir. Aynı anda birkaç değişik yapışma tamiratları yapılan parçalar bir arada basınçlı fırın içine konulabilir. Basınçlı fırında sertleştirme süresi göreceli olarak

düŖer. Genel olarak bir basınçlı fırın sistemi, basınçlı bir kabin içerisinde önceden belirlenen bir program çerçevesinde karmaşık kimyasal reaksiyonların oluşmasına imkân sağlamaktadır. Bir basınçlı fırının belli başlı sistemleri; basınca dayanıklı bir kap, basıncı sağlayan akışkanın ısıtılması ve bu gazı uniform olarak basınçlı fırında dağıtılabilmesi için gerekli kaynaklar, akışkanı basınçlandıran pompalar, vakum torbası içerisindeki parçaya vakum uygulayabilmek ve operasyon parametrelerini kontrol edebilmek için gerekli olan alt sistemlerdir [56].

4.4. Yapıştırıcı Çeşitleri

Yapıştırıcılar, genel olarak en az iki malzemenin birbirine yapıştırılarak birleştirilmesinde istenilen tasarım özelliklerini veren epoksi, fenolik, polyamid, polyimid ve silikon gibi malzemelerin kimyasal olarak birleştirilmesinden oluşan karışımlar olarak ortaya çıkmaktadırlar [60]. Yapıştırıcılar kullanımdan önce film, macun, sıvı ve toz gibi çeşitli formlarda olabilmektedirler. Yapısal yapıştırıcılar olarak adlandırılan yapıştırıcılar, karıştırılmaları sonucu ortaya çıkan kimyasal reaksiyon ile sertleşebilen yapıştırıcılar olarak bilinirler.

Yapısal yapıştırıcılar, yük taşıyabilen, esnek, ısıya dayanıklı ve yüksek kayma mukavemetine sahip olan yapıştırıcılardır. Yapısal yapıştırıcılar, uzay sanayisinde, otomotiv endüstrisinde, gemicilik vb. birçok alanda sıklıkla kullanılmaktadırlar.

Günümüzde kullanılan modern yapıştırıcılar, kimyasal tipleri ve formları açısından iki ana gruba ayrılmaktadırlar [61]. Bunlar:

- a) Kimyasal türleri açısından yapıştırıcılar
- b) Bulundukları formları açısından yapıştırıcılar.

4.4.1. Kimyasal Reaksiyon ile Sertleşen Yapıştırıcılar

En güçlü yapıştırıcılar kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılardır. Bu tip yapıştırıcılara, yapısal yapıştırıcılar da denilmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan ve kimyasal reaksiyon ile sertleşen bazı kimyasal yapıştırıcı tipleri ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

4.4.1.1. Anerobikler

Anaerobik yapıştırıcılar, oksijenle temasları kesildiğinde, oda sıcaklığında katılaştıran tek bileşenli malzemelerdir. Sıvı halde olan yapıştırıcının içinde bulunan kürleştirici bileşen, havadaki oksijenle temasta olduğu sürece etkisiz kalır. Yapıştırıcı, yapıştırılacak yüzeyler arasında kullanıldığında yapıştırıcının oksijen ile teması kesilir ve bunun sonucunda yapıştırıcıda hızla kürleşme olayı gerçekleşir. Aynı zamanda metalle temas söz konusu olduğunda ise kürleşme işlemi daha da hızlanır. Yapıştırıcı oksijenle teması kesildiğinde içerisinde serbest radikaller oluşur ve metal iyonlarının (Cu, Fe) etkisiyle bu serbest radikaller polimerizasyonu başlatarak kürleşme gerçekleşir ve bu işlem sonucunda yapışmada kullanılan yapıştırıcı katılaşarak rijit bir durum ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.4 te verilen anaerobiklerin sertleşme mekanizmasında:

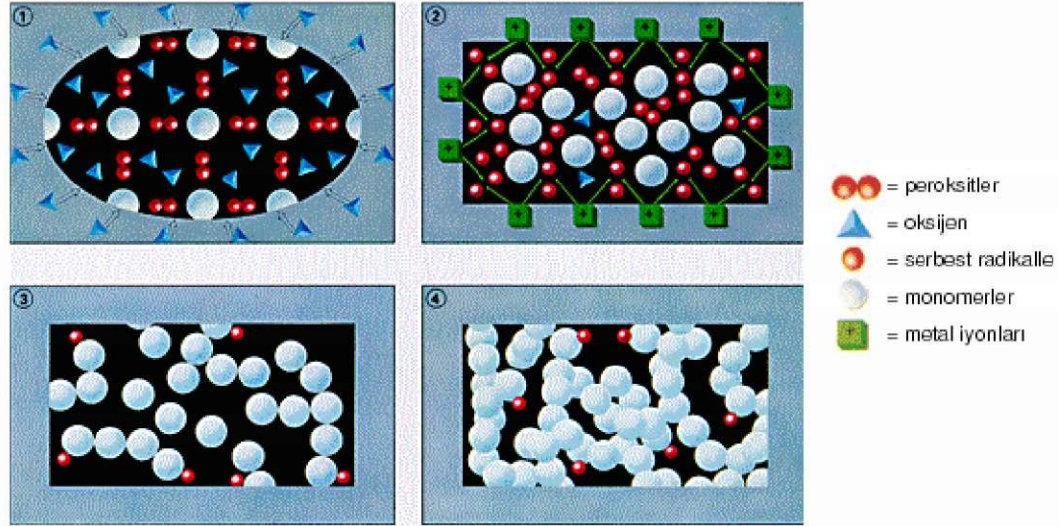
1. Durumda: Sıvı haldeki anaerobik yapıştırıcı oksijenle temas halinde olduğu için bir reaksiyon meydana gelmeye başlamaktadır.
2. Durumda: Yapıştırıcı yapıştırma boşluğuna doldurulduğunda oksijen ile teması kesilerek burada bulunan peroksitler serbest kök haline dönüşerek metal iyonları ile reaksiyona girmektedir.
3. Durumda: Serbest kökler, polimer zincirlerinin oluşmasına neden olmaktadır.
4. Durumda: Reaksiyon sona ererek, çapraz bağlı zincirler oluşturulur ve böylelikle yapıştırıcı termoset plastik halini almaktadır.

Sıvı haldeki yapıştırıcılar kılcallık etkisiyle en küçük boşluklara girerek ek yerlerini doldurmaktadırlar. Bu şekilde, kürleşen yapıştırıcı, yüzey pürüzlerinin içlerine girerek bu pürüzlerin tam şekillerini almış olur. Ayrıca kürleşme işlemi, metal yüzey ile yapıştırıcının teması ile de hızlanır ve bu temas bir katalizör vazifesi görür. Pasif malzemelerin katalizör etkileri azdır ya da hiç yoktur, böyle durumlarda hızlı ve tam kürleşme için aktivatör kullanılması gerekmektedir. Sıvı haldeki aktivatörler, yüzeylere yapıştırıcı sürülmeden önce yapıştırılacak yüzeylerden birine veya ikisine uygulanır. Aktivatör ile yapıştırıcının karıştırılması söz konusu olmadığı için açıkta bekleme süresi gibi bir kaygı mevcut olmamaktadır.

Anaerobik reaksiyon ile katılaştıran yapıştırıcıların genel özellikleri şunlardır:

- Çok yüksek kesme mukavemetine sahiptirler.
- Yüksek sıcaklık dayanımını (-55 C° 'den maksimum +230 C° 'ye kadar) gösterirler.

- Çok kısa sürede kürleşme sağlanır.
- Yapıştırılacak yüzeylerin parlatılması gerekmemektedir.
- Yama yapıştırırmalı tamiratlarda sızdırmazlık ve mükemmel kimyasal dayanımı sağlarlar.
- Mekanik titreşimlere karşı iyi mukavemet gösterirler.
- Dinamik yüklere karşı mukavemetleri iyidir.



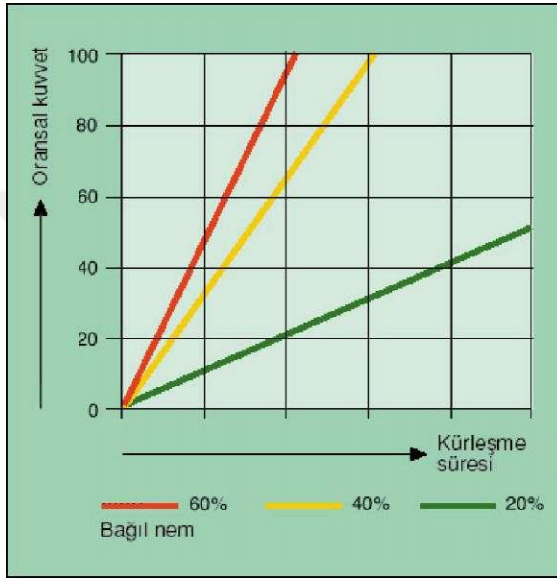
Şekil 4.4. Anaerobiklerin sertleşme mekanizmaları [8, 56].

Yapıştırıcıların çoğu oda sıcaklığında etkili olurlar. Ancak yüksek sıcaklıkla yapıştırıcılar daha etken olur ve yapışma süresi kısalmır. Birçok kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi, sıcaklık artışı ile kimyasal reaksiyonun hızında bir artış meydana gelir. Ancak sıcaklığın kontrolü iyi yapılmalıdır. Aksi halde yapıştırıcıyı oluşturan polimer maddenin bozulması ihtimali mevcuttur. Yapışma kalitesinin belirlenmesinde en etkili faktör, sıcaklık faktörü olarak öne çıkmaktadır [62].

4.4.1.2. Siyanoakrilatlar

Tek bileşenli siyanoakrilat yapıştırıcılar, hafifçe alkalik özellik gösteren yüzeyler ile temas ettiklerinde kürleşmeye başlarlar. Genel olarak bu tip yapıştırıcılar kullanıldıklarında, havada ve yapıştırılacak yüzeylerde mevcut bulunan az miktardaki ortam nemi kürleşmeyi çok kısa süre (birkaç saniye) içerisinde başlatmaktadır. Yapıştırılacak yüzeyler üzerindeki nem, yapıştırıcının içindeki dengeleyiciyi nötralize

etmekte ve böylece polimerizasyon işlemi bir yüzeyden diğerine gerçekleşir. En hızlı ilk kürleşmeyi elde etmek için hiç boşluk bırakılmamış olması gerekmektedir. Çalışma ortamında, oda sıcaklığında %40 ila %60 bağıl nem bulunma durumunda yama yapıştırırmalı bağlantılardan en iyi netice elde edilir. Çalışma ortamındaki düşük nem kürleşmeyi yavaşlatır, yüksek nem de hızlandırır fakat yapıştırıcının genel yapışma kuvvetini olumsuz etkilemektedir. Bu etkiyi gösteren grafikler Şekil 4.5 görülmektedir.



Şekil 4.5. Bağıl nemin bir fonksiyonu olarak siyanoakrilat yapıştırıcıların kürleşmesi [8].

Yapıştırıcı yüzeylere uygulandıktan sonra birkaç saniye içinde polimerizasyon süreci başladığı için, parçalar hemen birleştirilmelidir. Yapıştırıcının açıkta kalma süresi, bağıl neme, yapışma yüzeylerindeki neme, yapıştırıcıya ve ortam sıcaklığına bağlı olmaktadır. Siyanoakrilat yapıştırıcılar çok hızlı kürleştikleri için, bu tip yapıştırıcılar özellikle küçük parçaların yapıştırılması ve tamirat işlemleri için uygun olarak seçilmektedirler. Siyanoakrilat yapıştırıcılar, sadece yapıştırılacak iki yüzeyden birine sürülmelidir. En iyi yapışma işlemi için bağlantıdaki boşluğu dolduracak kadar yapıştırıcı uygulanması gerekmektedir.

Siyanoakrilat yapıştırıcıların bilinen genel özellikleri şunlardır:

- Çok yüksek kesme ve çekme mukavemeti sağlarlar.
- Çok yüksek kürleşme hızına (saniyeler içinde tutar) sahiptirler.
- Hemen hemen tüm malzemelerin yapıştırılmasında rahatlıkla kullanılabilirler.
- Yaşlanmaya dayanıklıdır.

4.4.1.3. Akrilikler

Bu tip yapıştırıcılar oda sıcaklığında aktivatör ile kürleşirler. Yapıştırıcının türüne göre, yapıştırıcı ve aktivatör yapıştırılacak yüzeylere ayrı ayrı uygulanabilirler veya hemen uygulama öncesinde bir mikserle karıştırılmalıdırlar. Bazı yapıştırıcılar düşük viskoziteli bir aktivatör ile kullanılmaktadırlar. Bu tür yapıştırıcılar hiçbir zaman aktivatörle karıştırılmamalıdır. Yapıştırıcı ve aktivatör her zaman ayrı ayrı tatbik edilmelidir. İki parça birbirine temas ettiğinde yapıştırıcı kürleşmeye başlamaktadır.

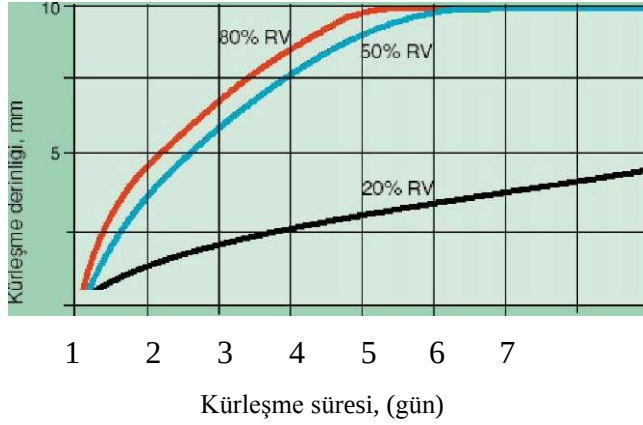
Modifiye akrilik yapıştırıcıların genel özellikleri şunlardır:

- Çok yüksek kesme ve çekme mukavemeti sağlarlar.
- Yüksek darbe mukavemetleri mevcuttur.
- Geniş sıcaklık aralığında (-55 C° ila $+120\text{ C}^{\circ}$) çalışmayı sağlarlar.
- Hemen hemen tüm malzemelerin yapıştırılmasında rahatlıkla kullanılabilirler.
- Özellikle önceden karıştırılan akriliklerde yüksek boşluk doldurma kabiliyetleri vardır.
- Ortam şartlarına karşı yüksek dayanım gösterirler.

4.4.1.4. Silikonlar

Bu malzemeler oda sıcaklığında ortam nemi ile vulkanize olurlar. Silikonlarda kenetlenme için su molekülleri kullanılır. Bu nedenle, suyun silikonun içine, vulkanizasyonun gerçekleştiği bölgeye nüfuz etmesi gerekmektedir. Su molekülü silikon molekülleri zincirine eklendiği zaman bir yan ürün açığa çıkar. Kürleşmenin kimyasal özelliğine bağlı olarak yan ürün asidik olabilmektedir. Bu yapıştırıcıların kürleşme hızı öncelikle bağıl neme bağlıdır.

Kürleşme mekanizmasının tabiatı gereği, silikonlar yapışma sınırının dış kenarlarından içeriye doğru vulkanize olur. Nemin, vulkanizasyonun gerçekleştiği her noktaya ulaşması gerektiği için, kürleşme derinliği 10- 15 mm ile sınırlanmaktadır [56].



Şekil 4.6. Silikonlarda kürleşme hızı - bağıl nem ilişkisi [8].

Silikon elastomerlerin (veya kürleşmiş silikon) genel özellikleri şunlardır [8,56]:

- Mükemmel sıcaklık dayanımı (230 C° 'den fazla) sağlarlar.
- Esnek, dayanıklı, uzama katsayıları yüksektirler.
- Düşük ile orta sertliktedirler.
- Birçok akışkanlar için, etkili sızdırmazlık sağlarlar.
- Mükemmel boşluk doldurma sağlarlar.

4.4.1.5. Poliüretanlar

Poliüretanlar genellikle suyun, izosiyanat grupları içeren bir katkı maddesi ile reaksiyonu neticesinde oluşmaktadırlar. Silikonlarda olduğu gibi, su molekülünün yapıştırıcının içine nüfuz ederek yapıştırıcı bağlarının oluştuğu her noktaya ulaşması gerekmektedir. Bunun sonucunda silikonlar ile aynı kürleşme olayı meydana gelir, fakat yan ürün açığa çıkmaz. Bu tip yapıştırıcılarda da kürleşme hızı, ortamın bağıl nemine bağlı olmaktadır [56].

Poliüretanların genel özellikleri şunlardır:

- Mükemmel dayanıklılık sağlarlar
- Esnektirler ve çekme yükü altında yüksek uzama katsayısına sahiptirler.
- Mükemmel boşluk doldurma özellikleri mevcuttur.
- Kürleştikten sonra rahatlıkla boyanabilirler.
- Kimyasal maddelere karşı dirençleri çok iyidirler.

4.4.1.6. Epoksiler

Epoksi türü yapıştırıcılar, epoksi reçine ve sertleştiriciden oluşurlar. Epoksi yapıştırıcılar ile çok kaliteli ve son derece mukavemetli yapışmalar elde edilir. Bunlar, çok farklı tipteki malzemeleri yapıştırmak için rahatlıkla kullanılabilirler. Tek bileşenli, iki bileşenli ve film olarak üç farklı formda bulunurlar. Her iki bileşen birleştirildiğinde aralarında kovalent bağlar oluşur ve termoset polimer halini alır. Bu bileşene katalizör ilavesi yapmak ya da bulundukları çevrenin ısını yükseltmek, yapıştırıcının sertleşme zamanını hızlandırabilir. Yüksek sıcaklıklarda sertleşen epoksilerde daha yoğun çapraz bağlar meydana geldiğinden dolayı, bu işlemler ile daha mukavemetli yapışmalar elde edilebilmektedir. Derinliğine sertleşme miktarları çok iyidir. Çok farklı tipteki malzemelerin yapıştırılmalarında rahatlıkla kullanılabilirler [56].

4.4.1.7. Fenolikler

Piyasada özellikle yüksek mukavemet gerektiren yapıştırmalarda aranan yapıştırıcılardır. Örnek olarak, metal ile metal, metal ile ağaç ve metal ile kompozit esaslı fren pabucu yapıştırmaları için oldukça iyi sonuçlar vermektedirler. Bu tip yapıştırıcıların kullanımlarından sonra sertleşmeleri için, ısı ve basınç uygulamak gerekmektedir [56].

4.4.2. Fiziksel Değişim ile Sertleşen Yapıştırıcılar

Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılara nazaran, fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar, daha düşük yapışma mukavemetine sahip olmaktadır. Bu yapıştırıcılara, yapısal olmayan yapıştırıcılar da denilmektedir.

4.4.3. Basınç Gerektirmeyen Yapıştırıcılar

Etiket yapıştırmaları için uygun olan bu tip yapıştırıcılar, sertleşmelerinden sonra dahi, çevre şartları mevcut durumlarını değiştirebilmektedir. Bu tip yapıştırıcılar, yüke maruz kalan yapışmalar ve tamiratlar için uygun olmamaktadır [56].

4.4.4. Formları Açısından Yapıştırıcılar

Modern yapıştırıcılar, kullanılmadan önce film, macun, sıvı ve toz gibi çeşitli formlarda olabilmektedirler. Formları bakımından yapıştırıcılar kullanım yerleri bakımından aşağıda belirtilen çeşitli gruplara ayrılabilirler. Bunlar:

- Macun formundaki yapıştırıcılar
- Film tipi yapıştırıcılar
- Düşük viskoziteli yapıştırıcılar
- Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar

4.4.5. Köpükler

Köpükler, kullanıldıklarından hemen sonra, kuruma süresince genişleyen epoksi esaslı yapıştırıcı gurubuna girmektedirler. Bu yapıştırıcılar birleşmelerdeki boşlukları doldurmada rahatlıkla kullanılmakta ve birleştirilecek parçaların tümünü birbirine kuvvetlice yapıştırmaktadırlar. Yapıştırılmalarda kullanılan köpük kalınlığının en az 2 mm olması istenmektedir.

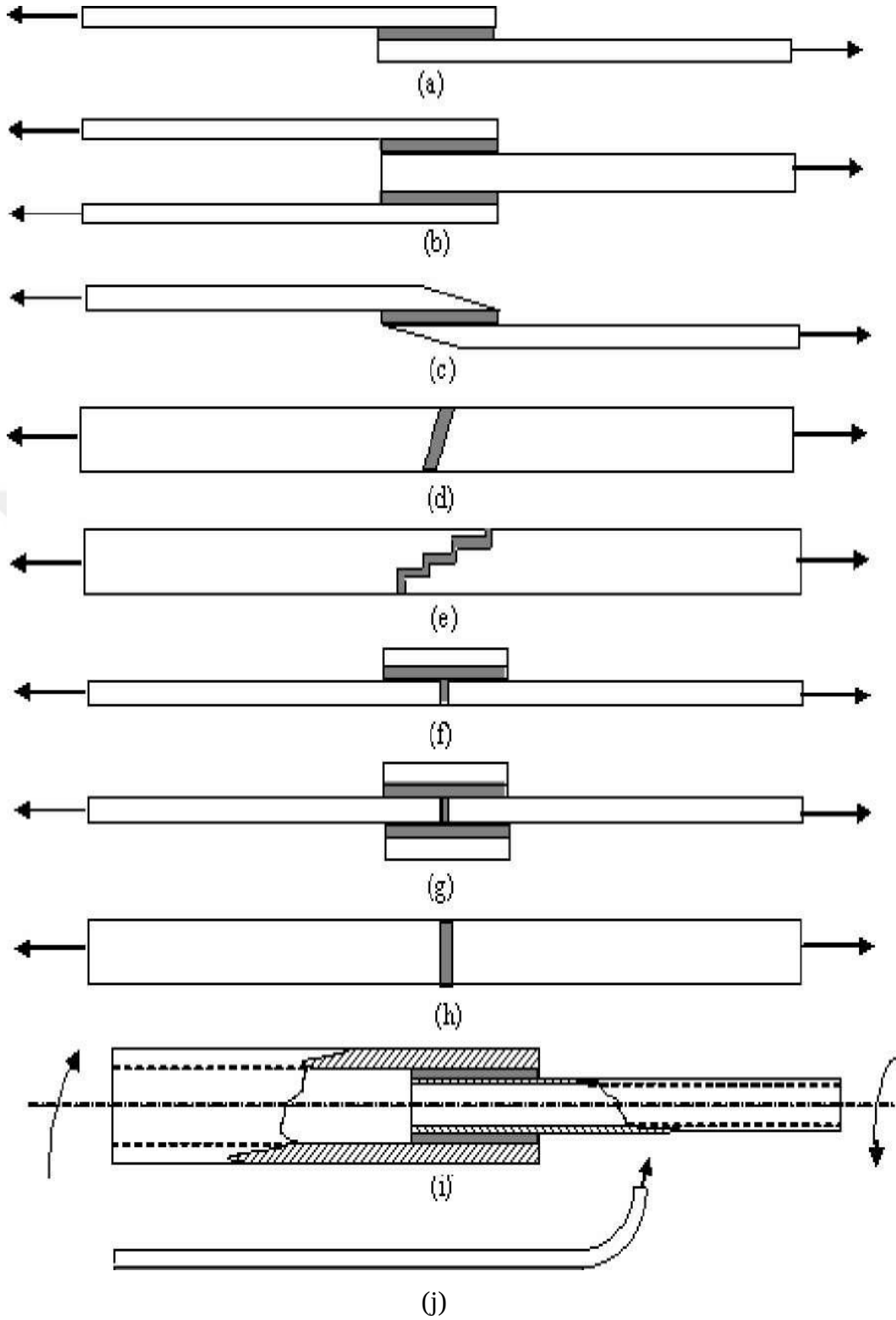
4.5. Yapıştırıcı ile Birleştirme Tipleri ve Yöntemleri

Yapıştırıcı bağlantılarındaki gerilme dağılımı ve bağlantının hasar mukavemeti hakkında yeterli bilgiye sahip olduktan sonra uygun bir tamirat tasarımı rahatlıkla yapılabilir. Bu tip bağlantıların yük altındaki davranışları, kullanılan malzemelerin geometrilerine ve malzeme davranışları gibi birçok parametreye bağlı olarak değişebilmektedir. Bu bağlılık çeşitliğinden dolayı, yapışma bağlantılarının ortalama mekanik davranışlarını tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır. Burada karşılaşılan temel güçlükler, özellikle yapıştırıcıların kontrol mekanizmalarının karşılaştırılmalarındaki eksikliklerden dolayı oluşmaktadır [63].

