

İZMİR KATİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMAL YAŞLANDIRMA VE TERMAL YORULMANIN YAPIŞTIRILMIŞ
CAM FİBER/EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ



DOKTORA TEZİ

Tarkan AKDERYA

Makine Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet ÇEVİK

TEMMUZ 2018

İZMİR KATİP ÇELEBİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMAL YAŞLANDIRMA VE TERMAL YORULMANIN YAPIŞTIRILMIŞ
CAM FİBER/EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Tarkan AKDERYA
D606213007

Makine Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet ÇEVİK

TEMMUZ 2018

İZMİR KATİP ÇELEBİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**INVESTIGATION OF EFFECTS OF THERMAL AGEING AND THERMAL
FATIGUE ON MECHANICAL PROPERTIES OF ADHESIVELY BONDED
E-GLASS FIBRE/EPOXY COMPOSITE MATERIALS**

DOCTORAL THESIS

Tarkan AKDERYA
D606213007

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet ÇEVİK

JULY 2018

İKÇÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 606213007 numaralı Doktora Öğrencisi **Tarkan AKDERYA**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TERMAL YAŞLANDIRMA VE TERMAL YORULMANIN YAPIŞTIRILMIŞ CAM FİBER/EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mehmet ÇEVİK
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU
İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi

Prof. Dr. Buket Okutan BABA

İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

Doç. Dr. Yusuf ARMAN

İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir ATAN

İzmir Katip Çelebi Üniversitesi

Teslim Tarihi : 20.06.2018
Savunma Tarihi : 12.07.2018





Sevgili aileme,



ÖNSÖZ

Öncelikle, tez çalışmam boyunca desteğini biran olsun dahi esirgemeyen, fikirleri, yol göstericiliği ve yaklaşımı ile akademik perspektifimin gelişmesinde önemli bir aktör olan, değerli tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Mehmet ÇEVİK'e içten teşekkür ederim.

Doktora sürecimin başından itibaren maddi ve manevi her türlü desteğini, enerjisini, motive edici yönlendirmelerini esirgemediği ve akademik yaşantımda önemli bir ilham kaynağı olduğu için değerli hocam Sn. Prof. Dr. Onur SAYMAN'a teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesi sırasında yardımcı olan, fikir alışverişinde bulunduğum Katip Çelebi Üniversitesi ve Dokuz Eylül Üniversitesi'ndeki tüm arkadaşlarım ve hocalarıma teşekkür ederim.

Katip Çelebi Üniversitesi Bilimsel Projeler Koordinatörlüğü'nün 2017-TDR-FEBE-0030 numaralı doktora tez projesi kapsamında tamamlanan tez çalışmalarım sırasında mali desteğini esirgemeyen Katip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne ve doktora tezimin en başından itibaren deneysel çalışmalarını yürütebilmem için gereken maddi kaynağı sağlayan Türkiye Bilimler Akademisi'ne (TÜBA) teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez jürime katılan Sn. Prof. Dr. Ramazan KARAKUZU, Sn. Prof. Dr. Buket OKUTAN BABA, Sn. Doç. Dr. Yusuf ARMAN'a teşekkür ederim.

Doktora sürecimin her aşamasında fikirlerini ve desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Volkan YILDIZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, doktora çalışmalarım sırasında beni hiç yalnız bırakmayan, desteklerini ve motive edici yaklaşımlarını esirgemeyen kıymetli aileme ve değerli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Temmuz 2018

Tarkan AKDERYA



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ix
KISALTMALAR	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxiii
ABSTRACT.....	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler	1
1.1.1 Fiber ve matris fonksiyonları	2
1.1.2 Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları	4
1.2 Yapıştırıcılar ve Yapıştırma Bağlantıları	5
1.2.1 Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları.....	7
1.2.2 İyi bir yapıştırma bağlantısı için gerekenler	8
1.3 Tezin Kapsamı.....	11
1.4 Amaçlar ve Hedefler	14
1.5 Temel Katkılar.....	15
2. LİTERATÜR TARAMASI	16
2.1 Giriş.....	16
2.2 Kompozit Malzemelere Darbenin Etkisi ile İlgili Çalışmalar.....	17
2.3 Kompozit Malzemelere Yaşlandırmanın Etkisi ile İlgili Çalışmalar	18
2.4 Kompozit Malzemelere Sıcaklığın Etkisi ile İlgili Çalışmalar	21
2.5 Kompozit Malzemelere Termal Yorulmanın Etkisi ile İlgili Çalışmalar.....	22
2.6 Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerle İlgili Çalışmalar ...	24
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	25
3.1 Kompozit Plaka Üretimi.....	25
3.2 Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Numune Hazırlanışı	28
3.3 Cam/elyaf epoksi kompozit malzeme numune hazırlanışı.....	30
3.4 Düşük Hızlı Darbe ve Termal Yaşlandırmanın Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri Çalışmasının Deney Düzenegi ve Deneyel Parametreleri	32
3.4.1 Termal yaşlandırma deney düzenegi.....	32
3.4.2 Düşük hızlı darbe testi deney düzenegi.....	33
3.4.3 Deneyel parametrelerin belirlenmesi.....	38
3.5 Termal Yorulmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri Çalışmasının Deney Düzenegi ve Deneyel Parametreleri	40
3.5.1 Termal-yağ çevrimi deney düzeneginin hazırlanması	40
3.5.2 Deneyel parametrelerin belirlenmesi.....	46
3.6 Termal-yağ Yaşlandırmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri Çalışmasının Deney Düzenegi ve Deneyel Parametreleri	49
3.6.1 Termal-yağ yaşlandırması deney düzeneginin hazırlanması	49
3.6.2 Deneyel parametrelerin belirlenmesi.....	52
3.7 Termal-yağ Yaşlandırmanın Cam Elyaf/Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Özelliklerine Etkileri Çalışmasının Deney Düzenegi ve Deneyel Parametreleri	56

3.7.1 Termal-yağ yaşlandırması deney düzeneğinin hazırlanması	56
3.7.2 Deneysel parametrelerin belirlenmesi	58
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	60
4.1 Düşük Hızlı Darbe ve Termal Yaşlandırmanın Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri.....	60
4.2 Termal Yorulmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri.....	69
4.3 Termal-yağ Yaşlandırmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri.....	84
4.3.1 Loctite 9466 ile yapıştırılmış numunelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu.....	85
4.3.2 Loctite 9461 ile yapıştırılmış numunelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu.....	95
4.3.3 DP 460 ile yapıştırılmış numunelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu.....	103
4.3.4 Yaşlandırılmış numunelerin renk değişimi	113
4.4 Termal-yağ Yaşlandırmanın Cam Elyaf/Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Özelliklerine Etkileri.....	115
4.4.1 Termal-yağ yaşlandırmanın mekanik özelliklere etkisi	115
4.4.2 Termal-yağ yaşlandırmanın termal özelliklere etkisi.....	121
4.4.3 Termal-yağ yaşlandırmanın elastisite modülü ve camsı geçiş sıcaklıklarına etkisi	145
4.4.4 Termal-yağ yaşlandırmanın morfolojik özelliklere etkisi.....	160
4.4.5 Yaşlandırılmış kompozitlerin renk değişimi	169
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	171
KAYNAKLAR.....	177
ÖZ GEÇMİŞ.....	193

KISALTMALAR

T_g	: Camısı geçiş sııcaklığı
ASTM	: American Society for Testing and Materials
DIN EN	: Deutsches Institut für Normung, European Norms
ISO	: International Organization for Standardisation
SEM	: Scanning Electron Microscope
X-FEM	: Extended Finite Element Method
VARIM	: Vacuum-Assisted Resin Infusion Molding
DTA	: Differential Thermal Analysis
DSC	: Differential Scanning Calorimeter
TGA	: Thermo Gravimetric Analysis
T_B	: TGA analizinde kompleks alan başlangıç sııcaklığı
T_s	: TGA analizinde kompleks alan bitiş sııcaklığı
T_{pik}	: TGA analizinde kompleks alan pik sııcaklığı
T_{1i}	: TGA analizinde 1. degradasyon basamağı ilk sııcaklığı
T_{1f}	: TGA analizinde 1. degradasyon basamağı final sııcaklığı
T_{3i}	: TGA analizinde 3. degradasyon basamağı ilk sııcaklığı
T_{3f}	: TGA analizinde 1. degradasyon basamağı final sııcaklığı
24s@-10°C	: 24 saat -10 °C'de yaşlandırılmış numune
24s@50°C	: 24 saat 50 °C'de yaşlandırılmış numune
24s@100°C	: 24 saat 100 °C'de yaşlandırılmış numune
24s@120°C	: 24 saat 120 °C'de yaşlandırılmış numune
24s@140°C	: 24 saat 140 °C'de yaşlandırılmış numune
ρ_f	: Fiber özgöl kütlesi
ρ_m	: Matris özgöl kütlesi
W_k	: Kompozit kütlesi
W_f	: Fiber kütlesi
W_m	: Matris kütlesi
V_k	: Kompozit hacmi
V_f	: Fiber hacmi
V_m	: Matris hacmi
V_f	: Fiber hacimce birleşme oranı
V_m	: Matris hacimce birleşme oranı
W_f	: Fiber kütlece birleşme oranı
W_m	: Matris kütlece birleşme oranı

A_k	: Kompozit alanı
A_f	: Fiber alanı
A_m	: Matris alanı
F_f	: Fiber tarafından paylaşılan kuvvet
F_m	: Matris tarafından paylaşılan kuvvet
F_k	: Kompozit üzerine uygulanan kuvvet
σ_k	: Kompozit gerilmesi
σ_f	: Fiber gerilmesi
σ_m	: Matris gerilmesi
ε_k	: Kompozit şekil değişimi
ε_f	: Fiber şekil değişimi
ε_m	: Matris şekil değişimi
E_1	: Kompozit boylamasına elastisite modülü (Young modülü)
E_f	: Fiber elastisite modülü
E_m	: Matris elastisite modülü

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1 : İki farklı kombinasyon ile oluşturulup kürlenmiş matris için formülasyonun özellikleri [77].....	27
Tablo 3.2 : Kürlenmiş Loctite 9461 [80], Loctite 9466 [81] ve DP 460 [82] epoksi bazlı yapıştırıcıların mekanik ve termal özellikleri.....	29
Tablo 3.3 : Deneysel parametre değişkenleri.....	38
Tablo 3.4 : Renolin Therm 320 ısı transfer yağı spesifik özellikleri [87].....	43
Tablo 3.5 : Deneysel parametre değişkenleri.....	47
Tablo 3.6 : Deneysel parametre değişkenleri.....	54
Tablo 3.7 : Deneysel parametre değişkenleri.....	58
Tablo 4.1 : Yaşlandırılmış numuneler için maksimum degradasyon pik sıcaklıkları. 131	131
Tablo 4.2 : 24 saat yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelere ait dekompozisyon sıcaklıkları.....	134
Tablo 4.3 : 168 saat yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelere ait dekompozisyon sıcaklıkları.....	136
Tablo 4.4 : 360 saat yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelere ait dekompozisyon sıcaklıkları.....	138
Tablo 4.5 : 720 saat yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelere ait dekompozisyon sıcaklıkları.....	140
Tablo 4.6 : 1080 saat yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelere ait dekompozisyon sıcaklıkları.....	142



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1 : Elyaf ve reçine kullanarak oluşturulmuş kompozit malzemenin şematik gösterimi [3].	1
Şekil 1. 2 : Sürekli ve kesintili fiberlere sahip kompozit malzemenin şematik gösterimi [3].	2
Şekil 1. 3 : Perçinlenmiş ve yapıştırılmış bağlantı gerilme dağılımları [8].	6
Şekil 1. 4 : Yapıştırıcı ve kohezyon hasarı gösteren yapıştırma bağlantılarından örnekler [8].	10
Şekil 1. 5 : Yapıştırılmış numune [8].	10
Şekil 3. 1 : Vakum destekli reçine-İnfüzyon yöntemi ile cam elyaf/epoksi kompozit plakaların üretimi.	25
Şekil 3. 2 : Tek bindirmeli olarak yapıştırılmış kompozit numunenin 3 boyutlu görünüşü (ölçüler mm'dir).	28
Şekil 3. 3 : Tek bindirmeli yapıştırılmalı bağlantı yapımında kullanılan yapıştırıcılar: (a) Loctite 9461 [80], (b) Loctite 9466 [81] ve (c) DP 460 [82].	29
Şekil 3. 4 : ASTM D5868-01'e göre hazırlanmış olan numunenin şematik görünüşü.	30
Şekil 3. 5 : ASTM D3039'a göre hazırlanmış olan numunenin şematik görünüşü.	31
Şekil 3. 6 : ATT Discovery - DY 110 (C) iklimik test odası [86].	32
Şekil 3. 7 : İklimik test odasına yaşlandırma amacıyla yerleştirilmiş kompozit numuneler.	33
Şekil 3. 8 : Düşük hızlı darbe testi deney düzeneği.	34
Şekil 3. 9 : Düşük hızlı darbe testi cihazına sabitlenmiş kompozit numune.	35
Şekil 3. 10 : Darbe uygulanmış kompozit numuneler.	36
Şekil 3. 11 : Detaylandırılmış deneysel prosedür.	37
Şekil 3. 12 : Termal yaşlandırma ve düşük hızlı darbe deneysel tasarım parametreleri şematik gösterimi.	39
Şekil 3. 13 : Çeşitli sıcaklık aralıklı termal çevrim için Sıcaklık – Zaman grafikleri: (a) -10 – 80 °C, (b) -10 – 100 °C ve (c) -10 – 120 °C.	42
Şekil 3. 14 : Termal çevrim deneyi şematik gösterimi.	44
Şekil 3. 15 : Detaylandırılmış deneysel prosedür.	45
Şekil 3. 16 : Etkili termal çevrim parametrelerinin şematik gösterimi.	46
Şekil 3. 17 : Termal çevrim deneysel tasarım parametreleri şematik gösterimi.	48
Şekil 3. 18 : Termal-yağ yaşlandırma deney düzeneği.	50
Şekil 3. 19 : Detaylandırılmış deneysel prosedür.	51
Şekil 3. 20 : Termal-yağ yaşlandırma deneysel tasarım parametreleri şematik gösterimi.	55
Şekil 3. 21 : Termal-yağ yaşlandırma deney düzeneği.	56
Şekil 3. 22 : Termal-yağ yaşlandırma deney düzeneği.	57
Şekil 3. 23 : Termal-yağ yaşlandırma deneysel tasarım parametreleri şematik gösterimi.	59
Şekil 4. 1 : Çekme testi esnasında numunelerin sıcaklığını ayarlama aparatı.	60
Şekil 4. 2 : -18 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, -18 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	61

Şekil 4. 3 : -18 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 25 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	62
Şekil 4. 4 : -18 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 70 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	62
Şekil 4. 5 : 25 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, - 18 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	63
Şekil 4. 6 : 25 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 25 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	64
Şekil 4. 7 : 25 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 70 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	64
Şekil 4. 8 : 70 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, - 18 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	65
Şekil 4. 9 : 70 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 25 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	66
Şekil 4. 10 : 70 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 70 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	66
Şekil 4. 11 : Farklı sıcaklıklarda yaşlandırılmış, darbe uygulanmamış, 25 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	67
Şekil 4. 12 : DP 460 ile yapıştırılmış, -10 ila 80 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.	69
Şekil 4. 13 : DP 460 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal çevrim sayısı grafiği.	70
Şekil 4. 14 : DP 460 ile yapıştırılmış, -10 ila 80 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait tipik kırılma yüzeyleri.	71
Şekil 4. 15 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, -10 ila 80 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.	72
Şekil 4. 16 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, -10 ila 100 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.	73
Şekil 4. 17 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, -10 ila 120 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.	74
Şekil 4. 18 : Loctite 9461 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal çevrim sayısı grafiği.	75
Şekil 4. 19 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, -10 ila 100 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait tipik kırılma yüzeyleri.	76
Şekil 4. 20 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, -10 ila 80 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.	77
Şekil 4. 21 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, -10 ila 100 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.	78
Şekil 4. 22 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, -10 ila 120 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.	79
Şekil 4. 23 : Loctite 9466 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal çevrim sayısı grafiği.	80
Şekil 4. 24 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, -10 ila 100 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait tipik kırılma yüzeyleri.	81
Şekil 4. 25 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, 168 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	85
Şekil 4. 26 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, 360 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	86

Şekil 4. 27 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, 720 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	87
Şekil 4. 28 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, 1080 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	88
Şekil 4. 29 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, 1440 saat yaşlandırılmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.....	89
Şekil 4. 30 : Loctite 9466 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal-yağ yaşlandırma maruziyet süresi grafiği.....	90
Şekil 4. 31 : Loctite 9466 ile yapıştırılan numunelere ait Deplasman – Maruziyet süresi grafiği.....	90
Şekil 4. 32 : Loctite 9466 ile yapıştırılan numunelere ait kırılma yüzeyleri.	92
Şekil 4. 33 : Loctite 9466 ile yapıştırılan numunelere ait Yük – Süre - Sıcaklık grafiği (a) ve grafiğin üstten görünüşü (b).	94
Şekil 4. 34 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, 168 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	95
Şekil 4. 35 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, 360 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	96
Şekil 4. 36 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, 720 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	97
Şekil 4. 37 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, 1080 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	98
Şekil 4. 38 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, 1440 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	98
Şekil 4. 39 : Loctite 9461 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Maruziyet süresi grafiği.....	99
Şekil 4. 40 : Loctite 9461 ile yapıştırılan numunelere ait Deplasman – Maruziyet süresi grafiği.....	100
Şekil 4. 41 : Loctite 9461 ile yapıştırılan numunelere ait kırılma yüzeyleri.	101
Şekil 4. 42 : (a) Loctite 9461 ile yapıştırılan numunelere ait Yük – Süre - Sıcaklık grafiği ve (b) grafiğin üstten görünüşü.....	102
Şekil 4. 43 : DP 460 ile yapıştırılmış, 168 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	103
Şekil 4. 44 : DP 460 ile yapıştırılmış, 360 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	104
Şekil 4. 45 : DP 460 ile yapıştırılmış, 720 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	105
Şekil 4. 46 : DP 460 ile yapıştırılmış, 1080 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	106
Şekil 4. 47 : DP 460 ile yapıştırılmış, 1440 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.....	107
Şekil 4. 48 : DP 460 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal-yağ yaşlandırma maruziyet süresi grafiği.....	108
Şekil 4. 49 : DP 460 ile yapıştırılan numunelere ait Deplasman – Maruziyet süresi grafiği.....	108
Şekil 4. 50 : DP 460 ile yapıştırılan numunelere ait kırılma yüzeyleri.....	109
Şekil 4. 51 : (a) DP 460 ile yapıştırılan numunelere ait Yük – Süre - Sıcaklık grafiği ve (b) grafiğin üstten görünüşü.....	111
Şekil 4. 52 : Yaşlandırılmış kompozit numunelerin renk değişimi.	114

