

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KOMPOZİT MALZEMELERİN YAPIŞTIRILMASINDA
KARMA YAPIŞTIRICI KULLANIMININ BAĞLANTI
MUKAVEMETİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUNUS EMRE TOĞAR

DENİZLİ, ARALIK - 2021

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



KOMPOZİT MALZEMELERİN YAPIŞTIRILMASINDA
KARMA YAPIŞTIRICI KULLANIMININ BAĞLANTI
MUKAVEMETİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUNUS EMRE TOĞAR

DENİZLİ, ARALIK - 2021

Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (PAÜBAP) tarafından 2021FEBE019 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Yunus Emre TOĞAR

ÖZET

KOMPOZİT MALZEMELERİN YAPIŞTIRILMASINDA KARMA YAPIŞTIRICI KULLANIMININ BAĞLANTI MUKAVEMETİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUNUS EMRE TOĞAR

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞRETİM ÜYESİ MURAT ÖZENÇ)

DENİZLİ, ARALIK - 2021

Kompozit malzemeler başta havacılık, uzay ve otomotiv endüstrileri olmak üzere hafiflik ve dayanım gereken tüm alanlarda kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin kendileriyle veya başka malzemelerle birleştirilmesinde yapıştırma tekniği yaygınca kullanılan bir yöntemdir. Fakat her bağlantı yönteminin olduğu gibi yapıştırma bağlantılarının da dezavantajları vardır. Yapıştırma bağlantılarında gerilme yığılmaları, büyük ölçüde bindirme bölgesinin uç kısımlarında meydana gelmektedir ve bu uç bölgelerde soyulma şeklinde hasar başlayarak bağlantının orta noktasına doğru ilerlemektedir. Karma yapıştırıcı bağlantı yöntemi bindirme bölgesinin ortasında rijit yapıştırıcı ve uç kısımlarında esnek yapıştırıcı kullanımıyla bağlantı mukavemetini arttırmayı sağlamaktadır. Bu yöntemle, bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilme yığılmaları esnek yapıştırıcı sayesinde azaltılabilir, bindirme bölgesi boyunca homojen bir gerilme dağılımı oluşturulabilir ve hasar yükü yüksek bir bağlantı elde edilebilir.

Bu çalışmada, 2 mm kalınlığındaki cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ön darbe sonrası çekme ve üç noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır. Tek yapıştırıcı ve karma yapıştırıcı bağlantıların enine darbe sonrası bağlantı dayanımları incelenmiş ve darbesiz durumdaki bağlantı dayanımlarıyla karşılaştırılmıştır. Kompozit malzemelerin yapıştırılmasında rijit yapıştırıcı olarak Araldite AV138 ve esnek yapıştırıcı olarak 3M DP8005 yapıştırıcıları kullanılmıştır. Tek yapıştırıcı ve karma yapıştırıcı bağlantıların hepsinde bindirme bölgesi uzunluğu 50 mm olacak şekilde sabit tutulmuştur. Karma yapıştırıcı bağlantılarda bindirme bölgesinde 1/1 ve 1/2 oranlarında (esnek/rijit) yapıştırıcı bölgelerini oluşturmak ve tüm bağlantı yöntemlerinde yapıştırıcı kalınlığının aynı kalmasını sağlamak amacıyla ayırma bantları kullanılmıştır. Hem ön darbesiz hem de enine ön darbe uygulanmış, tek yapıştırıcı ve karma yapıştırıcı bağlantıların 1 mm/min hızda çekme ve 2 mm/min hızda üç nokta eğilme deneyleri yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Kompozit malzeme, yapıştırma bağlantıları, karma yapıştırıcı, ön darbe.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF USING MIXED ADHESIVE ON JOINT STRENGTH IN BONDING COMPOSITE ADHERENDS

MSC THESIS

YUNUS EMRE TOĞAR

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. MURAT ÖZENÇ)

DENİZLİ, DECEMBER 2021

Composite materials are used in all areas where lightweight and strength are required, especially in aeronautical, automotive, and aerospace industries. Adhesive bonding is a widely used for bonding composite adherends with similar or dissimilar adherends. However, just like other joining methods, adhesive joints also have disadvantages. Stress concentrations in adhesive joints occur generally at the ends of the overlap, and peeling begins at these ends of the overlap and progresses towards the center. The mixed adhesive joint configuration provides to increase the joint strength by using stiff and brittle adhesive should be in the center of the overlap length, while the low-modulus and flexible adhesive is located at the ends of the overlap length. With this method, stress concentrations at the ends of overlap can be reduced by the flexible adhesive, uniform stress distribution can be along the overlap length and high failure load can be obtained.

In this study, tensile tests and three point bending tests were carried out after pre-impact on single lap joints of 2 mm thickness glass fiber reinforcement plastic adherends. The joint strength of mono and mixed adhesive joints post-impact were investigated and compared with non-impact joint strength. Araldite AV138 as stiff adhesive and 3M DP8005 adhesive as flexible adhesive was used for bonding composite materials. In all mono and mixed adhesive joints, the overlap length was kept constant at 50 mm. Separation tapes with 1/1 and 1/2 ratios (flexible/stiff) adhesive in the overlap were used in mixed adhesive joints. Tensile tests at a speed of 1 mm/min and three points bending at a speed of 2 mm/min were performed for both mono adhesive and mixed adhesive joints, both without pre-impact and transverse pre-impact, and the results were evaluated.

KEYWORDS: Composite adherends, adhesive joints, mixed adhesive, pre-impact.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Tezin Önemi	2
1.3 Literatür Özeti	3
2. YAPIŞTIRMANIN TEMEL KAVRAMLARI.....	20
2.1 Yapıştırma İşlemi	21
2.1.1 Adezyon	21
2.1.2 Kohezyon	22
2.2 Yapıştırma bağlantılarını etkileyen faktörler	23
2.2.1 Sıcaklık	23
2.2.2 Basınç.....	23
2.2.3 Zaman	24
2.2.4 Yapıştırılan malzeme yüzeyinin kalitesi.....	24
2.2.5 Yapıştırıcı kalınlığı	24
2.3 Yapıştırma Bağlantı Geometrilere	24
2.4 Yapıştırma Bağlantılarındaki Hasar Tipleri	25
2.4.1 Adezyon Hasarı.....	26
2.4.2 Kohezyon Hasarı.....	27
2.5 Yapıştırma Bağlantılarının Kullanım Alanları	28
2.5.1 Uçak Endüstrisinde Kullanımı.....	28
2.5.2 Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı.....	30
2.5.3 Demiryolu Taşımacılığında Kullanımı	30
2.5.4 Deniz Endüstrisinde Kullanımı.....	33
2.5.5 Sağlık Sektöründe Kullanımı.....	34
2.6 Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları	35
2.7 Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları	36
3. KOMPOZİT MALZEMELER	38
3.1 Kompozit Malzeme Tanımı.....	39
3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	40
3.2.1 Parçacık Takviyeli Kompozitler	41
3.2.1.1 İri Parçacıklı Kompozitler.....	42
3.2.1.2 Saçınma Yoluyla Dayanım Arttırılmış Kompozitler	42
3.2.2 Elyaf Takviyeli Kompozitler	43
3.2.2.1 Sürekli ve Yönelmiş Elyaf Takviyeli Kompozitler.....	43
3.2.2.2 Süreksiz ve Yönelmiş Elyaf Takviyeli Kompozitler	44
3.2.3 Yapısal Kompozitler	44
3.2.3.1 Tabakalı Kompozitler.....	44
3.2.3.2 Sandviç Paneller.....	45

3.3	Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	46
3.3.1	Uzay ve Havacılık Sanayisi	46
3.3.2	Otomotiv Sanayisi.....	47
3.3.3	Denizcilik Sanayisi	48
3.3.4	Spor Ekipmanları Üretim Sektörü	48
3.4	Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları.....	49
3.4.1	Kompozit Malzemelerin Avantajları	49
3.4.2	Kompozit Malzemelerin Dezavantajları	49
3.5	Kompozit Malzemelerin Yapıştırma Bağlantıları	50
3.5.1	Bağlantı Mukavemetini Etkileyen Faktörler.....	51
3.5.2	Hibrit Bağlantı Yöntemi	53
3.5.3	Karma Yapıştırıcı Bağlantı Yöntemi.....	55
4.	MATERYAL VE YÖNTEM	58
4.1	Yapıştırılan Malzeme Özellikleri	58
4.2	Yapıştırıcıların Özellikleri.....	59
4.3	Bağlantı Geometrisi.....	60
4.4	Deney Numunelerinin Hazırlanması	61
4.5	Darbe Deneyi İşlemleri	67
4.6	Çekme Deneyi İşlemleri.....	68
4.7	Üç Nokta Eğilme Deneyi İşlemleri	69
5.	DENEYSEL BULGULAR.....	71
5.1	AV138 Tek Yapıştırıcı Bağlantılar	71
5.1.1	Darbe Deneyleri	71
5.1.2	Çekme Deneyleri	73
5.1.3	Üç Nokta Eğilme Deneyleri.....	74
5.2	DP8005 Tek Yapıştırıcı Bağlantılar	76
5.2.1	Darbe Deneyleri	76
5.2.2	Çekme Deneyleri	78
5.2.3	Üç Nokta Eğilme Deneyleri.....	83
5.3	1/1 Oranında Karma Yapıştırıcı Bağlantılar	85
5.3.1	Darbe Deneyleri	85
5.3.2	Çekme Deneyleri	87
5.3.3	Üç Nokta Eğilme Deneyleri.....	88
5.4	1/2 Oranında Karma Yapıştırıcı Bağlantılar	90
5.4.1	Darbe Deneyleri	90
5.4.2	Çekme Deneyleri	92
5.4.3	Üç Nokta Eğilme Deneyleri.....	95
5.5	Ön Darbe Sonrası Çekme Deneylerinin Karşılaştırılması.....	96
5.6	Ön Darbe Sonrası Üç Nokta Eğilme Deneylerinin Karşılaştırılması ..	99
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER	102
	KAYNAKLAR	106
	ÖZGEÇMİŞ.....	113

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Yapıştırma biliminin disiplinler arası ilişki şeması.	20
Şekil 2.2 Adezyon ve kohezyon olaylarının şematik gösterimi.	21
Şekil 2.3 Temel yapıştırma bağlantı tipleri.	25
Şekil 2.4 Hasar tipleri.	26
Şekil 2.5 Adezyon hasarının üç boyutlu modellemesi.	27
Şekil 2.6 Kohezyon hasarının üç boyutlu modellemesi.	28
Şekil 2.7 Yapıştırma bağlantıların uçak yapımında kullanıldığı yerler.	29
Şekil 2.8 Yapıştırma bağlantıların havacılık endüstrisindeki köpük yapılarında kullanımı.	29
Şekil 2.9 Yapıştırma bağlantıların otomotiv endüstrisindeki kullanım alanları	30
Şekil 2.10 Yapıştırma bağlantıların kompozit malzemeden yapılmış vagonda kullanımı.	31
Şekil 2.11 Yapıştırma bağlantıların kullanıldığı boji tasarımı.	32
Şekil 2.12 Bojilerde kullanılan yay yapıları.	32
Şekil 2.13 Tekne gövdesinde yapıştırıcı uygulaması.	33
Şekil 2.14 Tekne gövdesine güvertenin yapıştırılması.	34
Şekil 2.15 Yapıştırıcı ile kesilmiş derinin birleştirilmesi.	35
Şekil 2.16 Vücuda yapıştırılmış şeker ölçüm cihazı.	35
Şekil 3.1 Kompozit malzemelerin diğer malzemelerle ilişki şeması.	38
Şekil 3.2 Modern kompozit malzemelerin temel yapısı.	39
Şekil 3.3 Farklı elyaf açılarına sahip katmanlı kompozit yapısı.	40
Şekil 3.4 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.	41
Şekil 3.5 Farklı kompozit malzeme yapıları.	42
Şekil 3.6 Elyaf takviyeli kompozit malzemeye uygulanan çekme gerilmesi sonucu matristeki şekil değişimi.	43
Şekil 3.7 Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin gösterimi.	44
Şekil 3.8 Tabakalı kompozit malzemelerde üst üste yerleştirilmiş elyaf katmanları.	45
Şekil 3.9 Çatı malzemesi olarak kullanılan sandviç panel yapısı.	45
Şekil 3.10 Kompozit malzemelerin kullanım alanları.	46
Şekil 3.11 Ariane 5 roketinin modüler tasarımı.	47
Şekil 3.12 Ariane 5 roketinin kafa kısmındaki yapıştırıcı ile birleştirilmiş CFRP sandviç yapı.	47
Şekil 3.13 Tek tesirli yapıştırma bağlantılarda rijit ve esnek yapıştırıcının gerilme dağılımı.	51
Şekil 3.14 Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme ve plastik deformasyon bölgeleri.	52
Şekil 3.15 Hibrit bağlantı yöntemleri.	54
Şekil 3.16 Karma yapıştırıcı bağlantı yöntemi ile hibrit bağlantı yöntemlerinin şematik gösterimi.	57
Şekil 4.1 Araldite AV138/HV998 yapıştırıcı.	59
Şekil 4.2 3M DP8005 yapıştırıcının uygulama tabancasına montajlanmış hali.	59
Şekil 4.3 Yapıştırma bağlantı geometrisi.	61
Şekil 4.4 Pürüzlendirme işlemi öncesi ve sonrası.	62
Şekil 4.5 Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.	62

Şekil 4.6 Bağlantı tiplerine göre markalama işlemi.....	63
Şekil 4.7 Yapıştırıcı uygulanacak yüzeye bant yapıştırma işlemi.....	64
Şekil 4.8 Yapıştırıcı uygulaması.....	65
Şekil 4.9 Yapıştırma bağlantılarının kalıptaki yerleşimi.....	65
Şekil 4.10 Bindirme bölgesi etrafından taşan yapıştırıcılar.....	66
Şekil 4.11 Darbe deney cihazına numunenin yerleşimi.....	67
Şekil 4.12 Darbe deneylerinde kullanılan fikstürün şematik gösterimi.....	68
Şekil 4.13 Çekme deney cihazı.....	68
Şekil 4.14 Yapıştırma bağlantılarının çekme deney cihazına bağlantısı.....	69
Şekil 4.15 Üç nokta eğilme cihazına yapıştırma bağlantılarının yerleşimi.....	70
Şekil 5.1 AV138 tek yapıştırıcı bağlantısının darbe deney grafiği.....	71
Şekil 5.2 2,5 J ön darbe sonrası AV138 tek yapıştırıcı bağlantılarda meydana gelen hasar.....	72
Şekil 5.3 AV138 tek yapıştırıcı bağlantılarının enerji-zaman grafiği.....	72
Şekil 5.4 2,5 J ön darbe sonrası darbe yüzeyinin görünümü.....	73
Şekil 5.5 AV138 tek yapıştırıcı bağlantılarının çekme deney grafiği.....	73
Şekil 5.6 Çekme deneyi sonrası meydana gelen yapıştırıcı hasarları.....	74
Şekil 5.7 AV138 tek yapıştırıcı bağlantılarının üç nokta eğilme grafiği.....	75
Şekil 5.8 Üç nokta eğilme sonrası meydana gelen yapıştırıcı hasarları.....	75
Şekil 5.9 DP8005 tek yapıştırıcı bağlantılarının darbe deney grafiği.....	76
Şekil 5.10 DP8005 tek yapıştırıcı bağlantılarının darbe sonrası hasarlı yüzeyleri.....	77
Şekil 5.11 DP8005 tek yapıştırıcı bağlantılarının enerji-zaman grafiği.....	78
Şekil 5.12 DP8005 tek yapıştırıcı bağlantılarının çekme deney grafiği.....	79
Şekil 5.13 Polimerin elastik şekil değişim adımları.....	81
Şekil 5.14 Polimerin plastik deformasyon adımları.....	81
Şekil 5.15 DP8005 tek yapıştırıcı bağlantılarının çekme deney sonrası hasar mekanizmaları.....	82
Şekil 5.16 DP8005 tek yapıştırıcı bağlantılarının üç nokta eğilme deney grafiği.....	84
Şekil 5.17 DP8005 tek yapıştırıcı bağlantılarının üç nokta eğilme deneyi sonrası hasar mekanizmaları.....	84
Şekil 5.18 1/1 oranında karma yapıştırıcı bağlantılarının darbe sonrası hasarlı yüzeyleri.....	85
Şekil 5.19 1/1 oranında karma yapıştırıcı bağlantılarının darbe deney grafikleri.....	86
Şekil 5.20 1/1 oranında karma yapıştırıcı bağlantılarının enerji-zaman grafikleri.....	86
Şekil 5.21 1/1 oranında karma yapıştırıcı bağlantılarının çekme deney grafikleri.....	87
Şekil 5.22 1/1 oranında karma yapıştırıcı bağlantılarının çekme deney sonrası hasar mekanizmaları.....	88
Şekil 5.23 1/1 oranında karma yapıştırıcı bağlantılarının üç nokta eğilme deney grafikleri.....	89
Şekil 5.24 1/1 oranında karma yapıştırıcı bağlantılarının üç nokta eğilme deneyi sonrası hasar mekanizmaları.....	90
Şekil 5.25 1/2 oranında karma yapıştırıcı bağlantılarının darbe deney grafikleri.....	91
Şekil 5.26 1/2 oranında karma yapıştırıcı bağlantılarının enerji-zaman grafikleri.....	91

Şekil 5.27 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların çekme deney sonrası hasar mekanizmaları.....	92
Şekil 5.28 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların çekme deney grafikleri.	93
Şekil 5.29 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların çekme deney sonrası hasar mekanizmaları.....	94
Şekil 5.30 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deney grafikleri.	95
Şekil 5.31 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deneyi sonrası hasar mekanizmaları.....	96
Şekil 5.32 Ön darbe sonrası çekme deney sonuçlarının karşılaştırması.	97
Şekil 5.33 Ön darbe sonrası oluşan hasarlar.	98
Şekil 5.34 Ön darbe sonrası üç nokta eğilme deney sonuçlarının karşılaştırması.....	100

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Tasarımları verilmiş hibrit bağlantı tekniklerinin üretim yöntemleri açısından değerlendirilmesi.....	54
Tablo 4.1 Cam elyaf takviyeli G10 kompozit özellikleri.....	58
Tablo 4.2 Tezde kullanılan yapıştırıcıların mekanik özellikleri.....	60
Tablo 4.3 Zımparalama işlemi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	63
Tablo 5.1 Ön darbe sonrası çekme deney sonuçları.....	99
Tablo 5.2 Ön darbe sonrası üç nokta eğilme deney sonuçları	100

SEMBOL LİSTESİ

AISI	: American Iron and Steel Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Plastic
DIN	: Deutsches Institut für Normung
EN	: European Norm
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Plastic
ISO	: International Standards Organization
TS	: Türk Standardı
R_a	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü, μm

ÖNSÖZ

Bu çalışma konusunun belirlenmesi ve yürütülmesi esnasında yönlendirmeleriyle her zaman yanımda duran ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli danışman hocam Dr. Öğretim Üyesi Murat Özenç'e teşekkür ederim.

2021FEBE019 numaralı proje ile bu yüksek lisans tezini destekleyen Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (PAÜBAP) teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın tüm sürecinde ve özellikle deney aşamasında gece gündüz demeden her anımda yanımda olan yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. İnan Ağır' a teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimim süresince destek ve yardımlarını aldığım Arş. Gör. Ahmet Can Yıldız ve Öğr. Gör. Gökhan Ekinci' ye teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her anında yanımda olan, beni destekleyen başta Göksel Ocak ve Furkan Duru olmak üzere tüm arkadaşlarıma ve hocalarıma ayrıca minnettarım.

Lisans ve Yüksek Lisans eğitim süreçlerimde benimle yol arkadaşlığı yapan, takıldığım her engelde yanımda olan Rezzan Yardımcı' ya teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca beni destekleyen yanımda duran annem, babam ve kardeşlerime özellikle tüm maddi imkansızlıklara rağmen okumam için elinden gelen her şeyi yapan annem Hüsna Toğar ve babam Bedrettin Toğar' a hayatımın sonuna kadar müteşekkir olacağım.

1. GİRİŞ

Yapıştırma, antik çağlardan günümüze kadar bir birleştirme tekniği olarak kullanılmıştır. M.Ö. 4000’li yıllarda Mezopotamyalıların inşaat işlerinde yapıştırıcı kullandıkları bilinirken, M.Ö. 3000’de Sümerliler hayvan derilerinden “Se-gin” adını verdikleri yapıştırıcıyı üretmiştir. Modern yapıştırıcı endüstrileri kuruluncaya kadar insanlar ağaç reçinelerinden ve hayvan derilerinden yapıştırıcılar yapmıştır.

Malzeme birleştirme teknolojisi insanoğlunun kullandığı hemen hemen her ürünü etkilemiştir. Şu anda, yapısal uygulamalar için kullanılan malzeme birleştirme yöntemleri, kaynaklı birleştirme, yapıştırma bağlantıları ve mekanik sabitleme (cıvata, perçin, pim vb.) olarak sınıflandırılabilir. Bazı durumlarda tek bir birleştirme yönteminin kullanılmasıyla bağlantıdan beklenen yeterli rijitlik, dayanım, titreşim sönümlenme gibi özellikler sağlanamayabilir. Böyle durumlarda bu türlü gereksinimleri gidermek için aynı anda birden fazla birleştirme yöntemi birlikte kullanılabilir. Buradaki amaç, farklı tekniklerin, farklı özellikteki malzemelerin avantajlarını birleştirmektir.

Yapıştırma tekniği ile birleştirme diğer birleştirme tekniklerine kıyasla daha iyi bir gerilme dağılımı sağlar ve mekanik sabitlemelerde delik bölgelerinde meydana gelen gerilme yığılmalarının önüne geçer. Mekanik birleştirme tekniklerinden daha estetik bir görünüm elde edilebilir. Farklı malzemelerin birleştirilmesi yapıştırma tekniği ile çok daha avantajlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ayrıca yapıştırma tekniğinin sızdırmazlık özelliği sayesinde mekanik sabitlemelerde sıklıkla görülen korozyon oluşumu da engellenmiş olur.

1.1 Tezin Amacı

Yapıştırma bağlantıları sadece aksenal yönde statik yüklere maruz kalmamaktadır. Eksene dik doğrultularda ani yüklere de maruz kalabilirler. Böyle durumlarda bağlantıya gelebilecek darbeler veya herhangi bir kaza durumunda, bağlantı dayanımının ne ölçüde değişebileceği, yeterli olup olmayacağı sorusuna

belirli ölçüde cevap bulunması gerekmektedir. Kompozit malzemelerin yapıştırma bağlantılarında, bağlantı mukavemetini artırmak, alacağı darbeler sonrasında dayanımlarının ne ölçüde değişeceğini belirleyebilmek, kompozit malzemelerin kullanım yerlerinin hassasiyetinden dolayı önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, 2 mm kalınlığındaki cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ön darbe sonrası çekme ve üç nokta eğilme deneyleri yapılacaktır. Tek yapıştırıcı ve karma yapıştırıcı bağlantıların darbesiz duruma göre enine darbe sonrası bağlantı dayanımları incelenecektir. Kompozit malzemelerin yapıştırılmasında rijit yapıştırıcı olarak Araldite AV138 ve esnek yapıştırıcı olarak 3M DP8005 yapıştırıcıları kullanılacaktır. Tek yapıştırıcı ve karma yapıştırıcı bağlantıların hepsinde bindirme bölgesi uzunluğu 50 mm olacak şekilde sabit tutulacaktır. Karma yapıştırıcı bağlantılarda bindirme bölgesinde 1/1 ve 1/2 oranlarında (esnek/rijit) yapıştırıcı olacak şekilde ayırma bantları kullanılacaktır. Ayırma bantları aynı zamanda yapıştırıcı kalınlığının sabit kalması için tek yapıştırıcı bağlantılarda da kullanılacaktır. Tek yapıştırıcı ve iki farklı oranda karma yapıştırıcı bağlantıların hem ön darbesiz hem de 2,5 J'den 7,5 J'ye kadar ön darbeli durumları sonrasında 1 mm/min hızda çekme ve 2 mm/min hızda üç nokta eğilme deneyleri yapılacak ve sonuçları değerlendirilecektir.

1.2 Tezin Önemi

Kompozit malzemeler başta havacılık, uzay ve otomotiv endüstrileri olmak üzere hafiflik ve dayanım gereken tüm alanlarda kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin kendileriyle veya başka malzemelerle birleştirilmesinde yapıştırma tekniği yaygınca kullanılan bir yöntemdir. Fakat her bağlantı yönteminin olduğu gibi yapıştırma bağlantılarının da dezavantajları vardır. Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar, büyük ölçüde bindirme bölgesinin uç kısımlarında meydana gelmektedir. Bu bölgelerde oluşan gerilme yığılması neticesinde, uç bölgelerde soyulma şeklinde hasar başlayarak bağlantının orta noktasına doğru ilerlemektedir. Yapıştırma bölgesindeki gerilme yığılmalarını azaltarak, bağlantının mukavemetini artırmak son derece önemlidir.

Yapıştırma bağlantılarında gerilme yığılmalarını azaltmayı amaçlayan ve bağlantıların enine mukavemetini arttırmaya yönelik birçok alternatif yöntem vardır. Bu yöntemlerden çoğu yapıştırılan malzemenin delinmesi ya da deformasyona uğratılması sonucunda yapılmaktadır ama son yıllarda kullanımı hızla artmakta olan karma yapıştırıcı bağlantı yönteminde yapıştırılan malzemeye zarar vermeden bağlantı mukavemeti artırılabilir ve bindirme bölgesinin uç kısımlarında oluşan gerilme yığılmaları azaltılabilmektedir. Karma yapıştırıcı bağlantılarda bindirme bölgesinin orta kısmında rijit ve uç kısımlarında ise esnek yapıştırıcı kullanılmaktadır. Literatürde karma yapıştırıcı bağlantılara yarı statik çekme ve aksel yönde ani çekme deneylerinin yapıldığı çalışmalar ile tek yapıştırıcı bağlantıların enine darbe davranışlarının incelendiği çalışmalar mevcuttur. Karma yapıştırıcı bağlantıların enine darbe sonrası bağlantı dayanımı üzerine çalışılmamıştır.

Bu çalışmanın özgün yanı; tek yapıştırıcı ve karma yapıştırıcı bağlantıların enine ön darbe sonrasında yapılacak çekme ve üç nokta eğilme deneyleri ile bağlantı dayanımının incelenmesi olacaktır.

1.3 Literatür Özeti

Karma yapıştırıcı bağlantı tekniğinin bağlantı mukavemeti açısından belirgin bir artış sağladığı literatürde belirtilmiştir. Bu tezin kapsamında kompozit malzemelerin karma yapıştırıcı bağlantılarında ön darbe sonrası çekme ve üç nokta eğilme deneyleri olduğu için yoğunluklu olarak karma yapıştırıcı bağlantıların bağlantı mukavemetini artırması üzerine yapılmış deneysel ve teorik çalışmalar olacaktır. Bunun yanında tek yapıştırıcı bağlantılar üzerinde yapılmış darbe ve üç nokta eğilme deneylerini içeren çalışmalar incelenecektir. Öncelikle karma yapıştırıcı bağlantıların literatürü verilmiştir.

Raphael ve Coleman (1966), tarihte ilk kez karma yapıştırıcı bağlantı yönteminin kullanılmasının bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilme yığılmalarını azaltacağını önermiştir. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında bu yöntemin kullanılmasının, bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilme yığılmalarını ve erken hasara uğramayı azaltacağını belirtmiştir. Bu yöntem bindirme bölgesinin uç kısımlarında daha esnek bir yapıştırıcının ve orta bölümünde yükleme

sırasında daha az deformasyona maruz kalan rijit bir yapıştırıcının kullanılmasını kapsamaktadır. Karma yapıştırıcılı bağlantı yönteminde kullanılan yapıştırıcılarda maksimum kesme gerilmelerinin birbirine yakın olanlarının tercih edilmesinin bağlantı mukavemetini ve gerilme dağılımını iyileştireceğini belirtmiştir.

Hart Smith (1973), yapıştırma bağlantılarında bindirme bölgesinin ortasında rijit bir yapıştırıcı ve bindirme bölgesinin uç kısımlarında esnek bir yapıştırıcı kullanılmasının bindirme bölgesinde yalnızca esnek bir yapıştırıcının kullanılmasından daha iyi bir bağlantı mukavemeti göstereceğini belirtmiştir. Karma yapıştırıcılı bağlantıların özellikle tek başına rijit yapıştırıcının kullanıldığı yapıştırma bağlantılarından çok daha avantajlı olduğunu belirtmiştir. Karma yapıştırıcılı bağlantı yönteminin kullanılmasının yapıştırma bağlantılarında bindirme bölgesinin uç kısımlarında oluşan soyulma gerilmesi probleminin çözülmesinde etkili olabileceğini ve orta kısımdaki rijit yapıştırıcının kesme yükünü etkili bir şekilde aktarabileceğini bunların sonucunda bağlantı mukavemetinin gelişeceğini belirtmiştir.

Srinivas (1975), sonlu elemanlar metodunu kullanarak yaptığı hesaplamalar ile karma yapıştırıcılı bağlantı yönteminin, maksimum soyulma ve kayma gerilmelerini azaltacağını göstermiştir. Bindirme bölgesinin uzunluğu boyunca mümkün olan en düşük gerilmeleri sağlamak için rijit ve esnek yapıştırıcıların bindirme bölgesindeki optimum uzunluklarının seçilebileceği sonucuna varılmıştır.

Frostig ve diğerleri (1999), bindirme bölgesinin uç kısımlarında yapıştırıcının düz, pahlı ve radyuslu olduğu yapıştırma bağlantılarının yüksek dereceli teori yaklaşımıyla analizini gerçekleştirmiştir. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarının analitik modelinde, yapıştırıcı kalınlığı boyunca soyulma gerilmesi değişimini belirleyebilen kendi geliştirdikleri kapalı çözüm yüksek derece teorisini kullanmışlardır. Kendi geliştirdikleri kapalı çözüm yüksek derece teorisi ile bindirme bölgesinin uç kısımlarında serbest yüzey kayma gerilmesi koşulunun modellenebileceği belirtilmiştir. Bindirme bölgesinin uç kısımlarında yapıştırıcının düz olarak bırakılması yani radyus ya da pah verilmemesi durumunda gerilme yığılmaları olacağı sonucuna varılmıştır.

Pires ve diğerleri (2003), 2024 T3 Alüminyum malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında bindirme bölgesinin ortasında rijit ve uç kısımlarında esnek

yapıştırıcılar kullanılmıştır. Yapıştırma bağlantılarında bindirme bölgesi 14 mm uzunluğunda olup bu bölgede esnek/rijit yapıştırıcılar üç ayrı oranda kullanılmıştır. Rijit ve esnek yapıştırıcıların ayrı ayrı kullanıldığı bağlantılar ile karma yapıştırıcı bağlantılar karşılaştırılmıştır. 1 mm/min hızda yapılmış çekme deneyi sonuçları, karma yapıştırıcı bağlantıların rijit ve esnek yapıştırıcıların ayrı ayrı kullanıldığı bağlantılardan %22 daha iyi dayanıma sahip olduğunu göstermiştir. Sonuçlar sonlu elemanlar analiziyle de teyit edilmiştir ve deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Fitton ve Broughton (2005), karbon elyaf takviyeli plastiğin (CFRP) tek tesirli yapıştırma bağlantılarında karma yapıştırıcı bağlantı tekniğini kullandıktan sonra, karma yapıştırıcı bağlantı tekniği ile ilgili çalışmalar kompozit bağlantılar ile genişletilmiştir. Bindirme bölgesinin orta ve uç kısımlarında sırasıyla rijit (yüksek elastite modüllü) ve esnek (düşük elastite modüllü) yapıştırıcılar kullanılmıştır. 2 mm/min hızda yapılmış çekme deneyi sonuçları, karma yapıştırıcı bağlantı tekniğinin karbon fiber takviyeli plastiklerin yapıştırma bağlantılarında kullanılmasının bağlantı mukavemetini geliştirdiğini göstermiştir.

Temiz (2006), Alüminyum 2024 T3 malzemenin çift tesirli karma yapıştırıcı bağlantıları oluşturularak, bağlantılar üzerindeki eğilme momentinin etkisini incelemek için sonlu elemanlar analizi yapılmış ve karma yapıştırıcı bağlantı tekniğinin bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilmeleri büyük ölçüde azalttığı tespit etmiştir.

Silva ve Adams (2007), süpersonik bir uçağın gövdesinin karşılaşılabileceği sıcaklık aralığında (-55 ile 200 °C aralığı) çift tesirli karma yapıştırıcı bağlantıların dayanımını incelemiştir. Deneylerin yapılacağı sıcaklık aralığında yapısı bozulmayan ve havacılık endüstrisinde çokça kullanılan, titanyum ve matris malzemesi bismaleimide reçine olan karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılmıştır. Deney numunelerinin yapıştırılmasında, düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık yapıştırıcıları kullanılmıştır. Aynı yapıştırılan malzemelerinin kullanıldığı (Ti-Ti ve Kompozit-Kompozit) ve farklı yapıştırılan malzemelerinin kullanıldığı (Ti-Kompozit) yapıştırma bağlantılarının 1 mm/min hızda, dört farklı sıcaklık (-55, 22, 100 ve 200 °C) değerinde çekme deneyleri yapılmıştır. Karma yapıştırıcı bağlantıların, rijit ve

esnek yapıştırıcıların ayrı ayrı kullanıldığı bağlantılara göre özellikle yüksek sıcaklıklarda daha iyi bir bağlantı mukavemeti sağladığı sonucuna varılmıştır.

Silva ve Adams (2007), çift tesirli karma yapıştırıcılı bağlantıların -55 ile 200 °C sıcaklık aralığında yapılan deneylerinde düşük sıcaklıklarda kompozit yapıştırma bağlantıların dayanımının düşük olmasının sebeplerini ve çözüm yollarını incelemiştir. Düşük sıcaklıklarda çift tesirli karma yapıştırıcılı bağlantıların daha iyi bir bağlantı mukavemeti sağlaması için çift tesirli yapıştırma bağlantılarda ortadaki yapıştırılan malzemenin değil de dıştaki yapıştırılan malzemenin kompozit olması gerektiği belirtmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarla ve sonlu eleman analizleriyle, çift tesirli karma yapıştırıcılı bağlantılarda dış taraftaki yapıştırılan malzemelerin bindirme bölgesinin uç kısımlarında yapıştırıcı yönünde pahlı olmasının ve dış taraftaki yapıştırılan malzemenin üst yüzeyi ile ortadaki yapıştırılan malzemenin yüzeyi arasında yapıştırıcı ile pah verilmesinin bağlantı mukavemetinin artmasını sağladığı sonucuna varılmıştır.

Kong ve diğerleri (2008), AISI 1045 çeliğinin yapıştırılmasında düşük ve yüksek elastisite modüllü iki yapıştırıcının birlikte kullanılmasının gerilme dağılımını nasıl etkilediğini üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiştir. Yapılan üç boyutlu analizlerde iki farklı durumun benzetimi yapılmıştır, bunlardan biri tek tesirli yapıştırma bağlantısının çekme deneyi benzetimi diğeri ise yarıma deneyi benzetimidir. Bu iki durum içinde yüksek ve düşük elastisite modüllü yapıştırıcıların yerleri ve uzunlukları farklı kombinasyonlarla analiz edilmiştir. Düşük elastisite modüllü yapıştırıcının, yarıma deneyinde yarımanın başladığı tarafta olduğu ve çekme deneyindeyse bindirme bölgesinin uç kısımlarında olduğu analiz sonuçlarında gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Düşük ve yüksek elastisite modüllü yapıştırıcıların birlikte kullanıldığı bağlantılarda yapıştırıcıların bağlantı hattındaki yerleri ve uzunlukları uygun seçildiği takdirde gerilmelerin daha az olacağı sonucuna varılmıştır.

Banea ve Silva (2009), farklı endüstrilerde çeşitli uygulamalar için kullanılan hafif fiber takviyeli kompozit malzemelerin yapıştırma bağlantılarında hasara sebep olan parametreleri ve bağlantı mukavemetini arttıracak çeşitli yöntemleri incelemiştir. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin yapıştırma bağlantılarında; yapıştırılacak kompozit türü, çevre şartları, maliyeti ve uygun yapıştırıcı seçimi gibi

parametrelerin önemli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yapıştırma bağlantılarında tasarım aşamasında sonlu elemanlar analizi ile bağlantı mukavemeti tahmininin pahalı testlerin miktarını azaltmada önemli olduğunu vurgulamışlardır. Bağlantı mukavemetini arttırmanın çeşitli yöntemlerinden birinin de karma yapıştırıcı bağlantı yöntemi olduğunu belirtmişlerdir. Karma yapıştırıcı bağlantı yönteminde kullanılan yapıştırıcıların çalışma ortamına uygun seçilmesiyle gerilme yoğunluğunun azaltılabileceğini ve bağlantı mukavemetinin arttırılabileceği sonucuna varmışlardır.

Neves ve diğerleri (2009a, 2009b), titanyum malzemesinin yapıştırma bağlantılarında, bindirme bölgesinde iki yapıştırıcıyı hesaba katan ve maksimum bağlantı mukavemetine ulaşmak için en iyi yapıştırıcı kombinasyonunu ve en iyi geometrik faktörleri (bindirme bölgesinin uzunluğu gibi) belirlemeye izin veren analitik bir model geliştirmiştir. Teknik tek tesirli bağlantılar için çift tesirli bağlantılardan daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Silva ve Lopes (2009), DIN C75 çelik malzemenin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında bindirme bölgesinin ortasında aynı rijit yapıştırıcının kullanıldığı, bindirme bölgesinin uç kısımlarında ise üç farklı esnek yapıştırıcının kullanıldığı karma yapıştırıcı bağlantıları incelemiştir. Bindirme bölgesinin uç kısımlarında farklı esnek yapıştırıcıların kullanıldığı karma yapıştırıcı bağlantıların 1 mm/min hızda çekme deney cihazında deneyleri yapılmıştır. Karma yapıştırıcı bağlantı tekniğinin kullanılması her durumda, rijit bir yapıştırıcının tek başına kullanılması durumuna göre bağlantı mukavemetinin arttırmıştır. Karma yapıştırıcı bir bağlantının, ayrı ayrı kullanılmış rijit ve esnek yapıştırıcıdan daha iyi bir bağlantı mukavemetine sahip olması için karma yapıştırıcı bağlantıda rijit yapıştırıcı tarafından taşınan yükün, esnek yapıştırıcı tarafından taşınan yükten daha yüksek olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Kumar ve Pandey (2010), alüminyum alaşımlı metallerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında karma yapıştırıcı bağlantı yönteminin kullanılmasının bağlantı mukavemeti üzerine etkilerini incelemek için iki boyutlu ve üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. Analiz sonuçları, karma yapıştırıcı bağlantı yöntemiyle, rijit yapıştırıcıların tek başına kullanıldığı bağlantılardan daha yüksek bir bağlantı mukavemeti ve daha düzgün bir gerilme dağılımı elde edilebileceğini göstermiştir.

Özer ve Öz (2012), Alüminyum 7075 malzemesinin dört farklı yapıştırıcı uzunluğu oranına (0,2/0,4/0,7 ve 1,3) sahip çift tesirli karma yapıştırıcılı bağlantılarının üç boyutlu sonlu elemanlar analizini yapmışlardır. Karma yapıştırıcılı bağlantıların, bindirme bölgesinde tek bir yapıştırıcının kullanıldığı duruma göre önemli ölçüde gerilme düşüşü sağladığı görülmüştür. Sonlu elemanlar analizindeki sayısal sonuçlar, analitik çözümlerle uyumlu çıkmıştır. Karma yapıştırıcılı bağlantılarda yapıştırıcı uzunluğu oranının optimizasyonu ile kayma ve soyulma gerilmelerinin azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bavi ve diğerleri (2013), üç farklı malzemenin (çelik, alüminyum ve karbon fiber takviyeli plastik), üç farklı yapıştırıcıyla (bir rijit ve iki esnek yapıştırıcı) tek tesirli ve çift tesirli karma yapıştırıcılı bağlantılarını on sekiz farklı durumda analitik olarak incelemiştir. Karma yapıştırıcılı bağlantılarda bindirme geometrisi optimizasyonu amacıyla yapılmış bu çalışmada yapıştırıcıların uzunluğu, yapıştırıcı kalınlığı ve malzeme kalınlığı da bu on sekiz farklı durumun oluşturulması aşamasındaki değişkenlerdendir. Durumların hepsinde bindirme bölgesi uzunluğu, yapıştırılan malzeme genişliği ve yapıştırılan malzeme uzunluğu sabit tutulmuştur. Karma yapıştırıcılı bağlantıların, yapıştırıcıların bindirme bölgesinde tek başına kullanıldığı durumlara göre daha iyi bir bağlantı mukavemeti sağladığı belirtilmiştir. Analitik olarak hesaplanmış on sekiz farklı durum deneysel sonuçlarla da karşılaştırıldığında uyumlu oldukları belirtilmiştir ve karma yapıştırıcılı bağlantılarda yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme kalınlığının minimum olduğu durumda pratikte daha iyi bir bağlantı mukavemeti sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Carbas ve diğerleri (2014), DIN C65 yüksek mukavemetli çelik malzemenin tek tesirli yapıştırma bağlantısının, düşük veya yüksek sıcaklıkta izotermal olarak kürlendiği durum ile indüksiyon ısıtma ile yapıştırıcının fonksiyonel olarak derecelendirildiği durumu incelemiştir. Yapıştırılan bağlantıların 1 mm/min hızında çekme deneyleri yapılmış ve izotermal olarak kürlenmiş bağlantıların hasar yükü tahmininde sayısal analiz kullanılmıştır. Karma yapıştırıcılı bağlantılarda bindirme bölgesinin ortasında rijit ve uç kısımlarında esnek yapıştırıcı kullanılmasının, bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilme yığılmalarını azalttığını, bindirme bölgesinde daha düzgün bir gerilme dağılımı sağladığını ve bağlantı mukavemetini geliştirdiğini belirtmiştir. İndüksiyon ısıtma ile yapıştırıcının fonksiyonel olarak derecelendirildiği

bağlantıların, düşük veya yüksek sıcaklıkta izotermal olarak kürlenmiş bağlantılardan daha iyi dayanım sağladığı sonucuna varılmıştır.