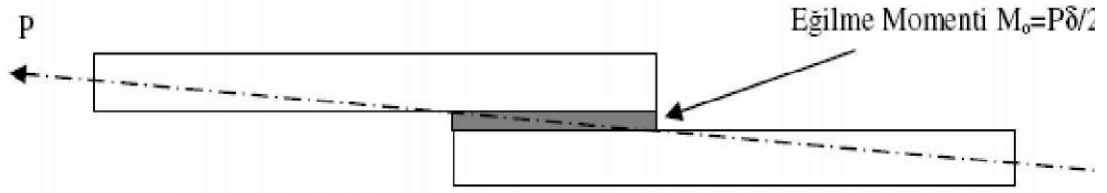
Yapısal mühendislik tasarımlarının rasyonel temeli, bir yükleme durumunda mevcut olan yükleri tanımlayabilmek ve bunun sonucunda oluşacak gerilmeleri pratik olarak hesaplayabilmektir. Yükleme durumundaki sistem genellikle bir fonksiyon ile tanımlanmaktadır. Fakat burada en uygun ve maliyet açısından en etkili çözüme ulaşacak en iyi malzeme ve uygun tasarım tekniğini kullanma becerisi etkili olmaktadır. Bu da

sürekli olarak teknolojide ilerlemeyi gerektirmektedir ve modern mühendisliğin önemini giderek artırmaktadır [64].

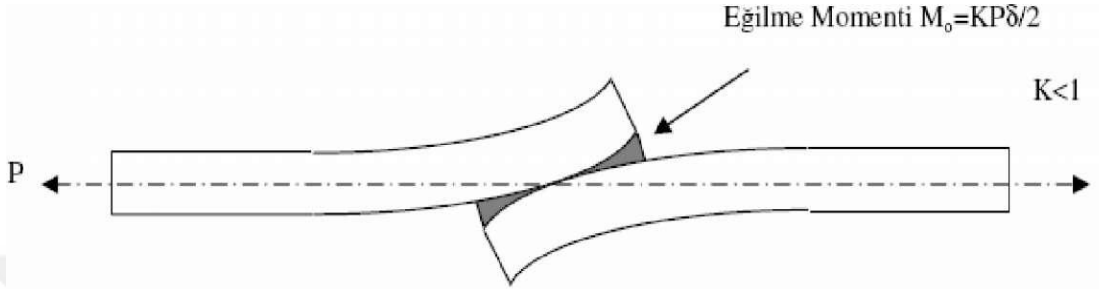
Şekil 4.7.a, tek tesirli bindirme bağlantısını göstermektedir. Bu tip bağlantılar, yapıştırıcıların test edilmesinde en fazla kullanılan bağlantı şeklidir. Ancak burada oluşan gerilme durumları karmaşık olmaktadır. Şekil 4.8.a'da da görüldüğü gibi, tek tesirli bindirme yapışma bağlantısında, yük aynı doğru üzerinde etki eder. Bundan dolayı, eksenel yük uygulama durumunda, sistemde eğilme momenti oluşmakta ve Şekil 4.8.b'de de görüldüğü gibi sistemde dönme meydana gelmektedir. Buradaki yapıştırıcı tabakasında sadece kaymadan dolayı uzama olmaz, aynı zamanda bağlantının uçlarında da yırtılma gerilmeleri oluşmaktadır. Bağlantılara çekme yükü uygulandığında uzama fazla olmaz, fakat eğilme momenti oluşmaktadır. Özellikle gerilmelerin yüksek olduğu bölgelerde, hem yapışan malzeme hem de yapıştırıcının kendisi birden plastik bölgeye girebilir [56].



Şekil 4.7. Yaygın olarak kullanılan bağlantı şekilleri [56, 64].



(a) Şekil değiştirmemiş bağlantı

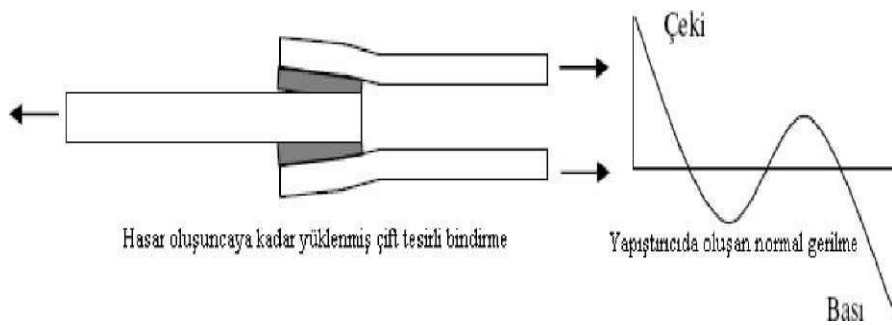


(b) Şekil değiştirmiş bağlantı

Şekil 4.8. Tek tesirli bindirme bağlantısının şekil değiştirmeden önce ve şekil değiştirdikten sonraki görünümü [56, 64].

Tek tesirli bindirme bağlantılarındaki yapışmanın kalite kontrolü, aynı şartlarda hazırlanan numuneler ile test edilmektedir. Bağlantının yapılışı basittir ve elde edilen sonuçlar, hem yapıştırıcı kalitesi hem de yapıştırılan malzemelerdeki yüzey işlemleri tarafından etkilenmektedir.

Tek tesirli bindirme bağlantılarının basitleştirilmiş analizinde, malzemenin rijit ve yapıştırıcının sadece kayma yönünde şekil değiştireceği kabul edilmektedir. Yük altında hasar oluşuncaya kadar yüklenmiş çift tesirli bindirmede meydana gelebilen gerilmeler Şekil 4.9. görülmektedir.



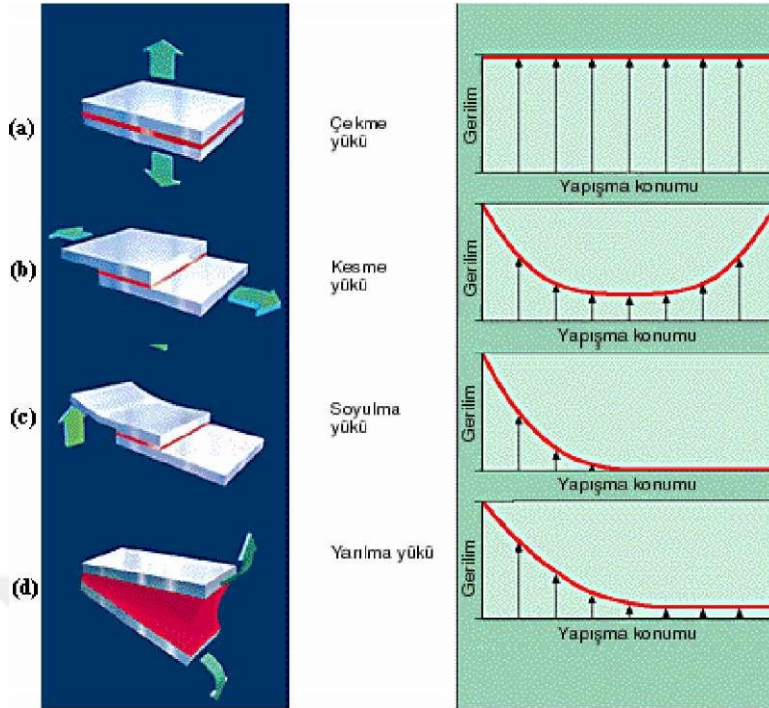
Şekil 4.9. Yüklenmiş haldeki çift tesirli bindirme bağlantısında ve yapıştırıcıda oluşan gerilmeler [56, 64].

4.6. Yapıştırıcı Bağlantılarında Karşılaşılan Gerilme Halleri

Yüke maruz bırakılan bir yapıştırma bağlantısına etki eden yükleme şartlarına bağlı olarak farklı türde gerilmeler oluşmaktadır. Yalnızca çekme veya basma yüklerinde, yapışma çizgisinde gerilim dağılımı düzgün olur. Bundan dolayı, yapışma çizgisinin her noktasında aynı yük miktarı görülür ve mevcut gerilimi hesaplamak için, buraya etki eden kuvvet mevcut yapışma alanına bölünür. Gerçek kullanımda, yalnızca çekme ve yalnızca basma yükleri çok nadir görülmektedir. Yapışmalı bağlantılarda daha çok kesme, yarıлма ve soyulma yükleri görülmektedir. Yapışma yeri gerilme dağılımı, yani gerilmelerin yapışma çizgisindeki konumunun hesaplaması daha zordur ve değişkendir. Yapışma alanının kenar bölgesi yapışmada kritik bölge olarak tanımlanmakta ve bu bölge orta noktaya göre daha yüksek gerilmeye dayanmak zorundadır. Bağlantının bir ek yerine, yarıлма veya soyulma kuvveti uygulandığında, gerilimin çoğu bir kenarda yoğunlaşmaktadır.

Ek yeri tasarımı, yapışmalı bağlantılarda en önemli parametre olarak öne çıkmakta ve seçilen yapıştırıcıdan en yüksek verimi almak için gerekli olmaktadır. Tasarım aşaması, yapıştırıcının özelliklerine göre ayarlanmalı, soyulma ve yarılmayı engelleyecek bir şekilde tasarlanmalıdır. Çünkü bu yükleme şekilleri yapışmalı bağlantıların hasarları için en tehlikeli yük şartları olarak belirtilmektedir. Yapıştırıcı ile yapıştırılan bağlantılarda, meydana gelen dört temel gerilmeyi oluşturan yükleme tipleri ve bunların bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları Şekil 4.10' da görülmektedir.

Şekil 4.10.a.'da görüldüğü gibi, çekme yükü altında kuvvetler yapıştırıcı tabakasına dik olarak etki etmektedir. Bu kuvvetlerden dolayı meydana gelen gerilme, yapışma alanına eşit şekilde dağılmaktadır. Fakat bağlantıya sadece bu tür bir gerilmenin etkiğinden emin olmak her zaman mümkün olmayabilir. Eğer kuvvetler eksenden kaçık olarak etki ediyor ise, o zaman yapışma alanına gerilmenin eşit yayılma avantajı kaybolacak ve bağlantının bozulma ihtimali ortaya çıkacaktır. Burada önemli olan diğer bir nokta da, yapıştırılan malzemenin yeterince kalın olması gerektiğidir. Yapışmalı bağlantılar, maruz kaldıkları yüklerin etkisi ile yüksek oranda eğilmeleri engellenmelidirler. Eğer yapışmalarda yüksek oranda bir eğilme oluşur ise buradaki gerilme dağılımı bindirme boyunca eşit çıkmamaktadır [65].



Şekil 4.10. En yaygın yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları [8].

Şekil 4.10b de görüldüğü gibi, kesme yükleri, yapıştırılan alanın tümüne düzgün olarak etki etmektedirler. Bu tür yüklemede, yapışma alanının tamamının etki altında olması, mevcut bağlantı ömrünü artırmaktadır. Mümkün olduğu durumlarda, yapıştırmalı bağlantıları, mevcut olan yükün büyük bir kısmını kesme yükü olarak taşıyabilecek şekilde tasarlanmalıdır.

Şekil 4.10c'deki gerilmenin oluşması için yapıştırılan malzemelerden biri veya her ikisi de esnek olmalıdır. Bu tür yüklemede, bağlantı uçlarında oluşan gerilmeler çok yüksek olmaktadır. Bundan dolayı, bağlantı çok geniş veya taşıyacağı yük düşük olmaz ise, bu durumda yapıştırma bağlantısı çabuk bozulacağı için, mümkün oldukça bu tür yüklemeden kaçınılmalıdır.

Şekil 4.10d'de görülen yükleme şekli, ekseriyetle eksenden kaçık olan çekme kuvvetinin veya momentinin uygulanması sonucudur. Önceki gerilmelerin aksine bu gerilme, yapışma alanına eşit olmayan şekilde dağılmakta ve bağlantının bir tarafında yoğunlaşabilmektedir. Bu gerilmeye dayanabilmek için yeterli derecede yapışma alanına ihtiyaç olmaktadır. Çekme veya kesme gerilmelerine göre, bu alan daha fazla olduğu için bu tarz bağlantı şekli tavsiye edilemez; çünkü maliyet artmaktadır [66].

4.7. Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Çözölemeyen Bağlantılarla Karşılaştırılması

Yapıştırıcı ile yapıştırma ve tamirat tekniğinin kaynak, perçinleme ve diğer mekanik bağlantıların tümünün yerini alacağını düşünölmemesi gerekmektedir. Bu temel birleştirme tekniklerinin her biri, farklı şartlar altında kendine özgü üstönlöklere ve özelliklere sahiptir. Şekil 4.11 'de perçin, kaynak ve yapıştırıcı bağlantılarında meydana gelen gerilme dağılımları görölmektedir. Burada belirtilen değişik birleştirme yöntemlerinin farklı avantaj ve dezavantajları mevcut olmakta ve bazı karşılaştırmalar aşağıda belirtildiğı gibi yapılabilmektedir [68, 69].

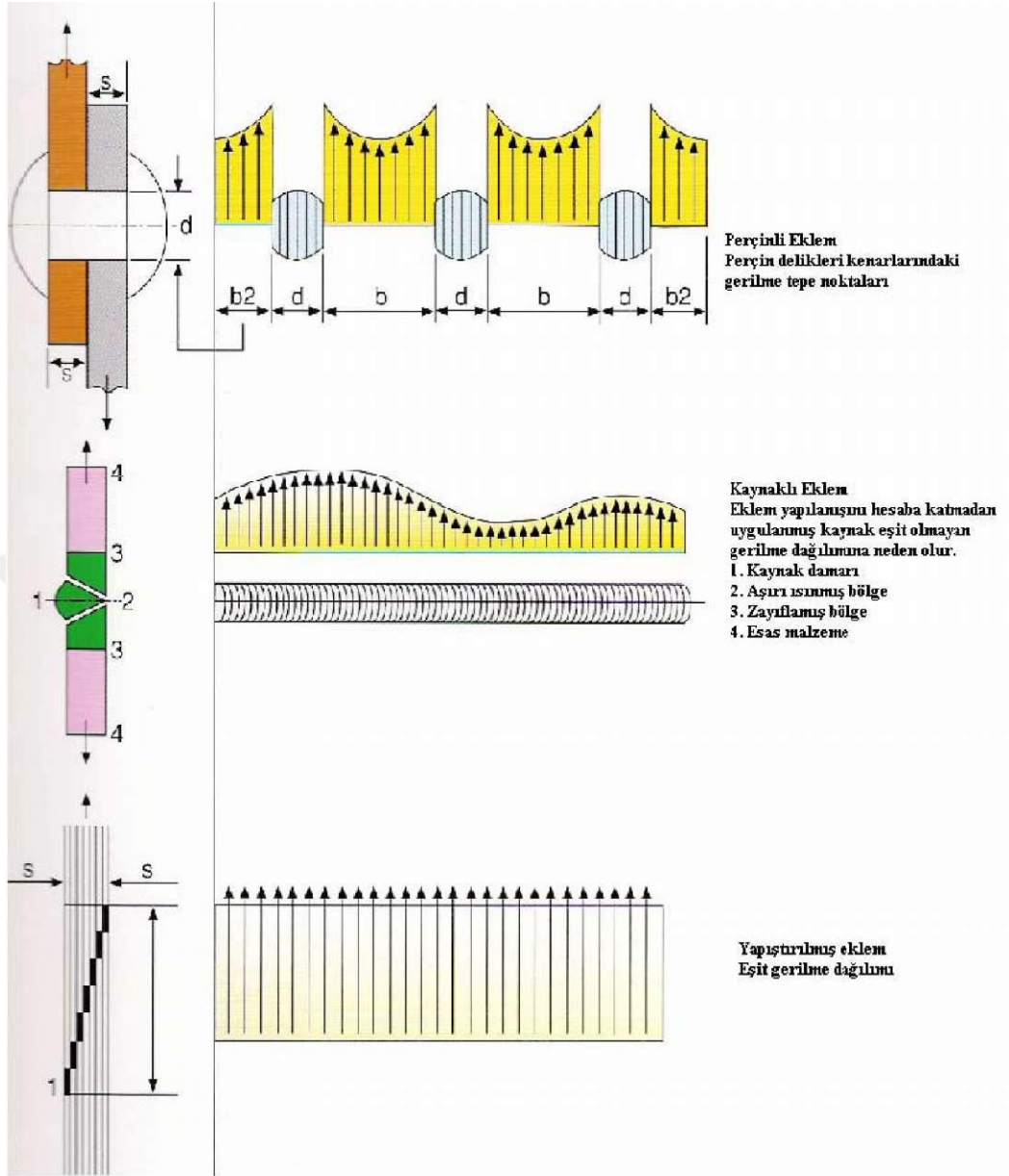
4.7.1. Perçin Bağlantıları

Perçin bağlantılarında gerilme yayılışı düzgün değildir. Perçin delikleri kesiti küçöltür ve ayrıca çentik etkisi nedeniyle deliklerin kenarlarında kritik gerilme uçları oluşmaktadır. Bindirme perçin bağlantılarında kuvvet tam ortaya etkilediğı için ek olarak bir eğilme momentini de ortaya çıkarabilmektedir.

4.7.2. Kaynak Bağlantıları

Kaynak yoluyla parçalara uygun bir yerleştirme ve şekillendirme vererek, malzemelerden en iyi bir şekilde yararlanıp, iyi bir birleştirme yapmak mümkündür. Ancak, kaynak işlemi sırasında malzemenin ergimesi ve daha sonraki soğuma şartları, malzemelerin içyapısındaki değişmeler, iç gerilmelere ve düzgün olmayan gerilme dağılımlarına yol açmaktadır. Dolayısıyla da mukavemet değerlerinde bir azalma söz konusu olmaktadır.

Farklı malzemelerin birbiriyle kaynak edilmesi de çeşitli sorunlar doğurur. Birleştirilecek malzemelerin her ikisinin de aynı tip olması durumunda kaynak mümkün olabilmektedir. Kaynak işlemi yüksek dayanımlı çeliklere ve metal alaşımlara özellikle tatbik edilebilir. Bunların da bazılarının kaynak edilebilme kabiliyetleri oldukça düşöktür ve bu nedenle uygulamada kaynak edilemezler.



Şekil 4.11. Kaynak, perçin ve yapıştırıcı birleştirmelerinde oluşan gerilme yığılmaları [67].

4.7.3. Lehim Bağlantıları

Lehimleme ile farklı malzemeleri birleştirmek mümkündür. Lehimleme sıcaklığı birleştirilen malzemenin ergime derecesinden daha düşük olmaktadır. Bununla birlikte, sert lehimlemede içyapı değişimleri ortaya çıkabilmektedir. Benzer olmayan metallerin birleştirilmesinde, örneğin Çelik ve Alüminyumun birleştirilmesinde olduğu gibi galvanik korozyon oluşabilir. Lehimleme işlemi değişik tip ve pahalı malzemeleri gerektirmektedir. Örneğin lehim en pahalı epoksi yapıştırıcıdan %30 daha pahalıdır.

4.7.4. Vida ve Cıvata ile Yapılan Bağlantılar

Vidaların ve cıvataların montajı ve tespitleri için, uygun yuvaların matkapla açılması veya darbe ile delinmesi gerekmektedir. Bu işlemler, birleştirilecek parçaların zayıflamasına neden olur ve ara boşlukların dolgu malzemeleri ile doldurulmasını gerektirir. Ayrıca bağlantılar yüklere maruz bırakıldıkları zaman, söz konusu malzemelerde düzgün olmayan gerilme bağlantıları ortaya çıkmaktadır. Şöyle ki, delik çevresindeki gerilmeler diğer bölgelerdeki gerilmelerin kat kat üstünde bir değere erişmektedir. Bu özellikten dolayı, yapıların ağırlığının artmasına neden olan daha kalın malzemelerin konstrüksiyonlarda kullanımları söz konusudur. Düzensiz gerilme dağılımları, düşük yorulma dayanımlarının görülmesine neden olmaktadır. Diğer olumsuzluklar ise kılcal ve mekanik temas korozyonu tehlikesi, yüzey pürüzlülüğü, tekrarlı yükler altında yumuşama olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, vidalar ve cıvatalar ile birleştirmeler genellikle yavaş, emek tüketici ve ustalık gerektiren bir işlemdir.