Şekil 4. 53 : 24 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait yük-deplasman grafiği.	115
Şekil 4. 54 : 168 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	116
Şekil 4. 55 : 360 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	117
Şekil 4. 56 : 720 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	118
Şekil 4. 57 : 1080 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.	118
Şekil 4. 58 : Kompozit numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal-yağ yaşlandırma maruziyet süresi grafiği.....	119
Şekil 4. 59 : Kompozit numunelere ait Deplasman – Maruziyet süresi grafiği.....	120
Şekil 4. 60 : 24 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Kütle - Sıcaklık grafiği.	121
Şekil 4. 61 : 168 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Kütle - Sıcaklık grafiği.	122
Şekil 4. 62 : 360 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Kütle - Sıcaklık grafiği.	123
Şekil 4. 63 : 720 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Kütle - Sıcaklık grafiği.	124
Şekil 4. 64 : 1080 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Kütle - Sıcaklık grafiği.	125
Şekil 4. 65 : 24 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafiği.	126
Şekil 4. 66 : 168 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafiği.	127
Şekil 4. 67 : 360 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafiği.	128
Şekil 4. 68 : 720 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafiği.	129
Şekil 4. 69 : 1080 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafiği.	130
Şekil 4. 70 : 120 °C’de 24 saat yaşlandırılmış numuneye ait TGA – DTA grafiği.	132
Şekil 4. 71 : Kompozit malzeme Young modülü – Maruziyet süresi – Sıcaklık grafiği.	145
Şekil 4. 72 : Kompozit plaka ölçüleri	148
Şekil 4. 73 : Düz örgü kumaş yapısına sahip cam elyaf kumaş şematik gösterimi [125].	153
Şekil 4. 74 : Enine ve boyuna fiber kalınlıkları şematik gösterimi [125].	154
Şekil 4. 75 : Temsili hacim elemanı [123].....	155
Şekil 4. 76 : Düz örgü cam alyaf kumaş yüzeyi.	157
Şekil 4. 77 - Kompozit malzeme camsı geçiş sıcaklığı (T_g) – Maruziyet süresi – Sıcaklık grafiği.	159
Şekil 4. 78 : 720 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.....	163
Şekil 4. 79 : -10 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitin SEM mikrografları.	164

Şekil 4. 80 : 25 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.....	165
Şekil 4. 81 : 80 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.....	165
Şekil 4. 82 : 100 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.....	166
Şekil 4. 83 : 120 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.....	167
Şekil 4. 84 : 120 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.....	168
Şekil 4. 85 : Termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerde renk değişimi	170





TERMAL YAŞLANDIRMA VE TERMAL YORULMANIN YAPIŞTIRILMIŞ CAM FİBER/EPOKSİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, termo-oksidatif ve termal-yağ yaşlandırmanın, düşük hızlı düşey darbenin, sıcaklığın ve termal çevrim sebebiyle oluşan termal yorulmanın farklı karakteristik özelliklerdeki epoksi bazlı yapıştırıcılar ile tek bindirmeli olarak yapıştırılmış $[0/90]_{8s}$ oryantasyona sahip cam fiber/epoksi kompozit malzemelerin mekanik, termal ve iç yapısal özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır.

Çalışmanın ilk basamağında tek bindirmeli yapıştırılmış kompozit malzemelere, üç farklı sıcaklıkta (-18, 25 ve 70 °C) termo-oksidatif yaşlandırma ve farklı enerji seviyelerinde (0 – 30J) düşük hızlı düşey darbe uygulanmış ve mekanik özelliklerin tayini için yapılan çekme testleri de farklı sıcaklıklarda (-18, 25 ve 70 °C) yapılmıştır.

İkinci aşamada, termal çevrim ile termal yorulma etkisi oluşturulmaya çalışılmış; tek bindirmeli kompozit numunelere, minimum -10 ila maksimum 80, 100 ve 120 °C arasında, aynı periyotlarda ve 1'den 50'ye kadar düzenli değişen sayılarda özel olarak oluşturulmuş bir deney düzeneğinde termal çevrim prosesi uygulanmıştır. Termal yorulmuş numuneler daha sonra mekanik karakterizasyon testlerine tabi tutulmuştur.

Üçüncü ve dördüncü basamakta, tek tesirli yapıştırılmış kompozit numunelerin yük taşıma kapasitelerine ve kompozit malzemelerin termal, mekanik ve iç yapısal özelliklerine, -10 ila 140 °C arasında değişen sıcaklıklarda ve 1440 saate kadar uzayan sürelerde uygulanan termal-yağ yaşlandırma prosesinin etkileri araştırılmıştır.

ASTM standartlarına uygun olarak üretilen, ölçülendirilen ve karakterize edilen kompozit malzemelerin termal özellikleri TGA, DTA ve DSC testlerinden elde edilmiş termogramlar ve verilerle, morfolojik özellikleri SEM analizinden elde edilmiş mikrograflarla ve mekanik özellikleri 1 mm/dk. hızında uygulanmış eksenel çekme testleri yardımı ile oluşturulmuş Yük – Deplasman grafikleri ile belirlenmiştir.

Sonuç olarak; -18 °C'de termo-oksidatif yaşlandırılmış numunelerin yük taşıma kapasitelerinin arttığı, numunelere uygulanan düşük hızlı darbenin enerjisi arttıkça yük taşıma kapasitelerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, örneklerin yük taşıma kapasitelerinin genellikle termal döngü sayısı arttıkça azaldığı ancak, 30 kez ısıl döngüye maruz kalan örneklerin maksimum yük taşıma kapasitesine sahip olduğu fark edilmiştir. Bununla birlikte, uygulanan karakterizasyon testlerinin sonuçlarına göre; -10 °C'de termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulan kompozit ve yapıştırılmış kompozit numunelerin mekanik ve termal özelliklerinin genellikle iyileştiği söylenebilir.



INVESTIGATION OF EFFECTS OF THERMAL AGEING AND THERMAL FATIGUE ON MECHANICAL PROPERTIES OF ADHESIVELY BONDED E-GLASS FIBRE/EPOXY COMPOSITE MATERIALS

ABSTRACT

In this thesis, influence of thermo-oxidative and thermal-oil ageing, low-velocity drop impact, high or low operating temperatures, thermal fatigue caused by thermal cycling on mechanical, thermal and morphological properties of E-glass fibre/epoxy ([0/90]_{8s}) single lap composite joints bonded with different characteristic adhesives are investigated.

In the first step of the work, thermo-oxidative ageing at three different temperatures (-18, 25 and 70 °C) and low-velocity impact at different energy levels (0 to 30J) are applied to composite joints and subsequently, tensile tests which are determinant of the mechanical behaviour are carried out at different temperatures (-18, 25 and 70 °C).

Thermal fatigue effect was tried to be formed by thermal-oil cycling; the thermal cycling process is applied to single lap composite joints in a specially constructed experimental set at a minimum of -10 °C to a maximum of 80, 100 and 120 °C for same periods and with regularly varying numbers (1 to 50). Thermally fatigued joints are subjected to mechanical characterization tests in order to define load carrying capacities in the second step of the study.

In the third and fourth steps, the effects of the thermal-oil ageing process which is applied at -10 to 140 °C for up to 1440 hours on the thermal, mechanical and morphological properties of the E-glass fibre/epoxy composites and on the load carrying capacities of adhesively bonded composite joints were investigated.

The thermal properties, morphological characteristics and mechanical behaviours of the composites produced, dimensioned and characterized in accordance with ASTM standards are determined by thermograms and datas obtained from TGA, DTA and DSC tests, are detected by micrographs obtained from SEM analysis and are find out with single lap shear tests with a speed of 1 mm/min, respectively.

As a consequence; it has been observed that the load carrying capacities of thermo-oxidative aged at -18 °C joints increase and the load carrying capacities decrease as the energy of the low velocity impact applied to the joints increases. It has also been found that the load carrying capacities of the specimens generally decrease as the number of thermal cycles increases, but that the specimens subjected to 30 cycles of thermal cycling have maximum load carrying capacity. However, according to the results of the characterization tests applied it can be concluded that mechanical and thermal properties of the composite and the bonded composite joints subjected to thermal-oil ageing at -10 °C are generally improved.

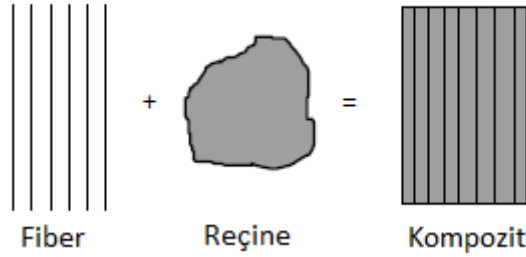


1. GİRİŞ

1.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

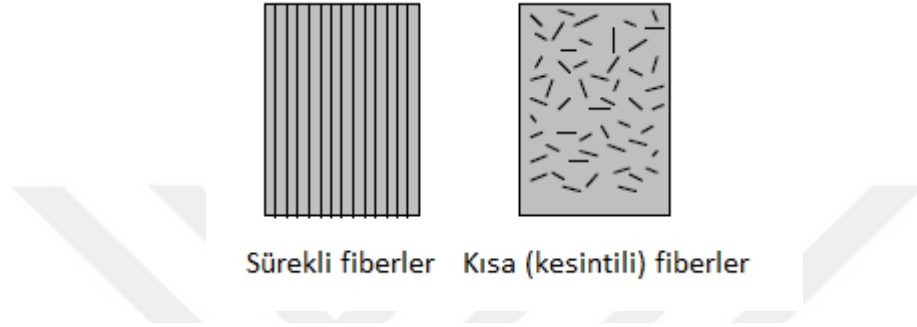
Kompozit malzemeler, farklı fiziksel özelliklere sahip iki veya daha fazla farklı malzemenin karışımı olarak tanımlanır. Farklı malzemeler, tek tek kendilerinin sahip oldukları özelliklerden daha iyi özelliklere sahip üstün malzemeler üretmek amacıyla karıştırılabilir. En genel durumda, kompozit malzemeler, sürekli fazlar içinde dağıtılan bir veya daha fazla süreksiz fazdan oluşur. Sürekli faz matris olarak adlandırılır ve süreksiz faz, takviye malzemesi veya takviye olarak adlandırılır [1].

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, farklı ara yüzlere (sınırlara) sahip bir matrise gömülü veya yapıştırılmış yüksek mukavemetli ve modüllü fiberlerden oluşur (Şekil 1.1). Bu formda hem fiberler hem de matris, fiziksel ve kimyasal kimliklerini korur, ancak tekil olarak bileşenlerden herhangi biri ile elde edilemeyen özelliklerin bir kombinasyonunu üretirler. Genel olarak, fiberler ana yük taşıyıcı elemanlardır, çevreleyen matris onları istenen yerde ve yönde tutar, yük aktarımı yapabilecekleri bir ortam olarak davranır ve örneğin yüksek sıcaklık ve nem gibi muhtemel çevresel hasar faktörlerinden korur [2, 3].



Şekil 1. 1 : Elyaf ve reçine kullanarak oluşturulmuş kompozit malzemenin şematik gösterimi [3].

Ticari olarak kullanılan başlıca fiberler çeşitli cam ve karbon türleri ile Kevlar 49'dur. Bor, silisyum karbür ve alüminyum oksit gibi diğer lifler de sınırlı miktarlarda kullanılırlar. Bütün bu lifler, sürekli uzunluklarda veya kesintili (kısa) uzunluklarda bir matrise dahil edilebilir (Şekil 1.2). Matris malzemesi bir polimer, bir metal veya bir seramik olabilir. Her matris kategorisinde çeşitli kimyasal bileşimler ve mikro yapı düzenlemeleri mümkündür [2, 3].



Şekil 1. 2 : Sürekli ve kesintili fiberlere sahip kompozit malzemenin şematik gösterimi [3].

Fiberle güçlendirilmiş kompozitlerin yapısal uygulamalarda kullanıldığı en yaygın biçim, bir dizi ince lif ve matris tabakasının istiflenmesi ve bunların istenen kalınlıkta birleştirilmesiyle üretilen bir laminattır. Kompozit bir laminatta çeşitli tabakaların istifleme sekansının yanı sıra her tabakanın lif oryantasyonu, kompozit laminat için çok çeşitli fiziksel ve mekanik özellikler üretecek şekilde kontrol edilebilir [2, 3].

1.1.1 Fiber ve matris fonksiyonları

Pek çok fiber takviyeli polimer, birçok geleneksel metalik malzemeden daha iyi veya yakın mukavemet ve modül kombinasyonunu sunar. Düşük yoğunlukları nedeniyle, bu kompozit malzemelerin mukavemet/ağırlık ve modül/ağırlık oranları, metalik malzemelerinkinden belirgin bir şekilde daha yüksektir. Ek olarak, birçok kompozit laminatın yorulma mukavemetinin yanı sıra yorulma hasarı toleransı mükemmeldir. Bu nedenlerden ötürü, fiber takviyeli polimerler, temel bir yapısal malzeme sınıfı olarak ortaya çıkmış ve havacılık, otomotiv ve diğer endüstrilerde ağırlıkça kritik bileşenlerin çoğunda metallerin ikamesi olarak kullanılmaktadır [2].

Kompozit malzemelerin davranışlarını iyi bir şekilde anlamak için, bir kompozitteki fiberlerin ve matris malzemelerinin rolleri hakkında yeterli bilgiye sahip olunmalıdır.

Bir kompozitteki fiberlerin ana fonksiyonları şunlardır [2, 3]:

- Yüğü taşımak: Yapısal bir kompozitte, yükün %70 ila 90'ı lifler tarafından taşınır.
- Kompozitlerde sertlik, mukavemet, termal kararlılık ve diğer yapısal özellikleri sağlamak.
- Kullanılan fiber tipine bağılı olarak elektriksel iletkenlik veya yalıtım sağlamak.

Bir matris malzemesi kompozit bir yapıda birkaç işlevi yerine getirir, bunların çoğı, yapının tatmin edici performansı için hayati önem taşır. Bir matris malzemenin önemli işlevleri aşağıdakileri içerir [2, 3]:

- Matris malzemesi elyafları birbirine bağlar ve yükü fiberlere aktarır. Yapıya sertlik ve şekil kazandırır.
- Matris, lifleri izole eder, böylece lifler tek tek ayrı olarak davranabilir. Bu, bir çatlağın yayılmasını durdurur veya yavaşlatır.
- Matris, iyi bir yüzey kalitesi sağlar ve net şekilde ya da nete yakın şekildeki parçaların üretimine yardımcı olur.
- Matris, fiberlerin kimyasal etkilere ve mekanik hasarlara (aşınma) karşı güçlendirilmesini sağlar.
- Seçilen matris malzemesine bağılı olarak, süneklik, darbe mukavemeti vb. gibi performans özellikleri de etkilenir. Sünek bir matris yapının sağlamlığını artıracaktır. Daha yüksek tokluk gereksinimleri için, termoplastik bazlı kompozitler seçilir.
- Hasar modu, kompozitte kullanılan matris malzemesinin türü ve lifle uyumluluğı ile kuvvetli bir şekilde etkilenir.

1.1.2 Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları

Kompozitlerin başlıca avantajları şu şekilde özetlenebilir [3-5]:

- Yüksek özgül mukavemet, sertlik ve hafiflik değerlerine sahiptir.
- Parça entegrasyonu için uyumludur.
- Kompozit yapılara yerleştirilebilen sensörler yardımıyla, hizmet içi izleme veya çevrimiçi süreç izleme sağlanır.
- İyi yorulma ve korozyon direncine sahiptir.
- Düşük ısı iletkenliği sağlar.
- Yüksek sürünme direncine sahiptir.
- Düşük yoğunluktadır.
- İstenilen sertlik ve mukavemete göre uyarlanmış yüksek optimizasyon kabiliyeti sağlar.
- İstenilen özelliklere sahip kompozitlerin üretimi mümkündür.
- Kompleks şekiller, kompozitler ile kolay bir şekilde üretilebilir.

Kompozitlerin sahip olduğu avantajların yanından bahsedilebilecek bazı dezavantajları aşağıdaki gibidir [3-5]:

- Zayıf ara fazlara sahip olan lamine kompozitler, düzlem gerilme yüklerine karşı zayıf direnç gösterir.
- Darbe olaylarına maruz kalan kompozitlerde güçlü iç hasarlar oluşması olasılığı ile zayıf darbe direnci gösterebilirler.
- Kompozit malzemeler, geleneksel metallere kıyasla genellikle pahalıdır.
- Kompozit malzemelerin şekillendirilmesi için üretim yöntemleri genellikle yavaş ve maliyetlidir.