Breto ve diğerleri (2015), cam elyaf takviyeli plastik (GFRP) ve Alüminyum 6005 A-T6 malzemelerinin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapıştırıcı kullanılmasının bağlantı dayanımına etkilerini incelemiştir. Yapıştırıcının fonksiyonel olarak derecelendirilmesi karma yapıştırıcılı bağlantılarda olduğu gibi bindirme bölgesinde iki farklı yapıştırıcının kullanıldığı ve bindirme bölgesinin uç kısımlarında oluşan gerilme yığılmalarının azaltıldığı bir yöntemdir. GFRP-Alüminyum malzemelerinin karma yapıştırıcılı bağlantılarının 1 mm/min hızında çekme deneyleri yapılmış ve sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırılmıştır. Karma yapıştırıcılı bağlantı yöntemiyle yapıştırma bağlantılarının hasar yükünün %70 oranında iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Marques ve diğerleri (2015), seramik ve Alüminyum 6063 T6 malzemelerinin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında karma yapıştırıcı kullanılmasının farklı sıcaklık değerlerinde bağlantı mukavemetindeki etkilerini incelemiştir. Deney numunelerinin hazırlanmasında rijit ve esnek özellikli iki farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Tek yapıştırıcılı ve karma yapıştırıcılı bağlantıların 1 mm/min hızda çekme deneyleri yapılmış ve sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklıkta ve oda sıcaklığında karma yapıştırıcılı bağlantı yönteminin hasar yükünü arttırdığı belirtilmiştir. Elde edilen deneysel ve sayısal veriler birbiriyle uyumlu olarak, karma yapıştırıcılı bağlantı tekniğinin tahmin ve optimizasyon için kullanılabilirliğini göstermiştir.

Silva ve diğerleri (2016), farklı özellikte dört yapıştırıcı ile DIN 55 Si7 çelik malzemenin 25 ve 50 mm bindirme uzunluklarındaki karma yapıştırıcılı bağlantılarında hasar yükünün tek yapıştırıcılı bağlantılara göre nasıl değiştiğini incelemiştir. İki farklı bindirme uzunluğuna sahip tek ve karma yapıştırıcılı bağlantıların 1 mm/min hızda çekme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca 25 mm bindirme uzunluğuna sahip tek ve karma yapıştırıcılı bağlantıların 40 J'ye ayarlanmış darbe test cihazıyla hasar yüklerinin değişimi test edilmiştir. 50 mm bindirme uzunluğuna sahip yapıştırma bağlantılar darbe test cihazına yerleşmediği için darbe testleri yapılamamıştır. Darbe testleri yapıştırma bağlantıların 40 J darbe sonucundaki hasar yüklerinin çekme deney sonuçlarıyla karşılaştırılması için yapılmıştır. Bu çalışmanın

temel amacı, bindirme bölgesinin uç kısımlarına küçük birer esnek yapıştırıcı tabakası ekleyerek, sadece rijit yapıştırıcıların kullanıldığı bağlantılardaki hasar yüklerinin önemli ölçüde arttırılabileceğini göstermektir. Karma yapıştırıcılı bağlantı tekniğinin bağlantılara esneklik sağlayarak hem statik çekme deneylerinde hem de darbe deneylerinde bağlantı mukavemetini arttırdığı görülmüştür ve sonuç olarak çarpışmalara dayanıklı yapılara sokulduğunda daha fazla enerji emilimi sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Breto ve diğerleri (2017), alüminyum malzemenin tek tesirli karma yapıştırıcılı bağlantısında bindirme bölgesinde kullanılan iki farklı yapıştırıcının ayırım bölgelerindeki tekilliğini incelemiştir. Komşu yapıştırıcılar arasındaki tekilliği ve malzeme süreksizliğini önlemek için ayırım noktalarına geçiş bandı önermiştir. Geçiş bandı kullanılmasının komşu yapıştırıcılar arasındaki tekilliği önlediğini analitik çözümle ve sonlu elemanlar analiziyle göstermiştir.

Öz ve Özer (2017), DIN C75 yüksek mukavemetli çelik numunelerin yapıştırma bağlantılarında bindirme bölgesinin ortasında aynı rijit yapıştırıcı varken uç kısımlarında iki farklı esnek yapıştırıcı kullanılmıştır. Çekme test cihazında 1 mm/min hızda yapılan deneysel sonuçlar karma yapıştırıcılı bağlantıların, tek yapıştırıcılı bağlantılara göre %40 daha yüksek bağlantı mukavemeti gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Chimminelli ve diğerleri (2017), Alüminyum 6005A-T6 malzemelerinin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, kendi geliştirmiş oldukları, yapıştırıcıları istenilen oranda dağıtan makine ile karma yapıştırıcı kullanılmasının hem deneysel hem de sonlu elemanlar yöntemiyle bağlantı dayanımındaki etkilerini incelemiştir. Geliştirmiş oldukları makine rijit ve esnek yapıştırıcının bindirme bölgesindeki dağılımını ve oranını belirleyebilmektedir. Bu makine ile bindirme bölgesinin uç kısımlarında esnek yapıştırıcı, ortasında rijit yapıştırıcı ve rijit yapıştırıcı ile esnek yapıştırıcı arasında da bu iki yapıştırıcının %50 oranındaki karışımının uygulanması 5 bantlı bağlantı olarak adlandırılmıştır. Yapıştırma bağlantılarının 1 mm/min hızda çekme deneyleri yapılmış ve sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırılmıştır. Yapıştırma bağlantılarında 5 bantlı karma yapıştırıcılı bağlantı yönteminin kullanılmasının, yapıştırıcıların tek başına kullanıldıkları duruma göre %70' in üzerinde bağlantı dayanımını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

Stein ve diğeri (2017), tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, karma yapıştırıcı bağlantı yönteminin kullanılmasının bağlantı dayanımındaki ve gerilme dağılımındaki etkilerini analitik ve sonlu elemanlar yöntemleriyle incelemiştir. Çelik, alüminyum ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerinin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, soyulma ve kayma gerilmelerinin hesaplanabileceği analitik bir yaklaşım sunmuştur ve geçmişte yapılan çalışmalarla karşılaştırmıştır. Karma yapıştırıcı bağlantı yönteminin kullanılmasıyla bindirme bölgesinde daha homojen bir gerilme dağılımı elde edilebildiğini ve bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilme yığılmalarının azaltılabildiğini belirtmiştir.

Durodola (2017), 1960'dan 2017'ye kadar karma yapıştırıcı bağlantı yöntemiyle ilgili yapılmış teorik ve deneysel çalışmaların geniş bir kesitini gözden geçirmiştir. Bindirme bölgesinin ortasında rijit ve uç kısımlarında esnek yapıştırıcıların optimum oranda kullanılmasının bağlantı mukavemetini önemli ölçüde arttıracığı fakat bu yöntemin uygulanmasında zorluklar olabileceği belirtilmiştir.

Machado ve diğeri (2018a), CFRP malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarının, bindirme bölgesinde iki rijit, üç esnek yapıştırıcı kullanılarak karma yapıştırıcı bağlantılar oluşturulmuştur. Yapıştırma bağlantılar çekme deney cihazında 1 mm/min ve 100 mm/min hızlarda test edilmiştir. Karma yapıştırıcı bağlantılarda tek yapıştırıcı bağlantılara kıyasla %64'e kadar mukavemet artışı elde edilmiştir. Kompozit malzemelerin yapıştırma bağlantılarında, bindirme bölgesinin orta kısımda rijit, uç kısımlarında esnek bir yapıştırıcının kullanılması, katman ayrılmasına yol açan kritik bölgesel soyulma gerilmelerinin azaltılmasına olanak sağladığı için katman ayrılması hasarını önleyebilir veya geciktirebilir sonucuna varılmıştır.

Machado ve diğeri (2018b), daha önce deneysel olarak test edilmiş bağlantıların mukavemetini tahmin edebilen sayısal modellerin geliştirilmesi üzerinde çalışmıştır. Deneysel testler, kompozit yapıştırma bağlantılarının yarı statik ve eksenel ani çekme dayanımındaki gelişmeyi değerlendirmek ve kompozit malzemelerde katman ayrılması hasarından kaçınmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Nümerik çalışmalarda aynı zorlama şartlarında karma yapıştırıcı bağlantı yönteminin kullanılmasının bağlantı dayanımını geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

Machado ve diğeri (2018), CFRP malzeme kullanılarak oluşturulan karma yapıştırıcı bağlantılara sıcaklığın etkisini incelemek üzere $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda 1 mm/min hızda yarı statik ve 100 mm/min hızda aksel ani çekme deneyleri yapılmıştır. Karma yapıştırıcı bağlantı yönteminin, tek yapıştırıcı bağlantılara kıyasla bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki soyulma gerilmelerinin azaltılmasında etkili olduğunu belirtmiştir. Sonuçlar karma yapıştırıcı bağlantıların $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktakine göre daha yüksek hasar yüküne çıkabildiği ve daha yüksek enerji emilimi yaptığını göstermiştir. Buna ek olarak oda sıcaklığının her iki sıcaklık aralığındaki en iyi sonuçları verdiği belirtilmiştir.

Machado ve diğeri (2018), doğrulama için daha önce yayınlanmış deneysel veriler kullanılarak karma yapıştırıcı bağlantıların sayısal modellenmesine odaklanmıştır. Önerilen modeller dört farklı yapıştırıcı kullanılarak, karma yapıştırıcı bağlantıların çeşitli konfigürasyonları üzerinde yarı statik ve aksel ani çekme yüklerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Modeller, özellikle daha sert yapıştırıcılar için, incelenmekte olan çoğu konfigürasyonun davranışını tahmin edebilmiştir. Modelin esnekliği yüksek olan yapıştırıcıların aksel ani çekme yükü altındaki bağlantı mukavemetinin tahmin edilmesi hususunda daha az etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Zaeri ve Googarchin (2019), Alüminyum 6061 T6 malzemesinden kesilen deney numunelerinin Araldite 2015 ve Araldite AV138'in tek yapıştırıcı ve karma yapıştırıcı bağlantı düzeninde kullanıldığı 180 farklı tek tesirli yapıştırma bağlantılarına çevresel mukavemet korozyonunun etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deney numuneleri dört farklı nem koşulunda (kuru, %75,3 bağıl nem, %84,2 bağıl nem ve musluk suyuna daldırılmış) 0, 35, 80 ve 270 gün oda sıcaklığında bu ortamlara maruz bırakıldıktan sonra test edilmiştir. Çekme deney cihazında 1 mm/min ve 100 mm/min hızlarda yapılmış testlerin sonuçları kuru ortamda karma yapıştırıcı bağlantıların, tek yapıştırıcı bağlantılara kıyasla daha yüksek hasar yüklerine sahip olduğunu göstermiştir. Fakat karma yapıştırıcı bağlantıların nemli ortamda tek yapıştırıcı bağlantılara göre statik hasar yükünde en yüksek azalmaya sahip oldukları belirtilmiştir. Hasar yükünün analitik tahminleri de kuru ortamdaki deneysel sonuçlarla benzerlik göstermiştir.

Ramezani ve diğlerleri (2020), alüminyum malzemenin tek tesirli karma yapıştırıcılı bağlantılarında yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırılan malzeme kalınlığı ve yapıştırıcı oranlarının çeşitli konfigürasyonlarının, 1 mm/min hızda çekme deneyleri yapılmış ve aynı anda dijital görüntü korelasyonu tekniğı kullanılarak incelenmiştir. Karma yapıştırıcılı bağlantı tekniğinin bindirme bölgesinin uç kısımlarında oluşan soyulma gerilmelerini azalttığı ve bağlantı mukavemetini arttırdığı belirtilmiştir. Endüstrilerde karma yapıştırıcılı bağlantıların kullanılmasının, yapıştırıcıların kürleşme koşullarının farklı olabilmesi ve yapıştırıcıların birbirinden ayrılması işleminin kolay olmaması gibi sorunları olabileceğı belirtilmiştir. Bindirme bölgesindeki yapıştırıcı uzunlukları oranının soyulma gerilmesi üzerindeki etkisinin, yapıştırıcı kalınlığı arttırıldığında arttığı ve yapıştırılan malzeme kalınlığı arttırıldığında azaldığı sonucuna varılmıştır.

Kanani ve diğlerleri (2020), Alüminyum 6082 T6 ve %50 cam elyaf takviyeli poliamid reçine matrisli kompozit malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantıları incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı iki farklı yapıştırıcının tek yapıştırıcılı ve karma yapıştırıcılı bağlantı düzeninde kullanıldığı tek tesirli yapıştırma bağlantılarının dayanımını arttırmaktır. Bağlantı dayanımını arttırmak için yapıştırılan malzemelerin bindirme bölgesine çentikler ekleyerek maksimum gerilme yığılması en aza indirilmiştir. Bu çentiklerin en iyi olanını bulmak için çeşitli çentik tasarımları ile bir dizi tek tesirli yapıştırma bağlantı modelini sonlu elemanlar yöntemiyle test etmişlerdir. Optimum tasarım parametreleri tek ve karma yapıştırıcılı bağlantı düzeninde yapıştırılan malzemelerin aynı ve farklı olduğu tek tesirli bağlantıları optimize etmek için kullanılmıştır. Yeni geometrik modifikasyonların çekme deney cihazında 0,5 mm/min hızda yapılan deney sonuçları, farklı yapıştırılanlara sahip bağlantılardaki maksimum gerilmeleri önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Buna ek olarak deneysel sonuçlar bağlantı mukavemetinde önemli ölçüde gelişme olduğunu göstermiştir.

Karma yapıştırıcılı bağlantıların literatürü başlangıçtan günümüze kadar incelenmiştir. Tez kapsamında karma yapıştırıcılı tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ön darbe sonrasında çekme ve üç nokta eğilme deneyleri olması sebebiyle tek yapıştırıcılı bağlantılarda darbe ve üç nokta eğilme deneylerini içeren deneysel ve sayısal çalışmalarda incelenmiştir. Literatür özetinin bundan sonraki kısmında

yapıştırma bağlantılarında darbe ve eğilme çalışmalarını içeren makaleler tarih sırasına göre sıralanmıştır.

Bouiadjra ve diğerleri (2007), ölçüleri 254x254x3 mm olan bir alüminyum plakanın merkezinde bulunan çatlağın onarımı için çatlağın üzerine 127x127x2 mm ölçülerinde kompozit yama karma yapıştırıcılı bağlantı tekniği kullanılarak yapıştırılmıştır. Kullanılan teknik sonlu elamanlar analizi için modellenmiştir. Yamanın yapıştırıcı uygulaması yapılan bindirme bölgesinin uç kısımlarında daha esnek bir yapıştırıcının kullanılması onarımın bağlantı mukavemetini arttırmıştır.

Aga ve Woldesenbet (2007), grafit ve kompozit malzemelerinin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı kalınlığının darbe davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. Darbe sonrasında yapıştırıcı tabakasında oluşan hasarı değerlendirmek için ultrasonik tarama yapılmıştır. Darbe deneyleri ağırlık düşürme cihazı kullanılarak üç farklı yapıştırıcı kalınlığında (0,17/0,25 ve 0,48 mm) ve üç farklı enerji seviyesinde (5, 10 ve 20 J) yapılmıştır. Darbe enerjisi ne kadar yüksek olursa, ulaşılan maksimum temas kuvvetinin o kadar büyük olduğu ve bunun yapıştırıcı tabakada daha fazla hasara yol açtığı belirtilmiştir. Tüm enerji seviyelerinde yapılan darbe testlerinde yapıştırıcı kalınlığının artırılmasıyla maksimum temas kuvvetinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Silva ve Adams (2007), titanyum alaşımlı metal ve bismaleimide reçine matrisli kompozit malzemelerden oluşturulan çift tesirli yapıştırma bağlantılarının sırasıyla -50, 22, 100 ve 200° C'de 1 mm/min hızda çekme deneyleri yapılmıştır. Kompozitte katman ayrılması hasarı, bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilme yığılması nedeniyle, -50 ve 22 °C' de ki testler sırasında meydana gelmiştir. Karma yapıştırıcılı bağlantılar, rijit yapıştırıcının tek başına kullanıldığı yapıştırma bağlantılardan daha yüksek hasar yükü göstermiş, bu da kompozit malzemede meydana gelebilecek katman ayrılması hasarının karma yapıştırıcılı bağlantı yöntemiyle ertelendiğini göstermiştir.

Marques ve Silva (2008), Alüminyum 6063 T6 malzemesinden yapılmış deney numunelerinin alın altına yapıştırılmasında birleşme noktasının altına ve üstüne alüminyum malzemedan küçük birer parça takviye kullanılmıştır. Yapıştırma için kullanılan alüminyum parçalarına sırasıyla 0°, 30°, 45° ve 60° pahlı olacak şekilde bindirme bölgesinin uç kısımlarına pah açılmıştır. Çekme deney cihazında 1 mm/min

hızda yapılan deneyler sonucunda malzemeye pah açılmasının karma yapıştırıcılı bağlantıların mukavemeti üzerinde çok az etkisi olduğu görülmüştür. Deneyel sonuçları sonlu elemanlar analizi ile karşılaştırdıklarında birbiriyle uyumlu olduğu ve malzemeye pah kırmanın sadece rijit yapıştırıcının tek başına kullanıldığı bağlantılarda yararlı olacağı sonucuna varılmıştır.

Sawa ve diğerleri (2010), kademeli yapıştırılan bağlantı yönteminde yapıştırılan malzemelerinin ve yapıştırıcı kalınlığının bağlantı mukavemetine etkilerini hem deneysel hem de sonlu elemanlar analiziyle incelemiştir. Bindirme bölgesi merdiven gibi basamaklı olan yapıştırılan malzemeler çelik ve alüminyumdan imal edilmiştir. Farklı yapıştırıcı kalınlığına sahip kademeli yapıştırılan malzemeli bağlantıların 980 N'lik basma kuvveti ile dört nokta eğilme deneyleri yapılmıştır ve sonlu elemanlar analiziyle karşılaştırılmıştır. Yapıştırılan malzemelerin elastite modülü arasındaki fark ve yapıştırıcı kalınlığı azaldıkça ara yüzlerin uç kısımlarındaki maksimum asal gerilmelerin azaldığı belirtilmiştir. Aynı zamanda yapıştırılan kademesi arttıkça da azalacağı belirtilmiştir. Yapıştırılan malzemelerinin aynı olmasının farklı olmasından daha iyi bir bağlantı mukavemeti sağladığı sonucuna varılmıştır.

Sayman ve diğerleri (2013), vakum destekli reçine infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiş cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında enine darbe ve sıcaklık faktörlerinin etkilerini incelemiştir. İki farklı yüzey kalitesine (pürüzlü ve pürüzsüz) sahip yapıştırma bağlantıların oda sıcaklığında dört farklı darbe enerji seviyesinde (5, 10, 15 ve 20 J) ön darbe deneyleri yapılmıştır. Ön darbe deneyleri yapılmış yapıştırma bağlantıların dört farklı sıcaklık (-20, 23, 50 ve 80 °C) değerinde 1 mm/min hızda çekme deneyleri yapılmıştır. Pürüzlü yüzeylere sahip yapıştırma bağlantılarında pürüzsüz olanlardan daha yüksek hasar yükü elde edilmiştir. Yapıştırma bağlantıların yük taşıma kapasitesinin oda sıcaklığı (23 °C) haricindeki diğer sıcaklıklarda azaldığı görülmüştür. Bağlantı hasar yükünün 5, 10 ve 15 J ön darbe sonucunda kademeli olarak azaldığı fakat 20 J ön darbe sonucunda artış gösterdiği belirtilmiştir. 20 J ön darbe sonrası yapılan çekme deneylerinde hasar yükündeki artışın darbe sonrası yapıştırılan malzemedeki oluşan delik sebebiyle meydana gelen mekanik kilitlenme etkisi olduğu belirtilmiştir.

Nakano ve diğeri (2013), açılı bindirme bağlantısında bindirme açısının, yapıştırıcı kalınlığının ve yapıştırıcı elastite modülünün, bağlantı mukavemetine ve gerilme dağılımına etkilerini incelemiştir. Açılı bindirme bağlantılarının dört nokta eğilme deneyleri ile hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Yapıştırıcı elastite modülü arttıkça ve yapıştırıcı kalınlığı azaldıkça bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilmelerin azaldığı belirtilmiştir. Yapılan dört nokta eğilme deneyleri bindirme açısının 60° olduğu durumda bağlantı mukavemetinin en yüksek değerine ulaştığı sonucuna varılmıştır.

Belingardi ve Scattina (2013), otomotiv yapılarında sıklıkla kullanılan bir enine kesite sahip kutu kirişin yapısal davranışı, yarı statik yükleme koşullarında üç nokta eğilme testleriyle incelenmiştir. Kutu kiriş, bir düz plaka ile U kesitli kıvrılmış çeliğin birleşiminden oluşmaktadır. Üç farklı tip numune konfigürasyonu incelenmiştir. Bunların ilki kompozit plakanın U kesitli kıvrılmış çeliğe yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantı, ikincisi plaka malzemesinin de çelik olduğu ve U kesitli kıvrılmış çeliğe yapıştırıcı ile birleştirildiği bağlantı, üçüncüsü plaka malzemesinin çelik ve U kesitli kıvrılmış çeliğe punta kaynağı ile birleştirildiği bağlantıdır. Farklı malzemelerin yapıştırılmasıyla elde edilen bağlantının kutu kirişin ağırlığını %28 azalttığı belirtilmiştir. Yapılan üç nokta eğilme testleri, farklı malzemelerin yapıştırılmasıyla elde edilen bağlantının daha fazla enerji emilimi gerçekleştirdiğini ve maksimum yük kapasitesinin daha fazla olduğunu göstermiştir.

Wu ve diğeri (2013), CFRP malzemelerinin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında bindirme uzunluğu ve genişliğinin bağlantı mukavemetine etkilerini incelemiştir. Bindirme uzunluğu ve genişliğinin bağlantı mukavemetini nasıl etkilediğini araştırmak için üç farklı bindirme uzunluğu (20, 30 ve 40 mm) ve üç farklı bindirme genişliğine (20, 25 ve 30 mm) sahip yapıştırma bağlantıların 1 mm/min hızında üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. Bindirme genişliği ve uzunluğu arttıkça bağlantının maksimum hasar yükünün de artacağı sonucuna varılmıştır. Bağlantı mukavemetinde bindirme uzunluğundan ziyade bindirme genişliğinin daha etkili olduğu belirtilmiştir. Üç nokta eğilme deneylerinden sonra farklı darbe enerjileri altında hasar sürecini keşfetmek için düşük hızda enine darbe (1 J den 4,5 J e kadar) deneyleri yapılmıştır. Üç nokta eğilme deneyi sonuçlarıyla enine darbe deneyi sonuçları, maksimum hasar yükü ve emilen enerji değerleri bakımından

karşılaştırılmıştır. Enine darbe testlerinde, çarpma enerjisi arttıkça çatlama uzunluğu ve enerji emiliminin arttığı sonucuna varılmıştır.

Reis ve diğerleri (2014), Docol 1000 yüksek dayanımlı elastik çelik malzemelerin tek tarafından takviyeli alın bağlantısında alın yüzeyleri arasındaki mesafenin darbe davranışı üzerindeki etkileri incelemiştir. Alın yüzeyleri arasında üç farklı uzunluk (0, 10, 20 mm) bulunan deney numunelerine farklı enerji seviyelerinde darbe testleri yapılmıştır. Benzer özellikteki numunelere 5 mm/min hızında üç nokta eğilme testide yapılmıştır. Alın yüzeyleri arasındaki mesafesinin artmasıyla yapıştırılan malzemelerin ayrılmadan taşıyabileceği enerji miktarı artmıştır. Alın yüzeyleri arasındaki 0, 10 ve 20 mm mesafelerde sırasıyla yapıştırma bağlantısının taşıdığı enerji miktarı 61,6/75,1 ve 77,5 J değerindedir. Üç nokta eğilme testinde de sonuçlar darbe testlerindeki sonuçlara benzer çıkmıştır. En fazla yükü alın yüzeyleri arasındaki mesafenin 20 mm olduğu numune taşımıştır ve maksimum ortalama yük değeri 1496,7 N çıkmıştır. Alın yüzeyleri arasındaki mesafenin darbe davranışı üzerindeki etkilerin incelendiği deneysel sonuçların daha derinlemesine anlaşılması için deneysel çalışmayı tekrarlayan sayısal bir model geliştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizine göre alın yüzeyleri arasındaki mesafenin olmadığı durumda soyulma gerilmesinin maksimum olduğu görülmüştür. Sonlu elemanlar analizinde aynı bindirme uzunluğunda alın yüzeyleri arasındaki mesafenin artmasının gerilmeyi düşürdüğü ancak aynı enerjiyi dağıtmak için bindirme uzunluğunun artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çallıoğlu ve Ergün (2015), cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin, tek tesirli yapıştırma bağlantılarında enine darbe sonrası üç nokta eğilme deneyleri ile darbe sonrası davranışları incelenmiştir. Kompozit malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında üç farklı bindirme uzunluğuna (20, 40 ve 60 mm) sahip deney numunelerinin önce darbe cihazında farklı enerji seviyelerinde (10, 20 ve 30 J) enine darbe deneyleri yapılmış ardından 2 mm/min hızda üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. En düşük eğilme yükü, 20 mm bindirme uzunluğuna sahip olan ve merkez noktasında 30 J ön darbe uygulanmış kompozit plakalarda meydana gelmiştir. Bununla birlikte, 10 J enerji seviyesinde 20 mm bindirme uzunluğuna sahip kompozitin eğilme yükü değeri, diğer enerji seviyelerinde hem darbe vurulmuş hem de darbe vurulmamış kompozitlere kıyasla maksimum olarak bulunmuştur. Ön darbe deneyi yapılmamış 40

ve 60 mm bindirme uzunluğuna sahip kompozit plakaların eğilme yükü değerlerinin, darbeli kompozit plakalara göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bindirme bölgesinin uzunluğundaki artışla birlikte eğilme yüklerinin artacağı sonucuna varılmıştır.

Çallıoğlu ve Ergün (2015), cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında enine darbe davranışlarını incelemiştir. Kompozit malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında darbe davranışını incelemek için üç farklı bindirme uzunluğuna (20, 40 ve 60 mm) sahip deney numunelerinin darbe cihazında farklı enerji seviyelerinde (5, 10, 15, 20, 25, 30 J) testleri yapılmıştır. Yapılan deneyler bindirme bölgesi uzunluklarının ve darbe enerji seviyelerinin, kompozitlerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında darbe davranışını önemli ölçüde etkilediğini gösterilmiştir. Bindirme bölgesinin uzunluğunun azalmasıyla kompozitin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında kritik hasar seviyesinin düştüğü ama emilen enerjisi seviyesinin arttığı belirtilmiştir.

Liu ve diğerleri (2019), Alüminyum 5182 malzemesinin tek tesirli yapıştırma bağlantıları üzerinde yapılan bu çalışmada, darbe yüzeyinin ve darbe enerjisinin yapıştırma bağlantılar üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapıştırma bağlantı numuneleri sıcak pres makinaları ile özel krleşme sıcaklığı ve krleşme basıncında üretilmiştir. Deneylerde önce 0, 10, 20 ve 30 J'lik enine düşük hızlı bir n darbe ardından 1,3 mm/min hızda eksenel çekme testi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar karbon fiber takviyeli plastiklerin darbe yüzeyinin, alüminyum darbe yüzeyine kıyasla daha iyi bir yapısal bütünlük ve bağlantı dayanımı sağladığını göstermiştir.

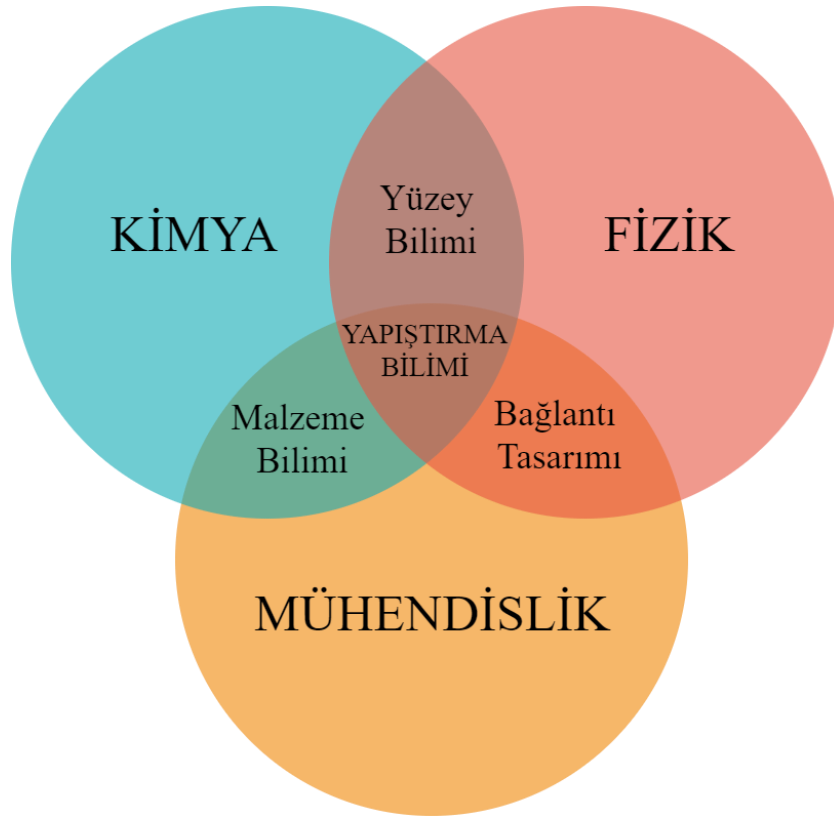
Machado ve diğerleri (2019), CFRP ve Alüminyum 6060 T6 malzemelerinin tek tesirli yapıştırma bağlantılarının yarı statik ve eksenel ani çekme yükleri altındaki davranışlarını incelemiştir. Otomotiv endüstrisinin gereksinimlerini takip eden çeşitli test sıcaklıkları (-30, 24 ve 80 °C) dikkate alınmıştır. Yapıştırma bağlantılarının çekme deney cihazında üç ayrı sıcaklık için 1 mm/min hızda yarı statik ve 100 mm/min hızda eksenel ani çekme deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar sıcaklığın etkisinin çok büyük olmadığını ve modern çarpışmalara dayanıklı yapıştırıcıların kullanımıyla otomotiv endüstrisinde kullanılan yapıştırma bağlantıların iyi enerji sönümlemesi yapacağını göstermiştir.

Kanani ve diğeri (2020), Alüminyum 6082 T6 ve poliftalamid (PPA) malzemelerinin kullanıldığı aynı malzemeli ve farklı malzemeli tek tesirli yapıştırma bağlantılarının kırılma mekanizmasını, yapıştırılan malzeme sertliğinin ve kullanılan yapıştırıcının ne ölçüde etkilediğini incelemiştir. Farklı yapıştırıcı ve yapıştırılan konfigürasyonları hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle analiz edilmiştir. Yapıştırma bağlantılarının ayrılma, üç nokta eğilme ve çekme deneyleri yapılmıştır. Maksimum kırılma yükü değerinin AL-AL bağlantılarında, AL-PPA ve PPA-PPA bağlantılarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Rijit yapıştırıcı tek tesirli bağlantılarda yapıştırılan malzeme sertliğinin maksimum kırılma yükünü etkilediği ama esnek yapıştırıcı bağlantılarda yapıştırılan malzeme sertliğinin maksimum kırılma yükünü etkilemediği sonucuna varılmıştır.

2. YAPIŞTIRMANIN TEMEL KAVRAMLARI

Yapıştırıcı kullanılarak yapılan birleştirme işlemine yapıştırma bağlantı denir. Yapıştırma bağlantılarda yapıştırıcı ile birleştirilen katı malzemelere yapıştırılan denir. Yapıştırma bağlantılarının temel amacı kullanımları sırasında maruz kalacakları gerilimlere dayanacak şekilde iki malzemeyi birbirine bağlamaktır.

Yapıştırıcılar binlerce yıldır kullanılmaktadır, ancak 100 yıl öncesine kadar büyük çoğunluğu kemik, deri, balık, süt ve bitki gibi doğal ürünlerden üretilmekteydi. Yaklaşık 1900'den beri, sentetik polimerlere dayalı yapıştırıcılar piyasaya sürüldü ve bugün yapıştırıcıların ve sızdırmazlık maddelerinin birçok endüstriyel kullanımı vardır (Petrie 2006). Evde, endüstride, ulaşımda ve diğer birçok alanda herhangi bir şekilde yapıştırıcı veya sızdırmazlık maddesi kullanmayan bir ürünü hayal etmek zordur.



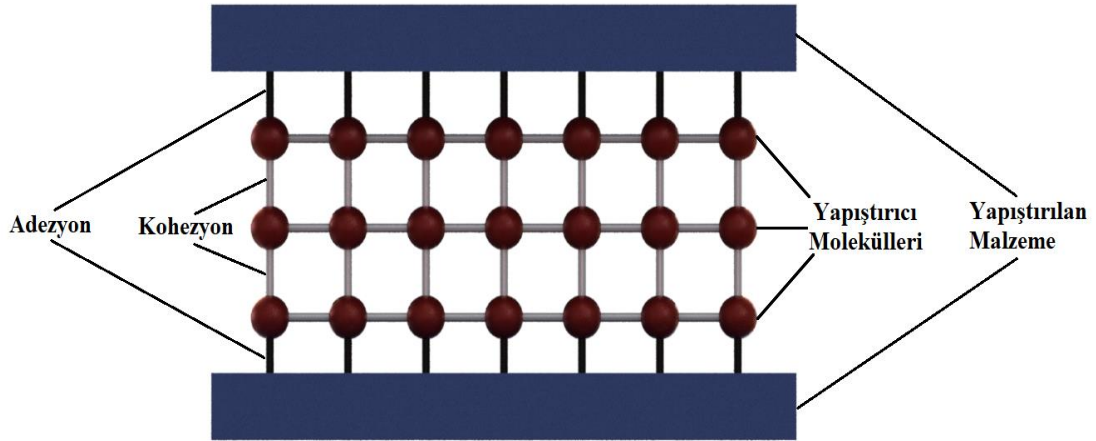
Şekil 2.1 Yapıştırma biliminin disiplinler arası ilişki şeması (Petrie 2006).

Yapıştırma bağlantılarının yük taşıma kapasitesi ve dayanıklılığı bağlantı tasarımı, yüklerin uygulanma şekli ve bağlantının maruz kalacağı ortam gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Bu nedenle, yapıştırma teknolojisi ile iyi sonuçlar elde

etmek için yüzey kimyası, polimer kimyası ve fiziği, malzeme mühendisliği, makine mühendisliği vb. gibi çeşitli bilimlerde bilgi sahibi olmak gerekir. Yapıştırma biliminin disiplinler arası bağlantılı bir bilim alanı olduğunu gösteren şema Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

2.1 Yapıştırma İşlemi

Yapıştırma işlemini daha iyi tanımlayabilmek için standartlarda yapıştırma terimlerinin açıklamalarına bakmak gerekir. ASTM D 907 standardında yapıştırma işlemindeki terimler açıklanmıştır. Yapıştırıcı, parça yüzeylerini bir arada tutan madde olarak; yapıştırılan, başka bir parçaya yapıştırıcı ile birleştirilen malzeme olarak; yapıştırma işlemi ise yapıştırılan malzemelerinin yapıştırıcı ile birleştirilmesi olarak tanımlanmıştır. Yapıştırıcının kendi molekülleri arasındaki adezyon ve yapıştırıcıyla yapıştırılan malzeme arasındaki kohezyon olayları yapışma işleminin temelini oluşturmaktadır. Adezyon ve kohezyon olaylarının şematik gösterimi Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Adezyon ve kohezyon olaylarının şematik gösterimi.

2.1.1 Adezyon

Farklı türdeki moleküllerin birbirine yapışmasına adezyon denir. Yapıştırılan malzeme yüzeyi ile yapıştırıcı yüzeyinin ara yüzey kuvvetleri (valans kuvvetleri) tarafından bir arada tutulması olayıdır. Yapıştırma işleminin iyi olabilmesi için

yapıştırılan malzeme yüzeyindeki pürüzlere yapıştırıcının tam olarak temas etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gerekir. Bununla birlikte yapıştırılan malzeme yüzeyinde yağ ve kir bulunması yapıştırma işlemini olumsuz etkiler. Yapıştırılan malzemenin yüzeyi yağ ve kirlere tam olarak arındırılmazsa, yapıştırıcı yüzeyi tam olarak ıslatamaz ve bu durum bağlantının zayıflamasına yol açar.

Baldan (2012), adezyon teorilerini altı alt başlıkta incelemiştir;

- Mekanik kilitleme teorisi
- Adsorbisyon teorisi
- Difüzyon teorisi
- Elektrostatik teori
- Zayıf sınır tabaka teorisi
- Kimyasal bağ teorisi

Aslında, bu teorilerin her biri, temas halindeki katıların doğasına bağlı ve sistemin oluşum koşullarına göre bir dereceye kadar geçerlidir. Bu nedenle, birbirlerini reddetmezler ve önemleri büyük ölçüde seçilen sisteme bağlıdır.

2.1.2 Kohezyon

Aynı türdeki moleküllerin birbirine yapışmasına kohezyon denir. Yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir. Yapıştırma işleminde zayıflık olmaması için adezyon ve kohezyon kuvvetlerinin yaklaşık eşit olması gerekir. Yapıştırma bağlantılarına standartlara uygun olarak yapılan testlerde kohezyon bağlarının kopması yani kohezyon hasarı ile bağlantının ayrılması beklenmektedir. Yapıştırma bağlantılarda oluşan kohezyon bağının şematik gösterimi Şekil 2’de verilmiştir.

2.2 Yapıştırma bağlantılarını etkileyen faktörler

Yapıştırma bağlantıların ana bileşeni olan yapıştırıcılar, formülasyonlarında yer alan polimerik maddelerin bazı fiziki ve kimyasal faktörlerden etkilenmesi sonucu yapışma sağlamaktadır. Yapıştırmayı etkileyen faktörlerin en önemlileri sırasıyla bu başlığın altında kısaca açıklanmaktadır (Kaya 2004). Yapıştırma bağlantıların yapımında bu faktörlerden biri veya birkaçı etkili olabilmektedir. Bu sebeple yapıştırma bağlantıların hazırlanmasındaki ana bileşen olan yapıştırıcılar kadar fiziksel ve kimyasal faktörlerde önemlidir.

2.2.1 Sıcaklık

Yapıştırma bağlantılarında kullanılan yapıştırıcıların büyük çoğunluğu oda sıcaklığında etkili olurlar. Ancak oda sıcaklığında yapıştırıcıların kürleşmesi uzun zaman alabilir bu süreyi kısaltmak için oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklık değerlerinde kürleşme gerçekleştirilebilir. Sıcaklık çoğu kimyasal reaksiyonda olduğu gibi yapıştırıcıların kürleşmesinde de reaksiyon hızını arttırmaktadır. Ancak sıcaklığın kontrol edilmesi gerekir aksi halde yapıştırıcıyı oluşturan polimerik maddenin bozulması ya da yapıştırılan malzemenin zarar görmesi söz konusu olabilmektedir. Sıcaklık kontrolü için yapıştırıcı firmaları yapıştırıcılarının kürleşmesi için farklı sıcaklıklarda bekletilmesi gereken süreleri bilgi metni olarak sağlamaktadır.

2.2.2 Basınç

Özellikle film ve bant halindeki yapıştırıcıların kullanıldığı yapıştırma bağlantıları için önemli bir faktördür. Bu tip bağlantılarda yapıştırmanın sağlanabilmesi için hafif bir baskı uygulaması yapıştırıcıların etkin olmasını sağlamaktadır. Ayrıca basınç uygulaması sıcaklık kontrolüyle birlikte yapıldığında yapıştırma bağlantıların kürleşme süresini hızlandırmaktadır.

2.2.3 Zaman

Yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcının kürleşmesi birkaç saniyeden birkaç güne varan süreler aralığında gerçekleşmektedir. Bu zamanın kısaltılması için yapıştırıcı üreticileri yapıştırıcıların hangi basınç ve sıcaklık değerinde kürlenmenin hızlı olacağını belirtmektedirler.

2.2.4 Yapıştırılan malzeme yüzeyinin kalitesi

Yapıştırma bağlantılarında yapıştırılan malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve temizliği yapıştırma bağlantıların dayanımını doğrudan etkilemektedir. Yüzey pürüzlülüğünün düşük olduğu ($R_a < 1$) parlak yüzeyli malzemelerin yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcının yüzeye tutunma olasılığının azalması sebebiyle bağlantı dayanımı düşük çıkmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün yüksek olduğu ($R_a > 5$) kaba yüzeyli malzemelerin yapıştırılmasında tam ıslanma ve adezyon gerçekleşmediği için gene bağlantı dayanımı azalmaktadır. Yapılan çalışmalar yüzey pürüzlülüğü için optimum değer R_a 1-3 μm olduğu belirtilmektedir (Kwon ve Lee 2000).

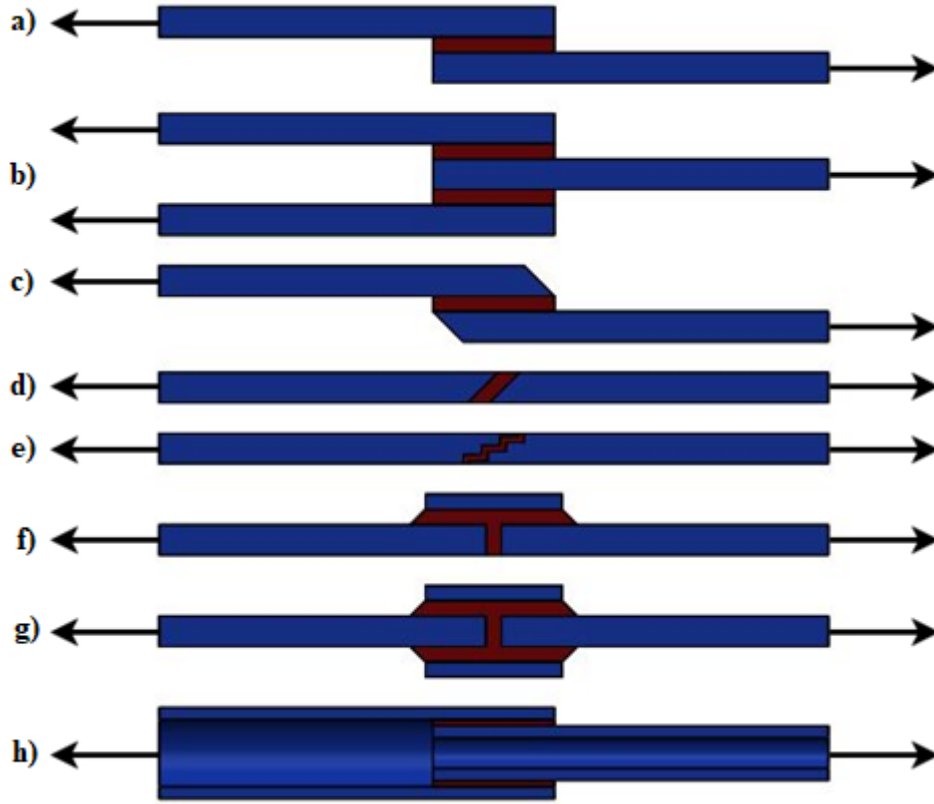
2.2.5 Yapıştırıcı kalınlığı

Yapıştırma bağlantıların dayanımını doğrudan etkileyen bir diğer etkende yapıştırıcı kalınlığıdır. Yapıştırıcı kalınlığı silikon misina ipi, bakır tel ve yapıştırıcı bant gibi çeşitli şekillerde ayarlanabilmektedir. Yapılan çalışmalar yapıştırıcı kalınlığının optimum değerinin 0,1-0,3 mm arasında olduğunu göstermiştir.