4.7.5. Yapıştırma Bağlantıları

Metal yapıştırma bağlantılarında diğer bağlantılar için anılan sakıncaların birçoğu görülmez. Ancak yapıştırma bağlantıları, diğer bağlantıların yerini alan bir bağlantı değil, onları tamamlayan ve onların uygulandığı durumlarda etkili olan bir yöntemdir. Yapıştırma bağlantılarında, büyük termik ve mekanik zorlamalar olmadan bağlantının yapılabilmesi, diğer yöntemlere nazaran önemli bir avantaj olarak öne çıkmıştır. Böylece; birleştirilecek parçaların özellikleri değişmez. Sıcak perçinleme ve kaynak bağlantılarında olduğu gibi işlem sonucunda ortaya çıkan iç gerilmeler yoktur.

Yapıştırma bağlantıları, mümkün olduğu kadar kayma gerilmelerine maruz kalacak şekilde tasarlanmalıdır. Çekme (soyma) zorlamaları, bu bağlantı türü için uygun değildir. Bu tip bağlantılarda, eğilme ve sıyırma zorlanmalarından kaçınılmalıdır.

1. Yapıştırma bağlantılarının dinamik mukavemeti özel bağlantı formları ile ya da kombine bağlantılarda kullanılarak önemli ölçüde yükseltilmelidir.
2. Yapıştırılan parçalar yüksek rijiditeye sahip olmalıdır.
3. Yapıştırma bağlantıları farklı metallerin birleştirilmesinde, özellikle metal ile metal olmayan malzeme birleştirilmesinde çok uygundur.

4. Yapıştırıcı kalınlığı yaklaşık olarak 0.1mm olmalıdır. Yapıştırıcıya dolgu maddesi eklenmesi yapıştırıcı özelliklerini değiştirir.
5. Yapıştırma bağlantıları sızdırmazlık ve izolasyon özelliklerine sahiptir.
6. Yerinde kullanılan yapıştırma konstrüksiyonları maliyetten önemli ölçüde ekonomi sağlar.

4.8. Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Tipleri

Farklı yükleme durumlarında yapıştırma bağlantılarının ya da yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tamamıyla anlaşılabilmesi için, hasar tiplerinin karakterize edilmesi gerekir. Genel olarak, yapıştırma bağlantılarında adhezyon ve kohezyon olmak üzere iki tip hasar şekli görülmektedir.

Yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde meydana gelen ayrılmadan kaynaklanan kopma olayı adhezyon hasarı olarak adlandırılırken, yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemedeki hasardan dolayı meydana gelen kopma olayı ise kohezyon hasarı olarak adlandırılmaktadır. Bu hasarların şekilsel gösterimi, Tablo 4.2 de verildiği gibidir.

Tablo 4.2. Temel Hasar Tipleri (ISO 10365) [56].

	Hasar Tipleri	Tanımlanma Şekli
Yapıştırılan Malzeme	 Yapıştırılan malzemelerin biri veya ikisinde de hasarın oluşması	YH
	 Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı	KYH
	 Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar	DH
Yapıştırıcı	 Kohezyon hasarı	KH
	 Özel kohezyon hasarı	ÖKH
Yapıştırıcı	 Adhezyon hasarı	AH

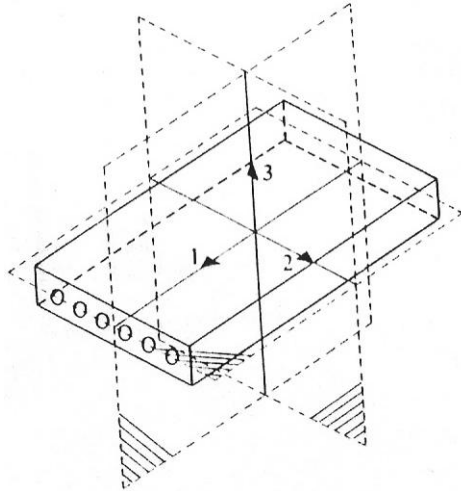
5. KOMPOZİT MALZEMELERDE GERİLMELER

Tabakalı kompozit malzemelerdeki bağlantıların dayanımlarını hesaplayabilmek için, bu malzemelerin yük altındaki mekanik özelliklerini iyi bilmek gerekir. Bu özellikleri, bağlantılarda kullanılacak olan malzemelerin özellikleri ile birleştirmek sureti ile daha sağlıklı analizler yapılabilir ve böylelikle tamiri yapılmış bağlantı durumundaki sistemin analizi ve hasar durumu rahatlıkla tahmin edilebilir. Bu analizler sayısal modellemenin temelini oluşturmaktadır. Mekanik davranışların analizi, gerilme analizi ile başlamaktadır. Bu bölümde, kompozit malzemelerin gerilme analizi hakkında genel bilgi verilmektedir.

5.1. Gerilme Analizi

Tüm doğrultularda aynı mekanik özelliklere sahip olan malzemelere izotrop malzeme denilmektedir. Kompozit malzemeler, her doğrultularında farklı mekanik özelliklere sahip olduklarından; izotrop malzemeler kategorisine girmezler. İzotrop olmayan bu malzemeler, ortotropik malzemeler olarak adlandırılırlar ve birbirine dik üç düzlemde farklı özellikler gösterirler.

Tek yönlü olarak takviye edilmiş olan kompozit yapılar her bir düzleminde kendi içerisinde simetrik malzeme özelliklerine sahiptirler ve bu özelliklerinden dolayı da ortotropik malzeme olarak kabul edilmektedirler.



Şekil 5.1. Tek yönde takviye edilmiş kompozit yapılarda malzeme özelliklerinin üç simetri düzleminin gösterilmesi [75].

Gerilme ile şekil değiştirme arasındaki eşitliği veren Hooke Kanunu, izotrop malzemelerden farklı olarak, tüm doğrultuları kapsayacak şekilde tansörel biçimde denklem [5.1]'de gösterildiği gibi yazılır.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (i,j,k,l = 1,2,3) \quad [5.1]$$

Burada σ_{ij} , gerilme tansörü, C_{ijkl} , elastiklik tansörü ve ε_{kl} , şekil değiştirme tansörüdür. Kütle kuvvetlerinin ihmal edildiği durumlar için simetrik yapılarda $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ve $\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk}$ olduğu için [5.1] eşitliği :

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (i,j = 1-6) \quad [5.2]$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifade matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad [5.3]$$

[5.3] eşitliğinde yazılmış olan ifadelerde yer alan katsayılar C_{ij} tansörünün simetriklik özelliği göz önünde bulundurularak hesaplanır. Bu simetrik durum, malzemenin ortotropik özelliğinden meydana gelmekte ve simetrik değerler yerlerine yazıldıktan sonra, eşitlikler kısaltarak uygun hal almaktadır. Bunun için, genel şekil değiştirme enerjisi denklemlerinden yararlanılır. $d\sigma_i$ birim gerilmesinin cisim üzerine etki etmesi durumunda gerçekleşen $d\varepsilon_i$ şekil değiştirmesinden dolayı cisimde meydana gelen dw enerjisine, şekil değiştirme işi adı verilmektedir. [5.3] eşitliğinde yazılmış olan şekil değiştirmeler, diferansiyel formda yer değiştirmeler cinsinden yazıldığında,

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{23} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{13} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad [5.4]$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada; u , v , w fonksiyonları sırası ile x , y , z eksenlerindeki yer değiştirmelerdir. Elastik özellikli matris elemanlarını daha az elemanla ifade edebilmek için, yazılması gereken şekil değiştirme enerjisi eşitliği;

$$dw = \sigma_i \cdot d\varepsilon_i \quad [5.5]$$

şeklindedir.

Bu eşitlikte σ_i yerine [5.2] eşitliğinde yer alan değeri yazılır ve integrali alınırsa:

$$w = \frac{1}{2} C_{ij} \varepsilon_j \varepsilon_i \quad [5.6]$$

eşitliği elde edilir. i ve j indislerinin yer değiştirmeleri, [5.6] eşitliğinde yerine yazılıp iş ifadesinin şekil değiştirmelere göre iki kez türevi alınır,

$$\frac{\partial^2 w}{\partial \varepsilon_i \partial \varepsilon_j} = C_{ij} = \frac{\partial^2 w}{\partial \varepsilon_j \partial \varepsilon_i} = C_{ji} \quad [5.7]$$

elde edilir. Buradan $C_{ij} = C_{ji}$ şeklinde simetrik olduğu görülmektedir ve böylece elastiklik matrisi simetriktir denir ve 21 elemanla gösterilebilir. Tek yönde takviye edilmiş malzemelerde her doğrultunun kendi içerisinde simetrik olması durumu, kısmen izotrop malzeme davranışına benzediği için birbirine dik doğrultuda simetrik malzemeler için yazılan [5.3] eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}. \quad [5.8]$$

Herhangi bir malzemedede, ortotropi özelliği mevcut ve mekanik özelliklerin bütün doğrultularda aynı olduğu tek bir düzlem malzemenin her noktasında mevcut ise 1 ve 2

indislerinin birbirine karşılık geldiği elemanlar birbirlerine eşit olurlar. Bu durumda [5.8] eşitliğinde $C_{11} = C_{22}$, $C_{13} = C_{23}$, $C_{44}=C_{55}$ ve $C_{66} = (C_{11}-C_{12})/2$ olarak yazılabilir. Eğer malzeme içerisinde sonsuz sayıda simetri düzlemi var ise, elastiklik matrisinin elemanları yalnızca iki indisle ifade edilebilir. Bu duruma uyan malzemelere izotrop malzemeler denilmektedir. Bu durumda; [5.8] eşitliği yeniden düzenlendiğinde, [5.9] eşitliği elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad [5.9]$$

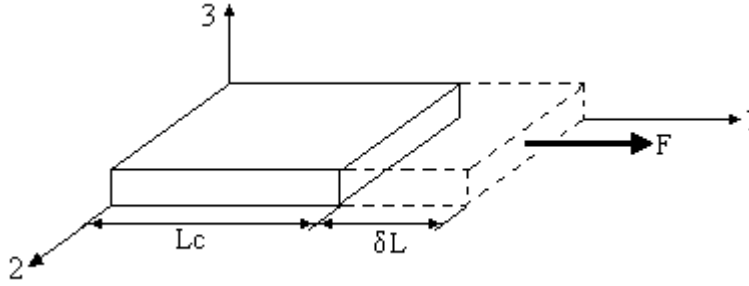
[5.2] bağıntısından, şekil değiştirmeler için elastiklik matrisinin tersi alınarak [5.10] eşitliği elde edilmiş olur. Burada S matrisi elastiklik matrisinin tersidir ve uygunluk matrisi ya da tamamlayıcı matris olarak da adlandırılır. Tansörel olarak şekil değiştirmeler; gerilmelere bağlı olarak,

$$\varepsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j \quad (i,j = 1-6) \quad [5.10]$$

şeklinde yazılır. Tamamlayıcı matrisi, [5.9] eşitliğinden yaralanarak matris formda şu şekilde yazılır:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad [5.11]$$

Ortotropik malzemelerde S tamamlayıcı elemanlarını bulmak için tek yönde yüklemeler yapılması gerekir.



Şekil 5.2 . Fiber takviye doğrultusunda (1) yapılan yükleme durumu.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, sadece 1 yönünde F_1 kuvvetinden dolayı oluşan σ_1 gerilmelerinin olduğu durum göz önüne alındığında, Hooke kanununun iki boyutlu gerilme durumu için [5.12] eşitliği yazılabilir.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ ve } \epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\nu_{12}\epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & -\nu_{12}\epsilon_1 \end{bmatrix} \quad [5.12]$$

Benzer şekilde, diğer gerilme yönlerinde de tek eksenli yüklemelerin yapıldığı dikkate alınarak ortotropik malzemeler için S_{ij} uygunluk matrisi elemanları bulunmuş olur.

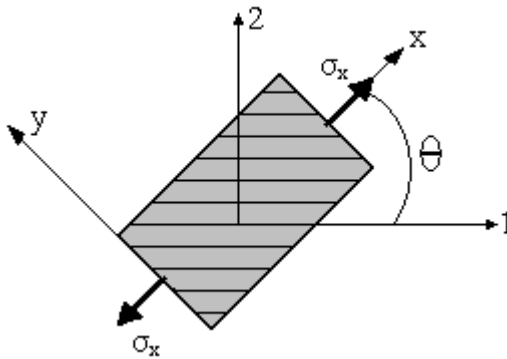
$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{21}}{E_2} & \frac{-\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & \frac{-\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad [5.13]$$

[5.11] eşitliği, düzlem şekil gerilme hali için tekrar yazılırsa [5.14] eşitliği elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad [5.14]$$

5.1.1. Fiber Takviye Açısının Gerilme/Şekil Değiştirme Bağlıntılarına Etkisi

Fiber takviye açısı kompozit yapının mekanik özelliklerinin değişiminde en etkili rol oynayan parametrelerden biridir. Gerilme şekil değiştirme eşitliklerinde takviye açısı göz önüne alınarak hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Tek yönde takviye edilmiş kompozit levhalarda fiber doğrultusunda uygulanan yükü fiber ve matris birlikte taşıırken fibere dik doğrultuda yapılan yüklemeler sadece matris tarafından taşınmaktadır. Bu nedenle de fiber doğrultusuna paralel olarak yapılan yüklemelerde mukavemeti matris malzemesine göre çok daha yüksek olan fiberler yükü taşıyarak kompozit malzemenin mukavemetini artırırken fibere dik doğrultuda yapılan yüklemelerde daha zayıf mekanik özelliklere sahip olan matris yükü taşıyamamaktadır [76].



Şekil 5.3. Fiber takviye doğrultusu ve yüklemeler [3].

Şekil 5.3’de görülen fiber takviye açısı θ doğrultusundaki gerilmeler, düzlem gerilme analizi formüllerinden [5.15] eşitliği ile elde edilebilir.

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin\theta \cos\theta \\ \sigma_2 &= \sigma_y \cos^2 \theta + \sigma_x \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin\theta \cos\theta \\ \tau_{12} &= -(\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta + \tau_{xy}(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta)\end{aligned}\quad [5.15]$$

[5.15] eşitliğinde $\sin\theta = s$ ve $\cos\theta = c$ şeklinde yazılarak yukarıdaki eşitlik matris formunda;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2.c.s \\ s^2 & c^2 & -2.c.s \\ -s.c & s.c & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{ve} \quad [T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2.c.s \\ s^2 & c^2 & -2.c.s \\ -s.c & s.c & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad [5.16]$$

şeklinde elde edilir. [5.16] eşitliğinde, trigonometrik ifadelerden oluşan T matrisine transformasyon (dönüşüm) matrisi adı verilir. Bu matris gerilmeler için, Hooke kanununa göre şekil değiştirmeler için de yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad ; \quad \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [5.17]$$

[5.17] eşitliği, [5.14] eşitliğinde yerine yazılması durumunda: [5.18] eşitliği elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad [5.18]$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} ; Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} ; Q_{21} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} ; Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} ; Q_{66} = G_{12}$$

Olarak tanımlanır.

Dönüşüm matrisi (T) kullanılarak takviye doğrultusunda yazılmış olan [5.16] eşitliği, asıl eksen takımı olan x ve y doğrultularında [5.17] ve [5.18] numaralı eşitliklerde yerine yazılması durumunda, [5.19] eşitliği elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \Rightarrow \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad [5.19]$$

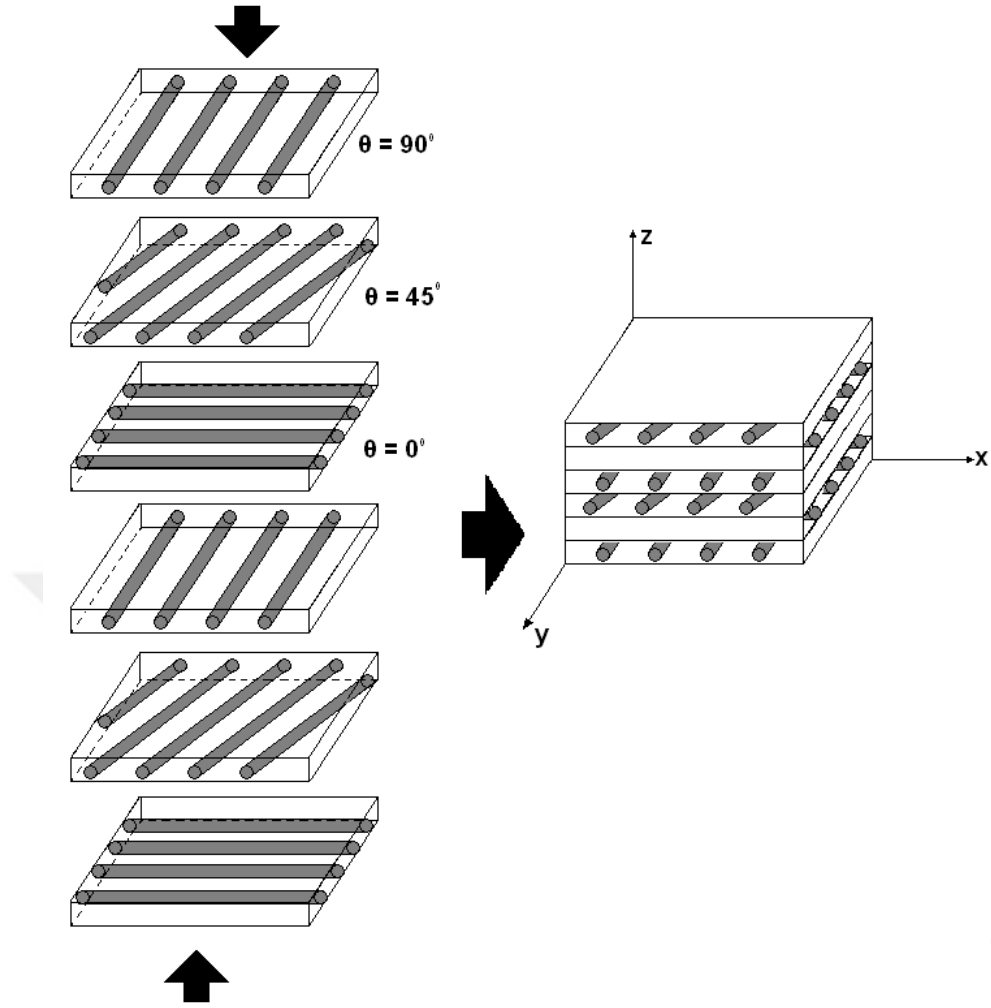
[5.19] eşitliğinde son terim x ve y eksenlerinde fiber takviyeli kompozit malzemeler için uygulanan gerilmelere karşı, meydana gelen şekil değiştirmeleri veren eşitliktir.

5.1.2 Tabakalı Kompozit Malzemelerde Gerilme Analizi

Tabakalı kompozit malzemelerin gerilme analizleri, izotrop malzemeler için yazılmış olan klasik tabaka teorisi kullanılarak gerekli eşitliklerin kompozit malzemelere uyarlanması ile yapılmaktadır. Bu nedenle problemin çözümü, düzlem gerilme analizine göre yapılmaktadır.

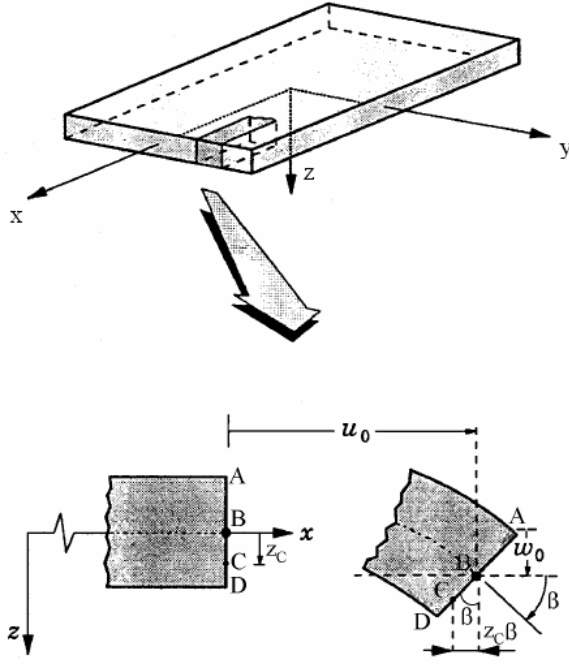
Genel olarak, statik analiz için şu temel varsayımlar sıralanabilir:

- a-** İmalat yöntemi ne şekilde olursa olsun bir araya getirilmiş olan tabakaların birleştirilmesi sonucunda tabakalı yapıya sahip olan plakalar ortaya çıkmaktadır.
- b-** Her bir tabakanın asal malzeme eksenleri 1 ve 2, x ve y eksenine göre keyfi olarak herhangi bir açı değerinde seçilebilir (Şekil 5.4).
- c-** Sabit plaka kalınlığı (t) plakanın diğer iki boyutu yanında ihmal edilebilecek kadar küçüktür.
- d-** u, v ve w yer değiştirmeleri plakanın kalınlığının yanında çok küçük değerlere sahiptir.
- e-** Kalınlık doğrultusundaki kayma şekil değiştirme bileşenleri γ_{xz} , γ_{yz} ve şekil değiştirme ε_z ihmal edilebilecek kadar küçüktürler.
- f-** u ve v teğetsel yer değiştirmeler z ekseninin bir fonksiyonudur.
- g-** Her bir plaka Hooke kanununa uyar.



Şekil 5.4. Farklı fiber takviye açılarına sahip tabakalardan oluşturulmuş kompozit yapı [3].

Sıralanmış olan d ve e maddelerinin sağlanması durumunda tabakalı yapılar için geçerli olan Kirchhoff deformasyon hipotezinin tanımlanmış olduğu görülmektedir. Bu hipoteze göre orta düzleme dik olan doğrultular, deformasyon sonrasında da bu düzleme dik olarak kalmaktadır.



Şekil 5.5. Kirchhoff deformasyon hipotezine göre plakanın kenarında deformasyona uğrayan ve deforme olmamış kenarlar [3].