1.2 Yapıştırıcılar ve Yapıştırma Bağlantıları

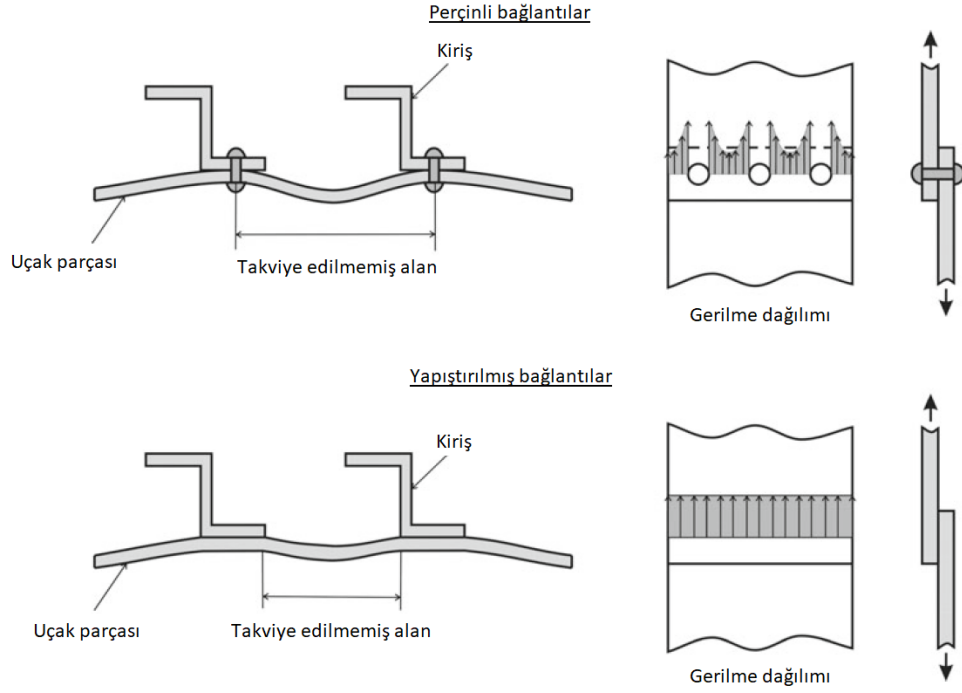
Yapışma, birbirinden farklı iki cismin birbirine yakın ara yüzey temasıyla bir arada tutulduğu, mekanik kuvvetin ya da ışın arayüz üzerinden aktarılabileceği duruma işaret eder. İki fazlı bir arada tutan ara yüzey kuvvetleri, van der Waals kuvvetlerinden, kimyasal bağdan veya elektrostatik çekimden kaynaklanabilir. Sistemin mekanik mukavemeti sadece arayüzel kuvvetler tarafından değil, arayüzey bölgesi ve iki yığın fazın mekanik özellikleri ile belirlenir [6].

Yapıştırıcılar binlerce yıldır kullanılmaktadır, ancak 100 yıl öncesine kadar, büyük çoğunluğu kemikler, deriler, balıklar, sütler ve bitkiler gibi doğal ürünlerden sağlanmaktaydı. Yaklaşık 1900 yılından beri sentetik polimer bazlı yapıştırıcılar piyasaya sürülmüştür ve günümüzde yapıştırıcı ve sızdırmazlık maddelerinin birçok endüstriyel kullanımı bulunmaktadır [7,8].

Yapıştırılmış bir numune oluşumunda üç aşamayı ayırt etmek mümkün olmaktadır. Başlangıçta, yapışkan, akışkan halde olmalıdır, böylece yüzey üzerinde kolaylıkla yayılabilir ve yapıştırıcıya yapışan madde uygun şekilde ıslatılır, böylece yapıştırıcı ve yapışan yüzey arasında yakın bir moleküler temas oluşur. İkinci olarak, yapıştırıcının karşılaştığı yükleri desteklemesi için, sıvı yapışkan sertleşmelidir. Sıklıkla, yapışkan başlangıçta bir monomer formundadır ve yüksek moleküler ağırlığa sahip bir polimer halinde polimerize olur. Basınca duyarlı yapışkanlar, sertleşmemeleri, ancak kalıcı olarak yapışkan kalmaları nedeniyle bir istisnadır. Son olarak, yapıştırılan malzemelerin yükü taşıma kapasitesinin ve dayanıklılığının, yapıştırılan numune yapıştırma biçimi, yüklerin uygulanma şekli ve yapıştırılan numunenin maruz kaldığı ortam gibi çeşitli faktörlerden etkilendiğini belirlemek gerekir. Bu nedenle, yapışkanlı bağlama teknolojisi ile iyi sonuçlar elde etmek için, çeşitli bilimlerde bilgi sahibi olmak gerekir: yüzey kimyası, polimer kimyası ve fiziği, malzeme mühendisliği, makine mühendisliği, vb. [7].

Yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantılar, mühendislik uygulamalarındaki mekanik bağlantılara artan bir alternatiftir ve geleneksel mekanik bağlantı elemanlarına göre birçok avantaj sağlar. Bağlanmış alan boyunca daha düzgün bir gerilme dağılımı sağlarlar, bu da daha fazla sertlik ve yük iletimi sağlayarak ağırlığı ve dolayısıyla maliyeti azaltır. Şekil 1.3, bir yapıştırılmış numunedeki gerilme dağılımının

perçinlenmiş bir bağlantıya göre daha yüksek bir sertlik ve daha düzgün gerilme dağılımı verebildiğini göstermektedir. Yapışkanın polimerik doğasından dolayı, yapıştırılmış malzemeler, yüksek yorulma mukavemetine sahip olmalarını sağlayan iyi sönümlenme özellikleri sağlar [8].



Şekil 1.3 : Perçinlenmiş ve yapıştırılmış bağlantı gerilme dağılımları [8].

Yapıştırıcı uygulamaları günümüzde çok çeşitlidir ve neredeyse her tür endüstride kullanılabilir. Havacılık endüstrisi, bu teknolojinin öncülerinden biridir ve kompozit malzemelerin uçaklarda kullanımının artmasıyla yapıştırıcılar giderek daha fazla kullanılmaktadır. Ray ve otomotiv endüstrisi daha hafif araçlar üretmek için yapıştırıcıların kullanımına yönelmektedirler. Biyoloji ve tıp gibi alanlar da örneğin protez, yapay organlar ve cerrahi yapıştırıcılar gibi malzemelerin biyouyumluluğun önemli olduğu alanlarda, yüzeylere hücre yapışması ve protein yapışmasına dayanan gelişen süreçleri kullanmaktadırlar [8].

1.2.1 Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları

Yapıştırma bağlantıları ile ilgili bazı avantajlar şu şekildedir [9];

- Gerilim düzgün dağılır ve daha büyük bir alana yayılır [10,11].
- Kalın veya ince tüm geometrilere nesnelere birleştirilebilir.
- Benzer veya farklı malzemeler birleştirilebilir.
- Benzer olmayan malzemeler arasında elektrokimyasal (galvanik) korozyonu en aza indirir veya önler.
- Yorulma ve döngüsel yüklere karşı dayanıklıdır.
- Düz konturlu birleşmeler sağlar.
- Isı transferine ve elektrik iletkenliğine karşı izole eder (bazı durumlarda yapıştırıcılar bu iletkenliği sağlamak için tasarlanmıştır).
- Yapıştırma bağlantılarının oluşması için gerekli olan kurlenme sıcaklığı düşük olduğu için genellikle metal parçaların mukavemetini azaltmaz.
- Titreşimi azaltır ve şoku emer.
- İyi bir mukavemet/ağırlık oranı sağlar.
- Mekanik birleştirmeden daha hızlı ve/veya daha ucuzdur.

Bunun yanında yapıştırma bağlantıları ile ilgili dezavantajlardan bazıları ise aşağıda verilmiştir [9].

- Yapıştırma bağlantısı, yapışma alanının görsel olarak incelenmesine izin vermez (yapıştırıcı saydam olmadığı sürece) [10-12].
- Uzun ömürlü yapıştırma bağlantıları elde etmek için yapıştırılacak yüzeyler özenle hazırlanmalıdır.
- Özellikle yüksek kurlenme sıcaklıklarının kullanılmadığı zamanlarda uzun kurlenme süreleri gerekebilir.
- Servis kullanım sıcaklıkları genellikle 177 °C ile sınırlıdır ancak daha pahalı olan özel yapıştırıcılar ile servis kullanım sıcaklıkları 371 °C'ye kadar çıkarılabilir.

- Çoğu yapıştırıcı için temizliğe önem veren proses kontrolleri gereklidir.
- Yapıştırıcı bağlantının kullanım ömrü, maruz kaldığı ortama bağlıdır.
- Doğal veya bitkisel kaynaklı yapıştırıcılar bakteri, küf, kemirgen veya haşaratlara maruz kalmaktadır.

1.2.2 İyi bir yapıştırma bağlantısı için gerekenler

İyi bir yapıştırma bağlantısı için gerekenler aşağıda maddeler halinde verilmiştir [9, 11, 13]:

- Yapıştırılacak malzemelere uygun yapışkan seçilmelidir.
- Yapıştırma bağlantısı ve malzemeler için iyi bir ortak tasarım gereklidir.
- Yapıştırılacak yüzeyler yapıştırıcı uygulanmadan önce temizlenmelidir.
- Yapıştırıcının yapıştırılacak olan yüzeyleri ıslatabilmesi gereklidir.
- Yapıştırıcı bağlantının oluşabilmesi için gerekli olan kürlenme ve sertleşme süreçlerinin kontrollü uygulanması gerekmektedir.

Nesneleri yapıştırma için çok sayıda yapıştırıcı bulunmaktadır. Yapıştırıcı tipi ve formun seçimi, yapıştırılacak malzemenin doğasına, son kullanım performans gereksinimlerine ve yapışkan uygulama işlemine bağlıdır.

Yapıştırılmış parçanın son kullanım gereksinimleri için dikkatle tasarlanmış bir bağlantı, dikkatlice tasarlanmamış olan bağlantıya göre, mekanik tasarımın avantajları ile yapışkan bağ mukavemetini uygun bir şekilde birleştirdiği için daha güçlü bir bağ oluşturur [14].

İyi bir yapıştırma bağlantısı elde etmek için, temiz substrat yüzeyleri ile başlanması şarttır. Kir, yağ, nem ve zayıf oksit tabakaları gibi yabancı maddeler, yapıştırıcı madde substrattan ziyade zayıf sınır tabakalarına bağlanmasın diye çıkarılmalıdır. Zayıf sınır katmanlarını kaldıran veya güçlendiren çeşitli yüzey işlemleri mevcuttur. Bu tür işlemler tipik olarak fiziksel veya kimyasal süreçleri veya bunların kombinasyonunu içerir [15].

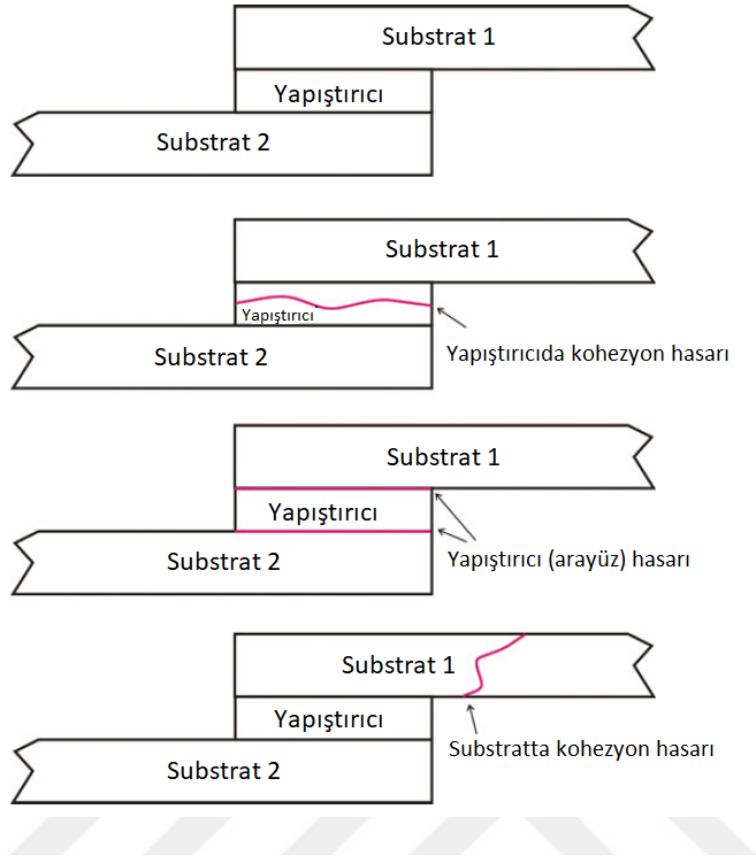
Islatma, yapışkan fazın yüzeyinde bulunan bir havanın (veya diğer gazların) bir sıvı faz ile yer değiştirmesidir. İyi ıslanma sonucu, substrat ile yapıştırıcı arasında,

yapıştırıcı kuvvetlerinin etkileyebileceği daha büyük bir temas alanı elde edilmiş olur [16].

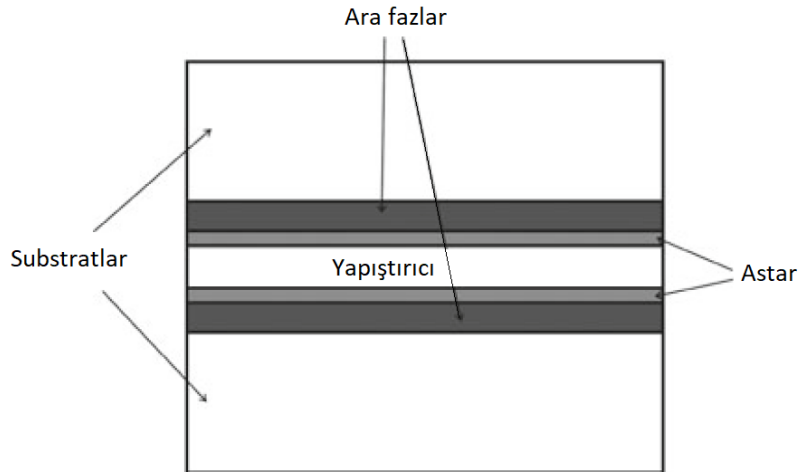
Parçaların başarılı bir şekilde yapıştırılması, uygun bir süreç gerektirir. Yapıştırıcının yapıştırılacak yüzeylere uygulanması ile birlikte, yapıştırma bağlantısı aynı zamanda uygun sıcaklık, basınç ve kürlenme süresine de tabi tutulmalıdır. Sıvı veya film yapıştırıcısı, bir kez uygulandığında, aşağıda bahsedilen üç yoldan biri ile katı hale dönüştürülebilmelidir. Katılaşmanın gerçekleştiği yöntem, yapışkan seçimine bağlıdır. Sıvı yapıştırıcıların katılara dönüştürülme şekilleri:

- Isı, basınç ve kürlenme maddelerinin herhangi bir kombinasyonu ile kimyasal reaksiyon,
- Erimiş sıvıyı soğutma,
- Çözücü buharlaşmasının bir sonucu olarak kurutma [11].

Yapışma, yapıştırıcı ile substrat arasında meydana gelen moleküller arası kuvvetlerden kaynaklanan çekimdir. Bu kavram, sadece bir maddede var olan moleküller arası çekim kuvvetlerini ifade eden kohezyondan farklıdır. Substrat ile yapıştırıcı arasında veya kohezyonda bulunan moleküller arası kuvvetler, esas olarak van der Waals tipi kuvvetlerdir. Mekanik, elektriksel ve difüzyon olayları, yapışma seviyesinde de meydana gelebilir [17]. Şekil 1.4, yapıştırıcı ve kohezyon hasarı arasındaki farkı göstermektedir. Yapıştırıcılar ile yapıştırılmış malzemeler, yapıştırıcı, kohezyon hasarı veya bunların bir kombinasyonu ile kırılır. Yapıştırıcı ile substrat arasındaki bölge ara faz olarak adlandırılır. Ara faz, sade yapıştırıcıdan farklı kimyasal ve fiziksel karakteristik özelliklere sahiptir. Ara fazın doğası, yapıştırma bağlantısının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Ara fazdan farklı olan arayüz, yüzey ile iki malzeme arasında bir temas düzlemidir. Arayüz arafaz içerisinde yer alır. Ara yüz, yüzey enerjisini tanımlamak ve ölçmek yararlıdır. Arayüz ayrıca sınır tabakası ile de belirtilir. Ara fazda, yapıştırıcı ile substrat arasında yer alan farklı malzemeler arasında çok sayıda arayüz bulunabilir. Astar, genellikle substrat yüzeyine uygulanan ve yapışmayı iyileştirmek veya substrat yüzeylerini korumaya yönelik yapıştırıcı uygulanmadan önce uygulanan bir maddedir. Yapıştırılmış numune, substratlar, yapıştırıcı, astar (varsa) ve bunlarla ilişkili ara fazlar ve ara yüzler tarafından oluşturulan bütün parçadır (Şekil 1.5)



Şekil 1. 4 : Yapıştırıcı ve kohezyon hasarı gösteren yapıştırma bağlantılarından örnekler [8].



Şekil 1. 5 : Yapıştırılmış numune [8].

1.3 Tezin Kapsamı

Son yıllarda kompozit malzemelerin endüstriyel kullanım trendlerinde önemli artışlar yaşanmaktadır. Yüksek mekanik performans, ultra hafiflik ve kompozit malzemelerin yüksek korozyon direnci bu artan eğilimin başlıca nedenleri arasındadır. Havacılık, denizcilik ve diğer ulaşım alanlarında kullanılmalarına ek olarak, petrol ve petrol ürünleri gibi ham maddeleri nakletmek için de kullanılırlar. Tüm bu uygulama alanlarında kompozit malzemeler sabit veya periyodik olarak, hava, su, deniz suyu, çeşitli gazlar, yağlar, petrol ürünleri, kimyasallar ve çeşitli farklı ortamlarla etkileşime girer. Bu etkileşimlerin bir sonucu olarak, kompozit malzemeler radyasyona, yüksek veya düşük çalışma sıcaklıklarına, değişken sıcaklıklara, kimyasal korozyona, darbeye ve deforme etkilerine maruz kalmaktadır. Bu etkiler, yaşlanma, yorulma, sıcaklık ve darbe fenomenlerinin kompozit materyalleri agresif bir şekilde etkilemesine neden olur. Bu faktörler kompozit malzemelerin ve yapıştırılarak birleştirilmiş kompozit malzemelerin mekanik, termal ve iç yapısal özelliklerinde değişiklikler meydana getirirler. Kompozit malzemelerin ve yapıştırılmış kompozit malzemelerin termal yaşlandırma, termal-yağ yaşlandırma, termal yorulma, sıcaklık ve darbe etkileri altındaki davranışlarını belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Bu tez kapsamında dört ayrı bilimsel çalışma yürütülmüştür.

