

İZMİR KÂTİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CAM ELYAF TAKVİYELİ YAPIŞTIRMALI KOMPOZİT BAĞLANTILARIN
EKSENEL DARBE YÜKLERİ VE TİTREŞİMLER ALTINDAKİ MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ



DOKTORA TEZİ

Uğur KEMİKLİOĞLU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEMMUZ 2018

İZMİR KÂTİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CAM ELYAF TAKVİYELİ YAPIŞTIRMALI KOMPOZİT BAĞLANTILARIN
EKSENEL DARBE YÜKLERİ VE TİTREŞİMLER ALTINDAKİ MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Uğur KEMİKLİOĞLU
(606213003)

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Buket OKUTAN BABA

TEMMUZ 2018

**IZMIR KATIP CELEBI UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

**INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIORS OF ADHESIVELY
BONDED GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITE JOINTS UNDER
AXIAL IMPACT AND VIBRATION**



PhD THESIS

**Uğur KEMİKLİOĞLU
(606213003)**

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. Buket OKUTAN BABA

JULY 2018

İKÇÜ, Fen Bilimleri Enstitüsünün 606213003 numaralı Doktora Öğrencisi Uğur Kemiklioğlu, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "CAM ELYAF TAKVİYELİ YAPIŞTIRMALI KOMPOZİT BAĞLANTILARIN EKSENEL DARBE YÜKLERİ VE TİTREŞİMLER ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :

Prof. Dr. Buket OKUTAN BABA
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi



Jüri Üyeleri :

Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU
Dokuz Eylül Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet ÇEVİK
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

Doç. Dr. Yusuf ARMAN
Dokuz Eylül Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir ATAN
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi



Teslim Tarihi : 20.06.2018
Savunma Tarihi : 12.07.2018



Aileme,

ÖNSÖZ

Doktora çalışmamın gerçekleştirilmesinde; özverili bir şekilde araştırmalarımaya yön veren, beni sürekli motive ederek destekleyen ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Buket OKUTAN BABA Hocam'a,

Gerçekleştirdiğim çalışma kapsamında araştırmalarımı değerlendiren, görüş ve önerilerini bildiren ve çalışmanın iyileştirilmesine katkı sağlayan tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU ve Sayın Doç. Dr. Mehmet ÇEVİK Hocalarım'a,

Çalışmalarım kapsamında; gerekli sarf malzemelerin, titreşim motorlarının ve sehparlarının teminini sağlayan İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (*Proje No: 2017-TDR-FEBE-0031*) ve tabakalı kompozit plakaları üretmeme imkan sunan Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Malzemeler Üretim Laboratuvarı'ndaki sorumlu hocalarıma ve arkadaşlarıma,

Akademik hayatımın başlangıcına ışık tutan ve değerli tecrübelerini aktarmaktan hiç bir zaman çekinmeyen, desteğini sürekli olarak hissettiğim ve kendisini tanıma şerefine nail olduğum Sayın Prof. Dr. Onur SAYMAN Hocam'a,

Eğitim hayatım boyunca bana yol gösteren, beni her anlamda destekleyen, hayatım boyunca bana güven ve huzur veren Canım Ablam Emine KEMİKLİOğLU'na,

Son olarak, bu günlere gelmemi sağlayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, iyi ve kötü günümde her zaman yanımda olan biricik AİLEM'e tüm kalbimle teşekkür ederim.

Temmuz 2018

Uğur KEMİKLİOğLU



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	1
1.2 Literatür Özeti	3
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	10
2.1 Kompozitin Tanımı	10
2.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	10
2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	13
2.3.1 Parçacık takviyeli kompozitler.....	14
2.3.2 Elyaf takviyeli kompozitler.....	15
2.3.3 Tabakalı kompozitler	15
2.3.4 Karma (Hibrit) kompozitler	15
2.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	16
2.5 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	18
2.5.1 El yatırma yöntemi.....	18
2.5.2 Kalıplama yöntemi.....	19
2.5.3 Püskürtme yöntemi	20
2.5.4 Elyaf (Filament) sarma yöntemi	21
3. BAĞLANTILAR.....	22
3.1 Kompozit Plakalarda Bağlantı Dizaynı.....	23
3.2 Kompozit Plakalardaki Bağlantıların Karşılaştırılması.....	24
3.3 Yapıştırırmalı Kompozit Bağlantılar	25
3.3.1 Yapıştırıcılar.....	26
3.3.2 Yapıştırıcıların avantajları ve dezavantajları	27
3.3.3 Yapıştırırmalı kompozitlerin bağlantı şekilleri	29
3.3.4 Yapıştırırmalı kompozitlere uygulanan testler	31
3.3.5 Elyaf takviyeli kompozitlerin yapıştırırmalı bağlantılarındaki hasar tipleri	32
4. MALZEME VE METOT	34
4.1 Problemin Tanımı.....	34
4.2 Tabakalı Kompozitlerin Üretimi	38
4.3 Yapıştırırmalı Kompozit Bağlantıların Üretimi.....	42
4.3.1 Kompozit plakaların kesim işlemi	43
4.3.2 Yüzey temizleme işlemi.....	43
4.3.3 Yapıştırma ve kürlenme işlemi	44
4.4 Kompozit Malzeme ve Yapıştırıcının Temel Mekanik Özelliklerinin Tespitinde Kullanılan Deneysel Metotlar	46
4.4.1 Çekme testi.....	47
4.4.2 Kayma testi	48
4.4.3 Yapıştırıcılara uygulanan çekme deneyleri.....	50

4.5 Yapıştırırmalı Kompozit Bağlantılara Uygulanan Deneysel Metotlar	52
4.5.1 Eksenel darbe deneylerinin uygulanması	53
4.5.2 Titreşim deneylerinin uygulanması	56
4.5.3 Çekme deneylerinin uygulanması	61
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	63
5.1 Kompozit Bağlantıların Eksenel Darbe Yükleri Altındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi	63
5.1.1 Farklı yapıştırıcılarla yapıştırılan kompozit bağlantıların tekrarlı eksenel darbe yükleri altındaki mekanik davranışları	63
5.1.2 Kompozit bağlantıların farklı sıcaklıklarda etkiyen eksenel darbe yükleri altındaki mekanik davranışları	70
5.1.3 Hasar modları	76
5.2 Kompozit Bağlantıların Titreşimli Yükler Altındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi	80
5.2.1 İki kenarı serbest bırakılmış plakalardan elde edilen sonuçlar	81
5.2.2 İki kenarı sabitlenmiş plakalardan elde edilen sonuçlar	88
5.2.3 İki kenarı serbest bırakılan ve sabitlenen plakalardan elde edilen sonuçların mukayesesi	97
5.3 Kompozit Bağlantıların Titreşimli ve Eksenel Darbeli Yükler Altındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi	101
5.3.1 İki kenarı serbest durumda titreşime ve sonrasında eksenel darbeye maruz plakalardan elde edilen sonuçlar	101
5.3.2 İki kenarı sabitlenmiş durumda titreşime ve sonrasında eksenel darbeye maruz plakalardan elde edilen sonuçlar	108
5.3.3 Titreşim ve eksenel darbe uygulanmış plakalardaki hasar durumları	113
5.3.4 İki kenarı serbest bırakılan ve sabitlenen plakalara uygulanan eksenel darbeler sonrasında elde edilen sonuçların mukayesesi	116
6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER	121
KAYNAKLAR	126
ÖZGEÇMİŞ	133

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
FAA	: Federal Aviation and Administration
UHM	: Ultra High Modulus
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Polymer
rpm	: Round per minute
dak	: Dakika
dev/dak	: Devir/Dakika
J	: Joule
N	: Newton
kN	: Kilo-Newton
SEM	: Scanning Electron Microscopy



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Tek yönlü örülmüş takviye elemanlarından üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [1].	12
Tablo 2.2: Dokumalı örülmüş takviye elemanlarından üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [1].	13
Tablo 3.1: Bağlama kuvvetlerinin karşılaştırılması.	25
Tablo 4.1: Cam elyaf takviyeli polimer kompozit plakaların mekanik özellikleri. ..	50
Tablo 4.2: DP-460 Epoksi yapıştırıcının mekanik özellikleri [97].	51
Tablo 4.3: Loctite 9466 Epoksi yapıştırıcının mekanik özellikleri [98].	52
Tablo 4.4: Titreşim motorunun teknik özellikleri.	60
Tablo 4.5: Titreşim çevrimi parametreleri.	61
Tablo 5.1: Farklı titreşimlere maruz iki kenarı serbest plakaların kopma kuvvetlerindeki değişim.	83
Tablo 5.2: Farklı titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı serbest plakaların kuvvet ve uzamalarındaki değişim.	86
Tablo 5.3: Farklı titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların kopma kuvvetlerindeki değişim.	90
Tablo 5.4: Farklı titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların kuvvet ve uzamalarındaki değişim.	92
Tablo 5.5: Farklı eksenel darbe uygulanan iki kenarı serbest plakaların kopma kuvveti değerleri.....	107
Tablo 5.6: Farklı eksenel darbe uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların kopma kuvveti değerleri.....	113



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Takviye elemanlarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması [4].	14
Şekil 2.2: Kompozit malzemelerin kullanım alanları a) Planör gövdesi, b) Tekne, c) Küvet, d) Basınçlı tüpler, e) Profiller, f) Kask ve koruyucular.....	17
Şekil 2.3: Kompozitlerin uygulama alanlarına yönelik üretim yöntemleri.	18
Şekil 2.4: El yatırma yönteminde kullanılan erkek kalıp.	19
Şekil 2.5: Vakum infüzyon yöntemi uygulaması.	20
Şekil 2.6: Püskürtme yöntemi ile küvet üretimi [3].....	21
Şekil 2.7: Elyaf sarma yöntemi ile üretilen silindirik parçalar [3].	21
Şekil 3.1: Bağlama yöntemleri a) Cıvata-somun, b) Kaynak, c) Yapıştırma [88]....	24
Şekil 3.2: Yapıştırma bağı.	26
Şekil 3.3: Yapıştırmalı kompozitlerde meydana gelen gerilmeler;	29
Şekil 3.4: Bağlantı şekilleri.....	30
Şekil 3.5: Yapıştırmalı kompozitlere uygulanan darbe testleri;	31
Şekil 3.6: Hasar durumunun şematik olarak gösterimi.....	32
Şekil 3.7: Hasar modları; a) Koheziv hasar, b) Adeziv hasar, c) Fiber yırtılma hasarı, d) Az miktarda fiber yırtılma hasarı.....	33
Şekil 4.1: Titreşim deneyi için uygun parametrelerinin belirlenmesi.....	35
Şekil 4.2: Titreşim deneylerinde kullanılan parametreler.....	36
Şekil 4.3: Titreşim ve eksenel darbe deneylerinde kullanılan parametreler.....	37
Şekil 4.4: Sarf malzemelerin dizilimi	39
Şekil 4.5: Tabakalı kompozit malzemelerin üretim aşaması.	40
Şekil 4.6: Kürlenme aşamasındaki sıcaklık – zaman grafiği.....	42
Şekil 4.7: Yapıştırılan plakalar a) Ana plaka, b) Yapıştırılan plakalar.....	43
Şekil 4.8: Plakaların yapıştırılması esnasındaki uygulamalar: a) Ana plakanın markalanması, b) Yapıştırılan plakalara sürülen yapıştırıcı uygulaması.	44
Şekil 4.9: Plakaların tek taraftan yapıştırılması esnasındaki kürlemeleri.....	45
Şekil 4.10: Yapıştırmalı bağlantı numunelerinin hazırlanması; a) Konumlandırma, b) Sulu kesim işlemi.	46
Şekil 4.11: ASTM D3039 standardına uygun hazırlanan çekme numunesi ölçüleri.	47
Şekil 4.12: Çekme testi sonrasında hasar gören numune.	48
Şekil 4.13: ASTM D7078 standardına uygun hazırlanan kayma numunesi ölçüleri.	48
Şekil 4.14: Kayma testi uygulama görüntüleri.	49
Şekil 4.15: Epoksi yapıştırıcıların çekme numunesi ölçüleri (mm).	50
Şekil 4.16: Epoksi yapıştırıcılar; a) Çekme numunesi olarak üretilmesi, b) Çekme deneyi sonrası hasar görüntüsü.	51
Şekil 4.17: Eksenel darbe deneyi için Charpy cihazına uygulanan modifikasyon. ...	53
Şekil 4.18: Eksenel darbe için hazırlanan numune;.....	54
Şekil 4.19: Eksenel darbe uygulaması.	55
Şekil 4.20: Eksenel darbe deneyinde farklı sıcaklıkların uygulanması; a) Soğutucu, b) Isıtıcı plakalar, c) Sıcaklık ölçümü.	56
Şekil 4.21: Plakaların sabitlemesi (Önden görünüş); a) İki kenarı sabitlemiş, b) İki kenarı serbest, c) Üstten görünüş.	57
Şekil 4.22: İki kenarı sabit şartları oluşturmak için tasarlanan titreşim sehпасının teknik ölçüleri (mm).....	59

Şekil 4.23: İki kenarı serbest şartları oluşturmak için tasarlanan titreşim sehпасının teknik ölçüleri (mm).....	59
Şekil 4.24: Titreşim test düzenekleri; a) İki kenarı sabitlenmiş, b) İki kenarı serbest.....	60
Şekil 4.25: ASTM D5868 Standardına uygun numune ölçüleri.....	62
Şekil 4.26: Farklı sıcaklıklarda uygulanan çekme deneyleri; a) Soğutma işlemi, b) Isıtma işlemi.....	62
Şekil 5.1: Tek seferlik aksenal darbe uygulanmış Loctite 9466 yapıştırıcılı bağlantının kuvvet – uzama diyagramı.....	64
Şekil 5.2: Üç kez tekrarlı aksenal darbe uygulanmış Loctite 9466 yapıştırıcılı bağlantının kuvvet – uzama diyagramı.....	65
Şekil 5.3: Tek seferlik aksenal darbe uygulanmış DP-460 yapıştırıcılı bağlantının kuvvet – uzama diyagramı.....	66
Şekil 5.4: Üç kez tekrarlı aksenal darbe uygulanmış DP-460 yapıştırıcılı bağlantının kuvvet – uzama diyagramı.....	67
Şekil 5.5: Tek seferlik darbe değerlerinde yapıştırılmalı bağlantıların kopma kuvvetleri.....	68
Şekil 5.6: Üç kez tekrarlı darbe değerlerinde yapıştırılmalı bağlantıların kopma kuvvetleri.....	68
Şekil 5.7: Darbe almamış bağlantılara göre normalize edilmiş kopma kuvvetlerinin karşılaştırılması; a) Tek seferlik darbe, b) Üç kez tekrarlı darbe.....	69
Şekil 5.8: Aksenal darbe ve çekme testleri esnasında ısıtma ve soğutma işlemleri... 70	
Şekil 5.9: -20°C Sıcaklıktaki kuvvet – uzama eğrileri.....	71
Şekil 5.10: Yapıştırılan yüzeylerde oluşan hasar alanları.....	71
Şekil 5.11: 0°C Sıcaklıktaki kuvvet – uzama eğrileri.....	72
Şekil 5.12: 20°C Sıcaklıktaki kuvvet – uzama eğrileri.....	73
Şekil 5.13: 40°C Sıcaklıktaki kuvvet – uzama eğrileri.....	74
Şekil 5.14: 60°C Sıcaklıktaki kuvvet – uzama eğrileri.....	74
Şekil 5.15: Farklı aksenal darbe enerjilerinde kopma kuvvetleri.....	75
Şekil 5.16: Farklı ortam sıcaklıklarındaki kopma kuvvetleri.....	75
Şekil 5.17: -20°C sıcaklığındaki hasar görüntüleri.....	76
Şekil 5.18: 0°C sıcaklığındaki hasar görüntüleri.....	77
Şekil 5.19: 20°C sıcaklığındaki hasar görüntüleri.....	77
Şekil 5.20: 40°C sıcaklığındaki hasar görüntüleri.....	78
Şekil 5.21: 60°C sıcaklığındaki hasar görüntüleri.....	79
Şekil 5.22: Titreşim sehпасlarına farklı sınır şartlarında sabitlenen kompozit plakadan çıkarılan çekme numuneleri; a) İki kenarı serbest, b) İki kenarı sabitlenmiş... 81	
Şekil 5.23: Değişen titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı serbest plakaların kuvvet – uzama diyagramları; a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5	82
Şekil 5.24: Farklı titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı serbest plakaların kopma kuvvetlerindeki değişim.....	84
Şekil 5.25: Titreşim salınımları.....	85
Şekil 5.26: Titreşime maruz iki kenarı serbest plakaların uç ve orta kısımlardan çıkarılan numunelerin kuvvet – uzama eğrileri; a) Parça 1, b) Parça 6.....	86
Şekil 5.27: Değişen titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı serbest plakaların çekme testi sonrası kopma yüzeylerinin mikroskop görüntüleri: a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5 , e) Titreşimsiz numune.....	87

Şekil 5.28: Titreşime maruz iki kenarı serbest plakaların tokluk – uzama eğrileri; a) Parça 1, b) Parça 6.....	88
Şekil 5.29: Değişen titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların kuvvet – uzama diyagramları; a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5	89
Şekil 5.30: Farklı titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların kopma kuvvetlerindeki değişim.	91
Şekil 5.31: Titreşime maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların uç ve orta kısımlardan çıkarılan numunelerin kuvvet – uzama eğrileri; a) Parça 1, b) Parça 6.	92
Şekil 5.32: Değişen titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların çekme testi sonrası kopma yüzeylerinin mikroskop görüntüleri; a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5 , e) Titreşimsiz numune.	94
Şekil 5.33: Titreşime maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların tokluk – uzama eğrileri; a) Parça 1, b) Parça 6.....	95
Şekil 5.34: Taramalı elektron mikroskop görüntüleri: a) Yapıştırıcı, b) Hasar gören üst plaka, c) Hasar gören alt plaka.	95
Şekil 5.35: Farklı titreşim çevrimlerinde görülen yapıştırıcı bağlantı hasarları (100 kat büyütme); a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5	96
Şekil 5.36: Farklı titreşim çevrimlerinde görülen yapıştırıcı bağlantıların hasar görüntüleri (1000 kat büyütme); a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5	96
Şekil 5.37: Farklı titreşimlerdeki plakalar üzerindeki elyafların hasar görüntüleri (100 kat büyütme); a) Titreşimsiz, b) 1.5×10^5 , c) 3×10^5 , d) 12×10^5 , e) 24×10^5	97
Şekil 5.38: İki kenarından sabitlenmiş ve iki kenarı serbest durumlar için bağlantı kopma kuvvetlerinin mukayesesi.....	98
Şekil 5.39: Normalize edilen değerlerin karşılaştırılması; a) Kopma kuvveti, b) Tokluk.	100
Şekil 5.40: 1.5×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların farklı eksenel darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	102
Şekil 5.41: 3×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların farklı eksenel darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	103
Şekil 5.42: 12×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların farklı eksenel darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	103
Şekil 5.43: 24×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların farklı eksenel darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	104
Şekil 5.44: Titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların 5J eksenel darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	104
Şekil 5.45: Titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların 10J eksenel darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	105
Şekil 5.46: Titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların 15J eksenel darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	105
Şekil 5.47: Titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların 20J eksenel darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	106
Şekil 5.48: Farklı eksenel darbe uygulanan iki kenarı serbest plakaların titreşim çevrimine bağlı kopma kuvveti diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.	107

Şekil 5.49: 1.5×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların farklı eksenel darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	108
Şekil 5.50: 3×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların farklı eksenel darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	108
Şekil 5.51: 12×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların farklı eksenel darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	109
Şekil 5.52: 24×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların farklı eksenel darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	109
Şekil 5.53: Titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların 5J eksenel darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	111
Şekil 5.54: Titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların 10J eksenel darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	111
Şekil 5.55: Titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların 15J eksenel darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	112
Şekil 5.56: Farklı enerji seviyelerinde eksenel darbe uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların titreşim çevrimine bağlı kopma kuvveti diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.....	113
Şekil 5.57: İki kenarı serbest sınır şartındaki titreşimler sonrasında eksenel darbelerle maruz bırakılan numunelerin hasar görüntüleri.....	114
Şekil 5.58: İki kenarı sabitlenmiş sınır şartındaki titreşimler sonrasında eksenel darbelerle maruz bırakılan numunelerin hasar görüntüleri.....	115
Şekil 5.59: Eksenel darbe sonrası hasara uğrayan numune görüntüsü.....	116
Şekil 5.60: Farklı titreşim çevrimlerindeki iki kenarı serbest ve sabitlenmiş plakaların eksenel darbelerle maruz bırakıldıktan sonraki kopma kuvveti blok diyagramı (Parça 1).....	117
Şekil 5.61: Titreşime maruz iki kenarı serbest plakaların farklı eksenel darbelerdeki normalize edilmiş kopma kuvvetleri; a) Parça 1, b) Parça 6.....	118
Şekil 5.62: Titreşime maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların farklı eksenel darbelerdeki normalize edilmiş kopma kuvvetleri; a) Parça 1, b) Parça 6.....	119
Şekil 5.63: Normalize edilmiş tokluk değerleri; a) İki kenarı serbest, b) İki kenarı sabit.....	120

CAM ELYAF TAKVİYELİ YAPIŞTIRMALI KOMPOZİT BAĞLANTILARIN EKSENEL DARBE YÜKLERİ VE TİTREŞİMLER ALTINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Kompozitlerin muadil malzemelere göre sergiledikleri üstün özellikleri, bu malzemelerin üretim yöntemlerindeki çeşitliliği ve gelişimi arttırmış, böylece endüstrinin birçok alanında kullanımını yaygınlaştırmıştır. Endüstrinin çeşitli alanlarında yer alan kompozit yapıların konstrüksiyonunda bağlantı elemanı olarak yapıştırıcıların kullanımı artmıştır. Geliştirilen yapıştırıcılar ile birleştirilen kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını incelemek amacıyla, çeşitli deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Ancak yapıştırıcı ile oluşturulan kompozit bağlantıların, konstrüksiyonlarda etkin ve güvenilir bir şekilde uygulanabilmesi için üzerinde daha fazla çalışılması şarttır. Özellikle birçok uygulamada sıklıkla karşılaşılan aksenal darbeler ve titreşime maruz kalan bağlantıların verecekleri davranışların tespiti ve değişen mekanik özelliklerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, iki farklı yapıştırıcı ile birbirine tek taraftan bindirmeli olarak yapıştırılan kompozit bağlantıların, farklı enerji değerlerinde (0J, 5J, 10J, 15J ve 20J) yapıştırma doğrultusunda tek seferlik ve üç kez tekrarlı etkileyen aksenal darbe yüklerine karşı gösterdikleri mekanik davranışlar karşılaştırılmış ve ideal yapıştırıcı seçilmiştir. Seçilen yapıştırıcı ile oluşturulan kompozit bağlantılara, farklı sıcaklıklarda (-20°C, 0 °C, 20 °C, 40 °C ve 60 °C) uygulanan farklı enerji değerlerindeki tek seferlik aksenal darbeler sonrasında elde edilen mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve bir sonraki deneylerde uygulanacak sıcaklık değeri 20°C olarak belirlenmiştir. Kompozit bağlantılar, farklı devirlerde (1.5×10^5 , 3×10^5 , 12×10^5 ve 24×10^5), iki kenarı sabitlenerek ve iki kenarından serbest bırakılarak titreşime tabi tutulmuş ve sonrasında bu bağlantıların titreşime karşı sergiledikleri mekanik davranışları incelenmiştir. Ayrıca, titreşime maruz bırakılan kompozit bağlantılara aksenal darbe yükleri uygulanarak titreşim ve aksenal darbenin kompozit bağlantıların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Bağlantılara uygulanan aksenal darbelerin bir kısmında dayanımın az miktarda arttığı gözlemlenirken, aksenal darbe, titreşim ve her iki mekanik etkinin tesiri sonrasında, çoğunlukla bağlantı dayanımlarının azaldığı saptanmıştır.



INVESTIGATION OF MECHANICAL BEHAVIORS OF ADHESIVELY BONDED GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITE JOINTS UNDER AXIAL IMPACT AND VIBRATION

ABSTRACT

The superior properties of composite materials compared to equivalent materials have increased the diversity and development of these materials in their manufacturing methods, thus making their use in many areas of the industry widespread. The use of adhesives as fasteners in the construction of composite structures in various areas of the industry has become common. Various experimental and analytical studies are carried out with the purpose of examining the mechanical behaviors of the composite joints formed by bonding with developed adhesives. Moreover, further work is necessary to apply these composite joints in constructions effectively and reliably. Especially in many applications, it is very important to determine the behaviors of the axial impacts and the behavior of the joints in the vibrating environments as well as the changing mechanical properties. In this study, the mechanical behavior of adhesively bonded single lap composite joints bonded with two different adhesives on one side with collapsed one on one and three times repetitive axial impact loads at different energy values (0J, 5J, 10J, 15J, and 20J) adhesive was chosen. Mechanical behaviors were compared after one-shot axial impact were applied on composite joints formed with the selected adhesive at different temperatures (-20°C, 0°C, 20°C, 40°C, and 60°C) and the temperature value to be applied in the next experiments was determined as 20°C. Composite joints were vibrated at different speeds (1.5×10^5 , 3×10^5 , 12×10^5 , and 24×10^5), fixed at two ends and released from both ends, and then their mechanical behavior as a function of vibration was investigated. In addition, the effects of vibration and axial compression on the mechanical properties of the composite joints were also investigated by applying axial impact loads to vibrationally exposed composite joints. It was observed that there was a small increase in the strength of some of the axial impacts applied to these joints, whereas the mechanical effects of both the axial impact and vibration lead to decrease in connection strengths.

1. GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Kompozit malzemeler; birbirlerinin eksik yönlerini tamamlayıp nispeten daha iyi özellikler elde etmek için bir araya getirilmiş en az iki veya daha fazla malzemenin oluşturduğu malzeme grubudur. Geleneksel metal yapılara kıyasla daha yüksek rijitlik ve mukavemete sahip hafif yapıların gelişmesine imkan sağlamaları en büyük avantajlarıdır. Bu malzemeler, özellikle yüksek mekanik performansın istendiği modern tasarıma sahip uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Savunma, havacılık, denizcilik, otomobil, medikal ve enerji sektörleri gibi birçok endüstriyel alanda karşılaşılan bu uygulamalar, kompozitin kompozite veya kompozitin metale bağlantısını zorunlu hale getirir. Seçilecek olan bağlantı türü ve buna bağlı olarak elde edilecek bağlantı performansı kompozitlerin kullanımını etkileyen önemli parametrelerdendir. Günümüzde, yapı ağırlığını artıran ve gerilme yığılmalarına sebebiyet veren mekanik bağlantı elemanları, yerlerini neredeyse tamamen yapıştırılarak oluşturulmuş yapılara bırakmaya başlamıştır. Bu durumun sebebi yapıştırma bağlantılarının, birleştirilen malzemelerin yapısını bozmadan uniform yük aktarımı sağlamaları, iyi yorulma direnci ve sızdırmazlık gibi avantajlı özelliklere sahip olmalarıdır. Ayrıca, yüksek seviyede gerilme ve soyulma dayanımına sahip yapısal yapıştırıcıların geliştirilmesinin de bu bağlantıların kullanımındaki artışa katkısı büyüktür.

Çok farklı alanlarda kullanılan kompozit malzemelerin özellikle darbelere ve titreşimlere maruz kalan makine ve makine parçalarında kullanımları göz önünde bulundurulduğunda, darbe yüklerinin ve mekanik titreşimlerin etkisi altında hasara uğrama ihtimalleri oldukça yüksektir. Darbeli yüklemelerin ve titreşimin sürekli tekrarlanması durumunda, öncelikli olarak perçin, cıvata, yapıştırıcı gibi bağlantı elemanları hasara uğrayabilmektedir.

Yapıştırılmalı bağlantılar, diğer bağlantılara kıyasla düşük gerilme yığılmaları içermeleri sebebiyle darbe ve titreşimlere karşı daha iyi yorulma direnci göstermekle birlikte, bu bağlantılardaki özellikle titreşim yükleri altında oluşan yorulma hasarlarının tespiti, hala çalışılması gereken önemli bir dizayn parametresi olarak karşımızda durmaktadır. Bu nedenle doktora çalışması kapsamında, epoksi yapıştırıcılı kompozit bağlantıların aksenal darbe ve titreşim kaynaklı hasarlarının önceden tespit edilmesi ve dayanım sınırlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Metal malzemelerin yapıştırılmalı bağlantılarındaki yorulma davranışlarının incelendiği birçok araştırma, uzun süreli tekrarlı yüklerin plastik deformasyona ve gözle görülebilen hasarlara sebep olduğunu ortaya koymuştur. Araştırmalar aynı zamanda, metal malzeme davranışlarından farklı olarak kompozit malzemelerin yapıştırılmalı bağlantılarındaki davranışların belirli aksenal darbe yükleri altında, benzer şekilde belirli titreşim aralıklarındaki döngülere bağlı olarak değişkenlik gösterebileceğini ön görmektedir. Kompozit malzemelerin yapıştırılmalı bağlantılarının aksenal darbelere, mekanik titreşimlere karşı davranışı, bu malzemelerin ara yüzeylerindeki bağ gerilmelerinin değerine bağlı olarak değişmekte, epoksi yapıştırıcıda darbe ve/veya titreşimlerin etkisiyle serbest enerjinin açığa çıkması sonucu kürlenme işlemine devam edebilmekte ve bunun sonucunda bağlantının mukavemeti artabilmekte veya azalabilmektedir. Ayrıca, bağlantının kırılma dayanımının bir ölçüsü olan tokluğun değişmesinde de, mekanik etkenler oldukça önemlidir.

Bu çalışma kapsamında tek taraftan bindirmeli olarak yapıştırılmış epoksi esaslı termoset polimerlerin, cam elyaflar ile takviye edilmesi neticesinde üretilen tabakalı kompozitler incelenmiştir. Birbirlerine farklı türden yapıştırıcılarla yapıştırılan tabakalı kompozit plakaların, darbe ve titreşime maruz bırakılmasından sonra görülen mekanik özelliklerindeki değişimler ortaya konmuştur. Öncelikle yapıştırılmalı bağlantıların farklı sıcaklıklardaki ortamlarda aksenal darbe yükleri almaları sonrasında kayma doğrultusunda değişen mekanik özellikleri incelenmiştir. Daha sonra bu plakaların, yapıştırılan tabaka düzlemine dik doğrultuda uygulanan titreşim yüklerine maruz kaldıktan sonraki mekanik davranışları ortaya konulmuş ve son olarak da hem titreşimin hem aksenal darbenin bulunduğu yükleme şartlarında plakaların gösterdiği davranışlar çalışılmıştır. Elde edilen sonuçların, yapıştırıcılarla

birbirine bağlanmış kompozitlerin farklı yükleme şartları altında emniyet değerlerinin saptanabilmesi, bu değerlerin optimize edilerek standartlaştırılması ve hasar mekanizmalarının anlaşılmasına ilişkin literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Özeti

Kompozit malzemeler, yüksek derecede mekanik performans isteyen yapılarda yaygın olarak kullanılır [1]. Bu tür yapılarda kullanılan kompozit malzemelerin birbirlerine bağlanması; civata-somun, pim, perçin gibi mekanik bağlantı elemanlarının yanı sıra, günümüzde revaçta olan ve sürekli olarak geliştirilen polimer esaslı yapıştırıcılarla da sağlanmaktadır. Yapıştırma yöntemi, diğer bağlama yöntemlerine göre fazlaca avantaja sahiptir. Bu avantajlar; yapısal hafiflik, düşük imalat maliyeti, tasarım esnekliği, korozyon ve yalıtım direnci, geliştirilmiş hasar toleransı, yüksek mukavemet ve yorulma direncidir [2]. Bahsedilen özellikler çerçevesinde, yapıştırmalı kompozit bağlantılar endüstrinin havacılık, denizcilik, otomotiv, savunma, elektronik, spor vb. gibi birçok alanında uygulamaya sahiptir.

Endüstrinin çeşitli alanlarındaki uygulamalara yönelik mukavemet ve emniyet gerekliliklerini sağlayacak karmaşık ve daha hafif yapıların geliştirilmesinde, kompozitin kompozitle veya kompozitin farklı türden malzemelerle bir araya getirildiği bağlantıların yapılması kaçınılmazdır. Yüksek bağlantı performansı sağlanamaması endişesi, kompozitlerin daha yaygın kullanımına sınır getirmektedir. Anizotropik ve heterojen yapıya sahip kompozit bağlantılarda karşılaşılan problemler, izotropik malzemelerinkine kıyasla daha karmaşıktır. Tüm bu sebeplerden dolayı, kompozit bağlantıları içeren çok sayıda çalışmayı literatürde görmek mümkündür.

Yapıştırmalı bağlantıya sahip kompozit malzemelerin ele alındığı son döneme ait rehber kitaplar [4-7] ve derleme makaleleri [8-11] yayınlanmıştır. Bu derleme yayınlarda, yapıştırmalı bağlantı performansını etkileyen temel parametreler özetlenip tartışılmıştır. Örneğin; kompozit malzemelerin yapıştırıcılı bağlantılarının termal, yaşlandırma ve nem etkilerinin incelenmesi [12-14]; tek ya da çift taraftan bindirmeli, tek taraftan pah kırılarak bindirmeli gibi farklı bağlantı türlerinin

mekanik davranışlarının incelenmesi [15-18]; bu bağlantılara ilişkin teorik modeller oluşturulup sonlu elemanlar yöntemleri ile çözümlenmesi [19, 20] gibi çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda kompozit malzemelerin yapıştırıcılı bağlantılarının performanslarını etkileyen; yapıştırılma metotları, kompozit plaka yüzeylerinin hazırlanması, kullanılan yapıştırıcıların ve yapıştırılan kompozit plakaların fiziksel, kimyasal ve geometrik özellikleri gibi birçok parametre mevcuttur [21-30]. Bu parametrelerin tümü, yapıştırılmalı kompozit bağlantıların oluşturulmasında dikkate alınmaktadır. Örneğin; da Silva ve arkadaşları [21], kompozit bağlantıların bağlanma geometrilerine ve çevresel koşullara bağlı olarak kürlenmelerine yönelik yaptıkları araştırmada, yapıştırıcının kürlenme sıcaklığının, ortam neminin ve yapıştırılan bölgenin uzunluğunun, bağlantı mukavemetini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuşlardır. Benzer şekilde, Moradi ve arkadaşları [26], çeşitli yapıştırılmalı bağlantılarda kullanılan malzeme özelliklerine ve geometrilerine bağlı olarak mukavemetin değişimini incelemiştir.

Kompozit plakaların yapıştırılması esnasında kullanılan yöntemlere bağlı olarak, yapıştırılan bağlantıların çeşitli mekanik etkenlere karşı gösterdikleri dayanımlar, mekanik etkenler sonucunda bağlantıda meydana gelen hasarlar genellikle yapıştırılma işleminde kullanılan metotlardan kaynaklanmaktadır [31-35]. Kompozit plakaların birbirine yapıştırılması esnasında, yapıştırıcının kürlenme safhası oldukça önemlidir. Bazı yapıştırıcılar oda sıcaklığında, belirli basınç altında kürlenebilmekte iken, bazı yapıştırıcılar yüksek sıcaklıklarda, bazı yapıştırıcılar ise hem yüksek sıcaklıklarda hem de basınç altında kürlenebilmektedir. Kürlenmenin uygun bir biçimde gerçekleşmemesi durumunda, yapıştırılan kompozit bağlantıların mekanik performanslarında büyük bir düşüş söz konusu olabilir. Kompozit bağlantıların mekanik özelliklerini etkileyen diğer bir husus; yapıştırılan plakaların yüzeylerinin yapıştırılmaya uygunluğudur. Yapıştırılacak yüzeylerin hazırlanmasına ilişkin çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde yüzey; aseton, heksan ve toluen gibi çözügen özellikli kimyasal malzemelerle yapıştırılacak olan plakaların yüzeyleri temizlenmektedir. Böylelikle, plaka üzerindeki yağ, elyaf ve polimer partikülleri gibi yapışmayı engelleyecek maddeler giderilmektedir [21, 24, 36-42]. Yapıştırıcı malzemenin yapıştırılan yüzeylere iyi tutunabilmesi için yapıştırılan yüzeylerin bir miktar pürüzlü olması da oldukça önemlidir. Kompozit yapıştırılmalı bağlantıların

hazırlanmasındaki bir diğer husus ise; geometrik parametrelerin doğru bir şekilde seçilerek oluşturulmasıdır. Yapıştırılmalı kompozit bağlantıların, yapıştırılan bölgelerindeki geometrik parametrelerin belirlenmesinde; yapıştırıcının kalınlığı [43-53], yapıştırılan bölgenin uzunluğu ve genişliği, kompozit plakaların ve yapıştırıcının birbirine yapıştırılma türleri ve plakalardaki takviye elemanlarının dizilimleri [54-64] etkilidir.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik olarak birleştirilmesiyle oluşturulan yapılara, belirli standartlara bağlı çeşitli deneyler uygulanmaktadır. Bu standartlar “Amerikan Test ve Malzeme Kurumu: American Society for Testing and Materials” (ASTM), “Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi: National Aeronautics and Space Administration” (NASA), “Federal Havacılık ve Yönetim: Federal Aviation and Administration” (FAA) gibi çeşitli kurum ve kuruluşlar tarafından oluşturulmuştur. Oluşturulan bu standartların ortak amacı; yeterli emniyet paylarına sahip olan hafifletilmiş kompozit bağlantıların maliyetlerini azaltmaktır. Bu standartlara bağlı olarak uygulanan deneyler ve bu deneylerden elde edilen sonuçların irdelenmesi literatürün oluşturulması ve günden güne geliştirilmesi bakımından oldukça önemlidir.

Yapıştırılmalı kompozit bağlantılara en çok uygulanan deney, bağlantının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde etkin bir biçimde kullanılan ASTM D5868 standardı olan elyaf takviyeli kompozit yapıştırıcılardaki kayma gerilmesinin belirlendiği aksel yöndeki çekme deneyidir [65]. Bu deney vasıtasıyla, çeşitli mekanik (eksel darbe, yanal darbe, yorulma, ön gerilme vb.), termal ve yaşlandırma etkilerine maruz bırakılan yapıştırılmalı bağlantıların bu etkenlerden sonra gösterdikleri maksimum kopma gerilmelerine bağlı mekanik davranışları incelenebilmektedir.

Yapıştırılmalı kompozit bağlantılara, yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak etkiyen en önemli mekanik faktörlerden biri darbe yükleridir [66, 67]. Darbe yükleri genellikle iki şekilde yapıştırıcıya etkimektedir: Bunlardan biri; yapıştırıcı ve yapıştırılan plakaların yüzeyleri arasında kayma gerilmesi oluşturabilecek olan aksel darbe yükleri, diğeri ise; yapıştırıcı ve/veya yapıştırılan plakaların üzerine etkiyen ve genellikle yapıştırılan yüzeyde bası hasarlarına sebep olan düşey/yanal darbe yükleridir. Yapıştırılmalı kompozit bağlantıların çeşitli darbe yükleri altında

gösterdikleri mekanik davranışların incelendiği çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar genellikle havayolu, denizyolu ve karayolu yolcu taşıtlarında kullanılan yapıştırımlı kompozit bağlantıların mekanik özelliklerinin incelenmesi için gerçekleştirilmiştir [15, 16, 68-72]. Örneğin; Ghanbari ve arkadaşları [16], farklı sıcaklıklarda kürlenmiş iki farklı yapıştırıcı ile birbirine yapıştırılan kompozit bağlantıların, farklı sıcaklıklardaki eksenel darbe yükleri altındaki mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Yapıştırıcı türünün ve değişen sıcaklık değerlerinin, farklı eksenel darbe yüklerinin etkimesi neticesinde, bağlantının mekanik özellikleri üzerinde oldukça büyük değişkenlikler gösterdiğini vurgulamışlardır. Benzer şekilde Sayman ve arkadaşları [72], kompozit plakalarla oluşturdukları yapıştırımlı bağlantılara farklı sıcaklıklarda ve farklı enerji değerlerinde eksenel darbe yükleri uygulamışlar, uygulanan darbe yükleri sonrasında ortam sıcaklığında bu numunelere çekme deneyi uygulayarak numunelerin bu etkiler altında gösterdikleri mekanik özelliklerini irdelemişlerdir. Oda sıcaklığında yapılan çalışmalarda, diğer sıcaklıklara nazaran daha olumlu etkilerin gözlemlendiğini vurgulamışlardır.

Kompozit malzemelerin farklı yükler altındaki dayanımlarının incelenebilmesi sonucunda yorulma ömürlerinin saptanması ve yorulmaya karşı oluşan dayanımlarına yönelik çeşitli araştırmalar da yapılmıştır. Örneğin; Yue ve arkadaşları [73], Q345B çeliğinden imal edilmiş vinç kireni kirişini UT70-30 karbon elyaf takviyeli polimer kompoziti ve JH-01 yapısal adeziv ile kaplamış ve bu kirişin yorulma özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada beş farklı numune geliştiren Yue ve arkadaşları, her numuneyi pozitif yönde; değişen eğilme kuvvetlerine maruz bırakmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda karbon elyaf takviyeli çelik kirişin yorulma ömrünün uzadığı gözlemlenmiştir.

Liu ve arkadaşları [74], karbon elyaf takviyeli polimer tabakalar ile çelik tabakalardan oluşturulan hibrit plakaların yorulma karakteristiğini araştırmışlardır. 3, 6 ve 9 tabakadan oluşan tek taraflı hibrit (elyaf – metal) plakalar ve 3 tabakadan oluşan çift taraflı hibrit plakalar deney numuneleri olarak kullanılmıştır. Yorulma testlerinde 10Hz frekanslı, R=0.1 yükleme oranına sahip, $P_{maks}=160\text{MPa}$ gerilme ve $F_{maks}=5.76\text{kN}$ yükleme değerleri uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda; çift taraflı hibrit plakaların yorulma ömürlerinin, tek taraflı hibrit plakaların yorulma ömürlerine göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Colombi ve Fava [75], karbon elyaf takviyeli polimerler ile tamir edilen çelik çubukların yorulmalarını incelemiştir. Burada, dört nokta eğmeye maruz bırakılan numuneler, farklı genliklerde yorulma testine tâbi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar karbon elyaf takviyeli çelik çubukların yorulma ömürlerinin arttığını göstermiştir. Benzer bir çalışma Borrie ve arkadaşları [76] tarafından, farklı ortamda gerçekleştirilmiştir. Önceden çatlatılmış çelik plakalara yamalanmış karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerinin farklı çevresel koşullardaki yorulma ömürlerinin bulunmasına yönelik araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, 20°C ve 50°C sıcaklıklarda sodyum klorür (NaCl) solüsyonu içerisinde altı ay boyunca statik gerilme altında bekletilen numunelere, $\sigma_{\min-\max}=15-150$ MPa'lık yorulma gerilmeleri uygulanmışlardır. Çalışma sonuçları, tamir edilen plakalarda yorulma ömrünün daha iyi bir sonuç verdiğini ortaya koymuştur.

Literatür araştırmasından, yorulma ömrü üzerine yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğunun çeliklerin kompozit malzemelerle tadilatı sonrasında ilişkin olduğu ve böylesi bir tadilatın yorulma ömrünü olumlu düzeyde etkilediği görülmüştür. Kompozit yapıştırıcıların yorulmaları üzerine de bir takım araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar şu şekilde özetlenebilir:

Tang ve arkadaşları [77], tek yüzeyden yapıştırılan ince plakaların statik ve 3 ila 9kN arasında değişen dinamik yükler altındaki kopma mukavemetlerini incelemişler ve ABAQUS programını kullanarak analiz etmişlerdir. Burada, yapıştırıcı kalınlığını da (2.5 mm ve 5.5 mm) farklı parametre olarak belirleyen araştırmacılar, hem statik yüklemde hem de dinamik yüklemde yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla birlikte mukavemetin düştüğünü ve tek bindirmeli bağlantının, yapıştırıcı ve plakanın ara yüzeyinden koptuğunu gözlemlemişlerdir.

Wu ve arkadaşları [78], “Ultra High Modulus (UHM)” karbon fiber takviyeli polimer kompozit plakalar ile çelik plakaları bir yapıştırıcı vasıtasıyla çift taraflı bağlayarak (double strap/lap joint), maksimum yorulma yükünü tespit etmiş ve bu yükün 0.2 katından 0.6 katına kadar yükler uygulayarak farklı numuneleri yorulmaya maruz bırakmışlardır. Yapılan testler sonucunda numunelerin yapıştırıcı ile kompozit yüzeyinden hasara uğradığı gözlemlenmiştir. Benzer bir çalışma da Borrie ve arkadaşları [79] tarafından gerçekleştirilmiştir. Borrie ve arkadaşları, çalışmalarını

denizcilik şartlarında gerçekleştirdikleri için, metallerle çift taraflı bağlanmış karbon elyaf takviyeli polimer kompozitleri; 20°C, 40°C ve 50°C sıcaklıklarda altı ay boyunca sodyum-klorür (NaCl) solüsyonunda bekletmişler ve sonrasında bu numunelerin yorulma ömürlerini incelemişlerdir. Yapılan işlemler sonrasında numunelerin mukavemetinin normale göre %10-15 civarında azaldığını gözlemlediklerini vurgulamışlardır.

Pang ve arkadaşları [80], alüminyum ve çeliği yapıştırıcı vasıtasıyla birbirine tek taraftan bindirmeli bağlantı olarak yapıştırmış ve bu bağlantılara özel olarak tasarlayıp ürettikleri bir test düzeneğinde, bağlantının bir kenarını sabitleyerek diğer kenarından yapıştırma düzlemine dik yönde titreşime maruz bırakmışlardır. Titreşim şiddetinin bir fonksiyonu olan hasar faktörüne bağlı oluşturdukları parametrelerle, bağlantının mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişimleri incelemişlerdir. Du ve Shi [81], aynı test düzeneğini kullanarak çelik plakalarla tek taraftan birbirine yapıştırılmış bağlantılara mod analizi uygulamış, elde ettikleri ilk üç serbest frekans değerlerinde numuneleri titreşime maruz bırakarak, bu bağlantıların mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir.

Jen ve Ko [82] tarafından gerçekleştirilen, bağlantı yorulmalarının incelendiği çalışmada, alüminyumların yapıştırıcı ile birbirine bağlandığı tek taraftan bindirmeli bağlantıların ömürleri araştırılmıştır. Farklı yapıştırıcı kalınlıklarının yorulma ömürlerine etkisini incelemişler, yapıştırıcı kalınlığının artmasının yorulma dayanımını azalttığını vurgulamışlardır. Yapılan deneyler sonrasında farklı yapıştırma uzunluklarına ve yapıştırıcı kalınlıklarına bağlı olarak yorulma ömrü grafiklerini elde ederek, bu grafikleri sonlu elemanlar çözümlerinde nümerik sonuçların da elde edilmesi için kullanmışlardır. Yorulma testleri sonrasında yüzeylerde oluşan lokal gerilmeleri sonlu elemanlar programı ile modellemişlerdir. Mazumdar ve Mallick [83] farklı yapıştırma uzunluğuna ve farklı yapıştırıcı kalınlığına sahip tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantıların statik ve dinamik yükler altındaki hasar kuvvetlerini incelemişlerdir. Yapıştırma uzunluğu 12.7 mm'den 38.1 mm'ye arttırıldığında hasar kuvvetlerinin %37 oranında arttığını gözlemlenmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının maksimum 0.33 mm'ye kadar arttırılması halinde de hasar yükünün arttığı, 0.33 mm'den fazla kalınlığın olması durumunda hasar kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür. Yorulma uygulanan kompozit

bağlantılarda, 10^6 çevrim sonrasında, hasar kuvvetlerinin %50 oranında azaldığı görülmüştür. Çekme deneyleri sonrasında bağlantı yüzeylerinde adeziv hasarı ve fiberlerden yırtılma hasarının görüldüğü vurgulanmıştır. Araştırmacılar, aynı zamanda numunelerin bir kısmını 214 saat boyunca suda bekletmiş ve aynı deneyleri uygulamışlardır. Suda bekletilen numunelerde de kuru numunelere benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Yukarıda özetlenen son onbir çalışmada [73-83] belirtildiği gibi, epoksi yapıştırıcılarla yapıştırılan metal veya kompozit bağlantıların genellikle aksel çekme – bası ve eğilme yükleri altındaki yorulma dayanımları ve ömürleri incelenmiştir. Yukarıda özetlenen diğer iki çalışmada da [16, 72] tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantıların aksel darbe yükleri altındaki mekanik davranışları incelenmiştir.

Söz konusu olan tez çalışması kapsamında, öncelikli olarak benzer yapıda, iki farklı ticari isme sahip olarak üretilen DP-460 ve Loctite 9466 epoksi esaslı yapıştırıcılar kullanılarak, tek taraftan bindirmeli olarak birbirine bağlanan kompozit bağlantılar oluşturulmuştur. Oluşturulan bu bağlantılara, farklı enerji değerlerinde aksel darbe yükleri uygulanmış, sonrasında bu bağlantılar çekme deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen kopma kuvvetlerine bağlı olarak mekanik davranışları incelenmiştir. Gerekli karşılaştırmaların yapılmasının ardından, deneysel olarak üstün mekanik özelliğe sahip olduğu görülen DP-460 epoksi esaslı yapıştırıcı ele alınmış, bu yapıştırıcı ile tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantıların, farklı sıcaklıklardaki farklı enerji değerlerindeki aksel darbe yüklerine ilişkin mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda uygulanan farklı enerji değerlerine sahip aksel darbeler sonrasında, çekme deneyi ile elde edilen kopma kuvvetleri karşılaştırıldığında, mekanik özelliklerin oda sıcaklığında maksimum değerleri verdiği tespit edilmiştir. Bu tespit sonrasında, tez kapsamında özel olarak oluşturulan titreşim düzenekleri kullanılarak tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantılara yapıştırma düzlemine dik (sökme doğrultusunda) titreşimler uygulanmış, bağlantıların mekanik özelliklerinde ve hasar modlarında oluşturacağı değişimler incelenmiştir. Son olarak; titreşime maruz bırakılan bağlantılara, farklı enerji değerlerinde aksel darbeler uygulanmış, titreşimin ve darbelerin etkileri de incelenmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozitin Tanımı

Kompozit malzemeler, temelde birbiri içinde çözünmeyen, metal, seramik veya polimer grubundan iki ya da daha fazla malzemenin, uygun olan özelliklerini tek maddede toplamak ve yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla oluşturulmuş makro düzeyde malzemelerdir. Metalik alaşımların aksine, kompoziti oluşturan her malzeme kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini korur.

Kompozitler, sürekli bir ana faz ile (matris), onun içinde dağılmış pekiştirici bir donatı fazı (takviye) olmak üzere iki temel bileşenden ibarettir. Takviye bileşeni, kompozit malzemeye gelen yükü taşımak ve matrisin rijitliğini/dayanımını arttırmak gibi fonksiyonları yerine getirir. Matris bileşeni ise takviye elemanlarına yük ve gerilim transferini sağlamak, çatlak ilerlemelerini önlemek ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmek, takviye elemanlarını bir arada tutmak, yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmak ve takviye elemanları yüzeylerini çevresel etkilere karşı korumak gibi fonksiyonları yerine getirir. Örneğin betonarme yapılar; çimento, kum ve su karışımından elde edilen harçtan oluşturulan matris malzeme ile çelik çubukların takviye elemanları olarak kullanılmasıyla meydana gelen kompozit yapıya sahiptirler. Burada, bası yüklerine karşı yüksek mukavemete sahip çimento ve çeki yüklerine karşı daha iyi mukavemet gösteren çelik çubuklar kullanılmakta; böylelikle, birbirlerinin eksik özelliklerini tamamlayan yeni bir malzeme grubu oluşmaktadır.

2.2 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin günümüz teknolojisine bağlı olarak birçok kullanım alanı vardır. Bu alanlara; elektrik – elektronik, inşaat, uzay araçları, ulaşım araçları, hobi ve spor araç gereçleri vb. örnekler verilebilir. Örnek verilen alanlarla ilgili

gereksinimlere yönelik birçok avantajı barındıran kompozit malzemeler üretilmektedir. Örneğin; elektriğin iletilmesini sağlayan bakır tellerin plastik kablolarla kaplanması yalıtımı sağlamaktadır. Benzer şekilde; deniz ulaşımında kullanılan araçların birçoğunun korozyon direncine sahip olması polimer yapıdaki matrislerin çeşitli takviye elemanlarıyla güçlendirilmeleri sonucunda uzun ömürlü olmaları sağlanmaktadır. Kompozit malzemelerin hobi ve spor (olta balıkçılığı, bisiklet, jimnastik aletleri vb.) amaçlı kullanımına ilişkin hafif olmasının yanı sıra dayanıklı olma özellikleri, kullanıcının rahatlığını ve güvende olmasını sağlamaktadır. Yukarıda bahsi geçen birçok kullanım alanı göz önünde bulundurulduğunda, kompozit malzemelerin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Hafiflik,
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek mukavemet,
- Yorulma ve kırılma dayanımı,
- Korozyon direnci,
- Aşınma direnci,
- Ekstrem sıcaklık dayanımı,
- Elektrik iletkenliği (metalik matrisli) veya yalıtımı (polimerik matrisli)
- Sıcaklık ve termal iletkenliği veya yalıtımı
- Estetik görünüm

Yukarıda bahsi geçen avantajların yanı sıra, kompozit malzemelerin çeşitli dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlar çoğunlukla matris malzeme veya takviye elemanı olarak kullanılan malzemelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kullanılacak olan malzemelerin pahalı olması, doğada çözünebilirliğinin zor olması, üretim metodunun zor olması veya hiç olamaması, üretilen kompozit malzemenin işlenebilirliğinin güç olması, nakliyesinin ve taşınabilirliğinin zor olması, farklı sıcaklık değerlerinde kullanılamaması, kırılma uzamalarının az olması gibi dezavantajları da mevcuttur.