Şekil 5.5' ten de görüldüğü gibi; Kirchhoff deformasyon hipotezine göre tabakanın kesit alanı x-z düzleminde. Bu durumda; B noktasının deforme olmuş ortadaki yüzeyden deformasyona uğramamış olan noktaya kadar olan x yönündeki yer değiştirmesi u_0 olarak alınacaktır. ABCD çizgisinin deformasyon sonrasında düz kalması durumunda x yönündeki yer değiştirmesi:

$$u_0 = u_c - z_c \cdot \beta \quad [5.20]$$

şeklinde yazılır. Buradaki β parametresi, deformasyon sonrasında ABCD olarak gösterilmiş olan çizgiye ait olan tabakanın orta yüzeyinin x doğrultusundaki eğimidir.

$$\beta = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad [5.21]$$

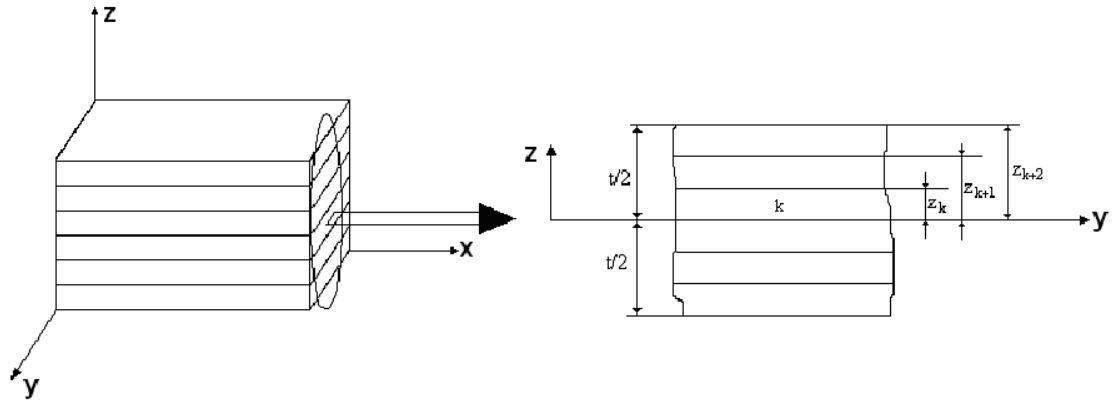
[5.21] denklemi ile ifade edilmiş olan β parametresi, x yönünde yazıldığı gibi y yönünde ve x-y düzleminde de yazılabilir. β parametresinin yerine yazılması ile, yer değiştirmeler ve buna bağlı olarak da şekil değiştirme eşitlikleri denklem [5.22]' de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
u &= u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} ; \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \epsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\
v &= v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y} ; \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \Rightarrow \epsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\
\gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \Rightarrow \gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{5.22}$$

[5.22] eşitliğinde bulunan şekil değiştirme ifadeleri, matris halindeki gösteriminde,

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad \text{ve} \quad \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \tag{5.23}$$

şeklinde yazılır.



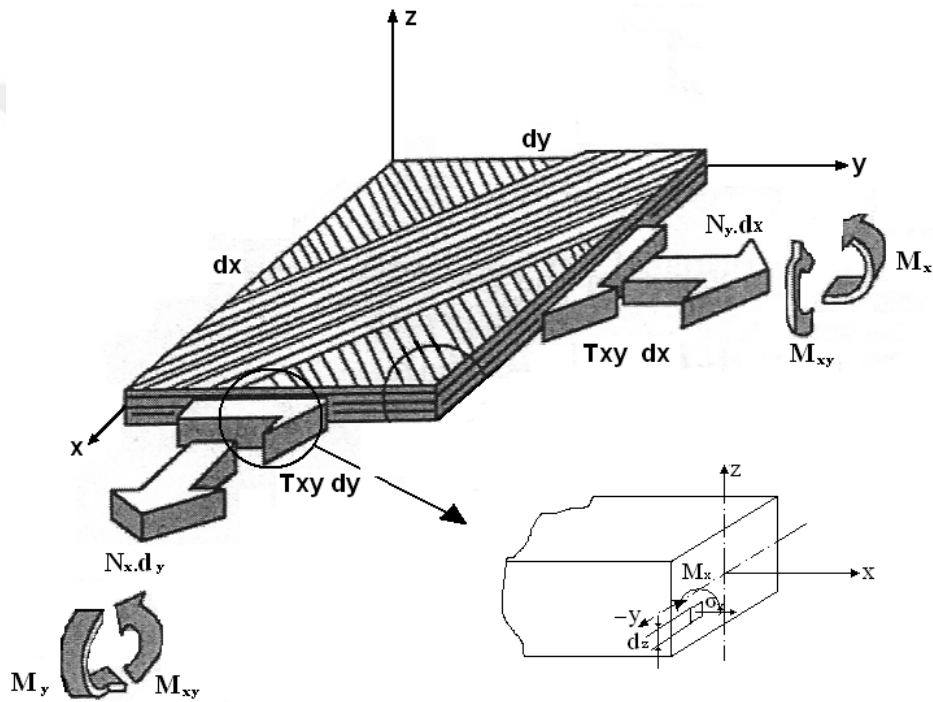
Şekil 5.6. Tabakalı kompozit yapıda simetri düzlemi ve tabaka kalınlıkları [75].

Plakada genel şekil değiştirme deformasyonuna uygun halde elde edilmiş olan [5.23] eşitliği [5.19] eşitliğinde yerine yazılırsa, [5.24] numaralı eşitlik elde edilmiş olur. Bu eşitlik, k indislili tabakaya ait gerilme şekil değiştirme eşitliği olarak adlandırılır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad [5.24]$$

[5.24] eşitliğinde $\bar{Q}_{ij}$ terimi sadece k indisli tabakaya aittir.

Şekil 5.7’de gösterilen kuvvet ve momentler etkisi altındaki cisimde, eksenel normal kuvvet ve moment ifadeleri [5.25] numaralı eşitlikte verilmiştir.



Şekil 5.7. Normal kuvvetler, kesme kuvvetleri, eğilme ve burulma momentleri uygulanarak yüklenmiş olan tabakalı kompozit malzeme [77].

$$\begin{aligned} N_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \\ M_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz \end{aligned} \quad [5.25]$$

Şekil 5.7 ’deki z plaka kesitinden alınmış olan diferansiyel elemanın tarafsız eksene uzaklığı ve dz de diferansiyel elemanın kalınlığıdır. [5.25] eşitliği, tüm tabakalar için, x ,y eksenlerine ve x-y kayma düzlemine göre yazılırsa :

$$\begin{aligned}
N_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz \\
M_x &= \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz
\end{aligned} \tag{5.26}$$

eşitlikleri elde edilir. Burada z_k ve z_{k-1} Şekil 5.6 de de görüldüğü gibi, tabaka sayısının değişimidir. Gerilmeler için elde edilmiş olan [5.24] eşitliği [5.26] eşitliğinde yerine yazıldığında; [5.27] eşitliği elde edilir.

$$\begin{aligned}
N_x &= \sum_{k=1}^n \left[\begin{array}{ccc} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{array} \right]_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right\} \\
M_x &= \sum_{k=1}^n \left[\begin{array}{ccc} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{array} \right]_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right\}
\end{aligned} \tag{5.27}$$

ε_x^0 , ε_y^0 , γ_{xy} , K_x , K_y ve K_{xy} z terimine bağlı büyüklükler olmadığı için ifadenin dışına alınarak denklemler düzenlenirse tüm sisteme ait komple direngenlik matrisi elde edilmiş olur.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} & B_{61} & B_{62} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{61} & B_{62} & B_{66} & D_{61} & D_{62} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix}; \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix}_{6 \times 1} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{Bmatrix}_{6 \times 1} \tag{5.28}$$

Burada yer alan A, B ve D terimleri, aşağıda verildiği gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 A_{ij} &= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k dz = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\
 B_{ij} &= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k z dz = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\
 D_{ij} &= \int_{-t/2}^{t/2} (\bar{Q}_{ij})_k z^2 dz = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3)
 \end{aligned} \tag{5.29}$$



6. MATERYAL VE YÖNTEM

Tabakalı kompozit malzemelerde yama yapıştırırmalı tamiratlar son yıllarda önem kazanmasından dolayı, çalışma konusu olarak tercih edilmiştir. Bu bölümde, mevcut çalışmada kullanılan malzemelerin çeşitleri ve üretim yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmada kullanılan tamiratyapılmış numunelerin hazırlanması ve bu tamiratların hasar yükleri üzerine etkilerinin belirlenmesi için yapılmış olan deneysel çalışmalar yer verilmiştir. Tamirat parametrelerinin maksimum hasar yüklerine olan etkileri deneysel olarak araştırıldığından; çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik davranışları incelenmemiştir. Deneysel çalışmada, öncelikle örgülü cam ve karbon lif takviyesi yapılmış olan tabakalı kompozit plakalarda dairesel şekilli hasar oluşturuldu. Bu hasarlar, literatürde de geniş bir şekilde yer verilmiş olan, yapıştırıcı/yama kullanılarak değişik parametrelerde tamiratları yapıldı. Ayrıca, değişik tamir parametreleri kullanılarak yapıştırıcı ile tamiri yapılan, hasara uğramış örgülü cam ve karbon fiber takviyeli kompozit numunelerin mekanik çekme dayanımları belirlendi. Örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler farklı iki yönde de aynı mekanik özelliklere sahip olmasından dolayı tercih edildi.

6.1. Malzeme Temini ve Üretimi

Çalışmada kullanılan kompozit malzemeler (örgülü cam/karbon fiber takviyeli kumaşlar ve reçine) İzoreel Kompozit İzole Malzemeleri Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi'nden temin edildi. Öncelikle, temin edilen bu malzemelerden 8 tabakalı kompozit levhalar üretildi. Daha sonra, bu levhalar 20, 30, 40, 50 mm genişliklerde şeritler halinde kesilerek test numuneleri olarak hazırlandı. Tamiratlar için kullanılan yama ve yapıştırıcılar Türk Hava Yolları Teknik A.Ş. den temin edildi. Bu malzemeler, laboratuvarlarda özel olarak hazırlanmış bölümlerde kontrollü çevre şartlarında muhafaza edilmektedirler. Yapılan çalışmada kullanılan tüm yapıştırırmalı tamiratların test numuneleri, Türk Hava Yolları Teknik A.Ş. de uzman teknik kadro ile birlikte hazırlandı.

Kompozit malzemeler sıcak presleme tekniği ile örgülü cam ve karbon fiber takviye ve epoksi reçine matriks kullanılarak üretildi. Üretimde kullanılan numunelerin özellikleri Tablo 6.1'da verilmiştir. Tabakaları oluşturacak olan örgülü fiberlerin (kumaşlar) her bir

katına reçine emdirilerek sekiz kat üst üste eklenip pres tablasına yerleştirildi. Presleme işlemi, 150 Bar basınç altında ve 140° C sıcaklıkta 4 saat preste bekletilerek yapılmıştır. Presleme işlemi sonunda çıkarılan plakalar oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Soğuma işleminin sonucunda, test deneyleri için bu levhaların kenarları özel kesicilerle kesilerek düzeltilip temizlendi ve kullanıma hazır hale getirildi.

Tablo 6.1. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan örgülü cam/karbon fiber ve epoksi reçine matriks malzemelerinin özellikleri.

Hammadde Adı	Marka	Özellik	Karışım Oranı
Epoksi Matriks (CY225)	Ciba Geigy	Bisphenol A	100 Pbw
Sertleştirici (HY225)	Ciba Geigy	Anhydride	80 Pbw
Karbon Fiber	İthal	Örgülü kumaş	280 gr/mm ²
Cam Fiber	İthal	Örgülü kumaş	280 gr/mm ²

6.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışma yapmak üzere üretilmiş olan örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler üzerine bu konuda yapılmış olan çalışmalar ve çekme cihazının kapasitesi göz önüne alınarak, 20, 30, 40, 50 mm genişliklerdeki şeritler halinde kesilip belirli uzunluklarda test numuneleri hazırlandı. Çekme testinde kullanılan cihazın, numune bağlama çeneleri de dikkate alınarak, tüm numuneler 300 mm numune uzunluklarında kesildi. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin işlenmesi için özel olarak üretilmiş, soyulmayı önleyen ve takviye edilmiş fiber kalıntıları bırakmayan, matkap ucu kullanıldı (Şekil 6.1). 10 mm çapındaki matkap ucu kullanılarak hazırlanmış olan numunelerin tam ortalarına dairesel şekilli hasarlar oluşturuldu. Delik delme esnasında, matkap ucu delik çapının en dışından kesmeye başlayarak ilerlediğinden, delme esnasında, tabakalı kompozit malzemelere takviye edilmiş olan fiberleri önden keser ve böylelikle, takviye edilen fiberlerde herhangi bir soyulmaya sebep olmamaktadır. Böylece, hasar için açılan deliklerin malzeme kalınlığı boyunca düz ve tam daire şeklinde olması sağlandı. Hasarların etrafı ile, yapıştırıcının temas edebileceği yüzeyler, zımpara ile pürüzlü hale getirildikten sonra, MEK (Metil-Etil-Keton) karışımı kullanılarak kalıntılar, kir ve tozlar temizlendi.

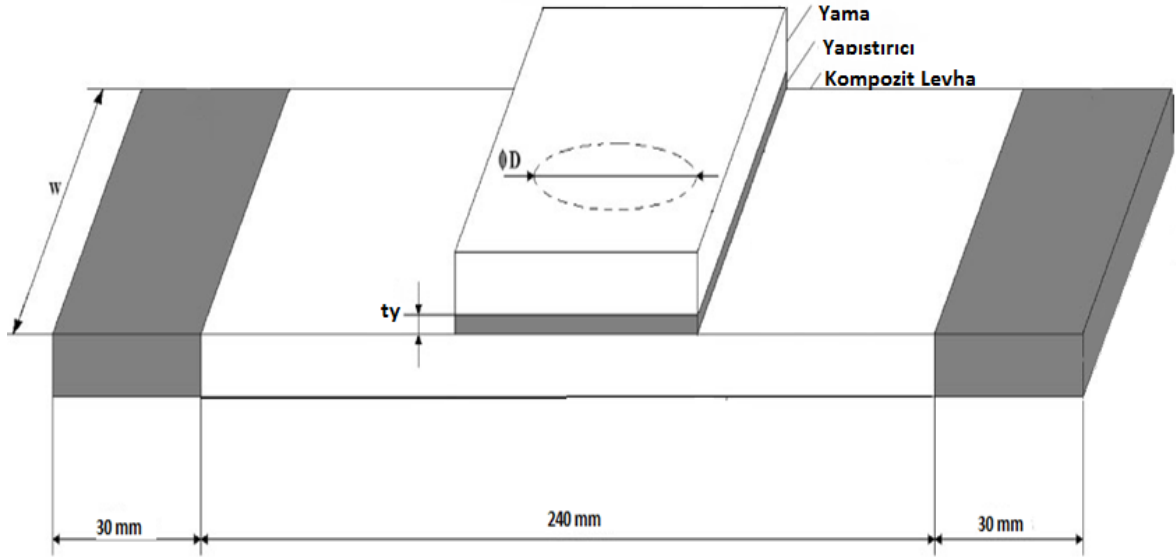
Yapıştırıcı kullanılarak bu hasarlar, iki yöntem ile kompozit yama yapıştırılıp tamir edildi. Tamir edilen kompozit plakaların geometrisi Şekil 6.2’de görülmektedir. Tamir işleminde ıslak yapıştırma ve önceden hazırlanmış (prepreg) yama/film yapıştırıcı yapıştırma tamirat yöntemleri kullanıldı. Bu tamirat işlemlerinde kullanılan malzemeler Tablo 6.2 de görülmektedir. Daha sonra, tamiratları yapılmış olan bu numunelerin çekme deneyleri yapıldı; tamiratların maksimum hasar yükleri belirlendi.



Şekil 6.1. Kompozit plakaların hasarlandırılması için kullanılmış olan matkap ucu (Ultra Tool)

Tablo 6.2. Tabakalı kompozit malzeme tamiratlarında kullanılan malzemeler

Tamirat Tipi	Ana Malzeme Tak.	Yapıştırıcı Çeşidi	Yama Malzemesi
W.L.	Örgülü cam fiber	Hysol EA9396	0020989 cam kumaş
	Örgülü cam fiber	Hysol EA9396	0021438-09 cam kumaş
Prepreg	Örgülü karbon fiber	C992275 film yapıştırıcı	C992268-14 karbon kumaş
	Örgülü karbon fiber	C991957-37 film Yapıştırıcı	C992270 karbon kumaş.



Şekil 6.2. Tamiri yapılmış olan kompozit plakaların geometrik şekli

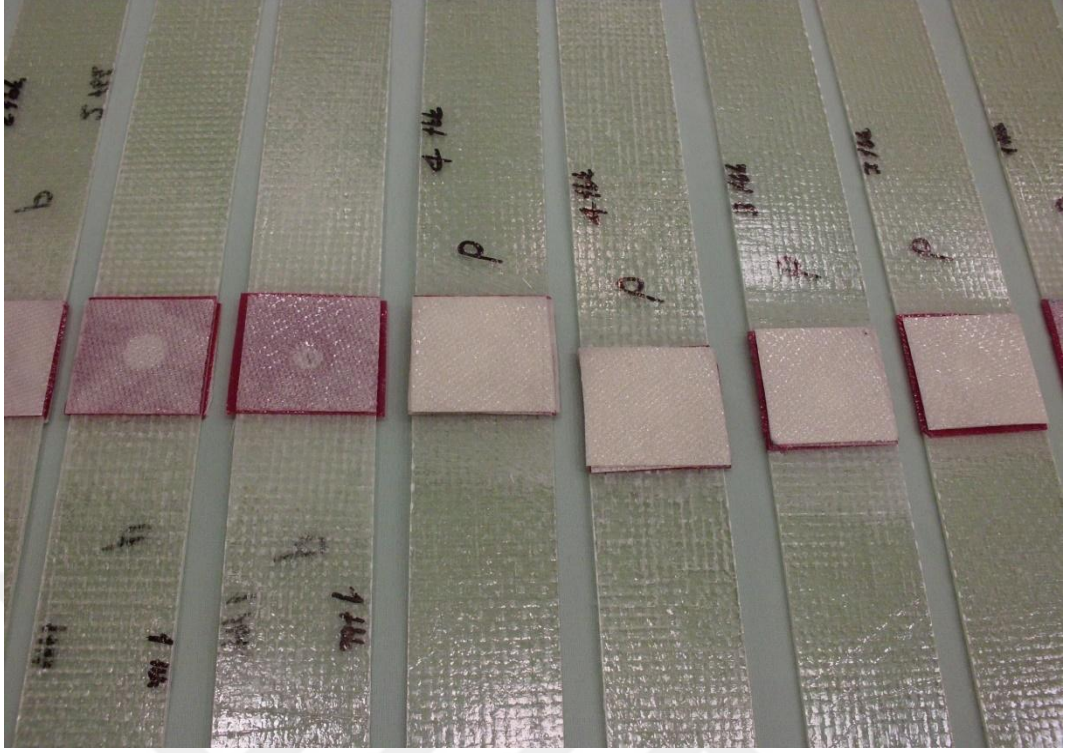
6.2.1. Genişlik/Çap (G/D) Oranlarının Tamirattaki Etkilerinin Araştırılması

Son yıllarda yapılmış olan birçok çalışmada, bu tür etkilerin araştırılması için $G/D = 2, 3, 4, 5$ oranları kullanılmıştır. Bundan dolayı, yapılan test sonuçlarının doğruluğunun karşılaştırılması için bu oranlar üzerinde çalışıldı. Tüm numunelerde delik çapı, $\varnothing 10$ mm alındığından dolayı, yukarıdaki oranları veren $G = 20, 30, 40, 50$ mm genişliklerde test numuneleri, hem örgülü cam fiber takviye edilmiş kompozit malzemeler, hem de karbon örgülü fiber takviye edilmiş kompozit malzemeler için hazırlandı. Tüm bu test numuneleri, $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ de ve %20 nem koşullarındaki prepreg yamalar ile tamir edildikten sonra küremeye bırakıldı. Bu tamiratlarda, cam örgülü fiber takviyeli malzemeler için C992270 numaralı cam fiber takviyeli kumaş yama ve C991957-37 film yapıştırıcı kullanıldı. Karbon örgülü fiber takviyeli malzemeler için ise, C992268-14 numaralı karbon yama ve C992275 film yapıştırıcı kullanıldı. Bu test numunelerinin tamir edilen hali Şekil 6.2.' de görülmektedir. Örgülü cam fiber takviyeli numunelerin küremesi için, 28 inç civa basıncında, artırmalı maksimum $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 2.5 saat bekletildi. Örgülü karbon fiber takviyeli numunelerin küremeleri için ise, 28 inç civa basıncında, artırmalı maksimum $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 2.5 saat bekletildi. Küreme test cihazı ve test numunelerinin küreme hali, Şekil 6.3 de görülmektedir. Küreme esnasında verilen basınç ve sıcaklıkta film

yapıştırıcısının eriyerek dağılmasını engellemek için, bu tamiratlar için özel olarak imal edilmiş olan ve aynı zamanda yapıştırılan bölgede boşluk kalmasını önleyen yönlendirici şilteler kullanıldı. Daha sonra bu numunelere, çekme testi uygulanarak her bir tamiratın hasar yükü belirlenerek G/D geometrik oranlarının yama yapıştırırmalı tamirat kalitesine olan etkileri araştırıldı.

6.2.2. Yapıştırıcı Kalınlığının Tamirattaki Etkilerinin Araştırılması

Yapıştırıcı kalınlığının, örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlara etkisini araştırmak için, yukarıdaki bölümde bahsedilen yöntem ile, G/D=3 geometrik oranlarda hazırlanmış numuneler, prepreg yöntemi ile tamir edilen karbon örgülü fiber takviyeli test numuneleri kullanıldı. Tamirat için kullanılan yapıştırıcının kalınlık kontrolünün rahat bir şekilde yapılabilmesi için film tipi yapıştırıcı kullanılmıştır. Hasara uğratılmış numunelerin tamiratları için, 1, 2, 3, 4, 5 tabaka film yapıştırıcı kullanılarak, farklı özelliklerde tamiratlar yapıldı. Film tipi yapıştırıcıya ısı verildikten sonra (eridikten sonra) sertleşme durumundaki her bir tabaka kalınlığı 0.1 mm olarak ölçüldü. Burada her bir film yapıştırıcı tabaka arasına yönlendirici şilte kullanıldı. Yapılan tamiratların maksimum hasar yükleri çekme testi ile belirlenip, yapıştırıcı kalınlığının tamirata olan etkisi araştırıldı.