“Düşük Hızlı Darbe ve Termal Yaşlandırmanın Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri” konulu çalışma tezin birinci basamağını oluşturmaktadır. Termal yaşlandırma işlemi -18 ila 70 °C sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Termal yaşlandırma işleminden sonra, tek bindirmeli yapıştırılmış cam elyaf/epoksi kompozit numuneler, farklı enerji seviyelerine (5 ila 30J) sahip düşük hızlı serbest düşme darbe etkilerine maruz bırakılmıştır. Termal yaşlandırma ve serbest düşme darbe etkilerinin tek bindirmeli olarak yapıştırılmış kompozit numunelerin gerilme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için çekme testleri yapılmıştır ve çekme testleri -18 ila 70 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci basamağında “Çevrim Sebebiyle Oluşan Termal Yorulmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri” konusu araştırılmıştır. Başlangıçta, numuneler ısıtılmış yağda tutulduktan hemen sonra soğutulmuş ısı transfer yağına daldırılmıştır.

Termal çevrimin sağlıklı bir şekilde uygulanması amacıyla, numuneler soğutulmuş yağda tutuldukları sürece (10 dk.) ısıtılmış yağda tutulmuştur. Termal çevrim prosesi, -10 ile 80 °C, -10 ile 100 °C ve -10 ile 120 °C arasında gerçekleştirilmiştir. Termal çevrim sayısının etkilerini gözlemlemek için, numuneler 1 ila 50 döngü arasında belirtilen sıcaklıklarda tutulmuştur. Termal çevrim prosesi uygulanmış numunelerin mekanik performanslarının tayini için oda sıcaklığında çekmede kesme mukavemeti testleri yapılmıştır. Bu testler sonucunda Yük – Deplasman grafikleri oluşturulmuş ve grafiklerdeki maksimum yük taşıma kapasiteleri mukayese edilmiştir.

“Termal-yağ Yaşlandırmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri” başlıklı çalışma tezin üçüncü basamağı olarak ifade edilebilir. Termal yaşlandırma işlemi, numunelerin farklı sıcaklıklarda ve farklı maruziyet süreleri için bir ısı transfer yağı içine daldırılması suretiyle gerçekleştirilmiştir. İşlem, -10 ila 120 °C arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Termal yaşlanma süresinin etkilerini gözlemlemek için, numuneler belirtilen sıcaklıklarda 24 ila 1440 saat arasında değişen maruziyet sürelerinde ayrı ayrı tutulmuştur. Son olarak, numunelerin mekanik performanslarını gözlemlemek için oda sıcaklığında çekmede kesme mukavemeti testleri yapılmıştır.

Tezin son basamağı olan dördüncü basamakta “Termal-yağ Yaşlandırmanın Cam Elyaf/Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Özelliklerine Etkileri” başlıklı bir çalışma yürütülmüştür. Termal-yağ yaşlandırma işlemi farklı maruziyet süreleri ve farklı sıcaklıklarda uygulanmış ve yaşlandırma prosesi kompozit numunelerin bir ısı transfer yağı içine daldırılması ile gerçekleştirilmiştir. Termal-yağ yaşlandırma işlemi -10 ila 140 °C arasında değişen sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Termal yaşlandırma periyotlarının etkilerini gözlemlemek için, numuneler 24 ila 1080 saat arasında belirtilen sıcaklıklarda tutulmuştur. Numunelerin mekanik performanslarını belirlemek için oda sıcaklığında çekme testleri yapılmış, kompozit örneklerin termal stabilitelerini belirlemek için TG ve DT analizi yapılmış ve mekanik özelliklerin azalmasına neden olan hasar mekanizmasını tespit etmek için bazı yaşlandırma koşullarına tabi tutulmuş numunelerden SEM mikrografları alınmıştır.

Tezin birinci bölümünde, kompozit malzemeler ve yapıştırma bağlantıları hakkında genel bir giriş yapıldıktan sonra tezin kapsamı, amaçları ve kritik çıktılarından bahsedilmiştir.

Genel bir literatür taraması Bölüm 2’de yapılmıştır. Literatür taraması bölümü altı alt kısma ayrılarak gruplandırılmıştır. Birinci kısımda literatür taramasına genel bir giriş yapılmıştır. İkinci kısımda kompozit malzemelere darbenin etkisi ile ilgili çalışmalardan bazılarına yer verilmiştir. Üçüncü kısım kompozit malzemelere yaşlandırmanın etkisi ile ilgili çalışmalardan ve dördüncü kısım kompozit malzemelere sıcaklığın etkisi ile ilgili yapılmış çalışmalardan oluşmaktadır. Kompozit malzemelere termal yorulmanın etkisinin araştırıldığı çalışmalar beşinci kısmı oluşturmaktadır. Tek bindirmeli kompozit malzemeler ile ilgili yapılmış çalışmalar altıncı kısımda bulunmaktadır.

Deneysel parametreler ve deneysel prosedürlerin oluşturduğu 3. Bölüm, 7 farklı kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda, tezin dört bölümünde de kompozit plaka üretimi için kullanılan vakum destekli reçine infüzyon metodundan bahsedilmiştir. Kesme mukavemeti karakterizasyonu için tek bindirmeli yapıştırılmış kompozit numunelerin üretim prosesinden ayrıntılı olarak ikinci kısımda bahsedilmiştir. Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu için gerekli olan numunelerin ölçülendirilerek üretilme aşamaları üçüncü kısımda açıklanmıştır. Dördüncü kısımda termal yaşlandırma ve düşük hızlı darbe deneysel prosedürleri ve deneysel parametreleri verilmiştir. Beşinci kısımda termal çevrim prosesinin ayrıntılı deneysel kurulumu ve parametreleri gösterilmiştir. Altıncı kısımda termal-yağ yaşlandırması prosesinin ayrıntılı deneysel sunumu ve parametreleri verilmiştir. Yedinci ve en son kısımda kompozit malzemelere uygulanan termal-yağ yaşlandırması ile ilgili deneysel kurulum ve parametreler bulunabilir.

Tezi oluşturan dört farklı çalışmanın ayrıntılı ve karşılaştırmalı sonuçları ve bu sonuçlara ait yorumlar dördüncü bölüm olan “Bulgular ve Tartışma” da yer almaktadır.

Beşinci ve son bölüm olan “Sonuçlar ve Öneriler”de, elde edilen bulgular doğrultusunda, her bölüm için ayrı ayrı sonuçlar derlenmiş ve bu sonuçlara göre bazı önerilerde bulunulmuştur.

1.4 Amaçlar ve Hedefler

Bu tez ile genel olarak ulaşılmak istenen amaç, tek bindirmeli olarak yapıştırılmış cam elyaf/epoksi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine, farklı sıcaklık ve farklı maruziyet sürelerinde uygulanan termal yaşlandırma, termal yorulma, termal-yağ yaşlandırma ile sıcaklığın ve düşük hızlı düşey darbenin etkilerini ortaya çıkarmaktır. Bu kapsamda tez dört ayrı ana bölüme ayrılmış ve her bölüm için ayrı deneysel prosedürler oluşturulmuştur.

Birinci aşamada, “Termal Yaşlandırma ve Düşük Hızlı Darbenin Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Numunelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi” konulu çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmanın amacı, üç farklı sıcaklıkta uygulanan termal yaşlandırmanın, altı farklı enerji seviyesine sahip düşük hızlı düşey darbenin ve farklı sıcaklıklarda uygulanan gerilme testlerinin tek bindirmeli yapıştırılmış cam elyaf/fiber epoksi kompozit numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemektir.

Tezin ikinci aşaması olan “Termal Çevrim Sebebiyle Oluşan Termal Yorulmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri” çalışmasında hedeflenen amaç; çalışma ortamı yağ olan tek bindirmeli yapıştırılmış cam elyaf/epoksi numunelerin mekanik özelliklerine, üç farklı sıcaklıkta ve altı farklı termal döngü sayısında termal-yağ döngüsünün neden olduğu termal yorulmanın etkilerinin belirlenmesidir.

Üçüncü aşamada “Termal-yağ Yaşlandırmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri” başlıklı çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmada hedeflenen amaç ise; yedi farklı sıcaklıkta termal-yağ yaşlandırmanın ve altı farklı termal yaşlandırma süresinin üç farklı karakteristik özellikte yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış cam elyaf/epoksi tek bindirmeli kompozit numunelerin mekanik performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesidir.

Tezin son basamağı olan dördüncü aşamada “Termal-yağ Yaşlandırmanın Cam Elyaf/Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Özelliklerine Etkileri” konulu bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, cam elyaf/epoksi kompozitlerin mekanik, termal ve iç yapısal özellikleri üzerinde yedi farklı sıcaklıkta

ve beş farklı termal yaşlandırma süresinde termal-yağ yaşlandırmasının etkilerini belirlemektir.

1.5 Temel Katkılar

Bu teze ait temel yenilikler;

- Tek bindirmeli yapıştırılmış, higrotermal yaşlandırılmış ve darbe uygulanmış cam elyaf/epoksi kompozit malzemelerin yüksek ve düşük sıcaklıklarda maksimum yük taşıma kapasitelerinin belirlenmesi için oluşturulan deneysel düzenek ve deneysel parametrelerin aynı anda uygulanmış olması,
- Farklı çalışma sıcaklıklarında ve sayısında uygulanan termal çevrim sebebiyle oluşan termal yorulmaya maruz kalan farklı karakteristik yapıştırıcılar ile tek bindirmeli olarak yapıştırılmış numunelerin dayanımı üzerindeki etkileri için kurulmuş deneysel düzenek ve termal yorulma işlemi için ısı transfer yağının kullanımı,
- Çeşitlendirilmiş termal yaşlandırma işlemi sıcaklıklarının ve sürelerinin, farklı yapıştırıcılarla tek bindirmeli olarak birleştirilen cam elyaf/epoksi kompozitlerin mukavemeti üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için oluşturulan deneysel düzenek ve termal yaşlanma prosesi için ısı transfer yağı kullanımı,
- Çeşitli sıcaklık ve sürelerde termal-yağ yaşlandırma uygulamasının, cam elyaf/epoksi kompozit malzemelerin termal, mekanik ve iç yapısal özelliklerine etkilerinin araştırılması için hazırlanan deneysel düzenek ve termal-yağ yaşlandırma işlemi için ısı transfer yağının kullanımınıdır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, kompozit malzemelerin yaşlandırma, darbe, sıcaklık ve termal yorulma etkisi altında davranışları ile ilgili literatür incelemesine genel bir bakış sunulacaktır. Birinci bölümde, kompozit malzemelerin konuyla ilgili genel özellikleri tartışılmaktadır. İkinci bölümde kompozit malzemelere darbenin etkisi ile ilgili çalışmalar sunulacaktır. Daha sonra üçüncü bölümde kompozit malzemelere uygulanan farklı yaşlandırma prosedürlerine karşı göstermiş oldukları davranışlarını içeren çalışmalara değinilecektir. Dördüncü bölümde sıcaklık etkisi altındaki kompozit malzemelerin gerilme testleri esnasında gösterdikleri davranışları inceleyen çalışmalara yer verilecektir. Beşinci bölümde kompozit malzemelerin termal yorulma davranışlarını inceleyen çalışmalardan bahsedilecektir.

2.1 Giriş

Son yıllarda, kompozit malzemeler, ultra hafiflikleri, yüksek sertlik değerleri, yüksek ısı dirençleri, yüksek mekanik performansları, tasarım esneklikleri ve yüksek korozyon dirençleri gibi önemli performans avantajlarına sahip olmaları nedeniyle endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [18]. Enerji, deniz ve uçak uygulamaları gibi alanlar da dahil olmak üzere geniş bir kullanım alanına ulaşmaktadır. Ayrıca, polimer matris kompozit boruları, kayda değer özelliklerinden dolayı doğalgaz, petrol, termal su ve atık su gibi malzemelerin batırılmış ve yeraltı nakli için yaygın olarak kullanılmaktadır [19].

Kompozit malzemeler, nakliye sırasında hava, su, deniz suyu, çeşitli gazlar, çeşitli ortamlar, yağlar ve kimyasal maddelerle sürekli veya periyodik olarak temas halindedir. Sonuç olarak servis ömrü boyunca, radyasyon, nem, yüksek veya düşük çalışma sıcaklıkları, sürekli değişen sıcaklıklar ve kimyasal korozyon gibi çeşitli agresif yaşlanma faktörlerine maruz kalmaktadırlar [20]. Uzun süreli dayanıklılık performansının devamlılığı için kompozit malzemelerin termal yaşlanma, termal döngü ve termal yorulma gibi termal uygulamalara karşı gösterdiği davranış özellikleri belirlenmelidir.

2.2 Kompozit Malzemelere Darbenin Etkisi ile İlgili Çalışmalar

Tita ve diğ. [21] deneysel bir araştırma yapmış ve ince kompozit laminatlar üzerinde serbest düşme etkisinin bazı sayısal sonuçlarını bulmuşlardır. Deneysel yaklaşım ile, istifleme sekansı ve çarpma enerjisi seviyesinin, kompozit plakaların dinamik tepkisi üzerinde etkili olabileceği doğrulanmıştır.

Enine darbe ve farklı sıcaklıkların etkisi altında kesme mukavemeti değerlerini yorumlayabilmek için Sayman ve diğ. [22] yapıştırılmış kompozit numuneleri deneysel olarak incelemiştir. Oda sıcaklığında çekme testlerine tabi tutulan, darbe uygulanmamış numunelerin, en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu bulmuşlardır.

LS-DYNA 3D sonlu elemanlar yazılımını kullanarak ve destekleyici deneyler yaparak, Vaidya ve diğ. [23], enine normal darbe yükünün tek tesirli yapışma ile yapıştırılmış kompozit numuneler üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapıştırılmış numunenin enine darbe ile yüklenmesi, düzlemde uygulanmış yüke kıyasla daha yüksek bir soyulma gerilimi konsantrasyonuna yol açacağından, yapıştırılan malzemenin önemli ölçüde sapmasına neden olur. Deneysel olarak düşük hızlı darbe testleri ile sonlu eleman modelinden elde ettikleri sonuçları doğrulamışlardır.

Sayman ve diğ. [24], tek tesirli yapıştırılmış kompozit numunelerin darbe sonrası davranışlarını belirlemek için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmanın ana sonuçlarından biri, sıcaklık ve uygulanan enerjinin eksenel çekme etkilerine karşı malzemenin dayanımı üzerinde büyük etkiye sahip olmasıdır. Çarpma enerjisi ve sıcaklık ile ilgili şartlar, daha önce eksenel darbe etkilerine maruz kalan numuneler için nasıl olursa olsun, statik gerilme mukavemetleri daima daha önce darbe uygulanmamış olanların altında kalır.

Galliot ve diğ. [25], bir düşey makinede gerilme etkisine maruz kalan tek tesirli bağlantılı yapıştırılmış numuneleri test etmek için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Sonuçlar, darbe altındaki numunelerin yükleme hızına karşı duyarlı olduğunu göstermiştir.

Kemiklioğlu ve diğ. [26] ise, farklı sıcaklıklarda ve eksenel darbeler altında sünek ve kırılğan yapıştırıcıların mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Hem tek hem de tekrarlanan etkiler altında sünek ve kırılğan yapıştırıcılar arasında anlaşılır sonuçlar elde etmişlerdir.

Ghanbari ve diğ. [27] farklı sıcaklıklarda farklı eksenel çarpma enerjilerinin, FM73 epoksi film yapıştırıcısı ile yapıştırılmış kompozit numunelerin çekme özellikleri üzerindeki etkilerini tespit etmek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çekme testlerinin sonuçları, eksenel çarpma enerjisi seviyelerinin arttırılmasının numunelerin yük taşıma kapasitesini azalttığını göstermiştir.

2.3 Kompozit Malzemelere Yaşlandırmanın Etkisi ile İlgili Çalışmalar

Termo-oksidatif yaşlanma, bir fırında veya farklı bir ısıtma ortamında farklı sıcaklıklara ulaştırılmış hava ile malzemenin yaşlandırılmasına dayanır [28-33].

Barjasteh ve diğ. [34], tek yönlü hibrit kompozitler için termal oksidasyon ve ilişkili hasar mekanizmasının kinetiğini belirlemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Cam elyaf kabuğu, karbon fiber çekirdeğin oksitlenmesini sınırlandıran koruyucu bir tabaka olarak işlev görmüştür. Çekme mukavemeti 52 hafta termal oksidasyon maruziyetinden sonra bile değişmeden kalmıştır.

Rudzinski ve diğ. [35], cam elyaf boyutunun cam elyaf kompozit malzemelerin termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak için termal-oksidatif bir yaşlandırma çalışması yapmışlardır. Cam elyaf kompozitlerin mekanik özelliklerinin uygun cam elyaf boyutlandırması ile güçlendirildiğini bulmuşlardır.

Fan ve diğ. [36], karbon fiber takviyeli kompozitlerin ısı iletkenliklerinin termo-oksidatif yaşlanmaya göre nasıl değiştiğine ilişkin deneysel bir çalışma yapmışlardır. Termo-oksidatif yaşlanma prosesi, matris reçenesi ve fiber/matris ara yüzlerinin kademeli olarak bozunmasına yol açarak, sek reçine, dokuma kumaş/epoksi kompozitleri ve karbon fiber/epoksi kompozitlerin düşük bir termal iletkenliğe sahip olmasına neden olmuştur.

Higrotermal yaşlandırma, yaygın olarak kullanılan yaşlandırma yöntemlerinden biridir ve higrotermal olarak yaşlanmış numuneleri karakterize etmek için su emilim miktarı dikkate alınır [37-43].