2.3 Yapıştırma Bağlantı Geometrileri

Yapıştırma bağlantılar basma, çekme, kayma, soyulma ve tüm bu yükleme durumlarının kombinasyonu olarak yüklenebilir. Yapıştırma bağlantılarının kullanım alanlarındaki yükleme durumları göz önüne alındığında dayanımı yüksek bir bağlantı elde etmek için yükleme durumuna uygun olarak bağlantı geometrisi seçimi yapılması

gerekmektedir (Şekercioğlu 2001). Mühendislikte en yaygın kullanılan sekiz bağlantı tipi Şekil 2.3'te verilmiştir.



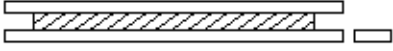
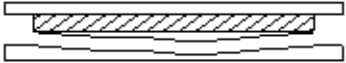
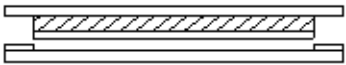
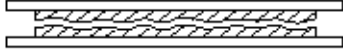

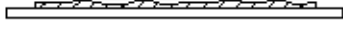
Şekil 2.3 Temel yapıştırma bağlantı tipleri.

- | | |
|----------------------------|--|
| a) Tek tesirli bağlantı | e) Kademeli alın bağlantı |
| b) Çift tesirli bağlantı | f) Tek taraftan takviyeli alın bağlantı |
| c) Pahlı bindirme bağlantı | g) Çift taraftan takviyeli alın bağlantı |
| d) Açılı alın bağlantı | h) Silindirik bindirme bağlantı |

2.4 Yapıştırma Bağlantılarındaki Hasar Tipleri

Farklı yükleme durumlarında yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için, meydana gelen hasar tiplerinin karakterize edilmesi gerekir. Yapıştırma bağlantılar kullanım yerlerine göre farklı gerilmelere maruz kalabilir. Yapıştırma bağlantıların maruz kaldıkları temel gerilmeler; çeki, kayma, burulma, soyulma ve yarıma gerilmeleridir. Bu temel gerilmelerin yanı sıra birkaçının bir arada bulunduğu birleşik gerilmelere de maruz kalabilirler. Yapıştırma bağlantılarında statik veya dinamik yükler altında genellikle

iki tip hasar modeli ile karşılaşılmaktadır (TS EN ISO 10365). Bu hasar tiplerinden biri adezyon diğeri ise kohezyon hasarıdır Şekil 2.4'te bu hasar tipleri gösterilmiştir.

Hasar Tipleri	
Yapıştırılan malzemede meydana gelen hasarlar	 <p>Yapıştırılan malzemelerin birinde veya ikisinde de hasarın olması</p>
	 <p>Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı</p>
	 <p>Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar</p>
Yapıştırıcıda meydana gelen hasarlar	 <p>Kohezyon hasarı</p>
	 <p>Özel kohezyon hasarı</p>
	 <p>Adhezyon hasarı</p>

Şekil 2.4 Hasar tipleri (TS EN ISO 10365 2001).

2.4.1 Adezyon Hasarı

Yapıştırıcının yapıştırılan malzeme yüzeyinden tamamen ayrılması sonucu gerçekleşmektedir. Adezyon hasarı temel olarak yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki adezyon bağlarının kopması sonucu oluşmaktadır. Yapıştırma bağlantılarında adezyon hasarı oluşumu yapıştırma öncesi yüzey temizleme işlemlerinde ya da yapıştırma esnasında problem olduğunu göstermektedir. Yapıştırılan malzeme

yüzeyinin yapıştırma işlemi için uygun pürüzlülük değerinde olmaması, yanlış yapıştırıcı seçimi, yapıştırılan malzeme yüzeyinin iyi temizlenmemiş olması, yapıştırma işleminin uygun koşullar altında yapılmamış olması ve bağlantının maruz kaldığı gerilme durumlarına uygun olmaması gibi sebeplerden oluşmaktadır. Tek bindirmeli bir bağlantıda oluşacak adezyon hasarının nasıl olacağı Şekil 2.5'te görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi adezyon hasarı sonucu yapıştırıcının büyük çoğunluğu yapıştırılan malzeme yüzeylerinden birinde kalmaktadır.



Şekil 2.5 Adezyon hasarının üç boyutlu modellemesi.

2.4.2 Kohezyon Hasarı

Yapıştırıcı moleküllerini bir arada tutan kohezyon bağlarının kopması sonucu gerçekleşmektedir. Dış etkiler ile oluşan aşırı yükleme, sıcaklık ve yaşlanma olayları sonucu meydana gelir. Normal şartlar altındaki yüklemelerde ve deneysel çalışmalarda kohezyon hasarının meydana gelmesi istenir. Uygun yükleme, uygun yapıştırıcı ve uygun geometri seçimi yapılarak önlemler alınabilir. Tek bindirmeli bir bağlantıda oluşacak kohezyon hasarının nasıl olacağı Şekil 2.6'da görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi kohezyon hasarı sonucu yapıştırıcının her iki yapıştırılan malzeme yüzeyinde de kalmaktadır.



Şekil 2.6 Kohezyon hasarının üç boyutlu modellenmesi.

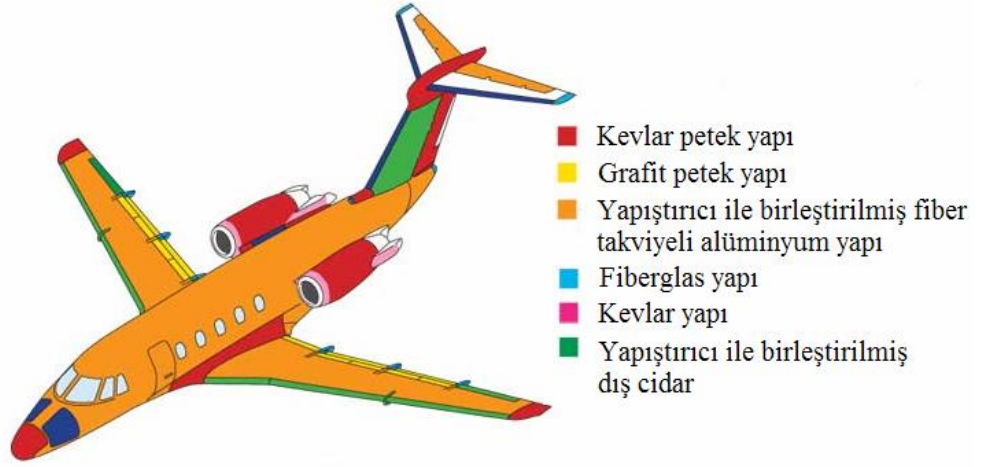
2.5 Yapıştırma Bağlantılarının Kullanım Alanları

Yapıştırma bağlantılar başta havacılık, uzay ve otomotiv endüstrileri olmak üzere hafiflik ve dayanım gereken tüm alanlarda kullanılmaktadır. Yapıştırma bağlantılar yapıştırılan malzemeye zarar vermeden çok daha iyi bir gerilme dağılımı sağlamakta ve aynı zamanda estetik görünmektedir. Son yıllarda kullanım alanı oldukça genişlemiş ve birçok alanda yapıştırma bağlantıların avantajlarından faydalanılmaktadır. Yapıştırma bağlantıların yaygın olarak kullanıldığı endüstrilerin bazılarında bu başlık altında sırasıyla yer verilmiştir.

2.5.1 Uçak Endüstrisinde Kullanımı

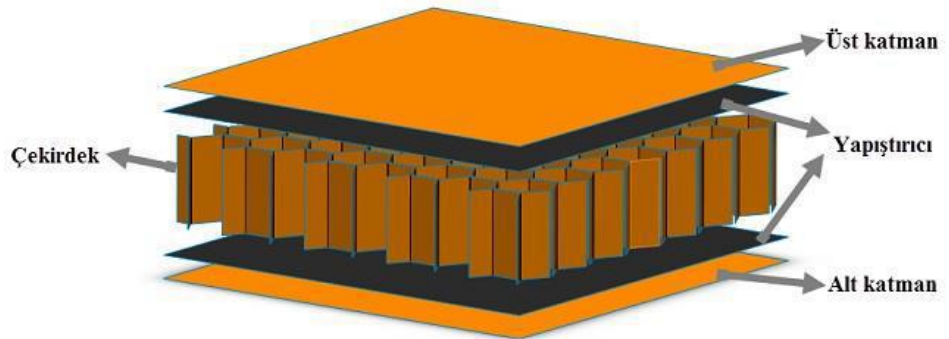
Uçak endüstrisinde yapıların hafif ve dayanımlarının yüksek olması istenmektedir. Bu durum uçaktaki birleştirme işlemlerinin ağırlığı çok fazla arttırmadan yapılmasını gerekli kılmaktadır. Yapıştırma bağlantılar hafif ve dayanımının yüksek olması sebebiyle uçak endüstrisi için en iyi çözümü sunmaktadır. Aynı zamanda yapıştırma bağlantıların estetik görünümü de aerodinamik açısından uçak endüstrisine fayda sağlamaktadır. Tüm bu avantajları sebebiyle yapıştırma bağlantılar uçak endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bazen de uçak kanatlarında kullanılan perçinli bağlantılarda dayanımı arttırmak için hibrit bağlantı olarak perçinli

yapıştırma bağlantılar kullanılmaktadır (Özenç 2007). Uçak gövdesinde yapıştırma bağlantılarının kullanımı Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Yapıştırma bağlantılarının uçak yapımında kullanıldığı yerler (Özenç 2007).

Havacılık endüstrisinde iki temel yapıştırma sınıfı vardır. Bunlardan ilki, epoksi, fenolik veya akrilik yapıştırıcılarla, yapıştırılan malzemeler arasındaki yükü aktaran yapısal yapıştırımadır. İkincisi, yapıştırılan malzemeler arasında korozyonu engelleyen sızdırmazlık özellikli yapıştırıcılardır. Bu yapıştırma sınıflarının fiziksel sertlikleri büyük ölçüde farklılık gösterir, ancak uçak endüstrisinde kullanım amaçları iki ortak özelliği barındırması sebebiyledir. Birincisi yapıştırıcının veya dolgu macununun tüm kullanım ortamlarında, kullanıldığı yapılarda ömrü boyunca yapışık kalması, ikincisi ise kullanıldığı yapı kırılrsa dahi yapıştırıcının bozulmamasıdır. Havacılık endüstrisindeki köpük yapıların birleştirilmesinde yapıştırıcı kullanımı Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Yapıştırma bağlantılarının havacılık endüstrisindeki köpük yapılarında kullanımı (Öztürk 2009).

2.5.2 Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı

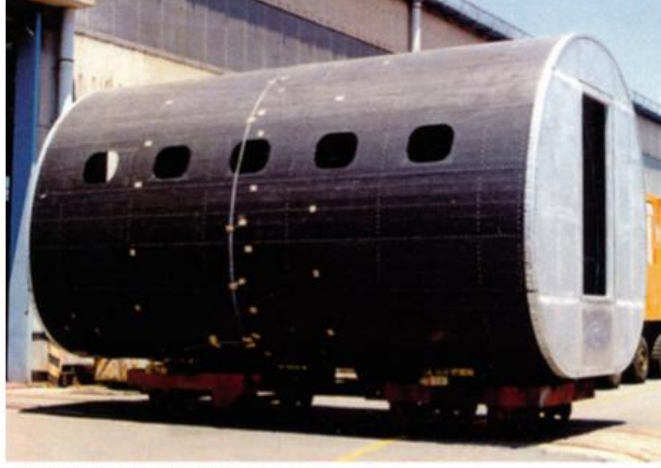
Otomotiv endüstrisinde yapıştırıcıların kullanımı aracın ön camının yapıştırılması işlemi ile başlamıştır. Bu yapıştırma işleminde camın sızdırmazlığı ve estetik görünümü için yapıştırma bağlantı tercih edilmiştir. Otomotiv endüstrisinde artan hafiflik talebi ile yapıştırma bağlantıların kullanımı yaygınlaşmıştır. Otomotiv endüstrisinde yapıştırıcıların kullanım amacını ve kullanım yerini gösteren görsel Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9 Yapıştırma bağlantıların otomotiv endüstrisindeki kullanım alanları (Pocius 2012).

2.5.3 Demiryolu Taşımacılığında Kullanımı

Demiryolu taşımacılığı ile insanların gidecekleri yere seyahati ve yüklerin hedef noktalara taşınması yapılmaktadır. Taşımacılığın sağlandığı vagonların ağırlıkları demiryolu taşımacılığı yönetmelikleriyle sınırlandırılmıştır. Vagonların yapıldığı malzemelerin ve kullanılan birleştirme yöntemlerinin hafiflik ve dayanımı aynı anda sunması beklenmektedir. Bu beklentinin karşılanmasında kompozit malzemelerin ve yapıştırma bağlantıların kullanımı birçok avantaj sunmaktadır.



a) CFRP vagonun dış yapısı



b) CFRP vagonun iç yapısı

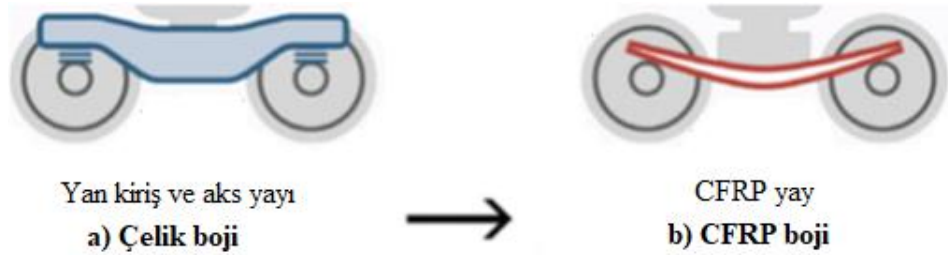
Şekil 2.10 Yapıştırma bağlantıların kompozit malzemenin yapılmış vagonu kullanımı (Pizzi ve Mittal 2018).

CFRP malzeme kullanılarak yapılmış prototip bir vagonun iç ve dış yapısı Şekil 2.10'da verilmiştir. Bu vagonu kompozit malzeme kullanımı ve bu malzemenin birleştirme yöntemi olarak yapıştırıcı kullanımı vagonun çelik yapıdan yapıldığı duruma göre çok ciddi bir ağırlık azaltmasına olanak tanımıştır. Özellikle bu tarz yapılarda hibrit yapıştırma yöntemlerinden perçinli yapıştırma ve civatalı yapıştırma bağlantı yöntemleri tercih edilmektedir. Demiryolu taşımacılığında vagonların ray üzerinde hareketini sağlayan bojilerinde ağırlığı da demiryolları yönetmeliğince toplam tren ağırlığına dahil edilmektedir. Bu sebeple bojilerde yapılacak ağırlık azaltmaları da demiryolu taşımacılığında önem arz etmektedir. Ülkemizde ve özellikle demiryolu taşımacılığının en çok kullanıldığı Japonya'da bojilerin kompozit malzemenin üretimi ve birleştirme yöntemi olarak da yapıştırma bağlantı kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Japonya'da CFRP malzemelerin yapıştırma bağlantılar kullanılarak birleştirildiği boji çalışması Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11 Yapıştırma bağlantıların kullanıldığı boji tasarımı (da Silva ve diğ. 2018).

CFRP malzemeden yapılmış bojinin ağırlığı 450 kg olarak ölçülmüştür. Çelik malzemeden üretilen standart bojilerin ağırlığı yaklaşık olarak 900 kg civarındayken kompozit malzeme ve yapıştırma bağlantı kullanılarak yapılmış boji ağırlığı yarı yarıya düşürmektedir(da Silva ve diğ. 2018).



Şekil 2.12 Bojilerde kullanılan yay yapıları, a) Çelik bojideki yay yapısı b) CFRP bojideki yay yapısı (da Silva ve diğ. 2018).

Kompozit malzemelerin esneklik özelliğinden yararlanılarak çelik bojilerde yay çeliğinden yapılmakta olan aks yayınında kompozit malzeme kullanılarak yapılacağı Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Kompozit malzemelerin hafiflik ve yüksek dayanımından yararlanılmaya devam edilmekte olan demiryolu taşımacılığı sistemlerinde her geçen gün yapıştırma bağlantı kullanımı da artmaktadır. Demir yolu yapılarındaki artan hafiflik talebiyle yapıştırma bağlantıların bu alandaki birleştirme işlemlerinde hem hafiflik hem de dayanımı bir arada sunması diğer birleştirme yöntemlerine alternatif olarak kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Mevcut yolcu vagonlarında yapıştırma bağlantılarının titreşim sönümlenme kabiliyetinden faydalanılmıştır.

2.5.4 Deniz Endüstrisinde Kullanımı

Deniz endüstrisi, küçük teknelerden, açık deniz petrol platformlarına kadar çok çeşitli yapıları kapsar. Deniz endüstrisi çalışma alanları arasında, küçük tersaneler, büyük üretim hattı tabanlı tekne montaj fabrikaları, donanma tersaneleri ve tasarımdan açık deniz platform onarımına kadar hizmet veren bir dizi taşeron şirketi bulunmaktadır. Bu alanların birçoğunda büyük ölçüde yapıştırıcı ve sızdırmazlık maddeleri kullanılır. Bu alanlarda kullanılan malzemeler çoğunlukla fiber takviyeli kompozitler olup bu malzemelerden yapılacak deniz araçlarında korozyon dayanımı yüksek olan yapıştırma bağlantılar sıklıkla tercih edilmektedir. Tekne üretiminde yapıştırma bağlantı kullanımını gösteren görsel Şekil 2.13'te verilmiştir. Yapıştırma bağlantılar genellikle kompozit ve ahşap malzemedeki tekne gibi deniz araçlarında kontrplak bölmelerin ve güvertenin gövdeye bağlantılarında sıklıkla kullanılmaktadır. Gövdeye güverte yapıştırma işlemini poliüretan yapıştırıcıyla yapıldığını gösteren görsel Şekil 2.14'te verilmiştir.



Şekil 2.13 Tekne gövdesinde yapıştırıcı uygulaması (Pocius 2012).



Şekil 2.14 Tekne gövdesine güvertenin yapıştırılması (Pizzi ve Mittal 2018).

2.5.5 Sağlık Sektöründe Kullanımı

Yapıştırıcılar, dikiş gibi mekanik sabitlemeye alternatif olarak vücuttaki kesik ve yırtıkları onarmak için tıpta giderek daha fazla kullanılmaktadır. Mevcut kullanımdaki başlıca yapıştırıcılar arasında, fibrin, jelatin ve poli(etilen glikol) (PEG) hidrojelleri bulunmaktadır ve doku yüzeylerine bağlanmalarıyla birlikte büyük ölçüde sızdırmazlık maddesi olarak işlev görmektedirler (da Silva ve diğ. 2018). Bir yapıştırıcı çeşidi olan Siyanoakrilatlar, çoğunlukla sadece yaranın kapatılması için cilt yüzeyine uygulama için kullanılmaktadır. Basınca duyarlı yapıştırıcılar da pansumanları ve cihazları cilt yüzeyine sabitlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların çoğu artık akrilik veya silikon kimyalarına dayanmaktadır. Yapıştırıcıların yara kapatmada kullanımını Şekil 2.15'te verilmiştir.

Son yıllarda özellikle vücuda yapıştırılarak şeker hastalarının anlık şeker ölçümünün yapıldığı cihazlarda yapıştırma bağlantılarının sağlık sektöründeki en yaygın kullanım biçimi olmuştur. Bu cihazlar ile yaklaşık olarak 2 hafta boyunca şeker ölçümü yapılabilmektedir ve bu ölçümlerin yapılması sürecinde cihazın doğru ölçümler yapabilmesini yapıştırıcıların vücutta sıvı sızdırmazlığı özelliği kullanılarak sağlanmaktadır. Şeker ölçüm cihazının insan vücuduna yapıştırılması Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.15 Yapıştırıcı ile kesilmiş derinin birleştirilmesi (da Silva ve diğ. 2018).



Şekil 2.16 Vücuda yapıştırılmış şeker ölçüm cihazı.

2.6 Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları

Yapıştırma bağlantılar, mühendislik uygulamalarında mekanik bağlantılara giderek artan bir alternatiftir ve geleneksel mekanik bağlantı elemanlarına göre birçok avantaj sağlar. Yapıştırma bağlantıların en önemli avantajları bu başlık altında maddeler halinde belirtilmiştir.

- Yapıştırılan alan boyunca daha düzgün bir gerilim dağılımı sağlayarak daha yüksek sertlik ve yük aktarımına olanak tanır, ağırlığı ve dolayısıyla maliyeti düşürür.
- Yapıştırıcının polimerik yapısı nedeniyle yapıştırma bağlantılarında yüksek yorulma mukavemetine sahip olmayı sağlayan iyi sönümlenme özelliği vardır.
- Yapıştırıcılar, farklı malzemeleri ve farklı termal genleşme katsayılarına sahip malzemelerin birleştirilmesinde kullanılabilir.
- Yapısal yapıştırıcıların ana uygulamalarından biri olan ince plakaları dahi deformasyona uğratmadan çok verimli bir şekilde yapıştırırlar.
- Yapıştırma bağlantılarında gerilme dağılımı perçinli ve kaynaklı bağlantıların dakine göre daha iyidir.
- Yapıştırma bağlantıların uygulaması diğer bağlantı yöntemlerine göre daha kolay ve ucuzdur.
- Yapıştırıcı ile aynı malzemeden yapılmış parçalar birleştirilebildiği gibi farklı malzemelerden yapılmış parçalar da birleştirilebilir.
- Yapıştırıcı ile aynı malzemeden yapılmış parçalar birleştirilebildiği gibi farklı malzemelerden yapılmış parçalar da birleştirilebilir.
- Düzgün gerilme dağılımı ve daha büyük yük taşıma alanı sağlamaktadır.
- Değişik ortamlara karşı bağlantıda yalıtım olanağı sağlamakta ve korozyon direnci yüksek bağlantılar elde edilebilmektedir.
- Birçok teknolojiye kolaylıkla uygulanabilir ve diğer bağlantı yöntemlerine göre daha estetik bir görünüm elde edilir.
- Isı ve elektrik iletkenliğine karşı yalıtkan olarak kullanılabilir.
- Yüksek darbe ve titreşim sönümlenme kabiliyetine sahiptir.

2.7 Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları

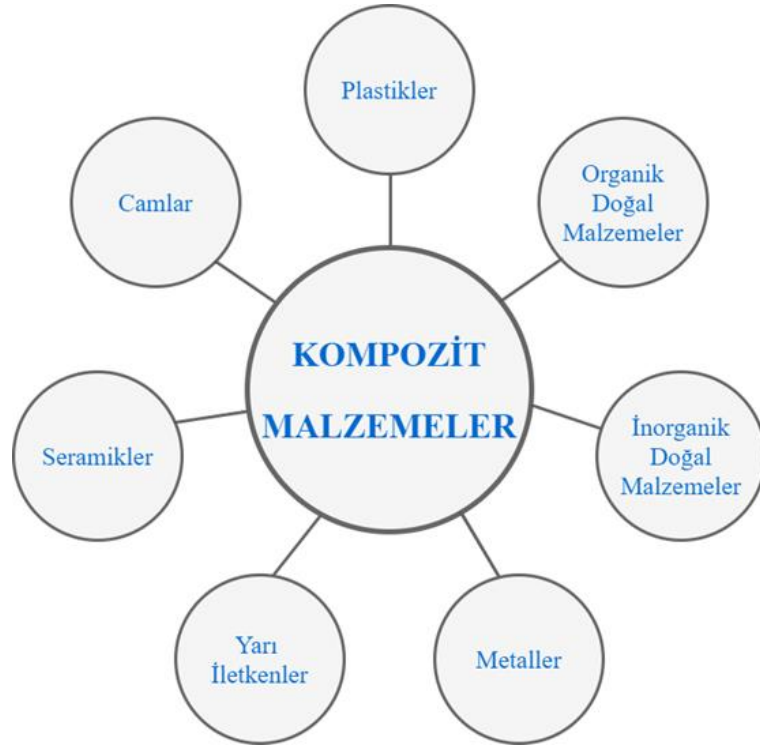
Her bağlantı yönteminin olduğu gibi yapıştırma bağlantılarında bazı dezavantajları bulunmaktadır. Yapıştırma bağlantıların kullanımını sınırlandıracak başlıca dezavantajları bu başlık altında maddeler halinde belirtilmiştir.

- Yapıştırma bağlantıların kullanılacağı alana göre sürekli çalışma sıcaklığında sınırlama (genellikle 180 °C) bulunmaktadır.

- Yapıştırma yapıldıktan sonra kontrol edilmesi gerekebilir ve kürlenme gerçekleştikten sonra taşan yapıştırıcıların bağlantıya zarar vermeden temizlenmesi gerekebilir.
- Yapıştırıcının kullanımında iç sağlığı ve güvenliği hususlarına dikkat edilmesi gerekmektedir.
- Yapıştırıcılar kolay alevlenebilir olmaları sebebiyle kullanıcıların eğitim alması gerekebilir.
- Kalıba ihtiyaç duyulabilir.
- Yapıştırma sonrası uzun kürlenme süreleri gerekebilir.
- Yapıştırma bağlantıların muayenesi edilmesi zordur.
- Yapıştırma bağlantıların faydalı ömrü bulunduğu çevreye bağlıdır.
- Yapıştırılacak malzemelerin yüzeyleri özenle temizlenmelidir.
- Yapıştırmanın gerçekleştirilebilmesi için ısı ve basınç gerekebilir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Bir amaç doğrultusunda kullanılabilir cisimler elde edebilmek için kullanılan maddelere malzeme denir. Mühendislikte genellikle malzemelerin rijit yapıları kullanılmaktadır. Mühendislik malzemeleri teknolojilerin ve sistemlerin üretiminde kullanılan mekanik, fiziksel ve kimyasal olarak arzu edilen özelliklere sahip katılardır. Kompozit malzemelerin diğer malzemelerle ilişkisini gösteren şematik çizim Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Kompozit malzemelerin diğer malzemelerle ilişki şeması (Yüksel ve Meran 2010).

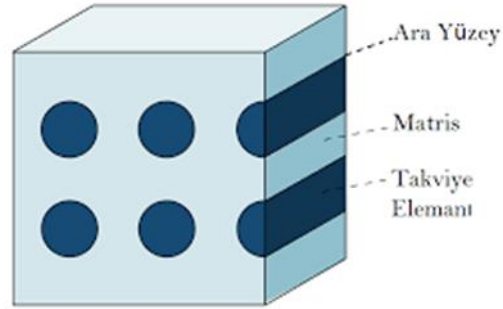
Bir veya daha malzemenin birleştirilmesiyle ya da bir malzemenin üzerine bir başka malzemenin takviyesiyle, malzemelerin üstün özelliklerini bir araya getirmek ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak için, mikro veya makro düzeylerde malzemelerin heterojen birleştirilmesi sonucu elde edilen malzemelere kompozit malzeme denir (Yüksel ve Meran 2010). Kompozit malzemeler farklı iki veya daha fazla malzemenin üstün yönlerinin birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Kompozit malzemeler kullanım alanlarındaki çevre şartları ve yükleme durumları göz önüne alınarak farklı malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır.

3.1 Kompozit Malzeme Tanımı

Modern teknolojiler çoğunlukla geleneksel metal alaşımlar, seramikler ve polimerik malzemeler tarafından karşılanamayan daha iyi özelliklere sahip malzemeler gerektirir, bu gereksinimler özellikle havacılık, su altı, biyomühendislik ve taşımacılık endüstrileri için geçerlidir. Örneğin uçak mühendisleri her geçen gün artan bir şekilde daha düşük yoğunluklu, yüksek dayanımlı, aşınmaya ve darbeye dayanıklı kolayca korozyona uğramayan yapısal malzemelere ihtiyaç duymaktadır (Callister 2006).

Malzeme özellik kombinasyonları ve aralıkları, kompozit malzemelerin geliştirilmesine bağlı olarak genişlemeye devam etmektedir. Kompozit malzemeler, birden fazla malzemenin belli bir amaç için (dayanıklılık, hafiflik, yüksek sıcaklıklara ve korozyona dayanıklılık vb.) bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır.

Modern yapısal kompozitler, iki veya daha fazla malzemenin bir karışımıdır. Bir bileşen genellikle polimerik veya seramik takviye edici liflerden yapılır. Diğer bileşen genellikle, en azından polimerik kompozitler için, doğası gereği polimerik olan reçineli bir bağlayıcı veya matristen oluşur. Lifler, matrise göre güçlü ve serttir. Modern kompozit malzemelerin temel yapısı Şekil 3.2’de verilmiştir.

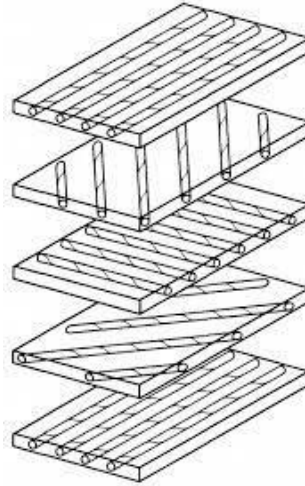


Şekil 3.2 Modern kompozit malzemelerin temel yapısı (Callister 2006).

Gelişmiş kompozitler, uçak gibi en zorlu uygulamalar için en sık kullanılan, geleneksel kompozitlerden ve benzer metallere önemli ölçüde üstün özelliklere sahip malzemeleri tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Bu malzemeler, yüksek performanslı reçineler ve liflerden yapılmıştır. Liflerin yapısı ve yönü, özel tasarım gereksinimlerini karşılayacak şekilde seçilir. Gelişmiş kompozit yapılar genellikle

belirli şekillerde üretilir. Gelişmiş bir kompozitin hangi yönde mukavemet ve sertliğinin yüksek olması gerektiği yükleme koşullarına uygun olarak ayarlanabilir.

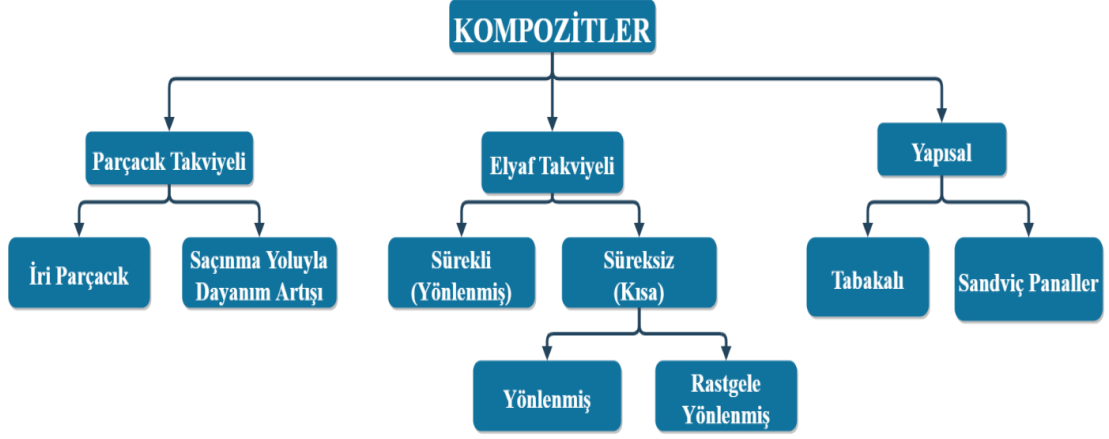
Kompozitler ayrıca genellikle mekanik bağlantı elemanları ve yapıştırıcıların bir kombinasyonu ile birleştirilir. Birçok üretici, bağlantıların büyük miktarda gerilmeye maruz kaldığı uygulamalarda (örneğin uçak yapıları) yapıştırma bağlantılarını tek başına kullanmak yerine mekanik birleştirme yöntemlerinden birini (genellikle perçin) ilave ederek hibrit bağlantı yöntemini tercih etmektedir. Hibrit bağlantı yöntemlerinde, mekanik bağlantı elemanları elyafın ezilmesini ve katmanlara ayrılmasını önlemek için boyutlandırılmalıdır, yapıştırıcılar mukavemet ve esnekliği dengelemelidir (Dobrzanski ve Oleksiak 2021). Farklı elyaf açılara sahip katmanlı kompozit yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Farklı elyaf açılara sahip katmanlı kompozit yapısı (Gerd 2006).

3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler parçacık takviyeli, fiber takviyeli ve yapısal kompozitler olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır ve Şekil 3.4'teki şemada gösterilmiştir. Parçacık takviyeli kompozitlerin tüm parçacık boyutları neredeyse aynıdır. Elyaf takviyeli kompozitlerin temel parçacık yapısı ise kullanılan elyafın geometrisiyle aynıdır. Yapısal kompozitler iki farklı homojen malzemenin bir kombinasyonudur.

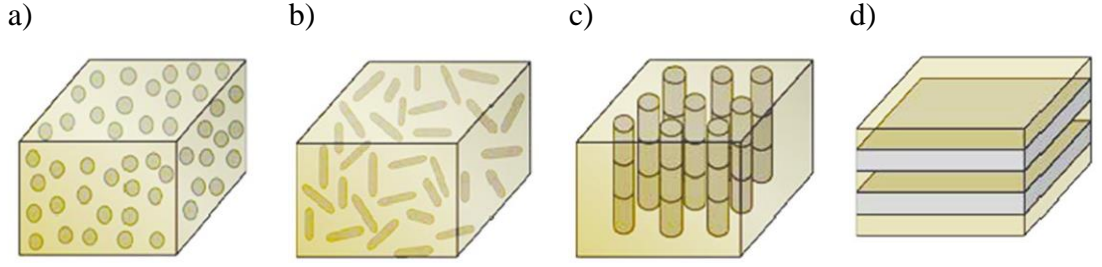


Şekil 3.4 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

3.2.1 Parçacık Takviyeli Kompozitler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler farklı bir malzemedan elde edilen matris içine bir veya birden çok partikül malzemenin eklenmesiyle oluşmaktadır. Bu kompozit malzemenin temel partikül yapısı, matris içerisine homojen dağılmaktadır. Bu sebeple bu tür kompozit yapılarına aynı zamanda yarı izotropik malzeme denir. Şekil 3.4'teki şemada da gösterildiği gibi parçacık takviyeli kompozitler, iri parçacık ve saçınma yoluyla elde edilen kompozitler olmak üzere iki dala ayrılmaktadır. Bu iki tür parçacık takviyeli kompozit malzemelerin arasındaki ayırım, takviye malzemesinin boyutu veya dayanım artırma mekanizmalarına göre yapılır.

Bu kompozit malzemelerin temel yapısında eklenmiş olan partikül fazı matristen daha sert ve katıdır. Takviye edici partiküller, matris çevresine homojen şekilde dağılarak matris fazının hareketliliğini kısıtlamaktadır. Böylece üretilen parçacık takviyeli kompozitler, esnek olmayan fiziksel özellik gösterir. Parçacık takviyeli kompozit türünün, malzemenin mekanik davranışın güçlendirilmesinde veya iyileştirilmesinde olumlu sonuçlar vermesi takviye malzemesi ve matrisin güçlü bağlar oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Mekanik sağlamlığa ve mukavemete yol açan bu güçlü bağlar atomik veya moleküler düzeyde meydana gelmektedir. Parçacık takviyeli kompozit malzemelere uygulanan kuvvetin büyük bir bölümünü matris taşıırken, takviye edici partiküller ise yükün oluşturmuş olduğu yer değiştirme etkisini sıfıra indirir. Farklı kompozit malzeme yapıları Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 Farklı kompozit malzeme yapıları, a) Parçacık takviyeli kompozitler, b) Lif takviyeli kompozitler, c) Fiber takviyeli kompozitler, d) Katmanlı kompozitler (Gerd 2006).

3.2.1.1 İri Parçacıklı Kompozitler

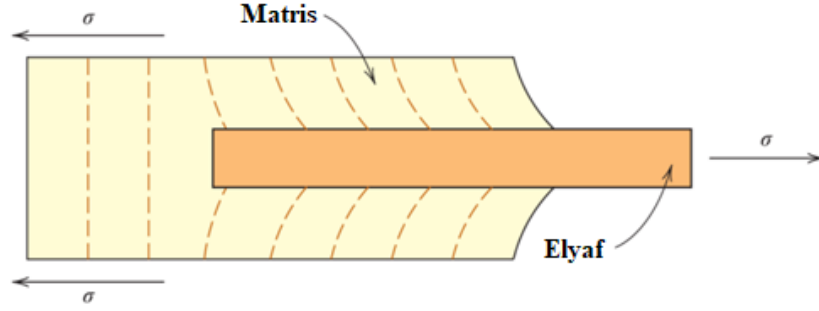
İri parçacıklı kompozit malzemeler içerisinde gerçekten büyük parçacık boyutuna sahip partiküller bulundurmaktadır. Bu takviye edici partiküller, ana malzemenin özelliklerini değiştirir, geliştirir veya pahalı olan ana malzemeye ucuz olan takviye malzemenin ilave edilmesiyle ana malzemenin hacmini arttırmak hedeflenmiştir. İri parçacıklı kompozit malzemelerde takviye malzemesi ile matrisin etkileşimi atomsal veya moleküler boyutta değildir. Bu kompozitlerin çoğunda takviye malzemesi olarak kullanılmış parçacık matristen daha sert ve rijittir. Günümüzde en çok bilinen ve kullanılan iri parçacıklı kompozit betondur.

3.2.1.2 Saçınma Yoluyla Dayanım Arttırılmış Kompozitler

Metaller ve metal alaşımları içinde hacimce küçük miktardaki çok sert ve inert (kimyasal olarak aktif olmayan) bir malzemenin ince parçacıklarının homojen dağılımı(saçılması), malzemenin sertlik ve dayanımını arttırabilir. Dağınık faz metalik veya metal dışı malzeme olabilir; oksit malzemeler sıklıkla kullanılır. Bu dayanım arttırma mekanizması da çökelme sertleştirmesinde olduğu gibi, matris içindeki partiküller ve dislokasyonlar arasındaki etkileşimleri içerir. Bu dayanım artırma mekanizması da çökelme sertleşmesinde olduğu gibi, tanecikler ve matris içindeki dislokasyonlar arası etkileşimle ilgilidir.

3.2.2 Elyaf Takviyeli Kompozitler

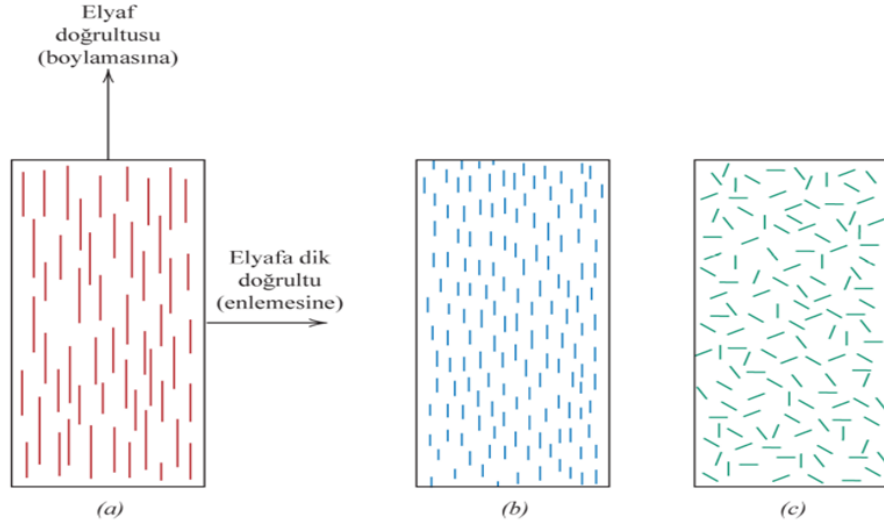
Günümüzde elyaf takviyeli kompozitler her alanda büyük bir öneme sahiptir. Elyaf takviyeli kompozitlerin en popüler kompozit türü olmasındaki en büyük etken, üretilen malzemelerde genellikle düşük ağırlıkla birlikte yüksek dayanımın birlikte elde edilmesidir. Buna ek olarak yüksek elastiklik gibi fiziksel özellikler de elde edilmektedir. Bu özellikler, özgül dayanım ve özgül elastiklik modülü terimleri ile tarif edilir, sırasıyla çekme dayanımının özgül ağırlığa oranı ve elastiklik modülünün özgül ağırlığa oranı olarak tanımlanır (Callister 2006). Elyaf takviyeli kompozit malzemeye uygulanan çekme gerilmesi sonucu matristeki şekil değişimi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Elyaf takviyeli kompozit malzemeye uygulanan çekme gerilmesi sonucu matristeki şekil değişimi (Callister 2006).

3.2.2.1 Sürekli ve Yönelmiş Elyaf Takviyeli Kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitler, elyaf takviyesinin sürekliliği ve yönelme durumuna göre ikiye ayrılır bunlardan biri sürekli ve yönelmiş elyaf takviyeli diğeri süreksiz ve yönelmiş elyaf takviyeli kompozitler olarak isimlendirilir. Sürekli ve yönelmiş elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik davranışları birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerden bazıları; elyaf ve matris fazlarının hacimsel oranları, matris ve elyafın gerilme-birim şekil değiştirme davranışı, gerilme ve yükün uygulandığı kuvvetin yönüdür.