Takviye elemanı olarak kullanılan elyaf; tek yönlü veya dokuma gibi farklı örgü çeşitliliğine sahip olabilmekte ve cam elyaf, karbon elyaf, kevlar elyafı gibi farklı malzemelerden üretilmektedir. Bu tür elyaf, farklı oryantasyonlarda ve farklı hacimsel oranlarda matris malzeme içerisinde takviye elemanı olarak kullanıldığında, farklı özellikler gösterebilmektedir. Tablo 2.1’de tek yönlü örülmüş takviye elemanlarından üretilen epoksi matrisli kompozit plakaların mekanik özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.1: Tek yönlü örülmüş takviye elemanlarından üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [1].

	Elyaf Türü		
	E Cam Elyaf	Kevlar	Karbon
Hacimsel oran (%)	0.60	0.60	0.60
Spesifik ağırlık (kg/m^3)	2080	1350	1530
Boyuna (ℓ) çekme mukavemeti (MPa)	1250	1410	1270
Boyuna (ℓ) bası mukavemeti (MPa)	600	280	1130
Enine (t) çekme mukavemeti (MPa)	35	28	42
Enine (t) bası mukavemeti (MPa)	141	141	141
Düzlem içi kayma mukavemeti (MPa)	63	45	63
Tabaka içi kayma mukavemeti (MPa)	80	60	90
Boyuna (ℓ) elastisite modülü (MPa)	45000	85000	134000
Enine (t) elastisite modülü (MPa)	12000	5600	7000
Kayma modülü (MPa)	4500	2100	4200
Poisson oranı	0.3	0.34	0.25

Tablo 2.2’de dokumalı örgüye sahip farklı takviye elemanlarından üretilen epoksi matrisli kompozit plakaların mekanik özellikleri verilmektedir. Burada kullanılan elyaf, enine ve boyuna olmak üzere, her iki doğrultuda da benzer mukavemet değerleri verilmektedir.

Tablo 2.1 ve 2.2’de, farklı örgü ve malzemeye sahip elyaflardan üretilmiş kompozit plakaların mekanik özelliklerindeki değişiklikler sergilenmiştir. Burada, Kevlar elyafından üretilen kompozitler hem hafiflik bakımından, hem de çekme mukavemeti

bakımından diğer elyaflara göre üstünlüğü görülmektedir. Elyafların maliyetleri incelendiğinde, karbon elyafı cam elyafından 7.3 kat, kevlar elyafı ise cam elyafından 4.2 kat daha pahalıdır [1]. Bu durumda, cam elyafının maliyetinin diğerlerine göre düşük olması bu elyafların endüstrideki tercih edilebilirliklerini arttırmaktadır.

Tablo 2.2: Dokumalı örülmüş takviye elemanlarından üretilen kompozitlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [1].

	Elyaf Türü		
	E Cam Elyaf	Kevlar	Karbon
Hacimsel oran (%)	0.50	0.50	0.45
Spesifik ağırlık (kg/m ³)	1900	1330	1450
Çekme mukavemeti (MPa)	400	500	420
Bası mukavemeti (MPa)	390	170	360
Düzlem içi kayma mukavemeti (MPa)	Belirtilmemiş	150	55
Elastisite modülü (MPa)	20000	22000	54000
Kayma modülü (MPa)	2850	Belirtilmemiş	4000
Poisson oranı	0.13	Belirtilmemiş	0.045

2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

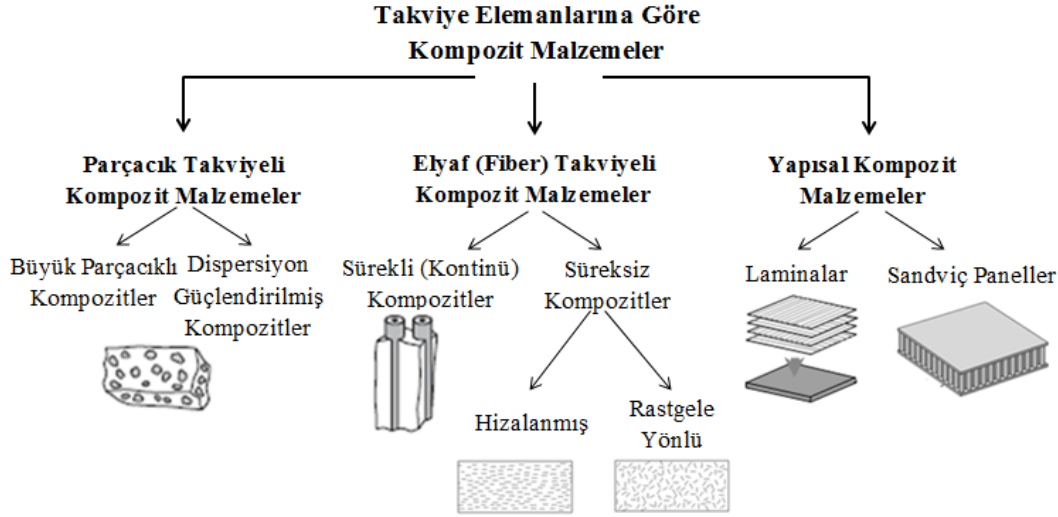
Kompozit malzemeler en az iki bileşenden (matris & takviye elemanı) oluştuğu için bu iki bileşene göre ayrı ayrı sınıflandırılmaktadır.

Ana faz olarak adlandırılan matris malzemeler polimerik, metalik ve mineral yapıda olabilir [1]:

- Polimerik matrisler; poliamid, polipropilen, polietilen gibi termoplastik özellikteki reçinelerden oluşabildiği gibi; polyester, epoksi, silikon ve poliüretan gibi termoset özellikli reçinelerden de oluşabilmektedir.
- Metalik matrisler; alüminyum, titanyum gibi yönlendirilmiş ötektik (oriented eutectics) özellikli çeşitli metal alaşımlarından oluşmaktadır.

- Mineral matrisler; çimento (kil & kalker), silisyum karbür, karbon ve grafit gibi yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerden oluşmaktadır.

Matris içerisinde dağıtılan takviye elemanlarına göre sınıflandırma aşağıdaki şekilde verilmektedir:



Şekil 2.1: Takviye elemanlarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması [4].

Kompozit malzemeler, sıklıkla kullanılan takviye elemanlarına göre; parçacık takviyeli, elyaf takviyeli, tabakalı ve karma olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır:

2.3.1 Parçacık takviyeli kompozitler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler taşıyıcı ve tutucu malzeme görevini üstlenen matris malzemenin içerisinde takviye malzemelerinin parçacıklar halinde bulunması neticesinde meydana gelir. Takviye elemanı olarak genellikle metal türevi parçacıklar, seramik türevi parçacıklar, çeşitli bitkilerin öğütülmüş halleri, parçacık halindeki elyaflar kullanılmaktadır. Parçacık takviyeli kompozitler, elyaf takviyeli kompozitlere göre daha kırılğan ve zayıf yapıya eğilimlidirler. Bu nedenle, parçacık takviyeli kompozitlerin takviye elemanlarının hacimsel özelliklerinin %40 oranından daha az olmamasına dikkat edilmelidir. Parçacık takviyeli kompozitler, üretim yöntemleri bakımından diğer kompozitlere nazaran daha düşük maliyetlerle üretilmektedir.

2.3.2 Elyaf takviyeli kompozitler

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, takviye elemanı olarak kullanılan ince yapıdaki elyafların matris malzeme içerisinde dizilimiyle meydana gelmektedir. Burada, kullanılan takviye elemanının en/boy oranı (aspect ratio) oldukça önemlidir. Bu orana bağlı olarak, takviye elemanının sürekli (kontinü) veya süreksiz olma durumu da önemlidir. Elyafların matris içerisinde diziliminin tek yönde olması durumunda, o yönde yüksek mukavemet sağlanırken, bu yöne dik doğrultuda minimum mukavemetin sağlandığı görülmektedir. Benzer şekilde, elyafların birbirine dik olacak şekilde paralel olarak yerleştirilmeleri neticesinde her iki yönde de eşit mukavemet sağlanmaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf yapısının sürekli ve hatasız olması elyaf takviyeli kompozit malzemenin mukavemeti açısından oldukça önemlidir.

2.3.3 Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozit malzemeler iki grupta incelenmektedir. Bunlardan birincisi; sürekli elyaf tabakaların oluşturduğu kompozit malzemelerdir. Takviye elemanı olarak kullanılan elyafların farklı açılarda yönlendirilip, tabakacıklar halinde üst üste istiflendirilmesiyle yüksek mukavemet değerleri elde edilmektedir. Bu çalışma kapsamında da tabakalı kompozit malzemeler üretilmiştir. Tabakalı kompozit malzemeleri oluşturan diğer bir grup ise; sandviç yapıdaki malzemelerdir. Kor malzeme adı da verilen sandviç takviye elemanlarına; balsa ağacı, yalıtım köpükleri (straför), bal peteği paneli örnek verilebilir. Sandviç yapıli kompozit malzemeler özellikle ısı yalıtımının yüksek olması istenilen uygulamalarda ve yüzeye dik olarak etkiyen darbe kuvvetlerinin sönmülmesi istenilen uygulamalarda tercih edilmektedir.

2.3.4 Karma (Hibrit) kompozitler

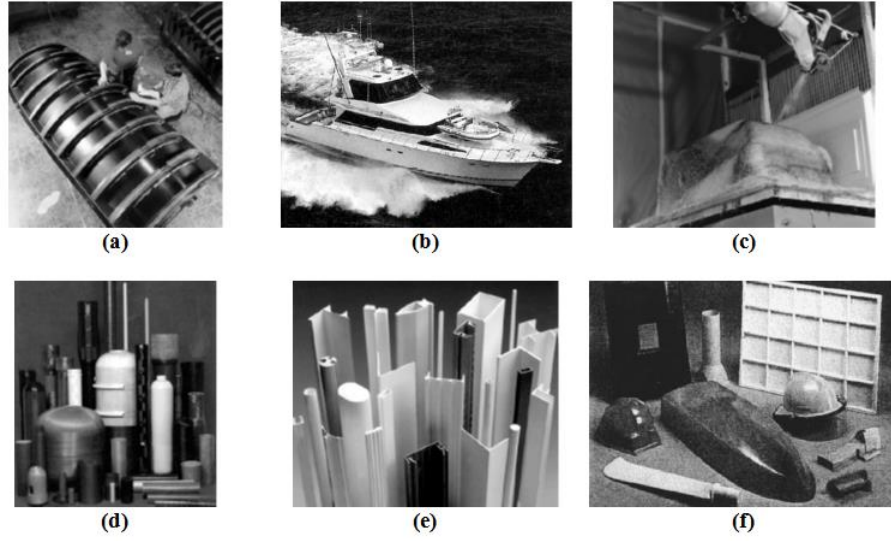
Farklı takviye elemanlarının, aynı matris içerisinde kullanılması ile meydana gelen kompozit malzemelerdir. Günümüzde yüksek mukavemete sahip, çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleri daha iyileştirilmiş, üretim maliyetini düşüren malzemelerdir. Yukarıda bahsi geçen kompozitlerin bir araya getirilmesiyle meydana gelmektedir.

Günümüzde oldukça geniş kullanım alanına sahip metal matrisli, seramik matrisli ve özellikle revaçta olan polimer matrisli kompozit malzemeler de bulunmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemeler ısıl özelliklerinde gösterdikleri davranışlarına göre iki temel gruba ayrılmaktadır. Bunlardan ilki; üretimleri sonrasında tekrar eski haline getirilemeyen, geri dönüşümü sağlanamayan termoset polimerler (epoksi reçine, polyester reçine, fenolik, silikon vb.), diğeri ise; üretimleri sonrasında ısıtıldığında tekrar eski haline dönüştürülebilen termoplastik polimerlerdir (ABS, asetal, poliamid, polikarbonat, polietilen, polistiren, polipropilen vb.). Polimerler matris malzemeleri oluştururken; bu malzemeler içerisinde konumlandırılan; genellikle ağaç, pamuk, kamış gibi bitki türlerinden ve çeşitli hayvanların tüylerinden, kemik ve kırıkdağlarından doğal yöntemlerle organik halde elde edilen malzemeler takviye malzemelerini oluşturmaktadır. Bu malzemelere istinaden; aramid (keklar), grafit ve cam esaslı elyaf halinde üretilen yapay takviye elemanları da bulunmaktadır.

2.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler; farklı yapılara ve özelliklere sahip olan, birbirinin eksik yönlerini tamamlayan en az iki veya daha fazla malzemedan oluşan ve bu nedenle, hali hazırda bulunan demir, alüminyum, çinko, ahşap gibi malzemelere nispeten daha iyi özellikleri sergileyebilen malzemelerdir.

Kompozit malzemelerin muadil malzemelere göre daha elverişli özelliklere sahip olması, bu malzemelerin kullanım alanlarını yaygınlaştırmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanım alanlarına ilişkin görsel Şekil 2.2’de gösterilmiştir [3].



Şekil 2.2: Kompozit malzemelerin kullanım alanları a) Planör gövdesi, b) Tekne, c) Küvet, d) Basınçlı tüpler, e) Profiller, f) Kask ve koruyucular.

Kompozit malzemelerin tercih edildiği çeşitli alanlardan birine denizcilik sektörü örnek olarak verilebilir: Denizcilik sektöründeki taşıtların inşasında ahşap ve metal malzemelerin kullanımı, kompozit malzemelerin bu alana yönelik olarak günden güne gelişmesiyle azalmıştır. Bu alandaki en önemli etkenlerden biri deniz suyunun ahşap ve metal malzemelere daha çabuk zarar vermesidir. Kompozit malzemelerin deniz suyuna karşı daha dayanıklı olmasından dolayı denizcilik alanında kullanımı büyük bir avantaj sağlamaktadır. Benzer şekilde; kompozit malzemelerin hafiflikleri ve darbe/çarpışma enerjilerini sönmüleyebilmeleri nedeniyle havacılık sektöründe ve rüzgar enerji sanayiinde kullanımı oldukça revaçtadır. Kompozit malzemelerin yüksek mukavemetli ve hafif olmaları, bu malzemelerin medikal cihazlarının, spor aletlerinin yapımında, bisiklet üretiminde de kullanılmasını yaygınlaştırmaktadır. Hafiflik; karayolu taşıtlarının enerji tüketiminin azaltılmasında büyük bir avantaj sağladığından dolayı otomotiv sanayiinde de kompozit malzemelerin kullanımı günden güne artmaktadır. Tüm bu bahsedilen alanlara yönelik kompozit malzemelerin çeşitliliği de günden güne artmakta olup, bu alanda kompozit malzemelerin kullanılabilir niteliklerine yönelik olarak çeşitli testler yapılmakta, test metotları da geliştirilmektedir.

2.5 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretiminde geçmişten günümüze kadar birçok yöntem kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin üretilmesinde, malzemede istenilen fiziksel, kimyasal, mekanik vb. özelliklerin elde edilebilmesi ve uygulama alanına yönelik üretilmesi bakımından çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur. Kompozit malzemelerin endüstrideki uygulama alanlarına yönelik üretim yöntemleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir [1,3]. Günümüzde hali hazırda kullanılan üretim yöntemlerinden bazıları şu şekilde açıklanmaktadır:

Kompozit Üretim Yöntemleri	Uygulama Alanları
Önceden ıslatılmış kumaş serme (Pre-preg) yöntemi	Uçak kanatları, yat gövdesi, antenler
El yatırma (wet lay-up) yöntemi	Rüzgar değirmeni kanatları, yüzme aparatları (palet, deniz bisikleti), bidon
Püskürtme (spray-up) yöntemi	Küvet, eviye, mobilya, deniz botu
Filament sarma yöntemi	Basınçlı kaplar, roket kovani, kimyasal tanklar, borular
Pultrüzyon yöntemi	Farklı kesitlerde profiller (kanallı profil, korniş, elektrik kablosu kabı)
Reçine transfer ile kalıplama yöntemi	Kasklar, bisiklet şasisi, rüzgar türbin kanatları, otomotiv panelleri, uçak parçaları
Enjeksiyon ile kalıplama yöntemi	Araç parçaları (bagaj havuzu, kamyonet kasası, torpido)
Basınçlı kalıplama yöntemi	Bagaj kapağı, tampon, soğutma panelleri
Yuvarlayıp sarma (roll-wrapping) yöntemi	Olta, golf sopası, raket, şaft ve mil

Şekil 2.3: Kompozitlerin uygulama alanlarına yönelik üretim yöntemleri.

2.5.1 El yatırma yöntemi

Genellikle kalıp üzerine uygulanan bir yöntemdir. Kalıp üzerine, önceden matris malzeme ile ıslatılmış ya da hiç ıslatılmamış dokuma/parçacıklı elyafın yerleştirilmesi sonrasında düz ve rulo fırçalar vasıtasıyla matris malzemenin elyaf

içerisine nüfuz ettirilmesi ile uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem genellikle erkek kalıpların üzerine uygulanmaktadır (Şekil 2.4). El yatırma yöntemi karmaşık yüzeyli parçalardan pürüzsüz bir yüzeye sahip dişi kalıp elde edilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, kompozit malzemelerin tadilatında da bu yöntem sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 2.4: El yatırma yönteminde kullanılan erkek kalıp.

2.5.2 Kalıplama yöntemi

Kalıplama yöntemi, adından da anlaşılacağı üzere kompozit malzemelerin bir kalıp üzerinde veya içerisinde üretilmesidir. Bu yöntem, özellikle polimer matrisli kompozit malzemelerin kürlenmesinde yaygın olarak kullanılmakta olup, ısı ve basıncın oluşturulması bakımından çeşitli metotların geliştirilmesine neden olmuştur. Bu kalıplama metotları üç ana grupta aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Sıcak pres ile kalıplama: Sıcak pres ile kalıplama yönteminde önceden hazırlanmış matris malzeme ve takviye malzemesinin sıcak pres altındaki basıncın etkisiyle kalıplanması işlemidir. Malzeme israfının en aza indirildiği yöntemdir.

Vakum torbası ile kalıplama: Karmaşık yüzeylere sahip yapılar bu yöntemle kolaylıkla üretilebilmektedir. Genellikle dişi kalıp içerisine bir takım sarf malzeme yardımıyla yerleştirilen takviye malzemelerinin, vakum torbası ile 1atm basıncın altında vakumlanması ve vakumlanan kalıbın içerisine matris malzemenin gönderilip, takviye malzemelerine nüfuz ettirilmesiyle üretimi sağlayan yöntemdir. Uygulamaya ilişkin Şekil 2.5'te gösterilen, el yatırma yöntemiyle üretilmiş dişi kalıptan çıkarılan araba kabuğu imalatı bu yöntemle örnek olarak gösterilmektedir.

Vakum torbası ile kalıplama yöntemi, el yatırma yöntemine nazaran kompozit malzemelerin tamir işlemlerinde de oldukça etkili bir yöntemdir.



Şekil 2.5: Vakum infüzyon yöntemi uygulaması.

Otoklav ile kalıplama: Özellikle termoset kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Kullanılan donanım ve ekipmanlar bakımından diğer yöntemlere nazaran daha pahalı bir yöntem olmasına rağmen daha kaliteli kompozit malzemelerin üretilmesi bu yöntemle sağlanmaktadır. Bu yöntem sayesinde 1 atm hava basıncının da altına inilebilmekte, bu nedenle malzeme içerisinde hava boşlukları oluşmamaktadır. Yüksek mukavemet gerektiren yapılarda kullanılan kompozit malzemelerin üretilmesinde otoklav ile kalıplama yöntemi tercih edilmektedir. Otoklav ile kalıplama yönteminde, üretim esnasında ve sonrasında ısı, basınç ve emiş kontrol edilebilmektedir.

2.5.3 Püskürtme yöntemi

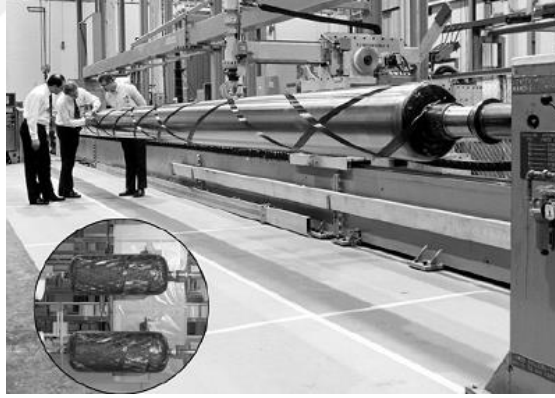
Püskürtme yöntemi matris malzeme ile takviye malzemesinin önceden karıştırılıp, bir kalıp veya yüzey üzerine kompresör vasıtasıyla püskürtülmesi ile meydana gelen bir yöntemdir. Takviye malzemesi genellikle parçacık halinde matris malzeme içerisine dağılmış vaziyettedir. Püskürtme yöntemi ile ilgili uygulamalı görsel Şekil 2.6'da verilmiştir. Şekil 2.6'da da görüldüğü üzere, parçacık halindeki cam elyaflar, sıvı haldeki epoksi esaslı matris malzeme ile karıştırılarak, küvet modelinin üzerine püskürtülmektedir.



Şekil 2.6: Püskürtme yöntemi ile küvet üretimi [3].

2.5.4 Elyaf (Filament) sarma yöntemi

Elyaf sarma yönteminde, matris malzeme ile önceden ıslatılmış sürekli elyaf lifleri dönel bir makine vasıtasıyla mandrenlere tutturulmuş silindirik kalıp üzerine sarılmaktadır. Seri üretimin söz konusu olduğu bu yöntemde genellikle silindirik parçalar üretilmektedir. Elyaf sarma yöntemi ile ilgili uygulama görseli Şekil 2.7’de verilmektedir.



Şekil 2.7: Elyaf sarma yöntemi ile üretilen silindirik parçalar [3].

Şekil 2.7’de elyaf sarma yöntemi ile önceden matris malzeme ile ıslatılmış karbon elyafların mandren etrafında dönen silindirik kalıba sarıldığı görülmektedir. Kompozit malzemelerin farklı özelliklerdeki türlerinden, üretim yöntemlerine kadar birçok çeşidi bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında; cam elyaf takviyeli ve epoksi polimer matrisli tabakalı kompozit plakalar vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Tabakalı kompozit plakaların üretim safhaları, Malzeme ve Metot Bölümü’nde detaylıca anlatılmıştır.

3. BAĞLANTILAR

Makine parçalarının koordineli bir şekilde çalışabilmeleri için, birbirlerine monte edilmeleri oldukça önemlidir. Monte edilecek parçaların üretim yöntemlerine, malzemelerine ve tasarımlarına uygun olacak şekilde standartlaştırılmış çeşitli bağlantı elemanları mevcuttur. Günümüzde en çok kullanılan bağlantı türlerine; mekanik bağlantılar, lehim - kaynak bağlantıları ve yapıştırırmalı bağlantılar örnek olarak verilebilir [84-87].

Makine bağlantılarının oluşturulmasında çeşitli kuvvetler söz konusudur. Bunlar: mekanik kuvvetler, difüzyon kuvvetleri, kohezyon ve adezyon kuvvetleridir. Mekanik kuvvetler, kimi zaman kuvvet (perçin, cıvata-somun, sıkı geçme, sıkma) bağlantılarıyla oluşturulurken, kimi zaman da şekil (kama, pim) bağlantılarıyla oluşturulmaktadır. Difüzyon kuvvetlerinde ise; lehimleme tekniği, ergiyen metalin uygulandığı yüzeye homojen olarak yayılması ve bunun sonucunda difüzyon kuvvetleri ile metal yüzeye tutunması bakımından oldukça etkilidir. Bağlantısı yapılacak, metal malzemelerden oluşan iki ince cidar arasına kalay/kurşun alaşımlarının ergitilip, yüzeylerin üzerine nüfuz etmesi sağlanarak difüzyon kuvvetleri oluşturur. Böylece parçaların birbirine bağlanması sağlanır. Kohezyon kuvvetleri, benzer özellikteki iki malzemenin, ısı ve/veya basınç etkisi altında çekim kuvvetlerinin oluşturulmasıyla meydana gelmektedir. Metaller ve termoplastikler bu çekim kuvveti altında birbirlerine bağlanabilmektedir. Adezyon kuvvetlerinde ise birbirine bağlanacak olan farklı malzemelerin yüzeylerinde oluşan çekim kuvvetleri söz konusudur. Yüzey ne kadar pürüzlü ve temiz hazırlanırsa, adezyon kuvveti o kadar iyi olur [84-88].

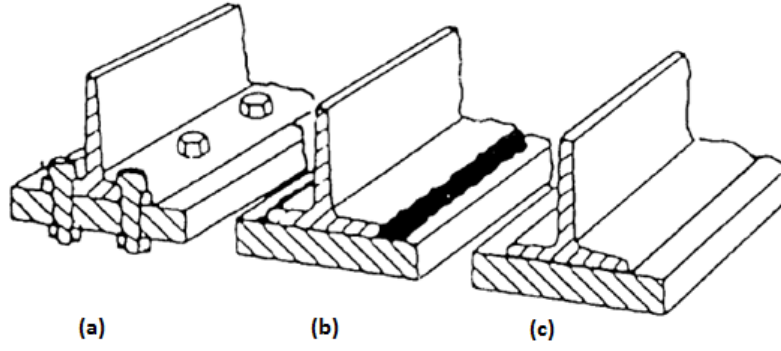
Makine parçalarının bağlantılarını oluşturan kuvvetler kadar, bu kuvvetlerin oluştuğu malzeme türleri de oldukça önemlidir. Metal bağlantıların genelinde mekanik kuvvetlerin etki ettiği cıvata-somun, pimli, perçinli bağlantılar; difüzyon

kuvvetlerinin etki ettiği lehim bağlantıları, kohezyon kuvvetlerinin etki ettiği kaynak bağlantıları, adezyon kuvvetlerinin etki ettiği çeşitli yapıştırıcılar kullanılırken; plastik esaslı bağlantıların genelinde mekanik kuvvetlerin etki ettiği bağlantıların yanı sıra, çoğunlukla adezyon kuvvetlerinin etki ettiği yapıştırıcılar kullanılmaktadır.

Söz konusu çalışma kapsamında; kompozit bağlantıları oluşturan kuvvetlerin çeşitleri incelenmiş, bağlama kuvvetlerinin oluşturulmasında kullanılan makine elemanları ve yöntemler karşılaştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonrasında, diğer bağlama kuvvetlerine nazaran üstünlük gösteren adezyon kuvvetlerinin etkili olduğu epoksi yapıştırıcılarla birbirine bağlanan kompozit bağlantılar incelenmiş, epoksi yapıştırıcıların avantaj ve dezavantajlarına değinilmiş, ayrıca kompozitlerin yapıştırılmasında günümüz endüstrisinde en çok tercih edilen bağlantı şekilleri karşılaştırılmış ve bu bağlantılara uygulanan deneysel metotlar anlatılmıştır.

3.1 Kompozit Plakalarda Bağlantı Dizaynı

Kompozit plakalar, kullanım alanlarına ve üretildikleri malzeme çeşitlerine göre, farklı bağlantı elemanları ile birbirine bağlanmaktadır. Örneğin, polimer ve/veya seramik matrisli kompozitler cıvata – somun, perçin ve pim gibi bağlantı elemanları ile birbirine bağlanabildiği gibi epoksi esaslı yapıştırıcılarla da birbirine bağlanabilmektedir. Bunun yanı sıra, metal matrisli kompozitler yukarıda bahsedilen yöntemlere ek olarak lehimleme veya kaynak yöntemiyle de birbirine bağlanabilmektedir. Farklı matris yapısına sahip olan kompozitlerin birbirine bağlanmasında en çok kullanılan yöntem epoksi yapıştırıcılarla yapıştırma yöntemidir. Bağlama yöntemlerinin bir kısmına ilişkin görsel şekil 3.1’de gösterilmiştir. Burada, parçalar birbirine periyodik olarak belirlenmiş bölgelerden (şekil 3.1a) cıvata-somun vasıtasıyla mekanik yöntemle, lineer olarak (şekil 3.1b) kaynak yöntemiyle, temas edilen alan boyunca (şekil 3.1c) yapıştırma yöntemiyle bağlanabilmektedir.



Şekil 3.1: Bağlama yöntemleri a) Cıvata-somun, b) Kaynak, c) Yapıştırma [88].

Cıvata – somun bağlantısında, birbirine bağlanan parçaların delinme işlemi sonrasında cıvata-somun eklenmesi gibi modifikasyonlar oluşurken (Şekil 3.1a), kaynak işleminde parçaların uç kısımlarında ek kaynak çizgileri oluşabilmektedir (Şekil 3.1b). Yapıştırma yönteminde ise, parçalar üzerinde herhangi bir modifikasyonun yapılması gerekmemektedir (Şekil 3.1c). Bu sebeple, birbirine bağlanan kompozitlerin kullanılacağı alana yönelik olarak, bağlama yöntemlerinin tercih edilebilirliği değişkenlik göstermektedir.

3.2 Kompozit Plakalardaki Bağlantıların Karşılaştırılması

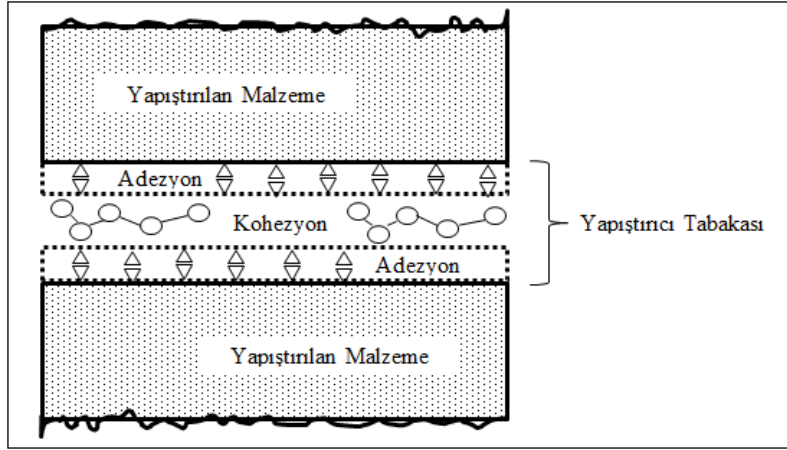
Bağlantısı yapılan parçaların hasar görmeden, sökülebilir olmasının istenmesi durumunda cıvata-somun veya pimli bağlantılar tercih edilmekte iken belirli bölgelerinin değiştirilmesinin istenmesi durumunda perçinler tercih edilmektedir. Lehim, kaynak ve/veya yapıştırma gibi sökülemeyen yöntemler bağlantının yorulma direncinin yüksek olmasının istendiği durumlarda, malzeme yapısı da göz önünde bulundurularak kullanılır. Bağlama kuvvetlerinden doğan yöntemlerin tercih edilmelerine yönelik, birbirine göre üstünlük dereceleri ile karşılaştırmaları Tablo 3.1’de verilmiştir. Burada, 1’den 4’e doğru gidildikçe, bağlanma özelliklerin daha iyi olduğu vurgulanmaktadır [88].

Tablo 3.1: Bağlama kuvvetlerinin karşılaştırılması.

	Mekanik Kuvvetler	Kohezyon Kuvvetleri	Difüzyon Kuvvetleri	Adezyon Kuvvetleri
Ön işlem gerektiren çalışmalarda	1	4	1	4
İnce metallerde	1	1	2	4
Farklı metal türlerinde	2	1	1	4
Yüzey İşçiliği	4	3	2	1
Alet ile işleme	4	2	2	2
Isı gereksinimi	4	1	1	2-3
Gerilme dağılımı	1	2-3	4	4
Sızdırmazlık	1	2	4	3
Çarpılma	2	1	2	4
Nihai işlemler	3-4	2	4	4
Tamir kolaylığı	3	1	1	4
Çözgen direnci	4	4	4	2
Sıcaklık etkisi	4	4	4	2

3.3 Yapıştırılmalı Kompozit Bağlantılar

Seramik, polimerik, metalik gibi çeşitli matrislere takviye malzemelerinin eklenmesi ile üretilen kompozit plakalardaki bağlantılar, aynı matrisli malzemelerden oluşturulmakla birlikte, farklı matrislerle de oluşturulmaktadır. Aynı veya farklı matrisli kompozitlerin çeşitli yapıştırıcılar vasıtasıyla birbirine bağlanması, bu malzemelerin kullanım kolaylığı açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Kompozit bağlantıların oluşturulmasında kullanılan etken malzeme yapıştırıcılardır. Yapıştırıcılar, yapıştırıldıkları malzemeler arasında iyi bir bağlantı sağlamaktadır. Bu bağlantı, Şekil 3.2’de gösterilen yapıştırma bağı ile açıklanmaktadır: Yapıştırma bağına dayanımı; yüzeyler arasında oluşan adezyon kuvvetlerine ve yapıştırıcının içerisindeki molekülleri arasında oluşan kohezyon kuvvetlerine bağlıdır [87].



Şekil 3.2: Yapıştırma bağı.

Yapıştırıcı çeşitleri, yapıştırıcıların kompozitlere bağlanma yöntemleri, yapıştırmalı kompozitlerin bağlantı şekilleri, yapıştırmalı kompozit bağlantılara uygulanan testler ve yapıştırılan yüzeylerde oluşan hasar tiplerine ilişkin bilgiler aşağıda detaylıca anlatılmaktadır.

3.3.1 Yapıştırıcılar

Yapıştırıcılar, katı halde bulunan benzer veya farklı özelliklere sahip hammaddelerden üretilen malzemelerin yüzeylerinden birbirleriyle bağlantısını sağlayan elemanlardır. Günümüz teknolojisinde kullanılan makine ve makine parçalarındaki enerji tüketiminin en aza indirgenmesi amacıyla, malzeme seçiminde dayanıklılığın yanı sıra hafiflik de aranan özellikler haline gelmiştir. Bu nedenle, enerji tüketiminin azaltılması hedeflenen teknolojik üretimlerde, hafiflik özelliği baz alınan kompozit malzemeler başta olmak üzere metal dışı malzeme kullanımı artmıştır. Bu malzemelerin endüstride yaygın olarak kullanımı sonucunda, birbirlerine bağlanmalarının kolay bir biçimde yapılabilmesi için yapıştırıcıların kullanımı ve çeşitliliği de günden güne artmaktadır. Yapıştırıcıların sıcaklığa dayanma sınırları 50°C ilâ 300°C arasındadır. Bu özelliğinden dolayı yapıştırıcılar; kağıt, ahşap, seramik, plastik, metal malzemeler için makine, tesis ve cihazlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [84]. Kullanım alanlarına göre yapıştırıcılar; sızdırmazlık elemanı olarak, bilinen bağlama şekillerinin uygun olmadığı alanlarda, yeni konstrüksiyonlar inşa etmek ve bağlama elemanlarını emniyete almak amacıyla tercih edilebilmektedir [85].

Yapıştırıcılar, yapıştırıldıktan sonra oda koşullarında veya yüksek sıcaklıklarda kürlenebilen malzemelerdir. Yapılarına göre farklılık gösteren yapıştırıcılar, kürlenmeleri esnasında sıcaklığın yanı sıra basınca da ihtiyaç duyabilmektedir. Kürlenme şekillerine göre yapıştırıcılar iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan biri fiziksel olarak, diğeri ise kimyasal olarak kürlenebilen yapıştırıcılardır [85]. Fiziksel olarak kürlenen yapıştırıcılar, termoplastik özelliğe sahip olan, kauçuk veya PVC (Polivinil klorür) esaslı olup, sıcaklık ve basınç etkisi altında katı halden eriyik hale geçebilen ve bağlantı sağlandıktan sonra tekrar kürlenerek sertleşebilen malzemelerdir. Kimyasal olarak kürlenebilen yapıştırıcılar ise; farklı kimyasal malzemelerin polimerizasyonu ile oluşturulan malzemelerdir. Kimyasal yapıştırıcılara epoksiler, polyesterler, akrilikler, fenolikler örnek olarak verilebilir. Bu malzemeler, birden fazla kimyasal bileşene sahip olup, bu bileşenlerin belirli oranlarda karıştırılarak kimyasal tepkimeye girmesi ile kürlenme işlemi sağlanmaktadır [90]. Örneğin; epoksi esaslı yapıştırıcılarda epoksi ve sertleştirici bileşenlerinin karışımı ile ideal yapıştırma sağlanırken, polyester esaslı yapıştırıcılarda polyester, sertleştirici ve hızlandırıcı bileşenleri ile ideal yapıştırma sağlanmaktadır. Çeşitli firmalar tarafından üretilen kimyasal olarak kürlenebilen yapıştırıcılar, farklı sıcaklıklarda polimerizasyona uğrayarak kürlenebilmektedir. Kimyasal olarak kürlenebilen yapıştırıcıların, uygulanacağı yüzeyin temiz ve ideal pürüzlülüğe sahip olması yapışma işleminin iyi olması bakımından önemlidir. Ayrıca, kürlenme esnasında yapıştırılan bölgeye basınç uygulanarak, polimerizasyon esnasında açığa çıkan suyun yüzeylerden uzaklaştırılması sağlanmakta; böylece iyi bir yapışma yüzeyi elde edilmektedir.

3.3.2 Yapıştırıcıların avantajları ve dezavantajları

Yapıştırıcılar, yapıştırıldıkları yüzeylere ince tabakalar halinde sürülmekte ve yüksek mukavemetli bağlantılar oluşturmaktadır. Aynı zamanda kaynak ve lehim bağlantılarına nazaran yüksek korozyon direncine ve kayma doğrultusunda yüksek yorulma dayanımına sahiptirler. Pimli, perçinli, cıvata-somun bağlantılarına nazaran yapıştırıcılarla bağlanan konstrüksiyonları negatif bir şekilde etkileyen çentik etkisi de oluşmamaktadır.

Konstrüksiyonların oluşturulmasında kolay ve uygulanabilir bir yöntem olan yapıştırıcılar çeşitli avantajlara sahiptir. Yapıştırıcıların özelliklerine bağlı olarak sağladığı avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek gerilme dayanımı,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Yüksek tokluk dayanımı,
- Yüksek korozyon direnci,
- Yüksek aşınma direnci,
- Titreşim ve darbelere karşı sönümlenme özelliği,
- Tüm kalınlıklarda ve değişik şekillerde bağlanma özelliği,
- Sızdırmazlık özelliği,
- Kolay ve hızlı montaj özelliği,
- Farklı malzemeleri bağlama özelliği,
- Diğer bağlama yöntemlerine nazaran ucuz olma özelliği,
- Hafiflik özelliği,
- Elektrik direnci ve yalıtım özelliği.

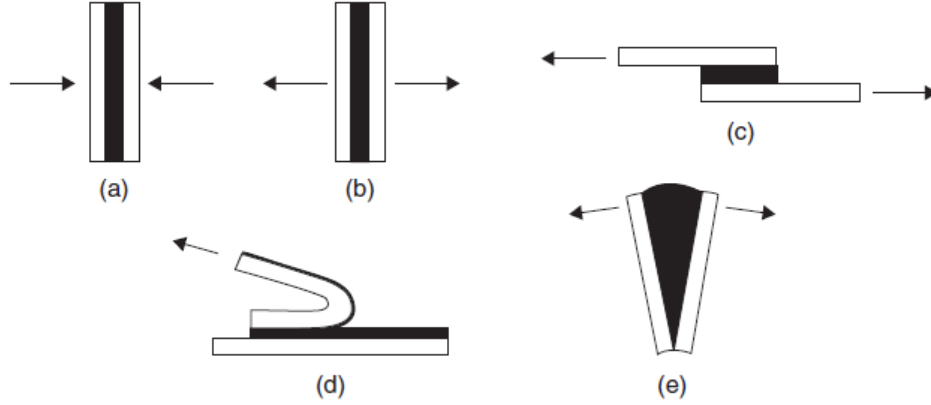
Yapıştırıcılar pek çok avantaj sağlamakta birlikte bazı dezavantajları da barındırmaktadır. Yapıştırıcıların dezavantajları aşağıda sıralanmaktadır:

- Yapıştırılacak yüzeylerin temizlenme gerekliliği,
- Uzun kurlenme süreleri,
- Çok yüksek sıcaklıklarda bozulma,
- Sıcaklık ve basınç gereksinimi,
- Çeşitli bağlama aparatları gerekliliği (mengene, pabuç-saplama),
- Geri dönüşüm zorluğu,
- Özel eğitim gerekliliği.

Genel anlamda yapıştırıcılar, fiziksel ve mekanik özellikler bakımından birçok avantaj sağlarken, üretim ve uygulama aşamalarında zahmet ve dikkat gereksinimlerinden dolayı dezavantajlar gösterirler. Uygulama esnası ve sonrasında dikkatli davranılması durumunda bu dezavantajlı özellikleri oluşturabilecek riskler giderilebilmektedir.

3.3.3 Yapıştırırmalı kompozitlerin bağlantı şekilleri

Yapıştırırmalı kompozitler, kullanıldığı makine ve/veya makine parçalarında çeşitli kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu kuvvetler neticesinde, yapıştırırmalı bağlantılarda çeşitli gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmeler Şekil 3.3'te gösterilmektedir [91].

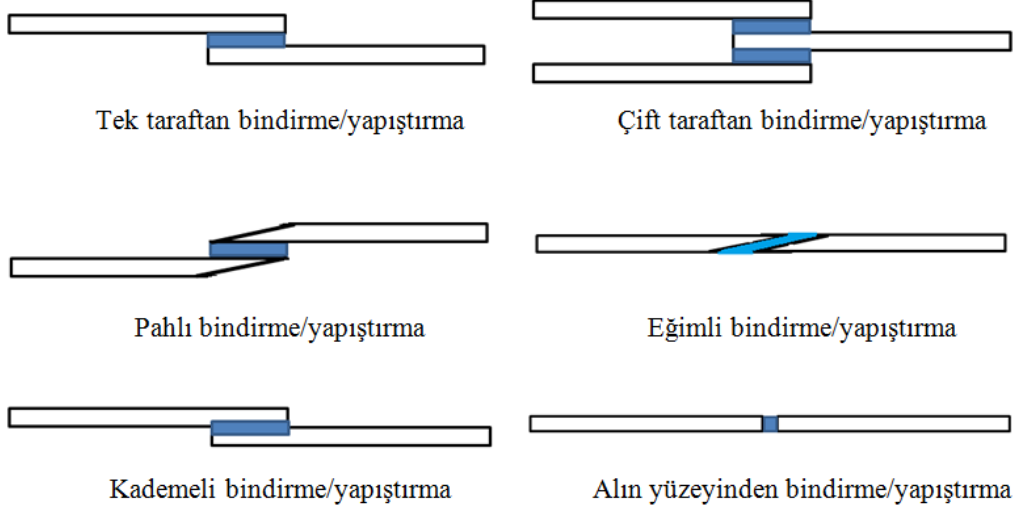


Şekil 3.3: Yapıştırırmalı kompozitlerde meydana gelen gerilmeler;

- a) Bası gerilmesi, b) Çeki gerilmesi, c) Kayma gerilmesi, d) Soyulma gerilmesi,
e) Dilinim (Yarılma) gerilmesi.

İki parçayı birbirine bağlayan yapıştırırmalı kompozitlere bası kuvvetleri uygulandığında yapıştırıcı üzerinde her hangi bir olumsuz durum görülmemektedir. Çeki gerilmelerinin oluştuğu, yapıştırma yüzeyine dik doğrultuda çekme kuvvetlerinin uygulanması sonucunda adezyon bağları daha kolay hasar görmektedir [92]. Bu nedenle, yapıştırırmalı kompozitlerde çeki gerilmelerinin oluşması istenmeyen bir durumdur. Kayma gerilmesi, yapıştırılan yüzeyler doğrultusunda meydana geldiği için adezyon kuvvetlerinin gösterdiği direnç kayma doğrultusunda maksimum düzeydedir. Soyulma gerilmesi, esnek yapıdaki malzemelerin birbirine yapıştırılması sonucunda meydana gelmektedir. Rijit malzemelerin birbirine yapıştırılması durumunda soyulma gerilmesi yapıştırıcı üzerinde oluşmaktadır. Dilinim gerilmeleri, yapıştırılan bağlantıya etkiyen bir moment sonucunda meydana gelmektedir [91]. Yapıştırırmalı kompozit bağlantılarda meydana gelen gerilme durumları göz önünde bulundurulduğunda, yapıştırırmalı bağlantıların tasarımında kayma gerilmesinin oluşması istenirken, çekme gerilmesinin oluşması

istenmemektedir. Yapıştırırmalı kompozitlere ilişkin oluşturulan bağlantılar Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



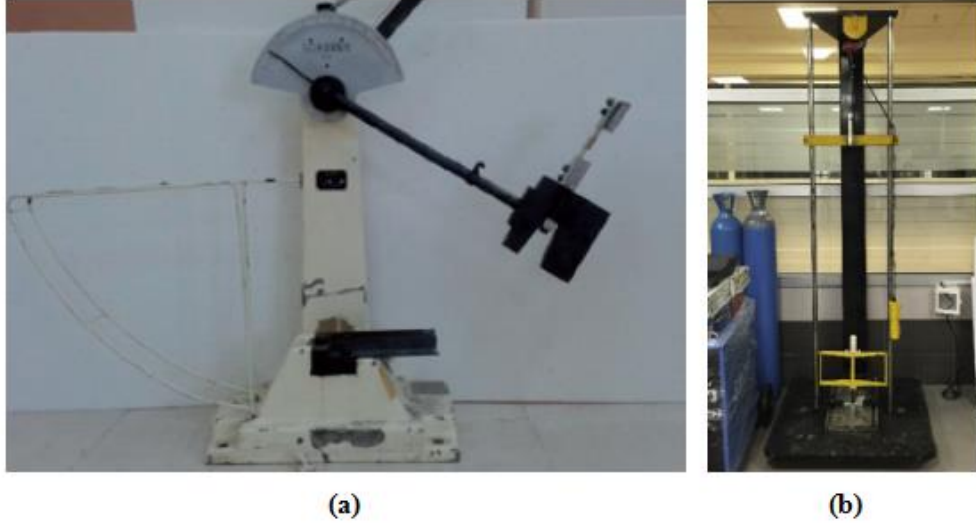
Şekil 3.4: Bağlantı şekilleri.

Şekil 3.4'te gösterilen durumlarda, kullanım kolaylığı ve rahatlıkla uygulanabilir olması bakımından tek taraftan yapıştırma/bindirme durumu endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Tek taraftan bindirmeli bağlantılarda iki malzemenin, üst üste binen yapıştırma bağı yardımıyla bir araya getirilmesi söz konusudur. Çift taraftan bindirme bağlantılarında ise; yapıştırılan orta plakanın her iki yüzünün pürüzlülüğünün de iyi durumda olması gerekmektedir. Çift taraftan bindirmeli bağlantıların yorulma dayanımı ve kayma gerilmelerine karşı gösterdikleri direnç, diğer bağlantı çeşitlerine göre daha fazla olmasına rağmen bu bağlantının üretim aşamaları daha zahmetlidir. Pahlı bindirmeli yapıştırma bağlantılarında kayma doğrultusunda oluşacak moment, tek taraftan bindirmeli bağlantılarda oluşan momente göre daha az olmakla birlikte, bu bağlantılar daha çok metal malzemelerde uygulanabilmektedir. Yapıştırma çeşitlerinde en önemli unsur adezyon kuvvetlerinin en iyi düzeyde olabilmesi için taşınacak olan yükün yüzey alanına homojen bir şekilde dağılmasıdır. Bu nedenle, eğimli ve kademeli bindirmeli bağlantılarda yüzey alanı genişlediğinden maksimum taşıma yükünün sağlanması muhtemeldir. Buna rağmen, üretim yöntemlerindeki işçiliği arttırdığından dolayı, bu bağlantılar da endüstride fazlaca tercih edilmemektedir.

Bu çalışma kapsamında, üretim kolaylığı ve kürlenebilme pratikliği bakımından avantaj sağlayan, tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantıların çeşitli etkiler altındaki mekanik davranışları incelenmiştir.

3.3.4 Yapıştırılmalı kompozitlere uygulanan testler

Yapıştırılmalı kompozitler, endüstrideki kullanım alanlarına bağlı olarak, çeşitli testlere tabi tutulmaktadır. Yapıştırılmalı kompozitlere mekanik, termal ve yaşlandırma testleri uygulanmaktadır. Yapıştırılmalı kompozitlere mekanik olarak yapıştırma düzlemi doğrultusunda (eksenel) ve yapıştırma yüzeyine dik doğrultuda (düzlemsel) darbe testleri uygulanmaktadır. Yapıştırılmalı kompozitlerde, eksenel darbe testlerinde kayma doğrultusundaki mekanik değişimler incelenirken, düzlemsel darbe testlerinde bası kuvvetlerindeki mekanik değişimler incelenmektedir. Yapıştırılmalı kompozitlere uygulanan darbe testlerine ilişkin görsel Şekil 3.5'te verilmektedir.



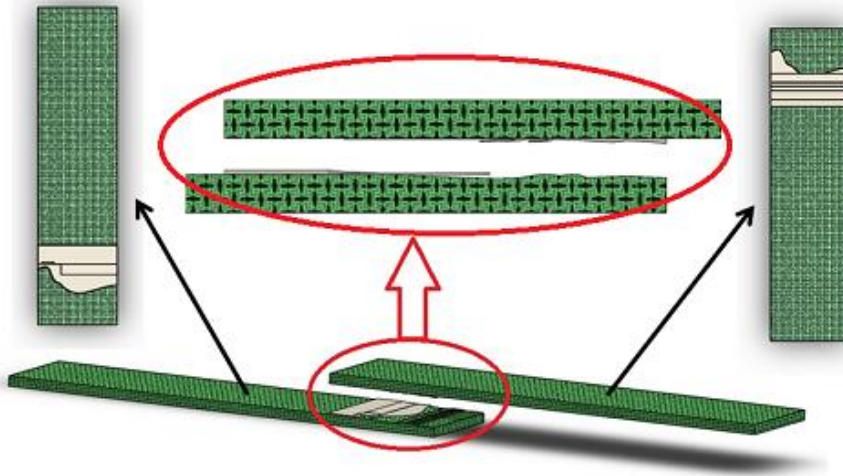
Şekil 3.5: Yapıştırılmalı kompozitlere uygulanan darbe testleri;
a) Eksenel darbe [16], b) Yüzeysel darbe [12].

Yapıştırılmalı kompozitlere etkiyen çevresel faktörler de göz önünde bulundurulduğunda; farklı sıcaklıklarda ve farklı ortamlarda (nemli ortam, tuzlu su, deniz suyu, sülfürik asit vb.) bekletilmeleri sonrasında yaşlandırılmaları sağlandıktan sonra mekanik özelliklerindeki değişimler incelenebilmektedir [9, 13-16].

Darbe deneylerine ve çevresel faktörlere maruz bırakılan yapıştırırmalı kompozitlerin mekanik özellikleri çekme deneyi ile belirlenebilmektedir. Çekme deneyi ile, yapıştırırmalı kompozitlerin maksimum kopma kuvvetleri ve/veya maksimum dayanımları tespit edilebilmektedir. Yapıştırırmalı kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesinde kullanılan çekme deneyi Bölüm 4’te detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

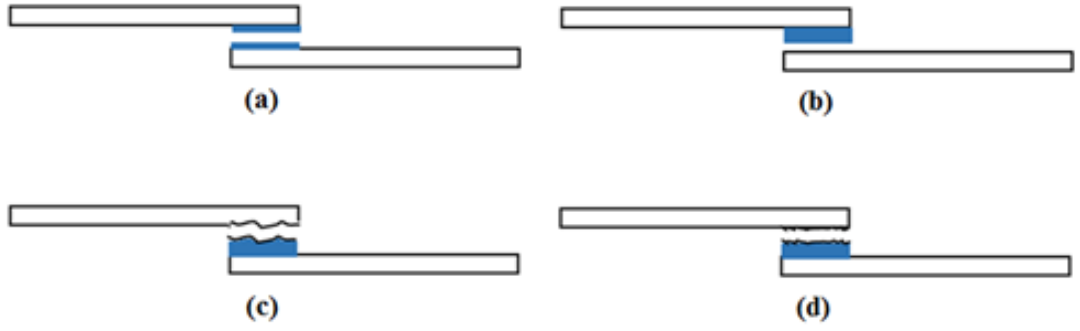
3.3.5 Elyaf takviyeli kompozitlerin yapıştırırmalı bağlantılarındaki hasar tipleri

Yapıştırırmalı kompozit bağlantılara uygulanan çekme deneyi sonrasında yapıştırma yüzeylerinde veya yapıştırılan plakaların üzerinde çeşitli hasarlar meydana gelmektedir. Şekil 3.6’da şematik olarak gösterilen, yapıştırırmalı kompozitlerde meydana gelen hasarlar genellikle yapışma bölgesinde oluşmakta ve hasar sonrasında, yapıştırıcı çoğunlukla her iki plaka üzerinde de kalmaktadır.



Şekil 3.6: Hasar durumunun şematik olarak gösterimi.

Elyaf takviyeli yapıştırırmalı kompozit bağlantılarda oluşan hasarlar, Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM) tarafından standartlaştırılmış olup, ASTM 5573 [93] standardına göre belirlenen hasar durumları Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7: Hasar modları; a) Koheziv hasar, b) Adeziv hasar, c) Fiber yırtılma hasarı, d) Az miktarda fiber yırtılma hasarı.