Hu ve diğ. [44], higrotermal yaşlanmanın etkisi altındaki cam fiber/polidisiklopentadiyen kompozitlerin yorgunluk davranışlarını araştırmışlardır. Sonuçlar, polidisiklopentadiyen kompozitlerin higrotermal yaşlanmaya karşı dirence sahip olduğunu göstermiştir.

Xin ve diğ. [45], kompozit örneklerinde higrotermal yaşlanmanın etkisini saptamak için karşılaştırmalı deneysel bir çalışma hazırlamış ve yaşlanma süresi ile eğilme özellikleri arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmışlardır. Çalışmaları sonucunda, ortalama eğilme dayanımının ve eğilme modülü bozulmasının daha yüksek sıcaklıklarda arttığını bulmuşlardır.

Berketis ve diğ. [46] uzun süreli higrotermal yaşlandırılmış cam elyaf takviyeli polimerlerin su emilim davranışlarını incelemiştir. Suyu daldırıldıktan sonra laminatların termo-mekanik özelliklerinde meydana gelen değişiklikler, dinamik mekanik termal analiz tekniği kullanılarak incelenmiştir.

Fitriah ve diğ. [47] tarafından yürütülmüş başka bir deneysel çalışmada, hidrotermal yaşlandırılmış cam elyaf takviyeli epoksi kompozit boruların bası davranışları araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, boruların dayanımının, sıcaklık artışı ve hidrotermal yaşlanma süresinin uzamasıyla önemli ölçüde azaldığını göstermiştir.

Soykök ve diğ. [48] mekanik olarak bağlanmış cam elyaf/fiber epoksi kompozit numuneleri sıcak su yaşlanmasına maruz bırakmış ve mekanik özelliklerini çevre sıcaklıklarında araştırmışlardır. Sıcak suda tutma süresi, mekanik bağlantılı kompozit bağlantıların çekme testi esnasındaki davranışı üzerinde oldukça etkilidir. Uzun daldırma süreleri, mekanik olarak bağlanan kompozit numunelerin mukavemetinin kademeli olarak azalmasına neden olmuştur.

Alessi ve diğ. [49], karbon elyafı ile güçlendirilmiş kompozit laminatların ve aynı zamanda bunların epoksi matrislerinin hidrotermal yaşlanma davranışlarını incelemiştir. İnterlaminar Mod I kompozitin kırılma tokluğu, termal yaşlanma koşulları tarafından aktive edilen sertleştirme veya gevrekleştirme mekanizmalarına göre değişken bir eğilim göstermiştir.

El-Abbassi ve diğ. [50], alkali takviyesinin daha önce su yaşlanma sürecine tabi tutulan alfa fiber takviyeli polipropilen kompozitlerin mekanik performans ve kilo kaybı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Alkali takviyesinin suda yaşlandırma sürecinde kilo kaybını azalttığını ve Young modülü ile çekme mukavemetini önemli ölçüde artırdığını tespit etmişlerdir.

Cheour ve diğ. [51] basınçla plaka üretim yöntemi ile yarı-tek yönlü keten elyaf takviyeli epoksi kompozitler üretmişlerdir. Üretimden sonra, kompozit örnekleri oda sıcaklığında suya batırmışlardır. Çalışmanın sonuçları, su yaşlandırmasından kaynaklanan su emiliminin, daldırma zamanı ile orantılı olarak eğilme modülünü azalttığını göstermiştir.

Çevresel yaşlandırma, malzemelerin doğal ortamın etkisi altında olduğu bir yaşlandırma yöntemidir [52, 53].

Guzmán ve diğ. [54] çevresel yaşlandırılmış karbon fiber/epoksi kompozitler hakkında deneysel ve teorik bir çalışma yapmışlardır. Bunu yapmak için, su difüzyonu ve kütle emiliminin teorik ve deneysel sonuçları arasındaki bağlantıyı incelemişlerdir. İstatistiksel olarak, emilen nem (bir durum değişkeni) ile döngüsel koşullarda yaşlanma arasında bir korelasyon olduğunu bulmuşlardır.

Shaoquan ve diğ. [55], termal yaşlanmanın karbon fiberlerle (T700) takviye edilmiş bismaleimid kompozitlerin mekanik ve düşük hızlı darbe hasarı mekanizması üzerindeki etkilerini belirlemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Termal yaşlanma maruziyet süresinin artmasının modifiye kompozitlerin çekme ve kayma mukavemetlerini azalttığını gözlemlemişlerdir.

Liu ve diğ. [56], termal yaşlanma sürecinin havada, ticari bir yağlama yağında ve karşılık gelen baz yağda gerçekleştirildiği bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmada, bu yaşlanma ortamlarında nitril kauçuğun davranışları araştırılmıştır. Yaşlanma sıcaklığı 125 °C olarak seçilmiş ve en uzun yaşlanma süresi 750 saat olarak seçilmiştir. Baz yağdaki bariyer etkisi ve oksijen tüketimi kauçuğa iyi bir koruma sağlamıştır.

Boubakri ve diğ. [57], 70 ve 90 °C'de yaşlandırılan poliüretan termoplastiklerin mekanik ve fiziksel davranışlarındaki değişiklikleri öğrenmek için deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma, termal yaşlanma maruziyet süresinin 270 güne kadar

uzamasının gerilme mukavemetinde kademeli bir artışa neden olduğunu ortaya koymuştur.

Karslı ve diğ. [58], termal yaşlandırmanın, cam elyaf ve karbon fiberle güçlendirilmiş Poli (eter eter keton) kompozitlerin mekanik, termal, termomekanik ve diğer özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucunda, termal yaşlandırma sürecinin malzemenin mekanik, termal, termomekanik, fiziksel ve tribolojik özelliklerini kontrol etmek için etkili bir yöntem olduğu ve aynı zamanda bu özelliklerin termal yaşlandırma prosesi ile iyileştirilebileceği bulunmuştur.

Kwon ve diğ. [59], SiC ve SiO₂ nanopartikülleri ile takviye edilmiş, termal olarak yaşlandırılmış cam elyaf/epoksi kompozitlerin arayüzey davranışlarını araştırmak için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, epoksi matris kompozitlerin gerilme ve basma dayanımlarının termal yaşlandırma ile değişebileceği bulunmuştur.

2.4 Kompozit Malzemelere Sıcaklığın Etkisi ile İlgili Çalışmalar

Soykök ve diğ. [60], termal koşulların ve sıkma torkunun, tek bindirmeli çift seri pinli cam elyaf/fiber epoksi kompozit numunelerin hasar yükü ve hasar davranışına etkilerini belirlemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Numuneler çekme testleri sırasında 40, 50, 60, 70 ve 80 °C sıcaklıkları maruz bırakılmış ve sıcaklık seviyesinin artmasıyla numunenin yük taşıma kapasitesinin kademeli olarak azaldığı görülmüştür.

Mekanik dirence sıcaklığın etkisine odaklanarak, Osanai ve Reis [61], tek tesirli bağlanmış numunelerin kayma direncine sıcaklık ve diğer bazı faktörlerin etkisi hakkında bir araştırma yapmışlardır. Sıcaklık artışı, yapıştırılmış numunelerin kesme mukavemeti üzerinde olumsuz etkide bulunmaktadır. Nispeten yüksek kesme mukavemeti kaybı gösteren sıcaklık aralığı 30 ila 50 °C arasında bulunmuştur ve 50 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise mukavemet kaybı oranları düşmektedir.

Başka bir deneysel çalışma, sıcaklığın yapıştırıcıların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak için Banea ve da Silva [62] tarafından yapılmıştır. Yapıştırıcıların kopma yüklerinin sıcaklığa göre değiştiği ve herhangi bir tasarım sürecinde göz önünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılmıştır.

2.5 Kompozit Malzemelere Termal Yorulmanın Etkisi ile İlgili Çalışmalar

Termal döngü, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini etkileyebilmesi sebebiyle önemli bir etken parametredir. Termal döngü gerçekleşirken, polimer matrisli kompozitlerin ve epoksi bazlı yapıştırıcıların mekanik özellikleri farklı parametrelerden etkilenmektedir.

Ghasemi ve diğ. [63] termal çevrim prosesi altında kompozit numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için geliştirdikleri termal döngü aparatı ile deneysel bir çalışma yapmışlardır. Termal döngü altında kompozit plakaların hasar davranışını belirleyen parametreler arasında en belirleyici faktörün istifleme sırası olduğunu bulmuşlardır.

Liang ve diğ. [64] kompozit plakaların yorulma davranışını belirlemek için karşılaştırmalı bir çalışma yürütmüşlerdir. Numunelere termografik çalışmalar uygulama amacıyla tepki yüzeyi metodolojisi yorulma testi olarak seçilmiştir. Test, yorulma özelliklerini belirlemek için $[0/90]_{3s}$ ve $[\pm 45]_{3s}$ istifleme sekanslarına sahip keten/epoksi ve cam/epoksi takviyeli kompozit numunelerine uygulanmıştır. $[0/90]_{3s}$ oryantasyona sahip numuneler için keten elyaf takviyeli kompozitin cam elyaf takviyeli kompozitten daha düşük yorulma dayanıklılığına sahip olduğunu, ancak $[\pm 45]_{3s}$ oryantasyona sahip numuneler arasında ise keten elyaf kompozit örneklerinin cam elyaf kompozitlere göre daha iyi bir özgül yorgunluk dayanıklılığı sunduğunu göstermektedir.

Alvarez ve diğ. [65] çevrimsel periyodik su emiliminin cam-vinilester ve cam-epoksi kompozitler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Artan döngülerin su emilimini arttırdığı görülmüştür.

Dai ve diğ. [66], hibrit kompozit malzemelerin yorulma özelliklerini belirlemek için oluşturdukları yazılımı ve Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemini (X-FEM) kullanmışlardır. Bu yazılım ve X-FEM ile mikroyapısal özellikler ve yükleme koşulları gibi birçok değişkenin melez kompozitlerin yorulma davranışları üzerindeki etkisini araştırdılar. Hibrit kompozitlerdeki karbon fiberin daha yüksek oranının, çevrimsel çekme yüklemesi altındaki kompozitlerin yorulma ömrü boyunca faydalı olduğu, ancak basma etkisi altında yorulma ömrü üzerinde olumsuz bir etkiye sahip

olabileceği ve karma (basma-çekme) çevrimsel yükleme altında karma bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Mostafa ve diğ. [67], yorulma ömrü boyunca kumaş ön gerilmesinin etkisini belirlemek için öngerilmeli cam/polyester kompozit numuneler üzerine çevrimsel çekme yorulma testlerini uygulamışlardır. Deneysel çalışmalar, yorulma ömrünün uygun bir seviyede öngerilme etkisi ile yaklaşık %43 oranında arttığını göstermiştir.

Yorulma özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili bir başka çalışma Longbiao tarafından yapılmıştır [68]. Tek yönlü C/SiC kompozitlere çevrimsel yorulma yüklemesi uygulanmış, yorulma davranışı, yorulma histerisi, yorulma histerez modülü ve yorulma histerik enerjisi birkaç sıcaklık altında gözlemlenmiştir. Oksitlenmiş atmosfer altında oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda, arayüz kesme gerilmesinin bozunma oranı, farklı fiber öncül formları veya oksidasyona bağlı olarak, tek yönlü C/SiC kompozit için en yüksek ve 2.5D C/SiC kompozit için en düşüktür.

Bhuyan ve diğ. [69], S2 cam elyaf/epoksi kompozitlerin termal döngü altında delaminasyon davranışını araştırmışlardır. Deneysel çalışma, ilk birkaç termal döngüden sonra termal döngü boyunca kütle kayıplarının olduğunu göstermiştir.

Eftekhari ve diğ. [70], cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin yorgunluk özelliklerini elde etmek için, çeşitli gerilme oranlarında ($R = -1, 0.1, 0.3$) ve sıcaklıklarda ($T = 23, 85$ ve 120 °C) farklı çevrim frekansları ile yorulma testleri uygulamıştır. Deneysel çalışma, cam elyaf takviyeli kompozitlerin yorulma ömrünün artan çevrim sayısı ile arttığını göstermiştir.

Helmy ve diğ. [71] cam elyaf/nanokil takviyeli epoksi reçine kompozitlerinin gerilme yorgunluğu özelliklerini gözlemlemek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Çalışma, nanokil takviyeli epoksi reçinesi ile nihaî dayanımın arttığını, ancak nanokil mevcudiyetinin kopma uzamasının azalmasına neden olduğunu göstermiştir.

Lee ve diğ. [72], farklı sıcaklıklarda termal çevrimin, kompozitlerin termo-oksidatif sabitliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmadan elde edilen bulgulara göre; termal çevrim prosesi, izotermal koşullardan daha yavaş bir kütle bozunum oranı göstermiştir.

Zhang ve diğ. [73], düşük sıcaklıkta termal çevrim uygulanan C/C-ZrC-SiC kompozitlerin mikro yapısındaki, mekanik özelliklerindeki ve oksidasyon direncindeki değişiklikleri incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmanın sonuçlarına göre; C/C-ZrC-SiC kompozitlerin eğilme dayanımı 100 döngüden sonra biraz artmış ve 200 döngüden sonra önemli ölçüde azalmıştır.

2.6 Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerle İlgili Çalışmalar

Kompozit malzeme uygulamalarında, kompozit malzemeler birbirine eklenerek kullanım gerektirebilir ve en yaygın olarak kullanılan bağlantı tiplerinden biri yapıştırıcı ile birleştirmedir. Yapıştırıcı ile bağlı kompozit malzemelerin çalışma güvenliği, yapıştırılan bölgelerinin mekanik davranışı ile belirlenir, çünkü hasarlar sıklıkla birleşim alanlarında görülür. Bu nedenle, araştırmacıların çalışmaları, yapıştırma bölgesinin mekanik davranışları üzerine odaklanır. Termal açıdan zorlu bir uygulama için bir yapıştırıcı seçerken, yapıştırıcıların yüksek sıcaklıklarda mekanik, termal stabilitesi dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biridir [74].

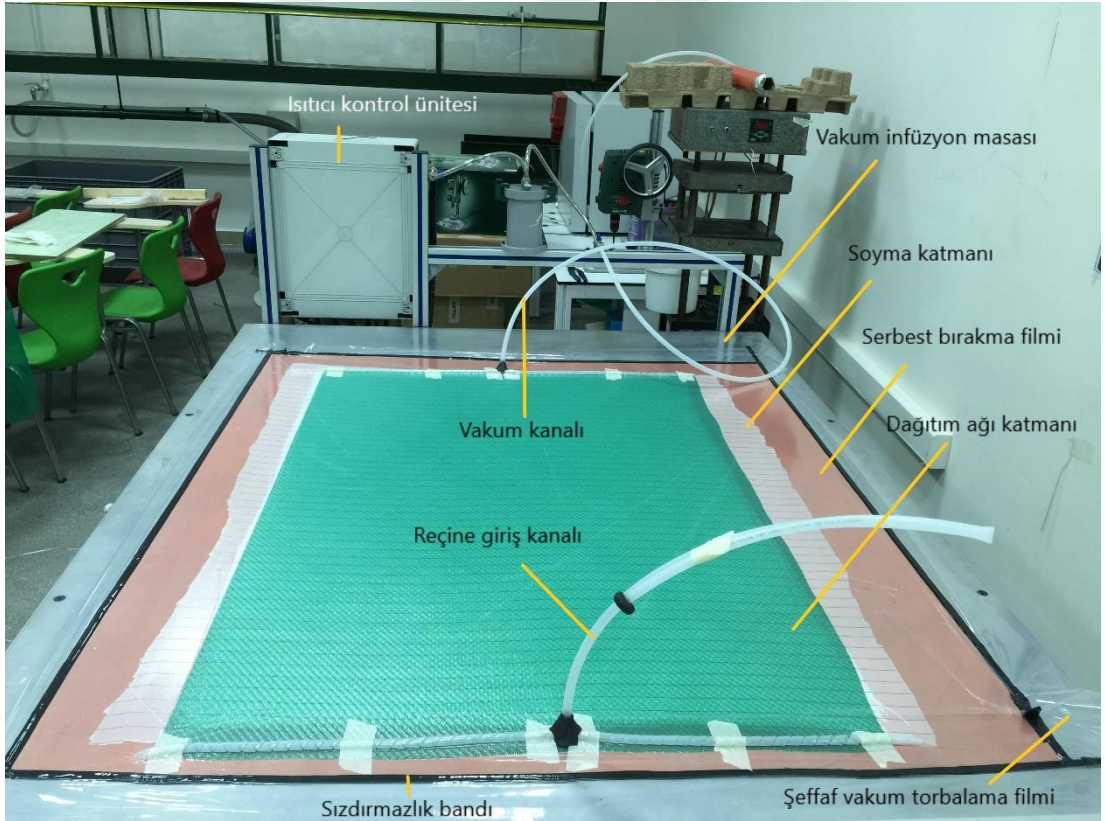
Mattos ve diğ. [75] tek tesirli keyfi yapıştırılmış alana sahip kompozit numunelerin arıza analizini gerçekleştirmeye uygun bir model geliştirmişlerdir. Deneysel test sonuçları, model tahminiyle iyi bir şekilde uygunluk göstermiştir.

Mahoney ve diğ. [76], tek tesirli yapıştırılmış kompozit numunelerin statik davranışları üzerinde sayısal bir çalışma yürütmüştür. Yapıştırıcı ve arayüz özelliklerinin etkisini araştırmışlardır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Kompozit Plaka Üretimi

Altı ile sekiz katmanlı $[0/90]_6$ ve $[0/90]_8$ oryantasyona sahip dokuma cam elyaf/epoksi kompozit plakalar üretmek için vakum destekli reçine infüzyon metodu (VARIM) kullanılmıştır. Üretim işlemi bir vakum cihazı ve kontrol ünitesi ısıtıcı sisteme sahip masa üzerinde gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta, ısıtıcı masa üzerine, vakum infüzyon esnasında cam elyaf tabakalara emdirilmek üzere hazırlanan epoksi reçine ve sertleştirici karışımının üretim masası ile herhangi bir temasını engellemesi amacıyla serbest bırakma filmi açılmış, bunun üzerine altı-tabakalı cam-fiber kumaşlar ve soyma katmanı serilmiştir. Hızlı ve homojen reçine yayılımı elde etmek için bir dağıtım ağı yerleştirilmiştir. Bir vakum torbalama filmi, tabakaları sarmak için kenarlardan bir sızdırmazlık bandı ile yapıştırılmıştır. Vakum kanalı ve bir reçine girişi vakum torbasının iki karşıt tarafına hava sızdırmaz şekilde bağlanmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Vakum destekli reçine-infüzyon yöntemi ile cam elyaf/epoksi kompozit plakaların üretimi.