Şekil 3.7 Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin gösterimi, a) Sürekli ve çekme doğrultusunda yönelmiş, b) Süreksiz ve çekme doğrultusunda yönelmiş, c) Süreksiz ve rastgele yönelmiş.

3.2.2.2 Süreksiz ve Yönelmiş Elyaf Takviyeli Kompozitler

Süreksiz ve yönelmiş elyaf takviyeli kompozitler de lif oryantasyonu rastgele dağıtılmıştır. Bu tür kompozitler de takviye elemanı olarak kısa ve süreksiz lifler kullanılmaktadır. Süreksiz ve yönelmiş elyaf takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi yukarıdaki görselde ifade edilmiştir. Süreklilik ve yönlenmelerin şematik gösterimi Şekil 3.7’de verilmiştir.

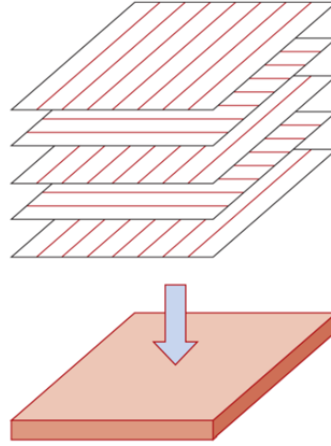
3.2.3 Yapısal Kompozitler

Yapısal kompozitler, konstrüksiyonlarda kullanılan hafiflik, dayanım ve yalıtım gibi özelliklerin birleştirilmesine olanak sağlayan kompozit malzeme grubudur. Bu kompozit yapıların özellikleri sadece bileşen malzemelerine bağlı değildir aynı zamanda geometrilerine de bağlıdır.

3.2.3.1 Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit, ince plakalar veya belirli yönde yüksek dayanıma sahip panellerden oluşur. Buradaki ince plakalar ahşap veya yönlenmiş sürekli elyaf

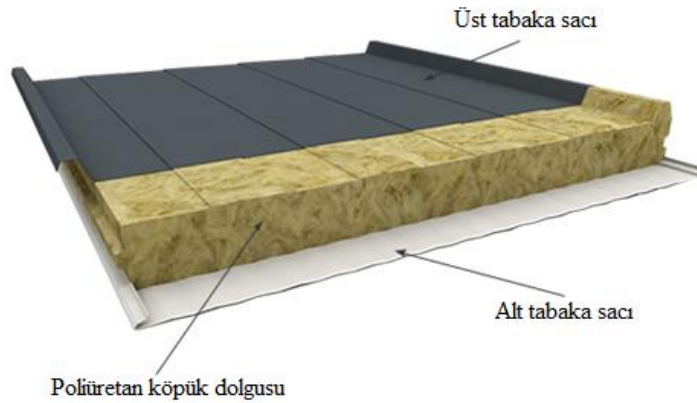
takviyeli plastikler gibi malzemeler olabilir. Bu tabakalar üst üste istiflendikten sonra her biri belirli bir yöndeki dayanımı artıracak şekilde elyaf takviyelerinin yönleri düzenlenerek yapıştırılır. Tabakalı kompozit malzemelerde, her biri belirli bir yöndeki dayanımı arttıracak şekilde elyaf takviyeli tabakaların istiflenmesi Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Tabakalı kompozit malzemelerde üst üste yerleştirilmiş elyaf katmanları (Pizzi ve Mittal 2018).

3.2.3.2 Sandviç Paneller

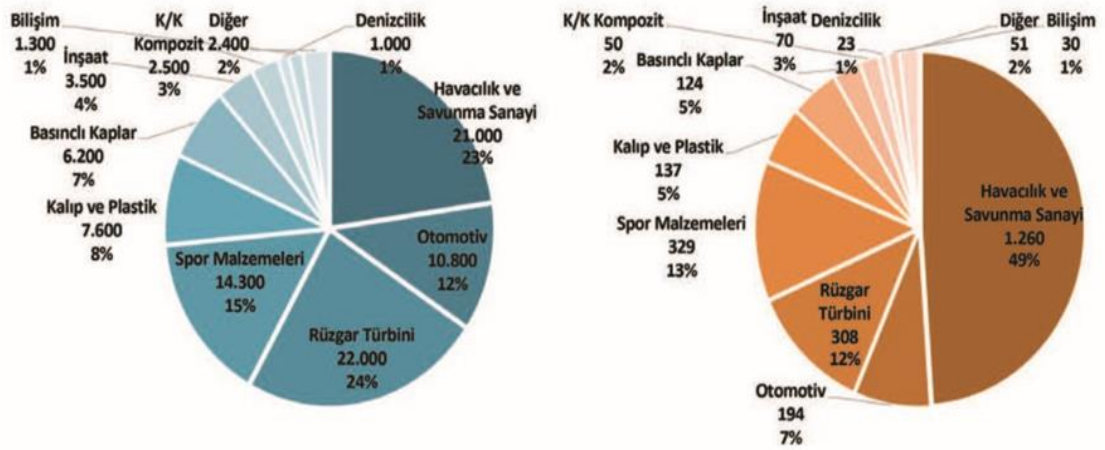
Sandviç paneller, hafif ancak yüksek rijitlik ve dayanıma sahip kiriş veya panellerin tasarımında kullanılan yapısal kompozitler sınıfında yer alırlar. Bir sandviç panel, aşağıdaki şekilde görüleceği gibi, kalın bir ara dolgu tabaka ve buna yapışan iki dış tabaka veya yüzeyden oluşur. Çatı malzemesi olarak kullanılan sandviç panel yapısına sahip kompozit malzemenin görseli Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 Çatı malzemesi olarak kullanılan sandviç panel yapısı.

3.3 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

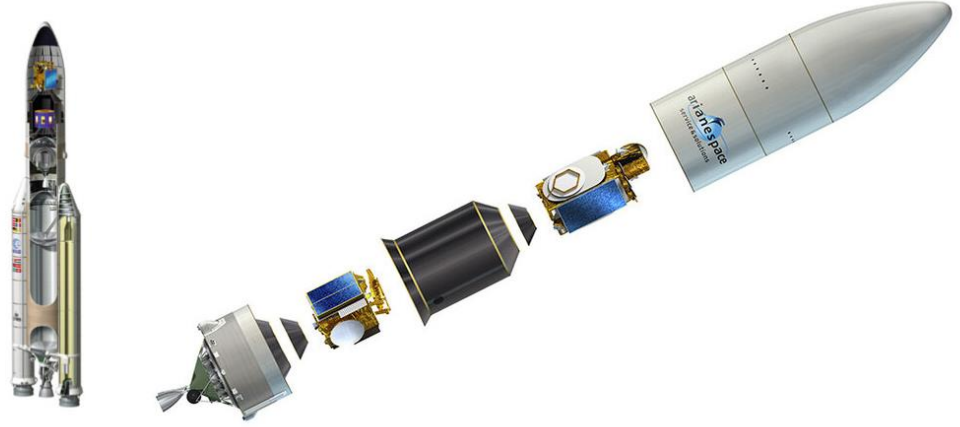
Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte kompozit malzemelerin önemi de aynı oranda artış göstermektedir. Böylece kompozit malzemelerin kullanım alanları da genişlemiştir. Kompozit malzemelerin kullanımının en fazla olduğu alanlardan biri de uçak sanayisidir. Aynı zamanda kompozit malzemeler nakliye, inşaat, elektrik, beyaz eşya ve denizcilik gibi birçok pazar alanlarında da kullanılmaktadır. Son 20 yılda kompozit malzemelerin kullanım alanları açısından değişimini ve tüm kullanım alanları içerisindeki yüzdelerini gösteren pasta grafiği Şekil 3.10'da verilmiştir.



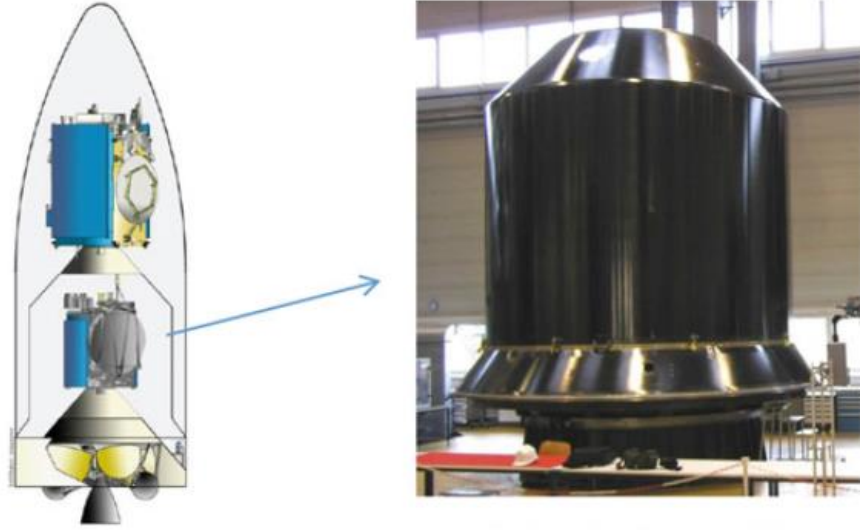
Şekil 3.10 Kompozit malzemelerin kullanım alanları (da Silva ve diğ. 2018).

3.3.1 Uzay ve Havacılık Sanayisi

Uzay ve havacılık sanayisinde kompozit malzemelerin kullanım alanları oldukça geniştir. Kompozit malzemelerin sahip olduğu gelişmiş mekanik özellikleri ve aynı zamanda hafiflikleri uçaklarda, helikopterlerde hatta uzay mekiklerinde iç ve dış tasarımlarda bu malzemelerin kullanılmasına neden olmaktadır. Ariane 5 roket fırlatıcısının ve Ariane 5 roketinin modüler tasarımı Şekil 3.11'de verilmiştir. Ariane 5 roketinin kafa kısmında bulunan sandviç yapıya sahip CFRP malzemedan üretilmiş iç gövde yapısı Şekil 3.12'de verilmiştir. Karbon fiber takviyeli sandviç yapının birleştirilmesinde yapıştırma bağlantılar kullanılmıştır.



Şekil 3.11 Ariane 5 roketinin modüler tasarımı (da Silva ve diğ. 2018).



Şekil 3.12 Ariane 5 roketinin kafa kısmındaki yapıştırıcı ile birleştirilmiş CFRP sandviç yapı (da Silva ve diğ. 2018).

3.3.2 Otomotiv Sanayisi

Kompozit malzemelerin temel özelliklerinden olan hafiflik ve dayanım bu malzemelerin otomotiv sanayisinde kullanımını her geçen gün arttırmaktadır. Kompozit malzemeler genel tanımı itibariyle farklı malzemelerin avantajlı yönlerini bir araya getiren malzemelerdir bu sebeple otomotiv sanayisinde arzu edilen hafif ve dayanımı yüksek parçaların yapımında kullanılmaktadır. Buna ek olarak otomotiv endüstrisinin en önemli problemi olan kaza durumları içinde darbe sönümlenme

kabiliyetine sahip kompozit malzemelerin kullanılmasıyla bu gibi can kaybıyla sonuçlanabilecek kazaların önüne geçilebilir.

Otomotiv sanayisinin son yıllarda yoğun bir yöneliminin olduğu elektrikli araç teknolojisinin bel kemiği niteliğinde olan full şarj durumundaki batarya aile alınabilecek maksimum yolun az olması sorunu mevcut araç yapılarında kullanılan çelik ve alüminyum gibi metal parçaların kompozit malzemelerden üretimiyle büyük oranda çözüme kavuşacaktır.

Otomotiv sanayisinde kompozit malzemelerin en iyi malzeme çözümü olarak önümüze çıktığı alanların başında yarış arabalarının üretimi yer almaktadır. Yarış arabalarında kullanılan malzemelerde arzu edilen tüm özellikler kompozit malzemeler sayesinde karşılanmaktadır. Yarış arabaları alanındaki araç tasarımlarında arzu edilen başlıca özellikler aerodinamik olarak iyi tasarlanmış, hafif ve dayanıklı yapılardır. Kompozit malzemeler tüm bu özellikleri barındırmaktadır bu sebeple çoğu otomobil markası katıldığı yarışlardaki araçlarında kompozit malzemeleri kullanmaktadır.

3.3.3 Denizcilik Sanayisi

Kompozit malzemeler denizcilik sanayisinin birçok alanında tercih edilmektedir. Bunlar arasında; yelken gövdesi, yat, tekne arkası platform basamakları imalatı bulunmaktadır. balsa ve polimer köpük üstüne cam, aramid karbon dokumaları ile kaplama malzeme ve yöntemleri kullanılmaktadır.

3.3.4 Spor Ekipmanları Üretim Sektörü

Her geçen gün spor araç gereçleri sektöründe kompozit malzemelerin kullanım alanı artmaktadır. Özellikle kompozit malzemelerin şekillendirilebilme kabiliyeti, hafifliği ve dayanıklı olması bu artışa sebep olmaktadır. Kullanım alanlarına örnek olarak bisikletler, yatlar, kano ve sörf ekipmanları örnek verilebilir. Bu alanda en çok cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler tercih edilmektedir.

3.4 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin üretim amacı matris fazının üstün özelliklerini kullanarak fiber bileşenlerden daha iyi özelliklere sahip malzeme oluşturmaktır. Kompozit malzemelerin birçok avantajı bulunmaktadır. Temel özelliklerinden biri olan hafiflik, yapılarda büyük avantaj sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin birkaç olumsuz özelliği de bulunmaktadır fakat kompozit malzemelerin dezavantajlı yanlarını ortadan kaldırmaya yönelik teorik çalışmaların olumlu sonuçlanması halinde kompozit malzemeler, metalik malzemelerin yerini alabilecektir.

3.4.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları

Günümüz teknolojisiyle elde edilen kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanları havacılık, otomotiv ve uzay endüstrileri olmak üzere birçok uygulama alanı vardır. Kompozit malzemelerin bu uygulama alanlarında kullanılmasının en önemli sebebi kompozit malzemelerin birçok yönden avantaj sağlamasıdır. Kompozit malzemelerin avantajları;

- Düşük yoğunluk
- Yüksek mukavemet
- Korozyon dayanımı
- Karmaşık geometrili yapılarda kolay üretim sağlama
- Yorulma direnci
- Düşük ısı iletkenlik
- Termal iletkenlik
- Ses yalıtımı

3.4.2 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin birçok avantajı bulunsa da birkaç önemli dezavantajı bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanımını sınırlayan bu dezavantajlı yönleri her geçen gün yapılan yeni çalışmalarla giderilmektedir.

Kompozit malzemelerin belli başlı dezavantajları;

- Üretim zorluğu
- Ham maddelerin yüksek maliyetli olması
- Güç onarım problemi
- Geri dönüşüme sahip olmamaları
- Talaşlı imalata uygun olmamaları

3.5 Kompozit Malzemelerin Yapıştırma Bağlantıları

Yapıların artan hafiflik talebi, kompozit yapıştırıcıların popülaritesini arttırmış, kendine özgü yüksek mekanik özellikleri ve tasarım yapmaya uygunluğundan faydalanılmıştır. Bununla birlikte, kompozitler enine yönde dayanıksızdır, katman ayrılması nedeniyle erkenden hasara uğrayabilirler. Gerilme yığılmalarını azaltmayı amaçlayan çeşitli teknikler ve yapıştırıcıların enine mukavemetinin artırılması, malzeme düzenlemesi ve geometri tasarımı açısından tartışılmakta ve karşılaştırılmaktadır.

Taşımacılık sektöründeki, yapısal uygulamalarda ileri kompozit malzemelerin kullanımı büyük ölçüde artmıştır. Bu malzemelerin yüksek mukavemeti ve sertliği, hafif ve yüksek performanslı araçlar üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yapılar klasik sabitleme yöntemleri ve kaynakla birleştirilebilir, ancak bu yöntemler kompozit yapılar ile farklı malzemelerin birleştirilmesi için genellikle uygun değildir. Bu yapıların birleştirilmesinde yapıştırıcıların kullanımı sonucu yapıların dayanımı üst seviyelere çıkarılabilmektedir. Buna ek olarak özellikle karmaşık çoklu malzemelerin yapıştırılmasında yüksek bağlantı dayanımı ve daha iyi bir gerilme dağılımı elde edilmektedir (Banea ve da Silva 2009).

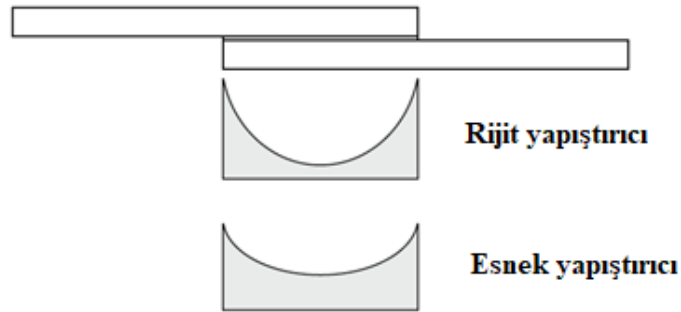
Kompozit malzemelerin birleştirme işlemlerinde günümüzde en sık kullanılan yöntemler, mekanik sabitleme, yapıştırma ve bu ikisinin birleştirildiği hibrit bağlantı yöntemleridir. Bunlara ek olarak son yıllarda adını duymaya başladığımız kompozit malzemelerin kaynak ile birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda bulunmaktadır. Tüm bu yöntemler arasında şu anki şartlarda en avantajlı yöntem yapıştırma bağlantı yöntemidir.

3.5.1 Bağlantı Mukavemetini Etkileyen Faktörler

Bindirme bağlantılarının, bağlantı mukavemetini etkileyen ana faktörler, malzeme özellikleri (yapıştırıcı ve yapıştırılan) ve geometridir (yapıştırılan malzeme ölçüleri, yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğu). Termal etkilerden kaynaklanan artık iç gerilmeler de dikkate alınmalıdır.

Bindirme bölgesinde rijit ve esnek yapıştırıcı kullanımına bağlı olarak gerilme dağılımının nasıl değiştiği Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Gerilme yığılmalarını en aza indirerek, bağlantı mukavemetini artırmak için genel kurallar aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Shang ve diğ. 2019).

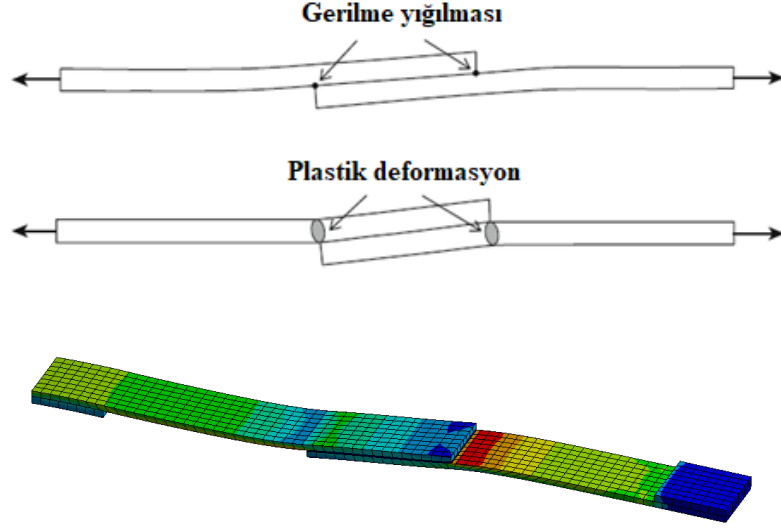
- Düşük modüllü ve esnek davranışa sahip bir yapıştırıcı kullanılması
- Yapıştırılan malzemelerin aynı olması veya mümkünse sertliklerinin yakın olması
- İnce bir yapıştırıcı tabaka kullanılması
- Geniş bir bağlantı alanı kullanılması



Şekil 3.13 Tek tesirli yapıştırma bağlantılarda rijit ve esnek yapıştırıcının gerilme dağılımı (Petrie 2006).

Kompozit malzemelerin kendileriyle veya başka malzemelerle birleştirilmesinde yapıştırma tekniği yaygınca kullanılan bir yöntemdir. Yapıştırma bağlantılar yapıştırılan malzemeye zarar vermeden çok daha iyi bir gerilme dağılımı sağlamakta ve aynı zamanda estetik görünmektedir. Fakat her bağlantı yönteminin olduğu gibi yapıştırma bağlantılarının da dezavantajları vardır. Yapıştırma bağlantılarında gerilme yığılmaları, büyük ölçüde bindirme bölgesinin uç kısımlarında meydana gelmektedir ve bu uç bölgelerde soyulma şeklinde hasar başlayarak bağlantının orta noktasına doğru ilerlemektedir. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında

gerilme yığılmalarının bindirme bölgesinin uç kısımlarında olduğunu ve o kısımlardan plastik deformasyon oluşacağını gösteren sonlu elemanlar analizi ile iki boyutlu şematik gösterimi Şekil 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.14 Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme ve plastik deformasyon bölgeleri.

Kompozit malzemelerin yapıştırma bağlantılarında hibrit bağlantı yöntemi ve karma yapıştırıcılı bağlantı yöntemi kullanılarak bağlantı mukavemetinin artırılması sağlanmaktadır. Hibrit bağlantı yönteminde yapıştırıcı ile birleştirmenin dayanımını arttırmak için ilaveten bağlantıya cıvata, perçin ya da kaynak eklenmektedir. Bağlantının oluşturulmasında yapıştırıcının tek başına kullanılmasında elde edilecek bağlantı dayanımından daha yüksek bir bağlantı dayanımı elde etmek için bu ilave yöntemlerle birleştirilmektedir. Hibrit bağlantılar yapıştırıcının tek başına kullanıldığı bağlantılara göre daha iyi bağlantı dayanımı sağlasa bile yapıştırılan malzeme üzerinde delik delme gibi ek işlemler gerektirmektedir. Kompozit malzemelerin yapıştırma bağlantılarında yapıştırılan malzemeye ek bir işlem yapmadan dayanımını arttırmanın en zahmetsiz yolu karma yapıştırıcılı bağlantı yönteminin kullanılmasıdır. Bu başlık altında kompozit malzemelerin yapıştırma bağlantılarında dayanımı arttırmak için kullanılacak hibrit bağlantı yöntemleri ve karma yapıştırıcılı bağlantı yöntemi sırasıyla verilmiştir.

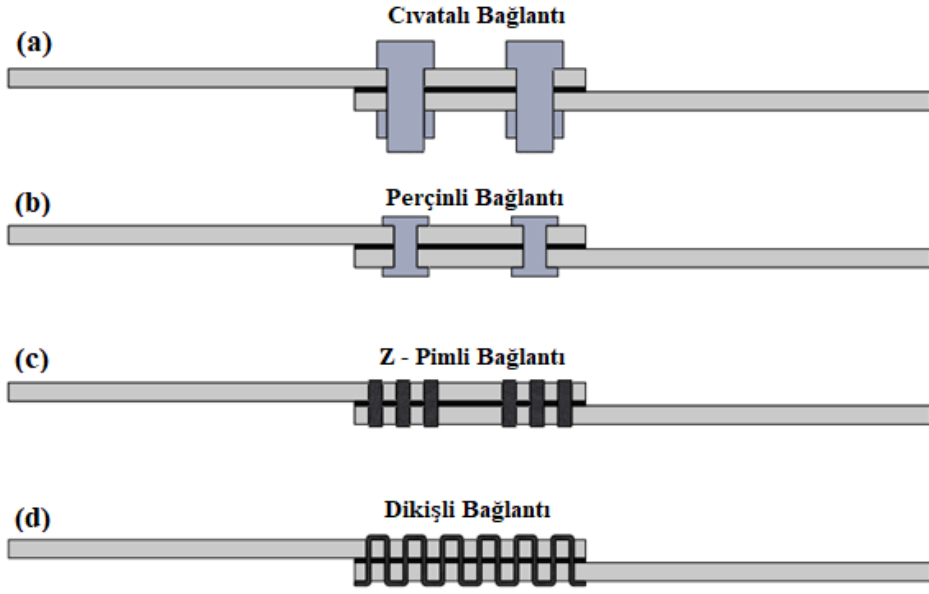
3.5.2 Hibrit Bağlantı Yöntemi

Hibrit bağlantılar hem yapıştırma bağlantıların hem de mekanik bağlantıların avantajlarını bir araya getirerek, eşzamanlı olarak yapıştırma ve yapıştırılanların mekanik olarak sabitlenmesinden oluşur. Hibrit bağlantılar kullanılan mekanik bağlantıya göre cıvatalı bağlantılar, perçinli bağlantılar ve kaynaklı bağlantılar olarak sınıflandırılabilir. Yapıştırılan malzemelerin üzerinden desteklenmiş ve yüzeyden desteklenmiş hibrit yapıştırma bağlantıların üç boyutlu modelleme programı kullanılarak yapılmış tasarımları Şekil 3.15'te verilmiştir.

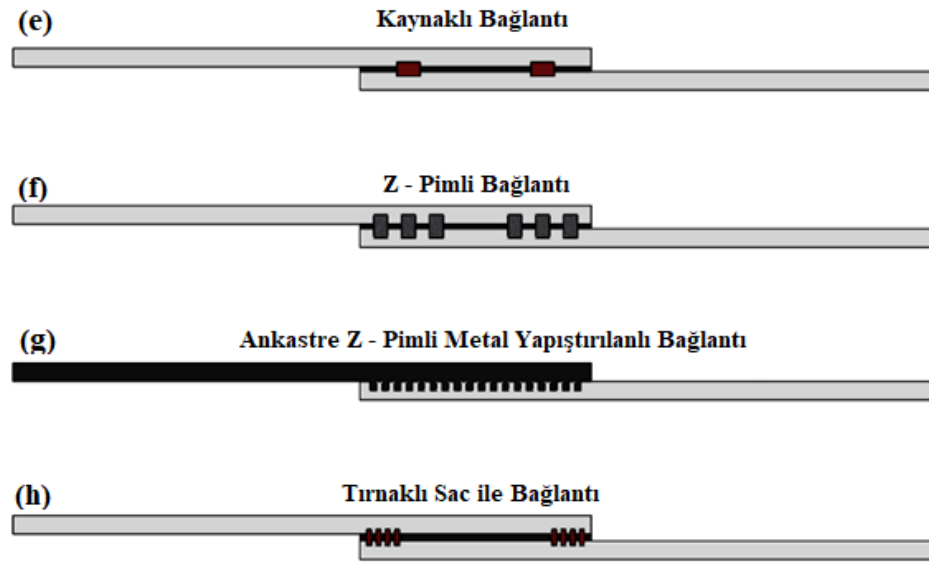
Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Mekanik birleştirme yöntemleri yerine yapıştırıcıyla birleştirmenin kullanılması ağırlık ve maliyet açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu tekniğin endüstri uygulamalarında güvenli bir şekilde kullanılması için öncelikle çözülmesi gereken birtakım sorunlar bulunmaktadır. Yapıştırıcının polimerik yapısı, zorlu ortam koşullarında (sıcaklık ve nem) bağlantı dayanımının azalmasına sebep olabilmektedir. Bir diğer nokta gerilme dağılımının bindirme bölgesinin uçlarında yoğunlaşmasıdır. Bu durum özellikle kompozitlerin yapıştırma bağlantılarında erken hasarlara neden olur. Ancak yapıştırıcıya ek olarak cıvata, perçin veya nokta kaynak gibi geleneksel birleştirme yöntemleri kullanıldığında sorunun bir kısmı çözülebilir. Bu nedenle yapıştırıcıyla birleştirme yöntemine ek olarak farklı birleştirme yöntemlerinin yapıştırıcıyla birlikte kullanılmasıyla hibrit bağlantılar oluşturulabilmektedir.

Hibrit bağlantı yönteminde cıvata ve perçin gibi mekanik bağlantıların yapıştırıcıya ek olarak kullanılması yapıştırıcının kürlenme süresi boyunca sabit kalmasını da sağlamaktadır. Ayrıca hibrit bağlantıların avantajlarından biri de yapıştırıcının tek başına kullanıldığı duruma göre daha iyi statik ve yorulma mukavemeti sağlamasıdır. Hibrit bağlantı yöntemlerine ek olarak karma yapıştırıcı bağlantı yöntemi de bağlantı mukavemetini arttırmanın bir yoludur. Karma yapıştırıcı bağlantı yöntemi, hibrit bağlantı yöntemlerinden farklı olarak bağlantı mukavemetini ekstra bir işleme gerek kalmadan arttırmaktadır. Hibrit bağlantıların oluşturulmasında kullanılacak yöntemlere göre üretimde oluşabilecek riskli yönler Tablo 3.1'de değerlendirilmiştir.

Yapıştırılan Üzerinden Desteklenmiş



Yüzeyden Desteklenmiş



Şekil 3.15 Hibrit bağlantı yöntemleri.

Tablo 3.1 Tasarımları verilmiş hibrit bağlantı tekniklerinin üretim yöntemleri açısından değerlendirilmesi.

Teknikler	Üretim Yöntemi	Elyaf Hasarı	Yüzey Hasarı	Bağlantı Boyutunda Değişme	Üretim Zorluğu
(a),(b)	Delme ve montaj	Var	Var	Var	Orta
(c)	Delme, montaj ve kürleme	Var	Az var	Yok	Yüksek
(d)	Dikme ve kürleme	Az var	Az var	Çoğunlukla var	Orta
(e)	Kaynak ve kürleme	Az var	Yok	Yok	Yüksek
(f)	Delme, montaj ve kürleme	Var	Az var	Yok	Yüksek
(g)	Yerleştirme ve kürleme	Az var	Yok	Az var	Yüksek
(h)	Yerleştirme ve kürleme	Az var	Yok	Yok	Düşük

3.5.3 Karma Yapıştırıcılı Bağlantı Yöntemi

Karma yapıştırıcılı bağlantılar bindirme bölgesi uç kısımlarında oluşan gerilme yığılmalarını bindirme bölgesinin uç kısımlarında esnek yapıştırıcı ve orta kısmında rijit yapıştırıcı kullanılarak gidermektedir. Karma yapıştırıcı kullanımıyla yapıştırma bağlantılarındaki bağlantı dayanımını olumsuz yönde etkileyen bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilme yığılmaları ile başlayan hasar iyileştirilmektedir. İki yapıştırıcıyı tek bir bağlantıda birleştiren karma yapıştırıcılı bağlantılar, tek bir esnek ya da rijit yapıştırıcının kullanımına alternatif olarak düşünülebilir (Shang ve diğ. 2019). Karma yapıştırıcılı bağlantılar başlangıçta yapıştırma bağlantılarındaki gerilme yığılmalarını azaltmak için metal bağlantılarda kullanılmıştır (Pires ve diğ. 2003). Yapılan diğer bir çalışma, bindirmenin ortasında aynı rijit yapıştırıcı olacak şekilde bindirmenin uçlarında üç farklı esnek yapıştırıcı kullanarak bu etkiyi açıkça göstermiştir (da Silva ve Lopes 2009). Karma yapıştırıcılı bağlantılar düzgün bir gerilme dağılımı sağlamıştır ve her durumda tek başına kullanılan rijit veya esnek bir yapıştırıcıdan daha yüksek mukavemet göstermiştir. Karma yapıştırıcılı bağlantı yönteminin hibrit bağlantı yöntemiyle karşılaştırması Şekil 3.16'da verilmiştir. Karma yapıştırıcılı bağlantı yönteminin üretim zorluğu açısından hibrit bağlantılardan daha kolay olduğu sonucuna varılmıştır.

Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, tek yapıştırıcılı ve karma yapıştırıcılı bağlantıların hasar yükü tahmininde analitik ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmıştır. Yapıştırma bağlantıların bazı uygulamalarında hasar yükünün hesaplanmasıyla defalarca yapılacak deneylerin sonucunda oluşacak zaman ve maliyet kayıplarını azaltacağı belirtilmiştir. Tek yapıştırıcılı bağlantıların analitik hasar yükü hesabında Volkersen ve Genel Akma Kriteri denklemleri kullanılmıştır. Karma yapıştırıcılı bağlantıların analitik hasar yükü hesabındaysa bu iki denklemin kombine edilmiş bir hali kullanılmıştır. Karma yapıştırıcılı bağlantıların analitik hasar yükü hesabında bu iki denklemin birlikte kullanılmasının sebebi Volkersen denkleminin rijit yapıştırıcılı bağlantılarda, Genel Akma Kriterininse esnek yapıştırıcılı bağlantıların hasar yükü hesabında deneysel sonuca en yakın değeri vermesi olarak belirtilmiştir (Özer ve Öz 2014). Bu iki analitik çözüm yöntemi dışında yapıştırma bağlantılarında yükleme sonrası meydana gelen eğilme durumunu da içeren Volkersen denkleminin

daha kapsamlı bir hasar yükü tahminini için Goland ve Reissner denklemi kullanılmaktadır (Dobrzanski ve Oleksiak 2021).

Genel Akma Kriteri denklemi;

$$F = \tau_a b l \quad (3.1)$$

Volkersen denklemi;

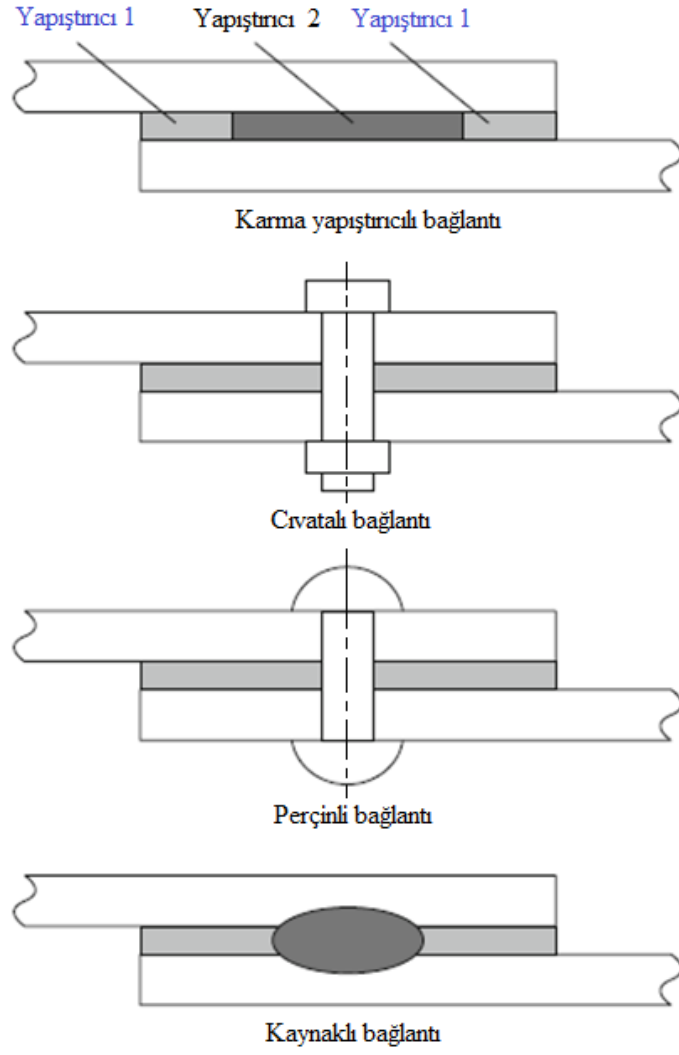
$$F = \tau \frac{2 b l \sinh (\Psi l)}{\Psi l (1 + \cosh (\Psi l))} \quad (3.2)$$

$$\Psi = \sqrt{\frac{G}{t_y} \left(\frac{2}{E t_m} \right)} \quad (3.3)$$

3.1’de verilen denklem ile 3.2’de verilen denklemlerin birleştirilmesiyle karma yapıştırıcıların hesabında kullanılan denklem 3.4’te verilmiştir.

$$F = (\tau_a b 2 l_e)_e + \left[\tau \frac{2 b l_r \sinh (\Psi l_r)}{\Psi l_r (1 + \cosh (\Psi l_r))} \right]_r \quad (3.4)$$

- F : Hasar yükü (N)
- τ_a : Yapıştırıcının kaymadaki akma dayanımı (MPa)
- τ : Yapıştırıcının kayma dayanımı (MPa)
- G : Yapıştırıcının kayma modülü (MPa)
- E : Yapıştırılan malzemenin elastite modülü (MPa)
- b : Bindirme bölgesi genişliği (mm)
- l : Bindirme bölgesi uzunluğu (mm)
- l_e : Bindirme bölgesindeki esnek yapıştırıcı uzunluğu (mm)
- l_r : Bindirme bölgesindeki rijit yapıştırıcı uzunluğu (mm)
- t_y : Yapıştırıcı kalınlığı (mm)
- t_m : Yapıştırılan malzemenin kalınlığı (mm)



Şekil 3.16 Karma yapıştırıcı bağlantı yöntemi ile hibrit bağlantı yöntemlerinin şematik gösterimi (Pocius 2012).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında, 2 mm kalınlığındaki cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ön darbe sonrası çekme ve üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. Tek yapıştırıcılı ve karma yapıştırıcılı bağlantıların darbesiz duruma göre enine darbe sonrası bağlantı dayanımları ve hasar mekanizmaları incelenmiştir.

4.1 Yapıştırılan Malzeme Özellikleri

Yapıştırılan malzeme olarak 2 mm kalınlığında cam elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanılmıştır. Yapıştırılan deney numuneleri ASTM D 5868-01 standardına uygun olarak 1000x1250 mm² kompozit plakadan su jeti ile kesilmiştir. Deney numunelerinin ölçüleri 125x25 mm² olacak şekilde kesimi yapılmıştır. Kullanılan cam elyaf takviyeli G10 kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme, basma ve üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan yapıştırılan malzemenin kesilmemiş plakasından ASTM D 3039 standardına uygun olarak kesilmiş numunelerinin çekme ve basma deneyleriyle ASTM D 2344 standardına uygun olarak kesilmiş numunelerin üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler hafiflik ve dayanım özelliklerini bir arada bulundurmaları sebebiyle birçok endüstriyel uygulama alanında kullanılmıştır. Bu malzemenin başlıca kullanım alanları uzay, havacılık ve otomotiv endüstrileri olmak üzere hafif ve dayanımı yüksek olması istenen birçok alanda da kullanılmaktadır. Bu malzemenin hafiflik ve dayanım özelliklerine ek olarak su geçirmez olması ve korozyon dayanımının yüksek olması kapalı ortamlar harici dış ortam şartlarına maruz kalan araçlar içinde cazip bir malzeme olarak tercih edilmesini sağlamıştır.

Tablo 4.1 Cam elyaf takviyeli G10 kompozit özellikleri.

Elyaf tipi	Woven
Çekme mukavemeti	320 MPa
Basma mukavemeti	465 MPa
Eğilme mukavemeti	465 MPa
Elastite modülü	18,6 GPa

4.2 Yapıştırıcıların Özellikleri

Kompozit malzemelerin tek yapıştırıcılı ve karma yapıştırıcılı yapıştırma işlemleri için iki farklı özellikte yapıştırıcı kullanılmıştır. Rijit yapıştırıcı olarak Araldite AV138/HV998, esnek yapıştırıcı olarak 3M DP8005 yapıştırıcıları kullanılmıştır. Rijit yapıştırıcı iki bileşenli olup teneke kutu içerisinde kütüce oranları hassas terzi ile ayarlanıp kullanılmıştır. Araldite AV138/HV998 yapıştırıcısı Şekil 4.1’de verilmiştir. Esnek yapıştırıcı iki bileşenli kartuş tip olup uygulama tabancası yardımıyla kullanılmıştır. 3M DP8005 yapıştırıcısının uygulama tabancasına montajlanmış hali Şekil 4.2’de verilmiştir. Kullanılan yapıştırıcıların mekanik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Araldite AV138/HV998 yapıştırıcı.



Şekil 4.2 3M DP8005 yapıştırıcının uygulama tabancasına montajlanmış hali.

Tablo 4.2 Tezde kullanılan yapıştırıcıların mekanik özellikleri (da Silva ve diğ. 2016).

Özellikler	AV138	DP8005
Elastite modülü	4890	590
Kayma modülü	1560	159
Çekme dayanımı	41	6,3
Kayma dayanımı	30,2	8,4

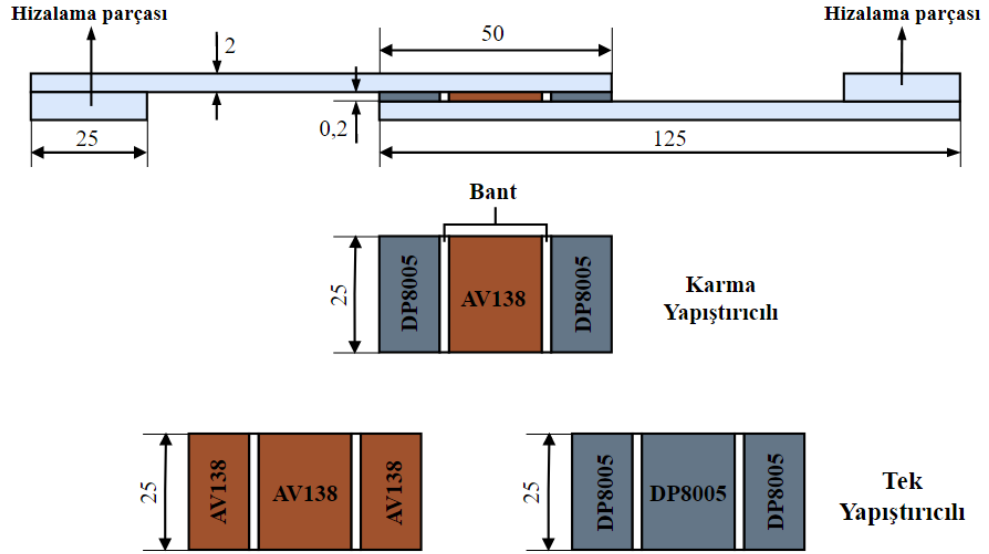
*Değerler N/mm²'dir.

Karma yapıştırıcılı bağlantıların literatürdeki çalışmalarında çoğunlukla rijit yapıştırıcı olarak AV138 ve esnek yapıştırıcı olarak DP8005 yapıştırıcıları kullanılmıştır. Kullanılan yapıştırıcıların üretici firmaları bu yapıştırıcıların en yaygın kullanım yerlerinin havacılık ve otomotiv endüstrileri olduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada her iki durum da göz önünde bulundurularak yapıştırıcı seçimi yapılmıştır.