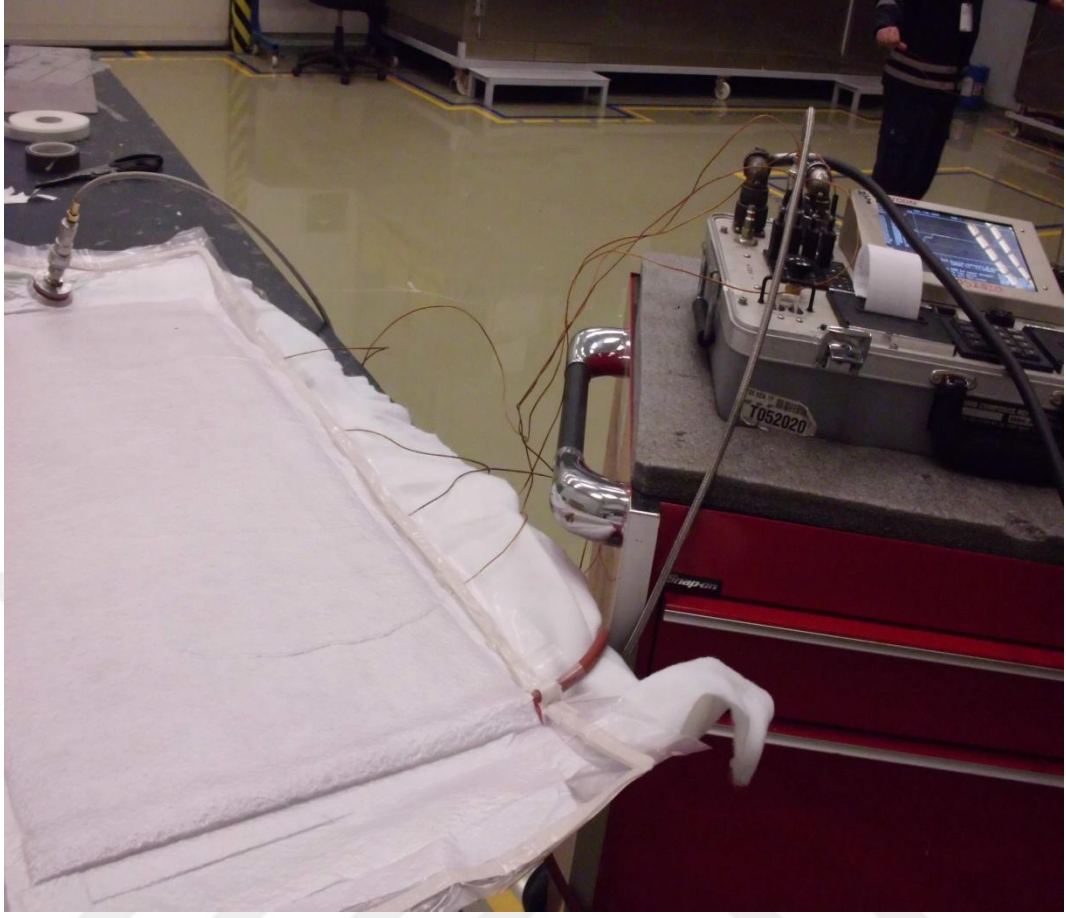


a) Cam fiber levhalar



b) Karbon fiber levhalar

Şekil 6.3. Yama ile tamir edilen test numuneleri



Şekil 6.4. Test numunelerinin k rleme görüntüsü ve k rleme cihazı

6.2.3. Malzemedeki Fiber Takviye Açısının Tamirata Olan Etkisinin Araştırılması

Malzemelerdeki fiber takviye açısının, örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırma tamiratlarındaki etkisini araştırmak için, $G/D=4$ geometrik oranlarda numuneler hazırlandı. Daha sonra prepreg ve ıslak yapışma yöntemleri ile tamir edilen, cam örgülü 0° , 15° , 30° , 45° açılarda fiber takviyesi yapılan test numuneleri kullanıldı. Test numunelerinin tamiratları için, prepreg yönteminde film tipi yapıştırıcı, W.L. (ıslak yapışma) yönteminde ise, Henkel EA9396 reçine yapıştırıcı kullanıldı. Farklı fiber takviye açılarına (0° , 15° , 30° , 45°) sahip olan tabakalı kompozit malzemelerden yapılmış olan levhaların tamiratları yapıldı. Bu tamiratların maksimum hasar yükleri çekme testi ile belirlenerek, tamiratı yapılan kompozit malzemelerdeki fiber takviye açısının tamirata olan etkisi araştırıldı.

6.2.4. Yama Kalınlığının Tamirattaki Etkilerinin Araştırılması

Yama kalınlığının, örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırırmalı tamirlatlara etkisini araştırmak için, $G/D=3$ geometrik oranlarda hazırlanan, prepreg ve ıslak yapışma yöntemleri ile tamir edilen, örgülü cam fiber takviyesi yapılan test numuneleri kullanıldı. Test numunelerinin tamiratlari için, prepreg yönteminde film tipi yapıştırıcı, W.L. yönteminde ise, Henkel EA9396 reçine yapıştırıcı kullanıldı. Hasarlanmış numunelerin tamiratlari için, 1, 2, 3, 4 adet tabaka yama kullanılarak farklı özelliklerde tamiratlari yapıldı. Burada her bir film yapıştırıcı tabaka arasına yönlendirici şilte kullanıldı. Bu tamiratlari maksimum hasar yükleri, çekme testi ile belirlenerek; yama kalınlığının tamirata olan etkisi araştırıldı.

6.2.5. Yama Bindirme Mesafesinin Tamirattaki Etkilerinin Araştırılması

Yama bindirme (yapışma uzunluğu) mesafesinin, örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırırmalı tamirlatlara etkisini araştırmak için, $G/D=2$ geometrik oranlarda hazırlanmış prepreg ve W.L. yöntemleri ile tamir edilen örgülü cam fiber takviyesi yapılmış test numuneleri kullanıldı. Test numunelerinin tamiratlari için, prepreg yönteminde film tipi yapıştırıcı, W.L. yönteminde ise, Henkel EA9396 reçine yapıştırıcı kullanıldı. Hasarlanmış numunelerin tamiratlari için 20, 30, 40, 50 mm lik yama yapışma mesafeleri kullanıldı. Farklı geometrik özelliklerde tamiratlari yapılan bu tamiratlari maksimum hasar yükleri çekme testi ile belirlendi. Böylece, bindirme mesafesinin tamirata olan etkisi araştırıldı.

6.2.6. Yapıştırıcı Çeşidinin Tamirata Olan Etkilerinin Araştırılması

Yapıştırıcı çeşidinin, örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırırmalı tamirlatlara olan etkisini araştırmak için, $G/D=2$ geometrik oranlarda hazırlanmış, prepreg ve W.L. yöntemleri ile tamir edilmiş örgülü cam fiber takviyesi yapılan test numuneleri kullanıldı. Test numunelerinin tamiratlari için, prepreg yönteminde film tipi yapıştırıcı, W.L. yönteminde ise reçine yapıştırıcı olan Henkel EA9396, Henkel EA9390 ve Henkel EA 9394 olmak üzere, üç çeşit yapıştırıcı kullanıldı. Hasara uğratılmış numunelerin tamiratlari için, bu dört farklı yapıştırıcı kullanıldı. Farklı özellikli yama

yapıştırılmalı tamiratlar yapılarak, bu tamiratların maksimum hasar yükleri çekme testi ile belirlenmiş ve farklı yapıştırıcı çeşidinin tamirata olan etkileri araştırılıp, bu sonuçlar grafiklere taşınmıştır.

6.2.7. Yamadaki Fiber Takviye Açısının Tamirata Olan Etkisinin Araştırılması

Örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırılmalı tamiratlarda kullanılan yamalardaki fiber takviye açısının, tamiratlardaki etkisini araştırmak için, $G/D=4$ geometrik oranlarda hazırlanan örgülü karbon fiber takviyeli malzeme numuneleri kullanıldı. Bu numuneler, 0° , 15° , 30° , 45° açılarda örgülü karbon fiber takviyeli yamalar kullanılarak, prepreg ve ıslak yapışma yöntemleri ile yama yapıştırılarak tamir edildi. Bu numuneler, çekme testine tabi tutularak, elde edilen hasar yükleri grafiklere aktarılıp, hem seçilen tamirat yönteminin, hem de yama yapıştırılmalı tamiratlarda kullanılan yamalardaki fiber takviye açısının tamirata olan etkileri belirlendi.

6.2.8. Yama Şeklinin Tamirata Olan Etkilerinin Araştırılması

Yama şeklinin, örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırılmalı tamiratlara olan etkisini araştırmak için, $G/D=5$ geometrik oranlarda numuneler hazırlandı (Şekil 6.4). Burada, prepreg ve W.L. yöntemleri ile kare ve daire şeklinde yamalar kullanılarak tamir edilen örgülü cam ve karbon fiber takviyesi yapılan test numuneleri kullanıldı. Test numunelerinin tamiratları için, prepreg yönteminde film tipi yapıştırıcı, W.L. yönteminde ise reçine yapıştırıcı olan Henkel EA9396 yapıştırıcı kullanıldı. Bu şekilde, 8 adet farklı özellikli yama yapıştırılmalı tamiratlar yapılarak, bu tamiratların maksimum hasar yükleri çekme testi ile belirlenmiş ve farklı yama şeklinin yama yapıştırılmalı tamirata olan etkileri araştırılarak, sonuçlar grafiklere taşınmıştır.



Şekil 6.5. Hazır yama-film yapıştırıcı ile tamirâtı yapılmış karbon fiber takviyeli test numunelerinin görünümü

6.3. Numunelerin Çekme Testine Tabi Tutulması

Deneysel çalışmada kullanılan çekme testleri, ASTM D3039-76 standardına göre yapıldı. Bu çalışmada seçilen tabakalı kompozit malzemeler, örgülü fiber takviyeli malzemeler olduklarından, tüm çekme testleri tek yönde uygulandı. Kompozit malzemelere takviye edilen fiberler örgülü olduklarından, bu malzemeler her iki yönde de aynı özellikler göstermektedirler. Yama yapıştırmalı tamiratlarda bu tip malzemelerin kullanımı, konstrüksiyonlarda yönleri tam olarak belli olmayan yani tam olarak yönleri hesap edilemeyen yüklere karşı, bu malzemelerin hasara uğramadan, sağlam kalmaları açısından önem arz etmektedir.

Yama yapıştırmalı tamiratları yapılan deney test numunelerinin çekme testleri, 600 kN çekme kapasitesine sahip olan Atlas-LH tipi universal çekme cihazı ile yapıldı. Şekil 6.5 'de görülen çekme cihazından elde edilen veriler, bilgisayar ortamında grafiklere dönüştürülerek sonuçlar elde edilmektedir.

Deney test numunelerinin çekme esnasında çene bağlantı kısımlarından hasara uğramamaları için, bu bölgeler bant ile kapatılıp çekme cihazının çenelerine bağlanarak yük uygulandı. Çalışmada kullanılan malzemeler, çekme yükü altında aniden hasara uğramaması için, cihazın çekme hızı 0.5 mm/dk olarak ayarlandı. Bu değer belirlenmesinde, benzer konulardaki çalışmalar ile uyumluluğu gözetildi. Böylece, test numunelerinden daha sağlıklı sonuçlar elde edildi.



Şekil 6.6. Çekme test cihazı.

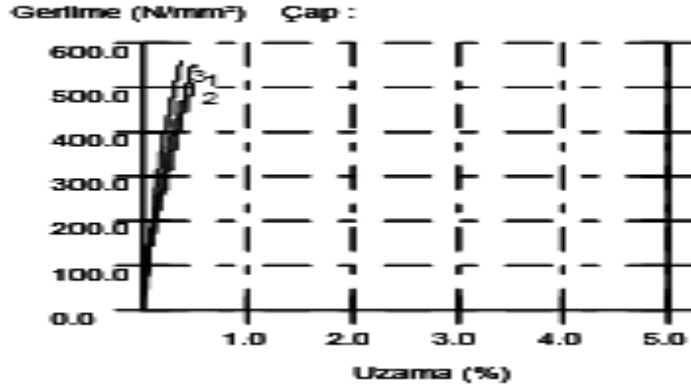
Deney sonuçlarında sunulmuş olan grafiklerde belirtilen her bir veri değeri, çekme test cihazının kaydetmiş olduğu 3 adet deney test numunelerinin ortalama değerlerinden elde edildi. Numunelerin cihaza bağlanmasının ardından gerçekleşen deneyin sonuçları, cihaz üzerinde yerleştirilmiş olan yük hücreleri tarafından algılanan yük–şekil değiştirme değerleri bilgisayara aktarılır. Aktarılan bu değerler Şekil 6.6’de görülen bir ara yüz yardımı ile takip edilebilmektedir.

TEST SONUÇLARI

DENEY SONUCU BULUNAN DEĞERLER														STANDART SINIR DEĞERLERİ									
No.	Sınıf Çapı	Num. Çapı	Anma	Genişlik	Kalınlık	Kesit Alanı	Kütle	İlk Boy	Son boy	Kopma Uzunluğu	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Çekme / Akma	D.Akma / K. Akma	Max.Yük. Toplam Uzunluk %	Akma Min	Çekme Min	Kopma Uzunluğu	Anma Kütle		Çekme / Akma	D.Akma / K. Akma	Max.Yük. Toplam Uzunluk %
																			Min	Max			
1	S420	2.96	0.00	20.00	1.40	28.00	0.050	140.00	140.65	0.49	435.35	551.07	1.27	1.04	0.49	420.00	500.00	10.00	0.000	0.000	1.150	1.300	0.000
2	S420	2.96	0.00	20.00	1.40	28.00	0.050	140.00	140.72	0.51	402.34	509.25	1.27	0.96	0.48	420.00	500.00	10.00	0.000	0.000	1.150	1.300	0.000
3	S420	2.96	0.00	20.00	1.40	28.00	0.050	140.00	140.51	0.36	442.12	559.64	1.27	1.05	0.36	420.00	500.00	10.00	0.000	0.000	1.150	1.300	0.000
4																							
5																							
6																							
7																							
8																							
9																							
10																							
11																							
12																							
13																							
14																							

Şekil 6.7. Çekme cihazını kontrol eden bilgisayarda ekrana yansıyan ara yüz.

GRAFIKLER



Şekil 6.8. Çekme cihazından elde edilen örnek gerilme-%uzama grafikleri

Çekme test cihazına hasara uğramış kesit girildi ve gerilme değerleri elde edildi. Çalışmada sunulan Hasar Yükleri bu gerilme değerlerinin kesit alanına bölünmesi ile elde edildi.

Deney sonucunda, gerilme-uzama eğrilerinde genel olarak gözlemlenen sonuç, gerilmelerin belirli bir değere ulaşmasının ardından, yama yapıştırırmalı tamiratlarda ani olarak hasar oluşmakta ve böylelikle % uzama çok az görülmektedir. Sadece, malzemelerdeki ve yamalardaki fiber takviye açısının değişimi ile % uzamanın da arttığı görülmüştür. Tamiratlarda görülen hasar tipleri, incelenmediğinden, % uzama değerlerine herhangi bir sınır konulmamıştır. Uzamalar sınırlandırılrsa bile, tamiratlarda hasar oluştuktan sonra, yük değerlerinde artış olmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan çekme deneylerinin genel olarak sonuçları incelendiğinde; yama yapıştırırmalı tamiratların hasar yüklerinin malzeme ve yama fiber takviye açısı, tamirat yöntemi, yama kalınlığı ve yama bindirme mesafesinin değişimi ile değişmektedir. Fakat % uzamanın, sadece malzeme ve yamadaki lif takviye açılarının artırılması ile değiştiği görülmüştür. Fiber takviye açısının artması kompozit levha mukavemetini azaltır. Fakat % uzama miktarını arttırır.

7. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada, hazırlanan ve tamiratları yapılmış olan numuneler, ayrı ayrı markalanarak, her bir durum için ayrılmış olan test numunelerinin çekme test deney sonuçları grafikler halinde verilmiştir. Çalışmada kullanılan deney test numunelerinin bazı özellikleri ve yama yapıştırırmalı tamiratlarında kullanılan parametreler Tablo 7.1.' de verilmiştir. Deneyler sonucunda, elde edilen bu grafiklerdeki maksimum hasar yükleri, temel parametre olarak kabul edilerek incelendi. Her tamirat için en uygun şartlar altında, farklı malzemelerle yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlar birbirleriyle kıyaslanarak sonuçlar elde edildi.

Öncelikle, deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin ölçüleri ve yama yapıştırırmalı tamirat şartları belirlendi. Daha sonra, farklı şartlarda tamiratları yapılmış olan bu numunelerin çekme test deneyleri yapıldı. Böylece, tamiratların maksimum hasar yükleri belirlenerek, her bir tamirat için en uygun şartlar tespit edildi. Sonuç olarak, tabakalı kompozit malzemelerde yapılan tamiratları etkileyen faktörler ayrı ayrı belirlenmiş oldu.

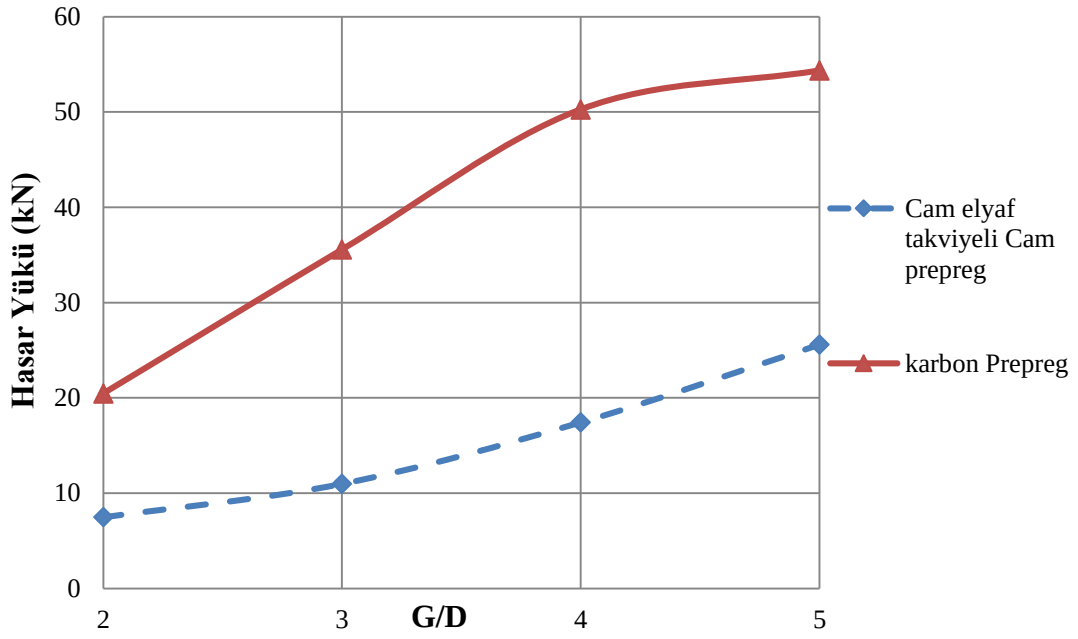
Tablo 7.1. Çalışmada kullanılan yama yapıştırırmalı tamiratlarının deney test numunelerinin özellikleri.

Tamirat Parametresi	Kullanılan Malzeme	Geometrik Oran (G/D)	Tamir Yöntemi
Genişlik/Çap Oranı	Cam - Karbon fiber	2,3,4,5	Prepreg
Yapıştırıcı Kalınlığı	Karbon fiber	3	Prepreg
Malzemelerdeki fiber Takviye Açısı	Cam fiber	4	Prepreg ve Islak Yapıştırma
Yamadaki Fiber Takviye Açısı	Karbon fiber	4	Prepreg ve Islak Yapıştırma
Yama Kalınlığı	Cam fiber	3	Prepreg ve Islak Yapıştırma
Yama Bindirme Mesafesi	Cam fiber	2	Prepreg ve Islak Yapıştırma
Yapıştırıcı Çeşidi	Cam fiber	2	Prepreg ve Islak Yapıştırma
Yama Şekli	Cam-Karbon fiber	5	Prepreg ve Islak Yapıştırma

7.1. Genişlik/Çap (G/D) Oranlarının Yama Yapıştırırmalı Tamiratlardaki Etkileri

Yama yapıştırırmalı tamiratların geometrik ölçülerinin tamiratlara olan etkilerinin araştırılması için, $G/D = 2, 3, 4, 5$ oranları kullanıldı. Tüm numunelerde delik çapı, $\varnothing 10$ mm alındığından dolayı, yukarıdaki oranları veren $G = 20, 30, 40, 50$ mm genişliklerde test numuneleri, hem örgülü cam fiber takviyeli kompozit malzemeler için, hem de karbon örgülü fiber takviyeli kompozit malzemeler için hazırlandı. Her bir durum için, 3 adet deney test numunesi kullanıldı. Bu test numunelerinde oluşturulan hasarlar, yama ve yapıştırıcı kullanılarak, prepreg yöntemi ile tamir edildi. Daha sonra, çekme testi deneylerine tabi tutularak her bir test numunesinin maksimum hasar yükü belirlendi. Bu test numunelerinin maksimum hasar yüklerinin değişimleri, Şekil 7.1.' de görülmektedir. Grafiklerde gösterilmiş olan her bir değer, 3 adet test numunesinin ortalama değeridir. Bunun sebebi, bazı test numunelerinin tamiratlarında meydana gelmiş olan tamirat hatalarının, deney sonuçlarını etkileme olasılığını en düşük seviyeye indirmektedir. Çekme deneyi sonucunda, numunelerde meydana gelen hasar şekline bakılmadı. Çünkü, bu durum tamiratın maksimum hasar yükünü etkilemediği görüldü. Bu çalışmada, iki adet benzer özellikteki tabakalı kompozitin yapışma özelliğinden çok, malzemelerdeki yama yapışmalı tamiratları etkileyen faktörler araştırıldı. Tüm numune tamiratlarında kullanılan yama malzemeleri, onarılan ana malzemedan zayıf seçildiğinden, hemen hemen tüm tamiratlardaki yamalar, çekme yükü altında, ya ana malzemedan söküldüğü (birden çok tabakaya sahip olan kalın yamalarda) ya da, ana malzeme ile beraber koptuğu (tek tabakalı ve yapışma alanı fazla olan tamiratlarda) gözlemlendi.