Basınç kontrolü ile vakum torbasında sızıntı olmadığından emin olduktan sonra, uygun oranlarda birleştirilmiş reçine ve hızlı sertleştirici karışımı emdirilmiştir. Emprenye işlemi tamamlandıktan sonra, vakum torbasında basıncı sabit tutmak için reçine girişi ve vakum tüpleri valfleri sızdırmaz bantlarla kapatılmıştır. Daha sonra laminat 120 °C sıcaklığa ulaşmaya kadar 1 saat ve 120 °C'ye ulaştıktan sonra da 1 saat olmak üzere toplamda 2 saat süreyle kürlenme işlemi için masada bekletilmiştir. Sertleşme tamamlandıktan sonra, laminat oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Laminatın kullanıma hazır hale getirilmesi için üst ve alt ayırıcı tabakalar çıkarılmıştır.

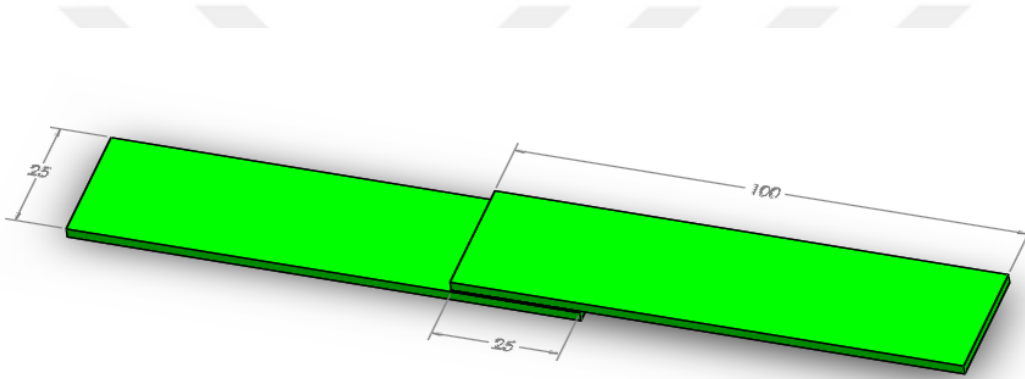
Kompozit malzeme üretiminde matris malzeme olarak, Araldite LY 1564 epoksi reçine ile Aradur 3486 ve Aradur 3487 sertleştiricileri kullanılmıştır. 8 saat 80 °C'de kürlenmiş matrise ait bazı özellikler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 : İki farklı kombinasyon ile oluşturulup kürlenmiş matris için formülasyonun özellikleri [77]

	Matris I	Matris II
	Araldite LY 1564 + Aradur 3486	Araldite LY 1564 + Aradur 3487
Özgül ağırlık (25 °C) [g/cm ³] (ISO 1675)	Araldite LY 1564: 1.1 – 1.2 Aradur 3486: 0.94 – 0.95	Araldite LY 1564: 1.1 – 1.2 Aradur 3487: 0.98 – 1.0
Karışım oranı (Kütlece karışım)	Araldite LY 1564: 100 Aradur 3486: 34	Araldite LY 1564: 100 Aradur 3486: 34
Karışım oranı (Hacimce karışım)	Araldite LY 1564: 100 Aradur 3486: 41	Araldite LY 1564: 100 Aradur 3486: 41
Camsı geçiş sıcaklıkları [°C] (ISO 11357-2 DSC, 10 °C /MIN)	80-84	81-86
Kopma mukavemeti [MPa] (ISO 527)	70-74	72-76
Elastisite Modülü [MPa] (ISO 527)	2860 - 3000	2946 - 3100

3.2 Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Numune Hazırlanışı

Laminat, tek bindirmeli olarak yapıştırılmış kompozit yapının yapıştırma bölgesindeki ayrılma mukavemetinin tayini için yapılacak bindirmeli bağlantılarda ayrılma mukavemeti testlerine tabi tutulabilmesi amacıyla ASTM D5868-01 [78] standardı baz alınarak istenen boyutlara sahip parçalar halinde kesilmiştir (Şekil 3.2). Yapıştırmadan önce, parçaların yapışma yüzeyleri ASTM D2093 [79] standardına göre pürüzlü hale getirilmiş ve çözücülerle temizlenmiştir. Tek bindirmeli olarak yapıştırılmış kompozit numune elde etmek için, yapıştırıcı malzeme olarak Loctite 9461 [80], Loctite 9466 [81] ve DP 460 [82] yapıştırıcıları kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3. 2 : Tek bindirmeli olarak yapıştırılmış kompozit numunenin 3 boyutlu görünüşü (ölçüler mm'dir).



(a)



(b)



(c)

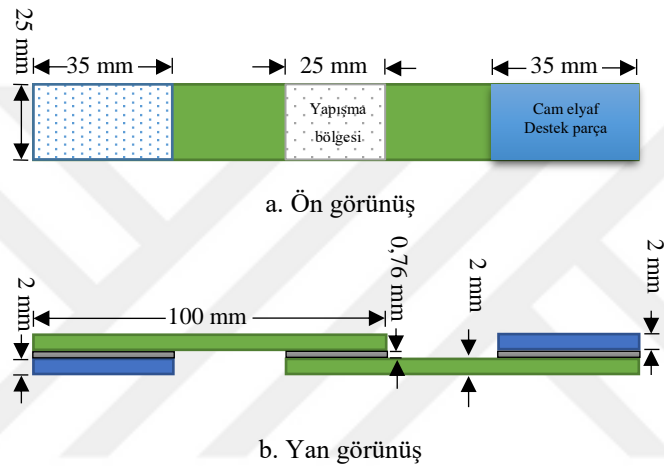
Şekil 3. 3 : Tek bindirmeli yapıştırırmalı bağlantı yapımında kullanılan yapıştırıcılar: (a) Loctite 9461 [80], (b) Loctite 9466 [81] ve (c) DP 460 [82].

Tablo 3. 2 : Kürlenmiş Loctite 9461 [80], Loctite 9466 [81] ve DP 460 [82] epoksi bazlı yapıştırıcıların mekanik ve termal özellikleri.

Yapıştırıcı adı	Kopma mukavemeti	Soyulma mukavemeti	Servis sıcaklık aralığı	Camsı geçiş sıcaklığı	Shore D sertliği
DP 460	36 MPa	5 MPa	-55 °C — +82 °C	58 °C	75 - 80
Loctite 9461	33 MPa	5 MPa	-55 °C — +120 °C	82 °C	80
Loctite 9466	33 MPa	8 MPa	-55 °C — +120 °C	62 °C	60

Bir hafta boyunca 22 °C'de kürlenen Loctite 9461, Loctite 9466 ve DP 460 yapıştırıcılarına ait mekanik ve termal özellikler Tablo 3.2'de gösterilmektedir. Tek bindirmeli yapıştırılmış numuneler oluşturulduktan sonra, numuneler, yapıştırılan bölgedeki yapıştırıcının kürlenmesi için oda sıcaklığında bir hafta bekletilmiştir.

Yapıştırma işleminin homojen bir şekilde gerçekleşmesi için, yapıştırılan kompozit numunelerin üst parçalarının serbest uçlarının altına kompozit plaka kalınlığında destek parçalar koyulmuştur (Şekil 3.4). Bu destek parçalar, kurlenme esnasında yer çekimine bağlı olarak serbest ucun ağırlığının, yapıştırıcı bölgenin yapışmasına olabilecek negatif etkisini bertaraf etmek için uygulanmıştır. Daha sonra 0.76 mm yapıştırıcı kalınlığını elde etmek için üst üste binme bölgesine sabit bir basınç uygulanmıştır. Testler gerçekleştirilmeden önce, numunelerin düzgün bir kurlenme ve birleşmesi için kompozit numuneler oda sıcaklığında bir hafta boyunca bırakılmıştır.



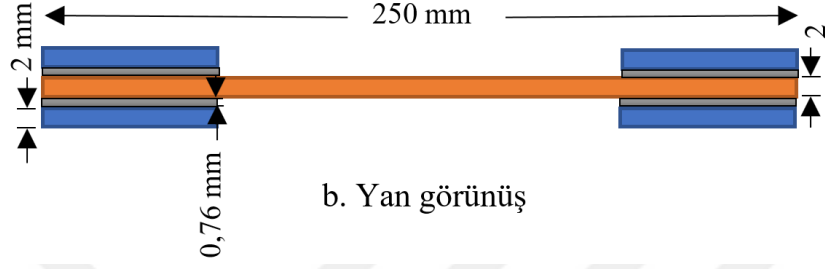
Şekil 3. 4 : ASTM D5868-01'e göre hazırlanmış olan numunenin şematik görünüşü.

3.3 Cam/elyaf epoksi kompozit malzeme numune hazırlanışı

Laminat, kompozit malzemenin mekanik karakterizasyonu aşamasında kullanmak için ASTM D3039 [83] standardına ait ölçülerde parçalara ayrılmıştır. Bu standarda ait ölçüler Şekil 3.5'te verilmiştir. Ölçülendirilen numuneler yaşlandırma prosesine tabi tutulmuş ardından gerekli mekanik testler uygulanmıştır. Yaşlandırılan numunelerin Young modülü ve maksimum yük taşıma kapasiteleri bu ölçüdeki numuneler kullanılarak bulunmuştur. ASTM D3039 standardına göre, mekanik testler uygulanırken her parametreye ait en az 3 numune kullanılmıştır.



a. Ön görünüş



b. Yan görünüş

Şekil 3. 5 : ASTM D3039'a göre hazırlanmış olan numunenin şematik görünüşü.

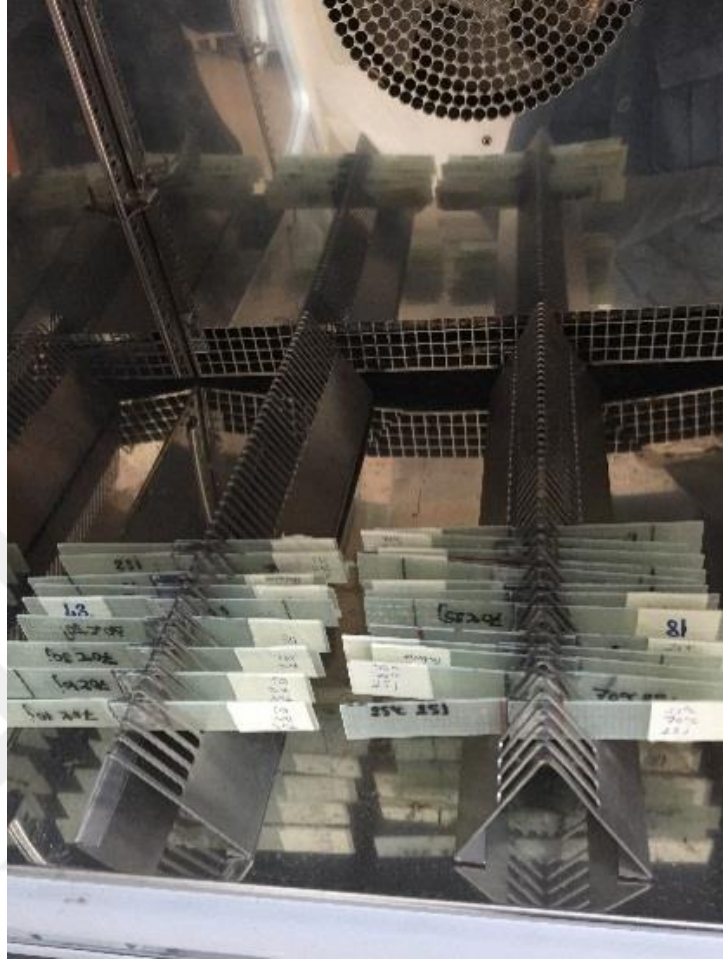
3.4 Düşük Hızlı Darbe ve Termal Yaşlandırmanın Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri Çalışmasının Deney Düzeneği ve Deneysel Parametreleri

3.4.1 Termal yaşlandırma deney düzeneği

Bu çalışmanın amaçlarından biri, termal yaşlandırmanın yapıştırılmış cam elyaf/epoksi kompozitlerin gerilme özelliklerine etkisini araştırmaktır. Bu nedenle üç farklı yaşlandırma sıcaklığı belirlenmiş ve Loctite 9461 kullanılarak hazırlanan kompozit numuneler bir hafta boyunca -18, 25 ve 70 °C sıcaklıklara tabi tutulacak şekilde üç gruba ayrılmıştır. İlk örnek grubu yedi gün boyunca 1 atm. sabit basınç altında -18 °C'de bir derin dondurucuda tutulmuş, ikinci grup oda koşullarında bir hafta boyunca 25 °C'de 1 atm. sabit basınç altında bekletilmiş ve son örnek grubu ATT Discovery - DY 110 (C) [84, 85] iklimik test odasında (Şekil 3.6) 70 °C'de bir hafta boyunca 1 atm. sabit basınç altında tutulmuştur (Şekil 3.7).



Şekil 3. 6 : ATT Discovery - DY 110 (C) iklimik test odası [86].



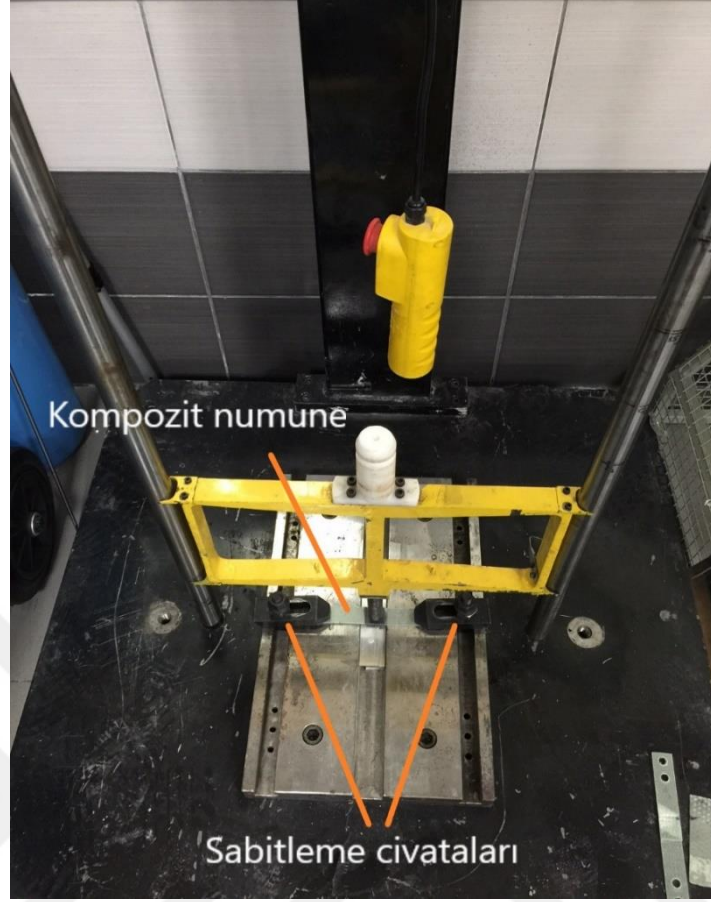
Şekil 3. 7 : Klimatik test odasına yaşlandırma amacıyla yerleştirilmiş kompozit numuneler.

3.4.2 Düşük hızlı darbe testi deney düzeneği

Termal yaşlanmanın yanı sıra, cam elyaf fiber/epoksi kompozit numuneler, düşük hızlı darbenin numunelerin mekanik davranışları üzerindeki etkisini gözlemlemek için düşük hızlı darbe testine maruz bırakılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3. 8 : Düşük hızlı darbe testi deney düzeneği



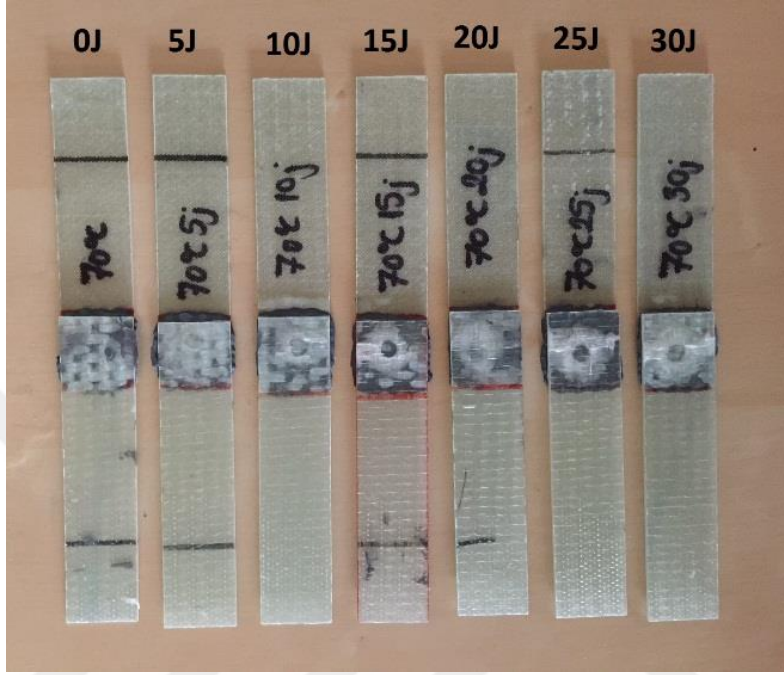
Şekil 3. 9 : Düşük hızlı darbe testi cihazına sabitlenmiş kompozit numune

Numuneler, sabitleme civataları kullanılarak her iki uçta darbe cihazının plakasına sabitlenmiştir (Şekil 3.9).