4.3 Bağlantı Geometrisi

Tek yapıştırıcılı ve karma yapıştırıcılı bağlantı geometrileri ve ölçüleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Bağlantı geometrisi ASTM D 5868-01 standardı referans alınarak oluşturulmuştur. Referans alınan kompozit malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantıları standardından farklı olarak bindirme bölgesinin uzunluğu 50 mm olarak yenilenmiştir. Bağlantı geometrisindeki bindirme uzunluğunun tespiti için literatürde en sık tercih edilen iki bindirme uzunluğu (25 ve 50 mm) ile ön deneyler yapılmıştır. Bindirme bölgesi uzunluğunun 25 mm olduğu durumda 2,5 J ön darbe sonrası tüm bağlantı tiplerinde bindirme bölgesinin uç kısımlarından ayrılma gözlenmiştir. Bu sebeple standartta 25 mm olması gereken bindirme bölgesi uzunluğu farklı enerji seviyelerini değerlendirebilmek için 50 mm olarak yenilenmiştir. Bindirme bölgesinin uzunluğu 50 mm ve genişliği 25 mm'dir. Tek yapıştırıcılı bağlantılar bindirme bölgesinde rijit veya esnek yapıştırıcılardan sadece birinin kullanıldığı bağlantılardır. Karma yapıştırıcılı bağlantılar bindirme ortasında rijit yapıştırıcının bulunduğu, bindirme bölgesinin uç kısımlarındaysa esnek yapıştırıcının bulunduğu bağlantılardır.

Bu tez çalışması kapsamında AV138 tek yapıştırıcılı, DP8005 tek yapıştırıcılı ve iki farklı oranda (1/1 ve 1/2) karma yapıştırıcılı bağlantılar olmak üzere toplamda dört farklı bağlantı tipi test edilmiştir.



Şekil 4.3 Yapıştırma bağlantı geometrisi.

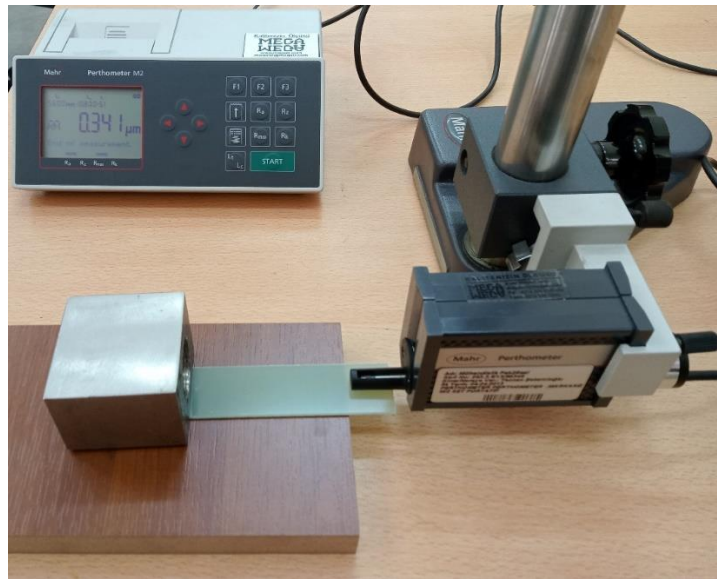
4.4 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri su jeti ile istenilen ölçülerde kesildikten sonra kenarlarda kesim sonrası oluşan çıkıntılar eğe yardımıyla temizlenmiş ve deney numunelerinin kenarları düzleştirilmiştir. Yapıştırma bağlantılarda yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasında mekanik kilitleme olması istenmektedir bu sayede yapıştırma bağlantılarından daha iyi bağlantı dayanımı elde edilmektedir. Yapıştırma işlemi öncesi yapıştırılan malzemelere fiziksel ya da kimyasal yöntemlerle aşındırma işlemleri uygulanmaktadır. Bu tez kapsamında kompozit malzemelere mekanik aşındırma işlemi uygulanmıştır. Kompozit malzemenin üretim sonrası yüzeyleri pürüzsüz olduğu için 100 numaralı zımpara kağıdı ile yapıştırıcı uygulanacak yüzeyleri aşındırılmıştır. Zımpara ile aşındırma işleminde, zımpara kağıdı sabit tutulup yapıştırılan malzemenin yapıştırıcı uygulanacak yüzeyi eksene dik yönde zımpara kağıdı üzerinde hareket ettirilmiştir. Zımparalama işleminin eksene dik yönde yapılmasının sebebi aksenal yönde çekme deneylerinde bağlantı dayanımı yükseltmeyi sağlamaktır. Deney numunelerinin zımparalama işlemi öncesi ve sonrası yüzeyleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Zımparalama işleminde bindirme bölgesi uzunluğunun 50 mm olması sebebiyle yaklaşık 60 mm uzunluğa kadar zımparalama yapılmıştır.



Şekil 4.4 Pürüzlendirme işlemi öncesi ve sonrası.

Tezin 2. bölümünde 2.2.4 alt başlığında pürüzlendirme işleminin önemi ve olması gereken optimum değerler anlatılmıştır. Pürüzlendirme işlemi sonrası ortalama yüzey pürüzlülüğünün R_a 1-3 μm aralığında olması istenmektedir. Pürüzlülük ölçümü için Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Elemanları Laboratuvarında bulunan Mahr Perthometer M2 cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ile yüzey pürüzlülüğü R_a ve R_z , gibi farklı değerlerde ölçülebilmektedir. Cihazla kompozit malzemenin zımparalama işlemi öncesi yüzeyinin pürüzlülük ölçümü Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Zımparalama işlemi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) cinsinden değişimi Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

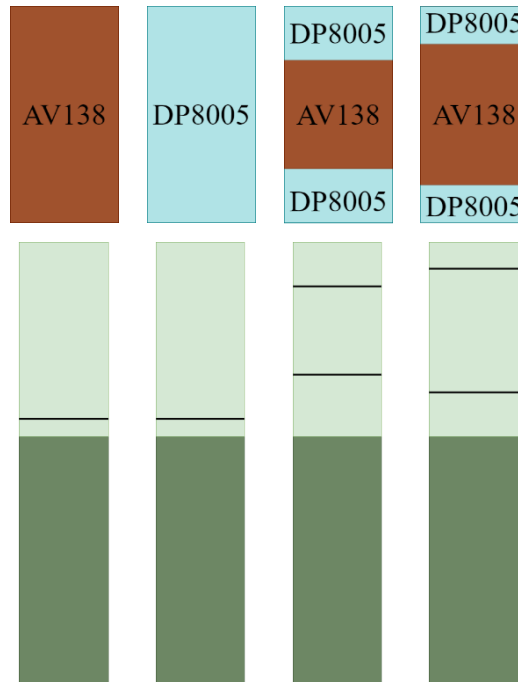


Şekil 4.5 Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.

Tablo 4.3 Zımparalama işlemi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri.

Yüzey Kalitesi	R _a (µm)		
	En düşük	Ortalama	En yüksek
Pürüzlendirme Öncesi	0,32	0,4	0,46
Pürüzlendirme Sonrası	1,7	2	2,1

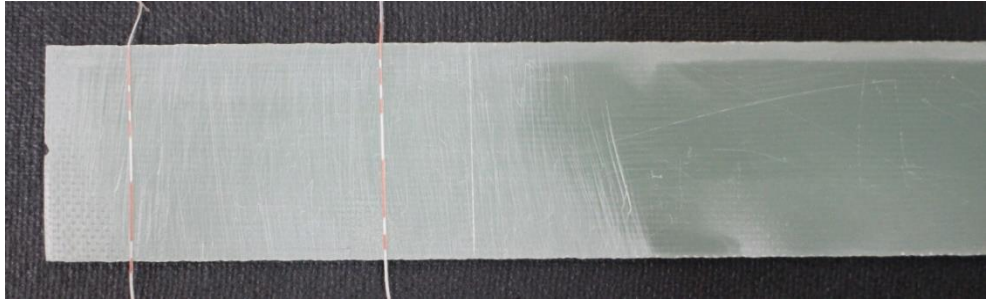
Kompozit malzemelerin yüzey pürüzlendirme işleminin ardından yapıştırıcı uygulanacak bölgenin belirlenmesi için markalama işlemi yapılmıştır. Tek yapıştırıcı bağlantıların oluşturulabilmesi için yapıştırılacak malzemelerden birinin yüzeyine mihengir yardımıyla kısa kenarla arasında 50 mm mesafe olacak şekilde düz bir çizgi çizilmiştir. Tek yapıştırıcı bağlantılar için markalama işlemi yapıştırıcı uygulaması sırasında yapıştırıcı sarfiyatını azaltmak amacıyla yapılmıştır. Karma yapıştırıcı bağlantılarda iki farklı oranda yapıştırıcı uygulaması yapılması sebebiyle markalama işlemi esnek ve rijit yapıştırıcıların uygulanacağı bölgeleri belirlemeyi sağlamaktadır. 1/1 oranındaki karma yapıştırıcı bağlantılarda yapıştırılacak malzemelerden birinin yüzeyine mihengir yardımıyla kısa kenarla arasında 12,50 mm ve 37,50 mm mesafe olacak şekilde iki düz çizgi çizilmiştir. 1/2 oranındaki karma yapıştırıcı bağlantılarda yapıştırılacak malzemelerden birinin yüzeyine mihengir yardımıyla kısa kenar ile arasında 8,33 mm ve 41,67 mm mesafe olacak şekilde iki düz çizgi çizilmiştir. Mihengir ile markalama işlemi sonrası numunelerde çizgilerin görünümünün şematik çizimi Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Bağlantı tiplerine göre markalama işlemi.

Markalama işleminin sonrası yapıştırıcı uygulaması yapılacak yüzeylerin temizliği yapılmıştır. Yüzeylerdeki olası yağ ve kir kalıntıları %99,5 saflıktaki aseton ile temizlenmiştir. Yüzeylere aseton püskürtme tabancası ile uygulanmıştır ve bu uygulamadan sonra yüzeylere herhangi bir kirletici temasta bulunulmamıştır.

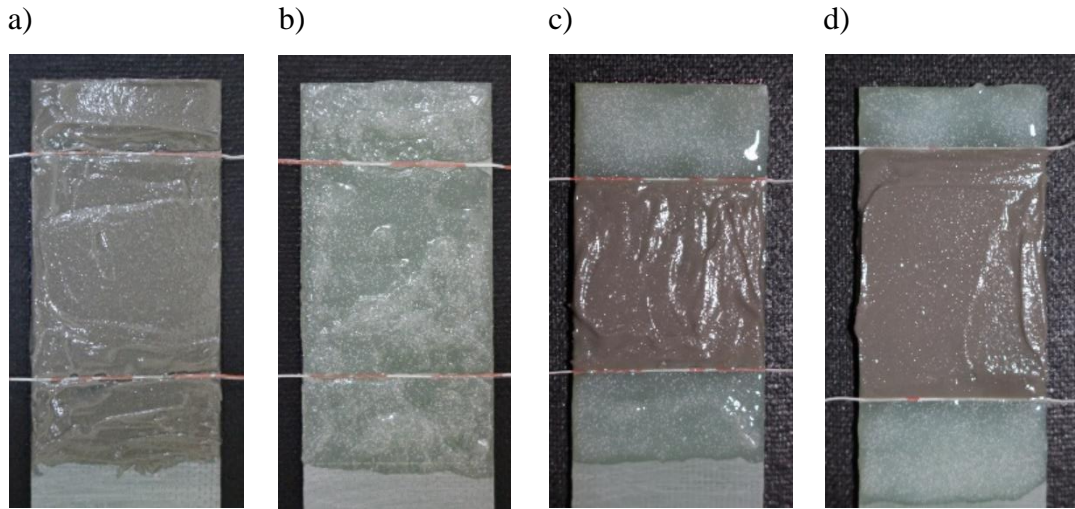
Yapıştırıcı uygulanacak yüzeylerin temizliği sonrasında yapıştırıcı kalınlığını ve yapıştırıcı bölgelerini ayarlamak için yüzeye iki adet çok ince kesilmiş bant yapıştırılmıştır. Yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı kalınlığı dayanımı etkileyen temel unsurlardan biridir. Yapıştırıcı kalınlığının belirlenmesi için yapıştırıcı uygulanacak yüzeye bağlantıda istenilen yapıştırıcı kalınlığında misina ip, bakır tel veya bant yapıştırılmaktadır. Bu tez kapsamında yapıştırıcı kalınlığının belirlenmesinde literatürde de belirtildiği gibi üçlü tekilliklerin oluşmasını engelleyen yapıştırıcı bant kullanılmıştır. Tek yapıştırıcılı bağlantılarda yapıştırıcı kalınlığını belirlemek için yapıştırıcı uygulaması yapılacak markalanmış bölgeye 210 µm kalınlığında 3M markalı çift taraflı banttan kesilmiş yaklaşık 0,3 mm genişliğinde iki adet bant yapıştırılmıştır. Karma yapıştırıcılı bağlantılarda yapıştırıcı kalınlığını belirlemek içinse markalanmış yüzeydeki iki çizginin üzerine aynı kalınlık ve genişlikteki bantlar çizgileri ortalayacak şekilde yapıştırılmıştır. Yapıştırma bağlantılardaki yapıştırıcının kalınlığını ayarlamak için yapıştırıcı uygulanacak yüzeye bant yapıştırma işlemi Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Yapıştırıcı uygulanacak yüzeye bant yapıştırma işlemi.

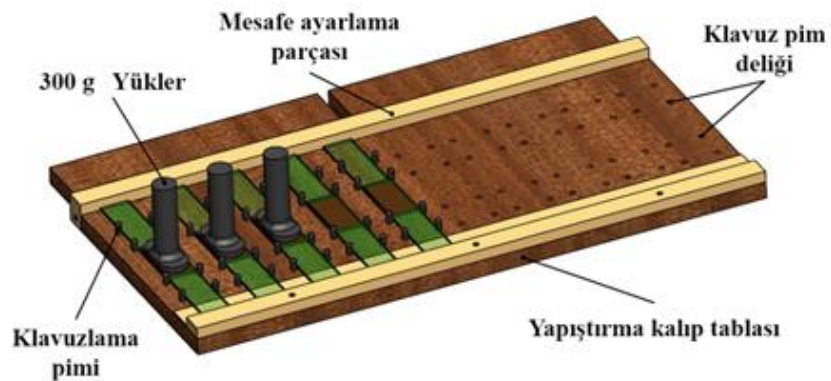
Deney numunelerinin oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılacakları yapıştırma kalıbı bağlantının toplam uzunluğu olan 200 mm’ye ayarlanmıştır. Rijit yapıştırıcı olan AV138 yapıştırıcısı 4/10 oranında sertleştirici/yapıştırıcı olacak şekilde hassas terazi ile yapıştırılacak malzemeye yetecek kadar karıştırılmıştır. Esnek yapıştırıcı olan DP8005 38 ml kartuş tip yapıştırıcıya uygun tabanca ile uygulanmıştır.

Yapıştırıcı uygulaması yapılan malzemeler yapıştırma kalıbındaki yerlerine yerleştirilip üzerlerine diğer yapıştırılacak malzeme kapatılmıştır. Bindirme bölgesi üzerlerine yaklaşık 300 gram yükler konularak fazlalık yapıştırıcıların tahliyesi sağlanmıştır. Kenarlardan taşan yapıştırıcılar bağlantıya zarar vermeden temizlenmiştir. Farklı parametreler için tek yapıştırıcı ve karma yapıştırıcı deney numunelerinden 5'er adet yapıştırılmıştır. Tek yapıştırıcı ve karma yapıştırıcı bağlantı yöntemlerindeki yapıştırıcı uygulama işlemi Şekil 4.11'de verilmiştir.



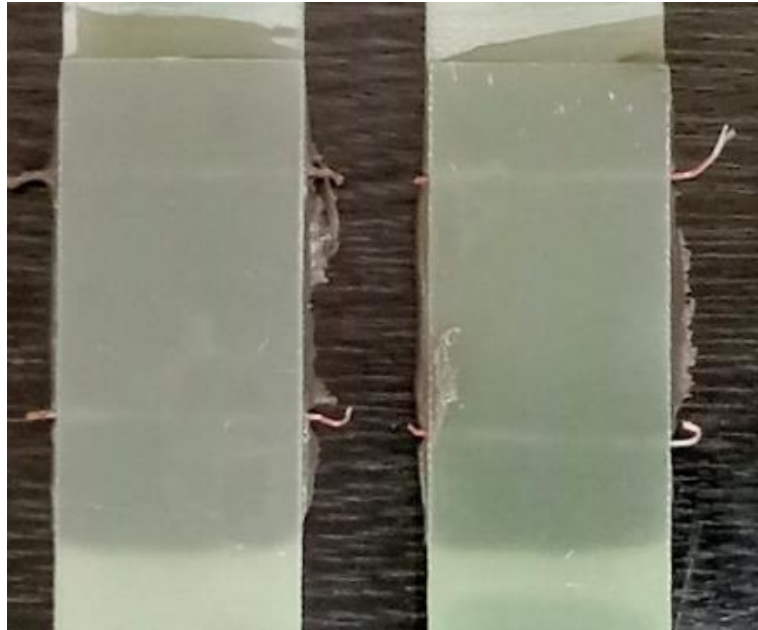
Şekil 4.8 Yapıştırıcı uygulaması, a) AV138 tek yapıştırıcı, b) DP8005 tek yapıştırıcı, c) 1/1 oranında karma yapıştırıcı, d) 1/2 oranında karma yapıştırıcı.

Yapıştırıcılardan AV138 ve DP8005 in oda sıcaklığında tam kürlenme süreleri sırasıyla 2 gün ve 1 gündür. Yapıştırma kalıbındaki her numune tam kürlenme sağlanması için 2 gün kalıpta bekletilmiş ve sonrasında 5 günde oda sıcaklığında tutulmuştur. Yapıştırma kalıbının ve numunelerin yerleşiminin, şematik gösterimi Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9 Yapıştırma bağlantılarının kalıptaki yerleşimi.

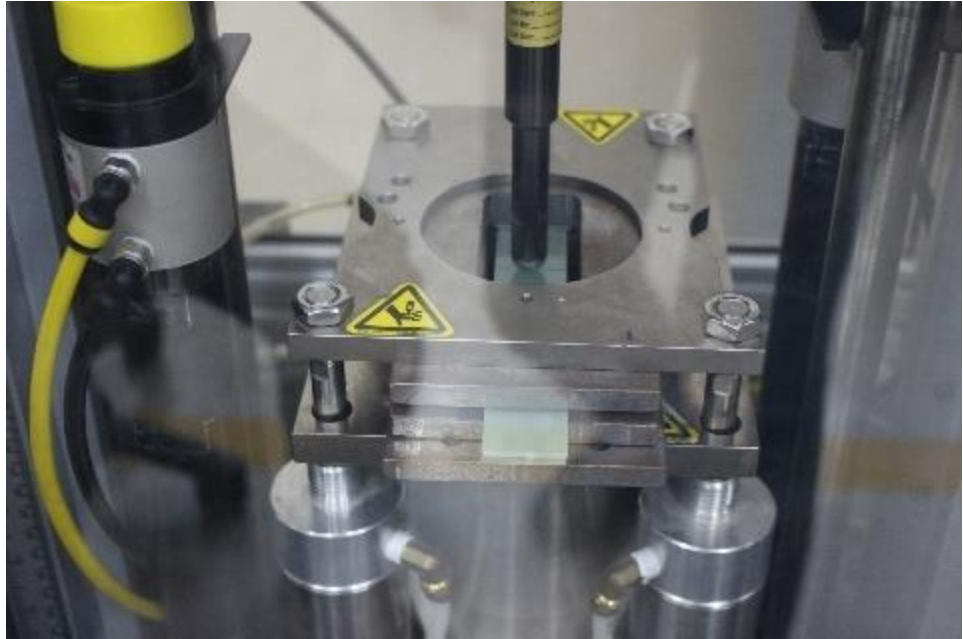
Yapıştırma bağlantılar 2 gün kalıpta bekletildikten sonra kalıptan alınıp oda sıcaklığında 5 gün daha bekletildikten sonra deney adımına geçilmiştir. 5 günlük oda sıcaklığında bekletilme aşamasında bağlantıların kalıp üzerindeyken temizlenememiş olan taşan yapıştırıcıları temizlenmiştir. Yapıştırma bağlantıların kalıptan alındıktan sonra bindirme bölgesi etrafından taşan yapıştırıcıların görünümü Şekil 4.10'da verilmiştir. Temizleme işlemi hem yapıştırıcıya hem de yapıştırılan malzemeye zarar vermeden yapılmıştır. Rijit yapıştırıcı olan AV138 eğe yardımıyla törpülenerek temizlenmiştir. Esnek yapıştırıcı olan DP8005 rijit yapıştırıcıya göre daha yumuşak olması sebebiyle maket bıçağı ile temizlenmiştir. Bu temizleme işleminde bindirme bölgesinin uç kısımlarından taşan yapıştırıcıların mukavemet artışı sağlamaması için yapıştırıcı tabakaya zarar vermeden eğe yardımıyla törpülenerek temizlenmiştir. Bindirme bölgesinin etrafındaki taşan yapıştırıcıların temizlenmesinin ardından yapıştırma bağlantıların üzerlerindeki toz ve kalıntılar kuru bir bez yardımıyla alınmıştır. Bu temizlik işleminden sonra yapıştırma bağlantıların üzerinde herhangi bir toz bulunmadığı için yapıştırma bağlantısındaki yapıştırıcı katmanın kalınlık ölçümü yapılmıştır. Ölçüm işleminde kumpas ve mikrometre kullanılmıştır. Bu ölçüm işlemi yapıştırma bağlantıların bindirme bölgesinde kullanılan bandın üzerine yapıştırıcı sızması olup olmadığını kontrol etmek amacıyla yapılmıştır. Son olarak yapıştırma bağlantıların kodları asetat kalem ile kompozit yüzeyine yazılmıştır.



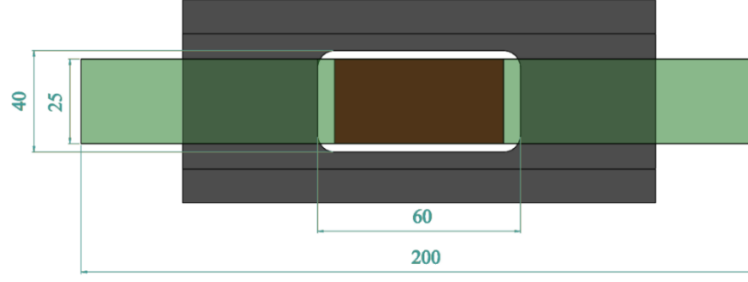
Şekil 4.10 Bindirme bölgesi etrafından taşan yapıştırıcılar.

4.5 Darbe Deneyi İşlemleri

Yapıştırma bağlantıları 1 hafta kürlenme sürecinin ve temizlik işlemlerinin ardından deney aşamasına geçilmiştir. Darbe deneyleri Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan INSTRON 9250HV cihazında 5,95 kg yük ile yapılmıştır. Tek yapıştırıcılı ve karma yapıştırıcılı bağlantılara 2,5/3,5/5 ve 7,5 J darbe enerjilerinde düşük hızlı enine darbe vurulmuştur. Darbe cihazında 60 mm açıklığında ve 40 mm genişliğinde fikstür kullanılmıştır. Deneylerde 12,5 mm çapta yarım küre uca sahip darbe vurucu kullanılmıştır. Darbe deneylerinde kullanılan INSTRON 9250HV cihazına numunelerin yerleşimi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Darbe deneylerinde darbe vurulan yüzey yapıştırma kalıbında yapıştırıcı uygulaması yapılmış malzemenin üzerine kapatılan malzeme yüzeyi olmuştur. Darbe cihazında kullanılan fikstürün şematik gösterimi Şekil 4.12'de verilmiştir. Darbe deneylerinde 60 mm açıklığa sahip fikstür kullanılmasının sebebi 50 mm uzunluğundaki bindirme bölgesinin uç kısımlarında oluşacak ayrılmalarda ve gerilme yığılmalarında yapıştırıcının davranışının test edilebilmesidir. Darbe deneyleri sırasında cihazın fikstürü pnömomatik sıkıştırma işleminde numunenin tam olarak sıkıştırılmasının sağlanması için altta bulunan fikstürün üst yüzeyine, üstte bulunan fikstürün alt yüzeyine cam elyaf takviyeli kompozit malzemeden kesilmiş birer hizalama parçası yerleştirilmiştir.



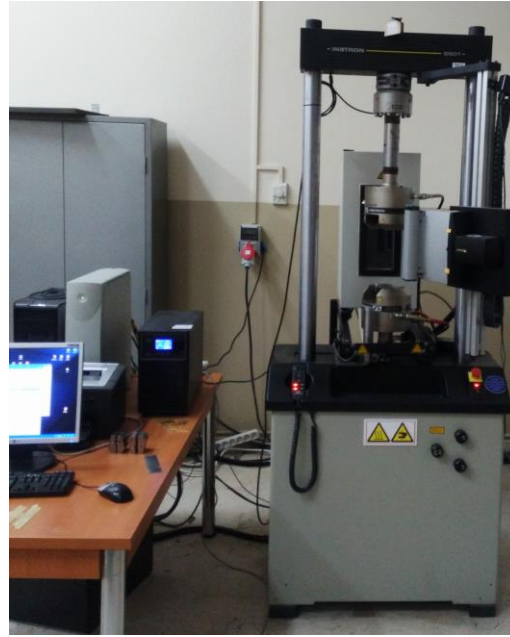
Şekil 4.11 Darbe deney cihazına numunenin yerleşimi.



Şekil 4.12 Darbe deneylerinde kullanılan fikstürün şematik gösterimi.

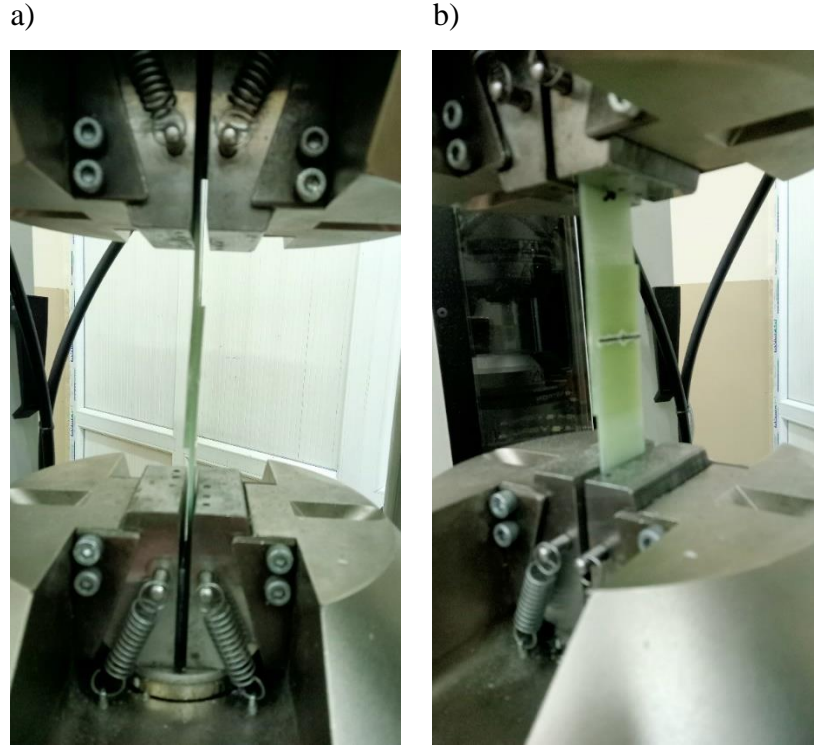
4.6 Çekme Deneyi İşlemleri

Çekme deneyleri Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan INSTRON 8801 cihazıyla ASTM D 5868-01 standardına uygun olarak 1 mm/min hızında yapılmıştır. Darbesiz ve ön darbe vurulmuş tüm yapıştırma bağlantıların çekme testleri yapılmıştır. Çekme cihazı 50kN yük hücreğine sahiptir. Hidrolik sistemle çalışan çekme cihazında üst çene sabit olup alt çeneden çekme işlemi yapılmaktadır. Bu çalışma prensibi göz önüne alınarak alt çeneye darbe vurulan kısım gelecek şekilde cihaza bağlanmıştır. Çekme deneylerinde ve her iki çeneye aparatları takılarak üç noktalı eğilme deneylerinde kullanılan INSTRON 8801 cihazı Şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.13 Çekme deney cihazı.

Çekme deneyi sırasında yapıştırma bağlantının cihaza nasıl bağlandığını gösteren resim Şekil 4.14'te verilmiştir. Çekme deneylerinin yapıştırıcı ekseninde olmasını sağlamak için deney öncesinde yapıştırma bağlantılarının çenelere bağlanacak her iki ucuna 2 mm kalınlığındaki kompozit malzemedeki kesilmiş hizalama parçaları yapıştırılmıştır.



Şekil 4.14 Yapıştırma bağlantılarının çekme deney cihazına bağlantısı, a) Yan görünüşü, b) Ön görünüşü.

4.7 Üç Nokta Eğilme Deneyi İşlemleri

Üç nokta eğilme deneyleri Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan INSTRON 8801 cihazıyla 2 mm/min hızında yapılmıştır. Bu cihazın çenelerine aparatları takılarak üç nokta ve dört nokta eğilme deneyleri yapılmaktadır. Darbesiz ve ön darbe vurulmuş tüm yapıştırma bağlantılarının üç nokta eğilme testleri yapılmıştır. Eğilme testinde kullanılan alttaki destekler arası mesafe 100 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Üç nokta eğilme testi için kullanılan çenelere bağlanmış alttaki iki destekte ve üstteki eğilmeye zorlayan uçta yarıçapı 3 mm olan silindirik çubuklar kullanılmıştır. Üç noktalı eğilme deneylerinde kullanılan prosedür Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Üç nokta eğilme cihazına yapıştırma bağlantılarının yerleşimi.

Üç nokta eğilme deneylerinde yapıştırma bağlantılar darbe vurulmuş yüzeyinden basıcı uç ile eğilmeye zorlanmıştır. Üstteki basıcı ucun yapıştırma bağlantıya düz bir şekilde basması için deney öncesinde yapıştırma bağlantıdaki darbe vurulmuş yüzeyin arkasına destek açıklığı göz önünde bulundurularak hizalama parçası yapıştırılmıştır.

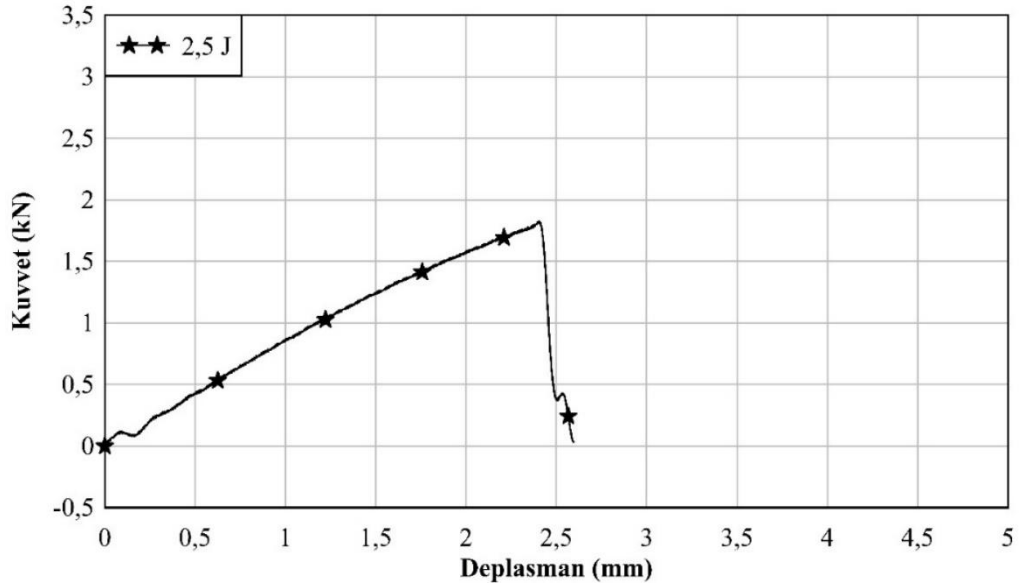
5. DENEYSEL BULGULAR

Tezin bu bölümünde AV138 ve DP8005 yapıştırıcıları kullanılarak cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yapıştırılmasında, tek yapıştırıcılı ve karma yapıştırıcılı bağlantı yöntemlerinin kullanılmasının bağlantı dayanımını nasıl etkilediği incelenmiştir. Buna ek olarak düşük hızda enine darbe sonrası davranışları incelenmiştir. Darbe sonrası davranışlarının belirlenebilmesi için ön darbe uygulanmış deney numunelerinin çekme ve üç nokta eğilme deneyleri yapılmıştır.

5.1 AV138 Tek Yapıştırıcılı Bağlantılar

5.1.1 Darbe Deneyleri

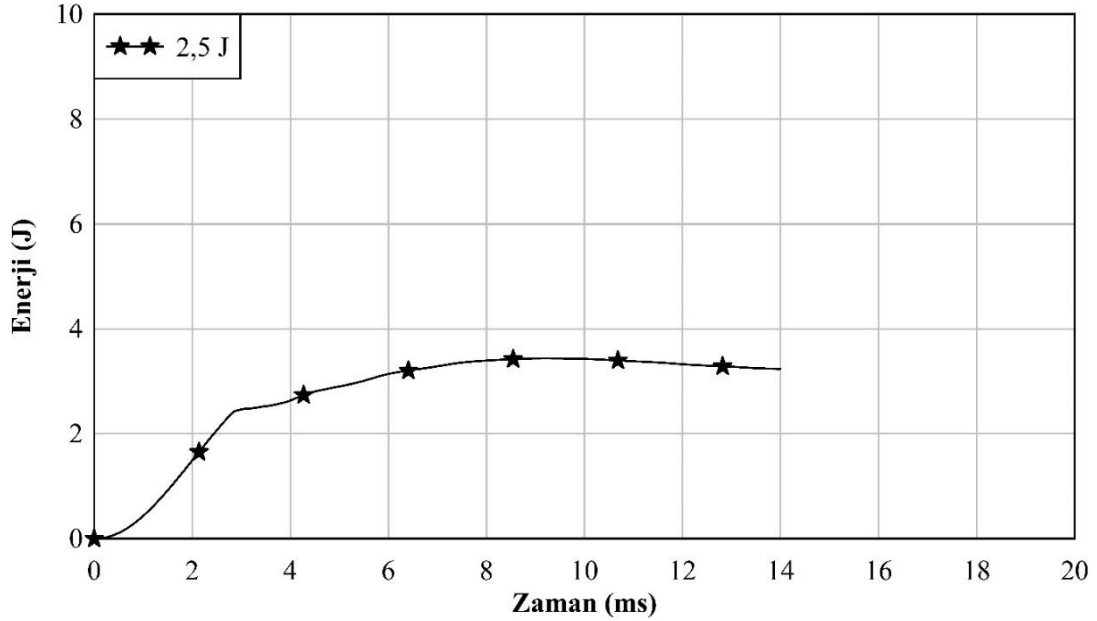
AV138 rijit yapıştırıcısının tek olarak kullanıldığı bağlantılarda 3,5 J darbe uygulanan numunelerin tümü bindirme bölgesinden tamamen ayrıldığı için sadece 2,5 J ön darbe uygulanan deney numuneleri değerlendirmeye alınmıştır. 2,5 J ön darbe sonucunda yapıştırma bağlantılarda bindirme bölgesinin uç kısımlarında kısmen ayrılma hasarı meydana gelmiştir. Darbe deneyi sonucu Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 AV138 tek yapıştırıcılı bağlantının darbe deney grafiği.

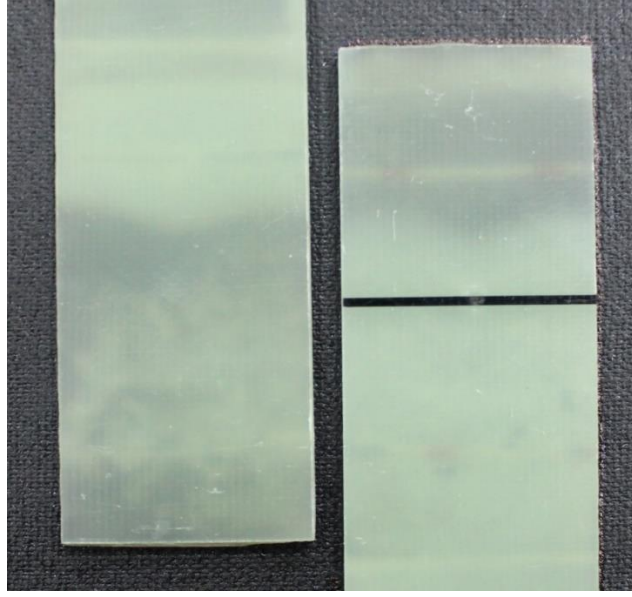


Şekil 5.2 2,5 J ön darbe sonrası AV138 tek yapıştırıcılı bağlantılarda meydana gelen hasar.



Şekil 5.3 AV138 tek yapıştırıcılı bağlantıların enerji-zaman grafiği.

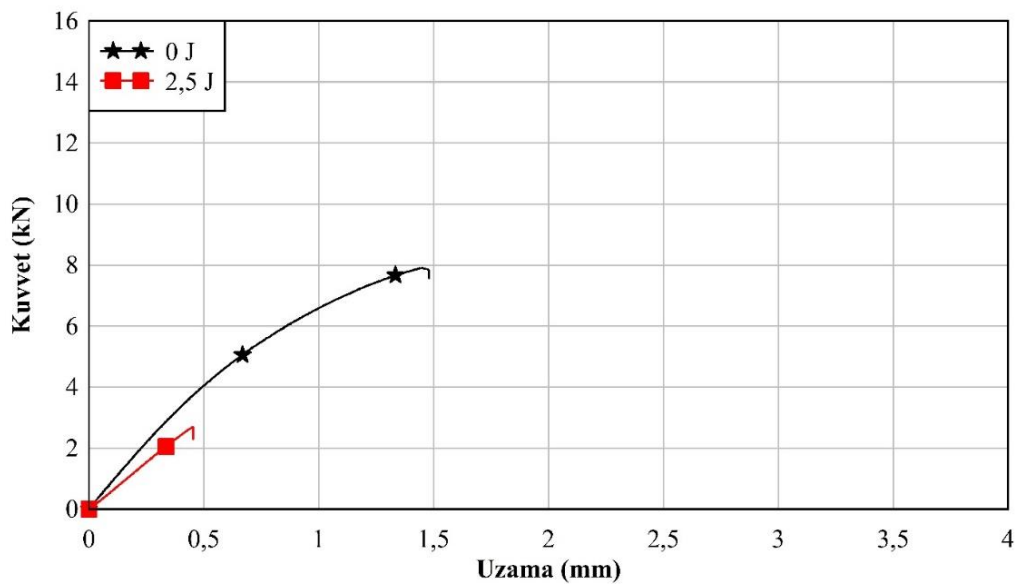
2,5 J ön darbe deneylerinde darbe uygulanan üstteki kompozit yapıştırılan malzemenin altında kalan bindirme bölgesinin uç kısmında yapıştırıcı ayrılması gözlenmiştir. Şekil 5.2'de bu durum görülmektedir, görselde alttaki yapıştırılan kompozit yüzeyinden darbe uygulanmıştır. AV138 tek yapıştırıcılı bağlantılarda bindirme bölgesinin uç kısımlarında oluşan gerilme yığılmaları yapıştırıcının rijit özelliklere sahip olması sebebiyle hasar ile sonuçlanmıştır. Şekil 5.3'te AV138 tek yapıştırıcılı bağlantıların enerji-zaman grafiği verilmiştir. Şekil 5.1 ve 5.3'te AV138 rijit yapıştırıcısının tek başına kullanıldığı bağlantılarda darbe enerjisinin sönmelenemediği ve hasar ile sonuçlandığı görülmektedir. 2,5 J ön darbe öncesinde kompozit malzeme yüzeyinden bir bütün olarak gözüken yapıştırıcı tabakanın darbe sonrasında, hasarın olduğu taraftan başlayarak bindirme bölgesinin ortasına kadar beyaza dönüştüğü görülmüştür. Şekil 5.4'te 2,5 J ön darbe sonrası kompozit yüzeyinde meydana gelen hasar verilmiştir.



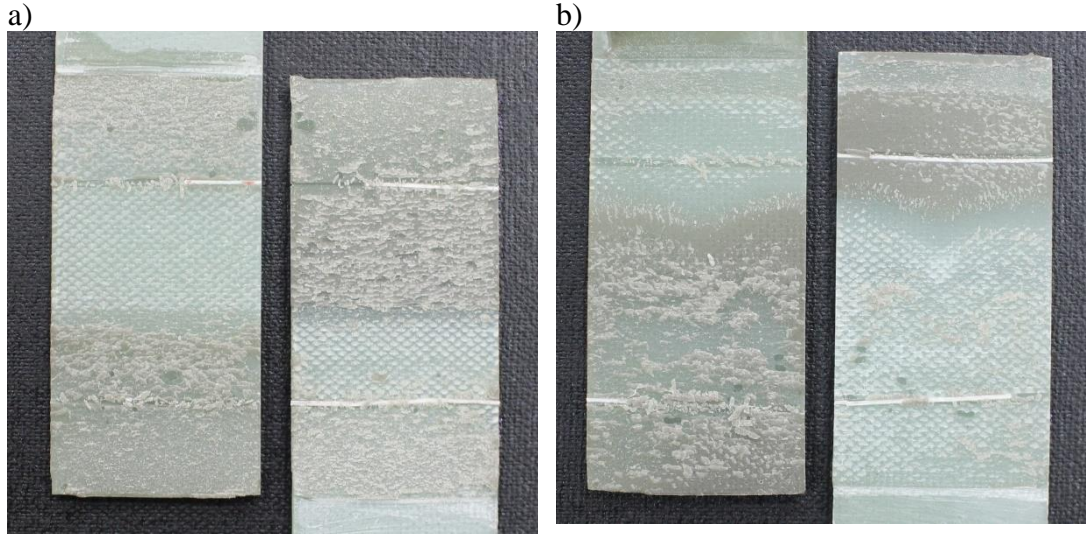
Şekil 5.4 2,5 J ön darbe sonrası darbe yüzeyinin görünümü.

5.1.2 Çekme Deneyleri

AV138 rijit yapıştırıcısının tek olarak kullanıldığı bağlantılarda 2,5 J ön darbe sonrasında bindirme bölgesinin uç kısımlarından ayrılmalar gözlenmiştir bunun sonucunda da darbesiz durumda 8000 N civarında olan hasar yükü ön darbe sonrası çekme deneylerinde 2600 N seviyesine düşmüştür. Çekme deneyi grafiği Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 AV138 tek yapıştırıcılı bağlantıların çekme deney grafiği.