Şekil 3.7’de dört farklı hasar modu gösterilmektedir. Koheziv hasarda (Şekil 3.7a), yapıştırıcının oluşturduğu kohezyon bağlarında hasar meydana gelmektedir. Adeziv hasarda (Şekil 3.7b), yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey (yapışma yüzeyi) arasında hasar meydana gelmektedir. Bu tür hasarların oluşma nedeni; yapıştırma işleminden önce yüzeylerin yeterli düzeyde temizlenememesidir. Şekil 3.7c’de fiber (elyaflardan) yırtılma hasarı gösterilmektedir. Burada hasar sonrasında, plakalar üzerinde kalan takviye elemanları net bir şekilde görülmektedir. Şekil 3.7d’de ise az miktarda fiber yırtılma hasarı gösterilmektedir. Burada hasar sonrasında matris malzemenin yapıştırıcı yüzey üzerine sıvandığı görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneylerden elde edilen hasar durumları “Sonuçlar ve Tartışma” bölümünde detaylıca incelenmiştir.

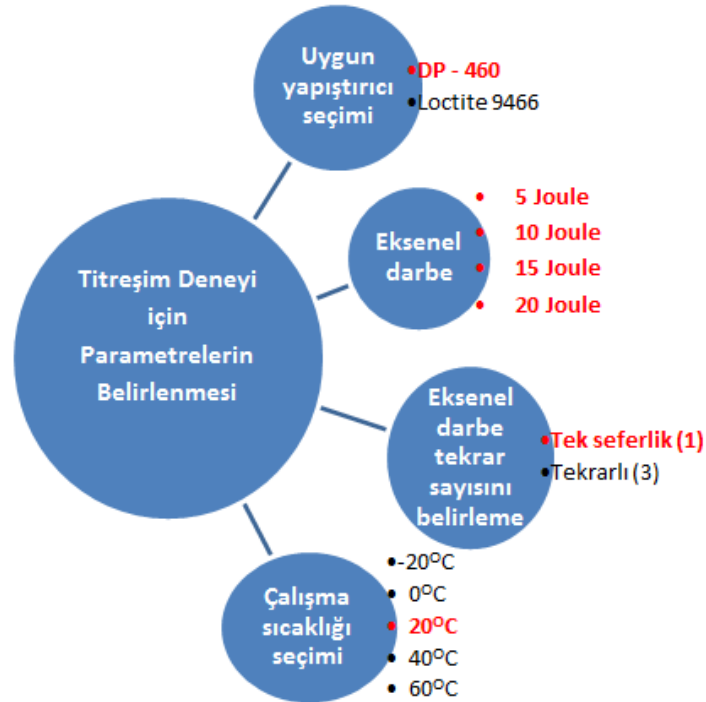
4. MALZEME VE METOT

4.1 Problemin Tanımı

Günümüz endüstrisinde çeşitli makine ve makine parçalarında kullanılan tabakalı kompozit plakaların birbirine monte edilmesi genellikle epoksi esaslı yapıştırıcılarla sağlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, tabakalı kompozit plakaların birbirine tek taraftan bindirmeli olarak, epoksi esaslı yapıştırıcılarla birleştirilmesiyle oluşturulan bağlantıların, çeşitli mekanik etkenlere maruz kaldıktan sonra gösterdikleri dayanım davranışları incelenmiştir. Bu çalışmadaki bağlantı şeklinin tek taraftan bindirmeli seçilmesinin nedeni, bu tür bağlantıların üretim aşamasının kolay ve endüstride sıklıkla kullanılan bağlantı modeli olmasındandır.

Çalışmanın ilk aşamasında, iki farklı yapıştırıcı kullanılarak üretilen bağlantıların eksenel darbe yüklerine maruz bırakıldıktan sonra elde edilen dayanımlarının birbirine göre mukayesesi yapılmıştır. Bu ürünlerden biri 3M (ABD) firması tarafından üretilen ve temin edilen DP-460 isimli epoksi yapıştırıcı, diğeri ise Henkel (Almanya) firması tarafından üretilen ve temin edilen Loctite 9466 isimli epoksi yapıştırıcıdır. İki farklı yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bağlantılara, tek seferlik (tekrarsız) ve üç seferlik art arda etkiyen (tekrarlı) eksenel darbe yükleri uygulanmıştır. Uygulanan eksenel darbe yüklerinin enerji değerleri sırasıyla 5J, 10J, 15J ve 20J'dür. Uygulanan eksenel darbe enerjisinin 20J üzerine çıkması durumunda, yapıştırılan kompozit bağlantıların çoğunlukla hasara uğradığı gözlemlendiği için bu deneylerdeki maksimum darbe enerji değeri 20J olarak belirlenmiştir. Yapıştırılmalı kompozit bağlantılara uygulanan eksenel darbe deneyleri sonrasında çekme deneyi ile elde edilen kopma kuvvetlerine ilişkin verilerin mukayese edilmesi neticesinde, çalışmanın uygun yapıştırıcı seçimi yapılmış ve daha yüksek dayanım gösteren, DP-460 epoksi esaslı yapıştırıcının, çalışmanın sonraki aşamalarında kullanılmasına karar verilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasının bir sonraki evresini oluşturan kısmında, DP-460 ile yapıştırılan kompozit bağlantıların, farklı sıcaklıklarda ve tek seferlik (tekrarsız) eksenel darbe yükleri altındaki mekanik davranışları incelenmiştir. Burada; çalışmanın bir sonraki aşamalarında uygulanacak olan ideal sıcaklık değerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında yapıştırılmalı kompozit bağlantılara -20°C, 0 °C, 20 °C, 40 °C ve 60 °C sıcaklıklarında eksenel darbe yükleri uygulanmış, hasar görmeyen numuneler, yine belirlenen farklı sıcaklıklarda çekme testlerine tabi tutulmuş ve böylece yapıştırılmalı kompozit bağlantıların farklı sıcaklıklardaki eksenel darbe yükleri altındaki mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çalışmanın ilk aşamalarını oluşturan ve bir sonraki aşama olan titreşim deneylerine yönelik uygun koşulların belirlenmesine ilişkin oluşturulan açıklayıcı görsel Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Şekil 4.1’de çalışmanın ileriki aşamalarında kullanılacak yapıştırıcı türü, uygulanacak darbe enerjileri, eksenel darbe yükünün tekrar sayısı ve uygun çalışma sıcaklıkları kırmızı renkli olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Titreşim deneyi için uygun parametrelerinin belirlenmesi.

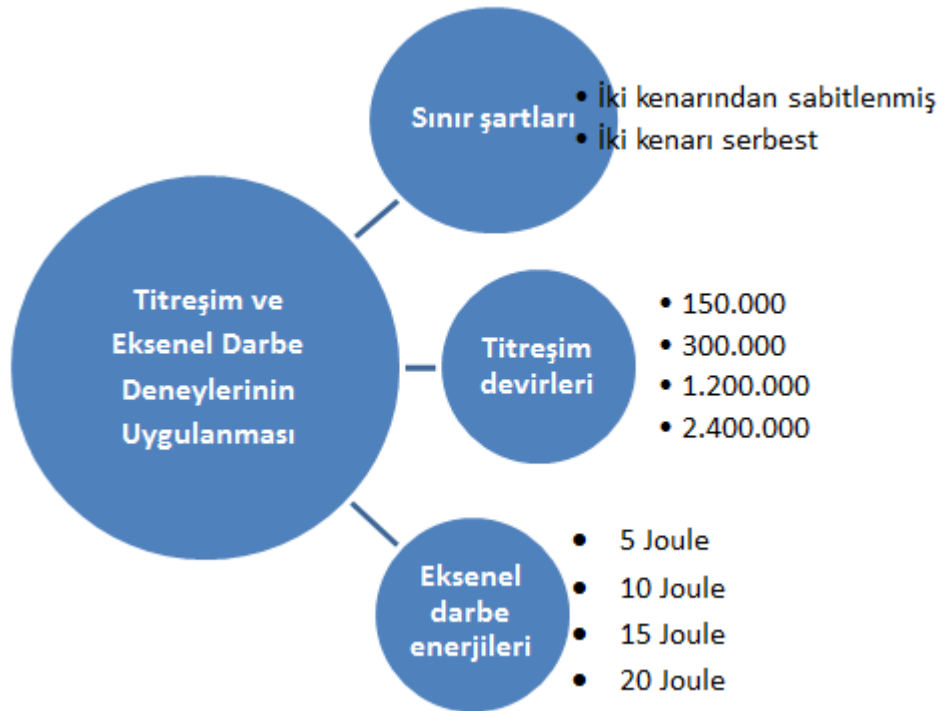
Çalışmanın ikinci aşamasında, yapıştırılmalı bağlantıların farklı sınır koşullarında ve farklı çevrimlerdeki titreşim etkileri altında gösterecekleri mekanik davranışların

incelenmesi amaçlanmıştır. Yapıştırılmalı kompozit bağlantılar, genellikle, çeşitli makine ve makine parçalarının çalışmaları esnasında titreşimlere maruz kalmaktadır. Bu sebeple, çalışma kapsamında, yapıştırılmalı kompozit bağlantılardaki titreşim etkisi incelenirken; iki kenarından sabitlenmiş ve iki kenarı serbest olarak tanımlanan iki farklı sınır şartı göz önüne alınmıştır. Örneğin; kompozit bağlantılarla üretilen bir bisiklet hareket halindeyken çeşitli titreşimlere maruz kalmakta, bununla birlikte bisikletin üzerine etkiyen yükler (bisiklet ve binici ağırlığı) iki kenarı sabitlenmiş sınır şartını oluşturmaktadır. Benzer şekilde, kompozit bağlantılarla montajı sağlanan rüzgar türbini kanatları, türbülanslı ve kuvvetli rüzgarların oluşturduğu hava koşullarında, uç kısımları serbest kalacak şekilde titreşime maruz kalarak, iki kenarı serbest olan sınır şartını oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında, yapıştırılan kompozit plakalara farklı çevrim değerlerindeki titreşimler etkimiş, etkiyen titreşimler sonrasında, plakalardan çekme deneyine tabi tutulacak şekilde numuneler çıkarılmış ve bu numunelerin konumlarına göre, titreşimin yapıştırılmalı bağlantılar üzerindeki mekanik davranışlarına etkisinin incelenmesine yönelik çeşitli yorumlar yapılmıştır. Şekil 4.2’de çalışmanın ikinci aşaması olan titreşim deneylerine ilişkin parametreler verilmiştir.



Şekil 4.2: Titreşim deneylerinde kullanılan parametreler.

Çalışmanın son aşamasında, titreşime maruz bırakılmış yapıştırırmalı kompozit plakalara eksenel darbe yüklerinin uygulanması amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında, günümüze yönelik makine ve/veya makine parçalarında meydana gelebilecek problemler göz önüne alınmıştır. Örneğin; uçağın titreşime maruz kalan parçalarına uçan bir kuşun çarpması sonucunda oluşabilecek hasar araştırma kapsamında tanımlanan durumla benzerlik göstermektedir. Bu sebeple, yapıştırılan kompozit plakalar titreşime tabi tutulduktan sonra, bu plakaların belirli bölgelerinden alınan numunelerine eksenel darbe deneyleri uygulanmıştır. Titreşime tabi tutulan yapıştırırmalı bağlantıların darbe enerji değerine bağlı olarak bir kısmının eksenel darbe etkisiyle hasara uğradığı görülürken, bir kısmının hasara uğramadığı görülmüştür. Hasara uğramayan numuneler çekme testlerine tabi tutulmuş ve bu numunelerin mekanik davranışları hakkında yorum yapılmasını sağlayan kopma kuvvetleri belirlenmiştir. Şekil 4.3'te titreşim ve eksenel darbe yüklerine maruz bırakılan yapıştırırmalı bağlantıların parametrelerinin bir arada sergilendiği görsel yer almaktadır.



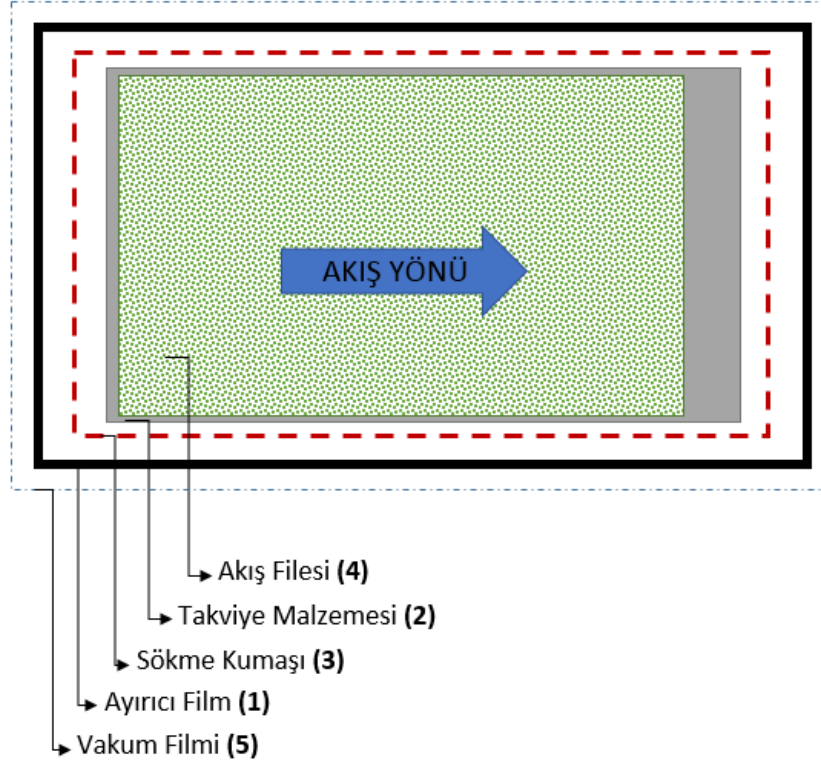
Şekil 4.3: Titreşim ve eksenel darbe deneylerinde kullanılan parametreler.

Bu çalışma kapsamında yukarıda bahsi geçen tüm aşamalar, ileriki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

4.2 Tabakalı Kompozitlerin Üretimi

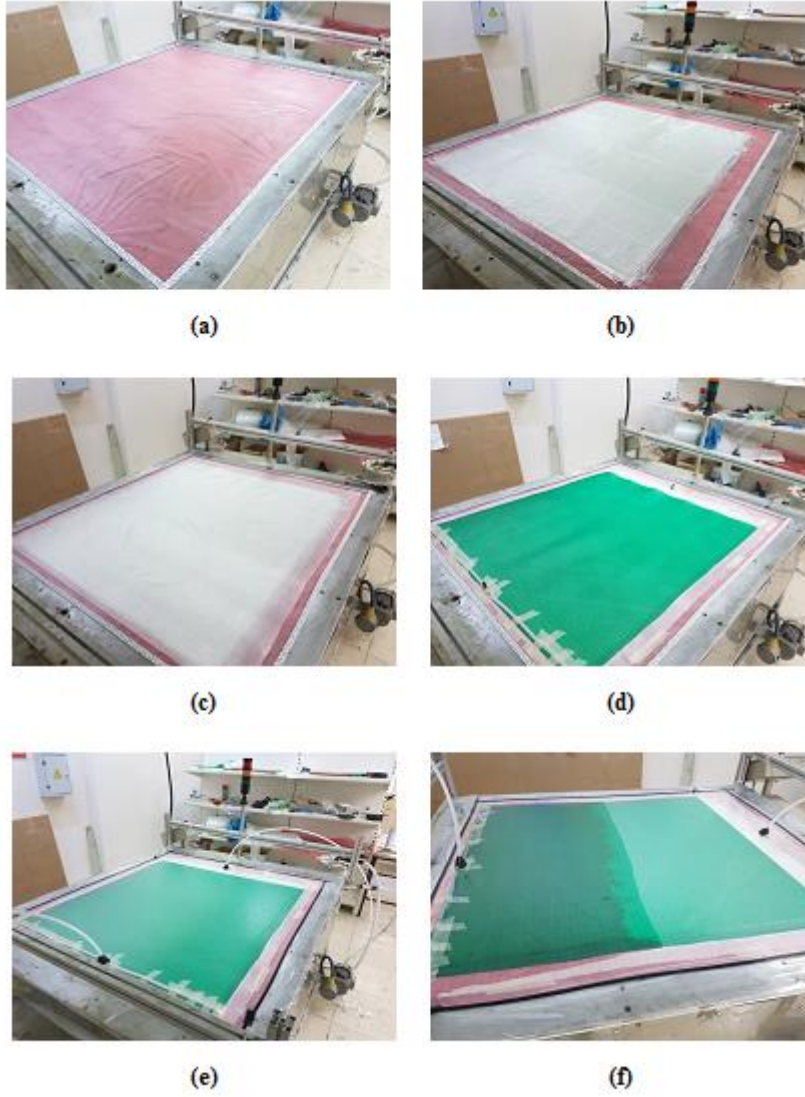
Tabakalı kompozit malzemeler genellikle organik veya inorganik elyafların üst üste dizilip, matris malzeme içerisine takviye edilmesiyle oluşturulmaktadır. Geçmişten günümüze kadar tabakalı kompozit malzemelerin üretilmesine yönelik çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Elle yatırma, püskürtme, elyaf sarma, vakum infüzyon, reçine transfer kalıplama, otoklav vb. yöntemler bunlardan bazılarıdır. Tabakalı kompozit malzemelerin üretim yöntemleri, kompozit malzemelerin kullanım alanlarına yönelik olarak günümüz teknolojisine uygun şekilde geliştirilmeye devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında, düz ve pürüzsüz plakaların üretilmesi amaçlandığı için vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır.

Doktora tezi kapsamında yapılan çalışmalarda, örgülü yapıya sahip E tipi cam elyaf takviye ve epoksi reçine matrisli termoset kompozitler kullanılmıştır. Kullanılan cam elyaflar, yapılan deneylere bağlı olarak değişkenlik göstermekte olup, 300gr/m² ve 500gr/m² ağırlıklarına sahiptir. Matris malzeme olarak iki bileşenden oluşan; Huntsman Firması tarafından tedarik edilen Araldite LY 1564 epoksi reçine ve Aradur 3486 reçine sertleştiricisi kullanılmıştır. Araştırmalar kapsamında gerçekleştirilen tek taraftan bindirmeli yapıştırımlı bağlantıların aksel darbe ve titreşim testlerine yönelik olarak, 6 tabakalı ve 8 tabakalı cam elyaf takviyeli kompozit plakalar üretilmiştir. Kompozit plakaların üretilmesinde kullanılan ve üretim aşamasında, vakum infüzyon masasında belirli oranlara ve sıralamalara göre dizilen sarf malzemelerin (ayırıcı film, 8 tabakalı cam elyaf takviye malzemeleri, sökme kumaşı, akış filesi ve vakum filmi) şematik görseli Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Sarf malzemelerin dizilimi
(Masa yüzeyinden yukarı doğru sıralama 1,2,3,4,5).

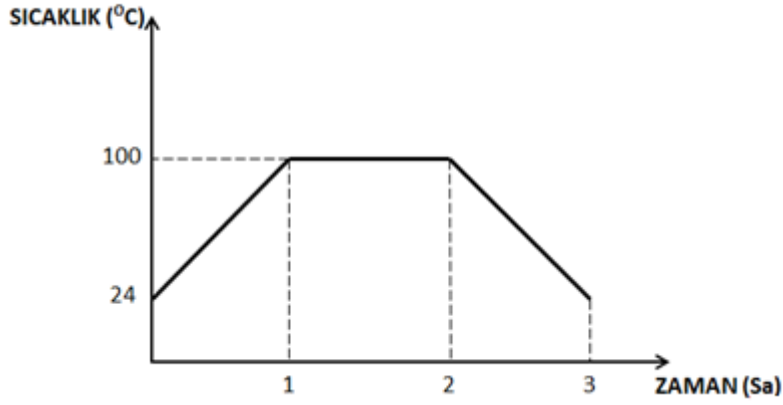
Tabakalı kompozit plakaların üretim aşamaları Şekil 4.5'te detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.5: Tabakalı kompozit malzemelerin üretim aşaması.

Şekil 4.5a'da vakum infüzyon masasına vakum macunu vasıtasıyla yapıştırılmış ayırıcı film görülmektedir. Vakum macunlarından masa üzerinde oluşturulan çerçeve üretimi yapılacak olan kompozit plakaların maksimum alanını belirlemektedir. Bu işlem sonrasında takviye malzemesi olarak kullanılan örgülü yapıya sahip cam elyaflar, ayırıcı film ebadından daha küçük yüzey alanına sahip olacak şekilde kesilerek üst üste dizilmiştir (Şekil 4.5b). Üst üste dizilen takviye malzemelerinin üzerine sökme kumaşı serilmiştir (Şekil 4.5c). Sökme kumaşı, üretim tamamlandıktan sonra kompozit plakaların üretim esnasında kullanılan diğer sarf malzemelerden ayrılmasında önemli ölçüde rol oynamaktadır. Bu nedenle, sökme

kumaşının enine ve boyuna olan ebatları, vakum macunlarının oluşturduğu çerçeve içerisinde kalmak şartıyla, takviye elemanlarının ebadından daha fazladır. Sökme kumaşının üzerine akış filesi serilmiştir (Şekil 4.5d). Akış filesinin üretim aşamasındaki görevi; vakumlama esnasında matris malzemenin ilerlemesini ve böylelikle takviye elemanları içerisine daha iyi nüfuz ettirilmesini sağlamaktır. Şekil 4.5d’de görüldüğü üzere, akış filesi serildikten sonra matris malzemenin iletilmesini sağlayan spiral hortumlar ve t borular takviye malzemelerinin uç kısımlarına boylu boyunca kağıt bantlarla (maskeleye bandı) yapıştırılmıştır. Bu işlemler tamamlandıktan sonra, vakum filmi tüm çevrenin ebadından büyük olacak şekilde kesilerek masa üzerine serilmiştir. Vakum macunlarının üzerinde bulunan, yapışmayı engelleyici şerit halindeki kağıtlar sırayla çıkarılıp, vakum filminin macunlar ile çepçevre yapıştırılması sağlanmıştır(Şekil 4.5e). Bu işlem sonrasında, yine Şekil 4.5e’de gösterilen vakum infüzyon hortumları t borulara geçirilmiş ve herhangi bir hava kaçağının olmaması için hortumlarla t boruların bağlantı yerlerine de vakum macunu kaplanmıştır. Vakum infüzyon yönteminde tüm hazırlıklar yapıldıktan sonra hava kaçağının olmaması, üretimin kaliteli ve standart bir şekilde sağlanması bakımından oldukça önemlidir. Bu nedenle, yapılan işlemler sonrasında, matris malzeme gönderilmeden önce hava kaçağı kontrolü yapılmıştır. Kontroller sonrasında, masa yaklaşık 60°C sıcaklığa ulaştığında matris malzeme vakum pompası çalıştırılarak hortum vasıtasıyla hazırlanan düzeneğe iletilmiştir (Şekil 4.5f). Matris malzeme ağırlıkça %67 oranında epoksi reçine, %33 oranında sertleştiricinin homojen karışımıyla hazırlanmaktadır. Bu işlemler sırasında ve sonrasında masa içerisinde bulunan rezistanslar çalıştırılarak, belirli sıcaklık ve süre aralığında kütleme işlemleri yapılmıştır. Kütleme işlemine ilişkin sıcaklık – zaman grafiği Şekil 4.6’da gösterilmektedir.



Şekil 4.6: Kürleme aşamasındaki sıcaklık – zaman grafiği.

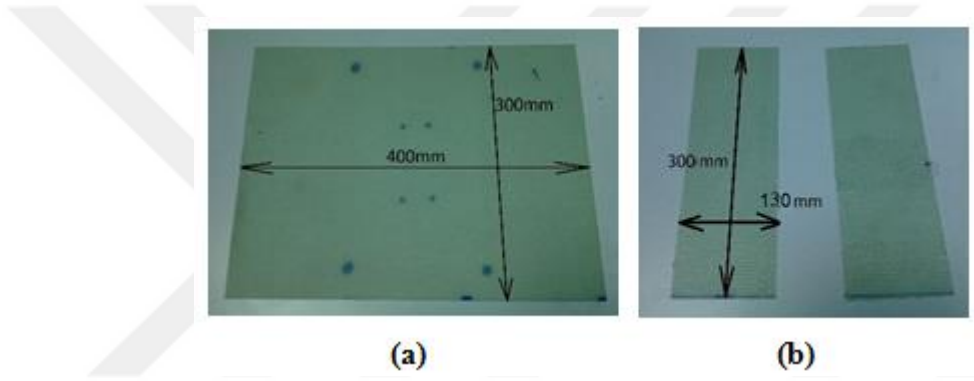
Şekil 4.6'da gösterilen sıcaklık – zaman grafiğinde, kompozit üretim masasının üretim için hazırlanmasından sonra, masa bir saatlik süre içerisinde oda sıcaklığından 100°C sıcaklığa getirilmektedir. Bu süre zarfında masanın sıcaklığı 60°C olduğu andan itibaren matris malzemenin vakumlanması işlemine başlanmaktadır. Bir saat içerisinde 100°C sıcaklığa ulaşan masa bir saat boyunca aynı sıcaklıkta bekletildikten sonra, masanın sıcaklığı bir saat içerisinde oda sıcaklığına getirilmektedir. Toplam üç saatlik ısıtma – soğutma işlemleri için geçen sürenin ardından kürlenme işlemi tamamlanmakta ve sonrasında kompozit plaka sökme kumaşı vasıtasıyla üretimde kullanılan ekipmanlardan ayrılmaktadır.

4.3 Yapıştırırmalı Kompozit Bağlantıların Üretimi

Yapıştırırmalı kompozit bağlantılarda uygun deney numunelerinin hazırlanabilmesi için gerekli ön çalışmalar yapılmıştır. Vakum infüzyon yöntemi ile üretimi tamamlanan kompozit plakalardan yapıştırırmalı bağlantıların oluşturulabilmesi için üç temel aşama takip edilmiştir. İlk aşamada üretilen plakalar, birbirine yapıştırılmaya uygun olabilecek şekilde, daha küçük ölçekler halinde kesilmiş, ikinci aşamada kesilen plakaların yüzeyleri, yapışma işleminin daha etkili olabilmesi için temizlenmiştir. Üçüncü aşamada yüzeyleri temizlenen plakalar birbirine yapıştırıcılarla bağlanmış ve bağlantıyı oluşturan yapıştırıcıların kürlenmesi sağlanmıştır. Yapıştırırmalı kompozit plakaların hazırlanışında kullanılan bu üç temel aşama aşağıdaki başlıklar altında daha detaylı bir şekilde açıklanmaktadır:

4.3.1 Kompozit plakaların kesim işlemi

Vakum infüzyon işlemi tamamlanan kompozit plakalar, infüzyon masasından söküldükten sonra, üretim esnasında kullanılan vakum torbası, akış filesi gibi sarf malzemeler sökme kumaşı vasıtasıyla kürlenene kompozit plakadan ayrıldıktan sonra, bir bütün halinde olan kompozit plaka Rubi – DV200 sulu kesim cihazında iki farklı ölçüde kesilmiştir. Kesilen plakalardan biri ana plakayı oluştururken, diğeri yapıştırılan plakaları oluşturmaktadır. Kesilen kompozit plakalar ve bu plakalara ilişkin boyutlar Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Burada, ana plaka 400x300 mm² ebatlarında, ana plakalarla birlikte çekme numunelerinin elde edileceği yapıştırılan plakalar 300x130 mm² ebatlarında kesilmiştir.



Şekil 4.7: Yapıştırılan plakalar a) Ana plaka, b) Yapıştırılan plakalar.

Kompozit plakaların iki farklı ölçülerde kesilmesinden sonra, plakaların kesilen kısımlarında kalan çapaklar, ege yardımıyla giderilmiş ve çapakları giderilen plakalara yüzey temizleme işlemleri uygulanmıştır.

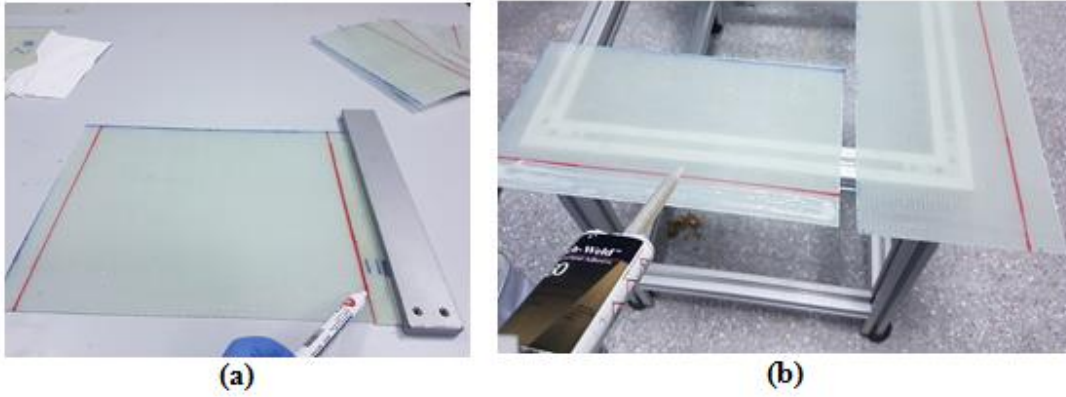
4.3.2 Yüzey temizleme işlemi

Kesim işlemi tamamlanan kompozit plakaların üzerinde, üretim sonrasında sökme kumaşının sökülmesine bağlı epoksi kalıntıları bulunmaktadır. Bu kalıntılar, yapıştırma işlemi sonrasında yapıştırıcının plakalara iyi bir şekilde tutunmasını engellemekte, bu sebeple plakaların birbirine yapışma işlemi etkili bir biçimde sağlanamamaktadır. Plakalar üzerinde bulunan epoksi kalıntılarının giderilme için küçük ölçeklerde kesilen plakaların yüzeyleri asetona batırılmış bir fırça vasıtasıyla temizlenmiştir. Asetonun bu çalışmada tercih edilmesinin sebebi, iyi çözgen özelliği ve oda sıcaklığında uçucu bir yapıya sahip olmasından dolayı yüzey temizleme için

gereken süreyi kısaltmasıdır. Yüzeyleri aseton ile temizlenen plakalar epoksi yapıştırıcılarla yapıştırılmıştır.

4.3.3 Yapıştırma ve kürlenme işlemi

Yüzey temizleme işlemi sonrasında, ana plakayı oluşturan kompozit plakanın her iki kenarına, epoksi yapıştırıcılar vasıtasıyla, yapıştırılan plakalar bağlanmıştır. Yapıştırma işleminden önce, yapıştırılacak plakalara çekme deneyi için gerekli standart ölçülere uygunluk sağlanabilmesi açısından, plakalar uç kısımlarından 25.4mm genişliğinde boylu boyunca bir kalem vasıtasıyla şerit çizilerek markalanmıştır. Markalama işleminden sonra, epoksi yapıştırıcı, yapıştırılan plakalar üzerine çepeçevre sürülmüş, yapıştırılan plakalar markalanan çizgiler doğrultusunda ana plakaya bağlanmıştır. Markalama ve epoksi yapıştırıcının sürülmesi aşamaları Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



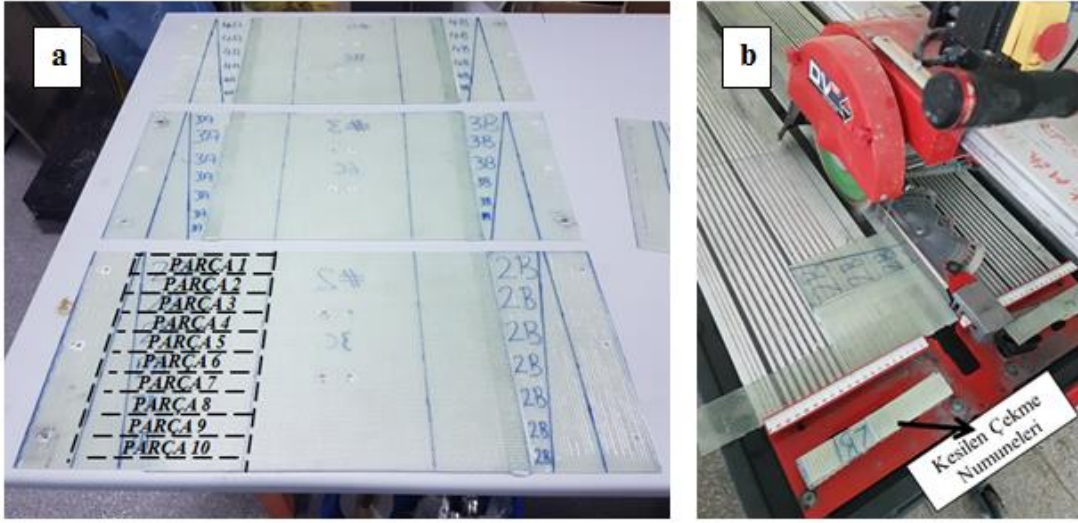
Şekil 4.8: Plakaların yapıştırılması esnasındaki uygulamalar: a) Ana plakanın markalanması, b) Yapıştırılan plakalara sürülen yapıştırıcı uygulaması.

Kompozit plakaların birbirine yapıştırılmaları esnasında, plakalar üzerinde herhangi bir hava kabarcığının olmamasına dikkat edilmiştir. Bu amaç için, yapıştırma esnasında ve sonrasında plakaların yapıştırılan bölgelerine üst kısımlarından etkiyen bir yayılı yük vasıtasıyla basınç uygulanmıştır. Yapıştırılan plakaların kürlenmeye bırakıldığı görsel Şekil 4.9’da gösterilmektedir.



Şekil 4.9: Plakaların tek taraftan yapıştırılması esnasındaki kürlenmeleri.

Şekil 4.9’da gösterilen resimde, ana plakanın her iki kenarından yapıştırılan plakaların açıkta kalan alt kısımlarına, yapışma bölgesinde herhangi bir eksen kaçıklığı olmaması için ilave plaklarla destek sağlanmıştır. Epoksi yapıştırıcının masa ve ahşap yüklere yapışmaması için bu yüzeye ayırıcı film yerleştirilmiştir. Kompozit plakaların birbirine epoksi yapıştırıcılarla yapıştırılma işlemleri tamamlandıktan sonra, oda sıcaklığında her biri 400gr ağırlığa sahip ahşap yüklerle uygulanan basınç altında 24 saat boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. Yapıştırılan plakalar, aksenal darbelerin ve çekme deneylerinin uygulandığı deneylerde, çekme deneyi standart  l lerine uygun olarak, 25.4mm genişliğinde 10’ar adet numuneler halinde sulu kesim cihazında kesilmiştir. Böylelikle, tüm deneylerde kullanılan yapıştırırmalı bağlantı numunelerindeki yapıştırıcı kalınlığının 0.3mm standardında kalması sağlanmıştır. Yapıştırılan plakalar ve bu plakaların sulu kesim cihazında çekme numuneleri halinde kesildiğini gösteren görsel Şekil 4.10’da verilmektedir.



Şekil 4.10: Yapıştırırmalı bağlantı numunelerinin hazırlanması;

a) Konumlandırma, b) Sulu kesim işlemi.

Numune boyutları, yapıştırırmalı bağlantılara uygulanan deneyler bölümünde çekme deneyinin anlatıldığı kısımda detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

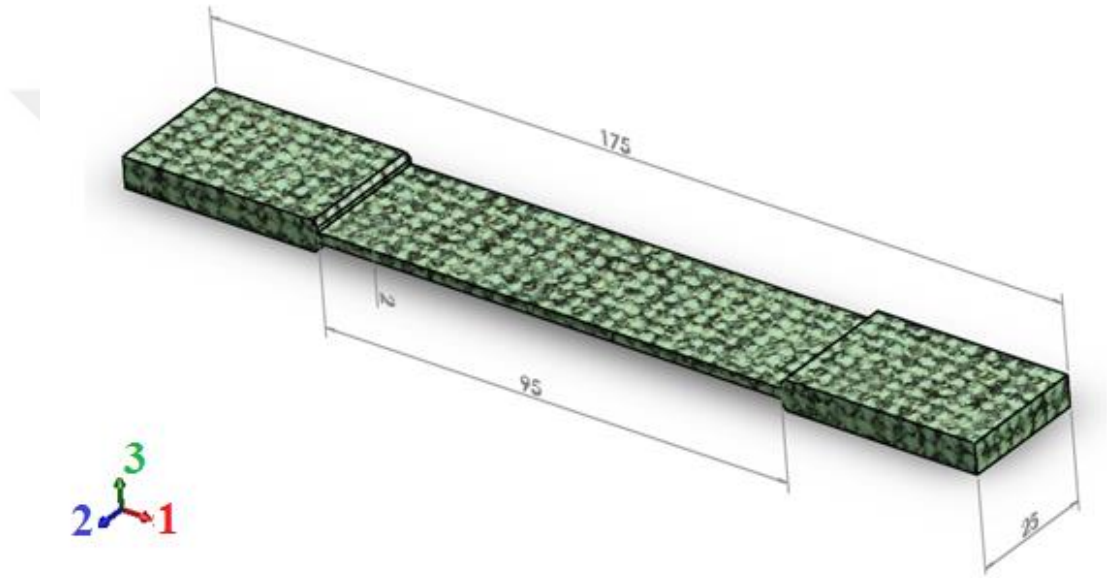
4.4 Kompozit Malzeme ve Yapıştırıcının Temel Mekanik Özelliklerinin Tespitinde Kullanılan Deneysel Metotlar

Bu bölümde, üzerinde çalışılan cam elyaf takviyeli epoksi polimer matrisli kompozitin temel mekanik özelliklerinin nasıl tespit edildiği açıklanmıştır. Kompozit malzemenin çekme ve kayma yükleri altındaki davranışları incelenerek, rijitlik ve mukavemet değerlerini ortaya koyan aşağıdaki özellikler bulunmuştur. Benzer şekilde, yapıştırıcı malzemeleri de çekme testlerine tabi tutularak, bu malzemelerin de mekanik özellikleri tespit edilmiştir.

Kompozit plakaların mekanik özelliklerinin tespitinde iki farklı test uygulanmıştır. Bu testlerden biri ASTM D3039 [94] standardında uygulanan çekme testi, diğeri ise ASTM D7078 [95] standardında uygulanan V çentikli kayma testidir. Çekme testinden takviye ve takviyeye dik doğrultulardaki dayanım değerleri (σ_1 ve σ_2), bu doğrultulardaki elastisite modülleri (E_1 ve E_2) ve Poisson oranı (ν_{12}) tespit edilirken; V çentikli kayma testi ile kayma mukavemeti (S) ve kayma modülü (G_{12}) tespit edilmiştir.

4.4.1 Çekme testi

ASTM test standartları, Amerika’da malzemelerin çeşitli özelliklerinin saptanabilmesi için yapılan testlere yönelik standartların belirlenebildiği bir kuruluş olan “American Society for Testing and Materials” tarafından dünya çapında kabul gören bir standarttır. Üretimi tamamlanan polimer matrisli elyaf takviyeli kompozit plakaların, çekme özelliklerinin belirlenebilmesi için ASTM D3039 test standardı uygulanmıştır. Çekme testi standardına uygun, milimetrik hazırlanan numune ölçüleri görseli Şekil 4.11’de gösterilmektedir.



Şekil 4.11: ASTM D3039 standardına uygun hazırlanan çekme numunesi ölçüleri.

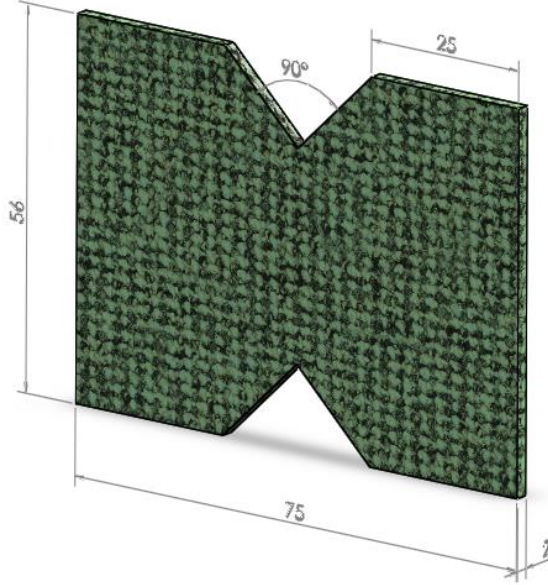
Çekme testinin uygulanmasında Shimadzu 100kN test cihazı kullanılmıştır. Test cihazına bağlanan numuneler 0.5mm/dak ilerleme hızı uygulanarak aksenal doğrultuda çekilmiştir. Kompozit plakaların Poisson oranı, video ekstansometre cihazı ile tespit edilmiştir. Çekme testi sonrasında hasar gören numune Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



Şekil 4.12: Çekme testi sonrasında hasar gören numune.

4.4.2 Kayma testi

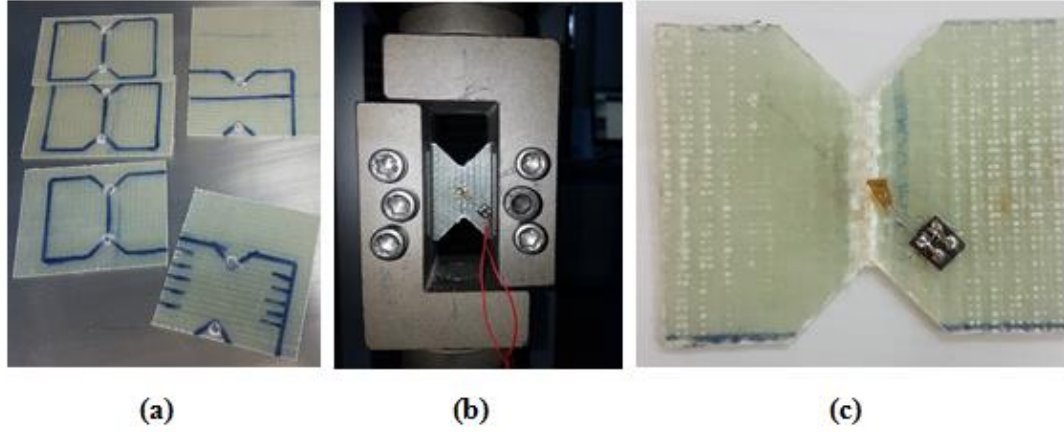
Kompozitin kayma gerilmesi ve kayma modülüne ilişkin değerleri, ASTM D7078 standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu standarda göre, V çentikli plakalar hazırlanmış, bu plakalar üzerine gerinim ölçer (strain-gage) bağlanmış ve gerinim ölçer vasıtasıyla elde edilen uzama verileri kullanılarak kompozit plakaların kayma modülü belirlenmiştir. Kayma testinde kullanılan numune ölçüleri milimetrik olarak Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.13: ASTM D7078 standardına uygun hazırlanan kayma numunesi ölçüleri.

Kayma testi için oluşturulan numunelerin hazırlanması esnasında, plakaların üzerine standart ölçülerde şablon çizimleri yapılmıştır (Şekil 4.14a). Üzerine standart ölçülerin çizildiği plakalar, el motoru ile dikkatli bir şekilde kesilmiş ve numuneler teste uygun hale getirilmiştir. Kayma test aparatlarına bağlanan numunelerin üzerine

yatayla 45° açı yapacak şekilde Strain Gauge firması (Tokyo, Japonya) tarafından üretilen TDS-30 gerinim ölçer yerleştirilmiş ve çekme cihazı üzerinde kayma testi uygulanmıştır (Şekil 4.14b). Numunenin, kayma testi sonrasındaki hasar görüntüsü Şekil 4.14c’de gösterilmektedir.



Şekil 4.14: Kayma testi uygulama görüntüleri.

Kayma testi sonrasında maksimum kayma mukavemeti (S), çekme cihazı ile elde edilen maksimum hasar kuvveti (P), hasar gören numunedeki V çentikler arasındaki minimum uzaklık (w) ve numune kalınlığı (t) baz alınarak aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$S = \frac{P}{w \cdot t} \quad (4.1)$$

Kompozit numunenin kayma modülünün hesaplanmasında, öncelikle kayma geriniminin (γ_{12}) hesaplanabilmesi için numune üzerine yatayda ve düşeyde 45°’lik açı ile yerleştirilen gerinim ölçerden alınan gerinim değeri (ϵ) kullanılmıştır. Çekme cihazından elde edilen gerilme – gerinim diyagramındaki lineer bölgeden alınan kayma gerilmesinin (τ_{12}) kayma gerinimine bölünmesi (γ_{12}) ile kayma modülü (G_{12}) bulunmuştur. Formüller sırasıyla denklem 4.2 ve 4.3’te verilmiştir.

$$\gamma_{12} = 2 \cdot \epsilon \quad (4.2)$$

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} \quad (4.3)$$

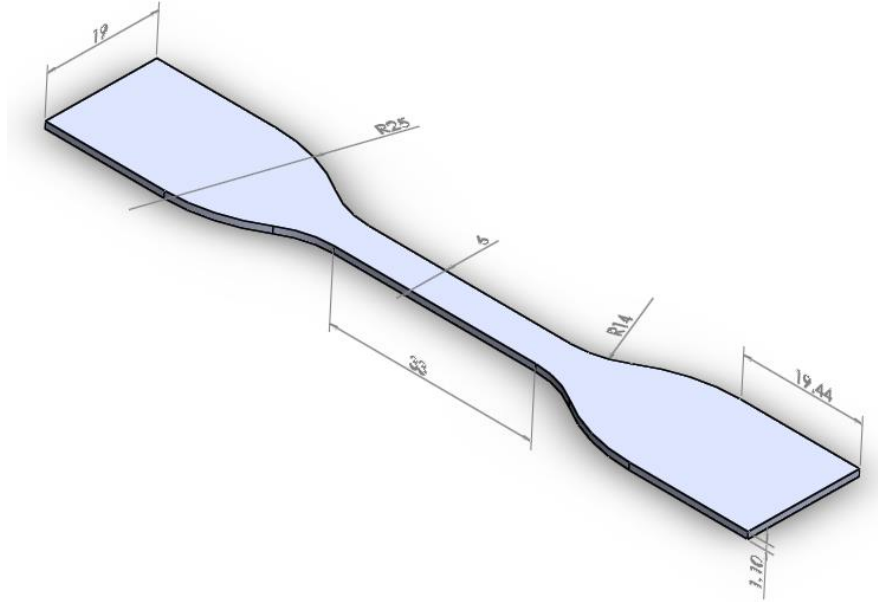
Kompozit plakalara uygulanan çekme ve kayma testleri sonrasında, üretilen plakaların mekanik özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Cam elyaf takviyeli polimer kompozit plakaların mekanik özellikleri.

E₁ Elastisite Modülü (GPa)	E₂ Elastisite Modülü (GPa)	G₁₂ Kayma Modülü (GPa)	σ_{max} Çekme Mukavemeti (MPa)	S Kayma Mukavemeti (MPa)
20	20	5	500	55

4.4.3 Yapıştırıcılara uygulanan çekme deneyleri

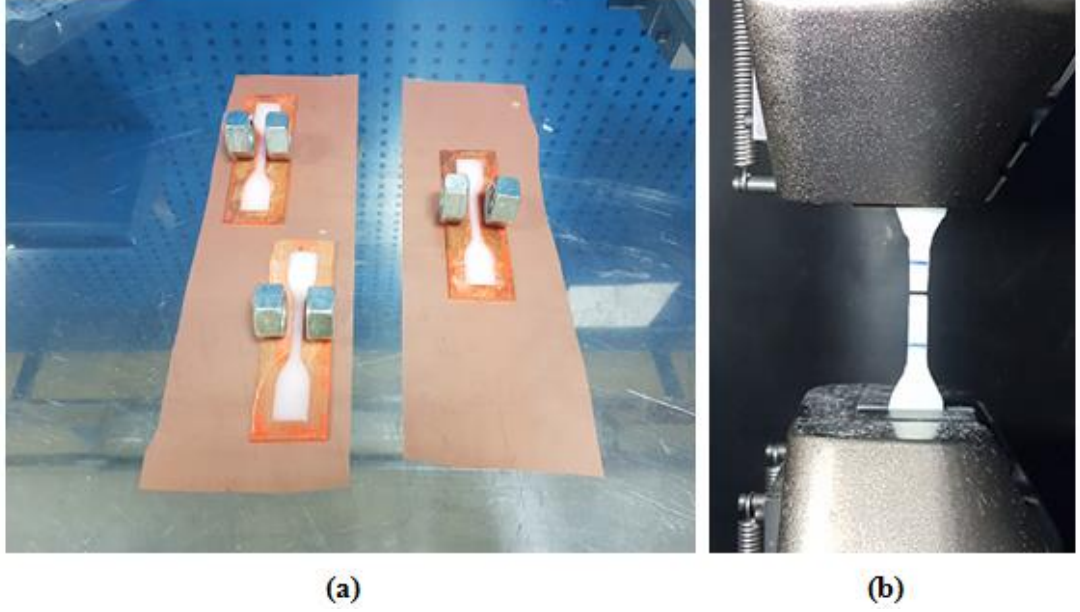
Bu çalışma kapsamında DP-460 ve Loctite 9466 olmak üzere iki farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcıların her ikisi de kısmi akışkan özelliğe sahip ticari ürünlerdir. Epoksi esaslı iki bileşenli (epoksi & sertleştirici) kimyasal yapılı olan bu yapıştırıcılar oda sıcaklığında kürlenmektedir. Yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin tespitinde ASTM D638 [96] test standardı kullanılmıştır. Plastik ve polimerik malzemelerin çekme özelliklerinin tespitinde kullanılan test standardına yönelik ölçüler Şekil 4.15’te verilmektedir.



Şekil 4.15: Epoksi yapıştırıcıların çekme numunesi ölçüleri (mm).

Epoksi yapıştırıcılar, kısmi akışkan özelliğe sahip olmasından dolayı, nüfuz ettiği yüzeyi/hacmi homojen bir şekilde kaplamaktadır. Bu nedenle, Zortrax M200

(Polonya) marka 3 boyutlu yazıcı vasıtasıyla, çekme deneyi için üretilecek epoksi numunelerin kalıbı üretilmiştir. 3 boyutlu yazıcıda üretilen kalıp dişi kalıp olmakla birlikte, epoksi yapıştırıcılar sıvanarak kalıbın içerisini doldurmuştur. Bir gün boyunca oda sıcaklığında kürlenmiş epoksi yapıştırıcılar, sonrasında çekme deneyine tabi tutulmuştur. Epoksi yapıştırıcıların çekme numunesi olarak üretildiği ve sonrasında çekme deneyi ile hasara uğradığı görseller Şekil 4.16'da gösterilmektedir.



Şekil 4.16: Epoksi yapıştırıcılar; a) Çekme numunesi olarak üretilmesi, b) Çekme deneyi sonrası hasar görüntüsü.

Çekme deneyi ile epoksi yapıştırıcıların elastisite modülü, çekme mukavemeti değerleri belirlenmiştir. Çekme deneyi sonucunda belirlenen DP-460 ve Loctite 9466 epoksi yapıştırıcılarının mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te verilmektedir.

Tablo 4.2: DP-460 Epoksi yapıştırıcının mekanik özellikleri [97].

Gerilmesi Bindirme Kayma (MPa)	Sertlik Durometre (D)	Kayma Gerilmesi (MPa)	Çekme Mukavemeti* (MPa)	Elastisite Modülü* (MPa)
5.51-6.89	75 – 80	>34.5	40	2600

*Veriler çekme testi ile elde edilmiştir.

Tablo 4.3: Loctite 9466 Epoksi yapıştırıcının mekanik özellikleri [98].

Bindirme Kayma Gerilmesi (MPa)	Sertlik Durometre (D)	Kayma Gerilmesi (MPa)	Çekme Mukavemeti* (MPa)	Elastisite Modülü* (MPa)
5	60	<i>Belirtilmemiş</i>	33	2100

*Veriler çekme testi ile elde edilmiştir.

4.5 Yapıştırırmalı Kompozit Bağlantılara Uygulanan Deneysel Metotlar

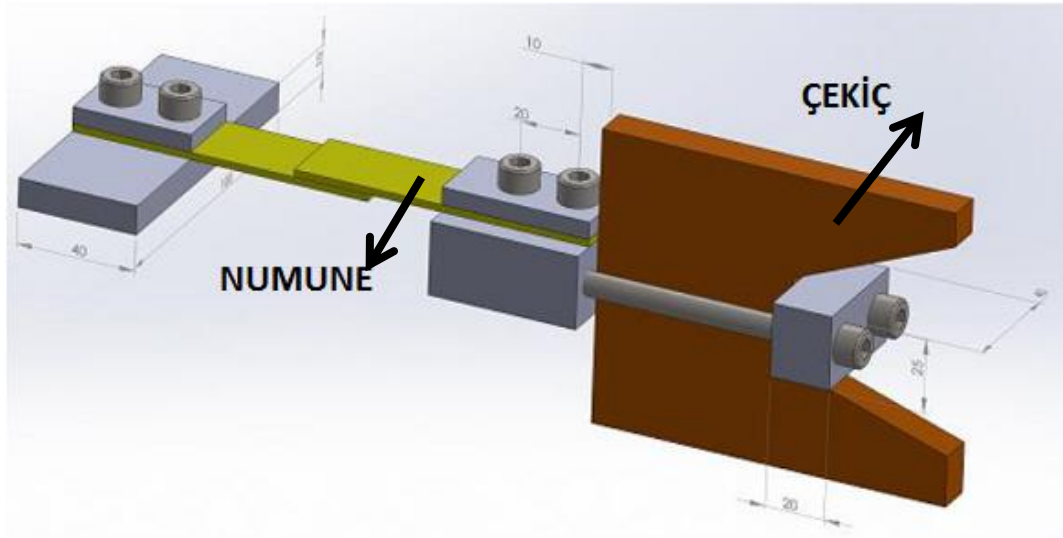
Çeşitli yapıştırıcılarla yapıştırılan kompozit plakalar, adezyon kuvvetlerine bağlı olarak birbirine tutunmaktadır. Adezyon; farklı moleküllerden meydana gelen malzemelerin, çekim kuvveti uygulayarak birbirine yapışması olarak tanımlanabilir. Epoksi esaslı yapıştırıcılar, yapıları gereği tutundukları yüzeyde adezyon kuvvetleri oluşturmakta, böylelikle çeşitli malzemelerin birbiriyle bağlantısını sağlamaktadırlar. Epoksi esaslı yapıştırıcılarla sağlanan bağlantıların mekanik özelliklerinin ve dayanım sınırlarının belirlenebilmesi için bu bağlantılara çeşitli mekanik testler uygulanmaktadır.