İstenen darbe enerji seviyelerini elde etmek için 5.645 kg'lık bir kütleye sahip çarpma tertibatının ağırlık merkezi farklı yüksekliklerden serbest bırakıldı. Darbe enerjisi için gerekli olan, kütleyi serbest bırakma yüksekliklerini hesaplamak için aşağıdaki yerçekimi potansiyel enerjisi denklemi kullanılmıştır.

$$U = mgh$$

Uygulanan darbeler, 0J'den 30J'e kadar 5 J aralıkları ile kademeli olarak arttırılmıştır. Darbe uygulanmış örnekler Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Ayrıca çalışmaya ait tüm uygulama basamakları Şekil 3.11'de adım adım verilmiştir.



Şekil 3. 10 : Darbe uygulanmış kompozit numuneler.



Şekil 3. 11 : Detaylandırılmış deneysel prosedür.

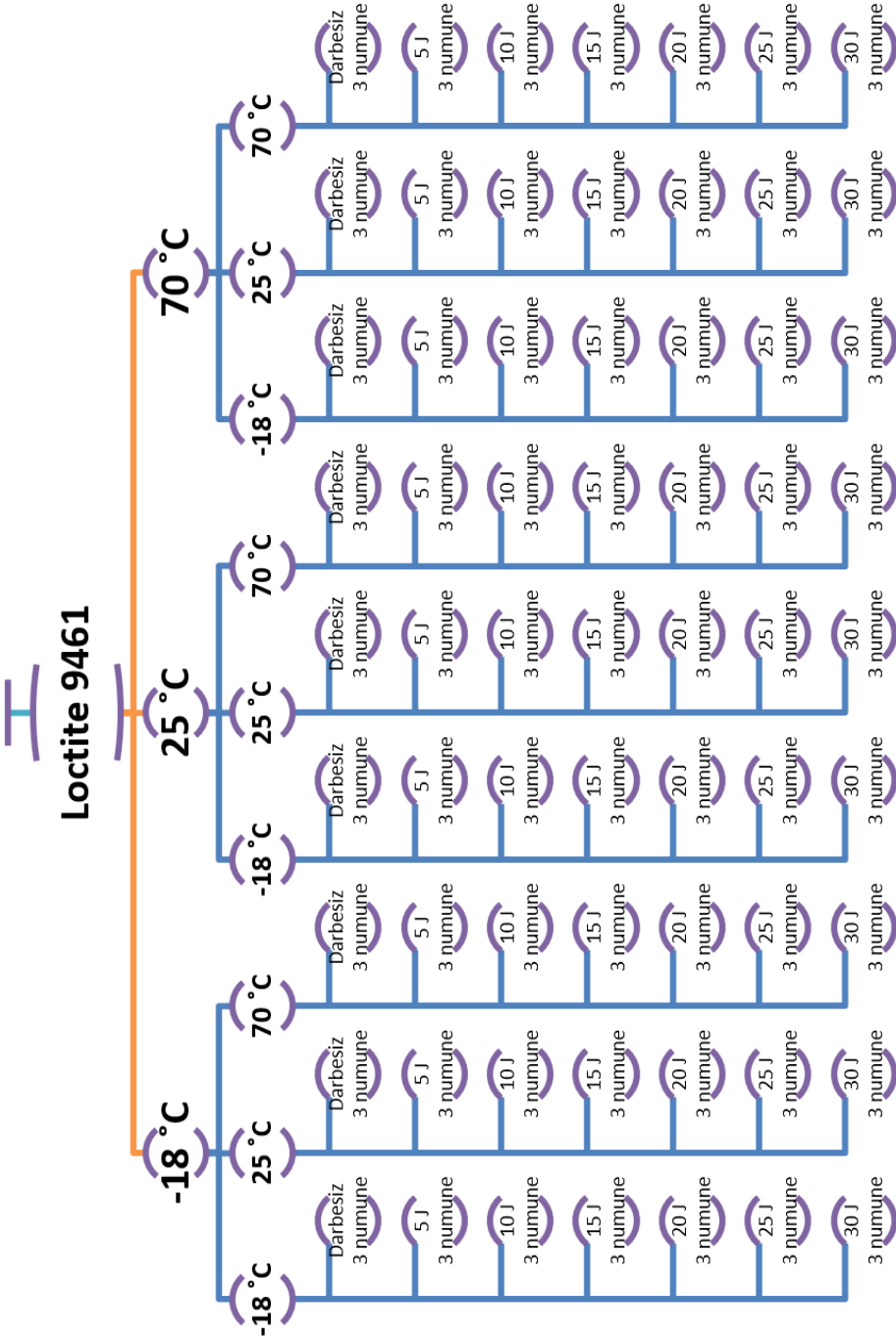
3.4.3 Deneysel parametrelerin belirlenmesi

Bu çalışmanın deneysel tasarımı şu parametreler seçilerek yapılmıştır: Termal yaşlandırma sıcaklığı olarak -18, 25 ve 70 °C, çekmede kesme mukavemeti testi için -18, 25 ve 70 °C sıcaklıkları, darbe enerjileri olarak da 0, 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 J seçilmiştir. Tek bindirmeli olarak yapıştırılan kompozit numunelerin hazırlanmasında Loctite 9461 yapıştırıcısı kullanılmıştır. Çekmede kesme mukavemeti belirleme testlerinden güvenilir sonuçlar elde etme amacıyla her parametre için 3 örnek kullanılmıştır. Buna bağlı olarak çalışmaya ait deneysel tasarım parametreleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Deneysel parametrelerin detaylı kategorizasyonu Tablo 3.3’te sunulmuştur.

Tablo 3. 3 : Deneysel parametre değişkenleri

Termal yaşlandırma sıcaklıkları [°C]	-18, 25 ve 70
Çekmede kesme mukavemeti testi sıcaklıkları [°C]	-18, 25 ve 70
Termal yaşlandırma süresi [saat]	168
Darbe enerjileri [J]	Darbesiz, 5, 10, 15, 20, 25, 30
Yapıştırıcı	Loctite 9461

Termal Yaşlandırma ve Düşük Hızlı Darbe Deneysel Tasarım Parametreleri

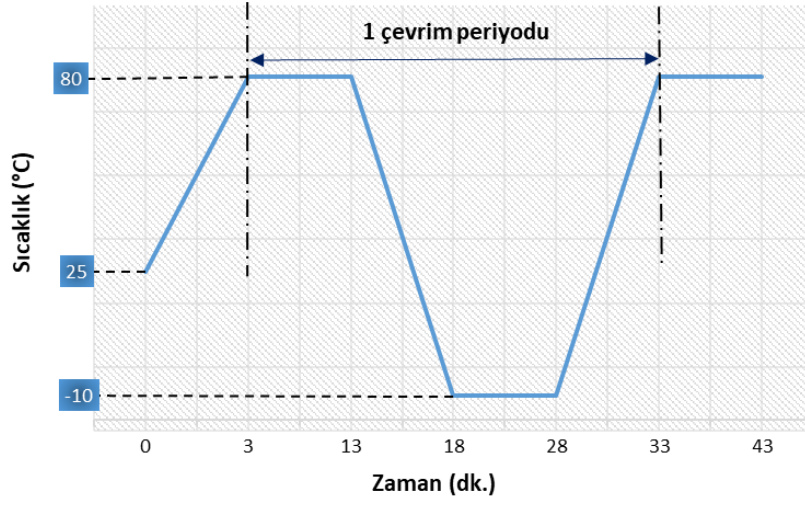


Şekil 3. 12 : Termal yaşlandırma ve düşük hızlı darbe deneysel tasarım parametreleri şematik gösterimi.

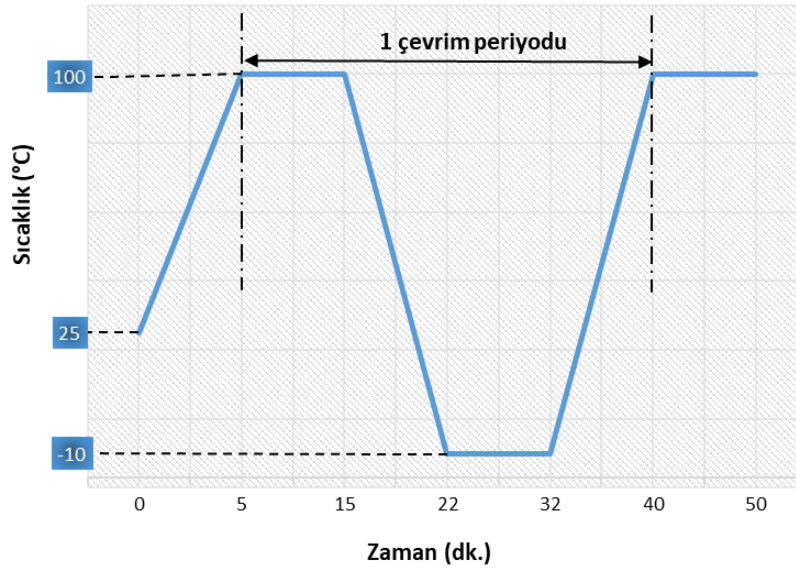
3.5 Termal Yorulmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri Çalışmasının Deney Düzenegi ve Deneysel Parametreleri

3.5.1 Termal-yağ çevrimi deney düzeneginin hazırlanması

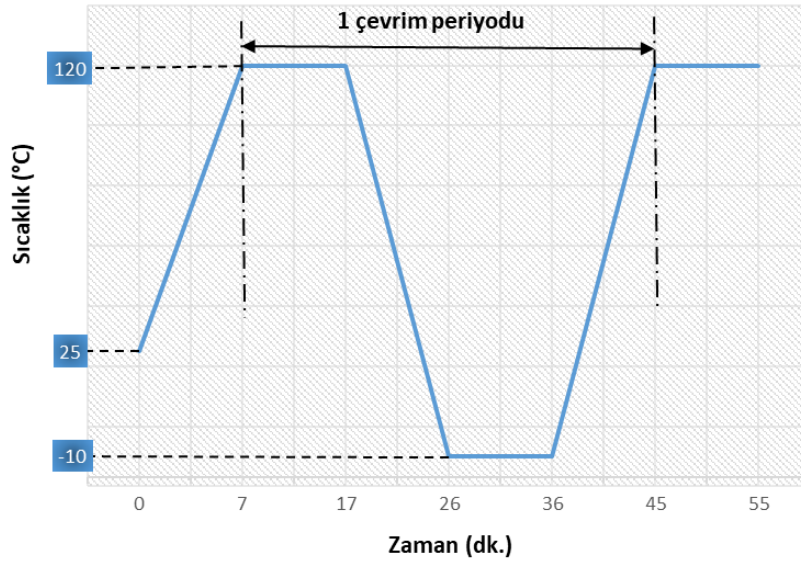
Başlangıçta, üç farklı grup numune 25 °C'den 100 °C'ye, 25 °C'den 80 °C'ye ve 25 °C'den 120 °C'ye ısıtıcıli manyetik karıştırıcı kullanılarak Renolin Therm 320 [87] ısı transfer yağı ile doldurulmuş 5000 ml borosilikat cam laboratuvar beherler içerisinde ısıtıldı. İstenilen sıcaklıklara erişildikten sonra numuneler bu sıcaklıklarda 10 dakika tutuldu. Hemen ardından, numuneler -10 °C'deki kuru buzlu ısı transfer yağı içerisine daldırıldı ve burada 10 dakika boyunca bekletildi. Numunelerin sıcaklığı -10 °C'ye düştükten sonra, tekrar hedeflenen sıcaklıklara ulaşmak için ısıtıcıli manyetik karıştırıcı üzerindeki beherler içerisine konulmuştur. Böylece bir termal çevrim süreci tamamlanmıştır. Termal çevrimin -10 °C'den 80 °C'ye uygulandığı deneysel düzenekte tek bindirmeli yapıştırılmış kompozit numuneler, 80 °C'de 10 dakika bekletilmiş hemen ardından -10 °C'deki kuru buzlu ısı transfer yağı içerisinde daldırılmış ve sıcaklıkları -10 dereceye düştükten sonra 10 dakika bu ortamda bekletilmişlerdir. Numunelerin sıcaklıklarının 80 °C'den -10 °C'ye düşmesi için 5 dakika süre gerekmiş ve aynı şekilde sıcaklıkların -10 °C'den 80 °C'ye çıkması için de 5 dakika süre gerekmiştir. Böylece maksimum sıcaklığın 80 °C olarak uygulandığı termal çevrim prosesi için 1 termal çevrim 30 dakika sürmüştür. Maksimum sıcaklığın 100 °C olarak uygulandığı deney düzenegi için 1 termal çevrim 35 dakika ve maksimum sıcaklığın 120 °C olduğu deney düzeneginde ise 38 dakika sürmüştür. Maksimum termal sıcaklıklara bağlı olarak 1 termal çevrim süresi ayrıntılı olarak Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

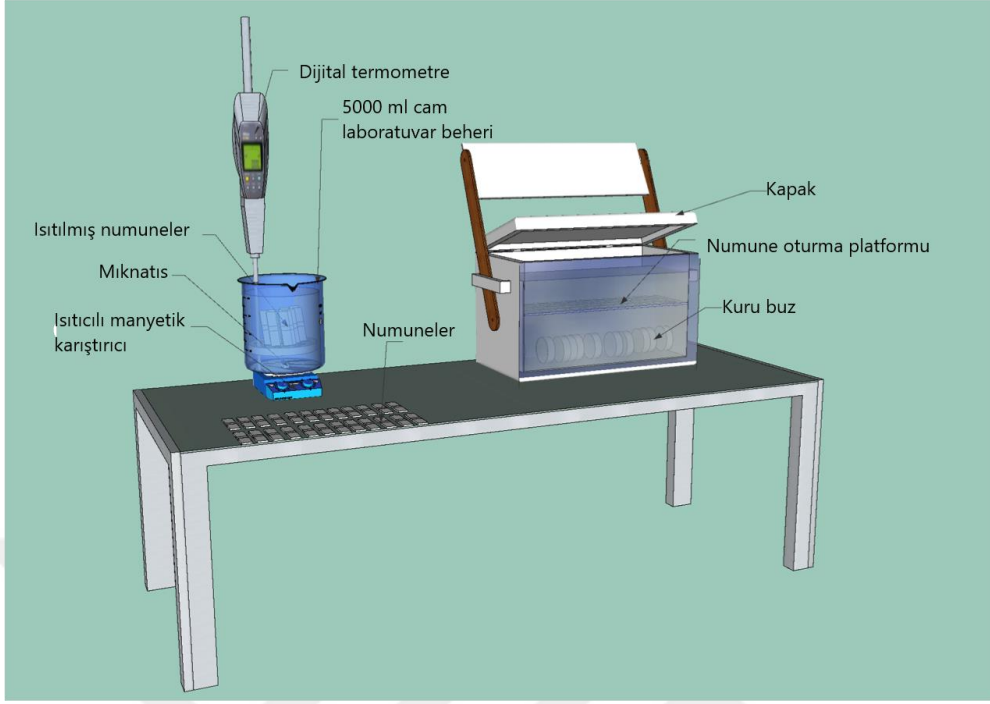
Şekil 3. 13 : Çeşitli sıcaklık aralıklı termal çevrim için Sıcaklık – Zaman grafikleri:
 (a) -10 – 80 °C, (b) -10 – 100 °C ve (c) -10 – 120 °C.

Bu termal döngü işlemi, farklı örnek grupları için 1, 10, 20, 30, 40 ve 50 kez tekrarlandı. Örnekler üzerine termal yorulma işlemini en doğru şekilde uygulayabilmek için, termal döngü işlemi kesintisiz olarak gerçekleştirildi. Termal çevrim prosesinde kullanılan Renolin Therm 320 ısı transfer yağının özellikleri Tablo 3.4'te sunulmuştur.

Tablo 3. 4 : Renolin Therm 320 ısı transfer yağı spesifik özellikleri [87].

Test	Birim	Değer	Test Metodu
Kinematik viskozite (40 °C)	mm ² /s	43,7	DIN EN ISO 3104 [88]
Kinematik viskozite (100 °C)	mm ² /s	6,5	DIN EN ISO 3104 [88]
Özkütle (15 °C)	kg/m ³	870	DIN 51757 [89]
Renk	-	max.2	ASTM D 1500-12 [90]
Kaynama noktası	°C	min.225	DIN EN ISO 2592 [91]
Akma noktası	°C	max.-12	DIN ISO 3016 [92]
Maksimum servis sıcaklığı	°C	300	-
Özgül ısı	cal/g°C	11040	-

Şekil 3.14'te deney düzeneği detaylı olarak gösterilmiştir. Termal çevrimdeki en yüksek sıcaklık, ısıtıcı manyetik karıştırıcı üzerinde bulunan ısı transfer yağının ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Termal çevrim ortamlarının sıcaklıkları, ısıtılmış manyetik karıştırıcıya bağlı termometreler ve harici termometreler tarafından sürekli kontrol edilmiştir. Numuneler, maksimum sıcaklıkta termal çevrim uygulanması esnasında ısıtılmış ısı transfer yağı ile doldurulmuş 5000 ml'lik borosilikat laboratuvar cam beherde tutulmuştur, daha sonra numuneler, kapağı kapalı soğutma sisteminde -10 °C'de saklanmıştır. Özel olarak temin edilmiş soğutma sisteminin kapağı sadece örnekleri ısıtılmış manyetik karıştırıcıdan aktarıırken açılmıştır. Soğutma sisteminin kapalı kullanımının en önemli nedeni, laboratuvar ortamındaki ısı değişimini en aza indirmek ve numunelerin sıcaklığını -10 °C'de stabil bir biçimde tutmaktır. Kompozit levhanın üretilmesinden termal olarak çevrim uygulanmış numunelerin elde edilmesine kadar olan tüm işlemler, Şekil 3.15'te ayrıntılı olarak adım adım gösterilmiştir.