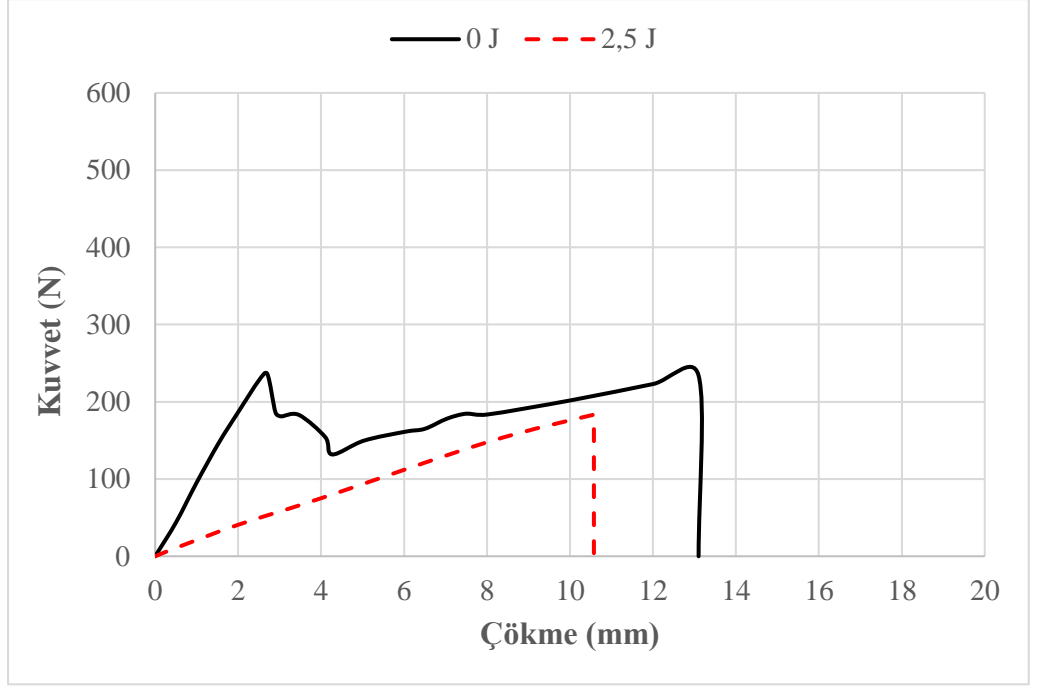


Şekil 5.6 Çekme deneyi sonrası meydana gelen yapıştırıcı hasarları, a) 0 J, b) 2,5 J.

AV138 tek yapıştırıcılı bağlantıların darbesiz ve 2,5 J ön darbe sonrası çekme deneyleri yapıştırıcı hasarı ile sonuçlanmıştır. Çekme deneyi sonucu meydana gelen yapıştırıcı hasarları Şekil 5.6’da verilmiştir. Bağlantılarda meydana gelen yapıştırıcı hasarının büyük ölçüde kohezyon hasarı olduğu görülmüştür. Deneysel çalışmalardaki yapıştırma bağlantılarında kohezyon hasarının meydana gelmesi yapıştırma işleminde bir problem olmadığını göstermektedir.

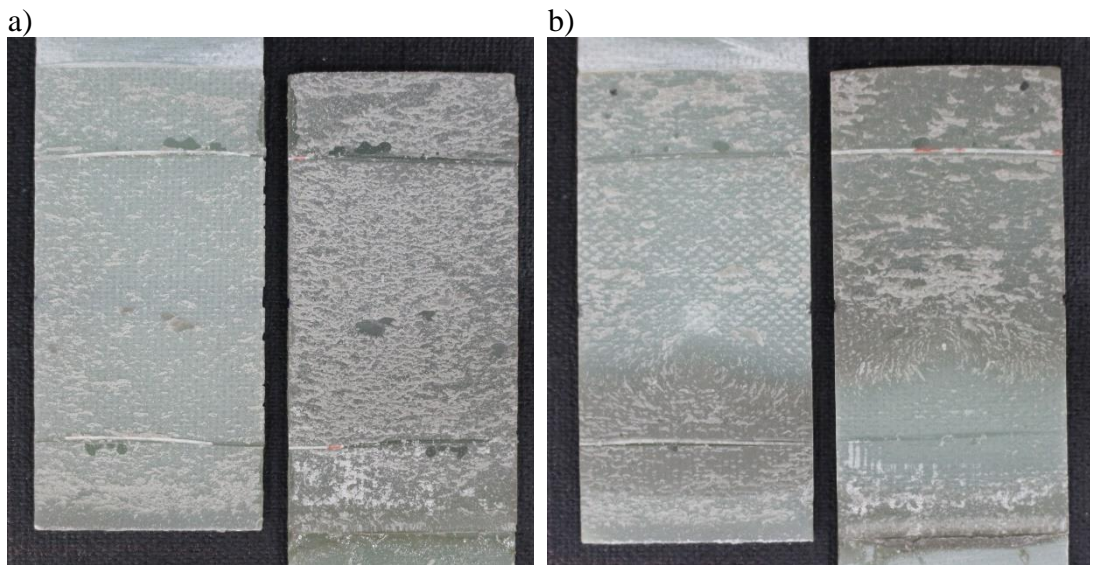
5.1.3 Üç Nokta Eğilme Deneyleri

Üç nokta eğilme deneylerinde, darbesiz durumda 235 N yük seviyesine kadar bindirme bölgesinin uç kısımlarında bir yapıştırıcı ayrılma hasarının başlamadığı ama bu noktadan sonra ufak bir çatlak başlangıcıyla ayrılmanın başlayıp ilerlediği gözlenmiştir. Üç nokta eğilme deney grafiği Şekil 5.7’de verilmiştir. Üç nokta eğilme grafiğinde rijit yapıştırıcının, bağlantıdaki yapıştırıcının tamamen ayrılana kadar yaklaşık aynı yük seviyesinde kaldığı gözlenmiştir. Bunun sonucu olarak bağlantının kopması sırasında yapıştırılan malzemelerin bir anda ayrılıp fırladığı gözlenmiştir. 2,5 J ön darbe sonrası yapıştırıcı bindirme bölgesinin ortasına kadar hasara uğradığı için ön darbe sonrası yapılan üç nokta eğilme deneyinde 0 J’de olduğu gibi bir çatlak başlangıç noktası grafikte görülmemektedir. 2,5 J ön darbe sonrasında çatlak oluşumu mevcut olduğu için 0 J’deki kadar yüksek bir hasar yükü elde edilememiştir.



Şekil 5.7 AV138 tek yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme grafiği.

AV138 tek yapıştırıcılı bağlantıların darbesiz ve 2,5 J ön darbe sonrası üç nokta eğilme deneyleri yapıştırıcı hasarı ile sonuçlanmıştır. Üç nokta eğilme deneyi sonucu meydana gelen yapıştırıcı hasarları Şekil 5.8’de verilmiştir. Bağlantılarda meydana gelen yapıştırıcı hasarının kohezyon hasarı olduğu görülmüştür.

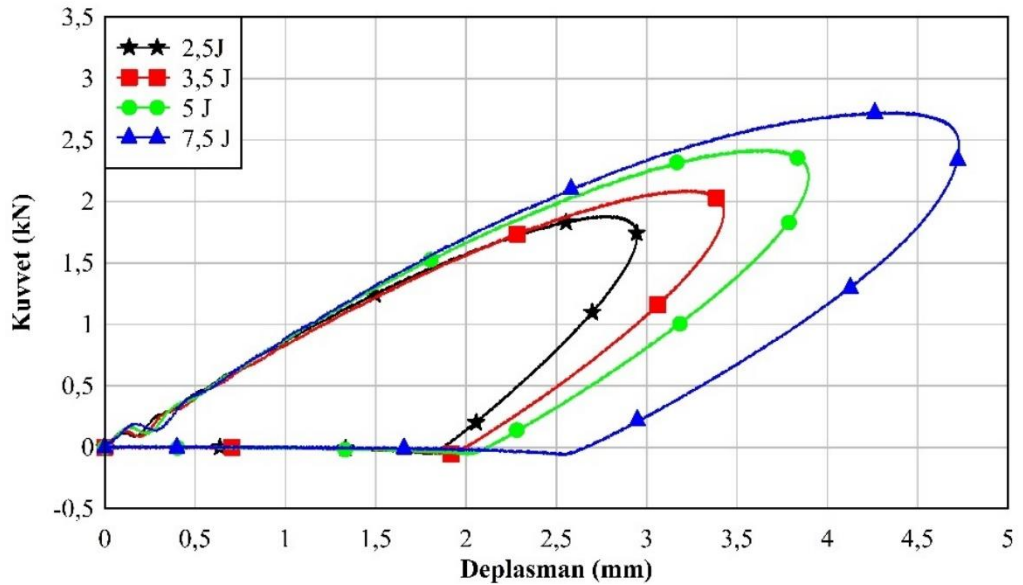


Şekil 5.8 Üç nokta eğilme sonrası meydana gelen yapıştırıcı hasarları, a) 0 J, b) 2,5 J.

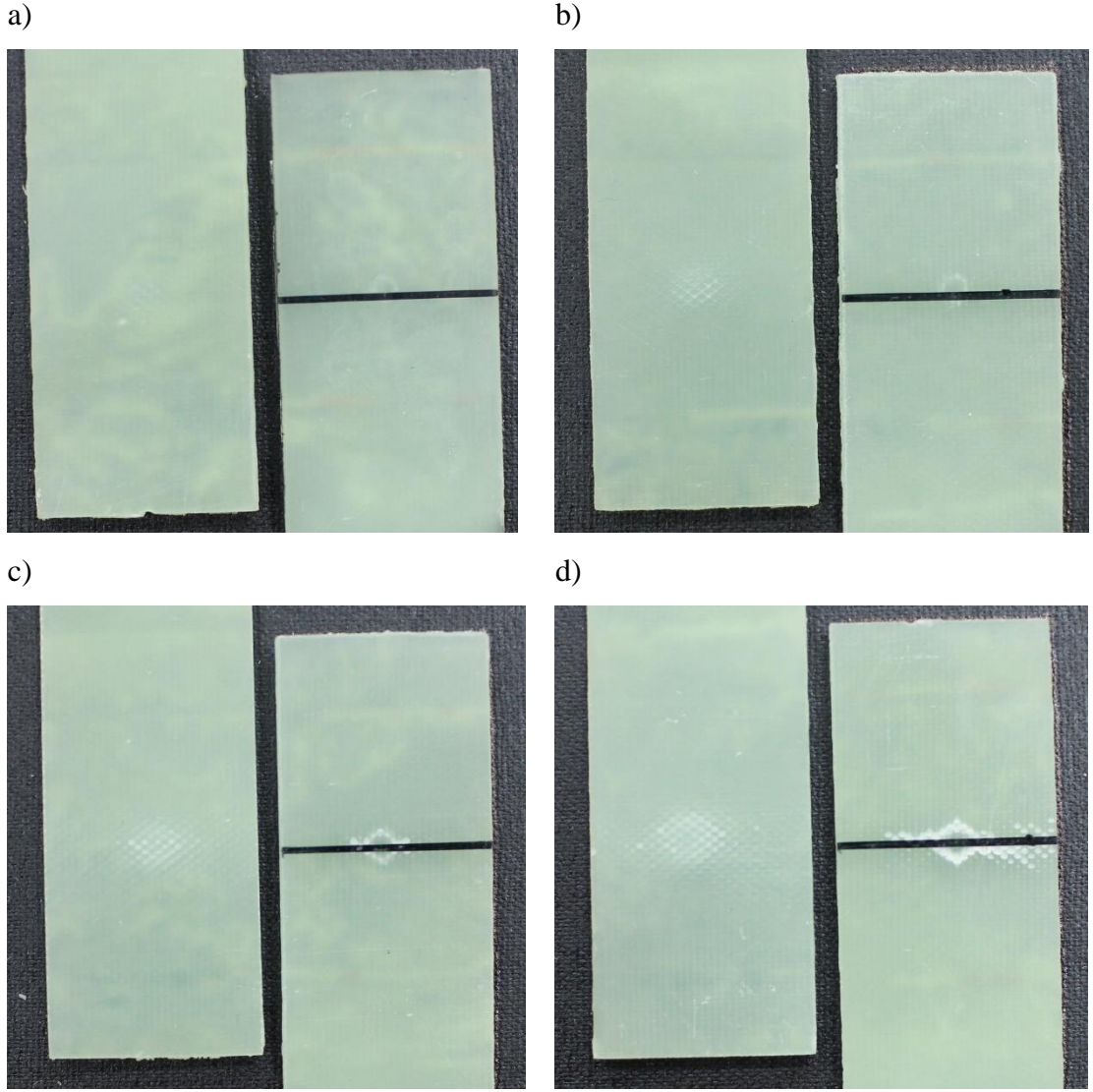
5.2 DP8005 Tek Yapıştırıcılı Bağlantılar

5.2.1 Darbe Deneyleri

DP8005 esnek yapıştırıcısının tek olarak kullanıldığı bağlantılarda sırasıyla 2,5/3,5/5 ve 7,5 J enerji seviyelerinde ön darbe deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde darbe sonucunda bindirme bölgesinin uç kısımlarından ayrılma gözlenmemiştir. Darbe deneyi grafiği Şekil 5.9'da verilmiştir. Grafikte eğrilerin kapalı bir form oluşturduğu görülmüştür. Kapalı form oluşturan bu eğrilerin içerisinde kalan alan yapıştırma bağlantıların sönümlediği toplam enerjiyi göstermektedir. Eğrilerin 0 noktasından başlayarak maksimum kuvvet seviyesine ulaşana kadar ki kısmı rijitlik eğrisi olarak tanımlanmaktadır. Enerji seviyesi arttıkça bu rijitlik eğrisinin eğimi değişmemiştir. Bağlantılardaki darbe sonrası kalıcı deplasmanlar enerji seviyesinin artmasıyla doğru orantılı olarak artmıştır. Darbe seviyesi arttıkça matris hasarının da arttığı, darbe vurulan kompozit malzeme yüzeyinde ve aralarında yapıştırıcı bulunan diğer kompozit malzeme yüzeyinde meydana gelen beyazlığın boyutundan anlaşılmıştır. Darbe grafiklerinin hepsinde başlangıç noktasında ufak bir dalgalanma olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmanın sebebi darbe vurucu ucun kompozit yüzeyine ilk değdiği anda meydana gelen matris hasarı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.9 DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantıların darbe deney grafiği.

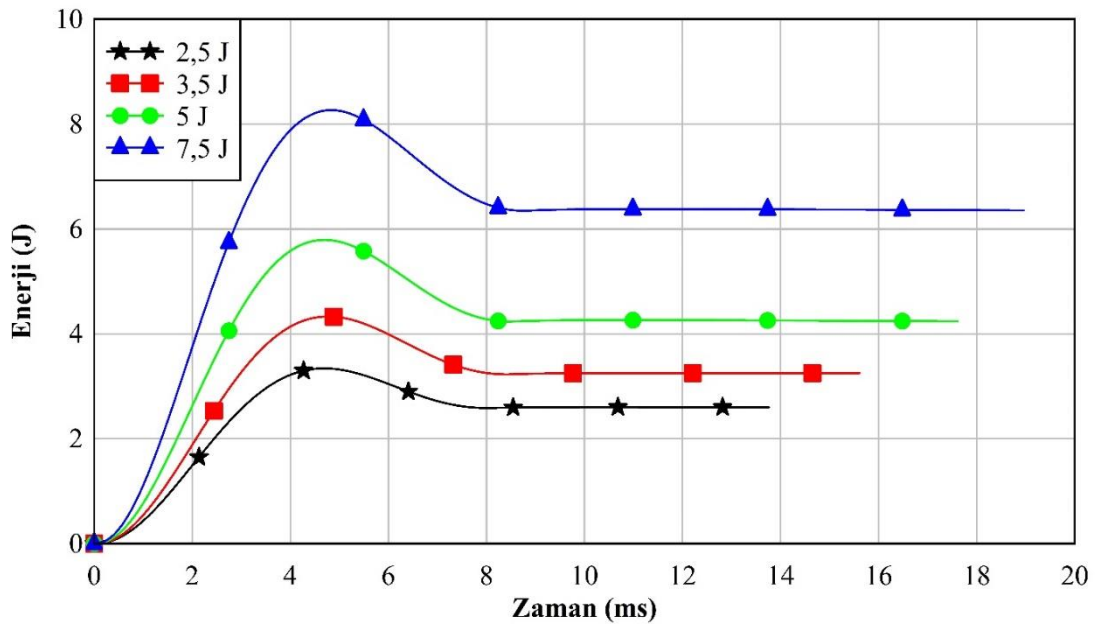


Şekil 5.10 DP8005 tek yapıştırıcı bağlantıların darbe sonrası hasarlı yüzeyleri, a) 2,5 J, b) 3,5 J, c) 5 J, d) 7,5 J.

DP8005 tek yapıştırıcı bağlantıların ön darbe deneyleri dört farklı enerji seviyesinde yapılmıştır. Deneylerde kullanılacak ön darbe enerji seviyelerinin belirlenmesi için yapılmış deneme çalışmalarında DP8005 tek yapıştırıcı bağlantıların 10 J ön darbe deneyi yapılmıştır. Bu deneyin sonucunda 7,5 J'den yüksek enerji seviyesinde yapılacak deneylerde kompozit malzemede matris hasarlarının yanında elyaf kopmalarının da meydana geldiği görülmüş bu sebeple maksimum 7,5 J enerji seviyesine çıkmıştır.

Şekil 5.10'da dört farklı enerji seviyesinde darbe uygulanmış DP8005 tek yapıştırıcı bağlantıların hasar yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 5.11'de darbe deneylerinin enerji-zaman grafikleri verilmiştir. Bu grafikler, darbe cihazından

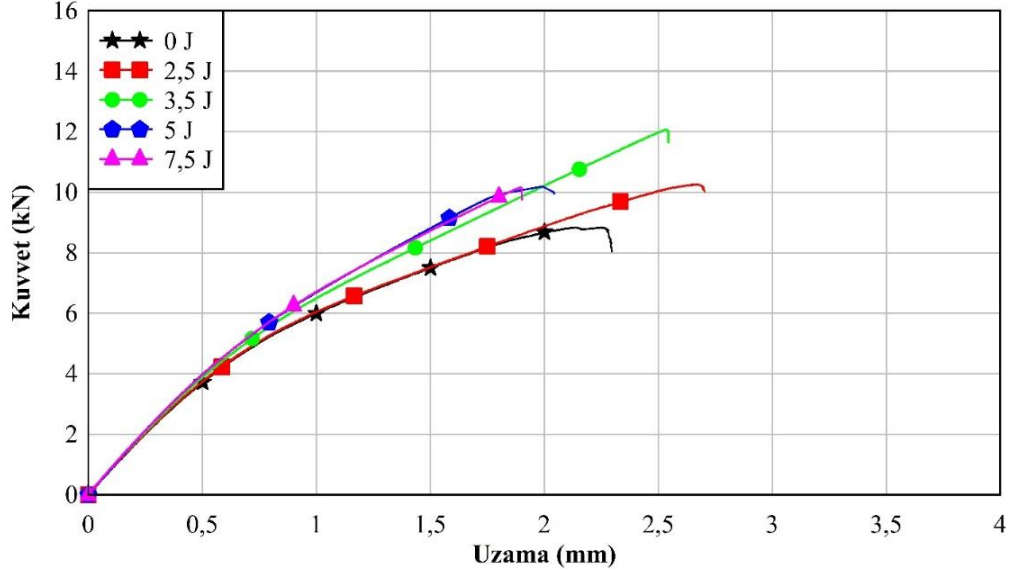
numuneye zamana bağı bir enerji transferi sürecini gösterir. Şekilde görüldüğü gibi, eğriler oldukça tutarlı bir şekle sahiptir. Her eğri başlangıçta zamanla artar, daha sonra tepe değerine ulaştıktan sonra azalır ve sonunda sabit bir seviyede kalır. Tepe değere karşılık gelen enerji seviyesi darbe enerjisi olarak nitelendirilmektedir. Tepe değere ulaştıktan sonra bir miktar azaldığı ve sonrasında sabit kaldığı enerji değeri yapıştırma bağlantılar tarafından emilen toplam enerjiyi göstermektedir. Aynı eğride aralarındaki fark, çarpma tertibatını geri döndüren geri tepme enerjisi olarak tanımlanır (Wu ve diğerleri 2013).



Şekil 5.11 DP8005 tek yapıştırıcı bağlantıların enerji-zaman grafiği.

5.2.2 Çekme Deneyleri

Çekme deney sonuçlarında 2,5 ve 3,5 J ön darbe uygulanmış bağlantıların hasar yüklerinin kademeli olarak artış gösterdiği ama 5 J seviyesinden sonra azaldığı görülmüştür. Çekme deney grafiği Şekil 5.12'de verilmiştir. 5 ve 7.5 J enerji seviyelerinde hasar yükünün kademeli olarak azaldığı görülmüştür ama bu azalma sonucunda dahi darbesiz duruma göre daha yüksek hasar yükleri elde edilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi darbe enerjisinin artmasıyla hasar yükündeki artışın, yapıştırıcının polimerik bir malzeme olması ve polimerik malzemenin bir özelliği olarak meydana geldiği düşünülmektedir.



Şekil 5.12 DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantıların çekme deney grafiği.

Yapıştırıcılar kürleştikten sonra termoset özelliği kazanmaktadır. Termosetler ağ yapısına sahip polimerlerdir. Uygulamalarda mekanik dayanım ve çelme modülünü artırmanın en çok tercih edilen yolu, polimeri çekme yönünde kalıcı şekilde değişimine uğratmaktır. Çekme sırasında molekül zincirleri birbiri üzerinde kayarak önemli oranda yönlendirilir. Plastik deformasyon (çeki yoluyla) sonucunda polimerik malzemelerin iç yapısındaki lamelerde çapraz halde bulunan zincirler birbiri üzerinde kayar ve bu, lamelin yana yatmasına neden olur; böylece katlanmış zincirler çekme eksenine göre daha iyi hizalanmış olur. Sonraki herhangi bir yer değiştirme ise zayıf ikincil bağlar veya van der Waals bağları tarafından engellenir. Bu durumda dayanımda bir artış meydana gelmektedir. Polimerik malzemelerin özelliklerinde neden olduğu değişiklikler açısından, çekme işlemi metallerdeki pekleşmeye benzediğini belirtmiştir (Schultz 1974).

Deneylerde uygulanan darbeler neticesinde meydana gelen eğilmelerden dolayı yapıştırıcı tabakasında kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu kayma gerilmeleri yukarıda bahsedildiği gibi termoset yapıştırıcının molekül zincirlerinin hizalanmasına sebep olmuş olabilir. Darbe sonrasında uygulanan çekme deneylerinde ise hizalanmış molekül zincirlerinin direnç oluşturmasıyla darbesiz duruma göre daha yüksek bir dayanım elde edilmiştir. Hatta bu mukavemet artışının bahsedildiği şekilde meydana

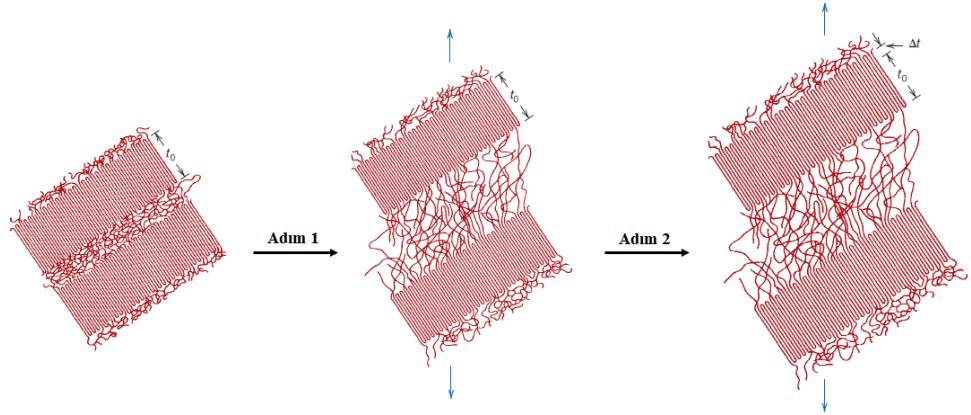
geldiğini teyit etmek maksadıyla, bağlantıda eğilme gerilmesi ve neticesinde kayma gerilmesi oluşturmak için üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır.

Bu bağlamda, DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantılarında 2,5 J ön darbe deneyinde yaklaşık 3 mm sehim olduğu için üç nokta eğilme deneyinde 3 mm deplasman oluşturulup ardından çekme deneyi yapılmıştır. Bu durumda da hasar yükünün arttığı görülmüştür. Ayrıca 2,5 J ön darbe sonrası çekme deneyi sonucu ile, üç nokta eğilme deneyi sonrasındaki çekme deneyi sonucu hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Bunun deney sonucunda darbe sonrası hasar yükündeki artışın darbe uygulamasında oluşan eğilme kaynaklı kayma gerilmelerinin lamellerdeki çapraz zincirlerin hizalanmasına katkı sağlaması olduğu sonucuna varılmıştır.

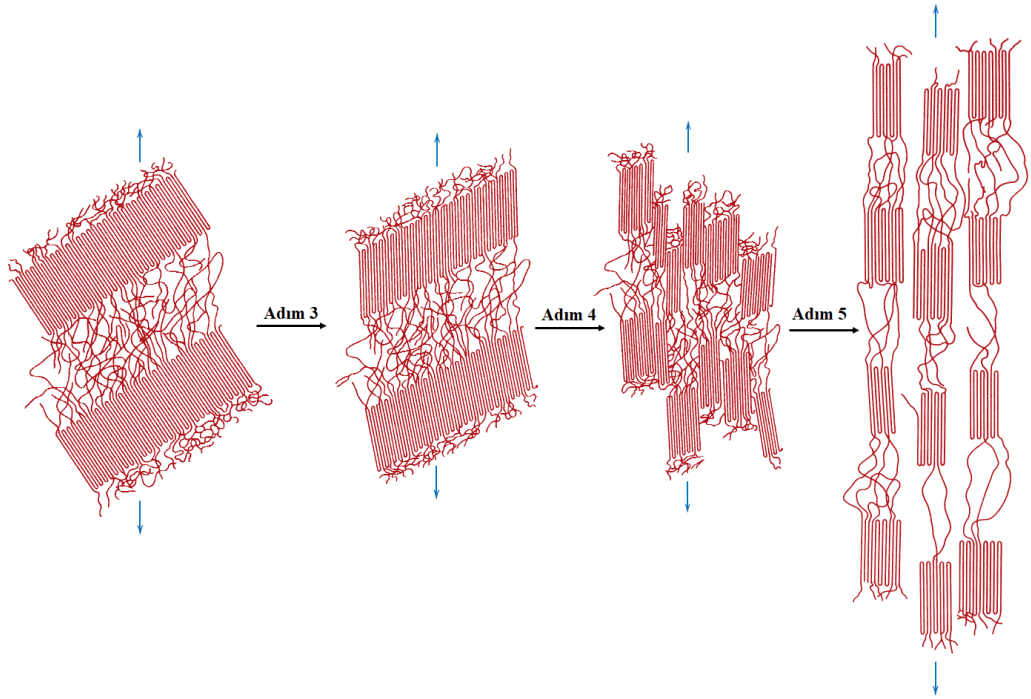
DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantılarda 2,5 ve 3,5 J ön darbe sonrası hasar yükündeki artışın daha iyi anlaşılabilmesi için polimerlerin elastik şekil değişim adımlarının şematik gösterimi Şekil 5.13'te verilmiştir. Şekil 5.13'te en başta polimerin içyapısındaki iki komşu katlanmış zincir yapıdaki lamel ve lameller arasındaki amorf bölgenin deformasyon öncesi hali verilmiştir. Birinci adım sonrasında uygulanan kuvvet neticesinde amorf bağ zincirlerinin uzaması verilmiştir. İkinci adım sonrasında kristal bölgedeki eğilme ve uzamalardan dolayı kristal lamellerindeki geri dönüşlü hafif bir kalınlık artışı görülmektedir. Bu aşamadan sonra Şekil 5.14'te plastik deformasyon adımları verilmiştir. Üçüncü adımda sonra elastik şekil değişimi geride bırakılmış ve lamel yapısındaki zincirlerin yana yatması verilmiştir. Dördüncü adımdan sonra kristal blok parçalarının ayrılması görülmektedir. Beşinci ve son adımda blok parçalarının ve bağlantı zincirlerinin çekme yönünde hizalanması verilmiştir.

Plastik deformasyonun son adımından sonra, yarı kristal polimerlerde meydana gelen bu çekme yönündeki gerilme, molekül zincirlerinin birbiri üzerinde kayması neticesinde önemli oranda hizalanmış (yönlenmiş) bir yapı üretmiştir. Bu yönlenme işlemine çekme adı verilmektedir. Bu işlem polimer elyaf ve filmlerin mekanik özelliklerinin artırılmasında yaygın bir şekilde kullanılır.

Deformasyon sırasında, yarı kristal küresel yapılar orta derecede uzama sonucu şekil değiştirir. Uzamanın büyük miktarda olması durumunda, bu yapılar tamamen zarar görür.



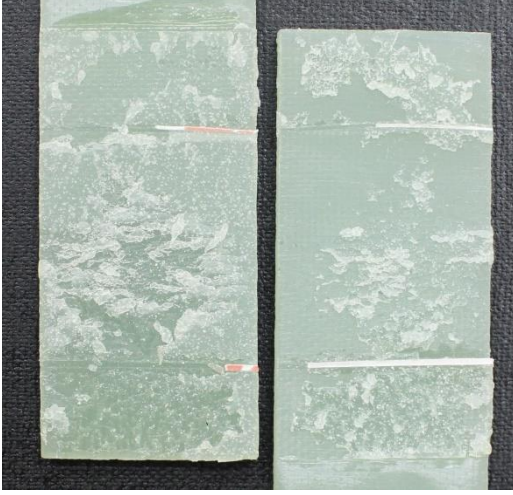
Şekil 5.13 Polimerin elastik şekil değişim adımları (Schultz 1974).



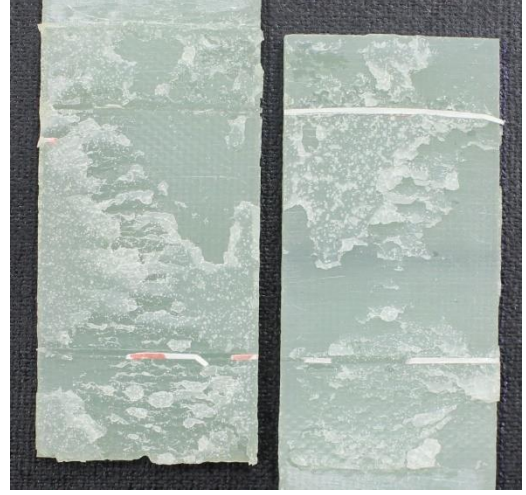
Şekil 5.14 Polimerin plastik deformasyon adımları (Schultz 1974).

DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantılarda 2,5 ve 3,5 J enerji seviyelerindeki ön darbe sonrası çekme deneylerinde hasar yükündeki artışın, 5 ve 7,5 J enerji seviyelerinde azalma gösterdiği görülmüştür. Bu durum 5 ve 7,5 J ön darbe sonrası DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantılarda yapıştırıcı tabakasının hasara uğradığını yapıştırıcı bütünlüğünün bozulması sonucu oluştuğunu göstermektedir. Yine de 5 ve 7,5 J ön darbe sonrası çekme deneylerinde elde edilen hasar yükü değerleri darbesiz çekme deneylerinde elde edilen hasar yükü değerinden yüksek çıkmıştır.

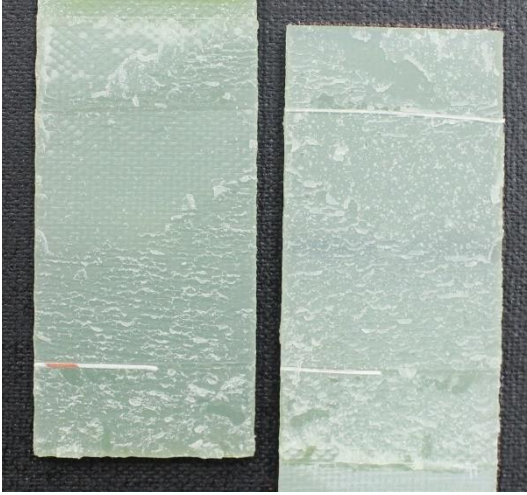
a)



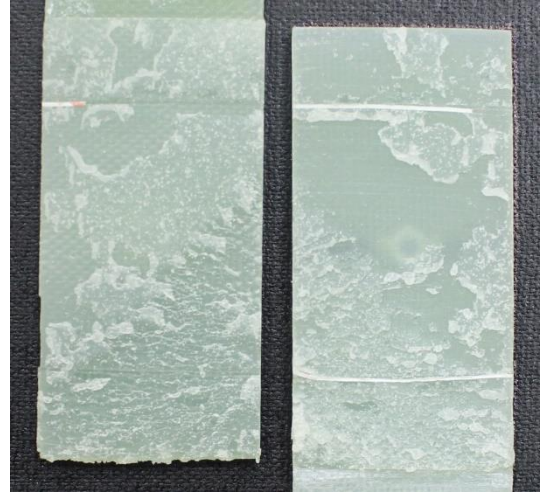
b)



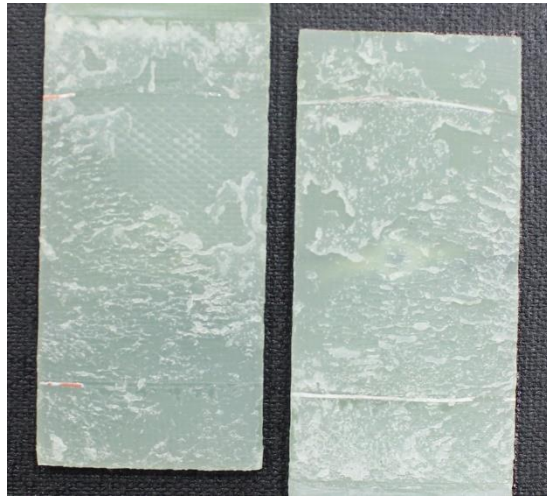
c)



d)



e)



Şekil 5.15 DP8005 tek yapıştırıcı bağlantıların çekme deney sonrası hasar mekanizmaları, a) 0 J, b) 2,5 J, c) 3,5 J, d) 5 J, e) 7,5 J.

DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantıların çekme deneyleri yapıştırıcı hasarı ile sonuçlanmıştır. Çekme deneyi sonucu meydana gelen yapıştırıcı hasarları Şekil 5.15'te verilmiştir. Bağlantılarda meydana gelen yapıştırıcı hasarının kohezyon hasarı olduğu görülmüştür. Kompozit malzemede katman ayrılması gibi bir hasar oluşumu gözlenmemiştir. 5 ve 7,5 J enerji seviyelerinde yapılan ön darbe deneyleri sonrasında kompozit malzemede belirgin şekilde beyazlaşma görülmüştür.

5 ve 7,5 J enerji seviyesindeki darbe deneylerinde görülen beyazlaşma darbe bölgesinde elyafın deformasyonu sonucu oluşmuştur. Ama buradaki elyaf deformasyonu elyafın kopması noktasına kadar ilerlememiştir. Tüm enerji seviyelerindeki darbe deneylerinde kompozit malzemenin matrisinde çatlaklar oluşmuş. Enerji seviyesinin yükselmesiyle bu çatlakların yoğunluğu artış göstermiştir.

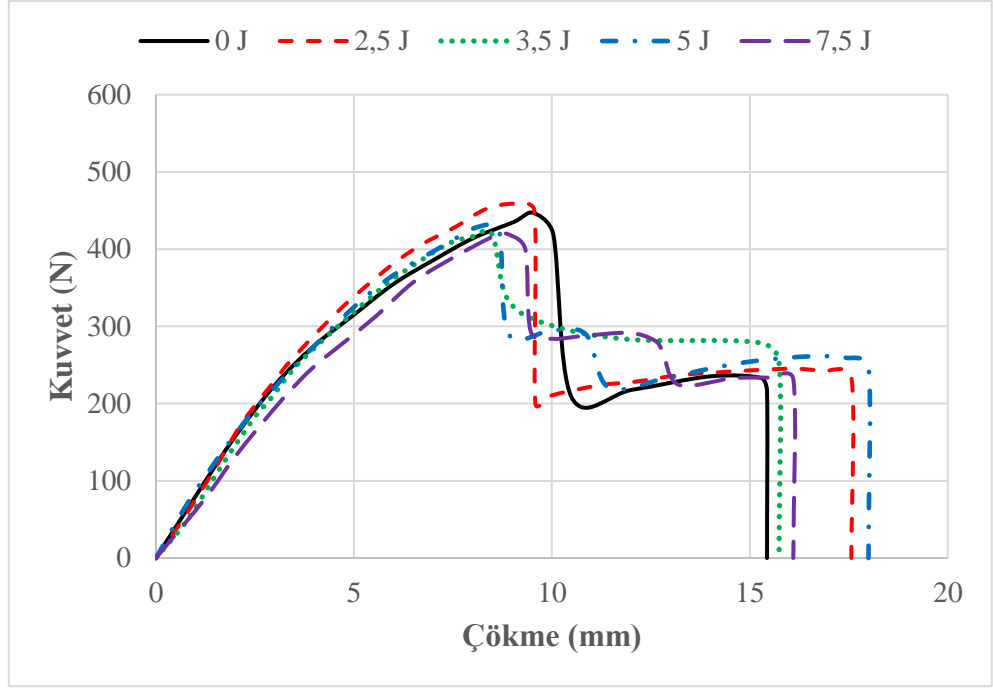
5.2.3 Üç Nokta Eğilme Deneyleri

Üç nokta eğilme deneyleri bağlantıların kompozit hasarına uğraması ile sonuçlanmıştır. Üç nokta eğilme deneylerinde alt çenenin yukarı yönlü hareketi neticesinde alttaki iki destek yukarı yönlü kuvvet üstteki eğilmeye zorlayan basıcı uç aşağı yönlü kuvvet uygulamaktadır. Bu durum bindirme bölgesinin uç kısımlarından başlayan hasarın bindirme bölgesinin ortasına kadar devam edip o noktadan sonra ilerleyememesi sebebiyle malzeme hasarına sebep olmuştur. 2,5 J ön darbe uygulanmış bağlantılarda darbesiz duruma göre daha yüksek bir hasar yüküne ulaşılmıştır. Üç nokta eğilme deneyi grafikleri Şekil 5.16'da verilmiştir. Grafikteki eğrilerin hepsinin aynı hasar mekanizmasına sahip olduğu görülmüştür.

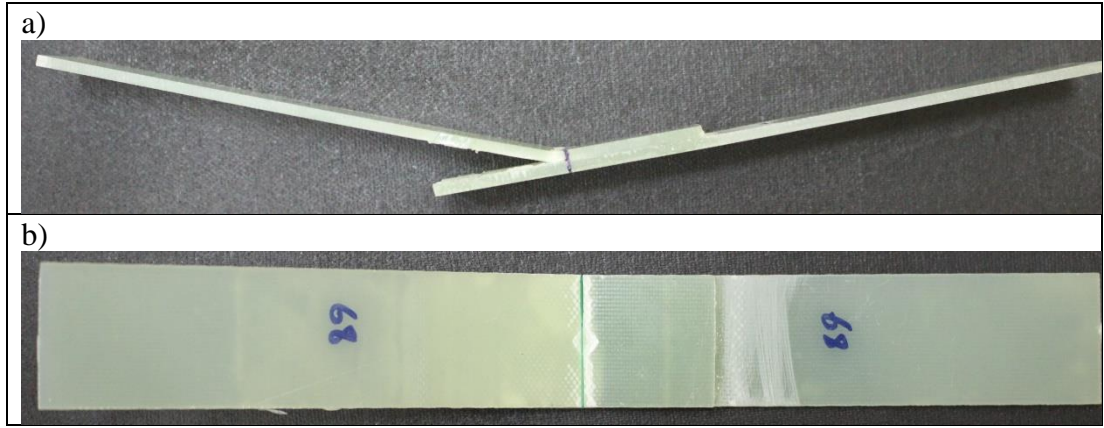
DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantıların tüm enerji seviyelerindeki ön darbe sonrası üç nokta eğilme deneylerinde hasar yükü değerlerinin çok belirgin bir artış ya da azalış göstermediği görülmüştür.

DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deneylerinde oluşan hasarlar Şekil 5.17'de verilmiştir. Bu hasar mekanizmalarının oluşumunun açıklaması Şekil 5.16'daki grafikte göz önüne alınarak yapılmıştır. Grafikte eğrilerin sıfır noktasından bir tepe değere ulaşmaya kadar artış gösterdiği görülmektedir bu tepe değer üç nokta eğilme deneyinde bindirme bölgesinin ayrılmaya zorlanan uç kısmında

çatlak oluşum noktası olup bu noktada çatlak oluşumuyla ani bir düşüşe geçtiği görülmüştür.



Şekil 5.16 DP8005 tek yapıştırıcıli bağlantıların üç nokta eğilme deney grafiği.