Bu uygulamalara, çekme cihazı yardımıyla yapılan çekme – basma - eğilme testleri, Izod/Charpy ve düşen ağırlık test cihazlarıyla yapılan eksenel – yanal – enlemesine darbe testleri örnek olarak verilebilir. Bu testler yardımıyla hem kompozit malzemelerin, hem de kompozit bağlantıların statik ve dinamik yüklere karşı dayanımları belirlenebilmektedir. Tüm bu bilinen testlerin yanı sıra kompozit bağlantıların farklı etkenler altındaki özelliklerinin de belirlenebilmesi için; farklı doğrultularda yorulma testleri, sürünme testleri, termal testler gibi çeşitli test metotları da geliştirilmektedir. Bu çalışmalar kapsamında geliştirilen ve kompozit bağlantılara farklı sınır şartları tasarlanarak, bu sınır şartları altında uygulanan titreşim testleri de örnek olarak verilebilir.

Bu çalışma kapsamında, yapıştırırmalı kompozit bağlantıların mekanik özelliklerini belirleyebilmek amacıyla gerçekleştirilen eksenel darbe, titreşim ve çekme deneylerine ilişkin uygulamalar aşağıda detaylıca açıklanmaktadır.

4.5.1 Eksenel darbe deneylerinin uygulanması

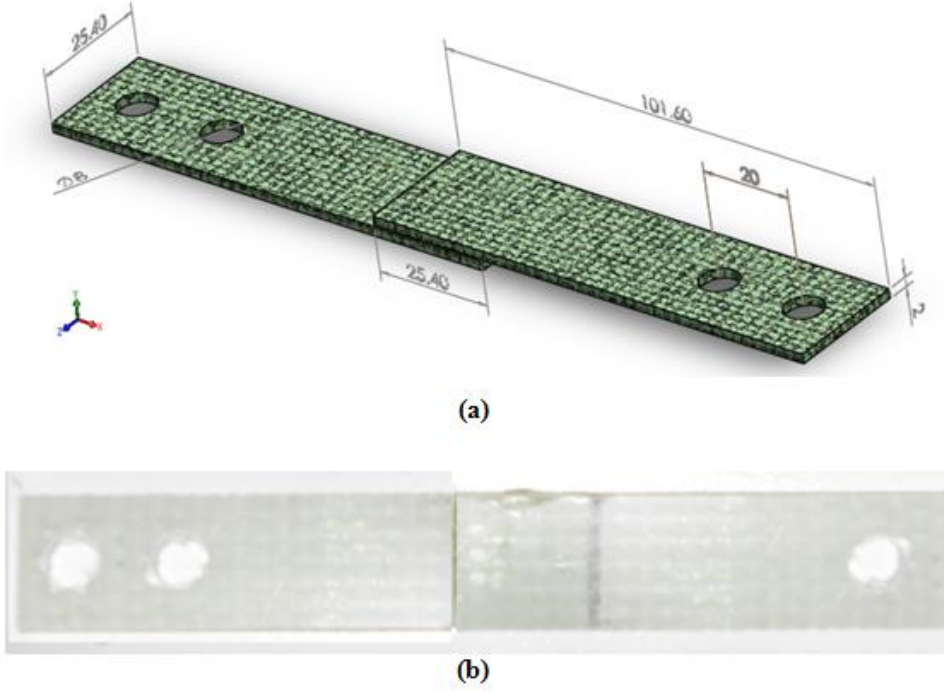
Darbe testleri, bir yapıştırırmalı bağlantıda kullanılan yapıştırıcının çok kısa bir zaman aralığında uygulanan kuvvetleri, azaltma veya absorbe edebilme kabiliyetini ölçmektedir. Başka bir deyişle, bu testlerden elde edilen veriler, yapışkanın uygulanan ani yüke karşı olan hassasiyetini ortaya koyar. Yapıştırırmalı bağlantılara uygulanan darbe yükleri; kimi zaman yapıştırılan bölgenin normali doğrultusunda etkiyerek bağlantı üzerinde bası kuvvetlerini oluştururken, kimi zaman da yapıştırılan bölgenin kayma doğrultusunda etkiyerek eksenel çeki kuvvetlerini oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında uygulanan eksenel darbe deneyleri, yapıştırılan bölgeyi kayma doğrultusunda aniden oluşan çeki kuvvetlerine zorlamaktadır. Bu çalışmada uygulanan eksenel darbe deneyleri, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü mekanik laboratuvarında bulunan, maksimum 30J enerji kapasitesine sahip Charpy darbe cihazının tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantılara uygulanabilir şekilde modifiye edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Yapıştırırmalı bağlantılara eksenel darbe deneylerinin uygulanabilmesi için, Charpy cihazı çekicinin ucuna monte edilen aparatın görseli Şekil 4.17’de verilmektedir [72].



Şekil 4.17: Eksenel darbe deneyi için Charpy cihazına uygulanan modifikasyon.

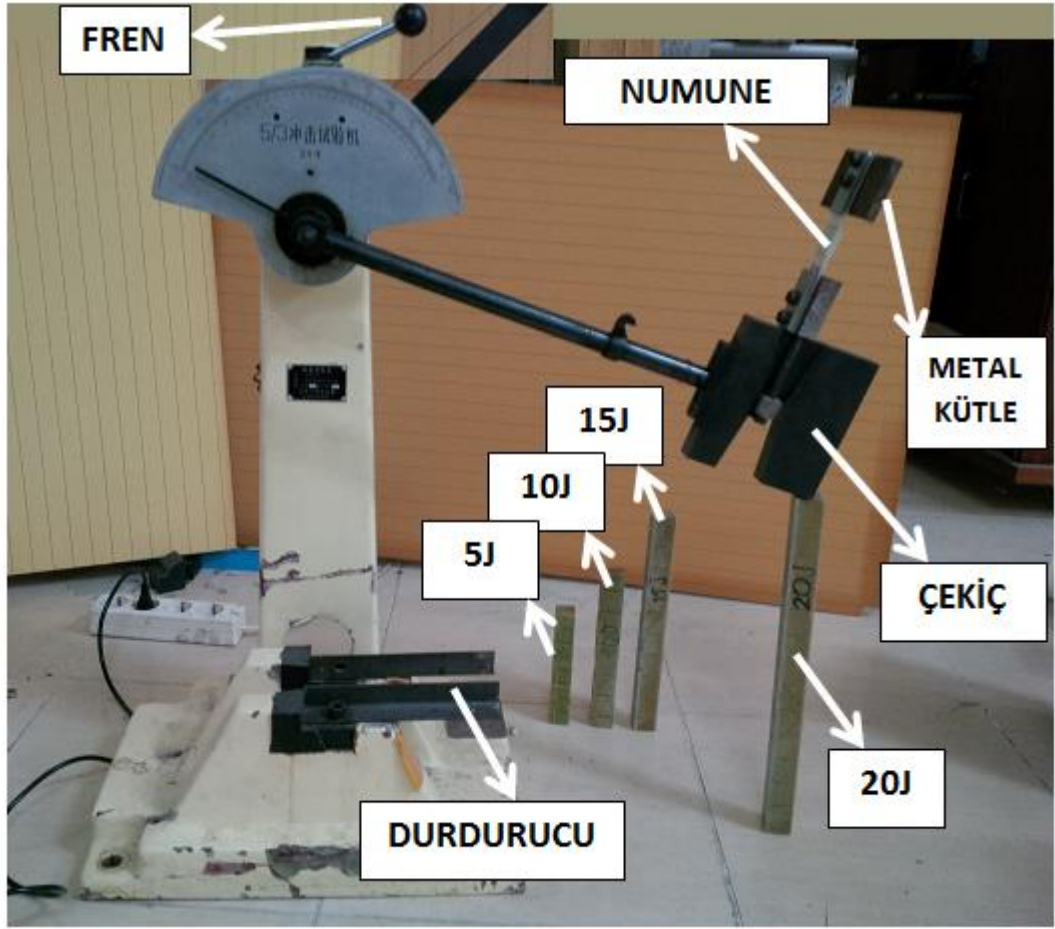
Eksenel darbe uygulanacak numuneler, modifiye edilen Charpy cihazına Şekil 4.17’de de görüldüğü gibi monte edilebilmesi için, uç kısımlarından sütun matkap

vasıtasıyla 8mm çapında delinmiştir. Numunelerin aksenal darbe için hazırlandığı boyutları ve numune görseli Şekil 4.18’de gösterilmektedir.



Şekil 4.18: Aksenal darbe için hazırlanan numune;
a) Numune ölçüleri, b) Örnek numune.

Eksenel darbe deneyi için hazırlanan yapıştırırmalı bağlantıya sahip numuneler bir kenarından charpy cihazı çekicinin ucundaki aparata iki cıvata ile sabitlenirken, numunelerin diğer kenarına iki cıvata ile metal kütle sabitlenmiştir. Çekiç, yüksekliği Şekil 4.19’da gösterilen, çarpma enerjisinin belirlenmesinde kullanılan farklı ölçülerdeki bloklar üzerinden bırakılarak, metal kütlenin cihaz üzerindeki durduruculara çarpması sağlanmıştır.

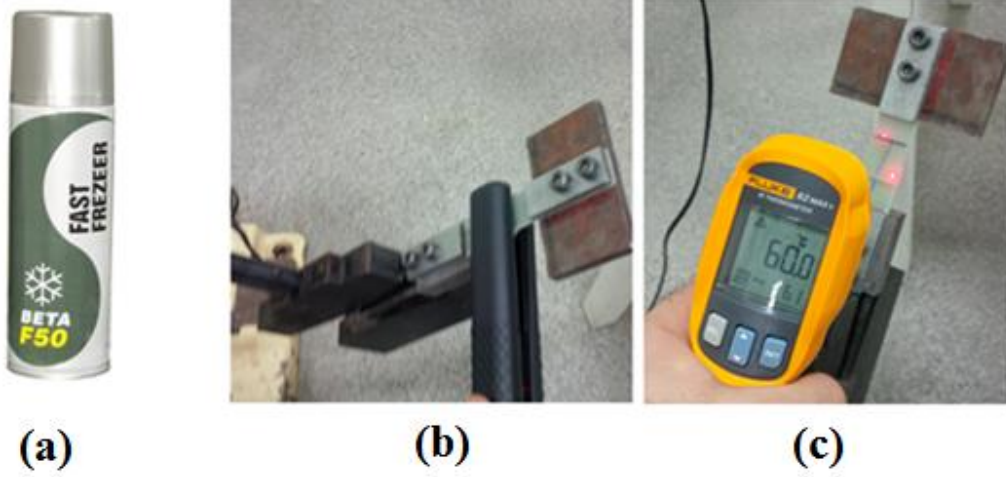


Şekil 4.19: Aksenal darbe uygulaması.

Çarpma etkisiyle çekiç geri teper tepmez Charpy cihazının üzerinde bulunan fren vasıtasıyla kilitlenmiş, böylece numunenin kenarındaki kütlelerin tekrardan durduruculara çarpması engellenmiştir. Bu işlemin aynı numune üzerinde tekrar edilmesi tekrarlı aksenal darbeleri oluşturmaktadır.

Aksenal darbe deneylerinde farklı sıcaklık değerlerinin uygulanmasında, numunelerin soğutulması için Beta Kimya (İstanbul, Türkiye) firması tarafından üretilen ve -50°C sıcaklığa kadar soğutma sağlayan Beta F50 soğutucu sprey kullanılmıştır (Şekil 4.20a). Numunelerin ısıtılması işlemindeyse rezistans plakalar kullanılmıştır (Şekil 4.20b). Deneylerde uygulanan sıcaklık değerleri Fluke 62Max (ABD) kızılötesi termometre ile anlık olarak ölçülmüş (Şekil 4.20c), numuneler $\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değeri aralığında aksenal darbe testlerine tabi tutulmuştur. Numunelere

uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri; bütün numunelerden ziyade, yapıştırma bölgeleri üzerine tesir ettirilmiştir.



Şekil 4.20: Eksenel darbe deneyinde farklı sıcaklıkların uygulanması; a) Soğutucu, b) Isıtıcı plakalar, c) Sıcaklık ölçümü.

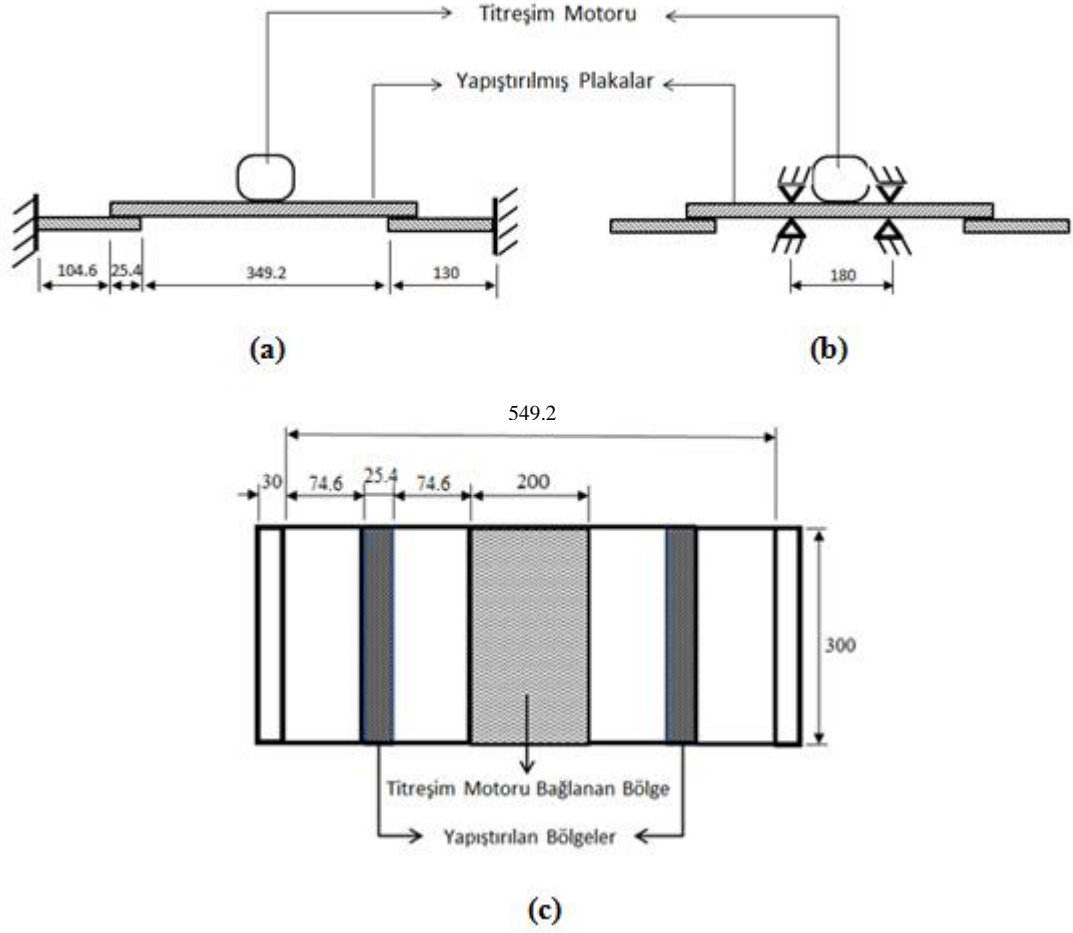
Eksenel darbe deneyleri sonrasında, özellikle yüksek enerji değerlerinde bazı numunelerin hasara uğradığı görülmüştür. Hasara uğramayan numuneler, bu işlem sonrasında çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Hasara uğrayan numuneler “Sonuçlar ve Tartışma” bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

4.5.2 Titreşim deneylerinin uygulanması

Titreşim, mühendislik tasarımlarında belirleyici etkiye sahip önemli bir faktördür. Gerek bağlanan elemanların gerekse bağlantı bölgelerinin performansı, farklı kaynaklardan gelen titreşimle doğrudan alakalıdır. Bu sebepten bağlantılardaki titreşim kaynaklı performans değişiminin tespiti son derece önemlidir.

Yapıştırırmalı kompozit bağlantıların titreşimli ortamlarda yorulmalarının incelenmesi üzerine kullanılabilen herhangi bir test cihazı bulunmamaktadır. Bu nedenle, çalışma kapsamında yapıştırırmalı kompozit bağlantıların titreşime maruz bırakıldığı test düzeneklerinin tasarlanması ve testlerin bu düzenekler yardımıyla uygulanması amaçlanmıştır. Bu amaç kapsamında; iki kenarı sabitlenmiş (yükli) durum ve iki kenarı serbest (yüksüz) durum olmak üzere iki farklı sınır şartına göre tasarlanan

düzenekler ve yapıştırılan plakaların sınır şartlarına göre sabitlenme şekilleri şematik olarak Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



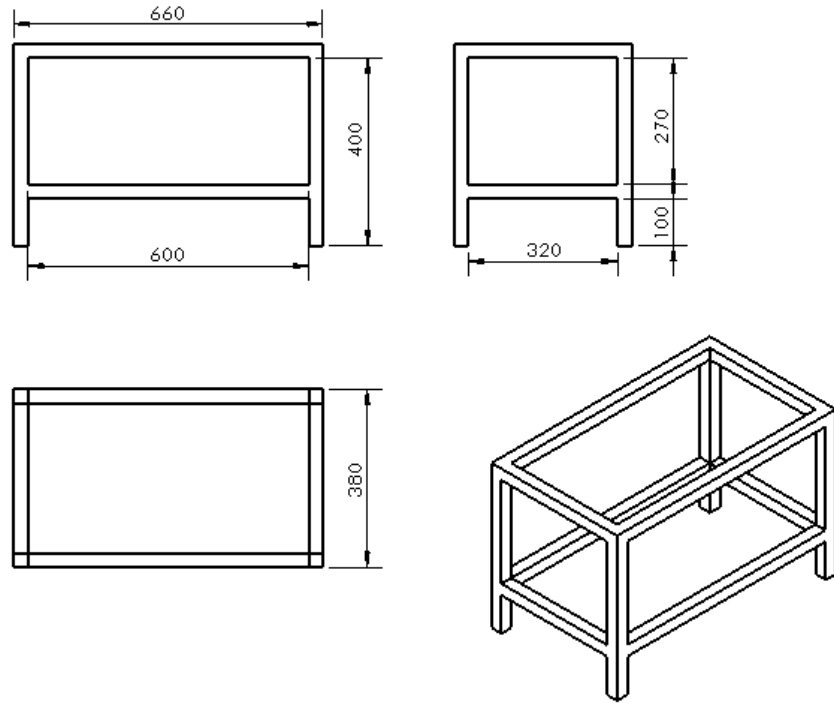
Şekil 4.21: Plakaların sabitlenmesi (Önden görünüş); a) İki kenarı sabitlenmiş, b) İki kenarı serbest, c) Üstten görünüş.

Şekillerden de görülebileceği gibi, yüklü durum ile plaka kenarlarının sabitlendiği, yüksüz durum ile plaka kenarlarının serbest bırakıldığı ve yapıştırma bağlantılarının titreşim kuvvetlerine maruz bırakıldığı durumlar tanımlanmıştır. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları, titreşim sonrası incelenecek olan mekanik özelliklerin bulunmasında kullanılacak çekme numunelerinin (ASTM D5868 standardına uygun) çıkarılmasına imkan verecek şekilde hazırlanmıştır. Tanımlanan bu şartları sağlayabilmek için tek taraftan bindirmeli olarak yapıştırılan kompozit plakalara delikler açılmış ve kompozit plakalar civata – somun vasıtasıyla hazırlanmış düzeneğe monte edilmiştir. Titreşim motorları her iki sınır şartı için de ana plakaların

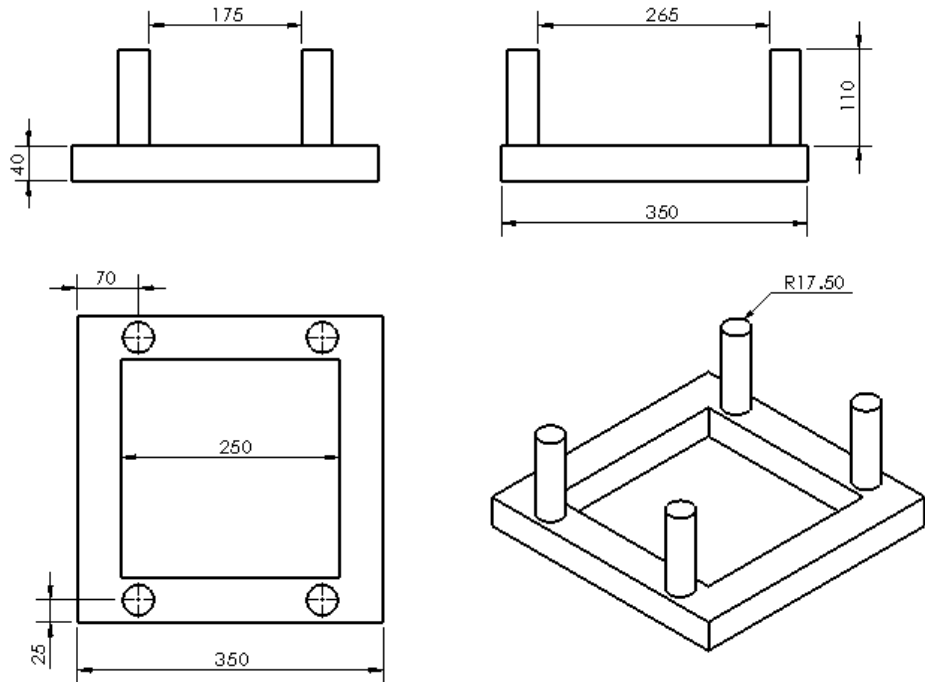
tam orta noktasından bağlanmıştır. Dönel şaftlarına yerleştirilmiş bir ağırlık sayesinde devirleri titreşime dönüştüren bu titreşim motorları, değişen sürelerde çalıştırılarak kompozit plakalara etkileyen farklı titreşim çevrimleri sağlanmıştır. Bu şekilde plakalar, titreşim motoru vasıtasıyla yorulmaya zorlanmıştır.

Yorulma durumları belirlenen her iki sınır şartı da çevresel etkenler göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Yüklü durumu sınır şartında; yapıştırıcılar, titreşim motorundan gelen titreşim yüklerini taşımaktadır. Bu durum, denizyolu taşıtlarının dalgalı denizdeki seyir hallerine veya karayolu taşıtlarının kasis ve engebeli yollardaki durumlarına örnek olarak verilebilir. Yüksüz durum sınır şartında; yapıştırıcılara hiçbir şekilde yük etki etmemekte olup, sadece titreşimden kaynaklanan salınım hareketlerine zorlanmaktadır. Bu duruma, uçakların inişleri esnasındaki yere çarpma durumlarında kanatlarında oluşan titreşimler, rüzgâr türbinlerinin kanatlarında, rüzgârın etkisiyle meydana gelen titreşimler örnek verilebilir. Bu çalışma kapsamında, yukarıda örneklerle bahsedilen problemlerin çözümüne yönelik araştırmalar yapılmıştır.

Titreşim düzenekleri her iki sınır şartı için özel olarak tasarlanmıştır. İki kenarı sabit sınır şartını oluşturmak için satın alınan titreşim sehpaalarına ilişkin teknik çizimler Şekil 4.22'de gösterilmektedir. Tasarlanan sehpaaların üzerine titreşim motorlarıyla birlikte yapıştırılmış kompozit plakaların bağlanması amaçlanmış, gerekli ölçülendirmeler titreşim sonrasında standart çekme numunelerinin elde edilebileceği boyutları da göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bu sehpaalar, Karaca Mekatronik Firması'nda (İzmir, Türkiye) kesilip monte edilmiş halde tarafımıza teslim edilmiştir. İki kenarı serbest sınır şartını oluşturmak için kullanılan sehpa ise, bölümümüz bünyesinde atıl halde bulunan kalıp çerçevesinden hazırlanmıştır. Bu sehpaaya ilişkin teknik çizimler Şekil 4.23'te verilmiştir.

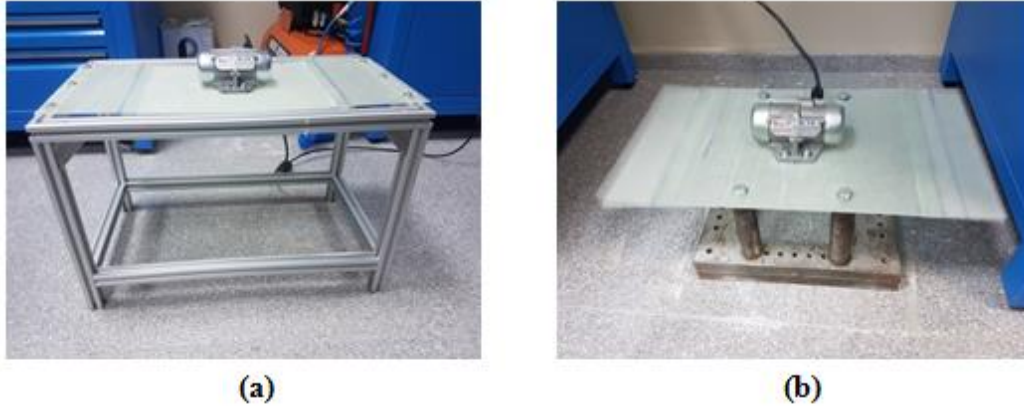


Şekil 4.22: İki kenarı sabit şartları oluşturmak için tasarlanan titreşim sehpasının teknik ölçüleri (mm).



Şekil 4.23: İki kenarı serbest şartları oluşturmak için tasarlanan titreşim sehpasının teknik ölçüleri (mm).

İki kenarı sabitlenmiş ve iki kenarı serbest bırakılan durumlara ilişkin hazırlanan sehpalara titreşim motorlarıyla birlikte yapıştırılmış plakaların yerleştirildiği deney düzeneklerinin çalışma esnasındaki görselleri Şekil 4.24’te gösterilmektedir.



Şekil 4.24: Titreşim test düzenekleri; a) İki kenarı sabitlenmiş, b) İki kenarı serbest.

Deneylerde kullanılan titreşim motoru, Kem-P Elektrik Motor Pompa İth. İhr. San. Tic. Ltd. Şti. (İzmir, Türkiye) tarafından üretilen MV-2 modeldir. Titreşim motorunun teknik özellikleri Tablo 4.4’te verilmektedir.

Tablo 4.4: Titreşim motorunun teknik özellikleri.

Model	Frekans (Hz)	Devir (dev/dak)	Santrifüj Kuvveti (N)	Ağırlık (Kg)
MV-2M	50	3000	220	1.6

Tablo 4.4’te görüldüğü üzere titreşim motoru 3000 dev/dak hızında çalışırken bulunduğu alana 220 N’luk dinamik kuvvet uygulamaktadır. Yapılan titreşim deneyleri boyunca tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit plakalara etkileyen bu kuvvetin etkime süresi ve sayısı Tablo 4.5’te gösterilmiştir. Farklı parametre numaralarıyla belirtilmiş dört farklı yükleme durumu mevcuttur. 1.5×10^5 - 24×10^5 çevrim sayısı arasında değişen yorulma döngüleri tercih edilmiş ve üst limit 24×10^5 olarak belirlenmiştir. Bu limitin belirlenmesinde, motorun riske girmeden uygulayabileceği, duraksamadan çalışması durumunda önerilen 14 saatlik (840 dak.) çalışma süresi göz önünde bulundurulmuştur. Her iki sınır şartında da 24×10^5 devir boyunca titreşime maruz bırakılan plakaların kopma kuvveti, titreşime maruz

bırakılmayan plakaların kopma kuvvetinin hemen hemen yarısı kadar olduğu için yapılan deneyler ve araştırmalar kapsamında maksimum titreşim parametresi 24×10^5 seçilmiştir.

Tablo 4.5: Titreşim çevrimi parametreleri.

Parametre Numarası	Titreşim Süresi (dak.)	Çevrim sayısı ($\times 10^5$)
1	50	1.5
2	100	3
3	400	12
4	800	24

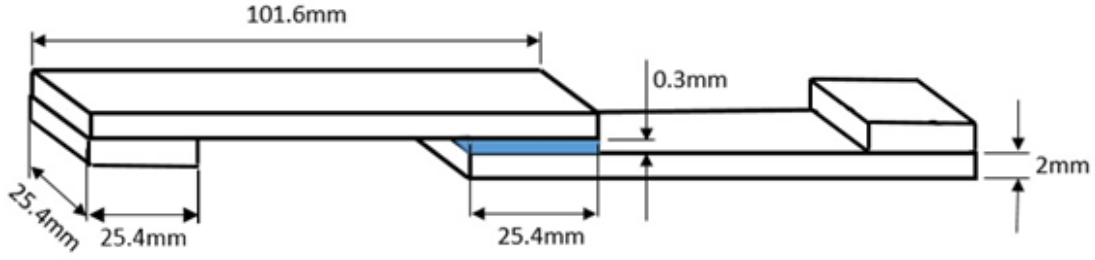
Yapılan titreşim deneyleri boyunca her bir yükleme durumu için 3'er adet yapıştırılmış plaka kullanılmıştır. Titreşime maruz bırakılan plakalar, çekme numunesine uygun olacak şekilde hazırlanmış ve bu numunelere uygulanan çekme testleri ile titreşime maruz bırakılan yapıştırmalı bağlantılardaki mekanik davranışlar incelenmiştir.

4.5.3 Çekme deneylerinin uygulanması

Çekme testi, yapıştırıcılı bağlantı dizaynında kullanılan en yaygın metotlardandır. Çünkü bu test, bağlantıdaki şekil değişim, rijitlik ve dayanıma ilişkin temel verilerin tespit edilmesine imkan sunar.

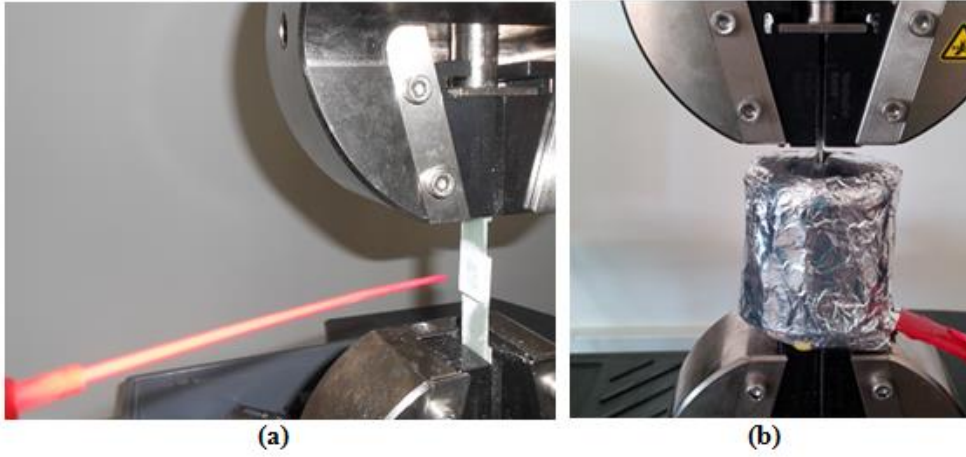
Birbirine yapıştırılan plakaların kürlenme işlemi tamamlandıktan sonra, plakalar sulu kesim cihazında kesilerek çekme testi standartlarına uygun numuneler haline getirilmiştir. Çekme testinde ASTM D5868 [65] test standardı uygulanmıştır. Bu standarda uygun olarak hazırlanan numuneler, Shimadzu 100kN test cihazında çekme deneyine tabi tutulmuştur. ASTM D5868 standardına uygun hazırlanan çekme numunesi ölçüleri şekil 4.25'te gösterilmektedir.

Çekme deneyi için hazırlanan numuneler, cihazın çenelerine bağlandıktan sonra, 1mm/dak ilerleme hızında çekilerek, numunelerin çekme doğrultusundaki uzamaya bağlı maksimum kopma kuvvetleri belirlenmiştir. Çekme deneylerinin bir kısmı numunelere uygulanan farklı sıcaklık değerleri altındaki eksenel darbeler sonrasında gerçekleştirilirken, bir kısmı da yapıştırılan plakalara uygulanan iki farklı sınır şartlarındaki titreşimler sonrasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.25: ASTM D5868 Standardına uygun numune ölçüleri.

Farklı sıcaklık değerlerinde uygulanan çekme deneyi görselleri Şekil 4.26’da gösterilmektedir. Burada, ısıtma işlemi özel olarak tasarlanan rezistans yardımıyla sağlanırken soğutma işlemi, Beta F50 soğutucu sprey ile gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyinin uzun sürmesi nedeniyle soğutma işlemlerinde sürekli olarak çekmeye maruz bırakılan numunelerin yapıştırılan bölgelerindeki sıcaklık değerleri kızılötesi termometre ile kontrol edilmiştir.



Şekil 4.26: Farklı sıcaklıklarda uygulanan çekme deneyleri; a) Soğutma işlemi, b) Isıtma işlemi.

Çekme deneylerinin uygulanması sonrasında numunelerden elde edilen kopma kuvveti – uzama diyagramlarına ilişkin veriler “Sonuçlar ve Tartışma” bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Üretimi tamamlanan cam/epoksi kompozit malzemelere ve bu malzemelerin yapıştırılmalı bağlantılarına uygulanan testler bir önceki “Malzeme ve Metot” bölümünde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu bölümde ise, tek taraftan bindirmeli yapıştırılmalı bağlantılara uygulanan testlerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

5.1 Kompozit Bağlantıların Eksenel Darbe Yükleri Altındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi

Bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, epoksi esaslı iki farklı yapıştırıcı eksenel doğrultuda tek ve tekrarlı etkiyen darbe enerjilerine maruz bırakılmış ve mekanik davranışlarının karşılaştırılması sonrasında üstün özellik gösteren yapıştırıcı seçilmiştir. İkinci aşamada ise; karşılaştırma sonrasında seçilen yapıştırıcının farklı sıcaklıklardaki farklı tek darbe enerjilerine maruz bırakıldıktan sonraki mekanik davranışları incelenmiştir.

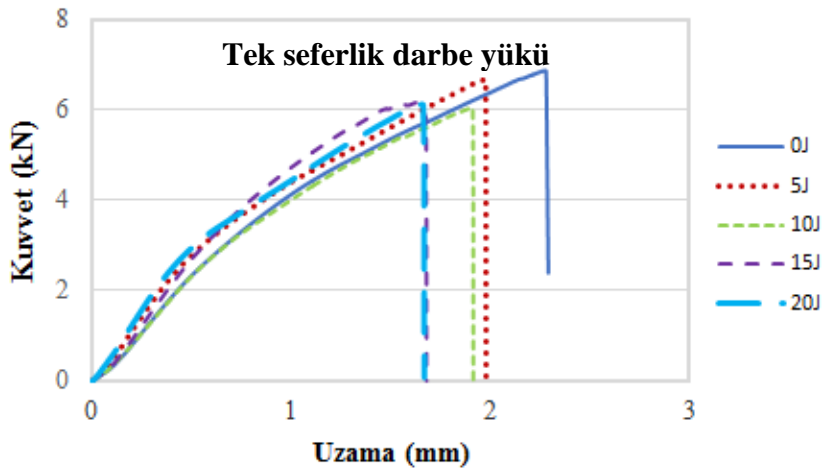
5.1.1 Farklı yapıştırıcılarla yapıştırılan kompozit bağlantıların tekrarlı eksenel darbe yükleri altındaki mekanik davranışları

Bu çalışma kapsamında, yapıştırılan kompozit plakaların takviye elemanı olarak 6 katlı $[0/90]_6$ oryantasyonda istiflenmiş, 500g/m^2 ağırlığa sahip örgülü cam elyaf kullanılmıştır. Epoksi esaslı yapıştırıcılarla yapıştırılan tek taraftan bindirmeli kompozit bağlantılarda iki farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Bu yapıştırıcılardan biri Henkel Firması tarafından üretilen Loctite 9466, diğeri ise 3M Firması tarafından üretilen DP-460 isimli yapıştırıcılardır. Bu iki yapıştırıcı; otomotiv, uçak, denizcilik, konfeksiyon vb. birçok sektörde yer alan ve metalden kompozite, ahşaptan plastiğe kadar birçok malzemenin birbirine yapıştırılmasında faydalanılan, tokluk değerleri yüksek, dayanıklı yapıştırıcılar oldukları için bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.

Eksenel darbe yüklerine karşı gösterecekleri mekanik davranışlarının incelenmesi ve birbirleriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır.

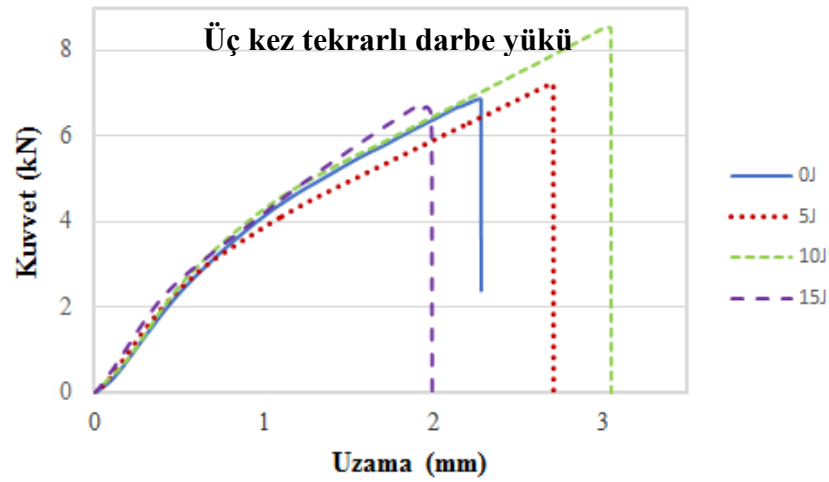
Birbirleriyle karşılaştırılması amaçlanan bu bağlantılara eksenel doğrultuda sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 Joule enerji değerlerine sahip tekrarlı ve tekrarsız darbe yükleri uygulanmış ve mekanik davranışları incelenmiştir. Tekrarlı darbe yüklerinde her bir numuneye art arda 3'er kere aynı değerde çarpma enerjisi, tekrarsız darbe yüklerinde ise, her bir numuneye tek seferde çarpma enerjisi etki ettirilmiştir. Uygulanan tekrarlı ve tekrarsız darbe yükleri sonrasında, kompozit bağlantılar çekme testine tabi tutularak, elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

Şekil 5.1'de belirtilen kuvvet - uzama diyagramı, Loctite 9466 epoksi yapıştırıcı ile bağlanan numunelere tek seferlik eksenel darbe uygulanması ve sonrasında çekme deneyine tabi tutulması neticesinde elde edilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi, artan darbe enerjisi, bağlantının taşıyabileceği maksimum yükü, başka bir deyişle çekme dayanımını düşürmektedir. Bağlantı dayanımına en az etki eden enerji seviyesi en düşük darbe enerjisi olan 5J'dür. Darbe enerjisinin etkimeydiği numunelerde görülen maksimum kuvvet 6.9kN iken, numunelere 20 J darbe enerjisinin etkimesi sonucunda, kopma kuvveti 6kN civarında elde edilmiştir. Bu değer, darbe almamış numunede elde edilen kopma kuvveti değerine kıyasla %13 daha azdır.



Şekil 5.1: Tek seferlik eksenel darbe uygulanmış Loctite 9466 yapıştırıcılı bağlantının kuvvet – uzama diyagramı.

Şekil 5.2’de Loctite 9466 yapıştırıcılı bağlantıya, eksenel yönde üç kez tekrarlı darbe uygulandıktan sonra yapılan çekme testleri sonuçları görülmektedir. 20J enerji değerinde genellikle üçüncü tekrarda numune, yapıştırılan kısımlarından hasara uğradığından bu enerji değerinde çekme testi uygulanamamıştır. Çekme testleri neticesinde elde edilen kuvvet – uzama diyagramlarından, üç kez tekrarlı eksenel darbenin Loctite-9466 ile yapıştırılmış bağlantının dayanımını ve çekme uzamasını arttırdığı görülmüştür. Burada, numunelere 10J eksenel darbe uygulanmasıyla bağlantı kopma kuvvetinin maksimuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Maksimum değer, darbe uygulanmayan numunelerin kopma kuvvetinden yaklaşık %32 daha fazladır. Eksenel darbe enerjisinin 5J ve 15J etkimesi durumunda, numunelerin dayanım değerlerinde benzerlik ve 10 J darbe enerjisindeki duruma kıyasla, çekme numunelerindeki uzamalarda azalma gözlemlenmiştir.

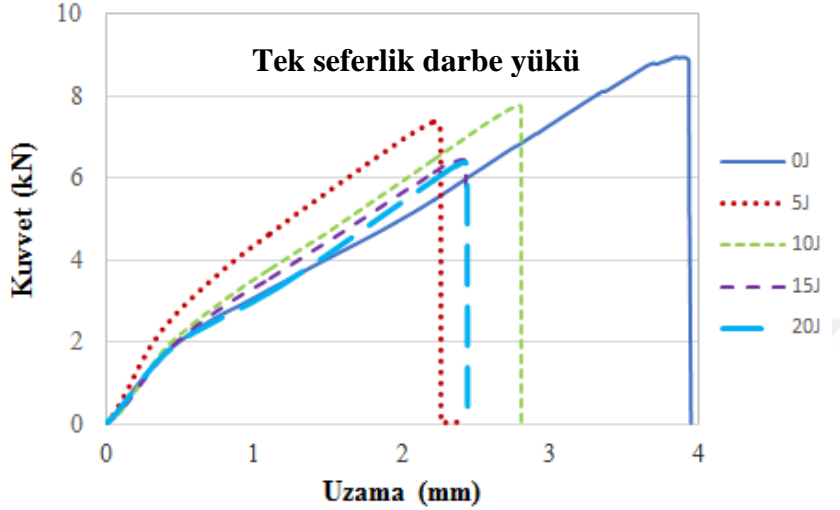


Şekil 5.2: Üç kez tekrarlı eksenel darbe uygulanmış Loctite 9466 yapıştırıcılı bağlantının kuvvet – uzama diyagramı.

Şekil 5.3’de DP – 460 epoksi yapıştırıcılarla yapıştırılan bağlantılara tek seferlik eksenel darbe uygulanması ve sonrasında çekme testine tabi tutulmasıyla elde edilmiş kuvvet – uzama diyagramları yer almaktadır.

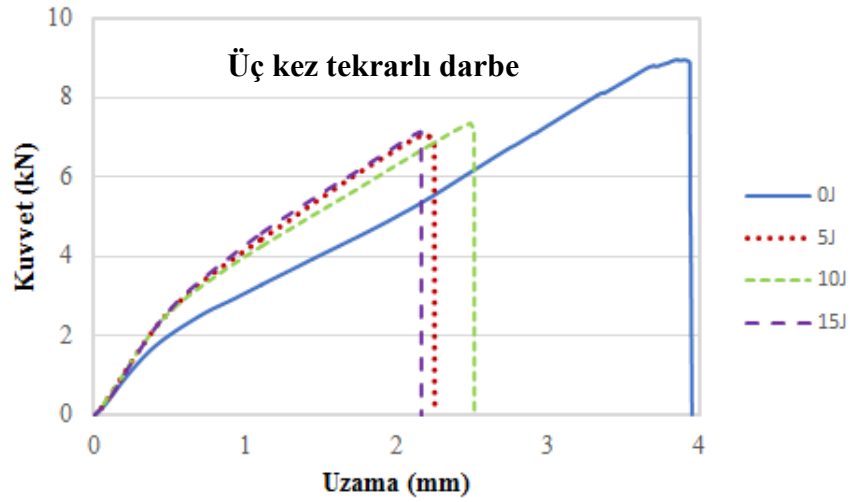
Belirtilen kuvvet – uzama diyagramına göre; numunelere uygulanan eksenel darbeler çekme dayanımını azaltmıştır. Bu durum, Loctite 9466 yapıştırıcının kullanıldığı bağlantıların davranışlarıyla benzerlik göstermektedir. Numunelere maksimum darbe enerjisi (20J) uygulandığında, bağlantıların kopma kuvvetinde %26’lık bir düşüş görülmüştür. Bu değer, Loctite 9466 yapıştırıcısının kullanıldığı tek seferlik eksenel

darbe durumunda bulunan değerin iki katıdır. Darbe uygulanan numuneler arasında, maksimum çekme kuvveti 10J aksel darbe enerjisi altında olmuştur. 15J ve 20J'lük enerjilerde görülen kuvvetler ise minimum değerlerde olup, bu değerler birbirlerine çok yakındır.



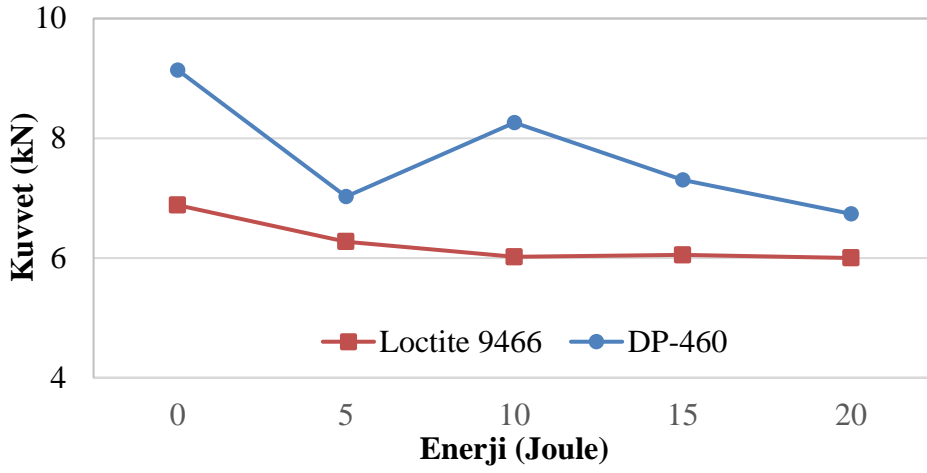
Şekil 5.3: Tek seferlik aksel darbe uygulanmış DP-460 yapıştırıcılı bağlantının kuvvet – uzama diyagramı.

Şekil 5.4'de verilen kuvvet-uzama eğrileri ise, aksel yönde üç kez art arda tekrarlı darbe yüklerine maruz kalmış DP-460 yapıştırıcılı bağlantılara aittir. Burada da, tek seferlik darbe uygulamasında elde edilen sonuçlara benzer şekilde, numunelere uygulanan darbelerin kopma kuvvetlerini azalttığı görülmüştür. Aksel darbe yükü uygulanan numuneler birbirleriyle kıyaslandığında ise, yine 10J aksel darbe enerjisinde maksimum kopma kuvvetinin ortaya çıktığı belirlenmiştir. Bu durum, tek seferlik darbe almış numunelerden elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Ancak, darbe almamış numunelerden elde edilen değerlere nazaran, tek seferlik ve üç kez tekrarlı darbe alan numunelerdeki düşüş kıyaslandığında, tekrar sayısının artması ile kopma kuvvetlerinde yaklaşık %10'luk bir düşüş görülmüştür.

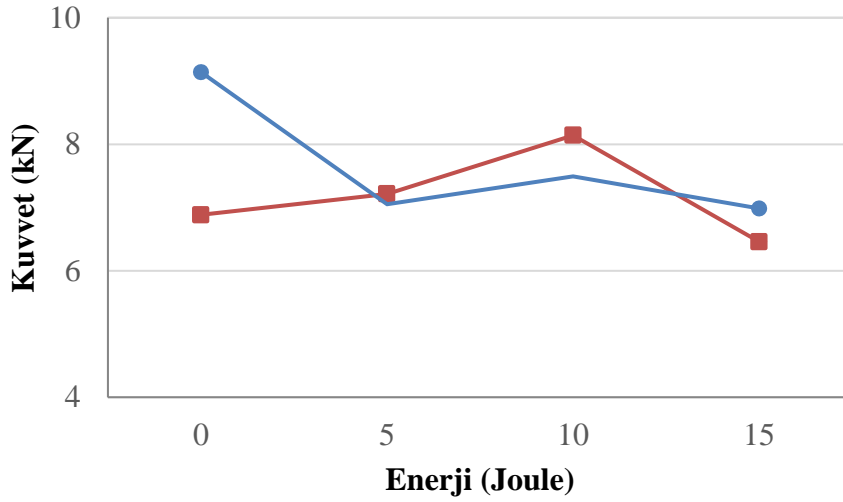


Şekil 5.4: Üç kez tekrarlı eksenel darbe uygulanmış DP-460 yapıştırıcılı bağlantının kuvvet – uzama diyagramı.

Şekil 5.5 ve 5.6'da, iki farklı yapıştırıcının kullanıldığı bağlantıların, sırasıyla tek seferlik ve üç kez tekrarlı darbe enerjilerinde gösterdikleri kopma kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Tek seferlik eksenel darbe enerjisi uygulanan DP-460 yapıştırıcılı numunelerin kopma kuvvetlerinin, Loctite 9466 yapıştırıcılı bağlantıya göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Oysaki, tekrarlı eksenel darbe uygulanan numunelerde DP-460 yapıştırıcılı bağlantının kopma kuvveti sadece 15J enerji değerinde Loctite 9466 yapıştırıcıya kıyasla yüksek çıkmıştır. 20J enerjinin uygulandığı üç kez tekrarlı darbelerde tüm numuneler hasara uğramıştır. Ayrıca, tekrarlı darbe yüklerindeki bağlantı kopma kuvvetlerinin her iki yapıştırıcı için de birbirine yakın olduğu görülmüştür. Üç kez tekrarlı darbe durumunda en yüksek kopma kuvveti, her iki yapıştırıcı için de 10J enerji değerinde ortaya çıkmıştır. Numunelere eksenel darbenin uygulanmadığı durumlardaki mekanik özellikleri incelendiğinde; Loctite 9466 ile yapıştırılan kompozit bağlantıların, çekme deneyi sonrasında, yaklaşık olarak 6.88kN'luk kuvvette, DP-460 ile yapıştırılan kompozit bağlantıların 9.14kN'luk kuvvette hasara uğradığı görülmüştür. Başka bir deyişle, eksenel darbe uygulanmayan bağlantılarda, DP-460 yapıştırıcının kopma dayanımı Loctite 9466'ya göre 1.33 kat daha fazladır.

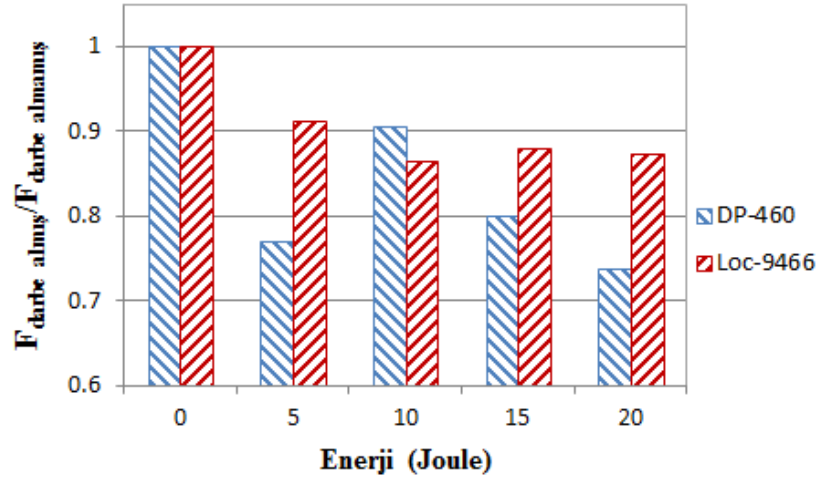


Şekil 5.5: Tek seferlik darbe değerlerinde yapıştırırmalı bağlantıların kopma kuvvetleri.

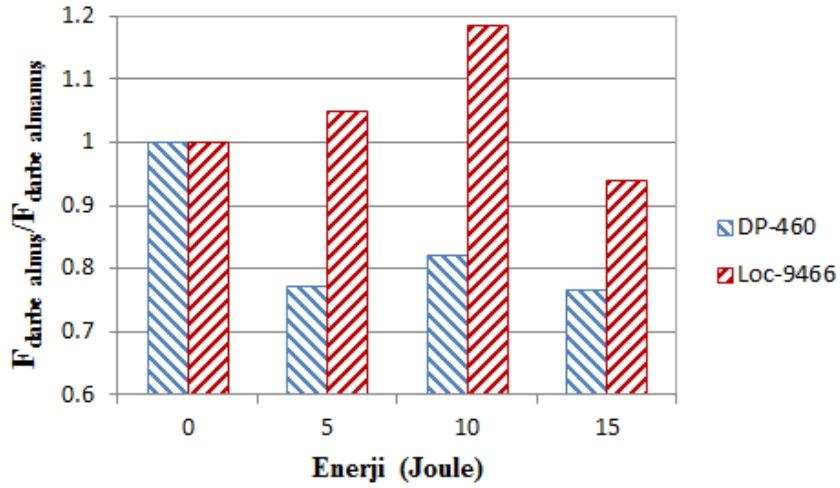


Şekil 5.6: Üç kez tekrarlı darbe değerlerinde yapıştırırmalı bağlantıların kopma kuvvetleri.