Tabakalı kompozit malzemelerdeki yama yapıştırırmalı tamiratlardaki G/D oranının değişmesi, tamiratların maksimum hasar yükleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 7.1 de görüldüğü gibi, karbon malzemelerdeki yama yapıştırırmalı tamiratlarda G/D oranını 2 den 5'e doğru değiştirildiğinde, tamiratların maksimum hasar yükleri de, 20 kN dan 54 kN'na kadar değiştiği gözlemlendi. Buna karşılık, G/D oranını 2' den 5' e kadar değiştirildiğinde ise, prepreg yöntemi ile tamir edilmiş yama yapıştırırmalı cam lif takviye edilen malzemelerde yapılan tamiratların maksimum hasar yükleri de, 8 kN dan 26 kN a kadar arttığı gözlemlendi. Buradan, yamalardaki G/D oranının değişiminin, cam fiber takviyesi yapılan yama yapıştırırmalı tamiratların hasar yüklerinde, karbon fiber takviyesi yapılan malzemelere göre daha etkili olduğu tespit edildi.



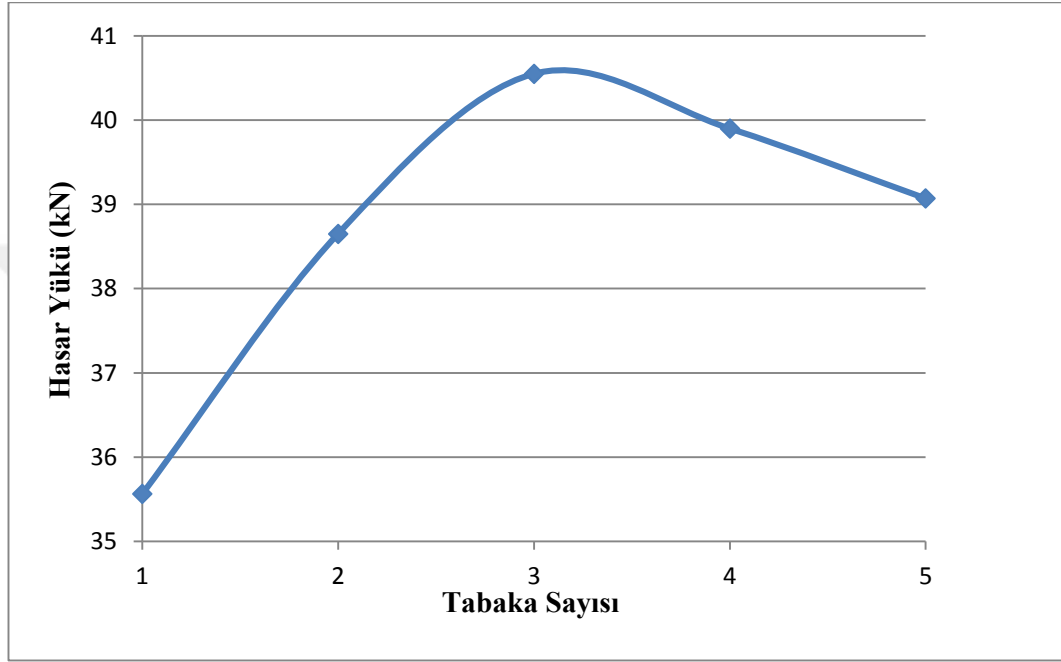
Şekil 7.1. Cam ve karbon fiber takviyesi yapılan ve prepreg yöntemi ile tamir edilen fiber açısı 0° olan malzemelerde G/D Oranları-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik

G/D oranının 2' den 5' e kadar değişimi, karbon fiber takviye edilen malzemelerdeki tamiratların hasar yüklerini yaklaşık olarak 2.5 kat artırırken, cam fiber takviyesi yapılmış malzeme tamiratlarınınkini yaklaşık 3 kat artırmaktadır. Mevcut çalışmadaki yama yapıştırırmalı tamiratlardaki G/D oranının artırılması, aynı zamanda yamanın yapışma alanını büyüttüğünden, tamiratların maksimum hasar yüklerini de artırmış olduğu anlaşılmaktadır. Aynı zamanda, tamiratlardaki G/D oranının artırılması, tamiratyapılan malzemenin ağırlığını da artıracığından dolayı, yama yapıştırırmalı tamiratlarda bu oranın optimum değerde seçilmesi gerekmektedir.

7.2. Yama Yapıştırırmalı Tamiratlardaki Yapıştırıcı Kalınlığının Etkisi

Yapıştırıcı kalınlığının, yama yapıştırırmalı tamiratlara etkisinin araştırılmasında, $G/D=3$ geometrik oranlardaki test numuneleri kullanıldı. Bu test numuneleri için, prepreg yöntemi ile tamir edilen, karbon örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemeler seçildi. Bunun sebebi, karbon örgülü fiber takviyesi yapılmış olan malzemelerin daha fazla çekme yüküne sahip olmalarındandır. Ayrıca, kullanılan yapıştırıcının film tipi yapıştırıcı seçilmesi, kullanılan yapıştırıcının kalınlığının kontrolü daha kolay olmaktadır.

Numuneler, çekme testine tabi tutulduğunda, yapılmış olan tamiratlar, genelde malzeme kopmasından önce hasara uğrar. Böylece, yapıştırıcı kalınlığının yama yapıştırırmalı tamiratlara olan etkisi daha kolay tespit edilebilmektedir. Yama yapıştırırmalı tamiratlardaki yapıştırıcı kalınlığının, yama yapıştırırmalı tamiratlara olan etkisi, Şekil 7.2’ de görülmektedir.



Şekil 7.2. Karbon fiber takviyesi yapılan malzemelerde, $G/D=3$, fiber takviye açısı 0° olan yama yapıştırırmalı tamiratlarda kullanılan yapıştırıcı kalınlığı-maksimum hasar yükü değişimini gösteren grafik

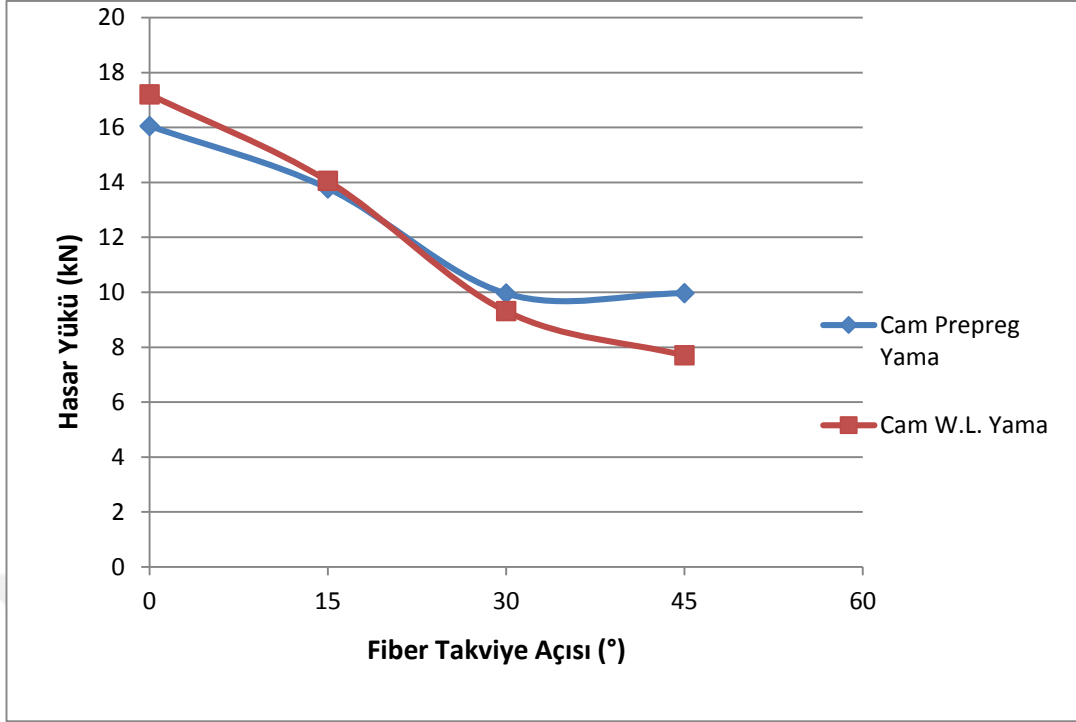
Yama yapıştırırmalı tamiratlarda, yamayı ana malzemeye tutturan yapıştırıcı, bağlantının en zayıf halkası durumundadır ve tamiratlarda çok önemli bir role sahiptir. Bundan dolayı, yapışmada kullanılan yapıştırıcının çok dikkatli ve özenle seçilmesi gerekmektedir. Şekil 7.2’ de görülen grafikte, beş değişik yapıştırıcı kalınlığı kullanılarak yapılan yama yapıştırırmalı tamiratların, çekme testi ile elde edilen hasar yükleri verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde, maksimum hasar yükünün üç tabaka film tipi yapıştırıcı kullanılarak yapılan tamiratlarda elde edildiği görülmektedir. Yama yapıştırırmalı bağlantılarda kullanılan yapıştırıcı kalınlığı belli bir kalınlığa kadar tamiratların hasar yüklerine olumlu yönde etki ettiği görülmektedir (Şekil 7.2). Her bir film tipi yapıştırıcı kalınlığı 0.1 mm olarak düşünüldüğünde; bu çalışmada, en uygun yapıştırıcı kalınlığı, 3 tabaka kalınlık olan 0.3 (3x0.1) mm olarak tespit edildi. Elde edilen bu değerin, buna

benzer yapılmış olan çalışmalarla uyumlu olduğu görüldü. Örneğin; Liu tarafından yapılmış olan çalışmada [5], yama yapıştırırmalı tamiratlar için optimum yapıştırıcı kalınlığı 0.25 mm olarak bulunmuştur. Bu değerden (3 tabaka) daha kalın yapıştırıcı tabakası kullanılarak yapılan yama yapıştırırmalı tamiratların maksimum hasar yüklerinin giderek azaldığı gözlemlendi. Bunun sebebi, bu değere kadar yapıştırıcı kalınlığı kullanılarak yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlarda çekme yükü uygulanması ile tamiratlarda adhezyon hasarının oluşmasına bağlandı. Bu değerden fazla yapıştırıcı kalınlığı kullanılarak yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlarda ise, çekme yükü altında kohezyon hasarı oluşmaktadır. Bu olayda, yapılmış olan tamiratların hasar yüklerini azalttığı, Şekil 7.2' de açıkça görülmektedir.

7.3. Malzemedeki Fiber Takviye Açısının Yama Yapıştırırmalı Tamirata Olan Etkisi

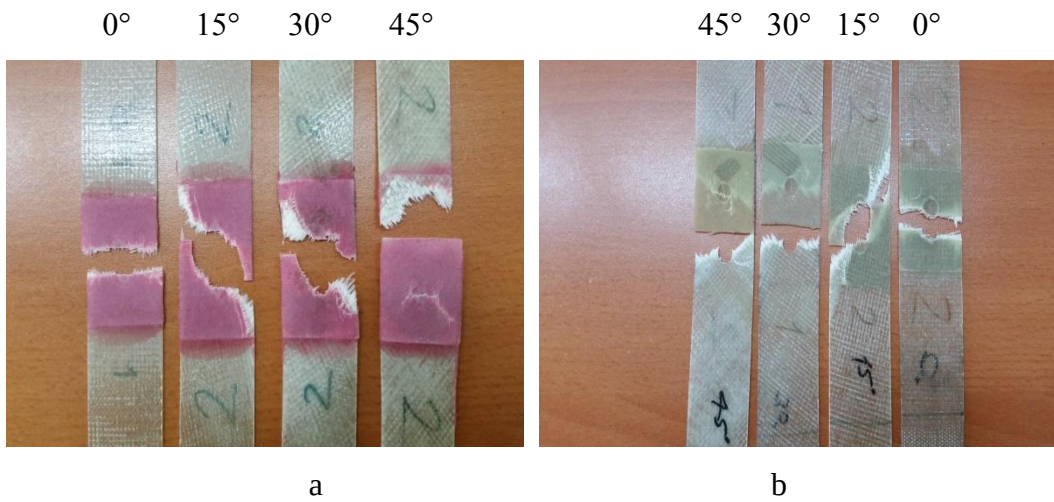
Örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerdeki fiber takviye açısının, yama yapıştırırmalı tamiratlardaki etkisini araştırmak için, 0°, 15°, 30°, 45° açılarda örgülü cam fiber takviyesi yapılan test numuneleri kullanıldı. Geometrik oran olarak da G/D=4 oranı kullanıldı. Bu numunelerin tamiratları, prepreg ve ıslak yapışma yöntemleri ile, yama yapıştırılarak tamir edildi. Bu numuneler, çekme testine tabi tutularak, elde edilen maksimum hasar yükleri grafiklere döküldü. Böylelikle, hem seçilen tamirat yönteminin, hem de tamiratı yapılan malzemelerdeki fiber takviye açısının tamirata olan etkisi kıyaslanarak belirlenmeye çalışıldı. Bu amaç için hazırlanmış olan test numunelerinden, çekme deneyi ile elde edilen maksimum hasar yüklerini veren grafikler Şekil 7.3 de görülmektedir.

Malzemelerdeki fiber takviye açısının 0°-45° kadar değişimi ile yama yapıştırırmalı tamiratların çekme deneyi ile elde edilen hasar yüklerinin azaldığı, fakat hasar anında % uzamanın arttığı tespit edildi. Aynı zamanda, malzemelerdeki fiber takviye açısının değişimi ile, yama yapıştırırmalı tamiratların çekme yükü altındaki hasar şeklinin de değiştiği gözlemlendi. Farklı fiber takviye açısına sahip olan yama yapıştırırmalı tamiratların çekme yükü altındaki hasar görüntüleri Şekil 7.4' te görülmektedir.



Şekil 7.3. Cam fiber takviyeli, $G/D=4$ olan prepreg ve ıslak yapıştırma yöntemi ile tamir edilen levhalardaki Fiber Takviye Açısı-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik

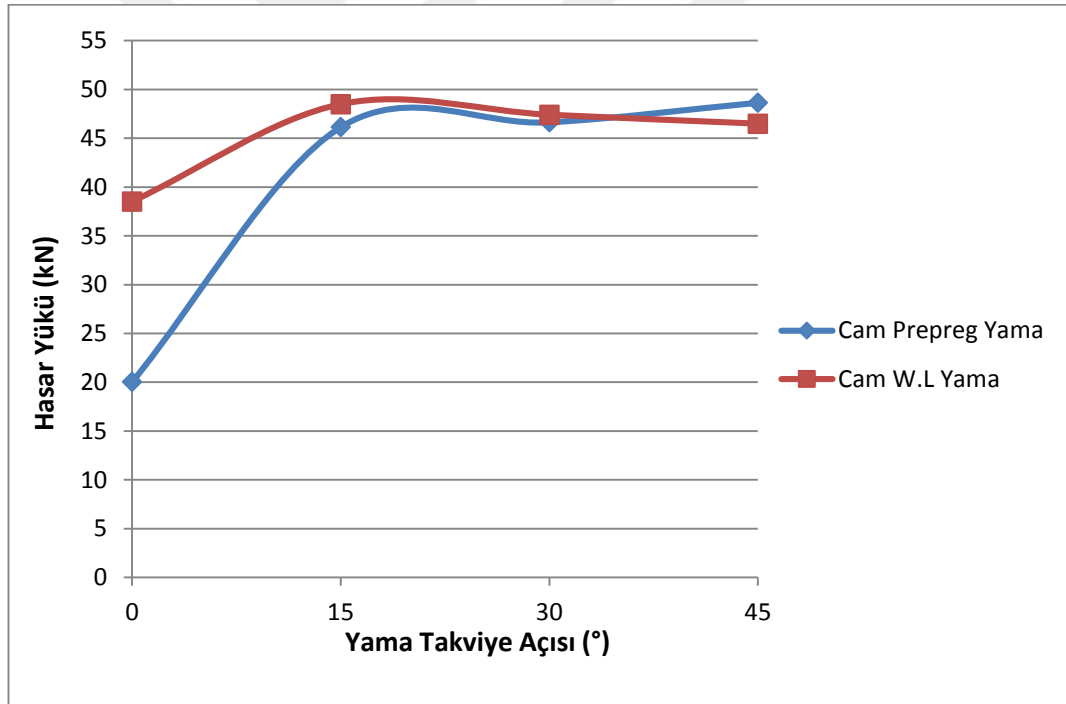
Malzemelerdeki fiber takviye açısının artırılması ile yama yapıştırırmalı tamiratların hasar yüklerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum her iki tamirat yönteminde de açıkça görülmüştür. Ancak, 45° de ıslak yapıştırırmalı tamiratlarda kesme kuvvetinin maksimum olması nedeni ile yama ayrılması daha kolay görüleceğinden, bu yöntem ile yapılmış olan tamiratların hasar yükleri 45° de azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.4. Cam fiber takviyesi yapılan, (a) prepreg ve (b) ıslak yapıştırma yöntemi ile tamir edilen levhalardaki fiber takviye açısına bağlı olarak görülen hasar şekilleri

7.4. Yamadaki Fiber Takviye Açısının Yama Yapıştırırmalı Tamirata Olan Etkisi

Örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlarda kullanılan yamalardaki fiber takviye açısının, tamiratlardaki etkisini araştırmak için, $G/D=4$ geometrik oranlarda hazırlanan örgülü karbon fiber takviyeli malzeme numuneleri kullanıldı. Bu numuneler, 0° , 15° , 30° , 45° açılarda örgülü karbon fiber takviyeli yamalar kullanılarak, prepreg ve ıslak yapışma yöntemleri ile yama yapıştırılarak tamir edildi. Deney numuneleri, çekme testine tabi tutularak, elde edilen hasar yükleri grafiklere döküldü. Böylelikle, hem seçilen tamirat yönteminin, hem de yama yapıştırırmalı tamiratlarda kullanılan yamalardaki fiber takviye açısının tamirata olan etkisi kıyaslanarak belirlenmeye çalışıldı. Hazırlanan deney numunelerinin çekme deneyi ile elde edilen hasar yükleri, grafikler halinde Şekil 7.5’ de verildi.

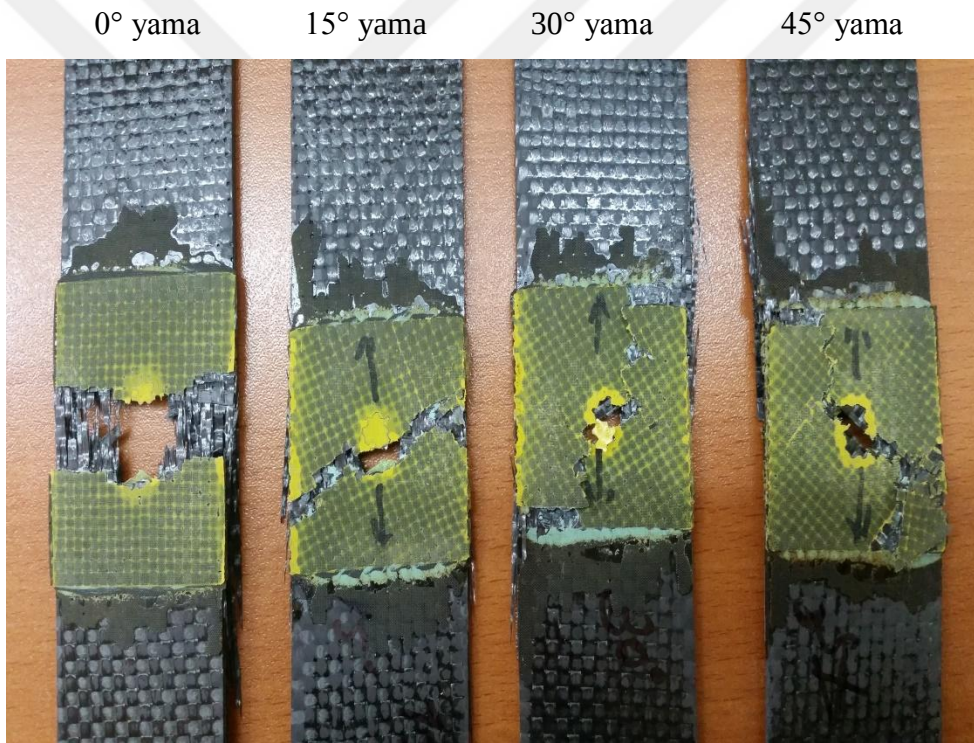


Şekil 7.5. Karbon fiber takviyeli malzemelerde, $G/D=4$, malzeme fiber takviye açısı 0° olan prepreg ve ıslak yapıştırma yöntemi ile tamir edilen yama yapıştırırmalı tamiratlardaki Yama Fiber Takviye Açısı-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik

Grafiklerden de görüleceği üzere, yama yapıştırırmalı tamiratlardaki hasar yüklerini, yamalarda kullanılan örgülü liflerin takviye açısının 0° den 15° ye dereceye kadar artırdığı ve 15° den sonra artmayıp yaklaşık olarak sabit kaldıkları görülmektedir. Bu durum, her iki

yöntem (ıslak yapıştırma-hazır yama kullanma) ile yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlarda da ortaya çıkmıştır.

Yama yapıştırırmalı tamiratlarda kullanılan yamada bulunan örgülü fiberlerin takviye açısını, tamiratların çekme eksenine göre 15° kaydırılarak yama yapıştırılması, tamiratların hasar yüklerinde, ıslak yapıştırma yönteminde % 40, hazır yama-film yapıştırıcı (prepreg) yönteminde ise % 130 kadar olumlu katkı sağladığı görülmektedir. Aynı zamanda, yama yapıştırırmalı tamiratlarda kullanılan yamalardaki fiber takviye açısının değişimi ile, tamiratların hasar şekillerinin de değiştiği gözlemlenmiştir. Farklı yama fiber takviye açılarına sahip olan tamiratlarda, çekme yükü altında görülen hasar görüntüleri, Şekil 7.6 de görülmektedir.