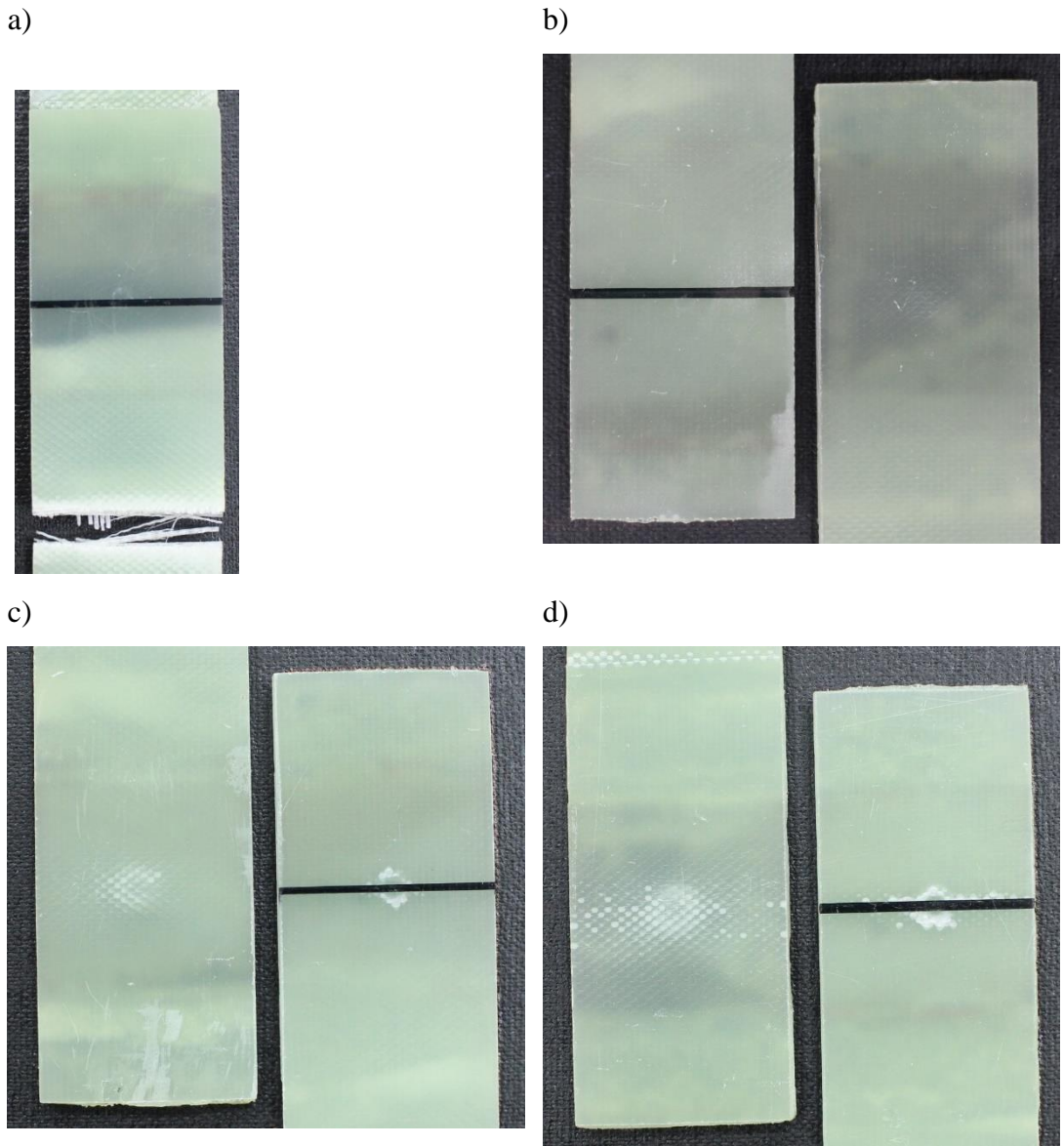
Şekil 5.17 DP8005 tek yapıştırıcıli bağlantıların üç nokta eğilme deneyi sonrası hasar mekanizmaları, a) Yandan görünüşü, b) Önden görünüşü.

Bu çatlak başlangıç noktası ile hasar ile sonuçlanıncaya kadarki olan kısım çatlak ilerlemesini göstermektedir. DP8005 tek yapıştırıcıli bağlantıların tüm üç nokta eğilme deneylerinde çatlakın bindirme bölgesinin ortasına kadar ilerleyip bu noktadan sonra daha fazla ilerleyememesi sebebiyle kompozit hasarı ile sonuçlandığı Şekil 5.17’de verilmiştir. Tüm enerji seviyelerinde darbe sonrası ve darbesiz üç nokta eğilme deneylerinde aynı hasar mekanizması ile karşılaşılmıştır.

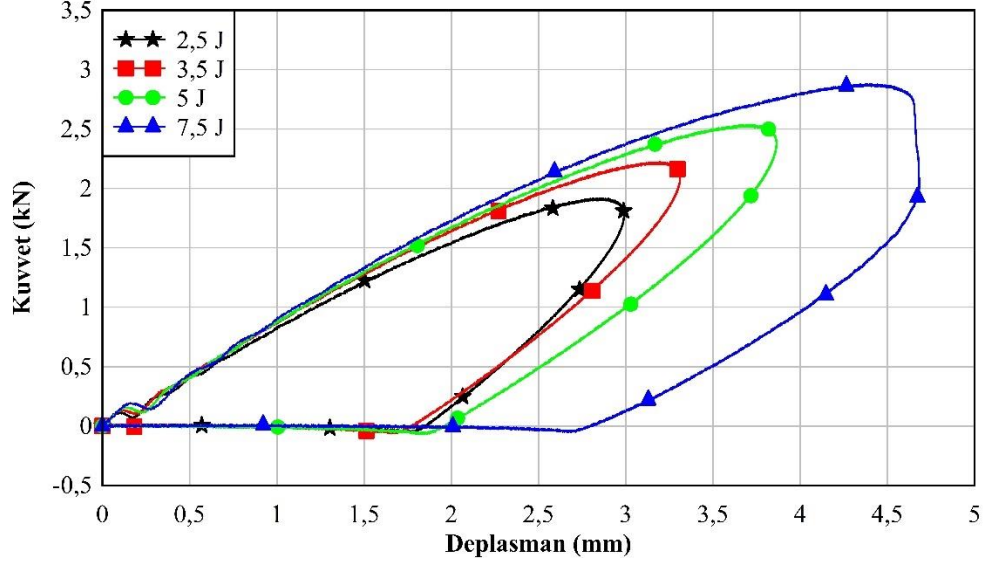
5.3 1/1 Oranında Karma Yapıştırıcılı Bağlantılar

5.3.1 Darbe Deneyleri

1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların darbe deneylerinde sadece 7,5 J darbe enerjisinde elyaf kopması ve matris hasarı sebebiyle grafikte düzleşme gözlenmiştir. Darbe sonucu kompozit malzemelerde oluşan hasarlar Şekil 5.18'de verilmiştir. Darbe deneyi sonuçlarının grafiği Şekil 5.19'da verilmiştir.

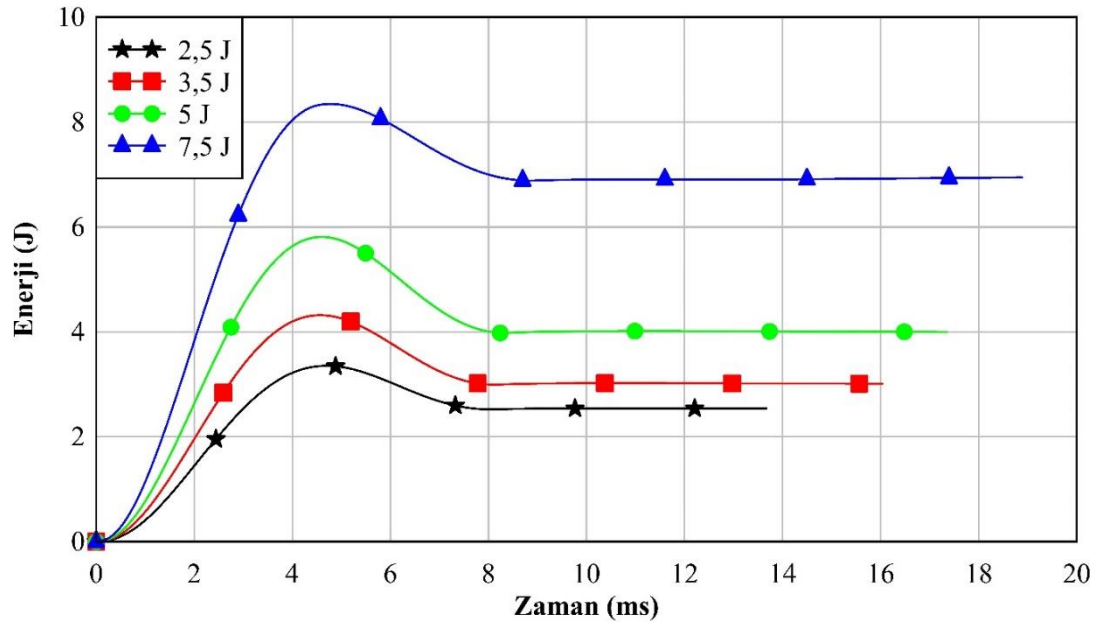


Şekil 5.18 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların darbe sonrası hasarlı yüzeyleri, a) 2,5 J, b) 3,5 J, c) 5 J, d) 7,5 J.



Şekil 5.19 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların darbe deney grafikleri.

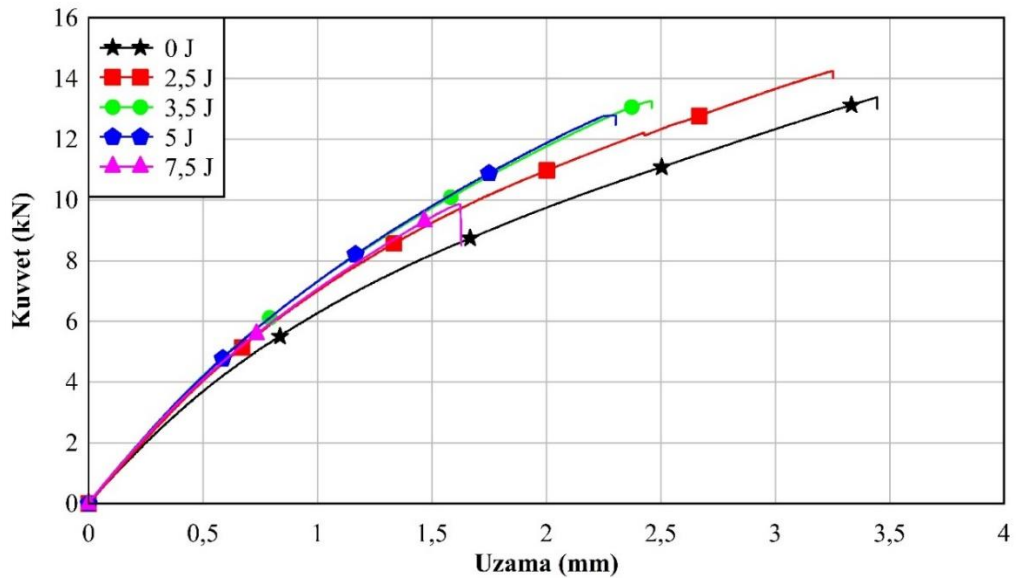
Şekil 5.19'da verilmiş darbe grafiklerinin hepsinde başlangıç noktasında ufak bir dalgalanma olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmanın sebebi darbe vurucu ucun kompozit yüzeyine ilk değdiği anda meydana gelen matris hasarı olduğu sonucuna varılmıştır. Darbe deneylerinin enerji-zaman grafikleri Şekil 5.20'de verilmiştir.



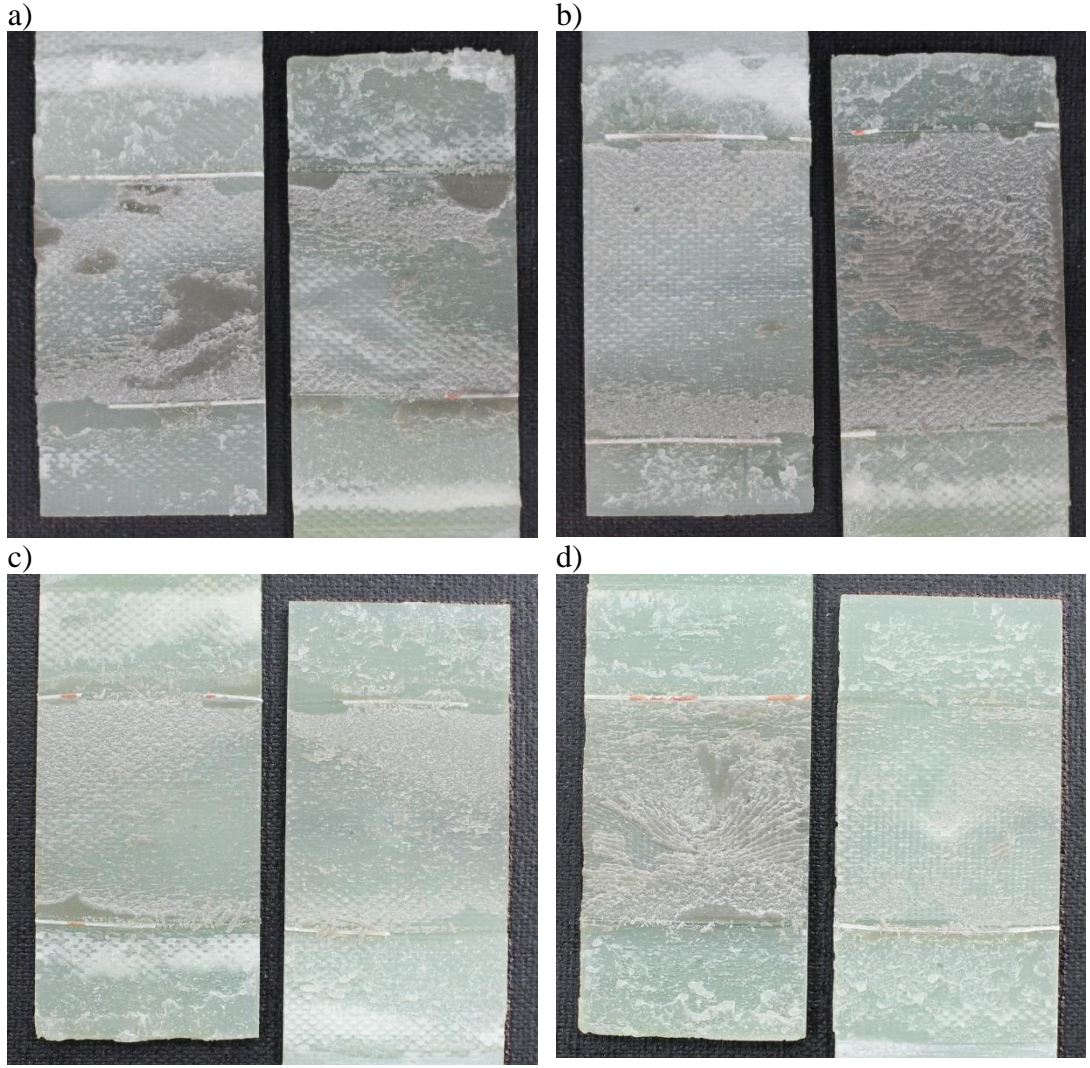
Şekil 5.20 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların enerji-zaman grafikleri.

5.3.2 Çekme Deneyleri

1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların sadece 2,5 J ön darbe sonrası durumunda yapıştırıcıda herhangi bir ayrılma olmadan malzemenin hasara uğraması ile deneyler sonuçlanmıştır. Bu durum 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların 2,5 J ön darbe sonrası dayanımının yapıştırılan malzeme dayanımının üzerinde olduğu göstermiştir. 3,5 J enine darbe sonrası beklendiği gibi hasar yükünde kademeli bir düşüş gözlenmiştir. 2,5 J enine darbe sonrası bağlantının hasar yükünde yaklaşık 1000 N'lik bir artış gözlenmiştir. Bu durum 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantılarda bindirme bölgesinde kullanılan esnek yapıştırıcı ile rijit yapıştırıcı oranın eşit olması sebebiyle ortadaki rijit yapıştırıcının bütünlüğünün bozulmamasından kaynaklanmıştır. Buna ek olarak darbe deneylerinde oluşan eğilme sonrası kayma gerilmeleri DP8005 yapıştırıcısının polimerik yapısında çapraz halde bulunan zincirlerin hizalanmasını sağlaması bağlantı dayanımındaki bu artışın ana sebebidir. Bindirme bölgesi uç kısımlarında esnek yapıştırıcı kullanılmasıyla, AV138' in tek yapıştırıcılı bağlantılarında olduğu gibi 2,5 J ön darbe sonrasında yapıştırıcının bütünlüğünün bozulup bindirme bölgesinin uç kısımlarında oluşacak ayrılmalar engellenmiştir. 3,5 J enerji seviyesinden sonra darbe sonucunda bindirme bölgesinin ortasında bulunan rijit yapıştırıcı bütünlüğünü koruyamamış ve bağlantının dayanımı azalmıştır. Çekme deney grafiği Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.21 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların çekme deney grafikleri.



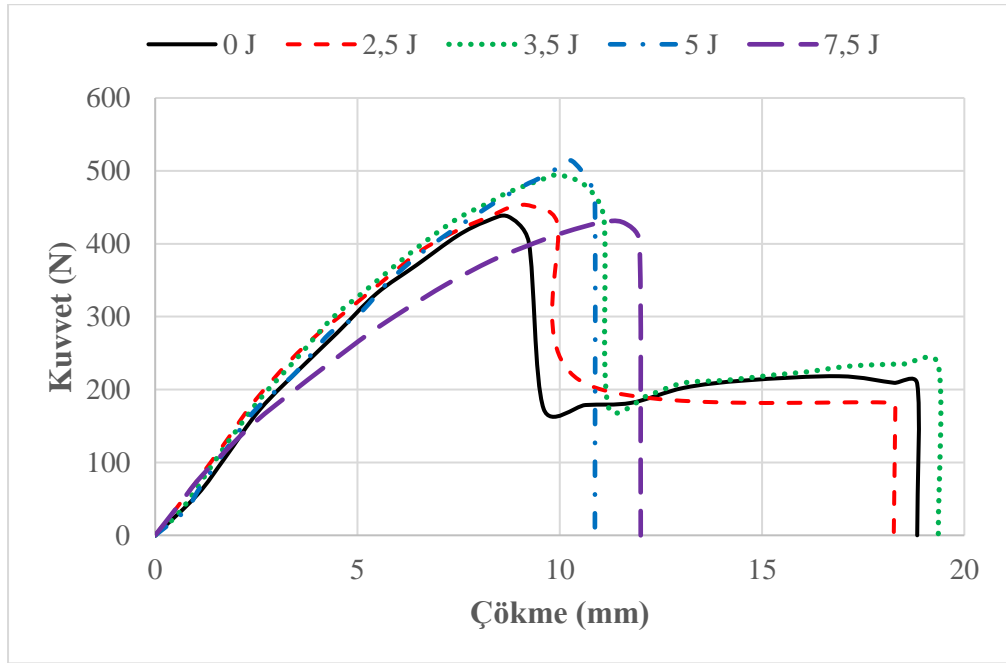
Şekil 5.22 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların çekme deney sonrası hasar mekanizmaları, a) 0 J, b) 3,5 J, c) 5 J, d) 7,5 J.

1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantılarda 2,5 J ön darbe sonrası çekme deneyinde oluşan hasarın kompozit malzemeden kopma ile sonuçlandığı Şekil 5.18’de verilmiştir. Buna ek olarak diğer enerji seviyelerinde ön darbe sonrası çekme deneylerinde oluşan hasarlar Şekil 5.22’de verilmiştir. Bağlantılarda meydana gelen yapıştırıcı hasarının kohezyon hasarı olduğu görülmüştür. Kompozit malzemede herhangi bir hasar oluşumu gözlenmemiştir.

5.3.3 Üç Nokta Eğilme Deneyleri

1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deneylerinde çoğunlukla malzeme hasarı oluşmuştur. Bu durum DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantılarda olduğu gibi bindirme bölgesinin uç kısımlarından ayrılma başladıktan

sonra bindirme bölgesinin ortasına kadar ilerlemiş ve sonrasında aşağıdan desteklerin yukarı yönlü kuvveti ve yukarıdaki basıcı ucun aşağı yönlü kuvvetlerini kompozit malzeme sönümleyememiş bunun sonucunda kompozit malzeme bindirme bölgesinin ortasından kırılmıştır. Darbesiz durumdaki bağlantıların üç nokta eğilme deney sonuçları 2,5-3,5 ve 5 J ön darbe sonrası durumdan daha az çıkmıştır. 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantılarda 5 J ön darbe enerji seviyesine kadar üç nokta eğilme deney sonuçları hasar yükünün darbe enerjisinin artmasıyla kademeli olarak arttığını göstermiştir. Üç nokta eğilme grafikleri Şekil 5.23'te verilmiştir.

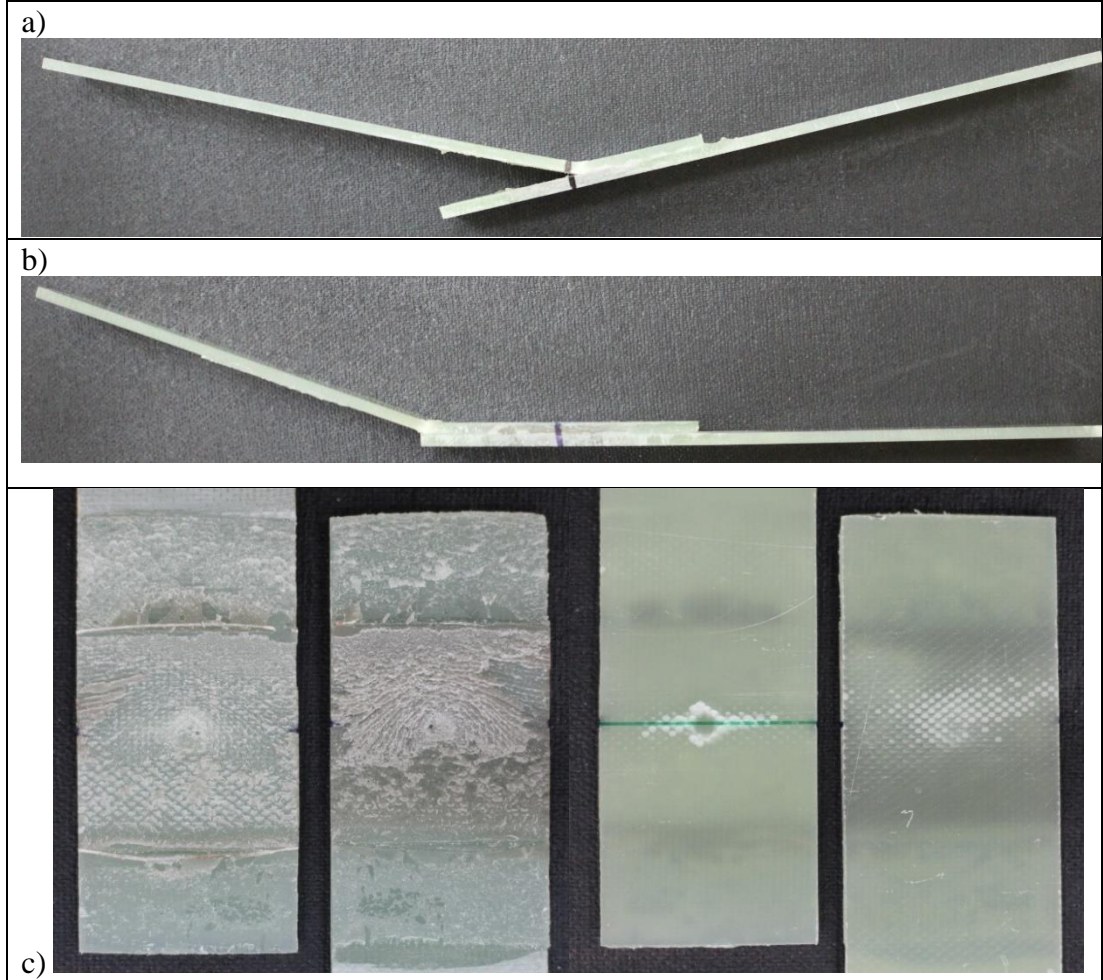


Şekil 5.23 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deney grafikleri.

Şekil 5.23'te farklı enerji seviyelerinde ön darbe uygulanmış 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantılarda sadece 5 ve 7,5 J darbe enerjilerinde ani bir kopma ile hasarın sonuçlandığı görülmektedir. Diğer enerji seviyelerinde ön darbe uygulanmış ve darbesiz numunelerin bindirme bölgesinin uç kısmında önce çatlak başlangıcı oluşumu ve sonrasında çatlağın ilerlemesiyle hasara uğradığı görülmüştür. 5 ve 7,5 J ön darbe sonrası bindirme bölgesinin ortasında bulunan rijit yapıştırıcının bütünlüğünün bozulması bu durumun oluşmasının temel sebebidir.

1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deneyleri sonucunda oluşan hasar mekanizmaları Şekil 5.24'te verilmiştir. 5 J ön darbe sonrası

yapılan üç nokta eğilme deneylerinde bindirme bölgesinin uç kısımlarında yığılmış gerilmelerin yapıştırıcıyı hasara uğratmadan kompozit malzemenin kırılmasıyla yani kompozit malzeme içerisinde bulunan elyafın kopmasıyla sonuçlanmıştır.

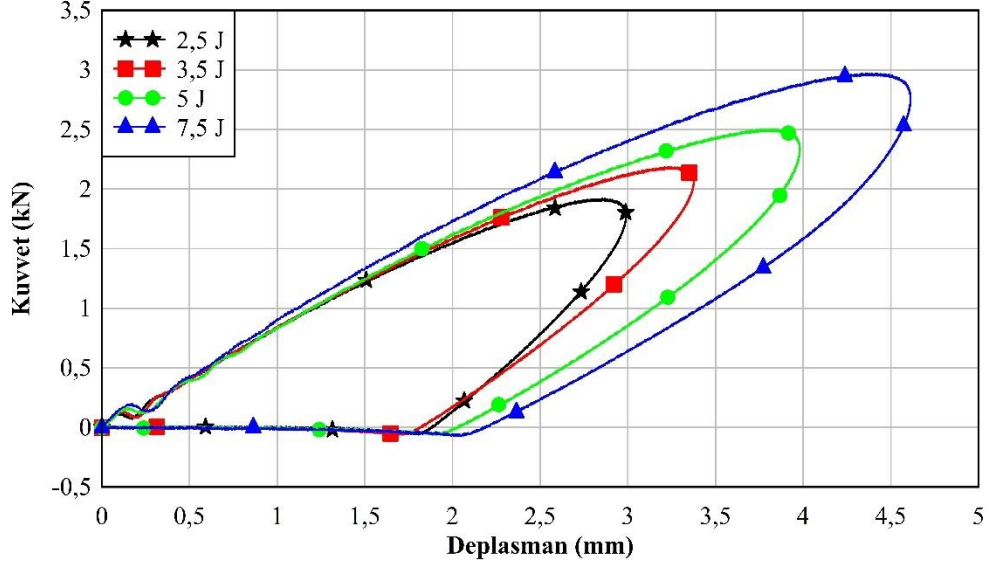


Şekil 5.24 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deneyi sonrası hasar mekanizmaları, a) Bindirme bölgesinin ortasından kompozit hasarı, b) Bindirme bölgesinin uç kısmından kompozit hasarı, c) Yapıştırıcı hasarı.

5.4 1/2 Oranında Karma Yapıştırıcılı Bağlantılar

5.4.1 Darbe Deneyleri

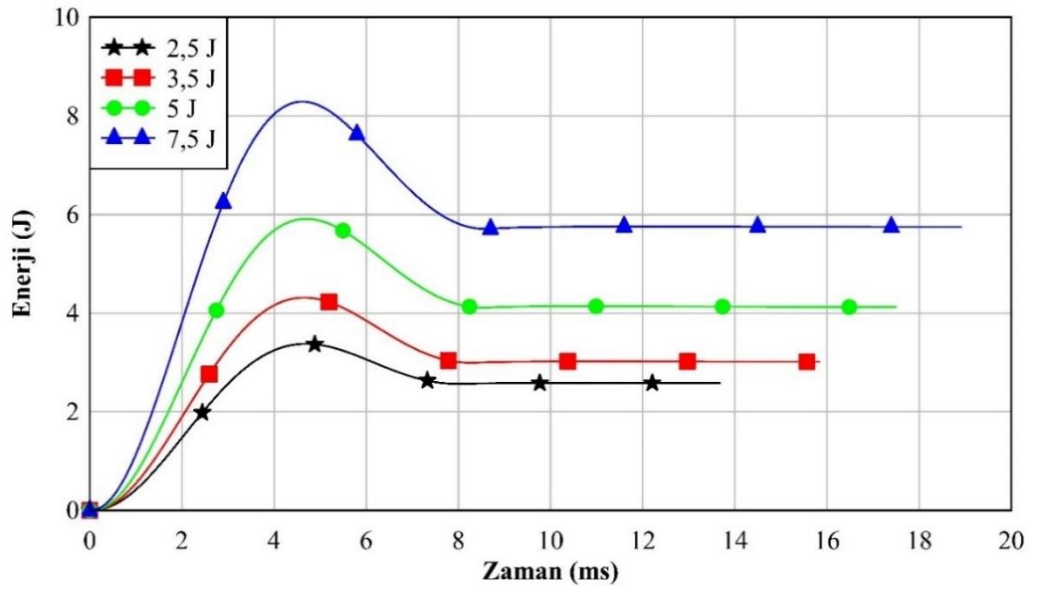
1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların dört farklı enerji seviyesindeki darbe deney sonuçları Şekil 5.25'te verilmiştir. Darbe deney sonucunda bağlantılarda herhangi bir ayrılma gözlenmemiştir. Darbe deneyi grafiklerinde de görüldüğü gibi kapalı form eğriler oluşmuştur.



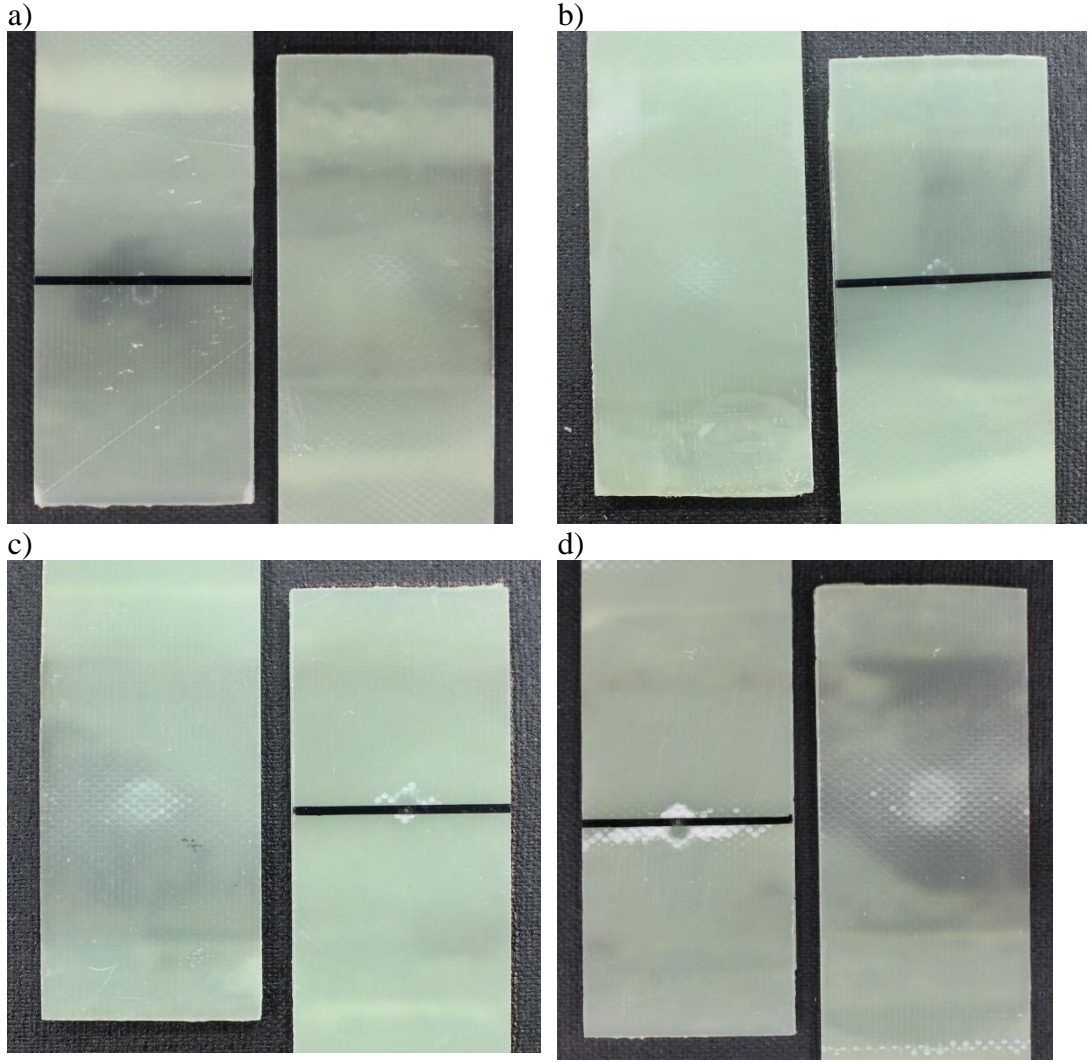
Şekil 5.25 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların darbe deney grafikleri.

1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların ön darbe sonrası kompozit malzeme yüzeylerinde meydana gelen hasarlar Şekil 5.27’de, darbe deneylerinin enerji-zaman grafikleri Şekil 5.26’da verilmiştir.

7,5 J ön darbe sonrasında bindirme bölgesinin ortasında bulunan rijit yapıştırıcının bir kısmının bütünlüğünü koruyamadığı ve kompozit malzeme yüzeyinden bakıldığında beyazlaşma olduğu görülmüştür.



Şekil 5.26 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların enerji-zaman grafikleri.

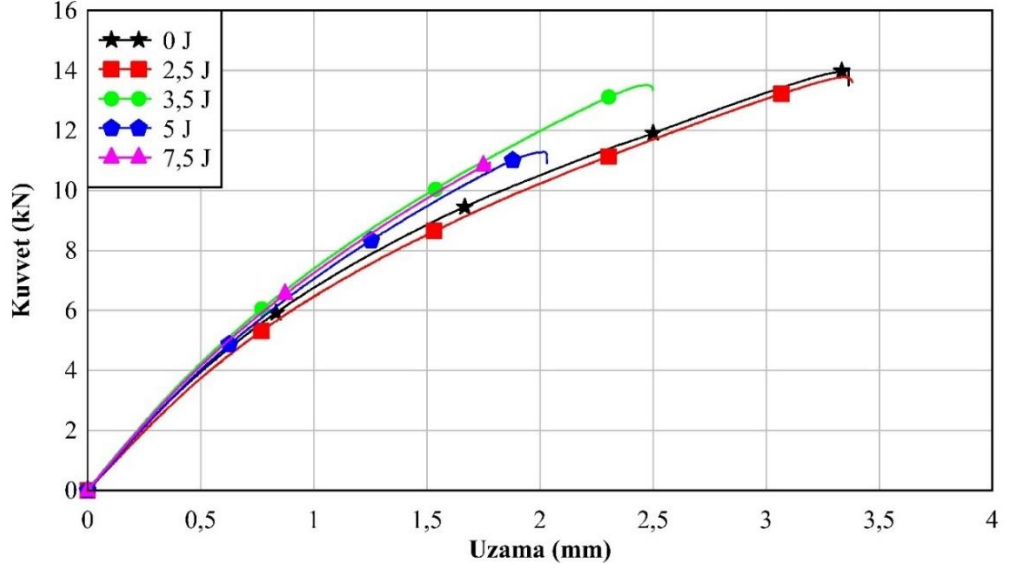


Şekil 5.27 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların çekme deney sonrası hasar mekanizmaları, a) 2,5 J, b) 3,5 J, c) 5 J, d) 7,5 J.

5.4.2 Çekme Deneyleri

1/2 oranında karma yapıştırıcı bağlantıların ön darbe sonrası çekme deneylerinde darbesiz durumdaki bağlantıların en yüksek hasar yüküne ulaştığı görülmüştür. Darbe enerji seviyesi arttıkça hasar yükünde kademeli bir düşüş gözlenmiştir. 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların ön darbe sonrası çekme deney grafikleri Şekil 5.28’de verilmiştir.

Ön darbe deneyleri sonrasında yapılan çekme deneylerinde yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı hasarı gözlenmiştir. Yapıştırıcı hasarlarının farklı enerji seviyelerin nasıl olduğu Şekil 5.29’da verilmiştir.

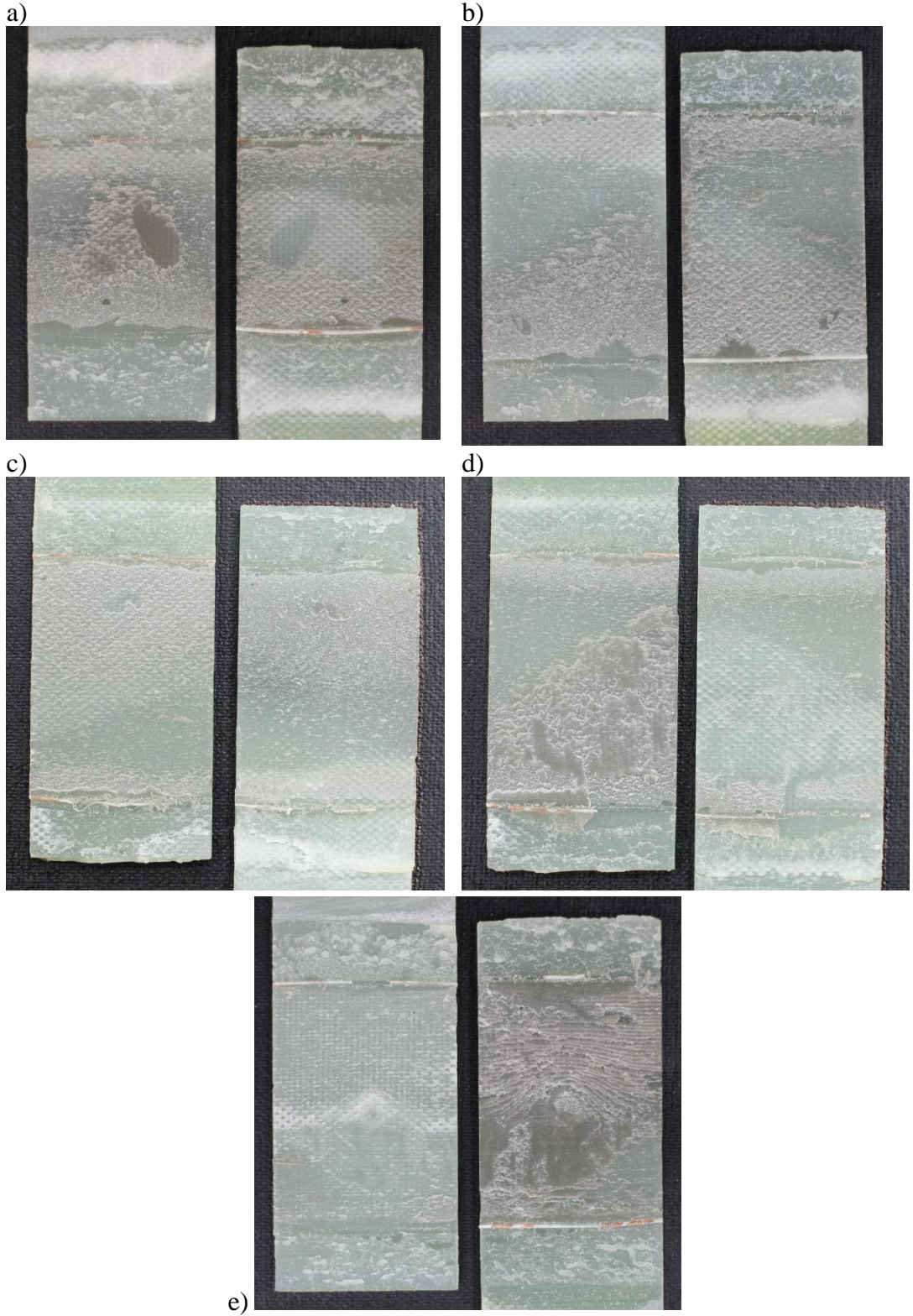


Şekil 5.28 1/2 oranında karma yapıştırıcı bağlantıların çekme deney grafikleri.

Çekme deneyleri sonrasında kompozit malzemede herhangi bir hasar meydana gelmemiştir. Şekil 5.29'da verilmiş yapıştırıcı hasarlarının tümünün kohezyon hasarı olduğu görülmektedir ve bu durum bize yapıştırma öncesi hazırlık ve yapıştırma işlemlerinde bir sorun olmadığını göstermiştir. Çünkü yapıştırma bağlantıların deneysel çalışmalarında yapıştırıcı hasarının kohezyon olması gerektiği belirtilmiştir.

Karma yapıştırıcı bağlantıların enine darbe sonrası dayanımları açısından karşılaştırıldığında 1/1 oranında karma yapıştırıcı bağlantıların daha yüksek bir bağlantı dayanımı gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bunun aksine darbesiz durumdaki hasar yükleri karşılaştırıldığında 1/2 oranında karma yapıştırıcı bağlantıların daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür.

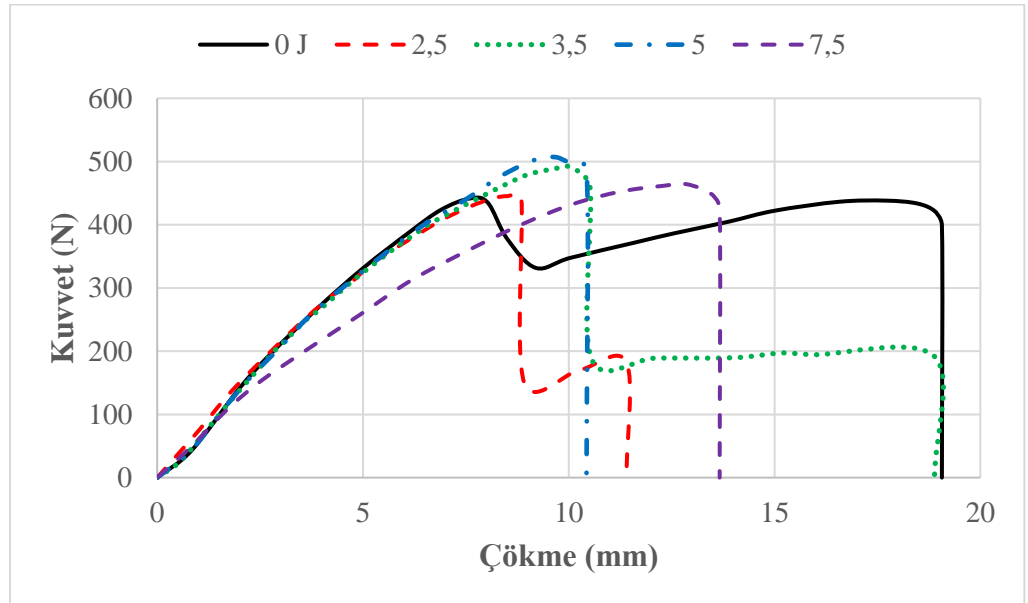
Literatürde, karma yapıştırıcı bağlantılarda bindirme bölgesindeki yapıştırıcı oranının bağlantı dayanımına etkisi üzerine yapılmış çalışmalarda, farklı oranlarda karma yapıştırıcı bağlantılar incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, ön darbe uygulaması olmadığı için 1/2 oranında karma yapıştırıcı bağlantıların 1/1 oranındaki karma yapıştırıcı bağlantılardan daha yüksek hasar yüküne ulaştığı görülmüştür. Literatürdeki karma yapıştırıcı bağlantıların dayanımı üzerine yapılmış çalışmalara ek olarak yaptığımız, ön darbe sonrası çekme deneylerinde 1/1 oranında karma yapıştırıcı bağlantıların dayanımının 1/2 oranındaki karma yapıştırıcı bağlantılardan daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür.