Her iki yapıştırıcının aksenal darbelerle karşı dayanımlarını daha net karşılaştırabilmek için darbe almış bağlantıların kopma kuvvetlerinin ($F_{\text{darbe almış}}$), darbe almamış bağlantıların kopma kuvvetleri ($F_{\text{darbe almamış}}$) ile normalize edildiği grafikler Şekil 5.7'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.7: Darbe almamış bağlantılara göre normalize edilmiş kopma kuvvetlerinin karşılaştırılması; a) Tek seferlik darbe, b)  kez tekrarlı darbe.

Eksenel darbenin uygulanmadığı durumlarda ve yüksek enerji seviyelerinde uygulanan gerek tek gerekse tekrarlı darbelerde DP-460 yapıştırıcısının gösterdiği yüksek kopma kuvvetleri sebebiyle, ilerleyen çalışmalarda bu yapıştırıcının kullanılmasına karar verilmiştir.

5.1.2 Kompozit bağlantıların farklı sıcaklıklarda etkiyen aksel darbe yükleri altındaki mekanik davranışları

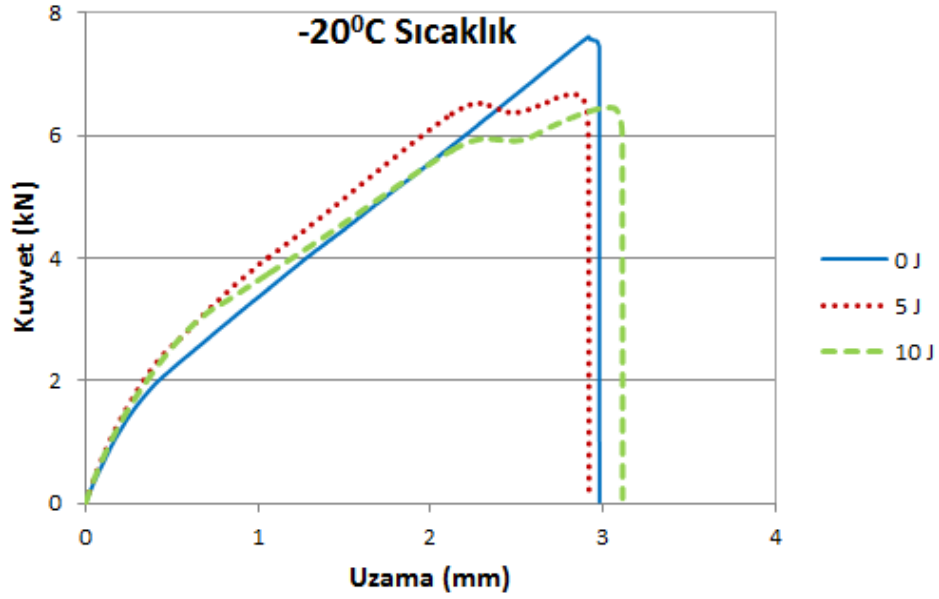
Bu çalışma kapsamında, yapıştırılan kompozit plakalarda takviye elemanı olarak 8 katlı $[0/90]_8$ oryantasyonda istiflenmiş, 500g/m^2 ağırlığa sahip örgülü cam elyaf kullanılmıştır.

DP-460 epoksi yapıştırıcı ile tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantılara -20°C , 0°C , 20°C , 40°C ve 60°C sıcaklıklarda 5J, 10J, 15J ve 20J enerji değerlerinde aksel darbe testleri uygulanmıştır. Ayrıca mukayese amaçlı olarak darbenin uygulanmadığı (0J) bağlantıların testleri de gerçekleştirilmiştir. Hem aksel darbe testleri esnasında hem de çekme testleri uygulanırken ısıtma ve soğutma işlemlerine devam edilmiştir (Şekil 5.8).



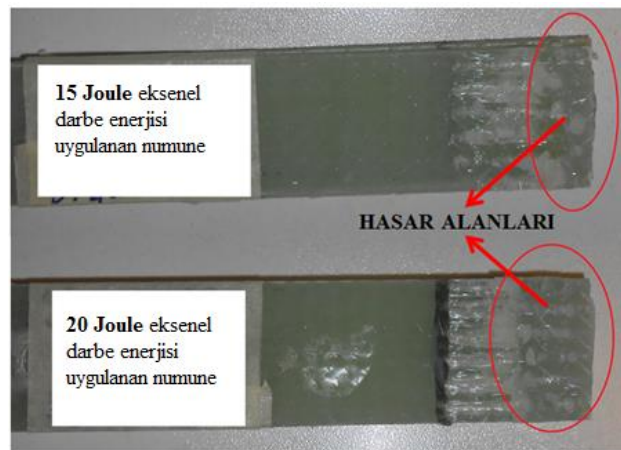
Şekil 5.8: Aksel darbe ve çekme testleri esnasında ısıtma ve soğutma işlemleri

Şekil 5.9'da, -20°C sıcaklıkta farklı enerjilerde darbe almış ve sonrasında aynı sıcaklıkta çekme testine tabi tutulmuş yapıştırırmalı bağlantılar için elde edilmiş kuvvet – uzama eğrileri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bağlantıya uygulanan darbe enerjisinin değerine bağlı olarak kopma kuvveti maksimum %11 oranında düşmüştür. 15J ve 20J enerjili darbe yüklerine maruz kalan bağlantılar bu sıcaklıkta hasara uğramıştır. Bu sebepten çekme testleri yapılamamış ve kuvvet – uzama eğrileri elde edilememiştir. Bu durum, -20°C 'de yapıştırıcının tutunma kuvvetlerinin azaldığını göstermektedir.



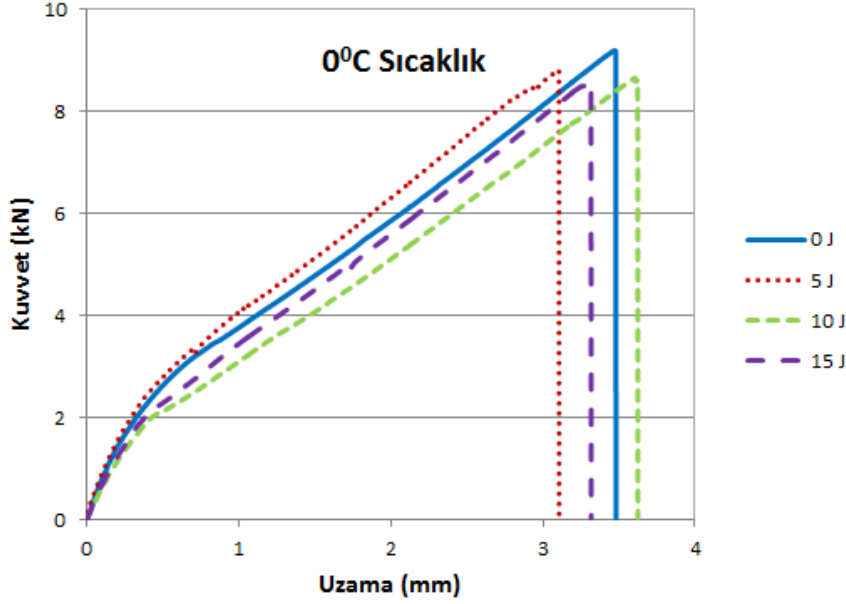
Şekil 5.9: -20°C Sıcaklıktaki kuvvet – uzama eğrileri.

-20°C sıcaklıkta, 15J ve 20J eksenel darbe enerjisi uygulanması sonrasında hasar gören numunelerin yapıştırılan yüzeylerinde oluşan hasar alanları Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Şekil 5.10'da gösterilen plakaların yapıştırma bölgesi kenarından hasara uğradıkları ve 20J eksenel darbe enerjisi altında hasar alanının daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca, soğuk ortamda yapılan eksenel darbe deneylerinde hasara uğrayan numunelerdeki yapıştırıcıların son derece kırılğan bir hal aldığı ve yüksek darbe enerjisi değerlerinde oluşan hasar esnasında büyük bir ses enerjisinin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.



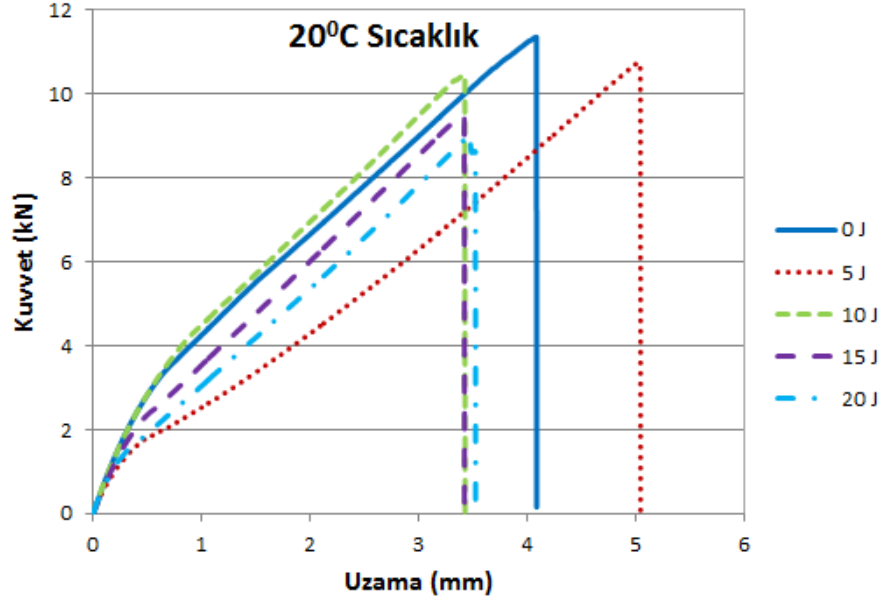
Şekil 5.10: Yapıştırılan yüzeylerde oluşan hasar alanları.

Şekil 5.11’de 0°C sıcaklıkta farklı darbe enerjileri uygulanan kompozit bağlantıların çekme deneyi sonrasında elde edilen kuvvet – uzama eğrileri gösterilmektedir. Bu sıcaklıktaki numuneler 20J aksel darbe enerjisine dayanamayıp, hasara uğramıştır. Buradaki kopma kuvvetlerinde, -20°C’de elde edilen kopma kuvveti değerlerine nazaran artış görülmüştür. Aksel darbe enerjisinin giderek artması ile birlikte kompozit bağlantıların kopma kuvvetleri azalmıştır.



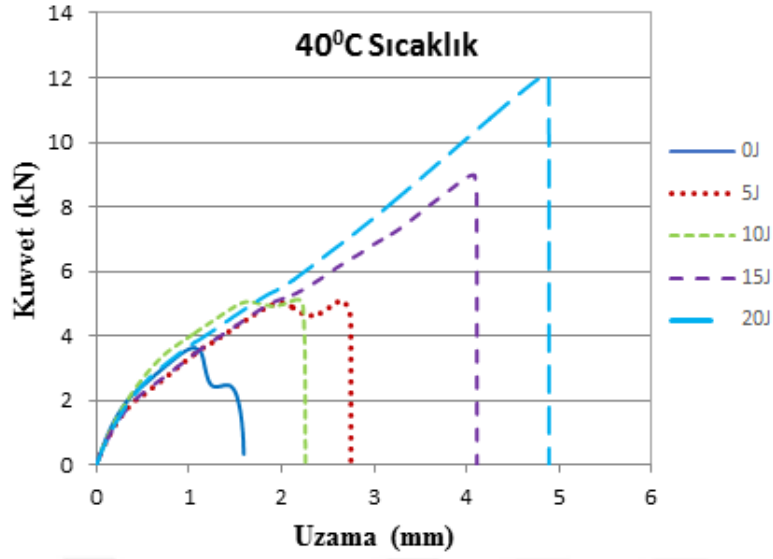
Şekil 5.11: 0°C Sıcaklıktaki kuvvet – uzama eğrileri.

Şekil 5.12’de oda sıcaklığı olarak nitelendirilebilen 20°C sıcaklığında farklı darbe enerjileri altında uygulanan malzemelerin kuvvet – uzama eğrileri gösterilmektedir. Burada da 0°C sıcaklıkta olduğu gibi, aksel darbe enerjisinin artması ile kopma kuvvetleri azalmıştır. Bağlantılar, bu sıcaklık değerinde, -20°C ve 0°C’de görülmeyen 20J aksel darbe enerjisine dayanabilmiştir. Ayrıca, 20°C sıcaklıktaki kopma kuvvetlerinde, düşük sıcaklıklardaki elde edilen kopma kuvvetlerine nazaran, bir artışın olduğu görülmüştür.



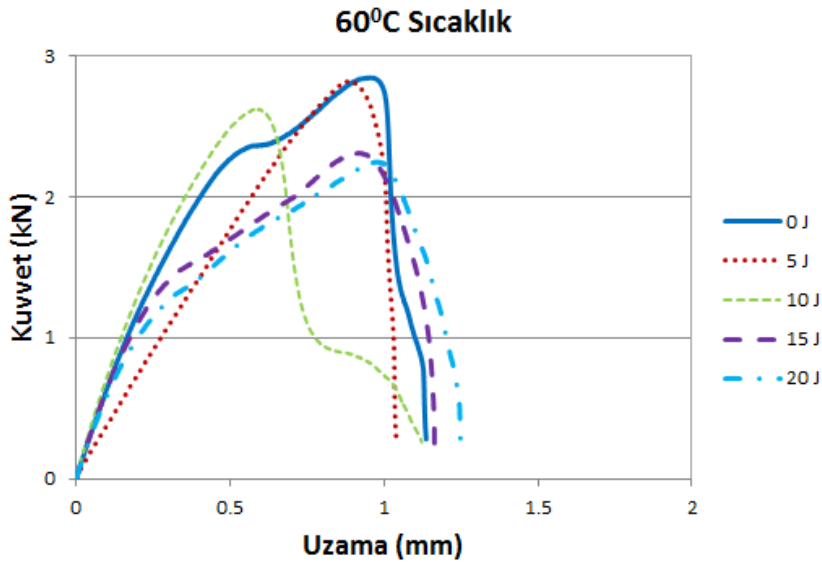
Şekil 5.12: 20°C Sıcaklıktaki kuvvet – uzama eğrileri.

Şekil 5.13'te 40°C sıcaklığında farklı darbe enerjileri uygulanan kompozit bağlantıların çekme deneyleri sonrasında elde edilen kuvvet – uzama eğrileri gösterilmektedir. Burada, yapıştırırmalı bağlantının 40°C'den düşük sıcaklıklarda gösterdiği davranıştan çok farklı davranış sergilediği görülmüştür. Daha düşük sıcaklıklarda elde edilen sonuçların tersine, artan darbe enerjisinin bağlantı kopma dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Darbe almamış bağlantıya nazaran, 20J enerjili darbe almış bağlantının kopma mukavemetinin %240 oranında arttığı görülmüştür. 5, 10 ve 15J darbe enerjilerinde görülen dayanım artışı, 20J'deki kadar büyük olmasa da, darbe almamış numune dayanımına göre yine de fazladır. Dayanımdaki artış sırasıyla %35, %40 ve %94'tür. Bu durum, 40° sıcaklıkta uygulanan eksenel darbe enerjisinin artmasıyla birlikte, yapıştırıcının iç sürtünmelerinin artması dolayısıyla kompozit plakaların DP-460 yapıştırıcıya daha iyi tutunmasıyla açıklanabilir. Şekil 5.13'te görüldüğü üzere, numunelere uygulanan eksenel darbe enerjisi değerleri düştükçe, özellikle darbesiz, 5J ve 10J değerlerinde eğrilerde kuvvetin kademeli olarak düştüğü görülmekte, bu durum malzeme yapısında bozulmalara işaret etmektedir.



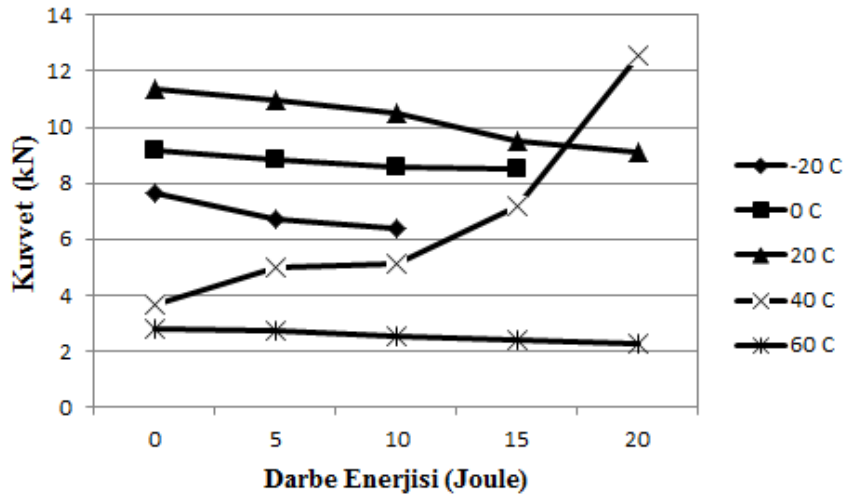
Şekil 5.13: 40°C Sıcaklıktaki kuvvet – uzama eğrileri.

Şekil 5.14'te ise, 60°C sıcaklıkta farklı eksenel darbe enerjileri uygulanan numunelerin kuvvet – uzama eğrileri gösterilmektedir. Bu sıcaklıktaki kopma kuvveti değerleri gerek darbe almamış, gerekse farklı enerjilerde darbe almış numuneler için diğer sıcaklık değerlerinde elde edilenlere göre çok daha düşük çıkmaktadır. Bu durum, uygulanan sıcaklığın, oda sıcaklığında kürlenmiş yapıştırıcıya ait camsı geçiş sıcaklığına [97] eşit olmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü, camsı geçiş sıcaklığına kadar ısıtılmış bir yapıştırıcının zincir yapısı bozulmakta ve yapıştırıcı yarı akışkan görünen viskoz bir hal almaya başlamaktadır.

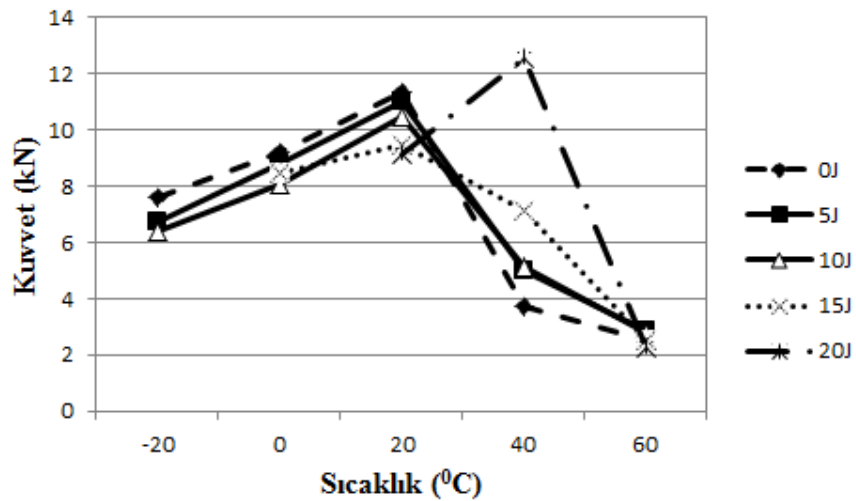


Şekil 5.14: 60°C Sıcaklıktaki kuvvet – uzama eğrileri.

Şekil 5.15 ve 5.16’da sırasıyla farklı eksenel darbe enerjisi ve farklı sıcaklık değerlerinde hasara uğrayan bağlantıların kopma kuvvetlerinin kıyaslanabildiği grafikler gösterilmektedir. Grafiklerde, 20°C sıcaklıkta kompozit bağlantılara etkiyen eksenel darbe yüklerinde görülen kopma kuvvetlerinin, diğer sıcaklıklardaki kopma kuvvetlerine nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Ortam sıcaklığının -20°C’ye düşürülmesi neticesinde bağlantıların kopma kuvvetleri hemen hemen yarıya inmektedir. Eksenel darbe enerjilerindeki artış, kompozit bağlantıların kopma kuvvetlerini düşürürken, sadece 40°C sıcaklıkta yapılan deneylerde aksine bir durum söz konusudur.



Şekil 5.15: Farklı eksenel darbe enerjilerinde kopma kuvvetleri.



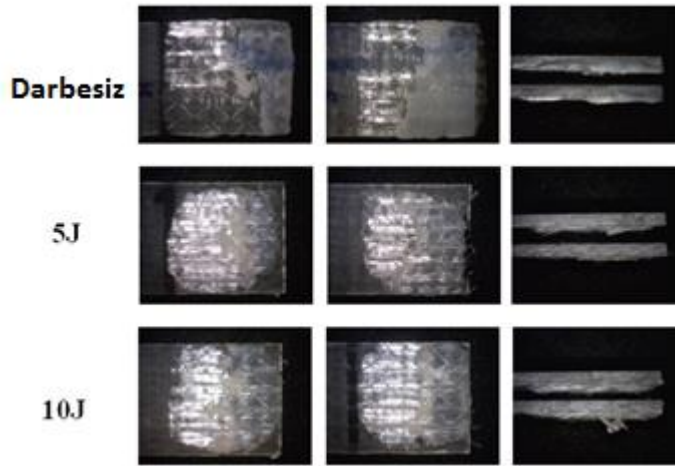
Şekil 5.16: Farklı ortam sıcaklıklarındaki kopma kuvvetleri.

Oda sıcaklığı olarak kabul edilen 20°C sıcaklıkta elde edilen kopma kuvvetleri diğerlerine göre daha yüksek olduğundan, bir sonraki çalışma olan kompozit bağlantıların titreşim etkileri altında mekanik özelliklerinin incelendiği bölümde oda sıcaklığı baz alınmıştır.

5.1.3 Hasar modları

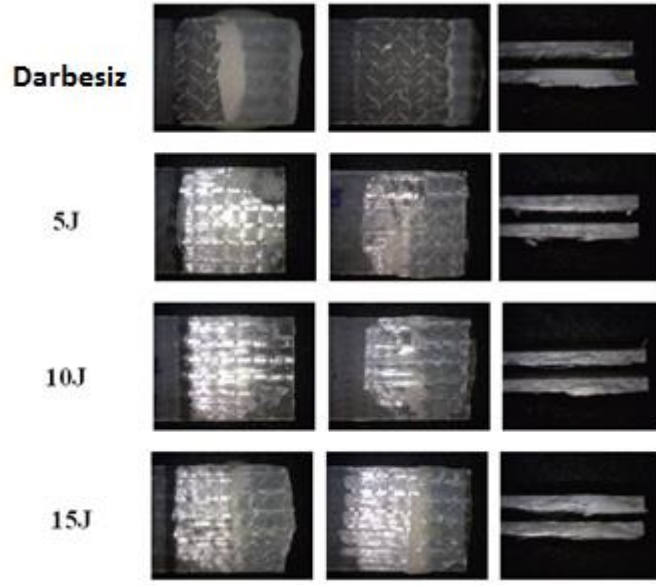
Farklı sıcaklıklarda (-20°C, 0°C, 20°C, 40°C ve 60°C) aksenal darbe uygulandıktan sonra, çekme deneyine tabi tutulan numunelerin, yapıştırılmış yüzeylerinde oluşan hasarlar incelenmiştir. Hasar görüntülerinde Dino-Lite dijital mikroskop kullanılmış ve yorumlarda ASTM 5573 [93] standardı göz önünde bulundurulmuştur. -20°C, 0°C, 20°C, 40°C ve 60°C sıcaklıklarda aksenal darbe almış numunelerin çekme deneyleri sonrasında meydana gelen hasar görüntüleri sırasıyla Şekil 5.17 – 5.21’de verilmiştir.

Şekil 5.17’de görüldüğü üzere -20°C’de, numunelere uygulanan aksenal darbe enerjisi değeri arttıkça, yapıştırılan kompozitlerin yüzeylerinde görülen hasarın az miktarda fiber yırtılma hasarından (light fiber tear failure) fiber yırtılma hasarına (fiber tear failure) doğru değiştiği saptanmıştır. Bu durum, plakaların yanal görüntüsündeki fiberlerin giderek saçaklanması ile kolaylıkla anlaşılabilir.



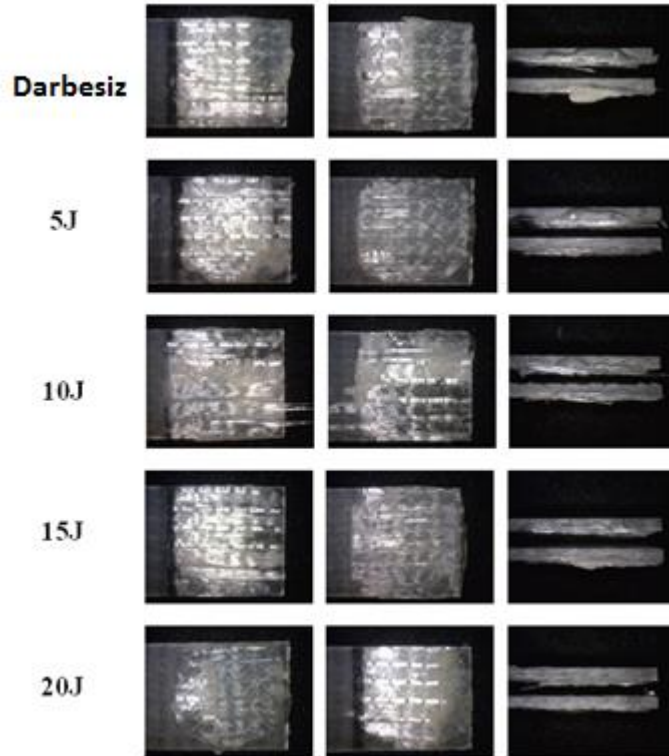
Şekil 5.17: -20°C sıcaklığındaki hasar görüntüleri.

Şekil 5.18’de 0°C sıcaklıkta, -20°C’deki hasarlara benzer görüntüler elde edilmektedir. Aksenal darbe enerjisi değeri arttıkça, numunelerdeki hasar, az miktarda fiber yırtılma hasarından fiber yırtılma hasarına doğru ilerlemektedir.



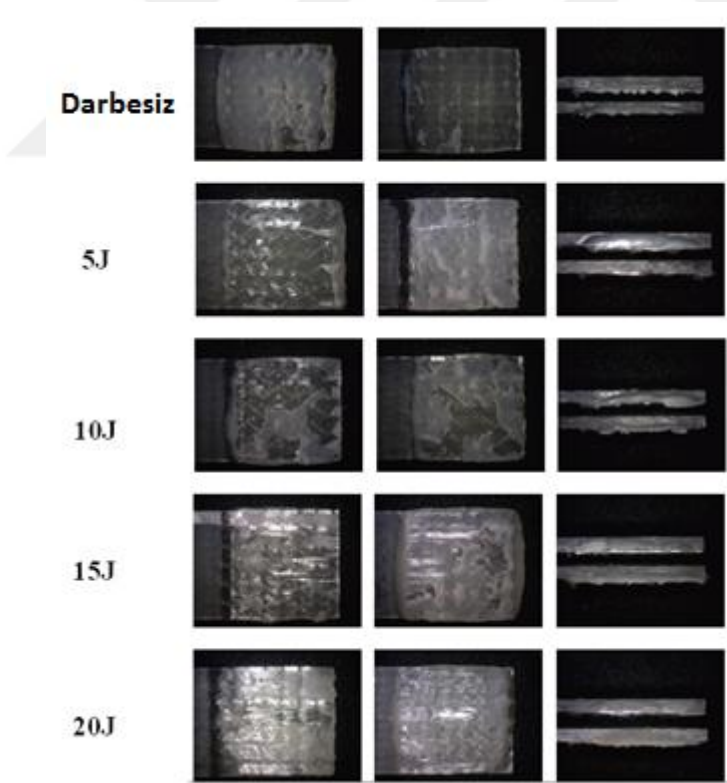
Şekil 5.18: 0°C sıcaklığındaki hasar görüntüleri.

Şekil 5.19’da oda sıcaklığı referansı olarak da değerlendirilebilecek olan 20 °C sıcaklıktaki tüm hasar görüntülerinde fiber yırtılma hasarı görülmektedir.



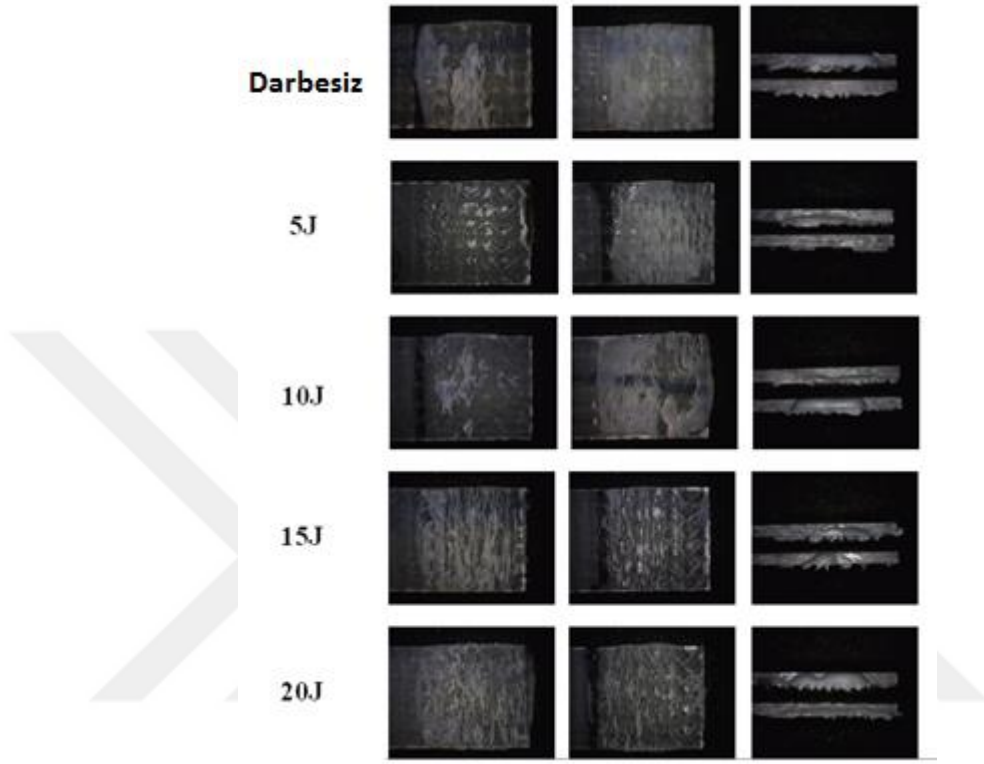
Şekil 5.19: 20°C sıcaklığındaki hasar görüntüleri.

Numunelerde, 40°C sıcaklığında meydana gelen hasar görüntüleri incelendiğinde (Şekil 5.20); yapıştırıcı renginde matlaşmanın meydana geldiği ve yapıştırıcının bu sıcaklık değerinde yumuşadığı görülmüştür. Numunelerde oluşan hasarlarda, düşük darbe enerjisi değerlerinde (0J, 5J, 10J) yüzeyler arasından ayrışmaların olduğu, böylelikle adezyon hasarının meydana geldiği görülmektedir. Eksenel darbe enerjisinin 15J değerinde uygulanması neticesinde numuneler yapışma yüzeylerinden ayrılmakta, adezyon hasarı ile birlikte az miktarda fiberden yırtılma hasarının da meydana geldiği görülmektedir. Eksenel darbe enerjisinin 20J değerinde uygulanması sonrasında elde edilen hasarlı yüzeylerde ise kısmi olarak adezyon hasarının görülmesinden ziyade, fiberden yırtılma hasarı görülmektedir. 40°C sıcaklıkta uygulanan deneylerdeki hasar modları incelendiğinde; artan darbe enerjisi ile birlikte bağlantı dayanımı da artmıştır. Adezyon hasarının meydana geldiği numunelerin dayanımının, az miktarda fiberden yırtılma hasarının meydana geldiği numunelerin dayanımına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.20: 40°C sıcaklığındaki hasar görüntüleri.

60°C sıcaklıktaki hasar görüntülerine bakıldığında (Şekil 5.21), yapıştırıcının yapısının kısmen bozulduğu ve bütün numunelerin yapışma yüzeylerinde kohezyon hasarının olduğu görülmektedir. Yapıştırıcı, hasar sonrasında süngerimsi görünüme sahip gözenekli bir hal almıştır.



Şekil 5.21: 60°C sıcaklığındaki hasar görüntüleri.

İncelenen hasar görüntülerinde, oda sıcaklığının üzerine çıkıldıkça hasarlı yüzeylerden mat bir görüntü elde edilmiş, oda sıcaklığının aşağısına inildikçe de hasarlı yüzeylerden parlak bir görüntü elde edilmiştir. Bu durum yapıştırıcının farklı sıcaklıklarda kimyasal ve yapısal özelliklerinin değişebileceğini vurgulamaktadır.

Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde, farklı epoksi yapıştırıcılarının farklı sıcaklıklarda ve farklı enerjilerdeki darbelere maruz bırakılması sonrasında çekme mukavemeti özelliklerinde değişimin olduğu görülmektedir. Sayman vd. [72] tarafından yapılan araştırma kapsamında; DP-460 epoksi yapıştırıcısı ile birbirine yapıştırılan kompozitlerin; farklı sıcaklık değerlerinde (-20 °C, 0°C, 24 °C, 50 °C ve 80 °C) uygulanan farklı enerjilerdeki eksenel darbe yüklerinin (10J, 15J, 20J ve 25J) etkimesi sonrasında yapıştırılmalı bağlantıların mekanik özellikleri incelenmiştir.

Burada, sıcaklık değerinin yükselmesi ile eksenel darbe enerjisinin bağlantı mukavemetini arttırıcı etkilerinin olduğunu gözlemlemiştir. Ghanbari vd. [16] tarafından gerçekleştirilen araştırma kapsamında, biri film (FM-73), diğeri kısmi sıvı (DP-460) halde olan iki farklı fiziksel özellikteki yapıştırıcıların oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklık değerlerinde (50°C, 80°C), 5J, 10J ve 15J enerjili eksenel darbe yükleri altındaki dayanımları karşılaştırılmıştır. 50°C sıcaklıkta eksenel darbe uygulanan numunelerin dayanımının, diğer sıcaklıklardaki dayanımlara nazaran arttığı görülmüştür.

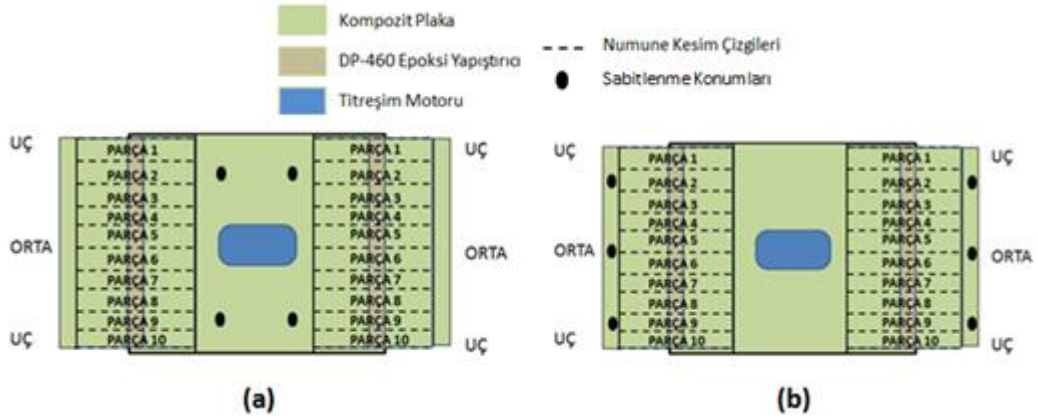
5.2 Kompozit Bağlantıların Titreşimli Yükler Altındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi

Bu çalışma kapsamında, DP-460 epoksi yapıştırıcılarla tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit plakaların titreşime maruz bırakılmasından sonra gösterecekleri mekanik davranışlar incelenmiştir. Yapıştırılan kompozit plakaların takviye elemanı olarak 8 katlı [0/90]₈ oryantasyonda istiflenmiş, 300g/m² ağırlığa sahip örgülü cam elyaf ve yapıştırıcı olarak DP-460 kullanılmıştır.

Daha önce farklı enerji değerlerinde ve farklı sıcaklıklarda yapılan eksenel darbe deneylerinden elde edilen mekanik davranışlar göz önünde bulundurularak, elde edilen optimum değerler dikkate alınarak titreşimlerin oda sıcaklığında ve farklı çevrimlerde (devirlerde) yapılması planlanmıştır.

Tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantılar, Bölüm 4.5.2’de izah edilen titreşim test düzenekleri yardımıyla, Tablo 4.5’te verilen dört farklı titreşim çevrimi sayısında, iki kenarı serbest bırakılarak ve iki kenarı sabitlenerek titreşime maruz bırakılmıştır.

Titreşimler sonrasında plakaların her iki kenarından da simetrik olarak 10’ar adet çekme numunesi çıkarılmış ve mekanik özelliklerinin ne şekilde değişeceğini tespit etmek için bu numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Her iki sınır şartında, sehpalara sabitlenerek, titreşime maruz bırakılan plakalardan çıkarılan numunelerin numaralandırılmalarına ilişkin şematik görseller Şekil 5.22’de verilmektedir. Bu plakalar, cıvata – somun bağlantılarıyla şekilde belirtilen konumlardan titreşim sehplarına sabitlenmiştir.



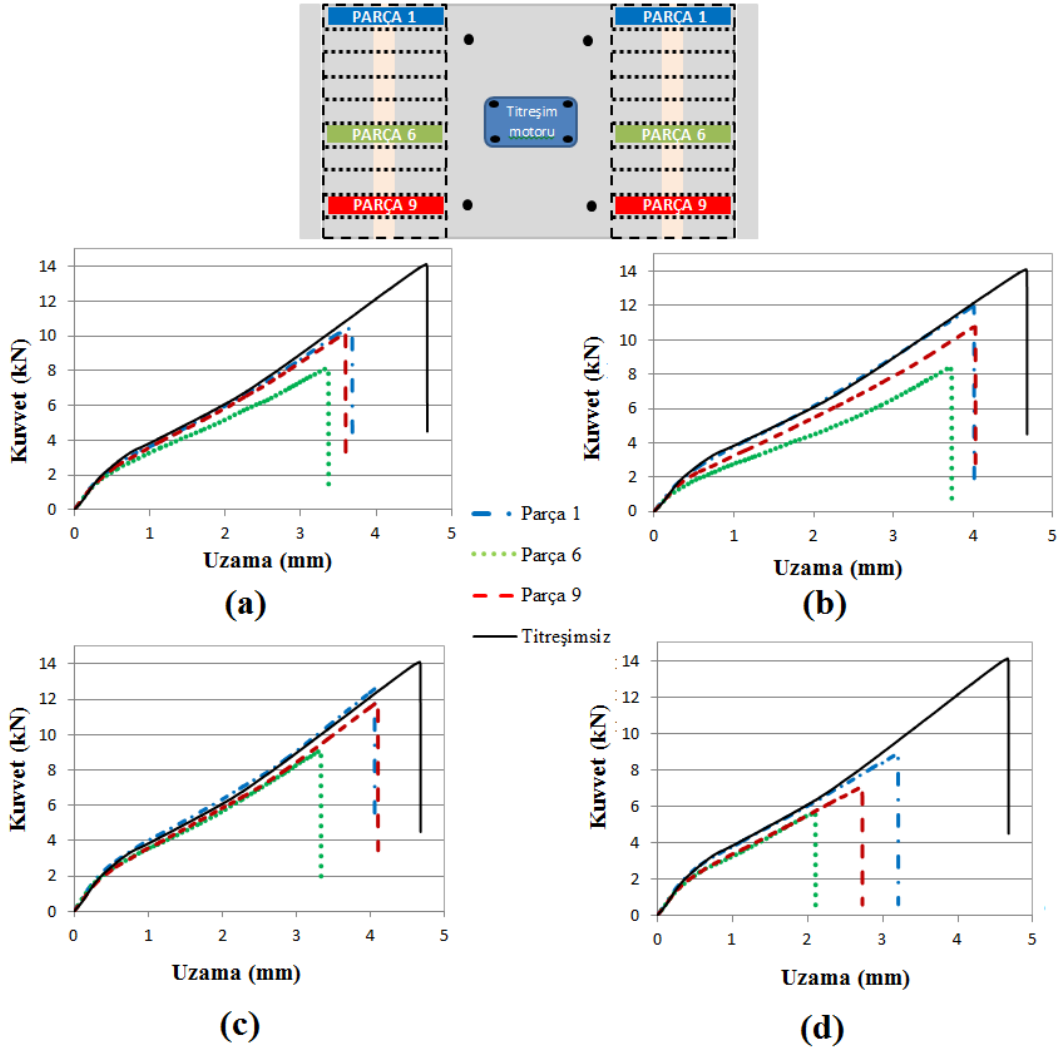
Şekil 5.22: Titreşim sehplarına farklı sınır şartlarında sabitlenen kompozit plakadan çıkarılan çekme numuneleri; a) İki kenarı serbest, b) İki kenarı sabitlenmiş.

Şekil 5.22’de belirtilen parçalardan 1,2,3 ve 8,9,10 numaralı numuneler plakaların uç kısımlarını; 4,5,6,7 numaralı numuneler plakaların orta kısımlarını kapsamaktadır.

Farklı çevrimlerde titreşime maruz bırakılan plakalardan çıkarılmış bu numunelerin çekme testlerinden elde edilen kuvveti – uzama eğrileri karşılaştırılarak değişen mekanik özelliklerine ilişkin yorumlar yapılmıştır.

5.2.1 İki kenarı serbest bırakılmış plakalardan elde edilen sonuçlar

Dört farklı titreşim çevriminin ($1,5 \times 10^5$, 3×10^5 , 12×10^5 ve 24×10^5) etki ettirildiği iki kenarı serbest bırakılmış plakaların uç (Parça 1 ve Parça 9) ve orta (Parça 6) kısımlarından çıkarılan numunelerin ve titreşime maruz bırakılmayan (titreşimsiz) numunelerin çekme testlerinden elde edilmiş kuvvet – uzama diyagramları Şekil 5.23’te görülmektedir.



Şekil 5.23: Değişen titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı serbest plakaların kuvvet – uzama diyagramları; a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5 .

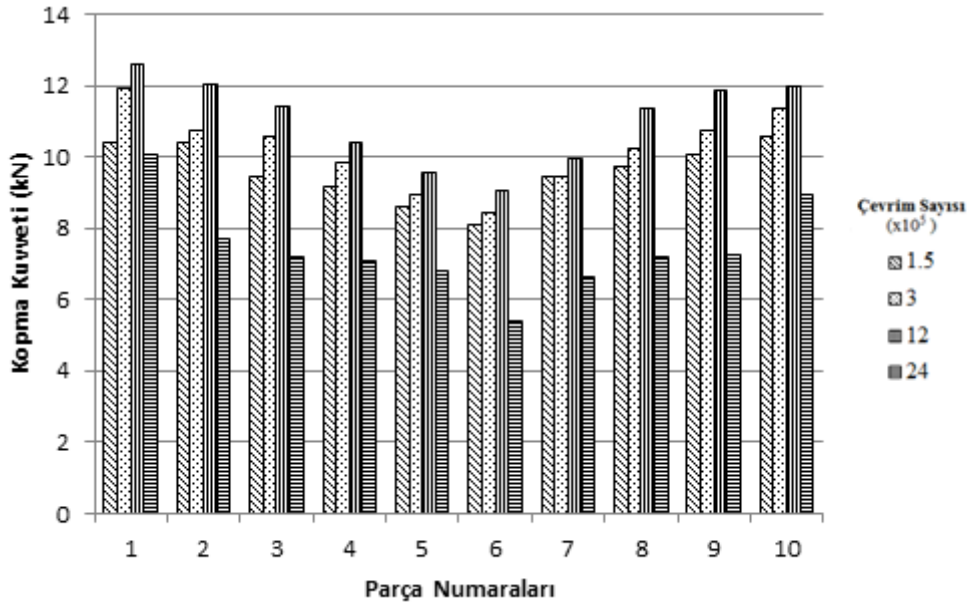
Şekil 5.23'e göre, kuvvet – uzama eğrilerinin 1 mm'ye kadar olan uzama değerlerinde, artık gerilmelerin giderildiği ve bu değerden sonra eğrilerde genellikle lineer artış olduğu görülmüştür. Kuvvetin maksimum seviyeye ulaşmasıyla, numuneler hasara uğramış ve lineer olarak artan kuvvet eğrileri aniden düşmüştür. Plakaların belirli bölgelerinden alınan numuneler (Parça 1, Parça 6, Parça 9) ile titreşime zorlanmayan (titreşimsiz) numunelerin kuvvet – uzama eğrileri incelendiğinde; titreşime zorlanmayan numunelerin kopma kuvvetinin, titreşime maruz bırakılan numunelerin kopma kuvvetine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, titreşimle zorlanan bağlantılarda, plakaların orta kısımlarından

alınan numunelerin (Parça 6) kopma kuvvetinin, uç kısımlarından alınan numunelerdekine kıyasla (Parça 1&9) daha düşük olduğu görülmektedir. Bu sonuç, titreşim motorunun orta kısımlardaki numunelere daha yakın olmasına bağlanabilir. Örneğin plaka ucunda yer alan Parça 1 için, 1.5×10^5 devirde kopma yükü 10.4kN ve uzama miktarı 3.82 mm civarında iken, aynı devirde Parça 6 için bu değerler sırasıyla 8.1kN ve 3.42 mm civarına düşmektedir. Titreşim devri 1.5×10^5 ten 12×10^5 e doğru artarken kopma kuvveti ve uzama da artmakta, 24×10^5 te bu değerler en düşük seviyeye ulaşmaktadır. Tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit plakalardaki tüm parçaların, farklı devirlerde (çevrim sayısı) görülen kopma kuvvetleri Tablo 5.1’de listelenmekte ve Şekil 5.24’teki blok diyagramında verilmektedir.

Tablo 5.1: Farklı titreşimlere maruz iki kenarı serbest plakaların kopma kuvvetlerindeki değişim.

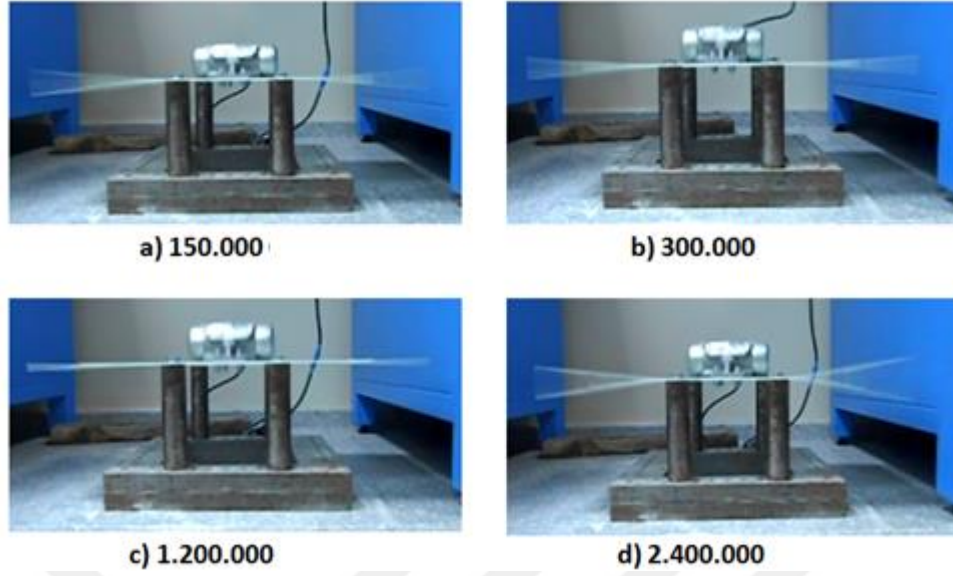
Çevrim ($\times 10^5$) Parça No	Kopma Kuvveti (kN)			
	1.5	3	12	24
1	10.4 (± 0.6)	11.9 (± 0.66)	12.5 (± 0.7)	8.9 (± 0.5)
2	10.4 (± 0.6)	10.8 (± 0.6)	12 (± 0.65)	7.7 (± 0.5)
3	9.5 (± 0.53)	10.5 (± 0.6)	11.5 (± 0.62)	7.2 (± 0.49)
4	9.2 (± 0.51)	9.8 (± 0.57)	10.4 (± 0.6)	7 (± 0.48)
5	8.6 (± 0.47)	8.9 (± 0.48)	9.6 (± 0.54)	6.8 (± 0.48)
6	8.1 (± 0.45)	8.45 (± 0.46)	9 (± 0.5)	5.6 (± 0.46)
7	9.5 (± 0.56)	9.5 (± 0.56)	9.99 (± 0.58)	6.6 (± 0.47)
8	9.76 (± 0.57)	10.2 (± 0.6)	11.4 (± 0.65)	7.2 (± 0.5)
9	10.1 (± 0.58)	10.4 (± 0.6)	11.87 (± 0.65)	7.27 (± 0.49)
10	10.6 (± 0.6)	10.8 (± 0.6)	12 (± 0.68)	8.99 (± 0.55)

**Deneysel verilerden elde edilen standart sapmalar parantez içerisinde gösterilmiştir.*



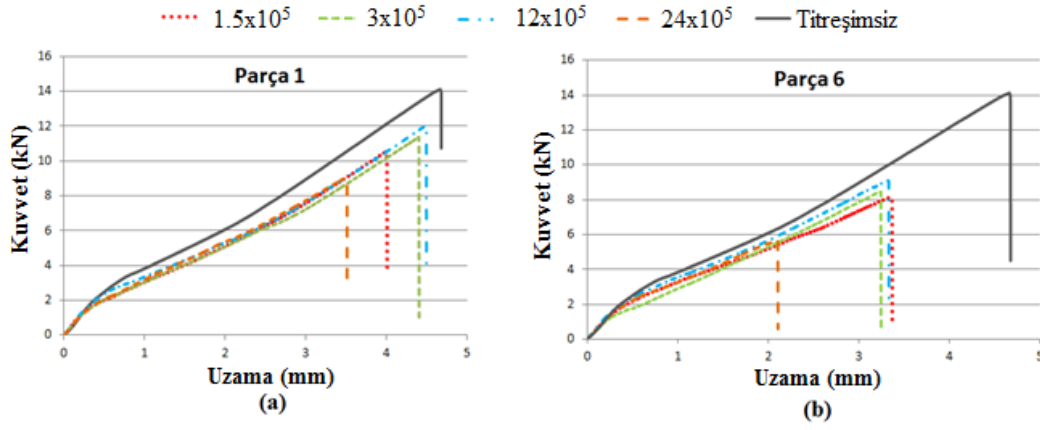
Şekil 5.24: Farklı titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı serbest plakaların kopma kuvvetlerindeki değişim.

Şekil 5.24'te gösterilen tüm titreşim devirleri için elde edilen kopma kuvveti – parça numaraları blok diyagramı incelendiğinde, 12×10^5 titreşim devrinde maksimum kopma kuvvetinin olduğu gözlemlenmektedir. Uygulanan titreşim çevrim sayısındaki artış, 12×10^5 çevrim sayısına kadar kademeli olarak kopma kuvvetini arttırırken bu değerden sonra (24×10^5) hızla düşürmektedir. Bu durumu, titreşim deneyleri esnasında plakalarda oluşan genlik değişimlerine ilişkin görsellerle desteklenmektedir (Şekil 5.25). Titreşim çevriminin 1.5×10^5 'ten 12×10^5 'e çıkması ile plakaların genliğinin ve titreşim sesinin giderek azaldığı, bu değerden sonra ise (24×10^5) hızlıca arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.25: Titreşim salınımları.

Şekil 5.24'teki blok diyagramları incelendiğinde, plakaların uç kısımlarından (Parça 1,2,3,8,9,10) orta kısımlarına (Parça 4,5,6,7) doğru gidildikçe kopma kuvvetlerinin azaldığı görülmektedir. Kopma kuvvetlerindeki maksimum fark Parça 1 ve Parça 6 numunelerinde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, kopma kuvvetlerindeki değişimin daha iyi yorumlanabilmesi için titreşime maruz bırakılan plakaların uç ve orta kısımlarından çıkarılmış numunelere ait çekme testlerinden elde edilen maksimum kuvvet – uzama eğrileri ve titreşim devrine bağlı olarak kayma mukavemetlerindeki değişimler sırasıyla Şekil 5.26 ve Tablo 5.2'de gösterilmiştir. Burada, 12×10^5 titreşim çevriminde kopma kuvveti ve uzama değerleri, hem uç hem de orta kısımdan çıkarılmış numuneler için en yüksek seviyededir. Değişen titreşim çevrimlerinde uç kısımların orta kısımlara nazaran daha çok etkilendiği görülmüştür: Uç kısımlardaki yapıştırmalı bağlantıların, ilk titreşim aşamalarındaki (1.5×10^5) kopma dayanımları titreşimsiz duruma kıyasla yaklaşık %25 oranında düşmekte, 12×10^5 titreşim çevriminde kopma dayanımı ve çekme uzaması ilk titreşime (1.5×10^5) nazaran %15 oranında artmaktadır. 24×10^5 titreşim çevriminde ve sonrasında, her iki kısımda da kopma dayanımı en düşük seviyede seyretmektedir.