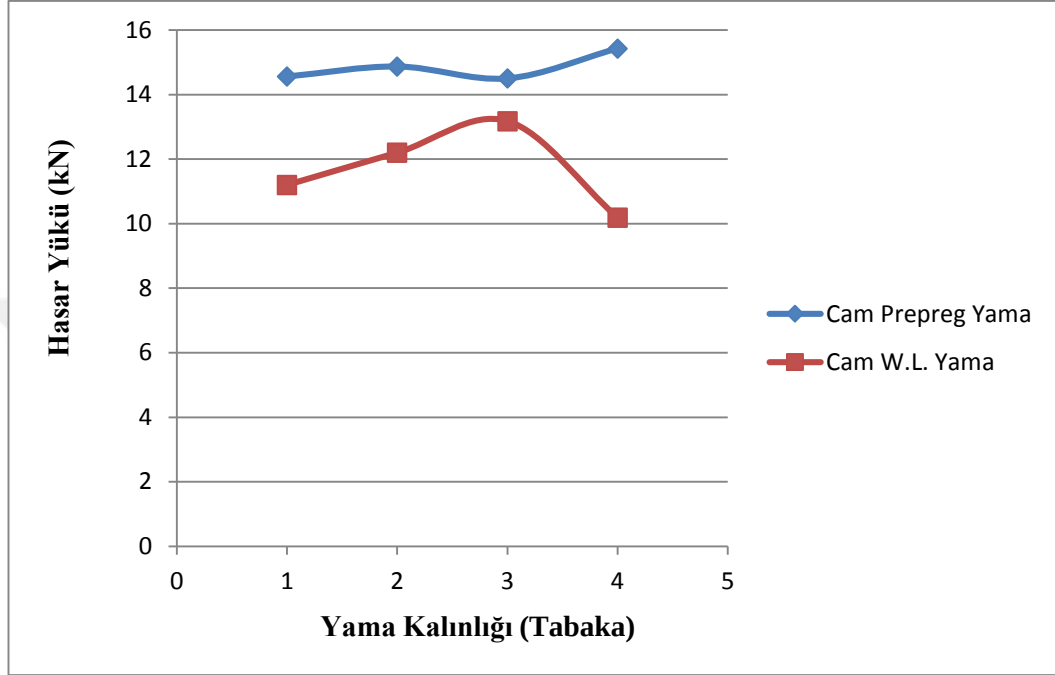


Şekil 7.6. Karbon fiber takviyesi yapılan, $G/D=4$, malzeme fiber takviye açısı 0° olan prepreg yöntemi ile tamir edilen levhalardaki yama fiber takviye açısına bağlı olarak görülen hasar şekilleri

7.5. Yama Yapıştırırmalı Tamiratlardaki Yama Kalınlığının Tamirata Etkisi

Yama kalınlığının, örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlara olan etkisini araştırmak için, Genişlik/Çap=3 ($G/D=3$)

geometrik oranlardaki örgülü cam fiber takviyeli deney test numuneleri kullanıldı. Hasara uğratılmış olan bu deney test numunelerinin tamiratlarında, prepreg ve ıslak yapışma yöntemleri için, sırasıyla 1, 2, 3 ve 4 adet tabaka yama kullanıldı. Bu tamiratların maksimum hasar yükleri, çekme testi ile belirlenerek Şekil 7.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.7. Cam fiber takviyesi yapılan malzemelerde, $G/D=3$, fiber takviye açısı 0° olan prepreg ve ıslak yapıştırma yöntemi ile yapılan yama yapıştırmalı tamiratlarda Yama Kalınlığı-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik

Yama yapıştırmalı tamiratlarda, yama kalınlığının artmasının tamiratın hasar yükünü çok önemli derecede artırmadığı gözlemlendi. Yama kalınlığının artırılması, yapılan yama yapıştırmalı tamiratın sadece esnemeye karşı direncini artırdığı ve daha rijit bir malzeme olmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Eğer bu özelliklerin önemli olmadığı tamiratlar yapılacak ise, yama kalınlığının fazla artırılmaması gerekmektedir. Çünkü, yama kalınlığını artırıldığında maliyetlerin ve sistemin ağırlığının artmasına yol açılmaktadır. Bu durum, özellikle hava araçlarının tamiratlarında çok daha önemli bir problem oluşturur.

Şekil 7.7’ den de görüleceği gibi, yama kalınlığının artırılması, ıslak yapıştırmalı yamalı tamiratlarda hasar yüküne etkisi, hazır yapıştırmalı yama tamiratlarından daha fazla etkili olduğu belirlenmiştir. Bu durum, yaklaşık olarak 3 tabaka yama kullanımına kadar açıkça ortaya çıkmaktadır. Ancak, üç tabaka yama kullanımından sonra, tamiratlarda

kullanılan yama oldukça kırılgan bir yapıya dönüşmektedir. Çekme yüküne maruz bırakıldığında ise, tamiratı yapılan malzeme ile beraber yük taşımayı bırakacaktır. Böylece, en alt tabakadaki yapıştırıcı bölgesinde malzemeden ayrılarak tamiratlar hasara uğrayacaktır. Buna karşılık, hazır yama (prepreg) kullanılarak yapılan tamiratların numune sonuçlarında, bu olay bu kadar belirgin görülmemekle birlikte, tamiratlardaki yama kalınlığının artırılması ile hasar yükü de artmaktadır.

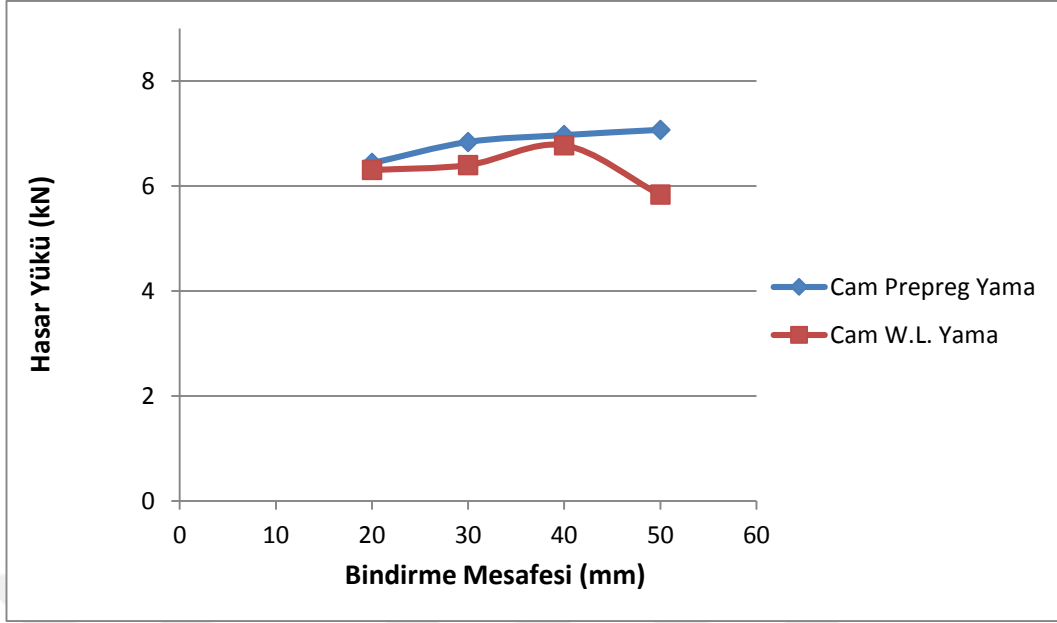
Aynı özellikli tabakalı kompozit malzemelerde hazır yama (prepreg) ve yapıştırıcı kullanılarak yapılan yama yapıştırırmalı tamiratların hasar yükleri, ıslak yama yapıştırırmalı tamiratların hasar yüklerinden yaklaşık olarak %25 daha büyük olduğu Şekil 7.7' den de görülmektedir.

7.6. Yama Bindirme Mesafesinin Yama Yapıştırırmalı Tamiratlardaki Etkisi

Yama bindirme mesafesi (yapışma uzunluğu), yama yapışmalı tamiratların kalitesini etkileyen en önemli geometrik parametrelerden birisidir. Yama bindirme mesafesinin, örgülü fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlara olan etkisini araştırmak için, $G/D=2$ geometrik oranlarda hazırlanan örgülü cam fiber takviyeli test numuneleri kullanıldı. Bu numuneler, hem prepreg hem de, ıslak yapışma yöntemleri ile tamir edilen numunelerdir.

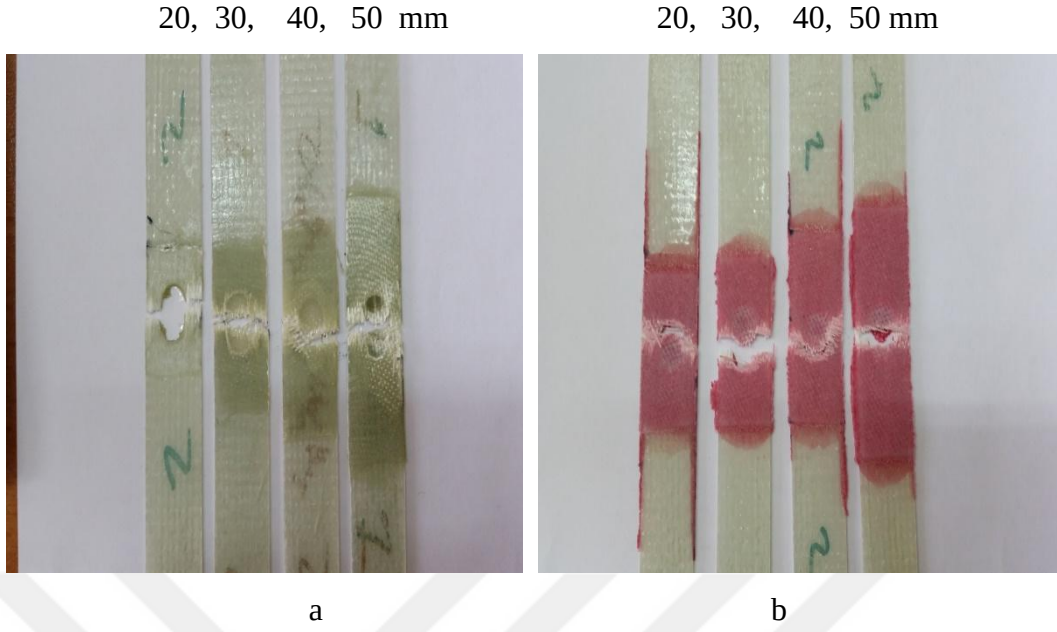
Hasara uğratılmış numunelerin tamiratları için, sırası ile 20, 30, 40, 50 mm lik yama yapışma mesafeleri kullanıldı ve farklı geometrik özelliklerdeki yama yapıştırırmalı tamiratlar yapıldı. Bu numunelerin çekme testlerinden elde edilen maksimum hasar yükleri, Şekil 7.8 de verilen grafiklerde görülmektedir. Böylece, bindirme mesafesinin tamirata olan etkisinin daha net ortaya çıktığı gözlenmiştir.

Yama yapıştırırmalı tamiratlarda yama bindirme mesafesinin artırılması, yama ile malzeme arasındaki yapışma alanını büyüttüğünden dolayı yama ve malzeme arasındaki bağlantı kuvvetini artıracaktır. Böylece, tamiratların maksimum hasar yüklerine olumlu bir katkı sağlayacaktır. Ancak, özellikle ıslak yama yapıştırırmalı tamiratlarda belli bir yama bindirme mesafesi değerinden (40 mm) sonra, tamiratta kullanılan yamanın çekme yükü altında malzemeden soyulması ile tamiratın hasar yükü de ani olarak düşmektedir. Fakat, hazır yama ve film tipi yapıştırıcılar kullanılarak yapılan tamiratlarda, 50 mm lik yama bindirme mesafesine kadar bu duruma rastlanmamıştır.



Şekil 7.8. Cam fiber takviyesi yapılan malzemelerde, $G/D=2$, malzeme fiber takviye açısı 0° olan prepreg ve ıslak yapıştırma yöntemi ile yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlarda Bindirme Mesafesi-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik

Bununla birlikte, yamanın malzemeden soyulması görülmediği gibi, tüm yamalar hasar bölgesinden yama ile birlikte kopmuştur. Bu durumun, tamiratların hasar yüklerine olumlu bir şekilde yansımış olduğu Şekil 7.8’ de görülmektedir. Ayrıca, bu işlem için kullanılmış olan levhaların hasar şekilleri Şekil 7.9’ da görülmektedir.

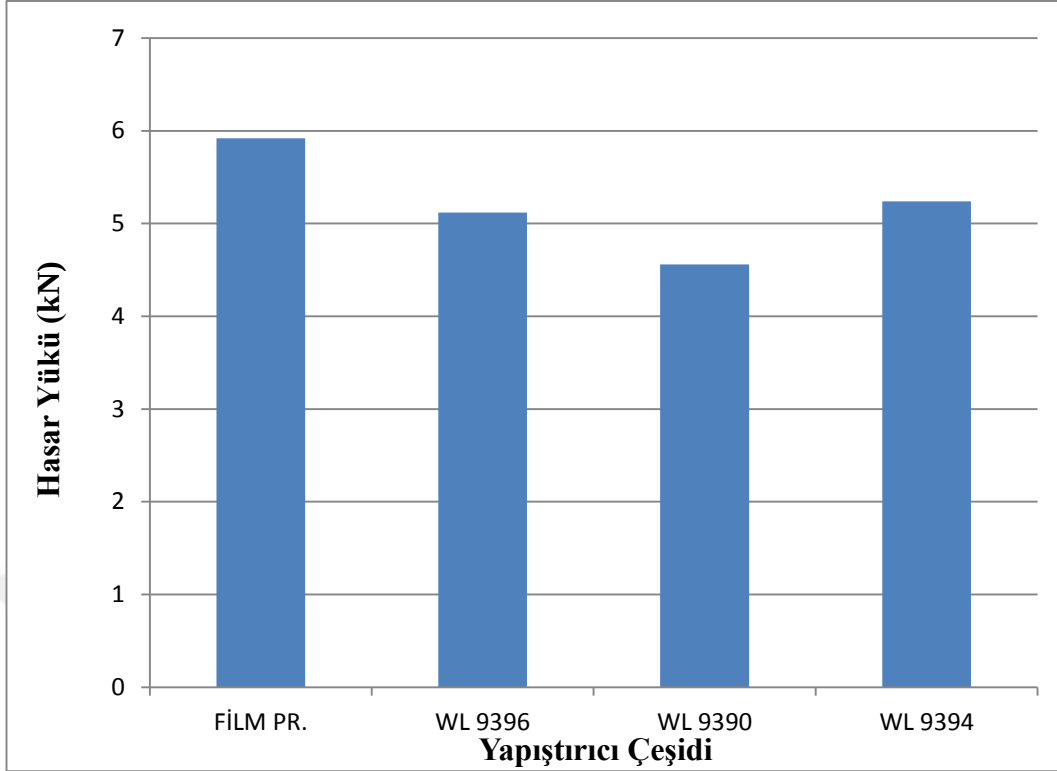


Şekil 7.9. Cam fiber takviyesi yapılan, (a) ıslak yapıştırma ve (b) prepreg yöntemi ile tamir edilen levhalardaki bindirme mesafesine bağlı olarak görülen hasar şekilleri

7.7. Tamiratlardaki Yapıştırıcı Çeşidinin Tamirat Üzerindeki Etkisi

Yapıştırıcı çeşidinin, yama yapıştırmalı tamirlara olan etkisini araştırmak için, $G/D=2$ geometrik oranlardaki örgülü cam fiber takviyeli deney test numuneleri kullanıldı. Bu test numuneleri, hem prepreg hem de ıslak yapıştırma yöntemleri ile dört adet farklı yapıştırıcı kullanılarak tamir edildi. Bu farklı özellikli yama yapıştırmalı tamiratların, çekme testi ile belirlenen maksimum hasar yükleri, Şekil 7.9’ de verilen grafikte görülmektedir.

Yama yapıştırmalı tamiratlarda kullanılan yapıştırıcı çeşidi çok önemli olduğundan, bu durumun da belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 7.9’ de görüldüğü gibi, örgülü cam fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde, aynı parametrelere sahip olan test numunelerinin tamiratlarında film tipi yapıştırıcı kullanıldığında, maksimum hasar yükü elde edilmiştir. Ancak bu tip yapıştırıcıların saklama koşulları zor ve maliyetli olduklarından, bu tip yama yapıştırmalı tamiratların çoğunda ıslak yapıştırıcı kullanılmaktadır. Islak yapışma yönteminde kullanılan bu tip ıslak yapıştırıcılarda ise, minimum hasar yükleri Henkel EA9390 numaralı yapıştırıcı kullanımında elde edildiği görülmektedir.

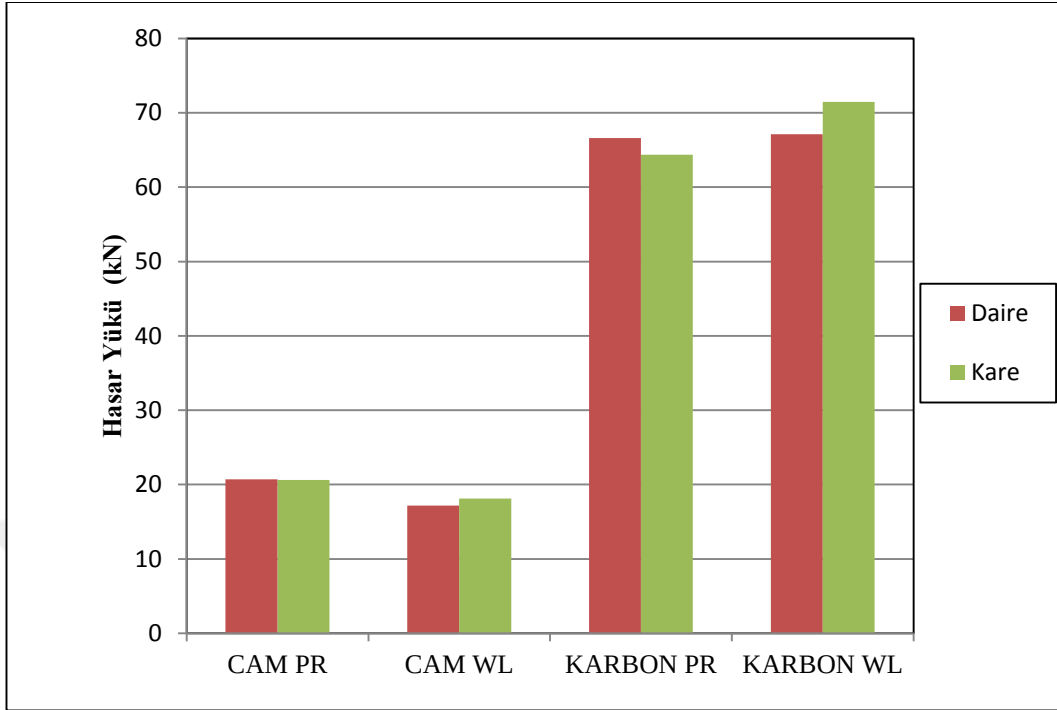


Şekil 7.10. $G/D=2$, malzeme fiber takviye açısı 0° olan yama yapıştırırmalı tamiratlarda kullanılan yapıştırıcı çeşidinin tamiratların hasar yüklerine etkisini gösteren grafik

7.8. Yama Şeklinin Tamirat üzerindeki Etkisi

Yama şeklinin, tamirlara olan etkisini araştırmak için, $G/D=5$ geometrik oranlarda hazırlanan, örgülü cam ve karbon fiber takviyesi yapılan test numuneleri kullanıldı. Bu test numuneleri, hem prepreg, hem de ıslak yapıştırma yöntemleri ile daire ve kare şeklindeki farklı yamalar kullanılarak tamir edildi. Bu farklı yama şekilli ve tamirat yöntemli test numunelerinin, çekme testi ile belirlenen maksimum hasar yükleri, Şekil 7.10 de verilen grafikte görülmektedir.

Yama yapıştırırmalı tamiratlarda kullanılan yama şeklinin seçimi, özellikle ana malzemede görülen hasarın şekline göre değişmektedir. Ancak, bu çalışmada, tüm deney test numuneleri için dairesel kesitli hasar oluşturulduğundan, numunelerdeki hasarın şekli değiştirilmeyip sadece yama şeklini değiştirilmiştir. Böylece, yamalardaki şekil değişikliğinin, değişik yama yapıştırırmalı tamirat teknikleri ile (prepreg ve ıslak yapışma) yapılan yama yapıştırırmalı tamiratların çekme yükü altındaki maksimum hasar yüklerine etkisi belirlenmiştir.



Şekil 7.11. Cam fiber takviyeli malzemelerde, $G/D=5$, malzeme fiber takviye açısı 0° olan prepreg ve ıslak yapıştırma yöntemi ile yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlarda Yama Şekli-Hasar Yüğü değişimini gösteren grafik

Örgülü cam fiber takviye edilmiş malzemelerde yapılan yama yapıştırırmalı tamiratlarının yama şeklinin değişimi, yani kare veya daire olması, tamiratların çekme testi ile elde edilen maksimum hasar yükü değişimine fazla etkisinin olmadığı Şekil 7.10’ da görülmektedir. Ancak, karbon takviye edilmiş malzemelerde yapılan tamiratlarda elde edilen maksimum hasar yüklerinde, bu değişim belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Bu malzemelerde hazır yama-film kullanılarak (prepreg) yapılan tamiratlarda, daire şeklinde kullanılan yama tamiratlarının maksimum hasar yüklerini artırırken, ıslak yapışma tekniği ile yapılan tamiratlarda ise kare şeklinde kullanılan yamanın, tamiratların maksimum hasar yüklerini artırdığı görülmektedir.

8. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Tabakalı kompozit malzemelerde yapılan yama yapıştırırmalı tamiratların kalitesi, genel olarak, tamiratı yapılan malzeme çeşidine, tamiratta kullanılan yama çeşidine, yama geometrisine, yapıştırıcı çeşidine, yapıştırıcı kalınlığına, yapışma alanının büyüklüğüne ve yapıştırılan yüzeylerin ön işlemlerine bağlıdır. Tüm bu parametrelerde optimum seçim yapıldığında, yapılacak tamirat işlemleri de bu derece sağlıklı ve tamiratı yapılmış olan malzemelerin de her türlü çevre şartlarındaki kullanımları o derece güvenli olmaktadır.