Şekil 5.29 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların çekme deney sonrası hasar mekanizmaları, a) 0 J, b) 2,5 J, c) 3,5 J, d) 5 J, e) 7,5 J.

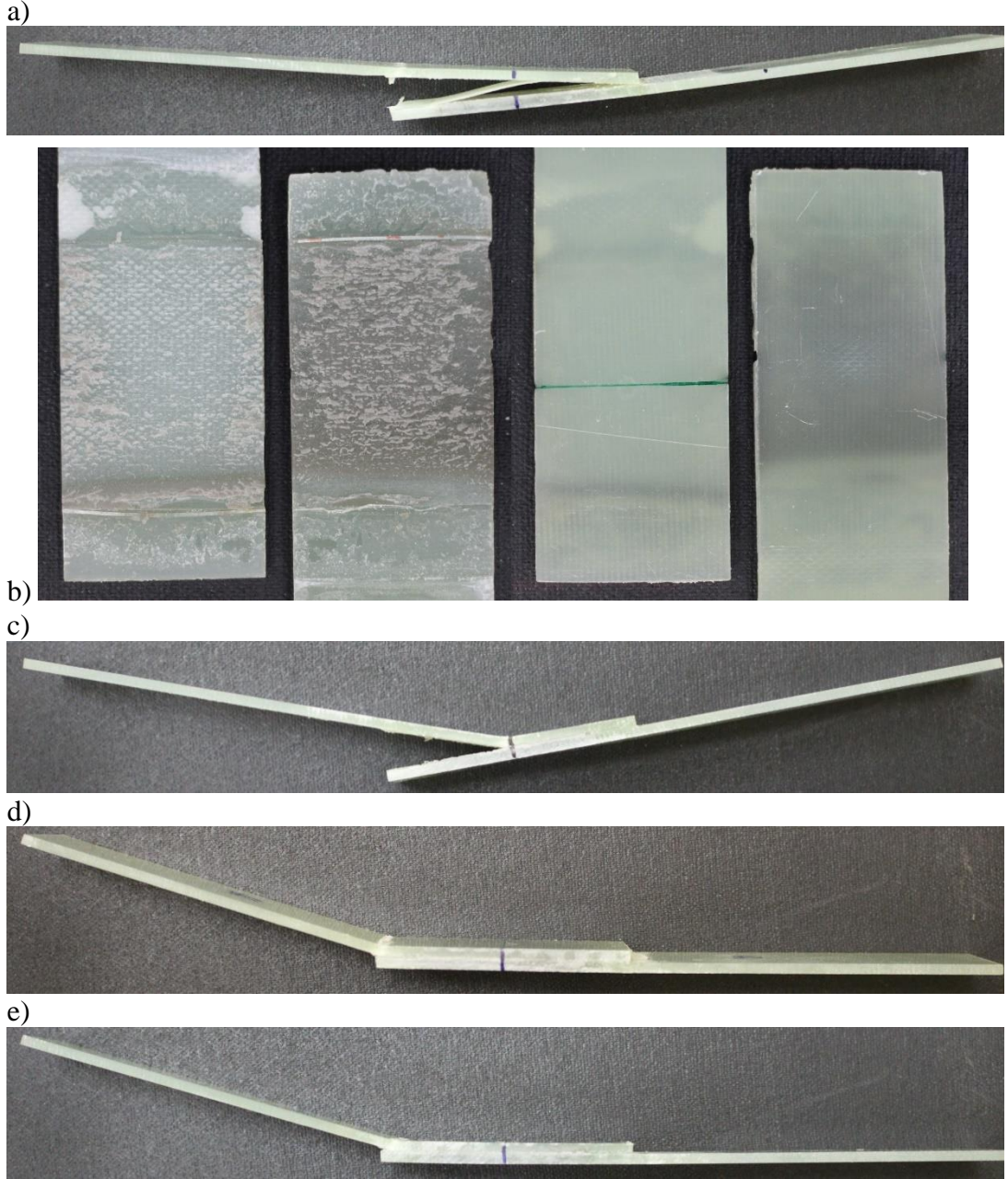
5.4.3 Üç Nokta Eğilme Deneyleri

1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deneylerinde çoğunlukla malzeme hasarı oluşmuştur. 3,5 J ön darbe sonrası üç nokta eğilme deneyinde, 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantılarda olduğu gibi bindirme bölgesinin uç kısmında ayrılma başladıktan sonra bindirme bölgesinin ortasına kadar ilerlemiş ve sonrasında aşağıdan desteklerin yukarı yönlü kuvveti ve yukarıdaki basıncı ucun aşağı yönlü kuvvetlerini kompozit malzeme sönmülememiş bunun sonucunda kompozit malzeme bindirme bölgesinin ortasından kırılmıştır. Darbesiz durumdaki bağlantıların üç nokta eğilme deney sonuçları ön darbe sonrası üç nokta eğilme deney sonuçlarından daha az çıkmıştır. 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantılarda 2,5-3,5 ve 5 J ön darbe sonrası üç nokta eğilme deney sonuçları hasar yükünün darbe enerjisinin artmasıyla kademeli olarak arttığını göstermiştir. Bu yükseliş tıpkı 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantılarda olduğu gibi 7,5 J’de düşüş göstermiştir. Üç nokta eğilme grafikleri Şekil 5.30’da verilmiştir.



Şekil 5.30 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deney grafikleri.

1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deney sonrası hasar mekanizmaları Şekil 5.31’de verilmiştir. Bu hasar mekanizmalarından 0 J’deki durum kompozit hasarı olan katman ayrılması ile sonuçlanmıştır. 5 ve 7,5 J ön darbe sonrası yapılan üç nokta eğilme deneylerinde çatlak ilerlemesi olmadan deneyin kompozit hasarı ile sonuçlandığı görülmüştür.



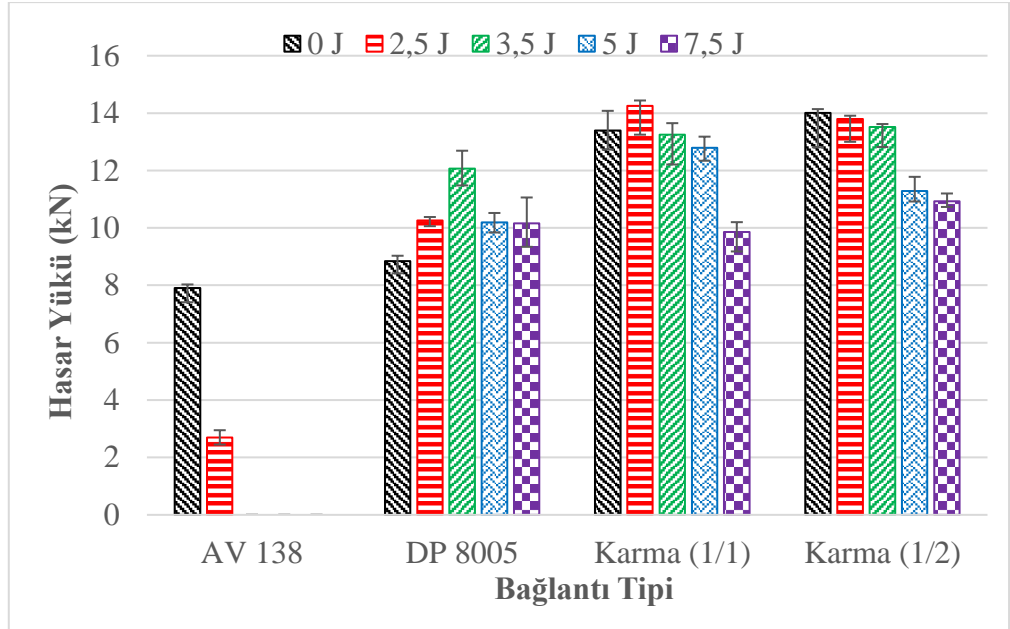
Şekil 5.31 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların üç nokta eğilme deneyi sonrası hasar mekanizmaları, a) 0 J, b) 2,5 J, c) 3,5 J, d) 5 J, e) 7,5 J.

5.5 Ön Darbe Sonrası Çekme Deneylerinin Karşılaştırılması

Ön darbe sonrası çekme deneylerinde ulaşılan hasar yükü değerlerinin tüm bağlantı tiplerindeki değişimini gösteren grafik Şekil 5.32’de verilmiştir.

AV138 rijit yapıştırıcısının tek yapıştırıcılı bağlantılarında enine darbe sonrası bağlantı hasar yükünde yaklaşık 3 kat azalma olduğu görülmüştür. Bunun en önemli nedeninin rijit yapıştırıcısının bindirme bölgesinin uç kısımlarından esneme kabiliyetine

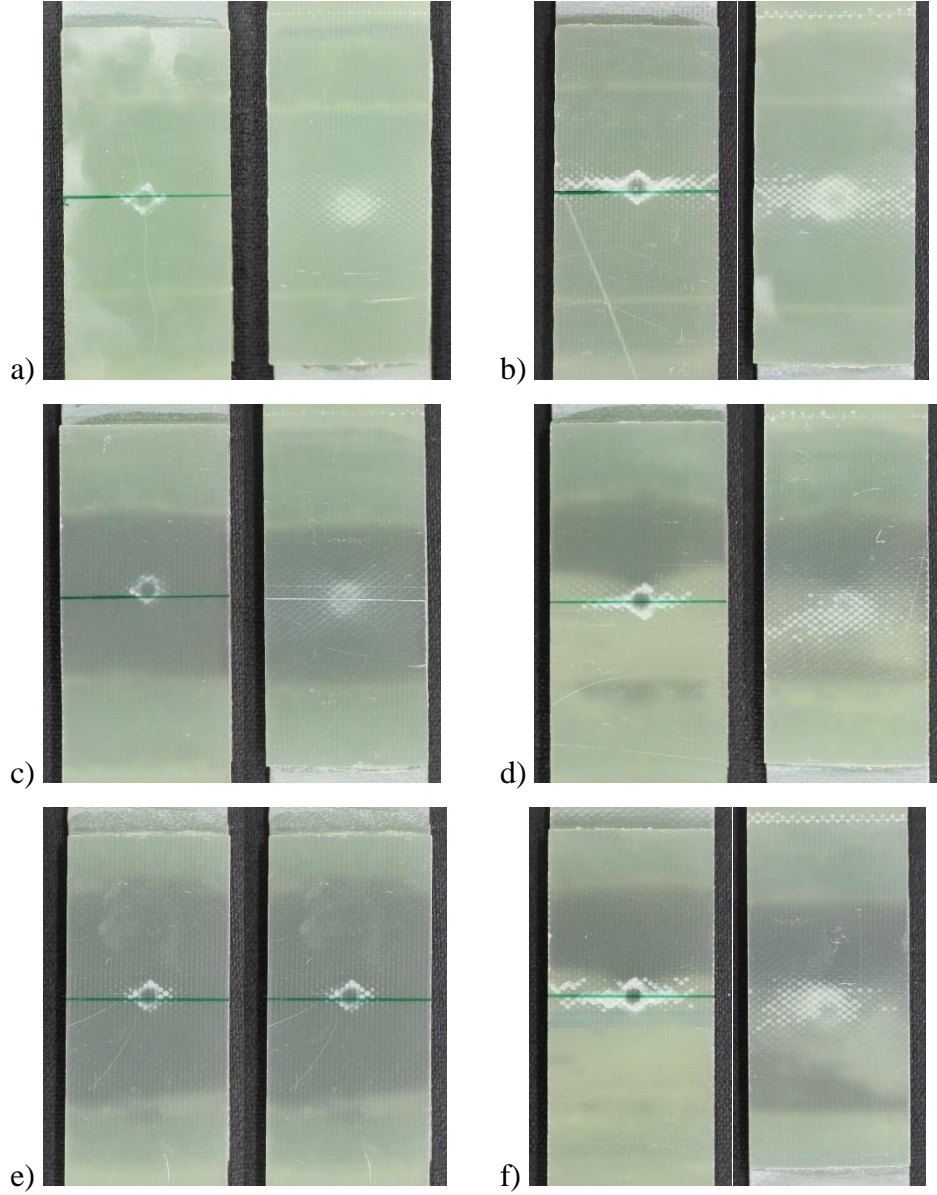
sahip olmaması olduğu sonucuna varılmıştır. Esneme kabiliyetinin olmaması sebebiyle 2,5 J ön darbe uygulamasında bindirme bölgesinin uç kısmından ayrılmalar gözlenmiş ve daha yüksek enerji seviyelerine çıkılmamıştır.



Şekil 5.32 Ön darbe sonrası çekme deney sonuçlarının karşılaştırması.

DP8005 esnek yapıştırıcısının tek yapıştırıcılı bağlantılarında darbe enerji seviyesinin artmasıyla hasar yükündeki artışın sebebini tam olarak anlayabilmek için literatürdeki çalışmalarda göz önünde bulundurulmuş ve DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantılarında 2,5 J ön darbe deneyinde yaklaşık 3 mm sehim olduğu için üç nokta eğilme deneyinde 3 mm deplasman oluşturulup ardından çekme deneyi yapılmıştır. Bu durumda da hasar yükünün arttığı görülmüştür. Ayrıca 2,5 J ön darbe sonrası hasar yükündeki artış miktarıyla aynı olduğu görülmüştür. Bunun deney sonucunda darbe sonrası hasar yükündeki artışın darbe uygulamasında oluşan eğilme kaynaklı kayma gerilmelerinin lamellerdeki çapraz zincirlerin hizalanmasına katkı sağlaması olduğu sonucuna varılmıştır.

Karma yapıştırıcılı bağlantılarda enerji seviyesinin artmasıyla bir istisnai durum harici bağlantı hasar yükünün düştüğü gözlenmiştir. Bu durum 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantılarda esnek yapıştırıcı kullanım alanının büyük olması ve darbe sonrası esnek yapıştırıcının mukavemetinin artmasıyla açıklanmıştır.



Şekil 5.33 Ön darbe sonrası oluşan hasarlar, a) 5J ön darbe uygulanmış DP8005 tek yapıştırıcılı b) 7,5 J ön darbe uygulanmış DP8005 tek yapıştırıcılı c) 5J ön darbe uygulanmış 1/1 oranında karma yapıştırıcılı, d) 7,5 J ön darbe uygulanmış 1/1 oranında karma yapıştırıcılı, e) 5 J ön darbe uygulanmış 1/2 oranında karma yapıştırıcılı, f) 7,5 J ön darbe uygulanmış 1/2 oranında karma yapıştırıcılı.

Dört bağlantı tipinin farklı enerji seviyelerinde ön darbe sonrası çekme deneylerinde elde edilen hasar yükleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Bağlantı tiplerinin şematik çizimleri sırasıyla AV138 tek yapıştırıcılı, DP8005 tek yapıştırıcılı, 1/1 oranında karma yapıştırıcılı ve 1/2 oranında karma yapıştırıcılı olacak şekilde sıralanmıştır. Farklı enerji seviyelerinde ön darbe uygulanmış bağlantıların çekme deney sonuçları her deney parametresindeki 5 deneyin sonuçlarının ortalaması alınarak tabloya yazılmıştır.

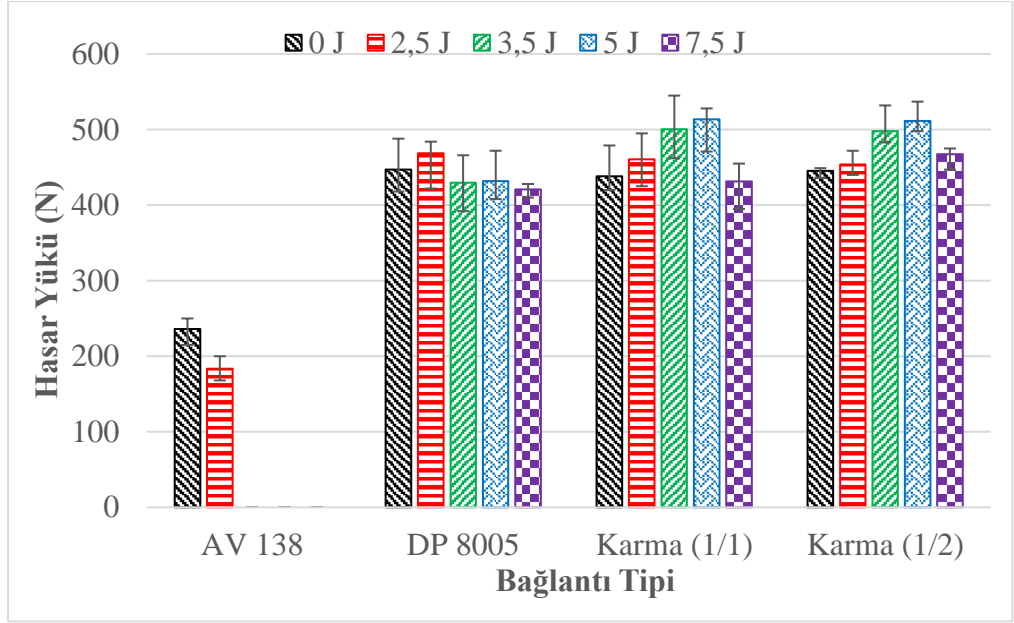
Tablo 5.1 Ön darbe sonrası çekme deney sonuçları (kN).

	AV138	DP8005	DP8005 AV138 DP8005	DP8005 AV138 DP8005
0 J	7,9	8,8	13,4	14,1
2,5 J	2,7	10,3	14,3	13,8
3,5 J		12,1	13,3	13,5
5 J		10,2	12,8	11,3
7,5 J		10,2	9,9	10,9

5.6 Ön Darbe Sonrası Üç Nokta Eğilme Deneylerinin Karşılaştırılması

Ön darbe sonrası üç nokta eğilme deneylerinde ulaşılan hasar yükü değerlerinin tüm bağlantı tiplerindeki değişimini gösteren grafik Şekil 5.34'te verilmiştir. Darbesiz durumda en düşük hasar yükü AV138 rijit yapıştırıcısının tek yapıştırıcılı bağlantılarında görülmüştür. 2,5 J ön darbe sonrası yapılan üç nokta eğilme deneylerinde sadece AV138 tek yapıştırıcılı bağlantıların hasar yükünde azalma gözlenmiştir. DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantılarda 3.5 J sonrasında düşüş görülmüştür. İki farklı orandaki karma yapıştırıcılı bağlantılarda 5 J ön darbe enerji seviyesine kadar bağlantı hasar yükünde artış gözlenmiştir. 5 J ön darbe sonrasında karma yapıştırıcılı bağlantılarda azalma olduğu görülmüştür.

Dört bağlantı tipinin farklı enerji seviyelerinde ön darbe sonrası üç nokta eğilme deneylerinde elde edilen hasar yükleri Tablo 5.2'te verilmiştir.



Şekil 5.34 Ön darbe sonrası üç nokta eğilme deney sonuçlarının karşılaştırması.

Tablodaki değerlere bakıldığında DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantılarda 2,5 J enerji seviyesindeki artıştan sonra diğer enerji seviyelerinde hasar yükünün birbirine çok yakın değerler olduğu görülmüştür.

Tablo 5.2 Ön darbe sonrası üç nokta eğilme deney sonuçları (N).

	AV138	DP8005	DP8005 AV138 DP8005	DP8005 AV138 DP8005
0 J	236	447	438	445
2,5 J	183	468	460	453
3,5 J		429	500	498
5 J		431	513	511
7,5 J		420	431	467

Bu durumun aksine AV138 tek yapıştırıcılı bağlantılarda darbe sonrası dayanımın ciddi ölçüde düşüş gösterdiği görülmüştür. Bu bilgiler sonucunda DP8005 yapıştırıcısının darbe ve bağlantı dayanımı yüksek bağlantılar elde etmek için karma yapıştırıcılı bağlantılarda kullanılmasının avantajlı olacağı kararlaştırılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kompozit malzemeler başta havacılık, uzay ve otomotiv endüstrileri olmak üzere hafiflik ve dayanım gereken tüm alanlarda kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin kendileriyle veya başka malzemelerle birleştirilmesinde yapıştırma tekniği yaygınca kullanılan bir yöntemdir. Fakat her bağlantı yönteminin olduğu gibi yapıştırma bağlantılarının da dezavantajları vardır. Yapıştırma bağlantılarında gerilme yığılmaları, büyük ölçüde bindirme bölgesinin uç kısımlarında meydana gelmektedir ve bu uç bölgelerde soyulma şeklinde hasar başlayarak bağlantının orta noktasına doğru ilerlemektedir. Karma yapıştırıcı bağlantı yöntemi bindirme bölgesinin ortasında rijit yapıştırıcı ve uç kısımlarında esnek yapıştırıcı kullanımıyla bağlantı mukavemetini arttırmayı sağlamaktadır. Bu yöntemle, bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilme yığılmaları esnek yapıştırıcı sayesinde azaltılabilir, bindirme bölgesi boyunca homojen bir gerilme dağılımı oluşturulabilir ve hasar yükü yüksek bir bağlantı elde edilebilir.

Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin tek tesirli yapıştırma bağlantılarında karma yapıştırıcı bağlantı yönteminin kullanılması bağlantı dayanımının artmasını sağlamıştır. Bunun en önemli sebebi yapıştırma bağlantılarda bindirme bölgesinin uç kısımlarında oluşan gerilme yığılmalarının esnek yapıştırıcı kullanımıyla azaltılması ve bunun neticesinde bindirme bölgesinin ortasında bulunan rijit yapıştırıcının daha fazla yük taşıyabilmesinden kaynaklanmaktadır. Buna ek olarak bindirme bölgesinin uç kısımlarında esnek yapıştırıcı kullanımıyla yapıştırma bağlantılarında hasarın başlangıç yeri olan bu uç kısımlarda erken hasarın önüne geçilmektedir.

Bu tez kapsamında karma yapıştırıcı bağlantı yönteminin kullanılmasının enine darbe sonrası bağlantı mukavemetini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu kısımdan sonra adım adım tüm bağlantı tiplerindeki sonuçlar değerlendirilmiş ve bunlara ek olarak öneriler yazılmıştır.

AV138 tek yapıştırıcı bağlantıların darbesiz durumda diğer tüm bağlantı yöntemlerinden daha düşük hasar yüküne ulaşması cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yapıştırılmasında AV138 yapıştırıcısının tek başına kullanılmasının bağlantı dayanımı açısından avantajlı olmadığını göstermiştir.

AV138 tek yapıştırıcılı bağlantıların ön darbe deneylerinde bindirme bölgesinin uç kısımlarındaki gerilme yığılması sebebiyle erkenden hasara uğradığı görülmüştür. AV138 tek yapıştırıcılı bağlantıların başlıca kullanım alanı olan uçak endüstrisinde darbe durumuna karşı dayanımı yüksek bir bağlantı olması gerekmektedir. AV138 rijit yapıştırıcısının bindirme bölgesinde tek başına kullanılması yerine bindirme bölgesinin uç kısmında ufak bir esnek yapıştırıcı kullanımıyla bağlantı dayanımının daha yüksek olacağı ve darbe durumunda erken hasarın önüne geçilebileceği sonucuna varılmıştır.

DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantılarda 2,5 ve 3,5 J enerji seviyelerinde ön darbe sonrası bağlantı hasar yükünde artış gözlenmiştir, bu artış 5 J'den sonra azalmış olsa da 7,5 J'deki hasar yükünün darbesiz durumdan yüksek olduğu görülmüştür. DP8005 esnek yapıştırıcısının tek yapıştırıcılı bağlantılarında darbe enerji seviyesinin artmasıyla hasar yükündeki artışın, yapıştırıcının polimerik bir malzeme olması ve polimerik malzemenin bir özelliği olarak meydana geldiği görülmüştür. Yapıştırıcılar kürleştikten sonra termoset özelliği kazanmaktadır. Termosetler ağ yapısına sahip polimerlerdir. Uygulamalarda mekanik dayanım ve çelme modülünü artırmanın en çok tercih edilen yolu, polimeri çekme yönünde kalıcı şekildeğişimine uğratmaktır. Çekme sırasında molekül zincirleri birbiri üzerinde kayarak önemli oranda yönlendirilir. Plastik deformasyon (çeki yoluyla) sonucunda polimerik malzemelerin içyapısındaki lamelerde çapraz halde bulunan zincirler birbiri üzerinde kayar ve bu, lamelin yana yatmasına neden olur; böylece katlanmış zincirler çekme eksenine göre daha iyi hizalanmış olur. Sonraki herhangi bir yer değiştirme ise zayıf ikincil bağlar veya van der Waals bağları tarafından engellenir. Bu durumda dayanımda bir artış meydana gelmektedir. Deneylerde uygulanan darbeler neticesinde meydana gelen eğilmelerden dolayı yapıştırıcı tabakasında kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu kayma gerilmeleri yukarıda bahsedildiği gibi termoset yapıştırıcısının molekül zincirlerinin hizalanmasına sebep olmuş olabilir. Darbe sonrasında uygulanan çekme deneylerinde ise hizalanmış molekül zincirlerinin direnç oluşturmasıyla darbesiz duruma göre daha yüksek bir dayanım elde edilmiştir. Hatta bu mukavemet artışının bahsedildiği şekilde meydana geldiğini teyit etmek maksadıyla, bağlantıda eğilme gerilmesi ve neticesinde kayma gerilmesi oluşturmak için üç nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Bu bağlamda, DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantılarında 2,5 J ön darbe deneyinde yaklaşık 3 mm sehimi olduğu için üç nokta eğilme deneyinde 3 mm deplasman oluşturulup ardından çekme deneyi

yapılmıştır. Bu durumda da hasar yükünün arttığı görülmüştür. Ayrıca 2,5 J ön darbe sonrası çekme deneyi sonucu ile, üç nokta eğilme deneyi sonrasındaki çekme deneyi sonucu hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. Bunun deney sonucunda darbe sonrası hasar yükündeki artışın darbe uygulamasında oluşan eğilme kaynaklı kayma gerilmelerinin lamellerdeki çapraz zincirlerin hizalanmasına katkı sağlaması olduğu sonucuna varılmıştır. DP8005 tek yapıştırıcılı bağlantıların ön darbe sonrası üç nokta eğilme deneylerinde 2,5 J ön darbe sonrası hasar yükü darbesiz duruma göre artış göstermiştir. Diğer enerji seviyelerindeki ön darbe sonrası üç nokta eğilme deneylerindeki hasar yükü darbesiz durumdaki hasar yüküne yakın değerlerdedir.

1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların sadece 2,5 J ön darbe sonrası durumunda yapıştırıcıda herhangi bir ayrılma olmadan malzemenin hasara uğraması ile deneyler sonuçlanmıştır. Bu durum 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların 2,5 J ön darbe sonrası dayanımının yapıştırılan malzeme dayanımının üzerinde olduğunu göstermiştir. 2,5 J enine darbe sonrası bağlantının hasar yükünde darbesiz durumdakine göre artış gözlenmiştir. Bu durum 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantılarda bindirme bölgesinde kullanılan esnek yapıştırıcı ile rijit yapıştırıcı oranın eşit olması sebebiyle ortadaki rijit yapıştırıcının bütünlüğünün bozulmamasından kaynaklanmıştır. Buna ek olarak darbe deneylerinde oluşan eğilme sonrası kayma gerilmeleri DP8005 yapıştırıcısının polimerik yapısında çapraz halde bulunan zincirlerin hizalanmasını sağlaması bağlantı dayanımındaki bu artışın ana sebebidir. Bindirme bölgesi uç kısımlarında esnek yapıştırıcı kullanılmasıyla, AV138' in tek yapıştırıcılı bağlantılarında olduğu gibi 2,5 J ön darbe sonrasında yapıştırıcının bütünlüğünün bozulup bindirme bölgesinin uç kısımlarında oluşacak ayrılmalar engellenmiştir. 3,5 J enerji seviyesinden sonra darbe sonucunda bindirme bölgesinin ortasında bulunan rijit yapıştırıcı bütünlüğünü koruyamamış ve bağlantının dayanımı azalmıştır. Karma yapıştırıcılı bağlantıların enine darbe sonrası dayanımları açısından karşılaştırıldığında 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların daha yüksek bir bağlantı dayanımı gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bunun aksine darbesiz durumdaki hasar yükleri karşılaştırıldığında 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların daha yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. 1/1 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların ön darbe sonrası üç nokta eğilme deneylerinde 5 J enerji seviyesine kadar hasar yükü kademeli olarak artış göstermiştir. Artış miktarı çok yüksek olmamakla birlikte bindirme bölgesindeki esnek yapıştırıcının polimerik özelliğinden kaynaklanmıştır.

1/2 oranında karma yapıştırıcı bağlantıların ön darbe sonrası çekme deneylerinde darbesiz durumdaki bağlantıların en yüksek hasar yüküne ulaştığı görülmüştür. Darbe enerji seviyesi arttıkça hasar yükünde kademeli bir düşüş gözlenmiştir. 1/2 oranında karma yapıştırıcılı bağlantıların ön darbe sonrası üç nokta eğilme deneylerindeyse 2,5 J ön darbe sonrası hasar yükünde artış gözlenmiştir, diğer enerji seviyelerindeki ön darbe sonrası dayanım 2,5 J enerji seviyesinden daha az olsa bile darbesiz durumdaki hasar yükünden daha yüksek değerdedir.

Bu tez çalışması kapsamında, 2 mm kalınlığında cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin iki farklı özellikteki yapıştırıcıyla tek yapıştırıcılı ve karma yapıştırıcılı bağlantılarının ön darbe sonrası bağlantı dayanımları incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak gelecek çalışmalarda farklı yapıştırıcılar ve yapıştırılan malzemeler çalışılabilir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin bu çalışmada kullanılan cam elyaf takviyeli kompozit malzemeden daha rijit olması sebebiyle bindirme bölgesinin uç kısımlarında oluşan esneme daha az olacağından hasar yükü daha yüksek değerlere ulaşabilir. Buna ek olarak bu deneysel çalışmaların sonlu elemanlar analizleriyle ve analitik hesaplarla karşılaştırmaları yapılabilir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin başlıca kullanım alanlarından olan uçak, otomotiv ve uzay endüstrilerinde kullanılabilir. Uçak endüstrisinde kanatların içerisindeki konstrüksiyon hafif olması için yapıştırma bağlantılar ile birleştirilmektedir, buradaki birleştirmeleri karma yapıştırıcılı bağlantı yöntemi kullanılarak yapılabilir. Kanat yapısında karma yapıştırıcılı bağlantı yönteminin kullanılması hem darbe durumunda hem de kanadın salınım hareketi yaptığı titreşim durumunda daha yüksek mukavemet göstermesini sağlayabilir.

7. KAYNAKLAR

Aga, Z. A. and Woldesenbet, E., "Bond thickness effect on impact response and damage of adhesively-bonded graphite/epoxy composites", *J. Adhes. Sci. Technol.*, 21 (1), 21–34, (2007).

Bachir, B. B., Fekirini, H., Belhouari, M., Boutabout, B. and Serier, B., "Fracture energy for repaired cracks with bonded composite patch having two adhesive bands in aircraft structures", *Comput. Mater. Sci.*, 40 (1), 20–26, (2007).

Baldan, A., "Adhesion phenomena in bonded joints", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 38, 95–116, (2012).

Banea, M. D. and da Silva, L.F.M., "Adhesively bonded joints in composite materials: An overview", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, 223 (1), 1–18, (2009).

Bavi, O., Bavi, N. and Shishesaz, M., "Geometrical optimization of the overlap in mixed adhesive lap joints", *J. Adhes.*, 89 (12), 948–972, (2013).

Belingardi, G. and Scattina, A., "Experimental investigation on the bending behaviour of hybrid and steel thin walled box beams - The role of adhesive joints", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 40, 31–37, (2013).

Breto, R., Chiminelli, A., Duvivier E., Lizaranzu, M. and Jimenez, M. A., "Finite element analysis of functionally graded bond-lines for metal/composite joints", *J. Adhes.*, 91 (12), 920–936, (2015).

Breto, R., Chiminelli, A., Lizaranzu, M. and Rodriguez, R., "Study of the singular term in mixed adhesive joints", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 76, 11–16, (2017).

Callister, W. D., *Materials Science and Engineering*, Seventh Ed., New York, USA: John Wiley and Sons, (2006).

Çallıoğlu, H. and Ergun, E., "An Assessment of the Impacted Composite Single-Lap Adhesive Joints", *J. Mech.*, 31 (4), 433–439, (2015).

Carbas, R. J. C., da Silva, L. F. M. and Critchlow, G.W., "Adhesively bonded functionally graded joints by induction heating", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 48, 110–118, (2014).

Chiminelli, A., Breto, R., Izquierdo, S., Bergamasco, L., Duvivier, E. and Lizaranzu, M., "Analysis of mixed adhesive joints considering the compaction process", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 76, 3–10, (2017).

Dobrzanski, P. and Oleksiak, W., "Design and Analysis Methods for Composite Bonded Joints", *Trans. Aerosp. Res.*, 2021 (1), 45–63, (2021).

Durodola, J. F., "Functionally graded adhesive joints – A review and prospects", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 76, 83–89, (2017).

Ergun, E. and Çallıoğlu, H., "The flexural behaviors of the impacted composite single-lap adhesive joints", *Sci. Eng. Compos. Mater.*, 22 (5), 503–510, (2015).

Fitton, M. D. and Broughton, J. G., "Variable modulus adhesives: An approach to optimised joint performance", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 25 (4), 329–336, (2005).

Frosting Y., Thomsen O. T. and Mordensen F., "Analysis of adhesive-bonded joints, square-end, and spew-fillet - high order theory approach", *J. Eng. Mech.*, 125, 1298–1307, (1999).

Gerd, H., *Kleben-erfolgreich und fehlerfrei*, Forth Ed., Wiesbaden, Deutsche: Vieweg+Teubner, (2006).

Hart-Smith L. J., "Adhesive-bonded double lap joints", *Natl. Aeronaut. Sp. Adm.*, (1973).

Kanani, A. Y., Liu, Y., Hughes, D. J., Ye, J. and Hou, X., "Fracture mechanisms of hybrid adhesive bonded joints: Effects of the stiffness of constituents", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 102, (2020).

Kanani, A. Y., Hou, X. and Ye, J., "The influence of notching and mixed-adhesives at the bonding area on the strength and stress distribution of dissimilar single-lap joints", *Compos. Struct.*, 241, (2020).

Kinloch, A.J., *Adhesion and Adhesives*, First Ed., London, United Kingdom: Chapman & Hall, (1987).

Kong, F. R., You, M. and Zheng, X. L., "Three-Dimensional finite element analysis of the stress distribution in bi-adhesive bonded joints", *J. Adhes.*, 84 (2), 105–124, (2008).

Kumar, S. and Pandey, P. C., "Behaviour of Bi-adhesive joints", *J. Adhes. Sci. Technol.*, 24 (7), 1251-1281, (2010).

Kwon, J. W. and Lee, D. G., "The effects of surface roughness and bond thickness on the fatigue life of adhesively bonded tubular single lap joints", *J. Adhes. Sci. Technol.*, 14 (8), 1085–1102, (2000).

Liu, X., Shao, X., Li, Q. and Sun, G., "Failure mechanisms in carbon fiber reinforced plastics (CFRP) / aluminum (Al) adhesive bonds subjected to low-velocity transverse pre-impact following by axial post-tension", *Compos. Part B Eng.*, 172, 339–351, (2019).

Machado, J. J. M., Gamarra, P. M. R., Marques, E. A. S. and da Silva, L. F. M., "Improvement in impact strength of composite joints for the automotive industry", *Compos. Part B Eng.*, 138, 243–255, (2018a).

Machado, J. J. M., Marques, E. A. S., Silva, M. R. G. and da Silva, L. F.M., "Numerical study of impact behaviour of mixed adhesive single lap joints for the automotive industry", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 84, 92–100, (2018).

Machado, J. J. M., Gamarra, P. M. R., Marques, E. A. S. and da Silva, L. F. M., "Numerical study of the behaviour of composite mixed adhesive joints under impact strength for the automotive industry", *Compos. Struct.*, 185, 373–380, (2018b).

Machado, J. J. M., Nunes, P. D. P., Marques, E. A. S. and da Silva, L. F. M., "Adhesive joints using aluminium and CFRP substrates tested at low and high temperatures under quasi-static and impact conditions for the automotive industry", *Compos. Part B Eng.*, 158, 102–116, (2019).

Machado, J. J. M., Marques, E. A. S. and da Silva, L. F. M., "Influence of low and high temperature on mixed adhesive joints under quasi-static and impact conditions", *Compos. Struct.*, 194, 68–79, (2018).

Marques, E. A. S. and da Silva, L. F. M., "Joint strength optimization of adhesively bonded patches", *J. Adhes.*, 84(11), 915–934, (2008).

Marques, E. A. S., da Silva, L. F. M. and Flaviani, M., "Testing and simulation of mixed adhesive joints for aerospace applications", *Compos. Part B Eng.*, 74, 123–130, (2015).

Nakano, H., Sekiguchi, Y. and Sawa, T., "FEM stress analysis and strength prediction of scarf adhesive joints under static bending moments", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 44, 166–173, (2013).

Das Neves, P. J. C., da Silva, L. F. M. and Adams, R. D., "Analysis of mixed adhesive bonded joints part I: Theoretical formulation", *J. Adhes. Sci. Technol.*, 23 (1), 1–34, (2009a).

Das Neves, P. J. C., da Silva, L. F. M. and Adams, R. D., "Analysis of mixed adhesive bonded joints part II: Parametric study", *J. Adhes. Sci. Technol.*, 23 (1), 35–61, (2009b).

Öz, Ö. and Özer, H., "An experimental investigation on the failure loads of the mono and bi-adhesive joints", *J. Adhes. Sci. Technol.*, 31 (19–20), 2251–2270, (2017).

Özenç, M., "Yapıştırma Bağlantılarının Darbe Yükleri Altındaki Davranışlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2007).

Özer, H. and Öz, Ö., "Three dimensional finite element analysis of bi-adhesively bonded double lap joint", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 37, 50–55, (2012).

Özer, H. and Öz, Ö., "A Comparative Evaluation of Numerical and Analytical Solutions to the Biadhesive Single-Lap Joint", *Math. Probl. Eng.*, 1–16, (2014).

Öztürk, A. U., "Sandviç Kompozitlerde Balpeteği Yapısının Optimizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2009).

Petrie, E. M., *Handbook of Adhesives and Sealants*, First Ed., New York, USA: McGraw-Hill, (2006).

Pires, I., Quintino, L., Durudola, J. F. and Beevers A., "Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 23 (3), 215–223, (2003).

Pizzi, A. and Mittal, K. L., *Handbook of Adhesive Technology*, Third Ed., New York, USA: Taylor & Francis, (2018).

Pocius, A. V., *Adhesion and Adhesives Technology*, Third Ed., Maplewood, USA: Hanser, (2012).

Ramezani, F., Ayatollahi, M. R., Akhavan-Safar, A. and da Silva, L. F. M., "A comprehensive experimental study on bi-adhesive single lap joints using DIC technique", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 102, (2020).

Raphael, C., "Variable-adhesive bonded joints", *Appl. Polym. Symp.*, 99–108, (1966).

Reis, P. N. B., Ferreira, J. A. M., Pereira, A. M. and Antunes, F. J. V., "Influence of superposition length on transverse impact response of single-strap adhesive joints", *J. Adhes.*, 90 (1), 65–79, (2014).

Sawa, T., Ichikawa, K., Shin, Y. and Kobayashi, T., "A three-dimensional finite element stress analysis and strength prediction of stepped-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to bending moments", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 30 (5), 298–305, (2010).

Sayman, O., Arıkan, V., Doğan, A., Soykok, İ. F. and Doğan, T., "Failure analysis of adhesively bonded composite joints under transverse impact and different temperatures", *Compos. Part B Eng.*, 54 (1), 409–414, (2013).

Schultz, J. M., *Polymer Materials Science*, First Ed., New Jersey, USA: Pearson Education, (1974).

Şekercioğlu, T., "Yapıştırma Bağlantılarının Dinamik Yükler Altındaki Davranışlarının İncelenmesi", Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2001).

Shang, X., Marques, E. A. S., Machado, J. J. M., Carbas, R. J. C., Jiang, D. and da Silva, L. F. M., "Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends", *Compos. Part B Eng.*, 177, (2019).

da Silva, L. F. M. and Adams, R. D. "Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 27 (3), 216–226, (2007).

da Silva, L. F. M. and Adams, R. D., "Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 27 (3), 227–235, (2007).

da Silva, L. F. M. and Lopes, M. J. C. Q., "Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 29 (5), 509–514, (2009).

da Silva, L. F. M., Oechsner, A. and Adams, R. D., *The Handbook of Adhesion Technology*, Second Ed., Springer International Publishing, (2018).

Silva, M. R. G., Marques, E. A. S. and da Silva, L. F. M., "Behaviour under impact of mixed adhesive joints for the automotive industry", *Lat. Am. J. Solids Struct.*, 13(5), 835–853, (2016).

Srinivas S., "Analysis of bonded joints", *Natl. Aeronaut. Sp. Adm.*, (1975).

Stein, N., Felger, J. and Becker, W., "Analytical models for functionally graded adhesive single lap joints: A comparative study", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 76, 70–82, (2017).

Temiz, Ş., "Application of bi-adhesive in double-strap joints subjected to bending moment", *J. Adhes. Sci. Technol.*, 20 (14), 1547–1560, (2006).

Wu, W., Liu, Q., Zong, Z., Sun, G. and Li, Q., "Experimental investigation into transverse crashworthiness of CFRP adhesively bonded joints in vehicle structure", *Compos. Struct.*, 106, 581–589, (2013).

Yüksel, M. ve Meran, C., *Malzeme Bilgisine Giriş*, 2. Baskı, Ankara: MMO/545/2, (2013).

Zaeri, A. R. and Saeidi Googarchin, H., "Experimental investigation on environmental degradation of automotive mixed-adhesive joints", *Int. J. Adhes. Adhes.*, 89, 19–29, (2019).