Şekil 5.26: Titreşime maruz iki kenarı serbest plakaların uç ve orta kısımlardan çıkarılan numunelerin kuvvet – uzama eğrileri; a) Parça 1, b) Parça 6.

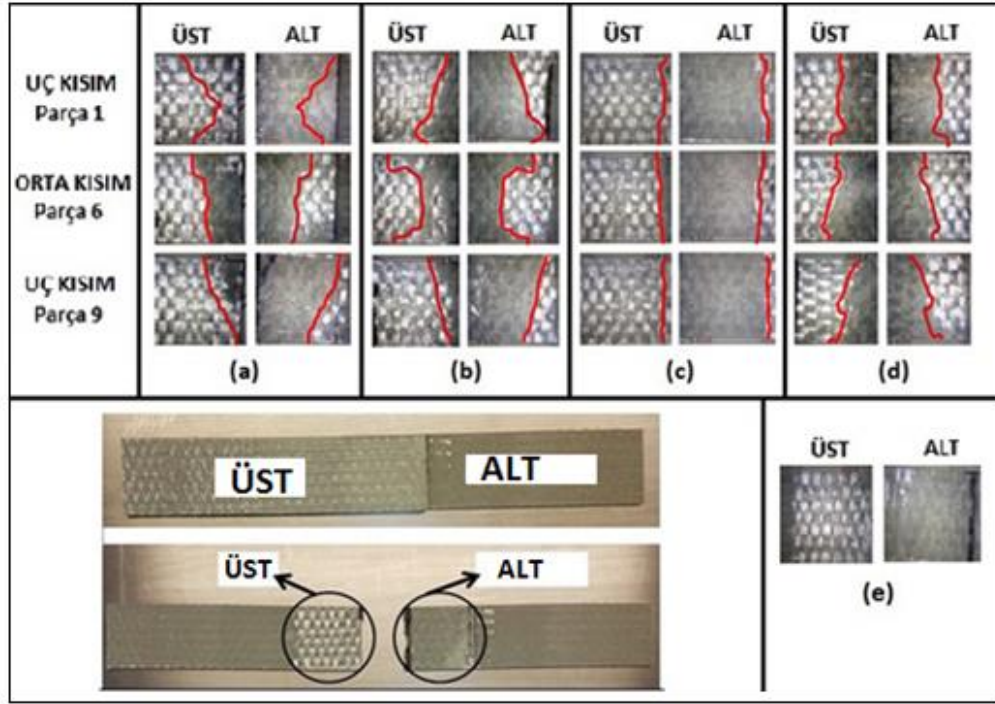
Tablo 5.2’deki kayma mukavemeti değerleri, numunelerin çekme deneyi sonrasında hasara uğramasıyla oluşan kopma kuvveti değerlerinin yapıştırma yüzeyi alanlarına bölünmesiyle elde edilmiştir.

Tablo 5.2: Farklı titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı serbest plakaların kuvvet ve uzamalarındaki değişim.

Çevrim (x10 ⁵)	PARÇA 1			PARÇA 6		
	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)	Kayma Mukavemeti (MPa)	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)	Kayma Mukavemeti (MPa)
0	14 (±0.9)	4.82	22.4	14 (±0.9)	4.82	22.4
1.5	10.4 (±0.6)	3.82	16.7	8.1 (±0.45)	3.42	13
3	11.9 (±0.66)	3.98	19	8.45 (±0.46)	3.18	13.5
12	12.5 (±0.7)	4.15	20.2	9 (±0.5)	3.39	14.5
24	8.9 (±0.5)	3.36	14.2	5.6 (±0.46)	2.08	8.6

*DeneySEL verilerden elde edilen standart sapmalar parantez içerisinde gösterilmiştir.

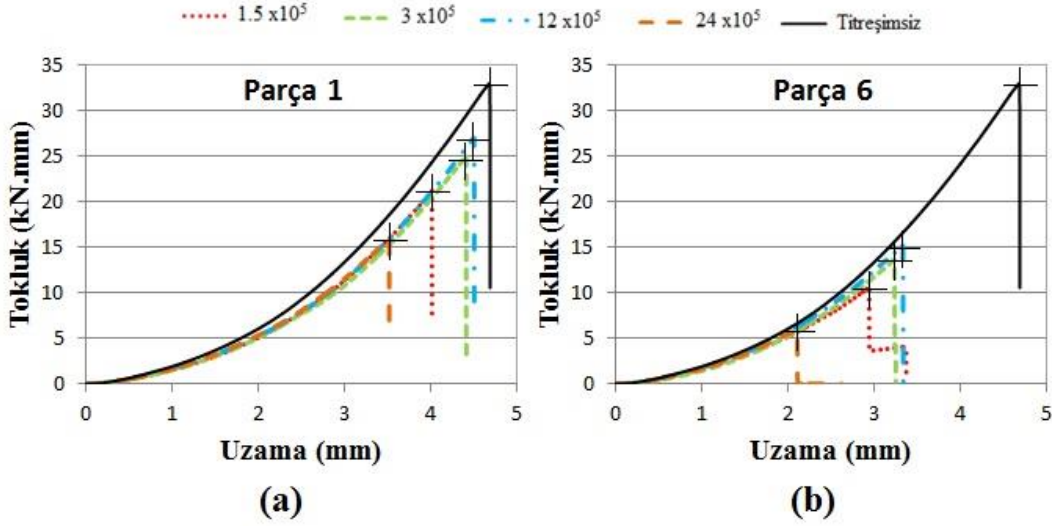
Farklı titreşim çevrimlerinin yapıştırıcının yapısı üzerindeki etkilerini görmek için çekme deneyleri sonrasında hasara uğrayan bağlantıların yapışma yüzeylerine ait dijital mikroskop görüntüleri Şekil 5.27’de verilmiştir.



Şekil 5.27: Değişen titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı serbest plakaların çekme testi sonrası kopma yüzeylerinin mikroskop görüntüleri: a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5 , e) Titreşimsiz numune.

Şekil 5.23'teki kuvvet ve uzama eğrileri ve Şekil 5.27'deki hasar görüntüleri incelendiğinde; Şekil 5.27a ve 5.27b'de yapıştırıcının kısmen gevrek yapıda hasara uğradığı gözlemlenmektedir; yapıştırıcının yaklaşık olarak %25'lik kısmı bir plaka üzerinde kalırken, %75'lik kısmı diğer plaka üzerinde kalmaktadır. Şekil 5.27c'de kopmanın sünek yapıda gerçekleştiği görülmektedir; yapıştırıcının yaklaşık olarak tamamı bir plakanın üzerinde kalırken, diğer plaka üzerinde yapıştırıcı bulunmamaktadır. Bu durum, titreşime maruz bırakılmayan Şekil 5.27e'de gösterilen hasar görüntüsüyle benzerlik göstermektedir. Şekil 5.27d'de ise; hasarın tamamen gevrek yapıda olduğu görülmektedir; yapıştırıcının %50'si bir plaka üzerinde kalırken, %50'si diğer plakanın üzerinde kalmaktadır. Buradan da yapıştırıcının titreşim etkisiyle yapısının değişebildiği görülmektedir. Bu değişime bağlı olarak, kopma kuvvetlerinin de değişiklik gösterdiği kanısına varılmaktadır. Ayrıca, tüm görüntülerde orta kısımdaki numunelerde oluşan hasarın uç kısımdaki numune hasarlarına göre daha gevrek olduğu da görülmektedir. Bu durum, Şekil 5.26'daki grafiklerdeki maksimum uzama değerleriyle de ispatlanmaktadır.

Son olarak, titreşime maruz bırakılan bağlantıların, enerji absorbe edebilme özelliklerinin bir parçası olan tokluk – uzama grafikleri Şekil 5.28’de verilmiştir. Bu grafiklerdeki tokluk değerleri, kuvvet-uzama diyagramlarının altında kalan alanların hesaplanmasıyla bulunmuştur.

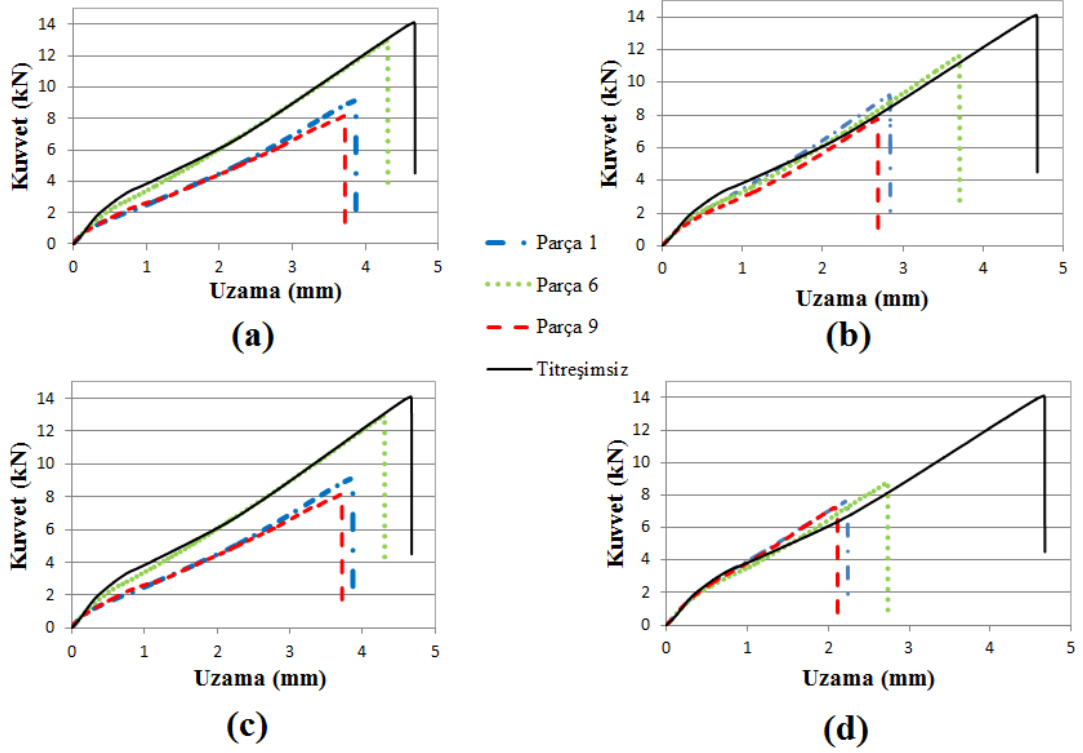
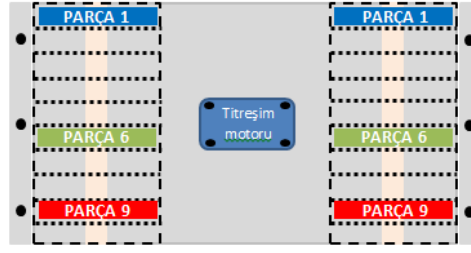


Şekil 5.28: Titreşime maruz iki kenarı serbest plakaların tokluk – uzama eğrileri;
a) Parça 1, b) Parça 6.

Yukarıdaki grafiklere göre, titreşime maruz bırakılmamış numunelerin tokluk değeri yaklaşık 33 kN.mm iken, titreşim sonrasında bu değer düşüştüğü görülmektedir. Ayrıca, her bir titreşim çevrimi için, iki kenarı serbest olarak titreşime maruz bırakılan plakaların uç kısımlarından (Parça 1) çıkarılan numunedeki tokluk ve uzama değerlerinin, orta kısımlarındakine (Parça 6) göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Titreşime maruz bırakılan plakaların orta kısımlarındaki tokluk değeri, uç kısımlarındakine göre 3×10^5 titreşim çevriminde maksimum oranda düşüş göstermiş olup, bu oran yaklaşık %42 civarındadır. Titreşime maruz bırakılan plakaların tokluk değeri 12×10^5 titreşim çevriminde maksimum seviyededir.

5.2.2 İki kenarı sabitlenmiş plakalardan elde edilen sonuçlar

Titreşim kuvvetlerinin etki ettirildiği iki kenarından sabitlenen plakaların uç (Parça 1 ve Parça 9) ve orta (Parça 6) kısımlarından çıkarılan numuneler ile titreşime maruz bırakılmamış numunelerin çekme testlerinden elde edilen kuvvet – uzama diyagramları Şekil 5.29’da verilmektedir.



Şekil 5.29: Değişen titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların kuvvet – uzama diyagramları; a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5 .

Şekil 5.29'daki diyagramlardan görüldüğü gibi, farklı çevrim sayılarında titreşime maruz bırakılan yapıştırmalı bağlantıya sahip plakaların, uç ve orta kısımlarından çıkarılan numunelerin kuvvet – uzama eğrileri ve kopma kuvvetleri farklılık göstermektedir. Kuvvet – uzama eğrileri genellikle lineer davranış sergilemekte olup, maksimum yüke ulaştıktan sonra aniden düşmektedir. Ani yük düşüşü gerçekleştiğinde karşılaşılan uzama miktarı, titreşimsiz numunelerde en büyüktür. Titreşimsiz numunelerin taşıyabileceği maksimum yük 14.1kN ve bu yüke ulaşıldığında görülen uzama miktarı ise 4.6 mm civarındadır. Titreşimin varlığı ve titreşim sayısının artışıyla, taşınan maksimum yük ve bu yükteki uzama miktarları düşmektedir. Örneğin plaka ucunda yer alan Parça 1 için, 1.5×10^5 devirde kopma

yükü 9.17kN ve uzama miktarı 3.87 mm civarında iken, 24×10^5 devirde bu değerler sırasıyla 7.7kN ve 2.24 mm civarına düşmektedir. Ayrıca, titreşim çevrim sayısının önemi olmaksızın, plaka ortasından çıkarılan numunelerin maksimum yük ve maksimum uzama miktarları, uçlardan çıkarılan numunelere göre daha büyüktür. 24×10^5 devirde, plaka ortasından çıkarılan numune (Parça 6) için maksimum yük ve uzama miktarları, ucundan çıkarılan numuneye (Parça 1) kıyasla sırasıyla %16 ve %42 oranında fazladır.

Tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit plakalardaki tüm parçaların, farklı devirlerde (çevrim sayısı) görülen kopma kuvvetleri Tablo 5.3'te listelenmekte ve Şekil 5.30'daki blok diyagramında verilmektedir.

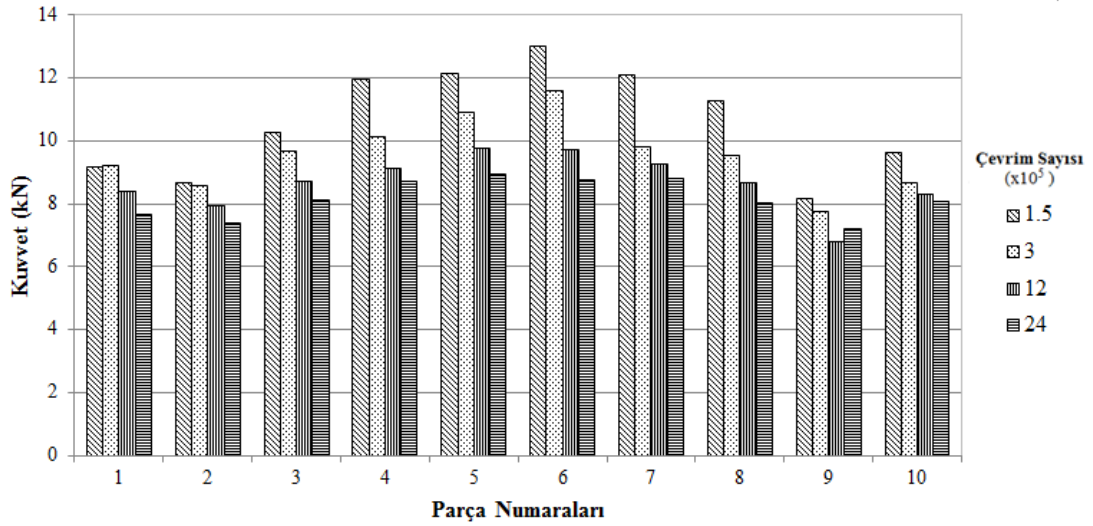
Tablo 5.3: Farklı titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların kopma kuvvetlerindeki değişim.

Çevrim ($\times 10^5$) Parça No	Kopma Kuvveti (kN)			
	1.5	3	12	24
1	9.17 (± 0.5)	9.2 (± 0.5)	8.4 (± 0.47)	7.7 (± 0.45)
2	8.7 (± 0.48)	8.6 (± 0.49)	8 (± 0.45)	7.4 (± 0.41)
3	10.3 (± 0.55)	9.7 (± 0.57)	8.7 (± 0.46)	8.1 (± 0.47)
4	11.98 (± 0.6)	10.1 (± 0.6)	9.2 (± 0.5)	8.7 (± 0.5)
5	12.16 (± 0.6)	10.9 (± 0.6)	9.8 (± 0.5)	8.9 (± 0.51)
6	13 (± 0.7)	11.6 (± 0.6)	9.7 (± 0.5)	8.77 (± 0.5)
7	12 (± 0.6)	9.8 (± 0.58)	9.3 (± 0.5)	8.8 (± 0.5)
8	11.3 (± 0.6)	9.6 (± 0.58)	8.7 (± 0.48)	8 (± 0.46)
9	8.2 (± 0.45)	7.8 (± 0.54)	6.8 (± 0.4)	7.2 (± 0.4)
10	9.6 (± 0.52)	8.7 (± 0.5)	8.3 (± 0.45)	8.1 (± 0.45)

*Deneyel verilerden elde edilen standart sapmalar parantez içerisinde gösterilmiştir.

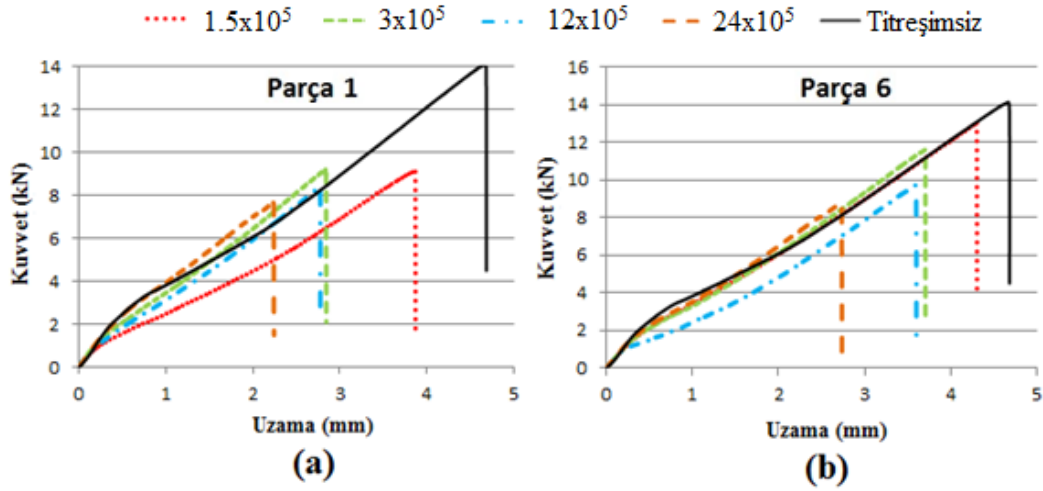
Burada da, en uçtaki numuneler (Parça 1 ve Parça 10) hariç, tüm titreşim devirlerinde (1.5×10^5 , 3×10^5 , 12×10^5 , 24×10^5), çekme deneyi sonrasında elde edilen kopma kuvvetlerinin, uçlardan ortaya doğru ilerledikçe (parça 2'den parça 6'ya doğru veya parça 9'dan parça 6'ya doğru) kademeli olarak arttığı açıkça görülmektedir. Yani titreşim motorunun bulunduğu orta bölgeden her iki uca doğru gidildikçe benzer özellikler görülmektedir. Plakalara etkiyen titreşimin döngü sıklığı arttıkça, kopma kuvvetleri azalmakta başka bir deyişle, tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantıların dayanımı düşmektedir. Dayanımdaki bu düşüş, özellikle titreşim

motoruna yakın bölgelerden çıkarılan numunelerde daha belirgindir. Örneğin, kompozit plakanın titreşim motoruna en yakın orta bölgesinden çıkarılan Parça 5 numuneleri için, 1.5×10^5 'ten 24×10^5 'e çıkarılan titreşim çevrim sayısı, kopma kuvvetini %32 oranında düşürürken, kompozit plakanın ucundan çıkarılan Parça 10 numuneleri için bu düşüş % 16 oranındadır.



Şekil 5.30: Farklı titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların kopma kuvvetlerindeki değişim.

Şekil 5.30'daki blok diyagramları incelendiğinde, plakaların uç kısımlarından (Parça 1,2,3,8,9,10) orta kısımlarına (Parça 4,5,6,7) doğru gidildikçe kopma kuvvetlerinin azaldığı görülmektedir. Kopma kuvvetlerindeki maksimum fark Parça 1 ve Parça 6 numunelerinde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, kopma kuvvetlerindeki değişimin daha iyi yorumlanabilmesi için titreşime maruz bırakılan plakaların uç (Parça 1) ve orta (Parça 6) kısımlarından çıkarılmış numunelere ait çekme testlerinden elde edilen maksimum kuvvet – uzama grafikleri ve kayma mukavemetleri değerleri sırasıyla Şekil 5.31 ve Tablo 5.4'te verilmiştir. Burada, artan titreşim çevrimine bağlı olarak maksimum uzama değerlerindeki oransal düşüşler açıkça görülmektedir: Titreşim çevriminin 1.5×10^5 'ten 3×10^5 'e çıkması durumunda, numunelerdeki uzama oranlarının ortalama %18 civarında azaldığı görülmüştür. Titreşim çevriminin 3×10^5 ve 12×10^5 olduğu durumlarda maksimum uzamalarda ciddi farklılıklar görülmezken, titreşim çevriminin 12×10^5 'ten 24×10^5 'e çıkması durumunda da kopma kuvveti ve uzamalarda gözle görünür seviyelerde düşüşler meydana gelmiştir.



Şekil 5.31: Titreşime maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların uç ve orta kısımlardan çıkarılan numunelerin kuvvet – uzama eğrileri; a) Parça 1, b) Parça 6.

Tablo 5.4: Farklı titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların kuvvet ve uzamalarındaki değişim.

Çevrim (x10 ⁵)	PARÇA 1			PARÇA 6		
	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)	Kayma Mukavemeti (MPa)	Kuvvet (kN)	Uzama (mm)	Kayma Mukavemeti (MPa)
0	14 (±0.9)	4.82	22.4	14 (±0.9)	4.82	22.4
1.5	9.17 (±0.5)	3.87	14.6	13 (±0.7)	4.31	20.8
3	9.2 (±0.5)	2.84	14.7	11.6 (±0.6)	3.7	18.6
12	8.4 (±0.47)	2.78	13.4	9.7 (±0.5)	3.61	15.5
24	7.7 (±0.45)	2.24	12.3	8.77 (±0.5)	2.73	14

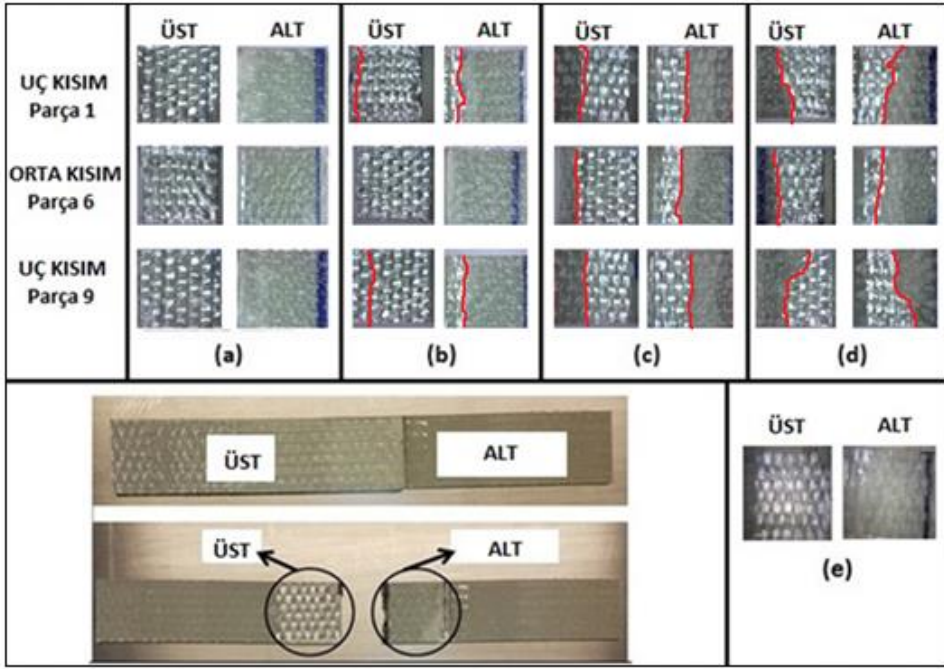
*Deneysel verilerden elde edilen standart sapmalar parantez içerisinde gösterilmiştir.

Artan titreşim çevrimine bağlı olarak kayma mukavemeti değerleri giderek azalmaktadır. Benzer şekilde artan titreşim çevrimi ile birlikte; çekme deneyleri sonrasında bağlantıların maksimum uzama değerlerinde de azalmalar görülmektedir.

Yapıştırırmalı bağlantı dayanımını düşüren titreşimin sebep olduğu yapısal değişimi ortaya koymak için çekme deneyi sonrasında hasar gören kopma yüzeyleri (yapışma yüzeyleri) dijital mikroskopla incelenmiştir. Tüm titreşim çevrimleri için uçlardan ve

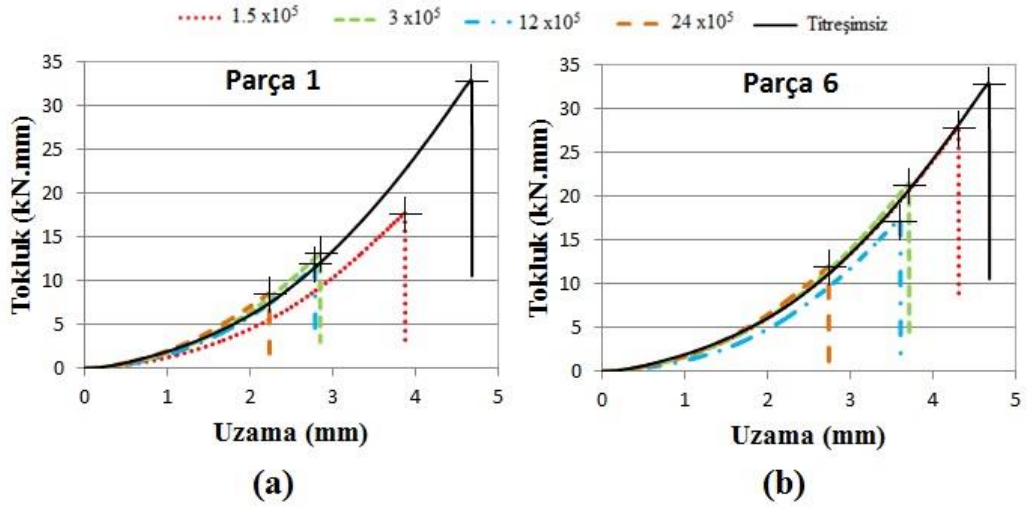
ortadan çıkarılmış numunelerin hasarlı yüzeylerine ait mikroskop görüntüleri Şekil 5.32’de verilmektedir. Mikroskop görüntüleri, hasarın yapıştırıcıda değil, genellikle yapıştırılan bölgedeki kompozit malzemelerde ortaya çıktığını göstermiştir. Hasar alanının yapıştırılan yüzey boyunca olması, yapıştırma işleminin kusursuz olduğunu göstermekte olup, bu durum; hasar sonrasında birbirine yapıştırılan plakalardan sadece birinde yapıştırıcının kalması ile açıklanmaktadır. Birbirine yapıştırılan her iki plakada da yapıştırıcının bulunması, bağlantıda kullanılan yapıştırıcının yapısının bozulduğunu ve buna bağlı olarak, bağlantı dayanımının azaldığını göstermektedir. Titreşim çevrim sayısı arttıkça bindirme bölgesindeki kompozite ait hasar alanı azalmaktadır. Azalan hasarlı alan, çekme yüküne karşı direnç gösteren alanın azaldığını gösterir. Bu durum, artan titreşim çevrim sayısında görülen dayanım düşüşünü açıklamaktadır.

Çekme deneyi sonrasında elde edilen uzama verileri (Şekil 5.29 & Şekil 5.31) ile Şekil 5.32’deki mikroskop hasar görüntüleri karşılaştırıldığında, orta kısımdan alınan numunelerdeki hasar alanlarının, uç kısımlardaki numunelerin hasar alanlarından fazla olduğu görülmekte, bu durum da uç kısımlardaki uzamanın orta kısımlara nazaran daha az olduğunu ispatlamaktadır. Yani; orta kısımlardaki kuvvet – uzama eğrileri daha sünek özellik gösterir iken, uç kısımlardaki kopma – uzama eğrileri daha gevrek özellik göstermektedir. Kuvvet – uzama eğrilerindeki sünek ve gevrek kopma özellikleri dikkate alınarak mikroskop hasar görüntüleri ile kıyaslandığında; yapıştırıcının tamamen tek bir plaka üzerinde kalması durumunda yani “az miktarda fiber yırtılma hasarı” şeklinde olması durumunda sünek kopma özelliği görülürken, yapıştırıcının yapıştırılan her iki plaka üzerinde olması durumunda gevrek kopma özelliği görülmektedir.



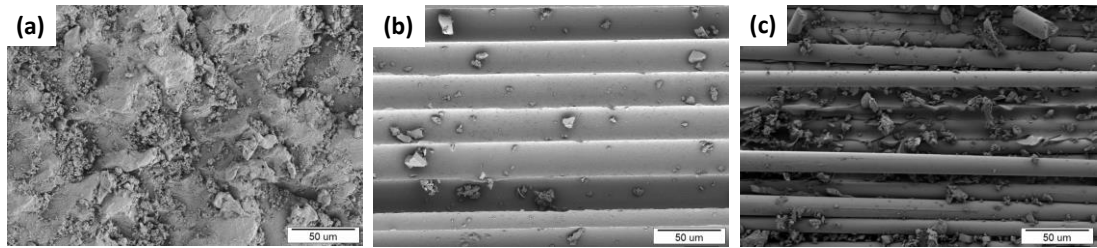
Şekil 5.32: Değişen titreşim çevrimlerine maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların çekme testi sonrası kopma yüzeylerinin mikroskop görüntüleri; a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5 , e) Titreşimsiz numune.

İki kenarından sabitlenerek titreşime maruz bırakılan plakaların çekme deneyleri sonrasında uç (Parça 1) ve orta (Parça 6) kısımlarından çıkarılan numunelere ilişkin tokluk – uzama grafikleri Şekil 5.33’te gösterilmiştir. Bu plakaların orta kısımlarındaki tokluk değeri, uç kısımlarındakine göre daha fazladır. Titreşim çevrimi arttıkça, tokluğun azaldığı görülmüştür. Burada, titreşim çevriminin 24×10^5 ’e çıkması neticesinde tokluk değeri, titreşimsiz numunenin tokluk değerine (33 kN.mm) göre, %76 oranında önemli ölçüde azalmıştır. Bu durum, titreşim etkisinin bağlantının tokluğunu son derece düşüren bir özelliğe sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.33: Titreşime maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların tokluk – uzama eğrileri;
a) Parça 1, b) Parça 6

Plakalara uygulanan santrifüj kuvveti etkisinin morfolojik açıdan yorumlanabilmesi için, çekme deneyi sonrasında hasar gören bağlantıların yüzeyleri, Carl Zeiss 300VP (Almanya) taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Hasar gören numunelerin taramalı elektron mikroskobunda incelenebilmesi için, numuneler Dremel 3000 serisi el motoru vasıtasıyla 5 mm x 5 mm ebatlarında hassas olarak kesilmiştir. Kesilen numuneler Quorum Q150 kaplama cihazında altın ile iki dakika boyunca kaplandıktan sonra, taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir. Şekil 5.34’te sırasıyla yapıştırıcıdan, hasar gören üst plakadan ve hasar gören alt plakadan alınan SEM görüntüleri verilmiştir.

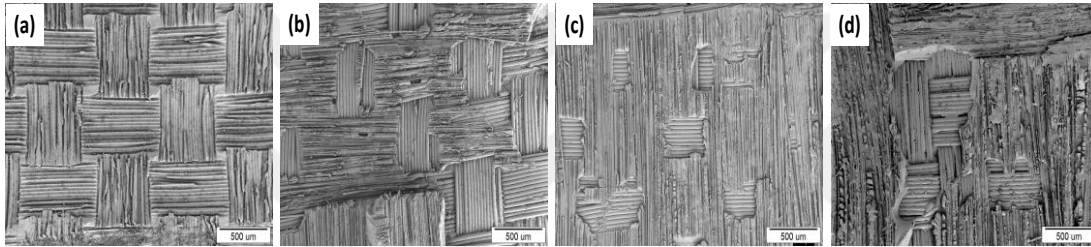


Şekil 5.34: Taramalı elektron mikroskop görüntüleri: a) Yapıştırıcı, b) Hasar gören üst plaka, c) Hasar gören alt plaka.

Şekil 5.34’te verilen 1000 kat büyütülmüş görüntülerde, hasar gören üst (Şekil 5.34b) ve alt (Şekil 5.34c) plakalarda yapıştırıcı kalıntılarının olduğu görülmekle birlikte

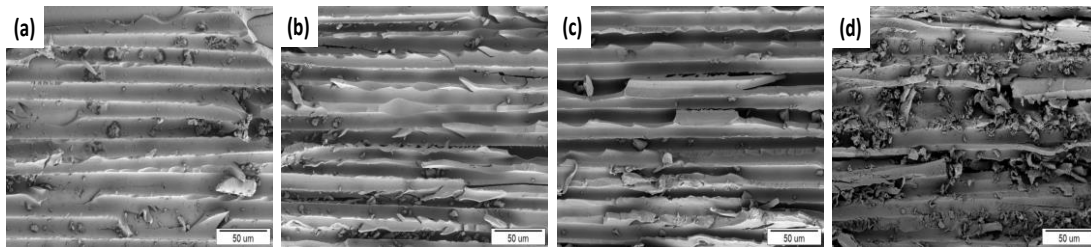
yapıştırıcının matris malzemeye çok iyi tutunarak hasara uğrattığı, böylelikle fiberlerin daha net görüldüğü aşıkardır.

Şekil 5.35'te farklı titreşim devirlerine maruz bırakılan yapıştırırmalı bağlantılarda meydana gelen hasarlı yüzey görüntüleri 100 kat büyütme ile gösterilmektedir. Burada, titreşim devri arttıkça, yapıştırılan plaka yüzeyinin giderek bozulduğu ve plaka içerisindeki cam elyafların daha kolay ayrıştığı görülmektedir. Düşük titreşim çevrimlerinde az miktarda fiberlerden yırtılma hasarı görülürken (Şekil 5.35a, 5.35b), artan titreşim çevrimi ile birlikte fiberlerden yırtılma hasarının oluştuğu görülmektedir (Şekil 5.35c, 5.35d).



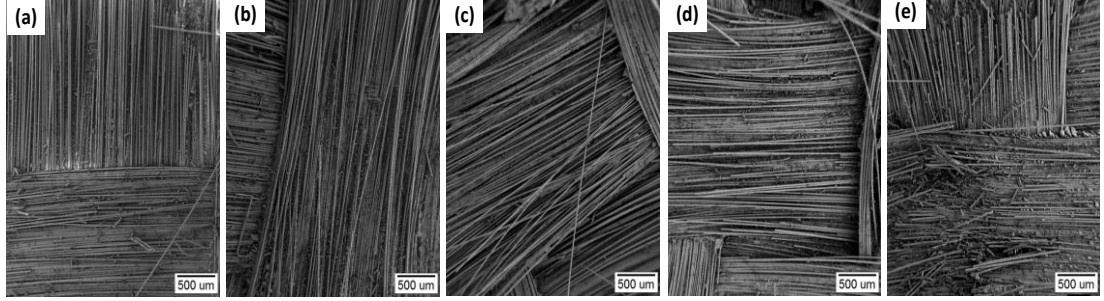
Şekil 5.35: Farklı titreşim çevrimlerinde görülen yapıştırırmalı bağlantı hasarları (100 kat büyütme); a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5 .

Bu görüntülerin 1000 kat büyütülmüş hali Şekil 5.36'da verilmiş olup, burada titreşim çevriminin artmasıyla elyafların daha fazla hasara uğradığı kolaylıkla görülebilmektedir. Artan titreşim çevrimi ile birlikte fiberlerin yapısı bozulmuş, fiberler zayıfladığından matris malzeme içerisinde tutunamamış, böylece bağlantı daha düşük kuvvetlerde hasara uğramıştır.



Şekil 5.36: Farklı titreşim çevrimlerinde görülen yapıştırırmalı bağlantıların hasar görüntüleri (1000 kat büyütme); a) 1.5×10^5 , b) 3×10^5 , c) 12×10^5 , d) 24×10^5 .

Şekil 5.37’de farklı titreşim devirlerine maruz bırakılan bağlantılarda meydana gelen hasar sonrası elyafların görüldüğü plakalar üzerindeki yüzey görüntüleri 100 kat büyütme ile gösterilmektedir.

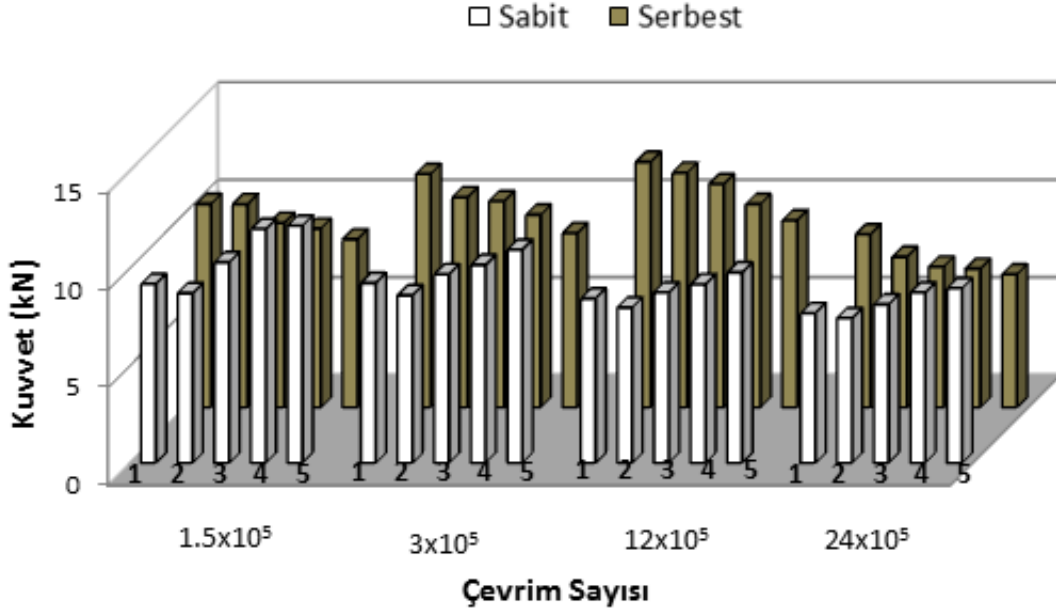


Şekil 5.37: Farklı titreşimlerdeki plakalar üzerindeki elyafların hasar görüntüleri (100 kat büyütme); a) Titreşimsiz, b) 1.5×10^5 , c) 3×10^5 , d) 12×10^5 , e) 24×10^5 .

Yukarıdaki SEM görüntülerine göre titreşim devrinin artması sonucunda, elyafların hasara uğradığı rahatlıkla görülmektedir. Titreşime maruz bırakılmayan numunelerde cam elyaflar hasara uğramazken, titreşim çevrimi arttıkça elyafların saçaklanmaya başladığı ve titreşim çevriminin 24×10^5 olması durumunda cam elyafların kendi içlerinde kırılma hale geldiği görülmektedir. Bu durum, titreşim çevriminin giderek artması neticesinde, yapıştırma yüzeylerinde az miktarda fiber yırtılma hasarından fiber yırtılma hasarına doğru ilerlediğinin göstergesidir. Yapıştırılan kompozit plakalara santrifüj kuvvetinin etki etmesi, artan çevrimle birlikte plakalardaki cam elyafların hasar görmesine neden olmakta, böylece bağlantı dayanımı giderek azalmaktadır.

5.2.3 İki kenarı serbest bırakılan ve sabitlenen plakalardan elde edilen sonuçların mukayesesi

Bu çalışma kapsamında, tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit plakalara, iki farklı sınır şartı belirlenerek, farklı devirlerde titreşim uygulanmıştır. Titreşim sonrasında mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme deneyi uygulanan numunelerin (Parça 1-5) kopma kuvvetleri karşılaştırmalı olarak Şekil 5.38’de gösterilmiştir. Simetrik diğer parçalarda (Parça 6’dan Parça 10’a doğru) kopma kuvvetleri benzer değerlere sahip olduğundan Şekil 5.38’de bu değerlere yer verilmemiştir.



Şekil 5.38: İki kenarından sabitlenmiş ve iki kenarı serbest durumlar için bağlantı kopma kuvvetlerinin mukayesesi.

Şekil 5.38’de iki kenarından sabitlenmiş plakalarda, bütün titreşim parametrelerinde, uç kısmından ortalara doğru gidildikçe çekme deneyinden elde edilen kopma kuvvetlerinin arttığı görülmektedir. İki kenarı serbest bırakılan plakalarda ise, bütün titreşim parametrelerinde plakaların uç kısımlarından ortalara doğru gidildikçe kopma kuvvetlerinin azaldığı görülmektedir. Yani, iki kenarı sabitlenmiş plakalarda, titreşim motorundan uzaklaştıkça, iki kenarı serbest plakalarda ise motora yaklaştıkça bağlantı dayanımı azalmaktadır. Başka bir deyişle, bağlantı hasarının ortaya çıkacağı riskli bölge, iki kenarından sabitlendiği durumda titreşim kaynağından uzak, iki kenarı serbest bırakıldığı durumda ise yakın olacaktır. Ayrıca, sabitlenen plakalardan elde edilen kopma kuvvetleri, serbest bırakılan plakalardan elde edilenlere kıyasla genellikle daha düşüktür. İstisnai durumlar, titreşim motoruna yakın yerden çıkarılmış numunelerde görülmektedir.

İki kenarından sabitlenmiş plakalarda, titreşim motorunun titreşim süresi boyunca yapıştırıcılara titreşim motorunun uyguladığı santrifüj kuvveti orta kısımlardaki yapıştırıcıyı pekleştirmekte, bu nedenle orta kısımlardaki kopma dayanımını, uç kısımlara nispeten arttırmaktadır. Titreşim boyunca etkiyen santrifüj kuvveti

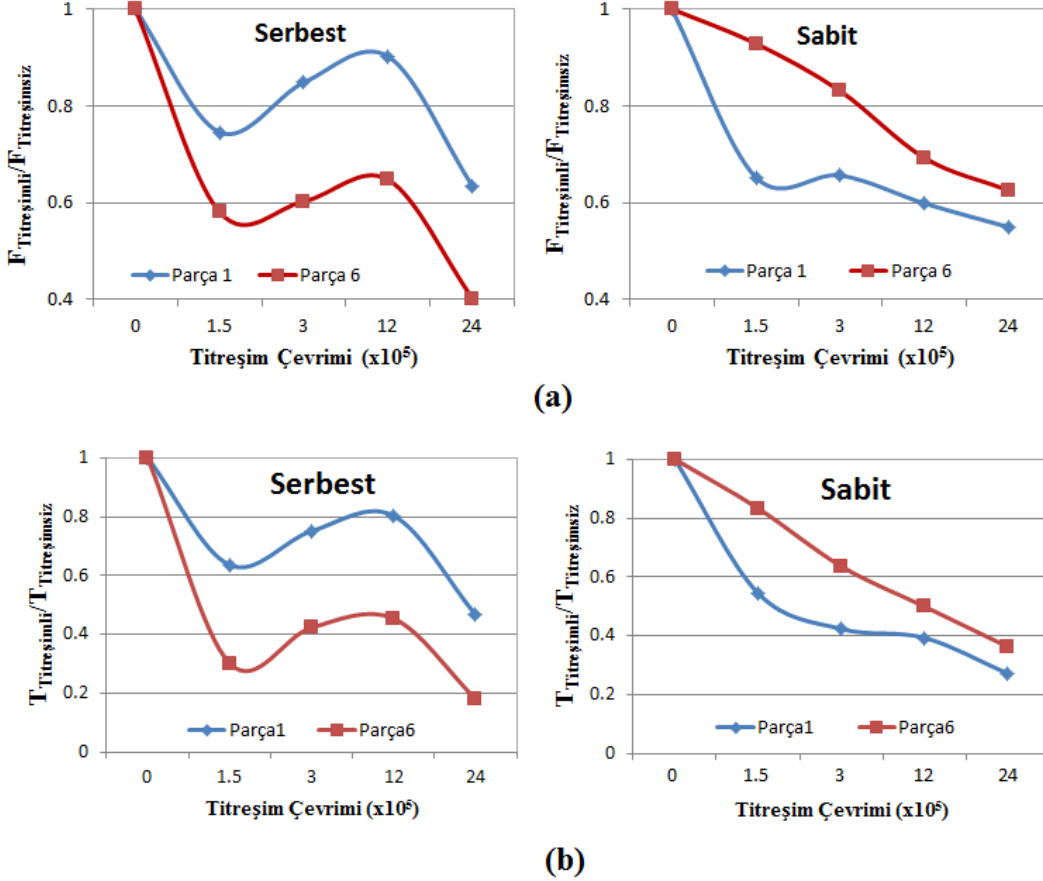
neticesinde, titreşim devri (çevrim sayısı) arttıkça yapıştırıcı dayanımı azalmaktadır. Bu durum hasar sonrası çekilen mikroskop görüntülerine de yansımaktadır.

İki kenarı serbest bırakılan plakalarda bütün titreşim devirlerinde, plakaların uç kısımlarından ortalara doğru gidildikçe kopma kuvvetlerinin azaldığı görülmektedir. Titreşimin ilk devirlerinden (1.5×10^5 ve 3×10^5) 12×10^5 'e çıkıldıkça kopma kuvvetleri kademeli olarak artmış, 24×10^5 devirde ise azalarak en düşük seviyeye ulaşmıştır. İki kenarı serbest plakalar için kurulan test düzeneğinde yapılan deneylerde, plakaların uç kısımlarının orta kısımlarından daha fazla salınım (genliğe) maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle uç kısımların kopma kuvvetlerinin daha yüksek çıkması muhtemeldir.

Farklı çevrimlerde titreşime maruz bırakılan iki kenarı serbest ve iki kenarından sabitlenen plakalardan alınan numunelerin çekme testleri ile elde edilen kopma kuvvetlerinin ($F_{\text{Titreşimli}}$), titreşimsiz numunelerin kopma kuvvetlerine ($F_{\text{Titreşimsiz}}$) bölünerek normalize edildiği diyagramlar ile titreşimli numunelerden elde edilen tokluk değerlerinin ($T_{\text{Titreşimli}}$), titreşimsiz numunelerdeki tokluk değerlerine ($T_{\text{Titreşimsiz}}$) bölünerek normalize edildiği diyagramlar Şekil 5.39'da verilmiştir. Normalize edilen diyagramlar birbirleriyle karşılaştırıldığında, titreşime maruz bırakılan iki kenarı serbest plakaların uç kısımlarındaki (Parça 1) dayanımlarının orta kısımlarındakine (Parça 6) göre daha yüksek olduğu görülürken, iki kenarı sabitlenen plakalarda ise bu durum tam tersidir. Yapılan titreşim deneyleri esnasında; iki kenarından serbest plakaların uç kısımlarında, iki kenarından sabitlenmiş plakaların ise orta kısımlarında titreşim salınımlarının (genliğin) daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Gözlemlenen titreşim salınımlarının, plakaların çeşitli kısımlarında (uç veya orta) fazla olması dayanımın arttığına göstergesidir. Titreşim uygulanmayan numunelere kıyasla, titreşim etkisinin maksimum olduğu 24×10^5 çevrimde; kenarları serbest plakalardan alınan numunelerin dayanımı maksimum %60 oranında orta kısımlarda (Parça 6) azalırken, kenarları sabitlenen plakalardan alınan numunelerin dayanımı maksimum %42 oranında uç kısımlarda (Parça 1) azalmıştır.

Tokluk değerlerinde de benzer değişimler görülmektedir. Maksimum titreşim çevriminde (24×10^5), iki kenarı serbest plakalardaki tokluk oranı, titreşimsiz

numunelerin tokluk oranına göre maksimum orta kısımlarda (Parça 6) %81 oranında azalırken, iki kenarı sabit plakalarda maksimum uç kısımlarda (Parça 1) %67 oranında azalmıştır. Titreşim çevriminin giderek artması durumunda, yapıştırılan plakaların tokluğu önemli ölçüde azalmaktadır.



Şekil 5.39: Normalize edilen değerlerin karşılaştırılması;

a) Kopma kuvveti, b) Tokluk.

Her iki sınır şartında da görülen hasar modu, yapıştırıcı ile bağlanmış fiber takviyeli plastiklerin hasar modlarının açıklandığı ASTM 5573 standardında tanımlanan “az miktarda fiber yırtılma hasarıdır (light-fiber-tear failure)”. Şekil 5.27 ve Şekil 5.32’de gösterilen hasarlı yüzeyler, az miktarda fiber yırtılma hasarını ve fiber yırtılma hasarını göstermektedir. Titreşim çevrim sayısı ve incelenen numunenin plakanın hangi kısmından çıkarıldığıyla bağlantılı olarak yapıştırılan bölgedeki yapıştırıcının yoğunluğuna bağlı olarak hasar alanı değişmektedir. Değişen hasar

alanı ile birlikte kopmanın sünek veya gevrek davranış gösterdiği kuvvet – uzama diyagramlarıyla da açıklanmıştır.

5.3 Kompozit Bağlantıların Titreşimli ve Eksenel Darbeli Yükler Altındaki Mekanik Davranışlarının İncelenmesi

Kompozit malzemelerle yapıştırılan bağlantılar, çeşitli makinelerde ve aksamalarında yukarıda bahsedilen eksenel darbe yüklerine veya çeşitli titreşimlere maruz kalabildiği gibi, aynı anda hem titreşim hem de eksenel darbe yüklerine de maruz kalabilmektedir.

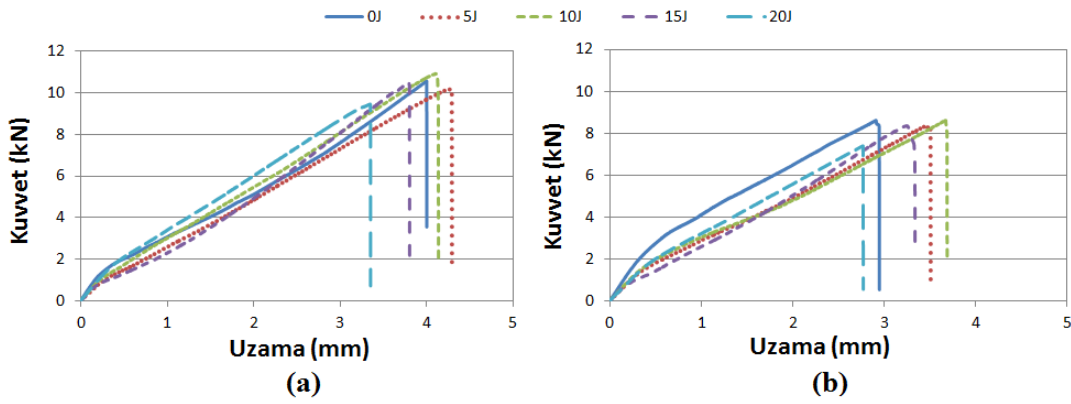
Bu bölümde yapılan çalışmalar kapsamında, birbirine tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit plakalar, ilk aşamada iki kenarı sabit ve iki kenarı serbest bırakılarak titreşime tabi tutulmuş, sonrasında bu plakalardan çıkarılan numunelere 5J, 10J, 15J ve 20J enerji değerlerinde eksenel darbe uygulanmıştır. Uygulanan eksenel darbe testleri sonrası hasar görmeyen numuneler çekme testine tabi tutularak, bağlantı hasara uğrayıncaya kadar kuvvet – uzama değerleri elde edilmiştir. Yapılan testler sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda sırasıyla detaylı bir biçimde açıklanmaktadır:

5.3.1 İki kenarı serbest durumda titreşime ve sonrasında eksenel darbeye maruz plakalardan elde edilen sonuçlar

Titreşime maruz bırakılan iki kenarı serbest plakalardan çıkarılan numunelere eksenel darbe testleri uygulanmış ve çekme testlerine tabi tutularak kuvvet – uzama diyagramları elde edilmiştir:

1.5×10^5 , 3×10^5 , 12×10^5 ve 24×10^5 çevrimlerinde titreşime maruz bırakılan plakaların uç ve orta kısımlarından çıkarılan numunelerin, farklı enerji değerlerindeki eksenel darbelerle maruz bırakıldıktan sonra çekme deneyi ile elde edilen kuvvet – uzama diyagramları sırasıyla Şekil 5.40, 5.41, 5.42 ve 5.43'te verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi tüm çevrimlerde, uç kısımlardan çıkarılmış numunelerdeki (Parça 1) kopma kuvvetleri, orta kısımdan çıkarılmış numunelerinkine (Parça 6) kıyasla yüksektir.