Bu çalışmada, tabakalı kompozit malzemelerdeki dairesel şekilli hasarların yama yapıştırılarak yapılan tamirleri etkileyen faktörler deneysel yöntemlerle araştırıldı. Deneysel çalışmada örgülü cam ve karbon fiber takviye edilmiş farklı kompozit malzemeler, yamalar, yapıştırıcılar ve farklı tamirat yöntemleri kullanılarak tabakalı kompozit malzemelerde yapılan, yama yapıştırırmalı tamiratların kalitesini belirleyen faktörler araştırıldı. Bu amaç için, yukarıda belirtilen parametrelerde değişik özelliklere sahip test numunelerinin tamiratları yapılarak, bu test numunelerinin hasar yükleri, çekme deneyi ile tespit edildi.

8.1. Genel Sonuçlar

Değişik parametrelerde tamiratı yapılan numunelere uygulanan çekme testi ile aşağıda belirtilen sonuçlar elde edildi.

- Yama yapıştırırmalı tamiratlardaki G/D oranının artırılması, aynı zamanda yamanın yapışma alanını artırdığından, tamiratların maksimum hasar yüklerini de artırmış olduğu gözlemlendi. Bu tamiratlardaki G/D oranının değişimi, cam fiber takviyesi yapılan malzeme tamiratların hasar yüklerinde, karbon fiber takviyesi yapılan malzemelere göre daha etkilidir. Yama yapıştırırmalı tamiratlardaki G/D oranının artırılması, aynı zamanda tamiratı yapılan malzemenin ağırlığını da artıracığından, bu oranın optimum değerde seçilmesinin uygun olduğu tespit edildi.

- Yama yapıştırırmalı bağlantılarda kullanılan yapıştırıcı kalınlığının, belli bir kalınlığa kadar kullanıldığında, tamiratların hasar yüklerine olumlu yönde etki ettiği gözlemlendi. Bu çalışmada, tamiratlardaki maksimum hasar yükünün üç tabaka film tipi yapıştırıcı kullanıldığında meydana gelmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının da 0.3 mm olarak seçilmiştir.

Bu değerden daha kalın yapıştırıcı tabakası kullanılarak yapılan yama yapıştırma tamiratların, maksimum hasar yüklerinin çekme yükü altında giderek azaldığı görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak yama yapıştırma tamiratlarında, çekme yükü uygulanması ile adhezyon hasarından kaynaklandığı kanaatine varılmıştır. Yapıştırıcı kalınlığının artması sonucunda kohezyon hasarının oluşması ile tamiratların hasar yüklerinin azaldığı görülmüştür.

- Malzemelerdeki fiber takviye açısının 0° - 45° kadar değişimi ile hem prepreg yöntemi hem de ıslak yapıştırma yöntemi ile yapılan yama yapıştırma tamiratların çekme deneyi sonucunda elde edilen hasar yüklerinin azaldıkları tespit edildi. Aynı zamanda, malzemelerdeki fiber takviye açısının değişimi ile tamiratlarda hasar anında % uzamanın arttığı ve yamaların kopma şeklinin de değiştiği görüldü.

- Yama fiber takviye açısının 45° olduğu durumlardaki ıslak yapıştırma tamiratlarda kesme kuvvetinin maksimum olması nedeni ile yama ayrılması daha kolay olmaktadır. Islak yama kullanılarak yapılmış olan tamiratların hasar yüklerinin 45° de daha çok azaldığı görülmüştür. Bu tip konstrüksiyonlarda, 45° li fiber takviyeli yama yapıştırma tamiratların yapılması mutlaka gerekli ise, prepreg tamirat yöntemi tercih edilmesi daha uygun olacaktır.

- Yama yapıştırma tamiratlarda, hem ıslak yapıştırma yönteminde hem de prepreg yöntemi ile yapılan tamiratlarda kullanılan yamalardaki fiber takviye açısının 0° den 15° 'ye kadar artırıldığında, tamiratların hasar yüklerinin de buna bağlı olarak arttığı, 15° den sonra ise, hasar yüklerinin artmayıp yaklaşık olarak sabit kaldıkları gözlemlendi. Buna bağlı olarak, çekme yükünün uygulanması ile tamiratlarda görülen hasar şekillerinin de farklı oldukları tespit edildi. Bu çalışmada, yama fiber takviye açısının 15° olarak seçilmesinin, yama yapıştırma tamiratların performanslarının artırılması için, en uygun açı değeri olduğu tespit edilmiştir.

- Yama yapıştırma tamiratlarda kullanılan yama kalınlığının fazla artırılması, tamiratın hasar yükünü çok önemli derecede artırmadığı gözlemlendi. Yama kalınlığının artırılması, yapılan yama yapıştırma tamiratın sadece esnemeye karşı mukavemetini artırdığı, bununla birlikte daha rijit bir bağlantı olmasına sebep olmaktadır.

- Yama kalınlığının 3 tabakaya kadar artırılması, ıslak yapıştırma yama tamiratlarda hasar yüküne etkisi, hazır yama yapıştırma tamiratlardan daha fazla etkilidir. Ancak, ıslak yapıştırma yama tamiratlarında, üç tabakadan fazla yama kullanıldığında, bu yamalar oldukça kırılgan bir yapıya dönüşmekte ve çekme yüküne maruz bırakıldığında ise, belli

bir değerden sonra ana malzeme ile birlikte yük taşımayı bırakarak, yamanın en alt tabakasındaki yapıştırıcı bölgesinde malzemeden ayrıldığı görülmektedir. Çekme yüküne maruz kalan, kalın yamalı tamiratlarda, en alt yama katmanının yapışma bölgesinde, eğilme momentinin daha fazla olması nedeniyle hasara uğramaktadır.

- Tamiratlarda yama bindirme mesafesinin artırılması, yama ile malzeme arasındaki yapışma alanını artırılmasına sebep olur. Bu işlem, yama ile malzeme arasındaki bağlantı kuvvetini artırarak, tamiratların maksimum hasar yüklerine olumlu bir katkısı olmaktadır. Artan bu bindirme mesafesi, yapışma bölgesinde meydana gelen kayma gerilmelerini azaltarak tamiratın hasar yüküne olumlu yönde katkı sağladığı gözlenmiştir.

- Örgülü cam fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerde, aynı parametrelere sahip olan test numunelerinin tamiratlarında, hazır film tipi yapıştırıcı (prepreg tamirat yöntemi ile) kullanıldığında, çekme yükü altında diğer yapıştırıcılara göre maksimum hasar yükünün elde edildiği tespit edildi.

- Örgülü cam fiber takviyeli malzemelerdeki yama yapıştırırmalı tamiratlarında, yama şeklinin değişimi (kare veya daire olması), tamiratların çekme testi ile elde edilen hasar yüküne önemli bir etkisi olmamaktadır. Ancak, karbon fiber takviyeli malzemelerdeki yama yapıştırırmalı tamiratlardaki hasar yüklerine etkisi belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Bu malzemelerde, hazır yama-film kullanılarak (prepreg) yapılan tamiratlarda, daire şeklinde kullanılan yama tamiratların hasar yüklerini artırdığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, ıslak yapışma tekniği ile yapılan tamiratlarda kare şeklinde kullanılan yamanın, tamiratların hasar yüklerini artırdığı tespit edilmiştir.

8.2. Öneriler

Bu çalışmada, cam ve karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit malzemelerdeki hasarların, hem ıslak yapıştırma yöntemi ile, hem de prepreg yöntemi ile tamir edilen yama yapıştırırmalı tamiratları etkileyen şartlar belirlendi. Fakat, bu tamiratlardaki sıcaklığın ve nemin etkisi çalışılmadı. Eğer, sıcaklık ve nem kontrollü bir ortamda bu tamiratlar yapılırsa, bu parametrelerin yama yapıştırırmalı tamirata olan etkilerinin sonuçları da belirlenmiş olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Aktaş A., 2005, Bearing strength of carbon epoxy laminates under static and dynamic loading, Composite Structures, vol: 67, PP:485-489.
- [2] Hull D., 1987, An introduction to compozit materials, Cambridge University press Newyork, PP: 103-142.
- [3] Okutan B., 2001, Stress and failure analysis of laminated composite pinned joints, DEÜ Fen Bil. Ens. İzmir.
- [4] Kinloch, A.J., 1987, Adhesion and adhesives science and technology, Chapman&Hall, ISBN 0-412-27440-X, p.441, London.
- [5] Xi Liu, Guoping W., 2007 Progressive failure analysis of bonded composite repairs, Composite Structures, Vol 81, pp 331-340.
- [6] P. Papanikos, K.I. Tserpes, Sp. Pantelakis, 2007, Initiation and progression of composite patch depending in adhesively repaired cracked metallic sheets, Composite Structures, Vol 81, pp. 303–311.
- [7] Hart-Smith, L.J., 1973, Adhesive-bonded single-lap joints, CR-112235, Nasa Langley Resesarch Center,.
- [8] Loctite Worldwide Design Handbook, 1988.
- [9] Volkersen, O., 1938, Die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten, Luftfahrtforschung, Vol 15, 41-47.
- [10] Wah, T., 1973, Stress Distribution in a Bonded Anisotropic Lap Joint, Transactins of ASME, Series H, J. Of Engineering Materials and Technology, Vol 95, 174-181.
- [11] Adams, R.D., 1989, Strength Predictions for Lap-Joints, Especially with Composite Adherents, Journal of Adhesion, vol 30, 219-242.
- [12] Mazumdar, S.K. and Mallick, P.K., 1998, Static and Fatigue Behaviour of Adhesive Joints in SMC-SMC Composites, Polymer Composites, vol, 19, 139-146.
- [13] Xiaoquan C., Baig Y., Renwei H., Yujian G. And Jikui Z., 2013, Study of Tensile Failure Mechanisms in Scarf Repaired CFRP Laminates, İnternational Journal of Adhesion & Adhesives, vol 41, 177-185.
- [14] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2000, Repair of Composite Laminates, DOT/FAA/AR-00/46, Office of Aviation Research Washington, D.C. 20591, Final Report.

- [15] Breitzman T.D., Larve E.V., Cook B.M., Schoeppner G.A., and Lipton R.P., 2009, Optimization of a Composite Scarf Repair Patch Under Tensile Loading, *Composites: Part A*, Vol. 40, 1921-1930.
- [16] Tse P.C., Lau K.J. and Wong W.H., 2002, Stress and Failure Analysis of Woven Composite Plates with Adhesive Path-Reinforced Circular Hole, *Composites: Part B*, Vol. 33, 57-65.
- [17] Jones R., Chiu W.K. and Smith R., 1995, Airworthiness of Composite Repairs: Failure Mechanisms, *Engineering Failure Analysis*, Vol 2, 117-128.
- [18] Cheng P., Gong X.J., Hearn D. And Aivazzadeh S., 2011, Tensile Behaviour of Patch-Repaired CFRP Laminates, *Composite Structures*, Vol. 93, 582-589.
- [19] Her S.C., 1999, Stress Analysis of Adhesively-Bonded Lap Joints, *Composite Structures*, Vol. 47, 673-678.
- [20] Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F. and Domingues J.J.M.S., 2009, Numerical Prediction on the tensile Residual Strength of Repaired CFRP under Different Geometric Changes, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 29, 195-205.
- [21] Madani K., Touzain S., Feugas X., Cohendouz S. and Ratwani M., 2010, Experimental and Numerical Study of Repair Techniques for Panels with geometrical discontinuities, *Computational Materials Science*, Vol. 48, 83-93.
- [22] Goyal V.K., Johnson E.R. and Goyal V.K., 2008, Predictive Strength-Fracture Model for Composite Bonded Joints, *Composite Structures*, Vol. 82, 434-446.
- [23] Davis M. and Bond D., 1999, Principles and Practises of Adhesive Bonded Structural Joints and Repairs, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 19, 91-105.
- [24] Chataigner S., Caron J.F., Diaz A.D., Aubagnac C. And Benzarti K., 2010, Non-linear Failure Criteria for a Double Lap Bonded Joint, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 30, 10-20.
- [25] Caminero M.A., Pavlopoulou S., Pedrosa M.L., Nicolaisson B.G., Pinna C. And Soutis C., 2013, Analysis of Adhesively Bonded Repairs in Composites: Damage Detection and Prognosis, *Composite Structures*, vol. 95, 500-517.
- [26] Wisnom M.R., 1999, Size Effects in the Testing of Fibre-Composite Materials, *Composite Structures and Tecnology*, Vol. 59, 1937-1957.

- [27] Whittingham B., Baker A.A., Harman A. And Bitton D., 2009, Micrographic Studies on Adhesively Bonded Scarf Repairs to Thick Composite Aircraft Structure, *Composites: Part A*, Vol. 40, 1419-1432.
- [28] Rider A.N., Wang C.H. and Chang P., 2010, Bonded Repairs for Carbon/BMI Composite at High Operating Temperatures, *Composites: Part A*, Vol. 41, 902-912.
- [29] Li D., Qing G. And Liu Y., 2011, A three-dimensional Semi-Analytical model for the Composite Laminated Plates with a Stapped Lap Repair, *Composite Structures*, Vol. 93, 1673-1682.
- [30] Ramji M., Srilakshmi R. And Prakash M.B., 2013, Towards Optimization of Patch Shape on the Performance of Bonded Composite Repair Using FEM, *Composites: Part B*, Vol. 45, 710-720.
- [31] Avdelidis N.P., Moropoulou A., and Marioli Riga Z.P., 2003, The Technology of Composite Patches and Their Structural Reliability Inspection Using Infrared Imaging, *Aerospace Sciences*, Vol. 39, 317-328.
- [32] Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Ramantani D.A., Morais J.J.L and Domingues J.J.M.S., 2010, Buckling Strength of Adhesively-bonded Single and Double-Strap Repairs on Carbon –Epoxy Structures, *Composites Science and Technology*, Vol. 70, 371-379.
- [33] Ahn J.S. and Basu P.K., 2011, Locally Refined p-FEM Modeling of Patch Repaired Plates, *Composite Structures*, Vol. 93, 1704-1716.
- [34] Kim H.S., Cho M., Lee J., Deheeger A., Grediac M. and Mathias J.D., 2010, Three Dimensional Stress Analysis of a Composite Patch Using Stress Functions, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 52, 1646-1659.
- [35] Rachid M., Serier B., Bouiadjra B.B., Belhouari M., 2012, Numerical Analysis of the Patch Shape Effects on the Performances of Bonded Composite Repair in Aircraft Structures, *Composites: Part B*, Vol. 43, 391-397.
- [36] Albedah A., Bouiadjra B.B., Mhamdia R., Benyahia F., Es-Saheb M., 2011, Comparison between Double and Single Sided Bonded Composite Repair with Circular Shape, *Materials and Design*, Vol. 32, 996-1000.
- [37] Hu F.Z. and Soutis C., 2000, Strength Prediction of Patch-Repaired CFRP Laminates Loaded in Compression, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 1103-1114.
- [38] Madani K., Touzain S., Feaugas X., Benguediab M., Ratwani M., 2008, Numerical Analysis for the Determination of the Stress Intensity Factors and Crack Opening

Displacements in Plates Repaired with Single and Double Composite patches, Computational Materials Science, Vol. 42, 385-393.

- [39] Apalak Z.G., Apalak M.K. and Genc M.S., 2006, Progressive Damage Modeling of an Adhesively Bonded Unidirectional Composite Single-Lap Joint in Tension at the Mesoscale Level, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 19, 671.
- [40] Ouinas D., Bouiadjra B.B., Serier B. and SaidBekkouche M., 2007, Comparison of the effectiveness of Boron/epoxy and Graphite/epoxy Patches for Repaired Cracks Emanating from a Semicircular Notch Edge, Composite Structures, Vol. 80, 514-522.
- [41] Taib A.A., Boukhili R., Achiou S., Gordon S. and Boukehili H., 2006, Bonded Joints with Composite Adherends. Part I. Effect of Specimen Configuration, Adhesive Thickness, Spew Fillet and Adherent Stiffness on Fracture, International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 26, 226-236.
- [42] Aydın M.D., Temiz Ş., ve Özel A., 2007, Yapıştırma bağlantılarının Dayanımı Üzerine Kırılma Basıncının Etkisi, 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, İstanbul/Türkiye.
- [43] Baker A.A., 2011, A Proposed Approach for Certification of Bonded Composite Repairs to Flight-Critical Airframe Structure, Applied Composite Materials, Vol. 18, 337-369.
- [44] Daverschot D.R., Vlot A. And Woerden H.J.M., 2002, Thermal Residual Stresses in Bonded Repairs, Applied Composite Materials, Vol. 9, 179-197.
- [45] Papanikos P., Tserpes K.I., Labeas G. And Pantelakis Sp., 2005, Progressive Damage Modelling of Bonded Composite Repairs, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 43, 189-198.
- [46] Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., and Domingues J.J.M.S., 2005, Modelling Single and Double-Lap Repairs on Composite Materials, Composite Science and Technology, Vol. 65, 1948-1958.
- [47] Sayman O., 2011, Elasto-plastic Stress Analysis in an Adhesively Bonded Single-lap Joint, Composites: Part B, Vol., 10.1016/j.compositesb.2011.08.006.
- [48] Soutis C., Duan D.M. and Goutas P., 1999, Compressive Behaviour of CFRP Laminates Repaired with Adhesively Bonded External Patches, Composite Structures, vol. 45, 289-301.

- [49] Tsamasphyros G.J., Furnarakis N.K. Kanderakis G.N. and Marioli-riga Z.P., 2003, Computational Analysis and Optimization for Smart Patching Repaires, Applied Composite Materials, Vol. 10, 141-148.
- [50] Temiz Ş., Aydın M.D., Alar G. Ve Özel A., 2005, Nemli Ortamlara Maruz Kalan Yapısal Yapıştırıcıların Dayanımı, TMMOB Makine Müh. Odası, IX Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu, 27-28 Mayıs,149.
- [51] Hart-Smith, L.J., 1982, Design methodology for bonded-bolted composite joints Technical Report AFWAL-TR-81-3154, Douglas Aircraft Company.
- [52] Hart-Smith, L.J., 1985, Bonded-bolted composite joints, J. Aircraft, vol 22(11), 993-1000.
- [53] Turan K., 2016, Kompozit malzemelerde yapışma bağlantılarının mukavemeti üzerine yama fiber takviye açısı etkisi (Araştırma makalesi), Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, cilt 7, sayı:1, 129-138.
- [54] Kaya A.,1991, Investigation of stres distributions in adhesive-bonded lap joint, MS. Degree Thesis, Dokuz Eylul University, Institute of Science and Technology,
- [55] Aydın, M.D., 2003, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi, Doktora tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 179s.
- [56] Solmaz M.Y., 2008, Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 150 s.
- [57] Çalık A., 2008, Yapıştırıcılar ve Köşeleri Yuvarlatılmış Basamaklı Bindirmelerin Yapıştırıcı Bağlantılarda Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, 91 s.
- [58] Polat Z., 2008, Hasarlı Kompozit Plakaların Tamir Yoluyla Mukavemetlerinin Arttırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 62 s.
- [59] Aktaş R. ve Otobatzmaz I., 1995, Kompozit Malzemeler ve Havacılık Sanayindeki Uygulamaları, Seminer Notları, Ankara.
- [60] Morrissey M.A. and Johnson W.R., 1985, Douglas Aircraft Company Design Handbook, Adhesive and Cements, California.
- [61] CIBA-GEIGY, 1993, Ciba composites: Redux Bonding Technology, Duxford-Cambridge, Pub. No. RGU 201A.

- [62] Turgut, A., Gür, M., ve Arslan, N., 1995, Birleştirmelerde kullanılan yapıştırıcı malzemelerin polimerleştirme sıcaklığının ve süresinin çekme mukavemeti ve elastisite modülüne etkilerinin araştırılması, Uluslararası Havacılık ve İleri Teknolojiler Sempozyumu, İ.T.Ü., İstanbul.
- [63] Taib A.A., Boukhili R., Achion S. and Boukehili A., 2006, Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints, International Journal of Adhesion & Adhesives, vol 26, 237- 248.
- [64] Adams, R.D. and Wake, W.C., 1984, Structural Adhesive Joint in Engineering, Elsevier Science Publisher, London.
- [65] Temiz, S., 2003, Study of the Effect of Environmental Factors on Mechanical Properties of Adhesively Bonded Joints, Ph. D. Thesis, Ataturk University, Erzurum, Turkey.
- [66] Kayacan, R.,1988, Yapıştırma ve metal bağlantılar için yapıştırıcı kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 240s.
- [67] Sika Teknoloji Klavuzu, 2008.
- [68] Apalak M.K., 1998, Yapıştırıcı ile Metalleri Birleştirme Tekniği, Makine Bülteni, vol 7, no 11, sayfa 29-31.
- [69] Rende H., 1996, Makine Elemanları Cilt 1, Seç Yayın Dağıtım, İstanbul.
- [70] Mallick P.K., 1977, Composites Engineering Handbook Einband 1. Marcel Dekker, Inc.
- [71] Jones R.M., 1999, Mechanics Of Composite Materials, Second Edition, Taylor & Francis Publishing.
- [72] Sayman O. ve Aksoy R., 1982, Kompozit Malzemeler, Ege Üniversitesi Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir.
- [73] Petrie E.M., 1975, Handbook of Plastics and Elastomers, McGraw-Hill, New York.
- [74] Turgut A., and Sancaktar E., (1991) The Effects of Cure and Loading Conditions on Fiber matrix Adhesion, The Adhesion Society, v.41,24-26
- [75] Hull ,D, 1981, An introduction of composite materials, Applied science publishers Introduction of Composite Materials, Cambridge Univ. Pres Inc., 246 s.
- [76] Gür, M., Turgut, A., ve Sancaktar, E., 1995, The effect of fiber type on the level of stress concentration created in filleted composite rectangular bars in bending, International mechanical Engineering Congress and Exposition, ASME, 49-55.
- [77] Hoa, S., V., 2003, Composite materials design and applications, CRC Pres, 233 s.

ÖZGEÇMİŞ

Şükrü ÇETİNKAYA, 1973 yılında Eğıl/Diyarbakır' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini 1990 yılında Eğıl'de tamamladı. 1995 yılında, Gaziantep Üniversitesi, Müh. Fak. Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl, mezun olduğu üniversitenin Makine Mühendisliği Bölümünde, Araştırma Görevlisi olarak atandı. 1998 yılında, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine ABD daki yüksek lisans eğitimini bitirdi. 2001 yılında, Jandarma Genel Komutanlığında, yedek subay olarak yaptığı askerlik görevini tamamlayarak, Dicle Üniversitesi, Müh. Fak. Makine Mühendisliği Bölümüne Öğretim Görevlisi olarak atandı ve halen aynı görevinde çalışmaktadır. Evli ve dört çocuk babasıdır.