1.5×10^5 çevrimde (Şekil 5.40), plakanın uç kısımlarındaki numunelerde 5J aksel darbe uygulanması durumunda, darbe uygulanmamış numunelere kıyasla, kopma kuvvetinde 0.2kN kadar azalma gözlemlenirken; aksel darbe enerjisinin 5J'den 10J'e çıkarılması ile bu değerin 0.7kN arttığı görülmüştür. Aksel darbe enerjisinin 10J'den 15J ve 20J'e artması neticesinde kopma kuvvetlerinin birbirine göre kıyasla, sırasıyla 0.4kN ve 1kN azaldığı görülmüştür. Titreşime tabi tutulan plakanın orta kısımlarındaki numunelerin aksel darbe enerjilerinin 10J uygulanması durumunda kopma kuvvetlerinin arttığı gözlemlenirken, aksel darbe enerjilerinin 10J'den 20J'e doğru artması durumunda kopma kuvvetleri azalmıştır.

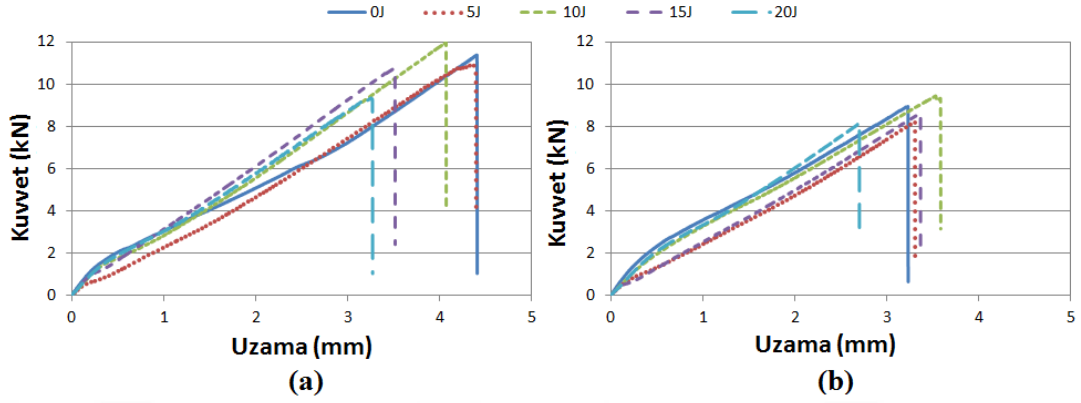


Şekil 5.40: 1.5×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların farklı aksel darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

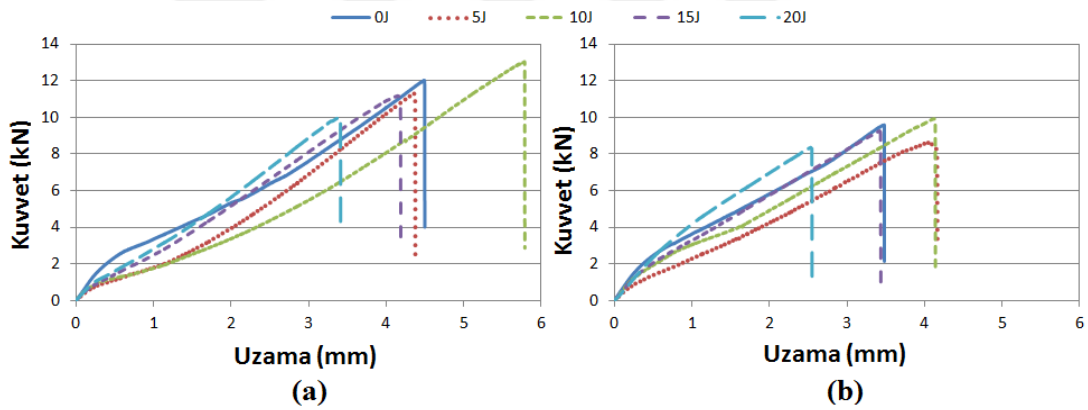
3×10^5 titreşim çevriminde (Şekil 5.41), plakaların uç ve orta kısımlarında elde edilen maksimum kopma kuvvetinin 10J enerjili aksel darbenin uygulandığı numunelerde olduğu görülürken, aksel darbe enerjisinin 10J üzerinde (15J ve 20J) uygulanması durumunda, numunelerde oluşan kopma kuvvetleri düşmüştür.

Şekil 5.42'deki diyagramlara göre, 12×10^5 titreşim çevriminde, numunelerde meydana gelen kopma kuvvetlerinin, diğer titreşimlerdeki farklı enerjilerin uygulandığı numunelerin kopma kuvvetlerine nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı zamanda 3×10^5 titreşim devrinde elde edilen kopma kuvvetlerinin azalış – artış durumları 12×10^5 titreşim devrinde de benzerlik göstermektedir: Darbe uygulanmayan numunelere göre aksel darbe enerjisinin 5J olması durumunda kopma kuvveti düşerken, 10J'de kopma kuvveti maksimum

değere ulaşmış, daha sonraki artan enerjilerde kopma kuvveti değerleri tekrar düşmüştür.

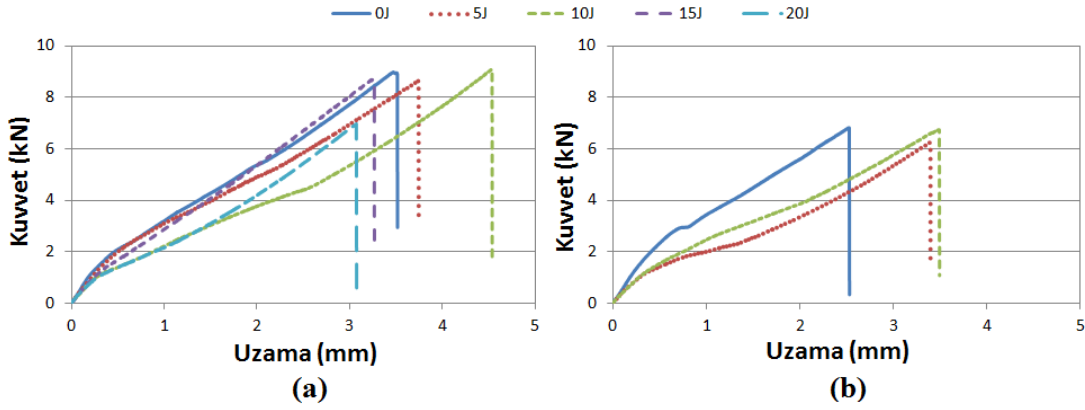


Şekil 5.41: 3×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların farklı aksenal darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.



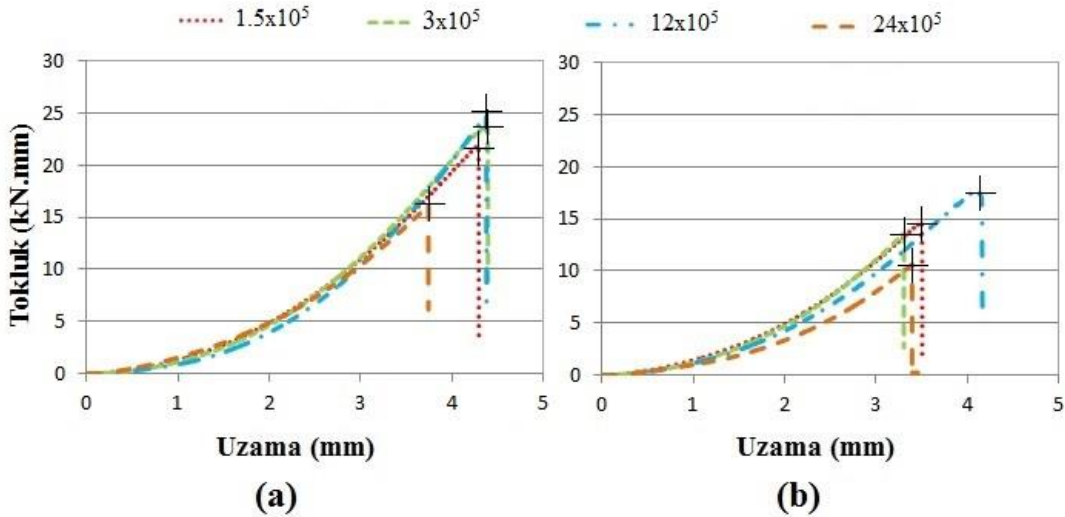
Şekil 5.42: 12×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların farklı aksenal darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

Şekil 5.43'te 24×10^5 titreşim çevriminde elde edilen kopma kuvvetleri, diğer titreşim değerlerinde elde edilen kopma kuvvetlerinden daha düşüktür. Ayrıca, plakaların orta kısımlarındaki numunelere 15J ve 20J enerji değerlerinde aksenal darbe yüklerinin uygulanması sonrasında numuneler hasara uğramıştır.

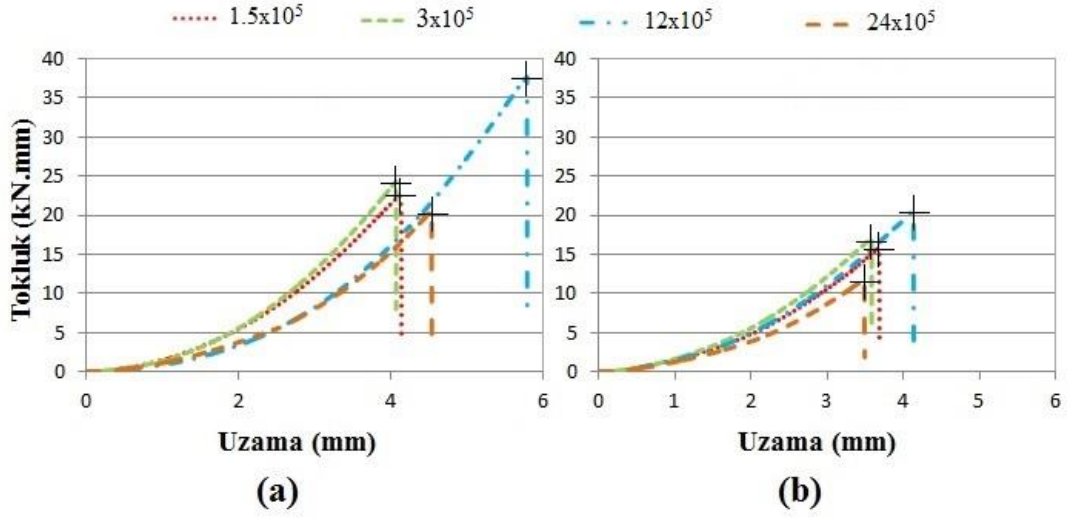


Şekil 5.43: 24×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların farklı aksenal darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

Farklı çevrimlerde titreşime maruz bırakılan plakaların uç ve orta kısımlarından çıkarılan numunelerin, 5J, 10J, 15J ve 20J enerji değerlerindeki aksenal darbelere maruz bırakıldıktan sonra çekme deneyi ile elde edilen tokluk – uzama diyagramları sırasıyla Şekil 5.44, 5.45, 5.46 ve 5.47’de verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, plakaların uç kısımlarındaki (Parça 1) tokluk değerleri, orta kısımlarındaki (Parça 6) tokluk değerlerinden daha fazladır. Ayrıca, tüm titreşim çevrimleri karşılaştırıldığında, aksenal darbe enerjisinin değişimine bağlı olmaksızın, maksimum tokluk değeri 12×10^5 ’te görülmüştür.

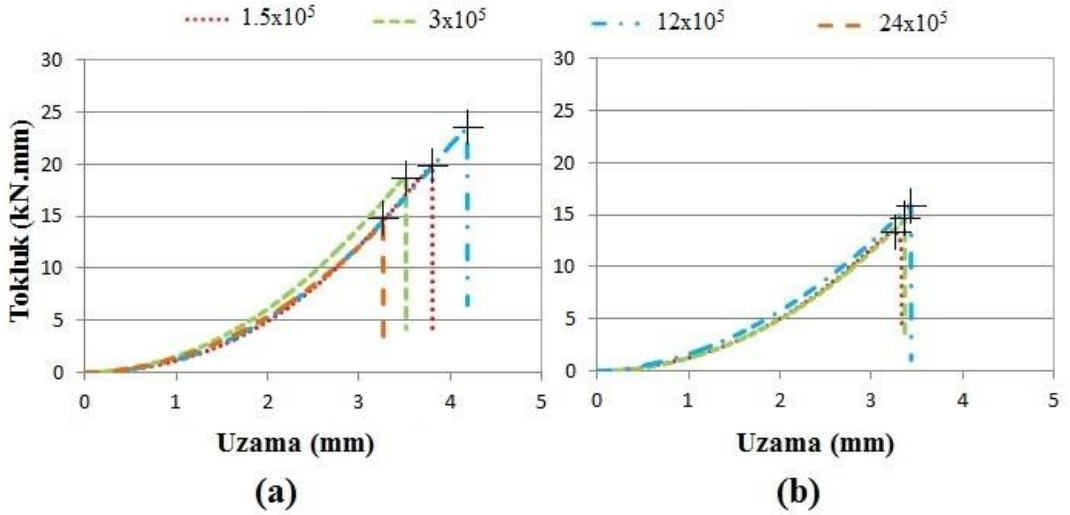


Şekil 5.44: Titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların 5J aksenal darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

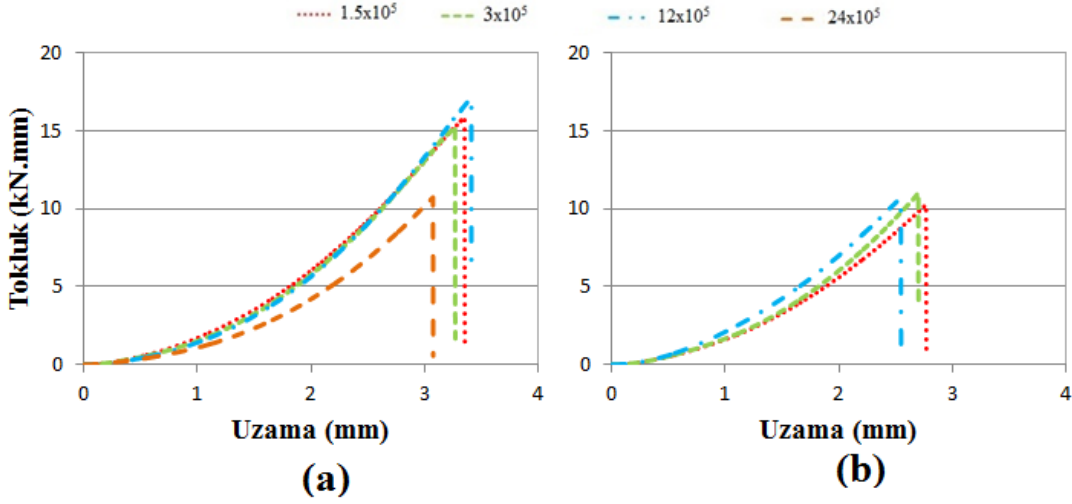


Şekil 5.45: Titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların 10J aksenal darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

10J aksenal darbe enerjisinde (Şekil 5.45), maksimum tokluk değerinin plakaların uç kısmında (Parça 1) ve 12×10^5 titreşim çevriminde meydana geldiği görülmektedir. Bu değer yaklaşık 38 kN.mm'ye tekabül etmekte olup, bu titreşim çevriminde, tokluk değeri aksenal darbe uygulanmayan (0J) numunede görülen 26.5 kN.mm'den (Şekil 5.28a) yaklaşık %30 daha fazladır.



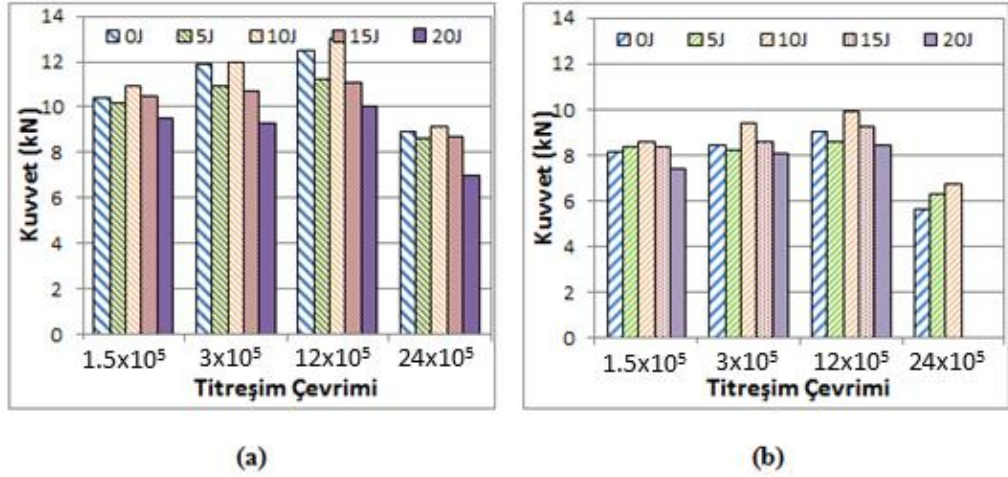
Şekil 5.46: Titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların 15J aksenal darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.



Şekil 5.47: Titreşim uygulanan iki kenarı serbest plakaların 20J aksenal darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

Eksenel darbe enerjisinin 20J olarak etkimesi durumunda (Şekil 5.47), titreşime maruz iki kenarı serbest plakaların orta kısmında (Parça 6) maksimum tokluk değeri, diğer titreşim çevrimlerine nazaran, 3×10^5 titreşim çevriminde daha fazladır.

Farklı titreşim çevrimlerinde iki kenarı serbest olarak titreşime maruz bırakılan plakalara farklı enerjilerdeki aksenal darbelerin uygulanması sonrasında bu plakaların uç (Parça 1) ve orta (Parça 6) kısımlarından elde edilen kopma kuvvetlerinin blok diyagramı ve bu kuvvetlere ilişkin değerler sırasıyla Şekil 5.48 ve Tablo 5.5'te verilmektedir. Blok diyagramlarından da görüleceği üzere; aksenal darbe enerjisinin 10J olduğu durumda kopma kuvvetlerinin maksimuma ulaştığı görülmektedir. Numunelere uygulanan aksenal darbe enerjilerinin 15J ve 20J olması ile birlikte kopma kuvvetleri giderek azalmış, hatta 24×10^5 çevriminde Parça 6 numuneler hasara uğramıştır.



Şekil 5.48: Farklı eksenel darbe uygulanan iki kenarı serbest plakaların titreşim çevrimine bağlı kopma kuvveti diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

Tablo 5.5: Farklı eksenel darbe uygulanan iki kenarı serbest plakaların kopma kuvveti değerleri.

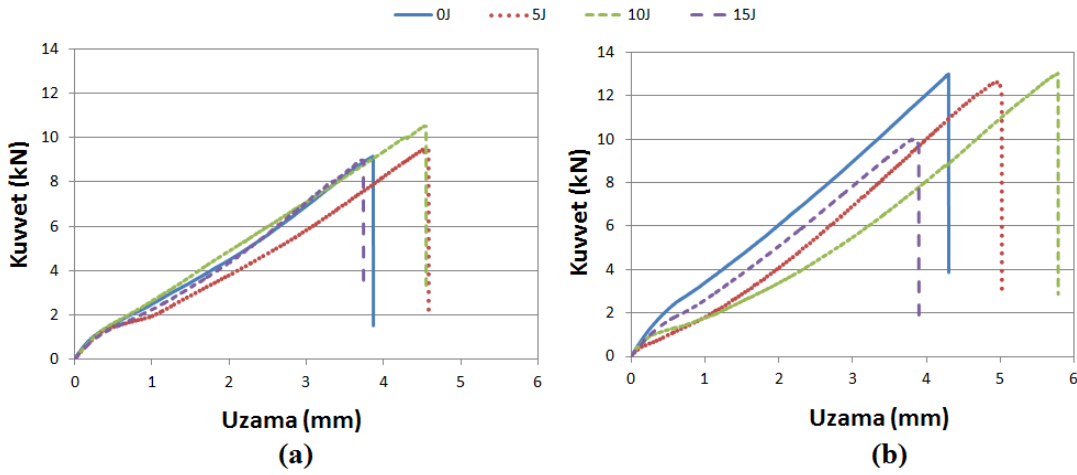
		Kopma Kuvveti (kN)			
		1.5	3	12	24
Darbe (J)	Çevrim (x10 ⁵)				
	Parça 6	0	8.1 (±0.3)	8.45 (±0.37)	9 (±0.48)
5		8.37 (±0.35)	8.2 (±0.3)	8.6 (±0.42)	6.3 (±0.14)
10		8.6 (±0.4)	9.4 (±0.55)	9.9 (±0.52)	6.7 (±0.17)
15		8.35 (±0.3)	8.6 (±0.41)	9.25 (±0.5)	Hasar
20		7.4 (±0.25)	8.1 (±0.32)	8.4 (±0.36)	Hasar
Parça 1	0	10.4 (±0.6)	11.9 (±0.68)	12.5 (±0.77)	8.9 (±0.43)
	5	10.2 (±0.58)	10.9 (±0.63)	11.2 (±0.69)	8.6 (±0.4)
	10	10.9 (±0.62)	11.96 (±0.7)	13 (±0.8)	9.1 (±0.5)
	15	10.5 (±0.6)	10.7 (±0.61)	11.1 (±0.67)	8.7 (±0.4)
	20	9.5 (±0.56)	9.3 (±0.55)	10 (±0.62)	7 (±0.2)

*DeneySEL verilerden elde edilen standart sapmalar parantez içerisinde gösterilmiştir.

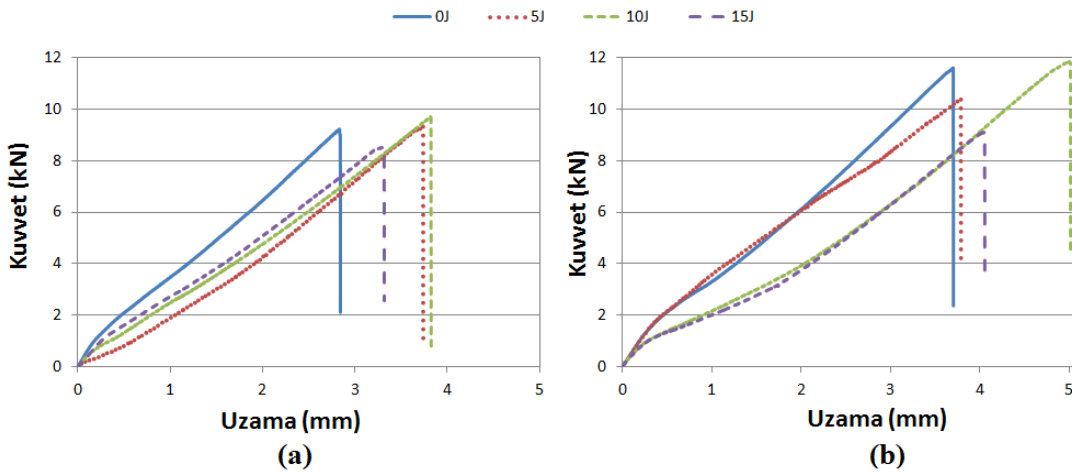
Ayrıca, Şekil 5.48’de gösterilen diyagramda, her bir eksenel darbe enerjisi değerinde titreşim çevrimi 12×10^5 ’e kadar arttıkça kopma kuvvetleri de artmış, çevrimin 24×10^5 olması durumunda kopma kuvvetleri aniden düşmüştür.

5.3.2 İki kenarı sabitlenmiş durumda titreşime ve sonrasında aksenal darbeye maruz plakalardan elde edilen sonuçlar

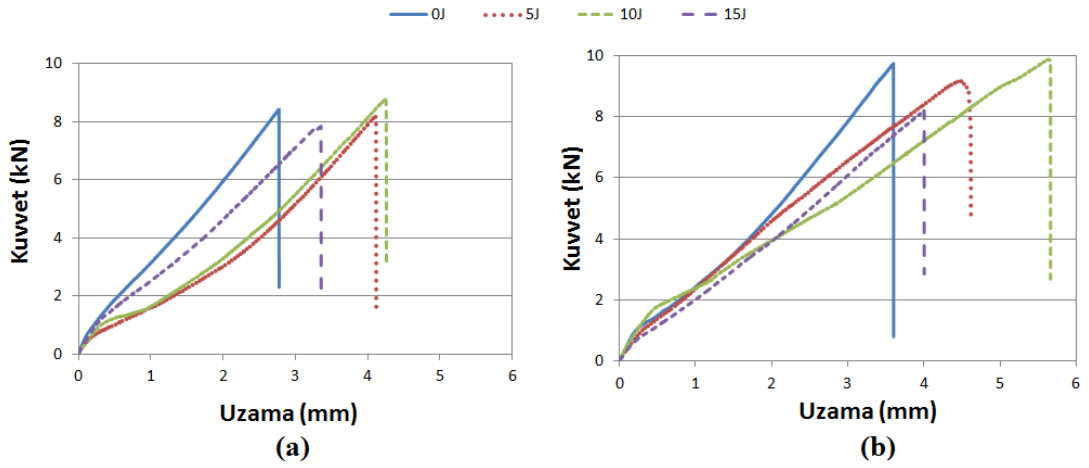
İki kenarı sabitlenerek 1.5×10^5 , 3×10^5 , 12×10^5 ve 24×10^5 titreşim çevrimlerine maruz bırakılan plakaların uç ve orta kısımlarından çıkarılan numunelerin, farklı enerji değerlerindeki aksenal darbelere maruz bırakıldıktan sonra çekme deneyi ile elde edilen kuvvet – uzama diyagramları sırasıyla Şekil 5.49, 5.50, 5.51 ve 5.52’de verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi, tüm titreşim çevrimlerinde plakaların ortalarından çıkarılan numunelere ait kopma kuvvetleri, uçlarından çıkarılanlara kıyasla daha yüksektir.



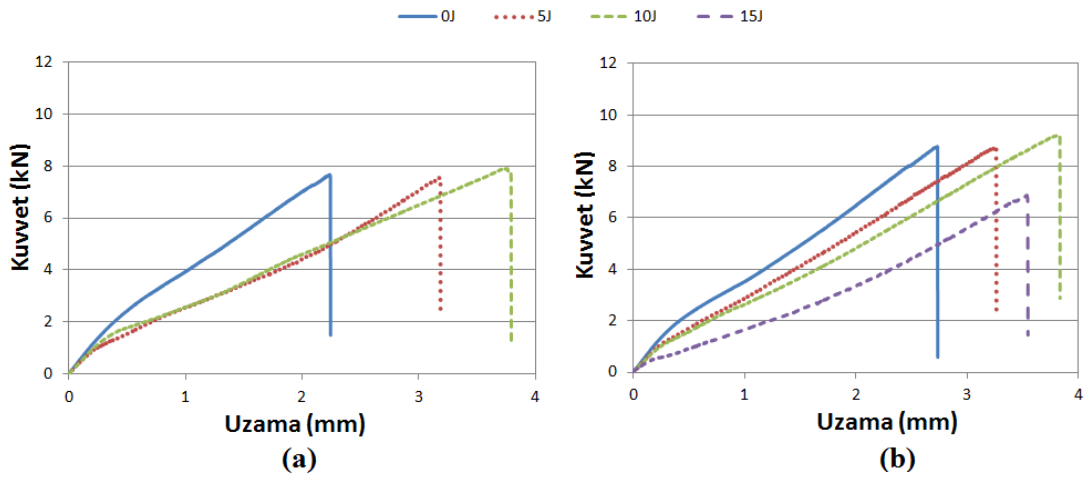
Şekil 5.49: 1.5×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların farklı aksenal darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.



Şekil 5.50: 3×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların farklı aksenal darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.



Şekil 5.51: 12×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların farklı aksenal darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.



Şekil 5.52: 24×10^5 devir titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların farklı aksenal darbe yükleri altındaki kuvvet – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

Şekil 5.49’da, 1.5×10^5 titreşim çevriminde aksenal darbe uygulanmayan numunelere (0J) göre, 5J enerjili aksenal darbe uygulanan numunelerin kopma kuvvetlerinde belirgin bir fark görülmezken, 10J enerjili aksenal darbe uygulanan numunelerin kopma kuvvetlerinde, artış gözlemlenmiştir. Maksimum kopma kuvveti 10J enerjili darbe yüklerinin uygulanması sonrasında gözlemlenirken, aksenal darbe enerjisinin 15J olarak uygulanması sonrasında, numunelerin uç kısımlarındaki kopma kuvvetlerinde %14 oranında, orta kısımlarında ise yaklaşık %23 oranında düşüş görülmüştür.

İki kenarı sabitlenerek titreşime maruz bırakılan plakalardan alınan numunelere 20J enerjili darbe deneyleri uygulandığında, bütün numunelerin hasara uğradığı gözlemlenmiştir, bu nedenle 20J enerji değerlerinde hiçbir numunenin kuvvet – uzama diyagramı çıkarılamamıştır.

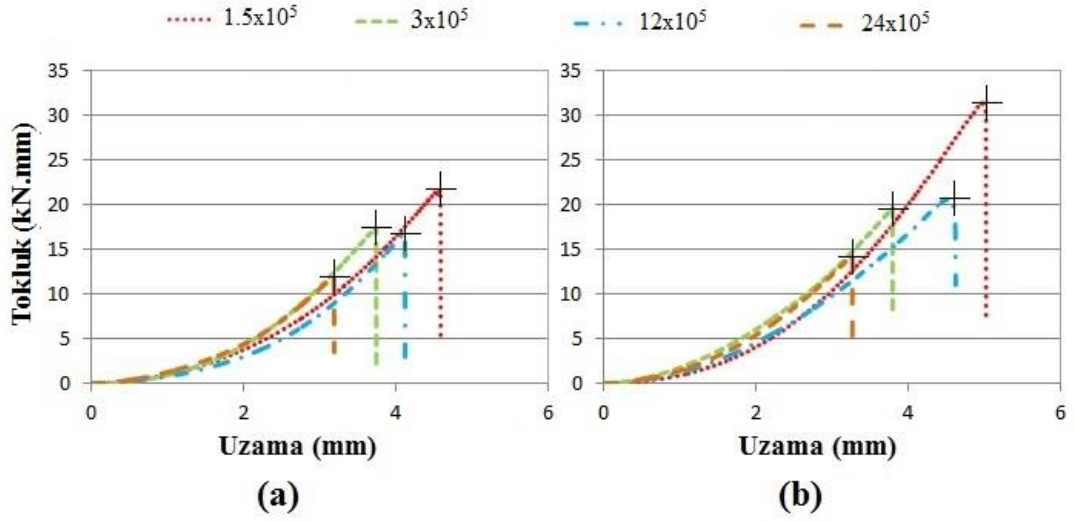
3×10^5 çevrimde (Şekil 5.50) plakaların uç kısımlarında aksel darbenin olmadığı (0J) ve düşük olduğu (5J) enerji değerlerinde kopma kuvvetlerinde pek bir değişim gözlemlenmezken, orta kısımlarda enerji değerinin 5J uygulanması durumunda kopma kuvveti, darbesiz numuneye göre, yaklaşık %10 oranında (11.6kN'dan 10.4kN'a) düşmüştür. Aksel darbe enerjisinin 10J olması durumunda ise kopma kuvveti 11.8kN olmuştur. Bu çevrimde de, aksel darbe enerjilerinin 10J'den 15J'e çıkarılması neticesinde kopma kuvvetleri azalmıştır. Bu azalma, numunelerin uç kısımlarında %14, orta kısımlarında ise %23 oranındadır. Düşük titreşim çevrimlerinde, plakaların uç ve orta kısımlarındaki kopma kuvvetlerindeki değişimlerin birbirine benzer oranlarda olduğu görülmektedir.

Şekil 5.51'de, 12×10^5 titreşim çevriminde iki kenarı sabitlenen plakaların uç ve orta kısımlarında, aksel darbe yüklerinin uygulanması ile numunelerin kopma kuvvetleri 5J enerjinin uygulanmasında bir miktar düşse de, 10J enerjinin uygulanması sonrasında artış göstermiş ve aksel darbe uygulanmayan numunelerin kopma kuvvetini az miktarda geçmiştir. Burada da plakaların orta kısımlarındaki kopma kuvvetlerinin, uç kısımlarına göre daha fazla çıktığı görülmektedir.

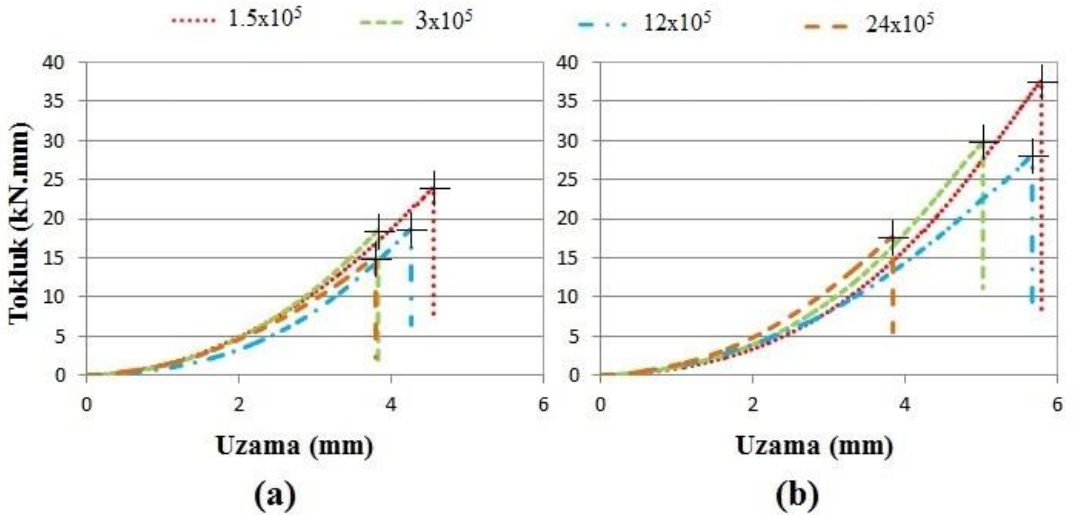
24×10^5 titreşim çevrimine (Şekil 5.52) maruz bırakılan iki kenarından sabitlenmiş numunelere 15J enerji değerinde aksel darbelerin uygulanması neticesinde, plakaların uç kısımlarındaki bütün numuneler hasara uğramıştır. 24×10^5 titreşim çevriminin, yapıştırılmalı bağlantıların dayanımını giderek azalttığı net bir şekilde görülmektedir. Titreşim çevriminin 12×10^5 ve 24×10^5 devirlerine doğru giderek artması durumunda, 5J enerji uygulanan numunelerin kopma kuvvetleri, aksel darbe uygulanmayan numunelerin kopma kuvvetlerine göre bir miktar düşüş gösterse de; 10J enerjili aksel darbe uygulanan numunelerin kopma kuvvetlerinde ise maksimum değeri almıştır.

Farklı çevrimlerde titreşime maruz bırakılan iki kenarı sabitlenmiş plakaların uç ve orta kısımlarından çıkarılan numunelerin 5J, 10J ve 15J enerji değerlerinde aksel

darbelere maruz bırakıldıktan sonra çekme deneyi ile elde edilen tokluk – uzama diyagramları sırasıyla Şekil 5.53, 5.54 ve 5.55’de verilmiştir. Eksenel darbe enerjisinin 20J değerinde uygulanması esnasında tüm numuneler hasar gördüğü için çekme testine tabi tutulamadığından tokluk – uzama değerleri verilememiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, plakaların uç kısımlarındaki (Parça 1) tokluk değerleri, orta kısımlarındaki (Parça 6) tokluk değerlerinden daha düşüktür. Titreşim çevrimi arttıkça, plakaların tokluğu azalmıştır.

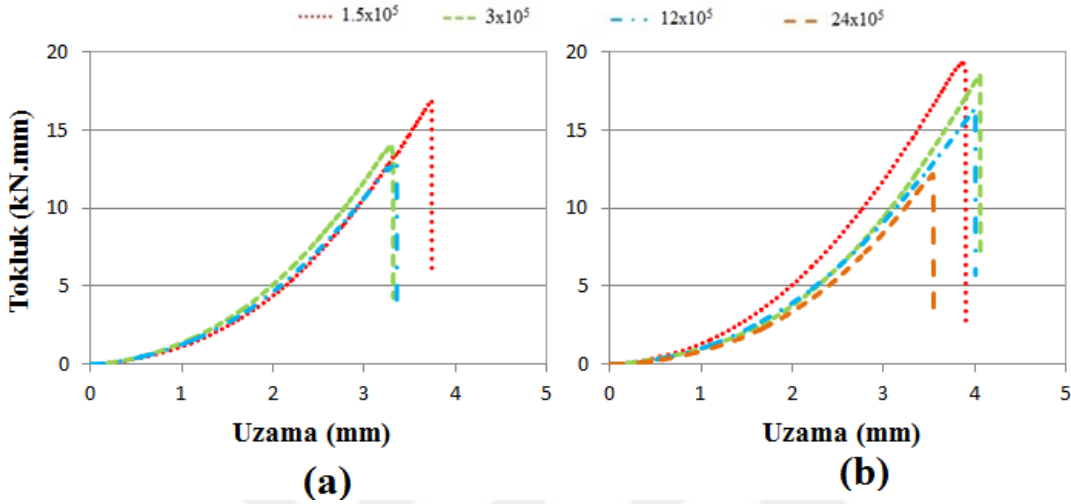


Şekil 5.53: Titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların 5J eksenel darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.



Şekil 5.54: Titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların 10J eksenel darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

Eksenel darbe enerjisinin 10J olarak uygulanması halinde (Şekil 5.54), iki kenarından sabitlenmiş plakaların orta kısmında 37 kN.mm değerinde maksimum tokluk görülmüştür. Bu değer, eksenel darbe uygulanmayan numunelerdeki 27 kN.mm (Şekil 5.33b) değerine nazaran %27 daha fazladır.



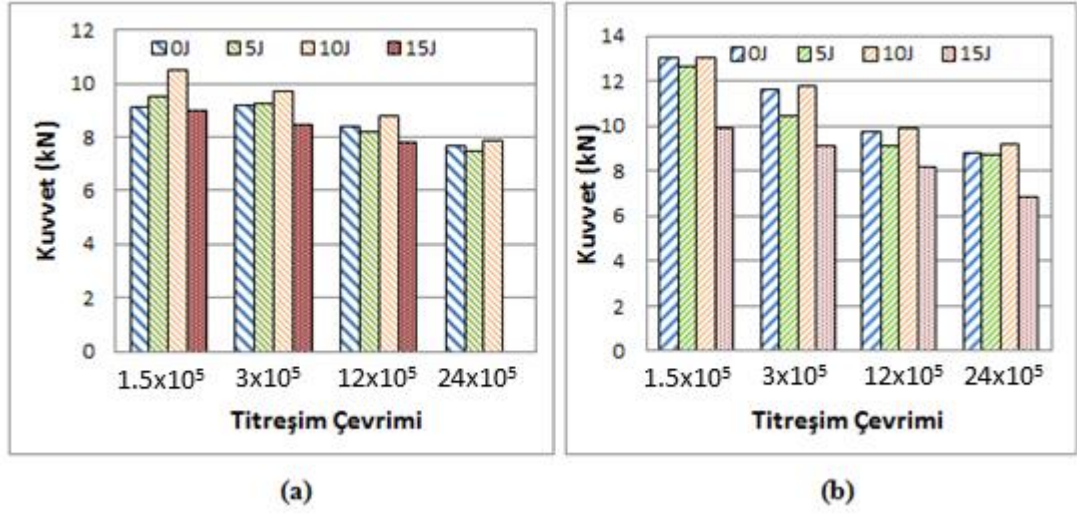
Şekil 5.55: Titreşim uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların 15J eksenel darbe yükü altındaki tokluk – uzama diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

24×10^5 titreşim çevriminde, iki kenarından sabitlenmiş plakalara 15J değerinde eksenel darbe enerjisinin etkimesi durumunda (Şekil 5.55), plakaların uç kısımlarındaki numuneler (Parça 1) hasara uğramıştır.

Sonuçları daha rahat görebilmek için, değişen titreşim çevrimleri ve darbe enerjilerinde Parça 1 ve Parça 6'ya ait kopma kuvvetleri blok diyagramları ve standart sapmaları içeren değerleri sırasıyla Şekil 5.56 ve Tablo 5.6'da verilmiştir. Parça 1 için düşük titreşim çevrimlerinde (1.5×10^5 ve 3×10^5), eksenel darbe enerjisi 10J'e kadar arttırıldığında, kopma kuvvetlerinde artış gözlemlenirken, yüksek titreşim çevrimlerinde (12×10^5 ve 24×10^5); eksenel darbe enerjisi 5J'de kopma kuvvetleri düşmekte, 10J'de ise artarak maksimum değere çıkmaktadır. Enerji değeri 10J'den 15J'e çıkarıldığında ise kopma kuvvetleri diğer enerji seviyelerindeki kuvvetlere nazaran düşmüş, hatta; 24×10^5 titreşim çevriminde numune hasara uğramıştır.

Plakaların orta kısımlarında ise, tüm titreşim çevrimlerinde eksenel darbe enerjisi 0J'den 5J'e arttırıldığında, kopma kuvvetlerinde hafif bir düşüş olmuş 10J'de ise 0J

enerjili numunelerin kopma kuvvetlerine yakın değerler göstermiştir. Eksenel darbe enerjisinin 15J uygulanması durumunda, numunelerin kopma kuvvetleri azalmıştır.



Şekil 5.56: Farklı enerji seviyelerinde eksenel darbe uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların titreşim çevrimine bağlı kopma kuvveti diyagramı: a) Parça 1, b) Parça 6.

Tablo 5.6: Farklı eksenel darbe uygulanan iki kenarı sabitlenmiş plakaların kopma kuvveti değerleri.

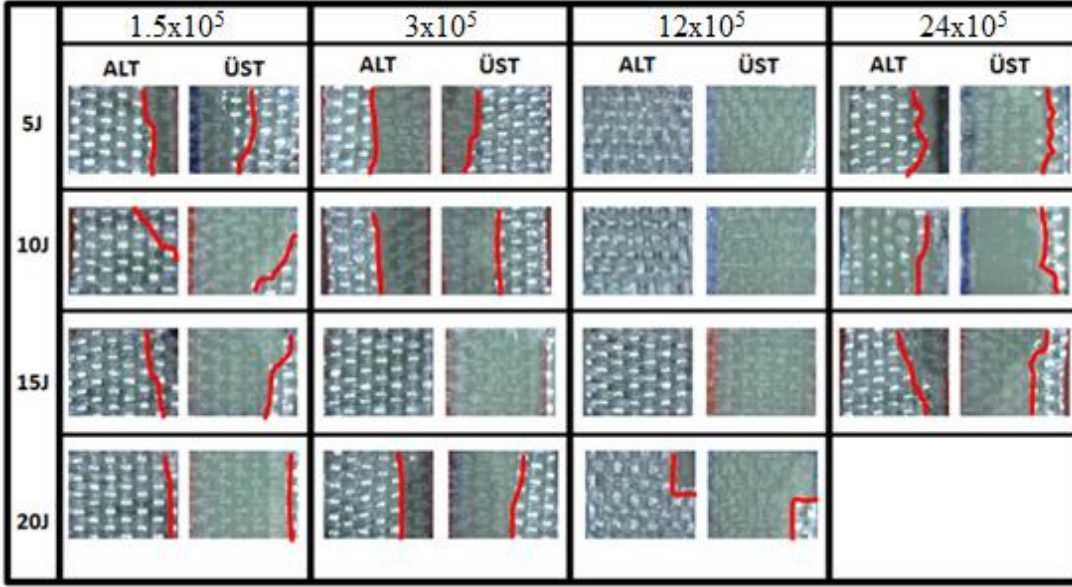
		Kopma Kuvveti (kN)			
		1.5	3	12	24
Darbe (J)	Çevrim (x10 ⁵)				
Parça 6	0	13 (± 0.81)	11.6 (± 0.75)	9.74 (± 0.57)	8.77 (± 0.52)
	5	12.6 (± 0.78)	10.4 (± 0.7)	9.1 (± 0.51)	8.7 (± 0.52)
	10	13 (± 0.8)	11.8 (± 0.72)	9.9 (± 0.56)	9.2 (± 0.5)
	15	9.9 (± 0.62)	9.1 (± 0.5)	8.2 (± 0.48)	6.8 (± 0.35)
	20	Hasar	Hasar	Hasar	Hasar
Parça 1	0	9.16 (± 0.6)	9.22 (± 0.52)	8.4 (± 0.46)	7.67 (± 0.42)
	5	9.5 (± 0.61)	9.3 (± 0.54)	8.2 (± 0.44)	7.5 (± 0.4)
	10	10.5 (± 0.7)	9.7 (± 0.58)	8.8 (± 0.5)	7.9 (± 0.44)
	15	8.99 (± 0.55)	8.5 (± 0.51)	7.8 (± 0.38)	Hasar
	20	Hasar	Hasar	Hasar	Hasar

*Deneysel verilerden elde edilen standart sapmalar parantez içerisinde gösterilmiştir.

5.3.3 Titreşim ve eksenel darbe uygulanmış plakalardaki hasar durumları

Titreşim ve eksenel darbe uygulanan numunelerin mekanik özellikleri çekme testi vasıtasıyla incelenmiştir. Çekme testleri sonrasında hasara uğrayan numunelerin

yapıştırma yüzeylerinden dijital mikroskop ile görüntüler alınarak, yapıştırıcının, yapıştırılan plakalar arasındaki miktarı ve yüzeyler üzerindeki yoğunluğu irdelenmiştir. Şekil 5.57’de iki kenarından serbest plakalardan çıkarılan Parça 3 numunelerinden elde edilmiş hasar görüntüleri verilmiştir. Bütün yüzeylerde ASTM D5573 standardında belirtilen “az miktarda fiber yırtılma hasarı” mevcuttur.

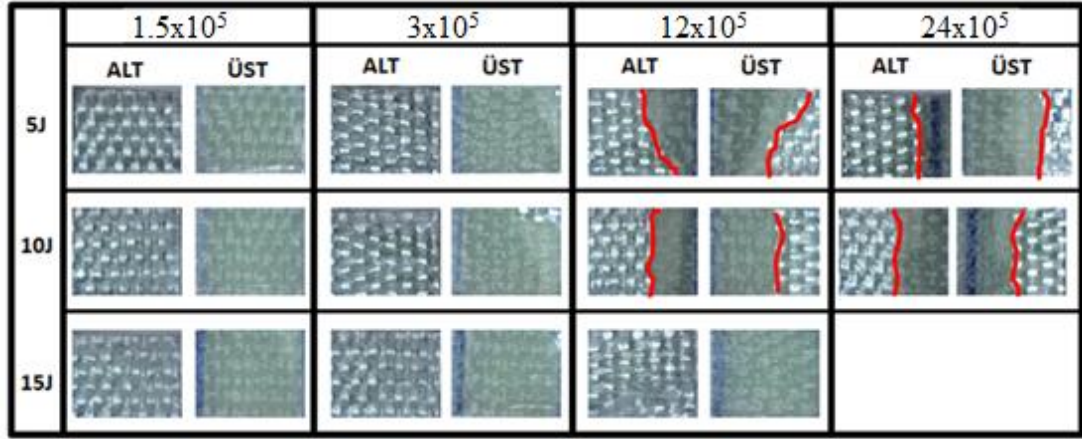


Şekil 5.57: İki kenarı serbest sınır şartındaki titreşimler sonrasında aksel darbelere maruz bırakılan numunelerin hasar görüntüleri.

Bu görüntülerde, numunelere uygulanan her bir aksel darbe enerjisi değerinde, titreşim devri 12×10^5 'e kadar arttıkça, yapıştırılan bölgeler üzerindeki yapıştırıcının yoğunluğu tek plaka üzerinde toplanmaktadır. Titreşim devrinin 24×10^5 olması durumunda yapıştırıcıların yoğunlukları tekrardan her iki plaka üzerinde oluşmaktadır. Yapıştırıcı yoğunluklarının tek plaka üzerinde toplanması, yapıştırmalı bağlantı dayanımının arttığının göstergesidir. Titreşim çevriminin 24×10^5 olduğu durumda, 20J aksel darbe enerjisi uygulanan numuneler, darbe testleri esnasında hasar gördüğü için Şekil 5.57'ye eklenememiştir. Hasar yüzeyleri her bir titreşim devri için incelendiğinde, 10J aksel darbe enerjisi uygulanan numunelerin hasar yüzeylerindeki yapıştırıcı yoğunluklarının, diğer enerji değerlerindeki hasar yüzeylerine nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum; numunelere 10J enerji değerlerinde etkiyen aksel darbeler sonrasındaki yapıştırmalı bağlantı

dayanımlarının, diğer enerji değerlerinde etkiyen numunelerin dayanımlarına göre daha yüksek olmasını ispatlamaktadır.

Şekil 5.58’de farklı devirlerde titreşime maruz bırakılan iki kenarı sabitlenmiş plakalardan elde edilen numunelerin farklı eksenel darbe yüklerine maruz bırakılması sonrasında çekme deneyleri ile oluşturulan hasar görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.58: İki kenarı sabitlenmiş sınır şartındaki titreşimler sonrasında eksenel darbelere maruz bırakılan numunelerin hasar görüntüleri.

Burada, numunelere uygulanan her bir eksenel darbe enerjisi değeri için, titreşim devri arttıkça, hasarlı yüzeylerdeki yapıştırıcı yoğunluğunun tek yüzey üzerinden her iki yüzeye doğru arttığı görülmektedir. Bu durum; yapıştırıcı bağlantıların dayanımının, artan titreşim çevrimine bağlı olarak, giderek azaldığının göstergesidir. Eksenel darbe uygulanan numunelerin tümü, 20J enerji değeri altında hasara uğradığı için, çekme deneylerine tabi tutulamamış, bu nedenle hasar görüntüleri alınamamıştır. Benzer şekilde, titreşim çevriminin 24x10⁵ olduğu durumda 15J eksenel darbe enerjisi uygulanan numuneler de hasar gördüğü için Şekil 5.58’de gösterilememiştir. Eksenel darbe deneyi esnasında hasara uğrayan, bu nedenle çekme deneyine tabi tutulamayan numune görüntüleri Şekil 5.59’da gösterilmektedir. Bu numunelerde fiberlerden yırtılma hasarı gözlemlenmiştir.

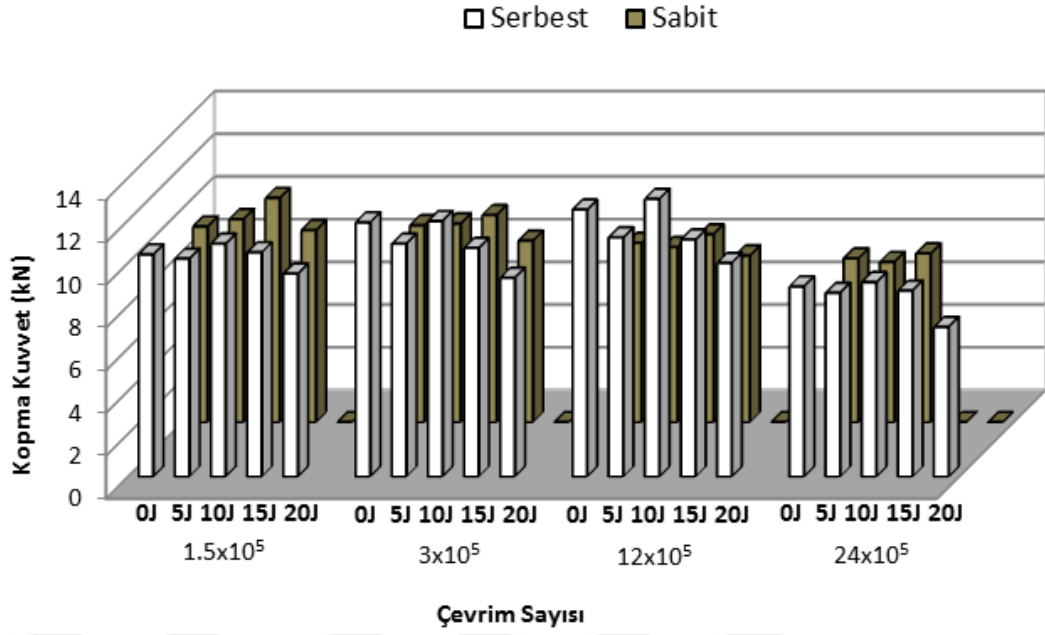


Şekil 5.59: Eksenel darbe sonrası hasara uğrayan numune görüntüsü.

Numunelere 20J'lük eksenel darbe uygulandığında, yapıştırılan kompozit plakalardaki matris malzeme olan epoksi polimerinin dayanamadığı, DP-460 yapıştırıcının matrisi oluşturan epoksilere iyi şekilde tutunabilmesine rağmen, epoksi matrisinin cam elyaflara iyi şekilde tutunamadığı görülmektedir.

5.3.4 İki kenarı serbest bırakılan ve sabitlenen plakalara uygulanan eksenel darbeler sonrasında elde edilen sonuçların mukayesesi

Şekil 5.60'ta her iki kenarından serbest bırakılan ve iki kenarı sabitlenmiş sınır şartları için, uç kısımlardan alınan numunelerin (Parça 1) farklı eksenel darbe enerjileri altındaki kopma kuvveti değerlerine ilişkin karşılaştırmalı blok diyagramları görülmektedir. Her iki sınır şartının genelinde 10J enerjili eksenel darbe uygulanan numunelerin dayanımının, diğer numunelere nazaran, arttığı görülmüştür. Ayrıca, uç ve orta kısımlardaki tüm diyagramlar incelendiğinde, yapıştırılan plakaların iki kenarı serbest sınır şartında, bütün titreşim parametrelerinde, uç kısımlarından ortalara doğru gidildikçe kopma kuvvetlerinin azaldığı görülürken; iki kenarından sabitlenmiş sınır şartında, bütün titreşim parametrelerinde, uç kısımdan ortalara doğru gidildikçe çekme deneyi vasıtasıyla elde edilen kopma kuvvetlerinin arttığı görülmektedir. Uygulanan eksenel darbeler sonrasında da bu durum, geçerliliğini korumuştur.

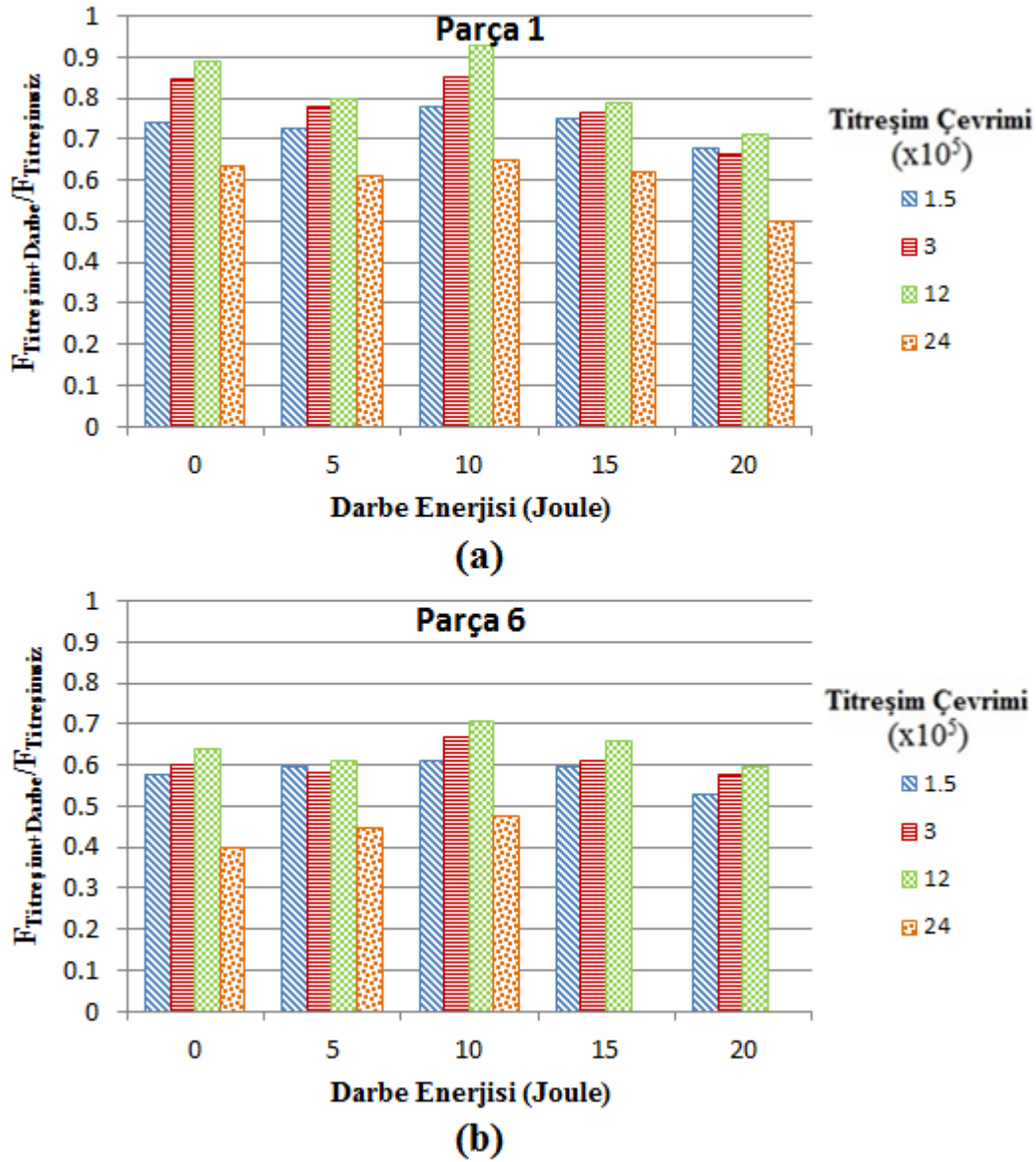


Şekil 5.60: Farklı titreşim çevrimlerindeki iki kenarı serbest ve sabitlenmiş plakaların aksenal darbelere maruz bırakıldıktan sonraki kopma kuvveti blok diyagramı (Parça 1).

Her iki sınır şartında da, çekme deneyleri sonrasında yapıştırılan yüzeylerde “az miktarda fiber yırtılma hasarı ve fiber yırtılma hasarı” gözlemlenirken, aksenal darbe esnasında hasara uğrayan yapıştırılmış yüzeylerde “fiber yırtılma hasarı” gözlemlenmiştir.

Farklı titreşim çevrimleri sonrasında aksenal darbe alan numunelerin kopma kuvvetleri ($F_{\text{Titreşim+Darbe}}$), titreşime maruz bırakılmayan, 14.1kN’luk değere sahip, kopma kuvveti ($F_{\text{Titreşimsiz}}$), değeri ile normalize edilmiştir. Normalize edilen iki kenarı serbest ve iki kenarı sabitlenmiş plakaların uç (Parça 1) ve orta (Parça 6) kısımlarındaki değerler sırasıyla Şekil 5.61 ve 5.62’deki blok diyagramlarında gösterilmiştir.

İki kenarı serbest olarak titreşime maruz bırakılan plakalara aksenal darbe uygulanması sonrasında (Şekil 5.61), aksenal darbe enerjisinin 10J olduğu durumdaki bütün çevrimlerde maksimum kopma kuvveti elde edilmiştir. Titreşim etkisi hemen hemen her çevrimde benzerlik göstermiştir; çevrim 12×10^5 ’e kadar artarken kopma kuvveti değerleri artmış, çevrimin 24×10^5 olması halinde kopma kuvvetleri minimum değerleri almış ve ortalama %45 civarında azalmıştır.

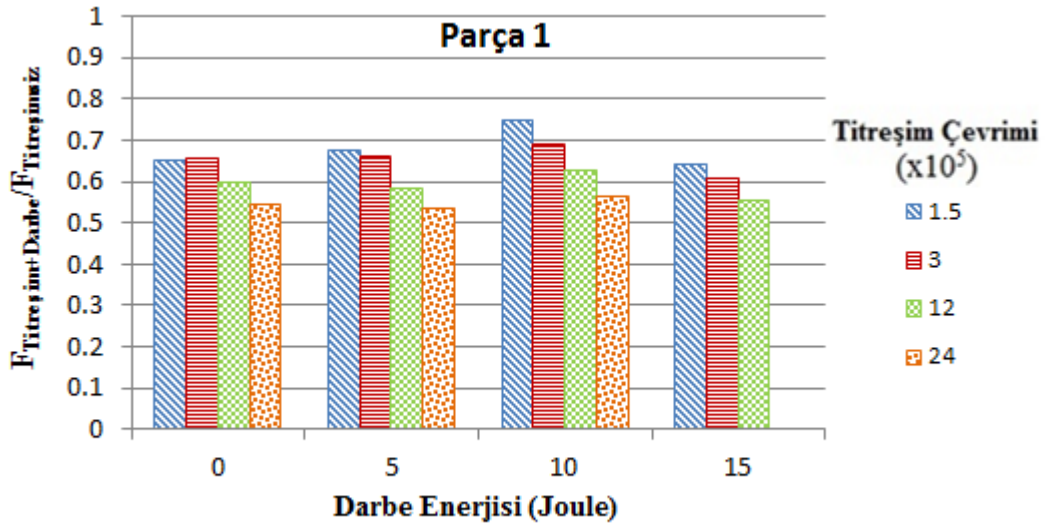


Şekil 5.61: Titreşime maruz iki kenarı serbest plakaların farklı eksenel darbelerdeki normalize edilmiş kopma kuvvetleri; a) Parça 1, b) Parça 6.

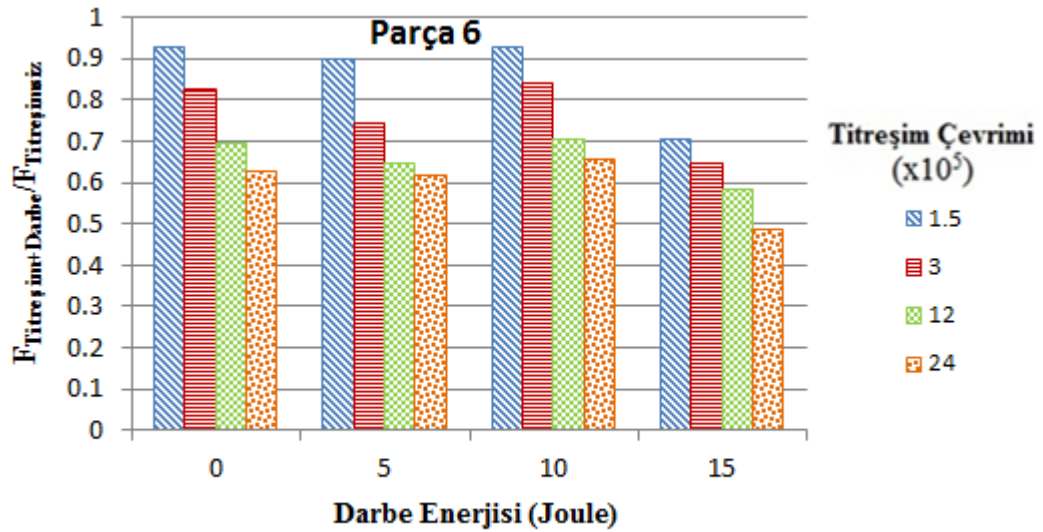
Titreşime maruz bırakılan iki kenarından sabitlenmiş plakalara uygulanan eksenel darbeler sonrasında 10J değerinde etkiyen eksenel darbe yükleri sonrasında, kopma kuvvetinin maksimum olduğu görülmüştür. Titreşim çevrimi arttıkça, kopma kuvvetleri her bir eksenel darbe enerjisinde azalmıştır (Şekil 5.62).

Her iki sınır şartında titreşime maruz bırakılan plakalar eksenel darbe uygulanması sonrasında, eksenel darbe uygulanmamış plakalardan elde edilen değişimlere benzer

durumları sergilemiştir. Eksenel darbe enerjisinin 10J olması ile çoğu numunelerdeki kopma kuvveti artmıştır.



(a)

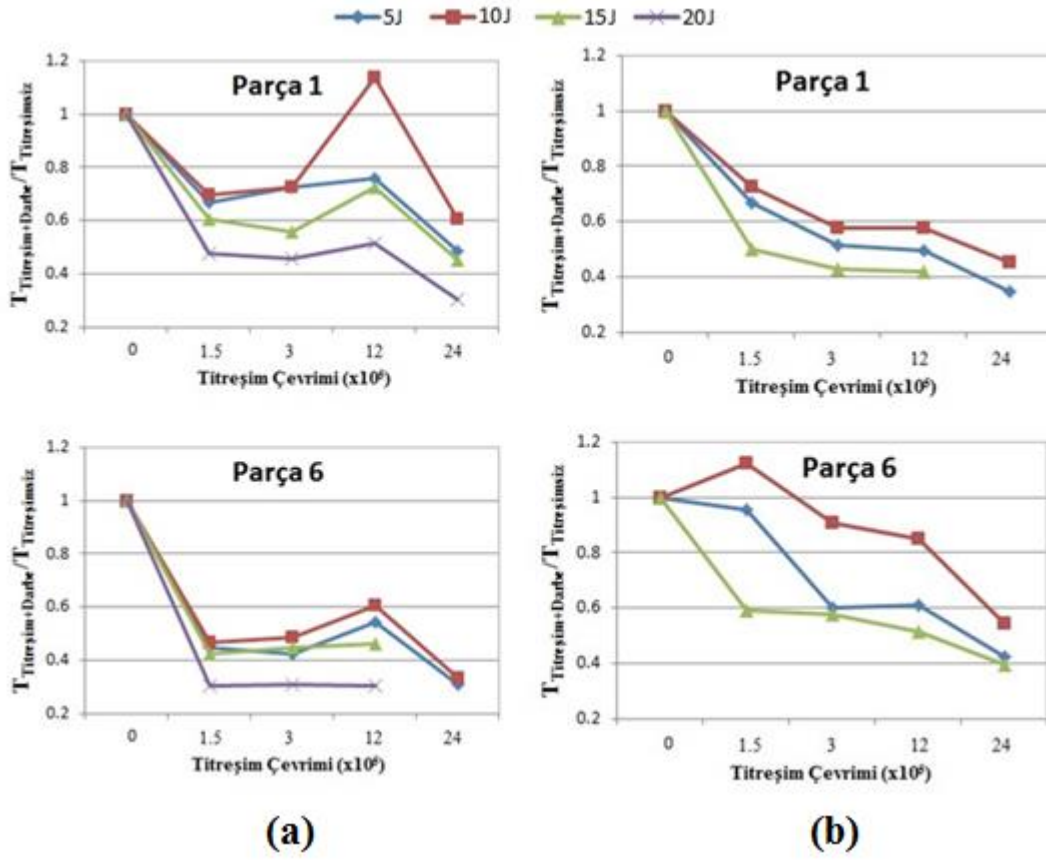


(b)

Şekil 5.62: Titreşime maruz iki kenarı sabitlenmiş plakaların farklı eksenel darbelerdeki normalize edilmiş kopma kuvvetleri; a) Parça 1, b) Parça 6.

Her iki sınır şartında plakaların uç (Parça 1) ve orta (Parça 6) kısımlarındaki normalize edilen tokluk değerlerindeki değişimler Şekil 5.63'te verilmiştir. Buradaki normalize edilen değerler; titreşim ve eksenel darbe sonrasında numunelerde meydana gelen tokluk değerinin ($T_{\text{Titreşim+Darbe}}$), hiçbir şekilde titreşime ve eksenel

darbeye maruz bırakılmamış numunede meydana gelen tokluk değerine ($T_{\text{Titreşimsiz}}$) oranlanması ile elde edilmiştir.



Şekil 5.63: Normalize edilmiş tokluk değerleri;

a) İki kenarı serbest, b) İki kenarı sabit.

Tokluk değerlerinin normalize edildiği grafiklerde, titreşime maruz bırakılan iki kenarı serbest plakaların uç kısımlarının (Parça 1) tokluğunun, orta kısımlarındakine (Parça 6) göre daha fazla olduğu görülürken, iki kenarı sabit plakalarda tam tersi durum görülmektedir. Titreşim devrinin artması halinde, tokluk değerlerinin artış ve azalışına ilişkin değişimler, kopma kuvvetindeki değişimlerle benzerlik göstermektedir. Her iki sınır şartında da maksimum tokluk değeri, 10J enerjili eksenel darbe uygulanan numunelerde meydana gelmiştir.

6. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Endüstrinin birçok alanında kompozit malzemelerin sıklıkla kullanılması, bu malzemelerin birbirine bağlanmasını sağlayan epoksi esaslı yapıştırıcıların da geliştirilmesine sebep olmuştur. Gelişen yapıştırıcı teknolojisi de, kompozit bağlantıların çeşitli şartlar altındaki dayanımının incelenmesini gereklilik haline getirmiştir. Bu bağlamda gerçekleştirilen doktora çalışması kapsamında epoksi esaslı yapıştırıcılarla tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantıların farklı şartlar ve mekanik etkiler altındaki dayanım özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sırasıyla değerlendirilmektedir:

Çalışmanın ilk aşamasında; iki farklı epoksi esaslı yapıştırıcı ile birleştirilen tek taraftan bindirmeli kompozit bağlantıların, farklı enerjilerde tek seferlik ve tekrarlı etkileyen aksenal darbe yükleri altındaki mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapıştırılan kompozit bağlantılara etkileyen tek seferlik ve tekrarlı aksenal darbe yükleri ve sonrasında gerçekleştirilen çekme deneyleri neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki özetlenmiştir;

- 20J değerindeki tekrarlı aksenal darbe yüküne maruz kalan tüm bağlantılar hasara uğramıştır.
- Tek seferlik aksenal darbe uygulamalarında DP-460 yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuş bağlantı dayanımı, Loctite 9466 yapıştırıcı kullanılan bağlantılara kıyasla daha yüksek çıkmıştır.
- 5J ve 10J değerindeki tekrarlı aksenal darbe yüklerinde, Loctite 9466 yapıştırıcılı bağlantıların kopma mukavemetleri, DP-460 yapıştırıcılı bağlantılarınkine göre daha yüksektir.
- 10J değerinde aksenal darbe uygulanması halinde, her iki yapıştırıcının kullanıldığı bağlantıların kopma dayanımları, diğer enerji seviyelerdeki darbe uygulamalarından elde edilen değerlere göre daha fazla çıkmıştır.

Çalışmanın ikinci aşaması kapsamında, DP-460 yapıştırıcılar ile tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantılara farklı sıcaklıklarda (-20°C, 0 °C, 20 °C, 40 °C, 60 °C) uygulanan aksenal darbe yükleri ve çekme deneyleri sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir;

- Oda sıcaklığından düşük sıcaklık değerlerinde ve yüksek darbe enerjilerinde, kompozit bağlantıdaki yapıştırıcının bağ kuvvetleri azaldığı için numunenin kopma mukavemeti azalmıştır.
- Oda sıcaklığının üzerinde ve camsı geçiş sıcaklığının altında olan 40°C sıcaklıkta, numunelere uygulanan aksenal darbe enerjileri arttıkça bağlantıların kopma kuvvetleri de artmıştır. 40°C sıcaklık haricindeki tüm sıcaklıklarda (gerek üzerinde gerekse aşağısında), numunelere uygulanan aksenal darbe enerjisinin artışı, bağlantı dayanımlarını azaltmıştır.
- Yapıştırıcı malzemenin camsı geçiş sıcaklığı değerine yakın olan 60°C sıcaklıkta, kopma kuvveti değerleri gerek darbe almamış, gerekse farklı enerjilerde darbe almış numuneler için diğer sıcaklık değerlerinde elde edilenlere göre çok daha düşük çıkmaktadır.
- 20°C sıcaklıkta, darbe almış ve almamış tüm numunelerde en yüksek bağlantı dayanımı görülmüştür.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, yapıştırılmış kompozit plakalar farklı devirlerde (1.5×10^5 , 3×10^5 , 12×10^5 ve 24×10^5) titreşime maruz bırakılmışlardır. Titreşim esnasında iki farklı sınır şartı oluşturulmuştur. Birinci sınır şartında, kompozit plakalar karşılıklı iki kenarından serbest bırakılırken, ikinci sınır şartında bu kenarlar sabitlenmiştir. Yapılan deneyler sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- Titreşim sonrası ortaya çıkan mekanik özellikler ve hasar modları üzerinde, titreşim çevrim sayısı, incelenen numunenin titreşim kaynağından olan uzaklığı ve sınır şartları gibi parametreler etkilidir.
- Titreşime maruz bırakılan kompozit bağlantıların kopma kuvvetleri, titreşimin uygulanmadığı bağlantıların kopma kuvvetlerine göre daha düşük değerlere sahiptir. Başka bir deyişle, titreşim, bu bağlantılardaki dayanımı azaltmıştır.

- İki kenarından sabitlenerek titreşime maruz bırakılan yapıştırırmalı kompozit bağlantılarda titreşim çevrim sayısı arttıkça, bu bağlantıların kopma kuvvetleri azalmıştır. Titreşim devrinin deneylerde uygulanan maksimum değere (24×10^5) ulaşması sonucunda bağlantı dayanımı, titreşime maruz bırakılmayan kompozit bağlantıların dayanımının hemen hemen yarısına kadar düşmektedir. Karşılıklı iki kenarın serbest bırakıldığı durumda ise bağlantı dayanımları belirli bir titreşim çevrim sayısına kadar artmış ve bu kritik devirin üzerine çıkılması halinde düşmüştür.
- İki kenarından sabitlenerek titreşime maruz bırakılan yapıştırırmalı kompozit plakaların orta bölgelerinden çıkarılmış numunelere ait kopma dayanımları, kenar bölgelerindeki numunelerin kopma dayanımlarına göre daha yüksektir. Diğer sınır şartında ise durum bunun tam tersidir.
- Titreşimsiz ve düşük titreşim çevrimlerine maruz numunelerde görülen hasar tipi, az miktarda fiber yırtılmasıdır. Titreşim çevrim sayısı arttıkça, bu hasara kohezyon hasarı da eşlik etmiştir.
- Maksimum bağlantı dayanımının elde edildiği durumlarda bağlantı sünek özellik gösterirken, düşük dayanımlarda gevrek özellik göstermiştir.

Çalışmanın son aşamasında, yapıştırırmalı bağlantılar iki farklı sınır şartında titreşime maruz bırakıldıktan sonra farklı aksenal darbe enerjileri (5J, 10J, 15J, 20J) uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir:

- İki kenarından sabitlenerek titreşime ve sonrasında aksenal darbeye maruz bırakılan plakaların uç bölgelerinden çıkarılan numunelere ait kopma dayanımları, orta bölgelerden çıkarılan numunelere göre daha düşüktür. İki kenarı serbest bırakılan plakalar için ise bu durumun tersi söz konusudur.
- İki kenarından sabitlenerek titreşime maruz bırakılmış plakalardan çıkarılan tüm numuneler, uygulanan 20J enerjili aksenal darbe yükleri sonrasında hasar görmüştür. İki kenarından serbest titreşime maruz bırakılan plakalarda ise, numuneler en yüksek titreşim çevrimi olan 24×10^5 'ten sonra bile 20J'lük darbe enerjisine dayanabilmişlerdir.

- İki kenarından sabitlenerek titreşime maruz bırakılan tüm numunelerde artan darbe enerjisi bağlantıların kopma dayanımını düşürmüştür. Sadece 10J darbe enerjisi uygulandığında numunelerin, diğer darbe alan numunelere kıyasla, kopma kuvvetlerinde artış oluşmuştur. Benzer davranışlar iki kenarı serbest olarak titreşime maruz bırakılan plakalarda da görülmüştür.
- Titreşime maruz bırakılmış iki kenarı serbest plakalardan çıkarılan numunelere eksenel darbe yüklerinin uygulanması sonrasında, titreşim çevrimi 12×10^5 iken dayanım değerleri, diğer çevrimlerdekine kıyasla, maksimum seviyede olurken, 24×10^5 olması durumunda bu değerler minimum seviyede olmaktadır. Benzer şekilde, titreşime maruz bırakılan iki kenarından sabitlenmiş plakalardan çıkarılan numunelere eksenel darbe yükleri uygulanması sonrasında, titreşim çevriminin artması ile numune dayanımının giderek azaldığı görülmüştür.
- Yüksek devirde (24×10^5) titreşime maruz bırakılan iki kenarı serbest plakaların titreşim motoruna yakın olan bölgelerinden çıkarılan numunelere uygulanan 15J ve 20J'lük darbeler sonrasında numuneler hasar görmüştür.
- Eksenel darbe sonrasında hasar gören numunelerde fiber yırtılma hasar modu ortaya çıkmıştır. Darbe sonrası hasara uğramayıp çekme testine tabi tutulan numunelerde ise az miktarda fiber yırtılma hasarı görülmüştür.

Farklı sınır şartlarında titreşime maruz bırakılan bağlantılara uygulanan eksenel darbe deneyleri sonrasında elde edilen sonuçlar neticesinde; titreşimin zorlamalı yükler altında olması durumunda numunelerin yüksek enerjili eksenel darbelere karşı dayanım sağlayamadığı görülmüştür. Titreşim sonrasında, belirlenen parametrelere bağlı olarak, eksenel darbe enerjisinin 10J olması durumunda numune dayanımının arttığı görülmüştür. Bu durum, titreşimli ortamlarda kompozit bağlantılara eksenel darbenin tesir etmesi ile dayanımı düşürecek bir etkisinin olmayacağını göstermiştir.

Farklı ortamlarda ve sınır şartlarında eksenel darbelere, titreşimlere ve titreşimli eksenel darbelere maruz kalan tek taraftan bindirmeli yapıştırılan kompozit bağlantıların sergilediği mekanik davranışlara bakıldığında, bu tür malzeme ve

bağlantıların kullanıldığı makinelerde/yapılarda ortaya çıkan zorlanmaların incelenmesinin ne denli önemli olduğu anlaşılmaktadır. Yapıştırımlı bağlantılara, farklı tekrar sayılarında ve değişen sıcaklıklarda uygulanan eksenel darbeler sonrasında, bağlantıların mekanik davranışlarındaki değişimlerin incelenmesi ile günümüz ihtiyacına çözüm aramaya yönelik sonuçlar sergilenmiştir. Benzer şekilde, yapıştırımlı bağlantıların titreşim kaynağından olan uzaklıkları, bağlantısı yapılmış plakaların sabitlenme şekilleri, titreşim çevrim sayıları, titreşim sonrası etkileyen eksenel darbelerin bağlantıların mekanik performansını ve hasar mekanizmalarını etkileyen önemli parametreler olduğunu göstermiştir. Bu tarz bağlantıların kullanıldığı kompozit yapıların dizaynında tüm bu parametreler ve deneylerden elde edilen sonuçlar dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların literatüre katkı sağlaması ve ilerleyen çalışmalarda sonlu elemanlar analizi ile nümerik çözümlerin uygulanmasında kaynak gösterilebilecek bir nitelikte olması amaçlanmıştır. Ayrıca, endüstride eksenel darbelere ve titreşimlere maruz bırakılan makine parçalarında kullanılan yapıştırımlı kompozit bağlantıların dizaynına, bakım ve onarım prosedürlerine ışık tutar niteliktedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Gay D., Hoa S.V., & Tsai S.W.** (2002). *Composite Materials: Design and Applications*: CRC Press.
- [2] **Adams R.D., Comyn J., & Wake W.C.** (1997). *Structural Adhesive Joints in Engineering*: Springer.
- [3] **Mazumdar S.K.** (2002). *Composites Manufacturing*: CRC Press.
- [4] **Callister W.D.** (2007). *Materials Science and Engineering*: Wiley.
- [5] **Daniel I.M. & Ishai O.** (1994). *Engineering Mechanics of Composite Materials*: Oxford University Press.
- [6] **da Silva L.F.M., Öchsner A., & Adams R.** (2011). *Handbook of Adhesion Technology*: Springer.
- [7] **Wahab M.A.** (2014). *Mechanics of Adhesives in Composite and Metal Joints, Finite Element Analysis with ANSYS*: Ghent University, Belgium.
- [8] **Budhea S., Banea M.D., de Barrosa S., & da Silva LFM.** (2017). An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion&Adhesives*, 72;30-42
- [9] **Durodola J.F.** (2017). Functionally graded adhesive joints – A review and prospects. *International Journal of Adhesion&Adhesives*, 76;83-9
- [10] **Wahab M.A.** (2012). Fatigue in adhesively bonded joints: A review. *International Scholarly Research Network (ISRN Material Science)*, Doi:10.5402/2012/746308.
- [11] **Thoppul S.D., Finegan J., & Gibson R.F.** (2009). Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – A review. *Composites Science and Technology*, 69;301-29.
- [12] **Akderya T., Kemiklioğlu U., & Sayman O.** (2016). Effects of thermal ageing and impact loading on tensile properties of adhesively bonded fibre/epoxy composite joints. *Composites Part B*, 95; 117-22.
- [13] **da Silva L.V., da Silva F.W., Tarpani J.R., de Camargo Forte M.M. & Amico S.C.** (2016). Ageing effect on the tensile behavior of pultruded CFRP rods. *Materials and Design*, 110;245-54.
- [14] **Fernandes R.L., de Moura M.F.S.F., & Moreira R.D.F.** (2016). Effect of moisture on pure mode I and II fracture behavior of composite bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 68;30-8.

- [15] **Kemiklioğlu U., Sayman O., Soykok I.F., Akderya T., & Dere R.** (2017) The mechanical behaviour of adhesively bonded composite joints under repeated axial impacts at different temperatures. *Science and Engineering of Composite Materials*, 24(6).
- [16] **Ghanbari E., Sayman O., Pekbey Y., & Özdemir O.** (2016). Experimental analysis of single-lap composite joints with two different adhesives at various conditions. *Journal of Composite Materials*, 50;1709-15.
- [17] **Bodjona K., & Lessard L.** (2015). Load sharing in single-lap bonded/bolted composite joints Part II: Global sensitivity analysis. *Composite Structures*, 129;276-83
- [18] **Biscaia H.C., Chastre C., Cruz D., & Viegas A.** (2017). Prediction of the interfacial performance of CFRP laminates and old timber bonded joints with different strengthening techniques. *Composites Part B*, 108;1-17.
- [19] **Guin W.E., & Wang J.** (2016). Theoretical model of adhesively bonded single lap joints with functionally graded adherends. *Engineering Structures*, 124;316-32.
- [20] **Chowdhury N.M., Wang J., Chiu W.K., & Chang P.** (2016). Experimental and finite element studies of thin bonded and hybrid carbon fibre double lap joints used in aircraft structures. *Composites Part B*, 85;233-42.
- [21] **da Silva L.F.M., Carbas R.J.C., Critchlow G.W., Figueiredo M.A.V., & Brown K.** (2009). Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29:621–32.
- [22] **Meneghetti G., Quaresimin M., & Ricotta M.** (2010). Influence of the interface ply orientation on the fatigue behaviour of bonded joints in composite materials. *International Journal of Fatigue*, 32:82–93.
- [23] **Song M.G., Kweon J.H., Choi J.H., Byun J.H., Song M.H., Shin S.J., & Lee J.** (2010). Effect of manufacturing methods on the shear strength of composite single-lap bonded joints. *Composite Structures*, 92:2194–202.
- [24] **Kanerva M., & Saarela O.** (2013). The peel ply surface treatment for adhesive bonding of composites: a review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 43:60–9.
- [25] **Liao L., Huang C., & Sawa T.** (2013). Effect of adhesive thickness, adhesive type and scarf angle on the mechanical properties of scarf adhesive joints. *International Journal of Solid Structures*, 50:4333–40.
- [26] **Moradi A., Carrère N., Leguillon D., Martin E., & Cognard J.Y.** (2013). Strength prediction of bonded assemblies using a coupled criterion under elastic assumptions: effect of material and geometrical parameters. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 47:73–82.
- [27] **Nguyen T.C., Bai Y., Zhao X.L., & Al-Mahaidi R.** (2013). Curing effects on steel/CFRP double strap joints under combined mechanical load, temperature and humidity. *Construction and Building Materials*, 40:899–907.

- [28] **Stazi F., Giampaoli M., Rossi M., & Munafò P.** (2015). Environmental ageing on GFRP pultruded joints: comparison between different adhesives. *Composite Structures*, 133:404–14.
- [29] **Akpınar S.** (2017). Effects of laminate carbon/epoxy composite patches on the strength of double-strap adhesive joints: experimental and numerical analysis. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 51:501–12.
- [30] **Mokhtari M., Madani K., Belhouari M., Touzain S., Feugas X., & Ratwani M.** (2013). Effects of composite adherend properties on stresses in double lap bonded joints. *Materials & Design*, 44:633–9.
- [31] **Park Y.B., Song M.G., Kim J.J., Kweon J.H., & Choi J.H.** (2010). Strength of carbon/epoxy composite single-lap bonded joints in various environmental conditions. *Composite Structures*, 92:2173–80.
- [32] **Markatos D.N., Tserpes K.I., Rau E., Markus S., Ehrhart B., & Pantelakis S.** (2013). The effects of manufacturing-induced and in-service related bonding quality reduction on the mode-I fracture toughness of composite bonded joints for aeronautical use. *Composites Part B*, 45:556–64.
- [33] **Mohan J., Ivanković A., & Murphy N.** (2014). Mode I fracture toughness of co-cured and secondary bonded composite joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 51:13–22.
- [34] **Mohan J., Ivanković A., & Murphy N.** (2015). Mixed-mode fracture toughness of co-cured and secondary bonded composite joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 134:148–67.
- [35] **Arenas J.M., Alía C., Narbón J.J., Ocaña R., & González C.** (2013). Considerations for the industrial application of structural adhesive joints in the aluminium–composite material bonding. *Composites Part B*, 44:417–23.
- [36] **Islam M.S., Tong L., & Falzon P.J.** (2014). Influence of metal surface preparation on its surface profile, contact angle, surface energy and adhesion with glass fibre prepreg. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 51:32–41.
- [37] **Iqbal H.S.M., Bhowmik S., & Benedictus R.** (2010). Surface modification of high performance polymers by atmospheric pressure plasma and failure mechanism of adhesive bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30:418–24.
- [38] **Encinas N., Oakley B.R., Belcher M.A., Blohowiak K.Y., Dillingham R.G., Abenojar J., & Martinez M.A.** (2014). Surface modification of aircraft used composites for adhesive bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 50:157–63.
- [39] **Sinmazçelik T., Avcu E., Bora M.O., & Çoban O.** (2011). A review: fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods. *Materials and Design*, 32:3671–85.

- [40] **Borsellino C., Di Bella G., & Ruisi V.F.** (2009). Adhesive joining of aluminium AA6082: the effects of resin and surface treatment. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29:36–44.
- [41] **Palmieri F.L., Belcher M.A., Wohl C.J., Blohowiak K.Y., & Connell J.W.** (2016). Laser ablation surface preparation for adhesive bonding of carbon fiber reinforced epoxy composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 68:95–101.
- [42] **Mohan J., Ramamoorthy A., Ivanković A., Dowling D., & Murphy N.** (2014). Effect of an atmospheric pressure plasma treatment on the mode I fracture toughness of a cocured composite joint. *Journal of Adhesion*, 90:733–54.
- [43] **Marzi S., Biel A., & Stigh U.** (2011). On experimental methods to investigate the effect of layer thickness on the fracture behavior of adhesively bonded joints *International Journal of Adhesion and Adhesives* , 31:840–50.
- [44] **Boutar Y., Naimi S., Mezlini S., da Silva L.F.M., Hamdaoui M., & Ali M.B.S.** (2016). Effect of adhesive thickness and surface roughness on the shear strength of aluminium onecomponent polyurethane adhesive single-lap joints for automotive applications. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30:1913–29.
- [45] **Azari S., Papini M., & Spelt J.K.** (2011). Effect of adhesive thickness on fatigue and fracture of toughened epoxy joints – Part II: analysis and finite element modeling. *Engineering Fracture Mechanics*, 78:138–52.
- [46] **Carlberger T., & Stigh U.** (2010). Influence of layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based adhesive – an experimental study. *Journal of Adhesion*, 86:814–33.
- [47] **Ji G., Ouyang Z., & Li G.** (2013). Effects of bondline thickness on Mode-I nonlinear interfacial fracture of laminated composites: an experimental study. *Composites Part B*, 47:1–7.
- [48] **Cooper V., Ivankovic A., Karac A., McAuliffe D., & Murphy N.** (2013). Effects of bond gap thickness on the fracture of nano-toughened epoxy adhesive joints. *Polymer*, 53:5540–53.
- [49] **Costa-Mattos H.S., Monteiro A.H., & Sampaio E.M.** (2010). Modelling the strength of bonded butt-joints. *Composites Part B*, 41:654–62.
- [50] **Naito K., Onta M., & Kogo Y.** (2012). The effect of adhesive thickness on tensile and shear strength of polyimide adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 36:77–85.
- [51] **da Silva L.F.M., de Magalhaes F.A.C.R.G., Chaves F.J.P., & de Moura M.F.S.F.** (2010). Mode II fracture toughness of a brittle and a ductile adhesive as a function of the adhesive thickness. *Journal of Adhesion*, 86:889–903.
- [52] **Tang J.H., Sridhar I., & Srikanth N.** (2013). Static and fatigue failure analysis of adhesively bonded thick composite single lap joints. *Composite Science and Technology*, 86:18–25.

- [53] **Xu W., & Wei Y.** (2013). Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 40:158–67.
- [54] **Neto J.A.B.P., Campilho R.D.S.G., & da Silva L.F.M.** (2012). Parametric study of adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 37:96–101.
- [55] **Mahi B.E., Benrahou K.H., Belakhdar K., Tounsi A., & Bedia E.A.A.** (2014). Effect of the tapered end of a FRP plate on the interfacial stresses in a strengthened beam used in civil engineering applications. *Mechanics of Composite Materials*, 50:467–76.
- [56] **Nanda K.A., & Siva P.N.** (2012). An experimental study of Flat-Joggle-Flat bonded joints in composite laminates. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 35:55–8.
- [57] **Bouchikhi A.S., Megueni A., Gouasmi S., & Boukoulida F.B.** (2013). Effect of mixed adhesive joints and tapered plate on stresses in retrofitted beams bonded with a fiberreinforced polymer plate. *Materials & Design*, 50:893–904.
- [58] **Li J., Yan Y., Zhang T., & Liang Z.** (2015). Experimental study of adhesively bonded CFRP joints subjected to tensile loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 57:95–104.
- [59] **Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., & Domingues J.J.M.S.** (2009). Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29:195–205.
- [60] **Marques E.A.S., Campilho R.D.S.G., & da Silva L.F.M.** (2016). Geometrical study of mixed adhesive joints for high temperature applications. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30:691–707.
- [61] **Hazimeh R., Challita G., Khalil K., & Othman R.** (2015). Experimental investigation of the influence of substrates' fibers orientations on the impact response of composite double-lap joints. *Composite Structures*, 134:82–9.
- [62] **Ozel A., Yazici B., Akpınar S., Aydın M.D., & Temiz S.** (2014). A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends. *Composites Part B*, 62:167–74.
- [63] **Gültekin K., Akpınar S., & Özel A.** (2014). The effect of the adherend width on the strength of adhesively bonded single-lap joint: experimental and numerical analysis. *Composites Part B*, 60:736–45.
- [64] **Park J.H., Choi J.H., & Kweon J.H.** (2010). Evaluating the strengths of thick aluminum-to aluminum joints with different adhesive lengths and thicknesses. *Composite Structures*, 92:2226–35.
- [65] **ASTM 5868:** (2014). Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding.

- [66] Ji G., Ouyang Z., Li G., Ibekwe S., & Pang S.S. (2010). Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints. *International Journal of Solids and Structures*, 47:2445–58.
- [67] Xu W., & Wei Y. (2012). Strength and interface failure mechanism of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 34:80–92.
- [68] Moreno M.C., Cela J.J.L., Vicente J.L.M., & Vecino J.A.G. (2015). Adhesively bonded joints as a dissipative energy mechanism under impact loading. *Applied Mathematical Modeling*, 39:3496-505.
- [69] Galliot C., Rousseau J., & Verchery G. (2012). Drop weight tensile impact testing of adhesively bonded carbon/epoxy laminate joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 35:68-75.
- [70] Schiel M., Kreling S., Unger C., Fischer F., & Dilger K. (2015). Behavior of adhesively bonded coated steel for automotive applications under impact loads. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 56:32-40.
- [71] Kadioglu F., & Adams R.D. (2015). Flexible adhesives for automotive application under impact loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 56:73-8.
- [72] Sayman O., Soykok I.F., Dogan T., Dogan A., & Arikian V. (2015). Effects of axial impacts at different temperatures on failure response of adhesively bonded woven fabric glass fiber/epoxy composite joints. *Journal of Composite Materials*, 49:1331-44.
- [73] Yue Q.R., Zheng Y., Chen X., & Liu X.G. (2016). Research on fatigue performance of CFRP reinforced steel crane girder. *Composite Structures*, 154:277-85.
- [74] Liu Q., Ma J., Kang L., Sun G., & Li Q. (2015). An experimental study on fatigue characteristics of CFRP – steel hybrid laminates. *Materials & Design*, 88:643-50.
- [75] Colombi P., & Fava G. (2015). Experimental study on the fatigue behaviour of cracked steel beams repaired with CFRP plates. *Engineering Fracture Mechanics*, 145:128-42.
- [76] Borrie D., Zhao X.L., Raman R.K.S., & Bai Y. (2016). Fatigue performance of CFRP patched pre-cracked steel plates after extreme environmental exposure. *Composite Structures*, 153:50-9.
- [77] Tang J.H., Sridhar I., & Srikanth N. (2013). Static and fatigue analysis of adhesively bonded thick composite single lap joints. *Composite Science and Technology*, 86:18-25.
- [78] Wu C., Zhao X.L., Chiu W.K., Al-Mahaidi R., & Duan W.H. (2013). Effect of fatigue loading on the bond behaviour between UHM CFRP plates and steel plates. *Composites Part B*, 50:344-53.
- [79] Borrie D., Liu H.B., Zhao X.L., Raman R.K.S., & Bai Y. (2015). Bond durability of fatigued CFRP-steel double-lap joints pre-exposed to marine environment. *Composite Structures*, 131:799-809.

- [80] Pang J., Du Y., Wu K., Hu P., & Li W. (2013). Fatigue analysis of adhesive joints under vibration loading. *Journal of Adhesion*, 89:12;899-920.
- [81] Du Y., & Shi L. (2014). Effect of vibration fatigue modal properties of single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 53;72-9.
- [82] Jen Y.M., & Ko C.W. (2010). Evaluation of fatigue life of adhesively bonded aluminium single-lap joints using interfacial parameters. *International Journal of Fatigue*, 32;330-340.
- [83] Mazumdar S.K., & Mallick P.K. (1998). Static and fatigue behavior of adhesive joints in SMC-SMC composites. *Polymer Composites*, 19(2); 139-146.
- [84] Kurbanoglu C. (2009). Makine Bilgisi: Nobel Yayın Dağıtım.
- [85] Kurbanoglu C. (2009). Makine Elemanları Teori, konstrüksiyon ve Problemler: Nobel Yayın Dağıtım.
- [86] Akkurt M. (2007). Makine Bilgisi: Birsen Yayınevi.
- [87] Babalık F. C. (2006). Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri: Nobel Yayın Dağıtım.
- [88] Petrie E. M. (1999). Handbook of Adhesives and Sealants: McGraw Hill Professional.
- [89] Harper C. A. (1992). Handbook of Plastics, Elastomers and Composites: McGraw-Hill.
- [90] Ebnesajjad S. & Landrock A. H. (2015). Adhesives technology handbook. 3rd ed. William Andrew (Elsevier).
- [91] Shields J. (1984). Adhesives handbook. 3rd ed. London: Butterworth.
- [92] Petrie E. M. (2002). Plastics and elastomers as adhesives. In: Harper CA, editor. Handbook of plastic and elastomers. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill.
- [93] ASTM D5573: (2012). Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints.
- [94] ASTM D3039: (2017). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- [95] ASTM D7078: (2012). Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method.
- [96] ASTM D638: (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.
- [97] <https://multimedia.3m.com/mws/media/661220/3mtm-scotch-weld-tm-epoxy-adhesive-dp460-ns-and-off-white.pdf> (Erişim: 06.06.2018).
- [98] <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/EA%209466-EN?pid=EA%209466&format=MTR&subformat=REAC&language=EN&plant=WERCS> (Erişim: 06.06.2018).

ÖZGEÇMİŞ

Eğitim Bilgileri

Derece	Üniversite	Bölüm	Yıllar
Lisans	Balıkesir Üniversitesi	Makine Mühendisliği	2006-2010
Yüksek Lisans	Ege Üniversitesi	Makine Mühendisliği	2010-2013
Doktora	İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi	Makine Mühendisliği	2013-2018

İş Deneyimi

Kurum Adı	Görev	Yıllar
Gediz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi	09/2011 – 07/2016
UKAS Mühendislik Makine İmalat San. ve Tic.	Girişimci	05/2015 – 01/2017

Tamamlanan Tezler

Yüksek Lisans	<p>Kol hareket yeteneği kısıtlanmış hastaların rehabilitasyonunda kullanılacak bir dış iskelet mekanizmasının tasarımı ve üretimi.</p> <p><i>Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özgür KİLİT</i></p>
---------------	---

Tamamlanan Projeler

Tarih	Kuruluş	Konu	Görev
2017 (6 Ay)	T.C. İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi <i>BAP Doktora Tezi Desteği Programı</i>	Epoksi ile Tek Taraftan Bindirmeli Yapıştırılan Kompozit Bağlantıların Titreşim Altındaki Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi (14.215,86TL)	Araştırmacı
2015	T.C. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı <i>Teknogirişim Sermaye Desteği Programı</i>	Bacasız Koku Sızdırmayan Endüstriyel Davlumbaz Tasarımı ve Üretimi (99.400,00TL)	Yürütücü
2014	İzmir Kalkınma Ajansı (İZKA)	500 kW Güneş-Rüzgar Kombinasyonlu Hibrit Teknolojilerle Yenilenebilir Enerji Üretimi Projesi (2.132.791,00TL)	Proje Asistanı
2013	TÜBİTAK 1003 <i>Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı</i>	Hibrit Taşıtlar İçin Değişken Tork Denetimine Dayanan Uyarlamalı Devrilme Önleme Sistemi İle Yanal Stabilite Kontrol Sisteminin Geliştirilmesi (499.931,00TL)	Proje Asistanı (İlk 11 Ay)

Yayımlar

- Kemiklioğlu U, Okutan Baba B.** “Mechanical Behavior of Vibration Effect of Adhesively Bonded Composite Joints under Axial Impacts” Başvurusu yapılacak.
- Kemiklioğlu U, Okutan Baba B.** “Experimental Evaluation of Vibration Effect of Adhesively Bonded Composite Joints under Centrifugal Force”

International Journal of Adhesion and Adhesives: Hakem değerlendirme aşamasında (SCI).

3. **Kemiklioğlu U**, Okutan Baba B. “Vibration effects on tensile properties of adhesively bonded single lap joints in composite materials” Polymer Composites: Doi: 10.1002/pc.24845, 2018 (SCI).
4. Akderya T, Sayman O, **Kemiklioğlu U**, Arap O. “A comparative study on effects of thermal fatigue caused by thermal-oil cycling on tensile properties of single lap composite joints bonded with different kinds of adhesives” Journal of Adhesion: Doi: 10.1080/00218464.2018.1440213, 2018 (SCI).
5. **Kemiklioğlu U**, Sayman O, Soykök İF, Akderya T and Dere R. “The mechanical behaviour of adhesively bonded composite joints under repeated axial impacts at different temperatures” Sci Eng Compos Mater:24(6), 865-873, 2017 (SCI).
6. Akderya T, **Kemiklioğlu U** and Sayman O. “Effects of thermal ageing and impact loading on tensile properties of adhesively bonded fibre/epoxy composite joints” Composites Part B: 95, 117-122, 2016 (SCI).
7. Pamuk G, **Kemiklioğlu U**, Sayman O and Ozdemir O. “Low velocity impact response of biodegradable PLA composites reinforced by reclaimed cotton preforms” Tekstil ve Konfeksiyon: 26(3), 321-326, 2016 (SCI).
8. Toygar ME, Sayman O, **Kemiklioğlu U**, Öztürk H, Kırıl Z and Maleki FK. “Vibration and buckling analysis of a curved sandwich composite beam with FEM” Res. Eng. Struct. Mat.: 2, 49-59, 2016 (Alan İndeksli).
9. **Kemiklioğlu U**, Sayman O, Batar T, Soykok IF, Akderya T and Akan E. “Strength comparison of ductile and brittle adhesives under single and repeated impacts” Applied Adhesion Science: 3(15), 2015 (Springer).

Uluslararası Konferanslarda Sunulan Bildiriler

1. **Uğur Kemiklioğlu**, Buket Okutan Baba. “The Investigation of Vibration Effects of Adhesively Bonded Composite Plates under Free Edge Conditions” 2nd International Students Science Congress, İzmir, 2018.

2. **Uğur Kemiklioğlu**, Buket Okutan Baba. “The Investigation of Centrifugal Force Effect on Adhesively Bonded Composite Plates under Clamped Edge Conditions” 2nd International Students Science Congress, İzmir, 2018.
3. Tarkan Akderya, **Uğur Kemiklioğlu**, Oğuzhan Arap, Okan Özdemir, Onur Sayman. “Önceden Hasara Uğramış Kompozit Borularda Tamiratın Etkisinin İncelenmesi” 2nd International Students Science Congress, İzmir, 2018.
4. **Uğur Kemiklioğlu**, Buket Okutan Baba. “The Analysis and Comparison of Various Adhesively Bonded Composite Joints” International Students Science Conference, İzmir, 2017.
5. **Uğur Kemiklioğlu**, Tarkan Akderya, Oğuzhan Arap, Onur Sayman. “Effects of thermal fatigue on mechanical properties of glass fibre/epoxy composites” ICCS19 19th International Conference on Composite Structures, Porto, PORTUGAL, 2016.
6. Tarkan Akderya, **Uğur Kemiklioğlu**, Oğuzhan Arap and Onur Sayman. “Effects of thermal fatigue on mechanical properties of glass fibre/epoxy composites” ICCS19 19th International Conference on Composite Structures, Porto, PORTUGAL, 2016.
7. Tarkan Akderya, **Uğur Kemiklioğlu**, Oğuzhan Arap and Onur Sayman. “Effects Of Thermal Fatigue On Mechanical Properties Of Adhesively Bonded Glass Fibre/Epoxy Single Lap Composite Joints” ICCE 24 - 24th Annual International Conference on Composites and Nano Engineering, Haikou, Hainan Island, CHINA, 2016.
8. **Uğur Kemiklioğlu**, Selim Solmaz. “Design and analysis of a novel air conditioning system based on thermo-electric coolers” 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi (OTEKON 2014), Bursa, 2014.
9. Barış Zafer, **Uğur Kemiklioğlu** and Selim Solmaz, "Conceptual Design, Analysis and Production of a Hydrogen Fuel-Cell Electric Vehicle for Shell Eco-Marathon 2012", 6. Otomotiv Teknolojileri Kongresi (OTEKON 2012), Bursa, 2012.

Ulusal Konferanslarda Sunulan Bildiriler

1. **Uğur Kemiklioğlu**, Özgür Kilit. “Kol Kas Gücü Zayıflamış Hastaların Kullanımı İçin Yay Dengelemeli Bir Dış İskelet Tasarımı ve Üretimi” 19. Ulusal Ergonomi Kongresi, Balıkesir, TÜRKİYE, 2013.
2. **Uğur Kemiklioğlu**, “Portatif araç gölgeliği iskeleti tasarımı”, 12. Üretim Araştırmaları Sempozyumu (ÜAS), İzmir, 2012.

Patent ve Faydalı Modeller

1. **Buluş Adı:** Güneş ısı kaynaklı endüstriyel atık kurutma sistemi
Buluş Sahipleri: Selim Solmaz, **Uğur Kemiklioğlu**, Ayşegül Güngör Çelik, Egemen Ol Öğretim
Tescil No: 2013 07262 (Faydalı Model)
2. **Buluş Adı:** Bası kuvveti altında elektrik üretebilen piezoelektrik sıvı kristal cam tasarımı
Buluş Sahipleri: Emine Kemiklioğlu, Enver Atik, **Uğur Kemiklioğlu**
Başvuru No: 2017/05660 (Patent)
3. **Buluş Adı:** Yapıştırıcı malzemelere özgü aksenal darbe cihazı
Buluş Sahipleri: Onur Sayman, **Uğur Kemiklioğlu**
Başvuru No: 2015/17368 (Patent)
4. **Buluş Adı:** Isıl gerilim testinde yenilik
Buluş Sahipleri: Onur Sayman, Tarkan Akderya, **Uğur Kemiklioğlu**, Gürkan Çetin
Başvuru No: 2015/14744 (Patent)
5. **Buluş Adı:** Duman gazı giderici davlumbaz sistemi
Buluş Sahipleri: Aykut Asar, **Uğur Kemiklioğlu**
Başvuru No: 2015/02318 (Patent)
6. **Buluş Adı:** Otomotiv taşıtları için GPS kontrollü güvenli viraj alma asistanı
Buluş Sahipleri: Selim Solmaz, **Uğur Kemiklioğlu**
Başvuru No: 2014/03084 (Patent)

7. **Buluş Adı:** Can kurtaran priz ve priz adaptörü

Buluş Sahipleri: Selim Solmaz, **Uğur Kemiklioğlu**, Hasan Çakmak, Erhan Nergiz

Başvuru No: 2013/02774 (Patent)

Etkinlikler

Shell Eco-Marathon Alternatif Enerjili Araba Yarışları
Hidrojen Arabası Üretimi (2012), Hibrit Enerjili Araba Üretimi (2013-2015).
Rotterdam – HOLLANDA

TÜBİTAK Alternatif Enerjili Araba Yarışları
Elektrikli Şehir Konsepti Araç Üretimi (2014-2015).
İstanbul – TÜRKİYE

TÜBİTAK Alternatif Enerjili Araba Yarışları
Güneş Enerjili Araba Üretimi (2007-2010).
İzmir - TÜRKİYE

Sertifikalar

MATLAB Fundamentals
Figes, BURSA, 02-03 Mart 2010.

Introduction to ANSYS Workbench
Figes, BURSA, 17-18 Mayıs 2010.

AVL Dizel Motor Simulasyon Eğitimi
AVL-Advanced Simulation Technologies, İstanbul, 03-05 Aralık 2012.

Bilgisayar Programları

Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD)	SolidWorks, AutoCad
Bilgisayar Destekli Analiz (CAE)	Ansys Classic, Ansys Workbench (Yapısal)
Programlama ve Dokümantasyon	Matlab, Fortran, MS Office (Word, Excel, Powerpoint)