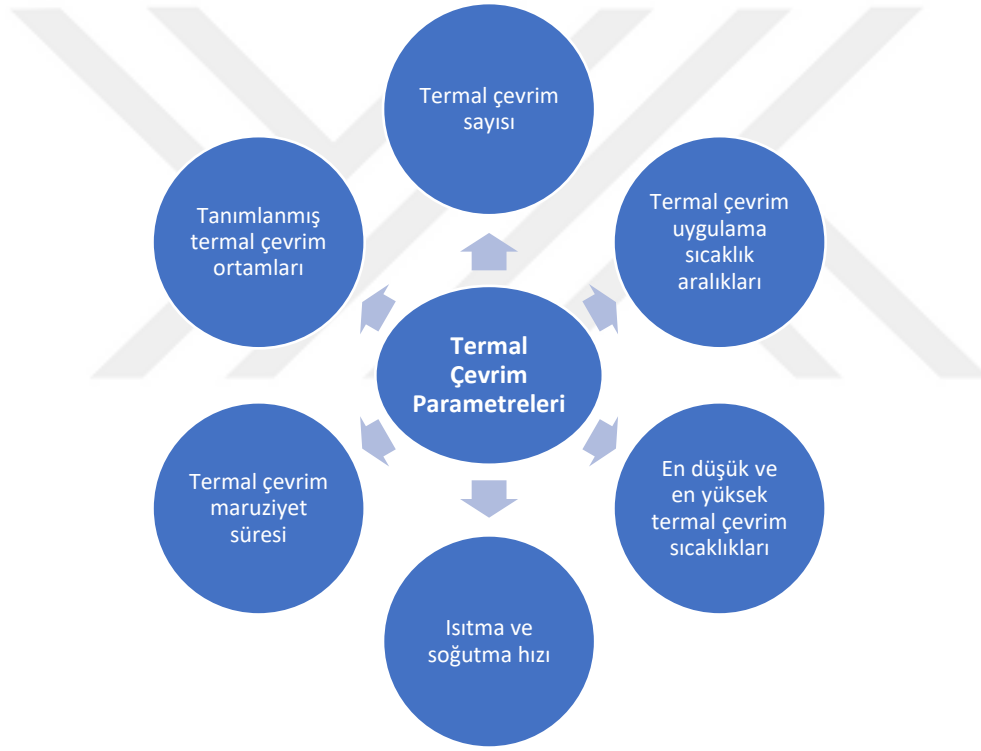
Şekil 3. 14 : Termal çevrim deneyi şematik gösterimi.



Şekil 3. 15 : Detaylandırılmış deneysel prosedür

3.5.2 Deneysel parametrelerin belirlenmesi

Termal çevrim etkisine karşı kompozit malzemelerin direnci genellikle geometrik, malzeme ve termal çevrim parametreleri olarak kategorize edilen çeşitli parametrelerden etkilenir. Bu çalışma, özellikle termal çevrim parametrelerine odaklandığından, termal döngü parametrelerinden deneysel tasarım değişkenleri seçilmiştir. Termal çevrim parametreleri alt kategorilere şu şekilde ayrılabilir: Termal çevrim sayısı, termal çevrim sıcaklık aralıkları, en yüksek ve en düşük sıcaklıklar, ısıtma ve soğutma hızı, termal döngüye maruz kalma süresi ve tanımlanan termal çevrim ortamları (Şekil 3.16).



Şekil 3. 16 : Etkili termal çevrim parametrelerinin şematik gösterimi

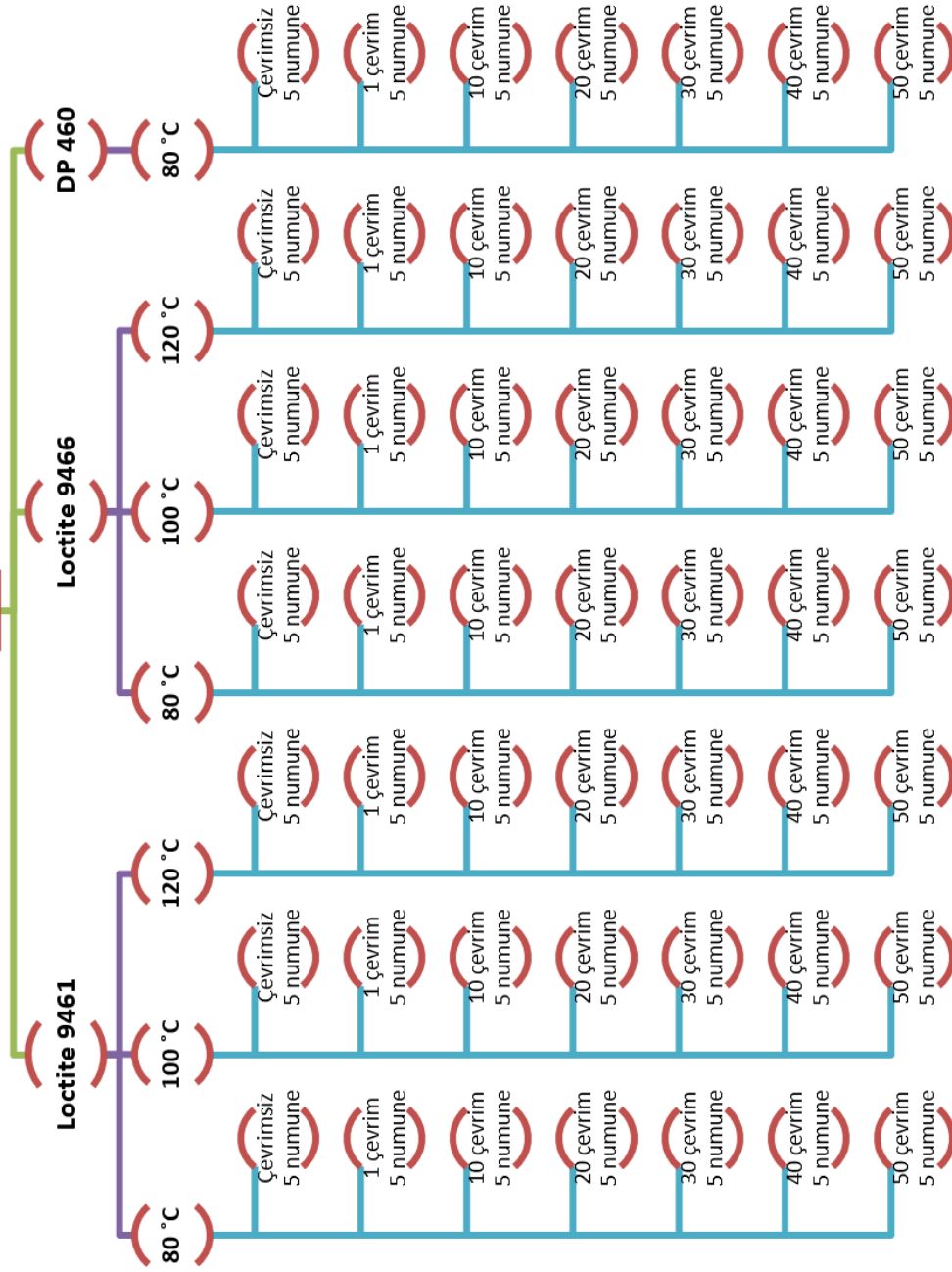
Termal çevrim parametreleri göz önünde bulundurularak, bu çalışmanın deneysel tasarımı şu parametreler seçilerek yapılmıştır: Termal çevrim parametreleri olarak termal çevrim sayısı ve termal döngü sıcaklığı seçilmiş ve malzemeye bağlı olarak da üç çeşit yapıştırıcı malzeme parametresi olarak seçilmiştir (Tablo 3.5). Tek bindirmeli çekme testlerinden güvenilir sonuçlar elde etmek için, çevrim/yapıştırıcı durumu

başına beş örnek kullanılmıştır. Deneysel parametrelerin detaylı kategorizasyonu Şekil 3.17'de sunulmuştur.

Tablo 3. 5 : Deneysel parametre değişkenleri.

Termal çevrim sayısı	0, 1, 10, 20, 30, 40, 50
Maksimum sıcaklık [°C]	80 (DP 460 için) 120 (Loctite 9461 ve 9466 için)
Minimum sıcaklık [°C]	-10
Termal çevrim sıcaklık aralıkları [°C]	-10'dan 80 °C'ye (Loctite 9461-9466 ve DP 460 için) -10'dan 100 °C'ye (Loctite yapıştırıcıları için) -10'dan 120 °C'ye (Loctite yapıştırıcıları için)
1 termal çevrim için geçmesi gereken süre (dk)	30 (-10'dan 80 °C'ye) 35 (-10'dan 100 °C'ye) 38 (-10'dan 120 °C'ye)
Yapıştırıcılar	Loctite 9466 Loctite 9461 DP 460

Termal Çevrim Deneysel Tasarım Parametreleri



Şekil 3. 17 : Termal çevrim deneysel tasarım parametreleri şematik gösterimi

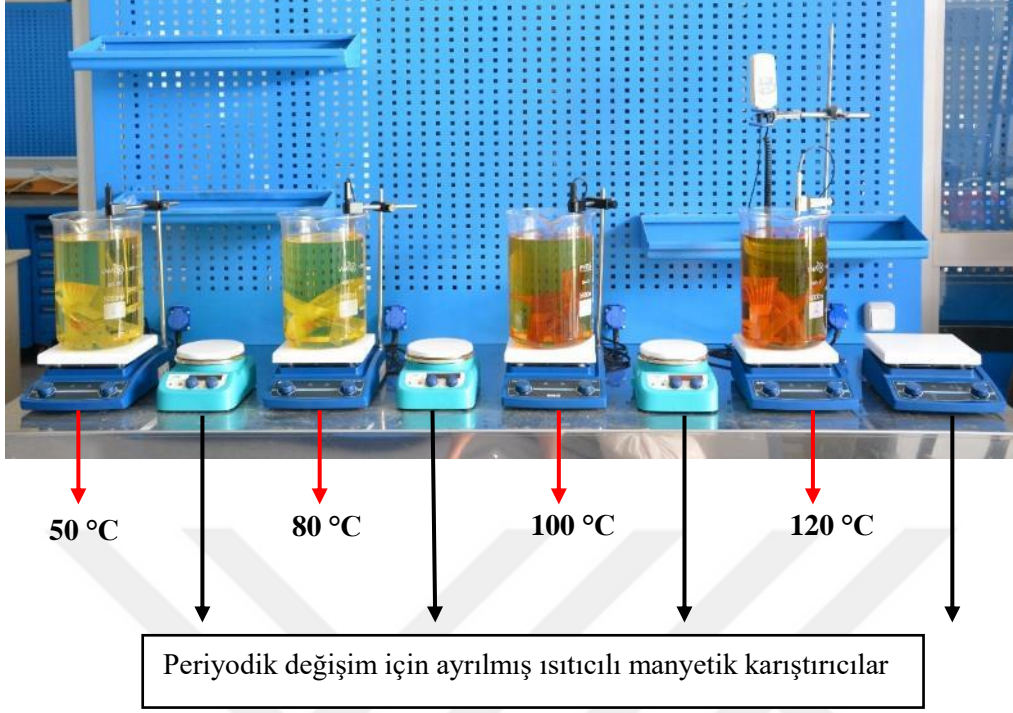
3.6 Termal-yağ Yaşlandırmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri Çalışmasının Deney Düzenegi ve Deneysel Parametreleri

3.6.1 Termal-yağ yaşlandırması deney düzeneginin hazırlanması

Hazırlanan numuneler, termal yaşlanma için ısı transfer yağı ile doldurulmuş 5000 ml borosilikat cam laboratuvar beherlerine konuldu. Sıvıyı istenen sıcaklıklara getirmek için ısıtıcıly manyetik karıştırıcılar kullanılmış ve herhangi bir sıcaklık değişimi olmaksızın belirli maruz kalma süreleri için bu sıcaklıklarda başarılı bir şekilde tutulmuştur. Deneyler boyunca on ısıtıcıly manyetik karıştırıcı kullanıldı ve her karıştırıcı en fazla üç gün boyunca çalıştırıldı, daha sonra yedek olanla değiştirildi.

Termal yaşlandırma işlemi, oda sıcaklığı değişimini en aza indirmek ve termal yaşlanma koşullarını etkileyebilecek komplikasyonları önlemek için hava dolaşımı olmayan izole bir odada gerçekleştirilmiştir.

Fuchs Renolin Therm 320, mükemmel termal stabilitesi, düşük kalıntı oluşumu, temiz kullanım sonrası uygulaması, iyi ısı transfer özellikleri, korozyona karşı koruma özelliği, uzun servis ömrü ve yüksek çalışma sıcaklığı aralığı nedeniyle ısı transfer yağı olarak seçilmiştir. Isı transfer yağı Renolin Therm 320 polimerizasyon ve damıtma sistemlerinde, ısı değiştiriciler ve ısı geri kazanım sistemlerinde kullanılmaktadır. Yüksek rafine mineral yağlara yakınlığı nedeniyle açık veya kapalı ısı transfer sistemlerinde de kullanılabilir. Üreticisi tarafından verilen bilgilere göre, yüksek oksidasyon stabilitesi, anti-korozif özellikleri ve aşınma önleyici korumaya sahiptir. İçerdiği antioksidanlar sayesinde iyi yaşlanma stabilitesi de vardır [87, 93]. Liu ve diğ. [56], yaşlanma sürecinde kullanılan baz yağların oksidatif stabilitesinden ötürü, malzemenin oksidasyon ve çapraz bağlanmadan korunduğunu belirtmiştir.



Şekil 3. 18 : Termal-yağ yaşlandırma deney düzeneği.

Numuneler istenen sıcaklıklara (50, 80, 100 ve 120 °C) ısıtılmış ve ısıtıcı manyetik karıştırıcılar kullanılarak bu sıcaklıklarda 168, 360, 720, 1080 ve 1440 saat bekletilmiştir (Şekil 3.18). Derin dondurucu ise -10 °C’de termal yaşlandırma uygulaması için kullanılmıştır. Detaylandırılmış deneysel prosedür Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3. 19 : Detaylandırılmış deneysel prosedür.

3.6.2 Deneysel parametrelerin belirlenmesi

Termal-yağ yaşlandırmanın çeşitli yapıştırıcılar ile tek bindirmeli yapıştırılmış kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkileri konulu çalışmanın parametrelerinde yapıştırıcı tipi ilk deneysel parametre olarak alındı. Loctite 9466, Loctite 9461 ve DP 460 isimli üç farklı yapıştırıcı kullanıldı. Bunlardan birincisi, Loctite 9466 (Henkel Sanayi (Dusseldorf, Almanya) tarafından sağlanan), sertleştirilmiş, uzun ömürlü, beyazımsı bir epoksi yapıştırıcıdır ve yüksek uyumluluğu sayesinde yapıştırılmış yüzeye yüksek kesme ve sıyırılma mukavemeti sağlar. Tam kütleme işleminden sonra, birçok kimyasal veya solvante karşı yüksek direnç ve aynı zamanda elektriksel yalıtım özelliği kazanır [81]. İkincisi, Loctite 9461 (Henkel Sanayi (Dusseldorf, Almanya) tarafından tedarik edilen), epoksi ve sertleştirici olarak iki bileşene ve tiksotropik özelliklere sahip olan bir epoksi yapıştırıcıdır. Bu yapıştırıcı, yüksek kesme ve sıyırılma mukavemetine sahiptir, yapıştırılacağı yüzeye kolayca tutunur ve sert yapısı metaller, mühendislik termoplastikleri ve farklı tipte laminatlar gibi farklı yüzeylerin yapıştırılmasında kullanışlıdır [80]. Üçüncüsü, DP 460 (3M Sanayi (Maplewood, Minnesota, ABD) tarafından sağlanan), yüksek kesme ve soyulma mukavemetine ve uzun servis ömrüne sahip, sünek [94], beyaz, yüksek performanslı ve epoksi bir yapıştırıcıdır [82]. Araldite 1564 epoksi/Aradur 3487 sertleştiricisinin oluşturduğu matris çok düşük viskoziteye sahiptir ve bununla birlikte endüstride ve araştırmalarda kompozit malzemeler için bir matris olarak kullanılır [95-97]. Bu nedenle, Araldite 1564 epoksi/Aradur 3487 sertleştiricisinin oluşturduğu matris, daha önce diğer çalışmalarımızda [26, 98] ve diğer araştırmacılar tarafından da kendi çalışmalarında [22, 94, 99, 100] kullanılan Loctite 9461, Loctite 9466 ve DP 460 yapıştırıcıları yerine yapıştırılmış kompozit-kompozit malzeme üretmek için bir yapıştırıcı olarak kullanılmamıştır. Bu yapıştırıcıların seçilmesinin arkasındaki sebep, polimerlerle iyi bir uyum sergiledikleri ve hem araştırma çalışmalarında hem de kompozit endüstrisinde yaygın olarak kullanılmalarıdır.

Termal yaşlandırma sıcaklığı ikinci deneysel parametre olarak alınmıştır. Yapıştırıcıların imalatçıları [82, 101] tarafından önerilen servis sıcaklıkları dikkate alınarak; DP 460 yapıştırıcısı ile yapıştırılmış numuneler için 10, 25, 50 ve 80 °C,

Loctite 9461 ve 9466 yapıştırıcıları ile yapıştırılmış numuneler için 10, 25, 50, 80, 100 ve 120 °C'lik termal yaşlandırma sıcaklıkları seçilmiştir.

Üçüncü deneysel parametre termal yaşlanma süresi olarak seçilmiştir. Jojobabu ve diğ. [102], karbon nano-dolgu maddesinin, higrotermal olarak yaşlandırılmış epoksi bazlı yapıştırıcı ile yapıştırılmış malzemelerin bozunumuna olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında termal yaşlanma süresi 12 hafta olarak seçilmiştir. Başka bir deneysel çalışmada [103], termal yaşlanmaya maruz kalan cam/epoksi kompozitlerin tekrarlanan darbe tepkisi araştırılmış ve maksimum termal yaşlanma maruziyet süresi 1300 saat olarak seçilmiştir. Tüm bu çalışmalar dikkate alındığında, bu çalışmadaki örnekler 24, 168, 360, 720, 1080 ve 1440 saat boyunca termal olarak yaşlandırılmıştır.

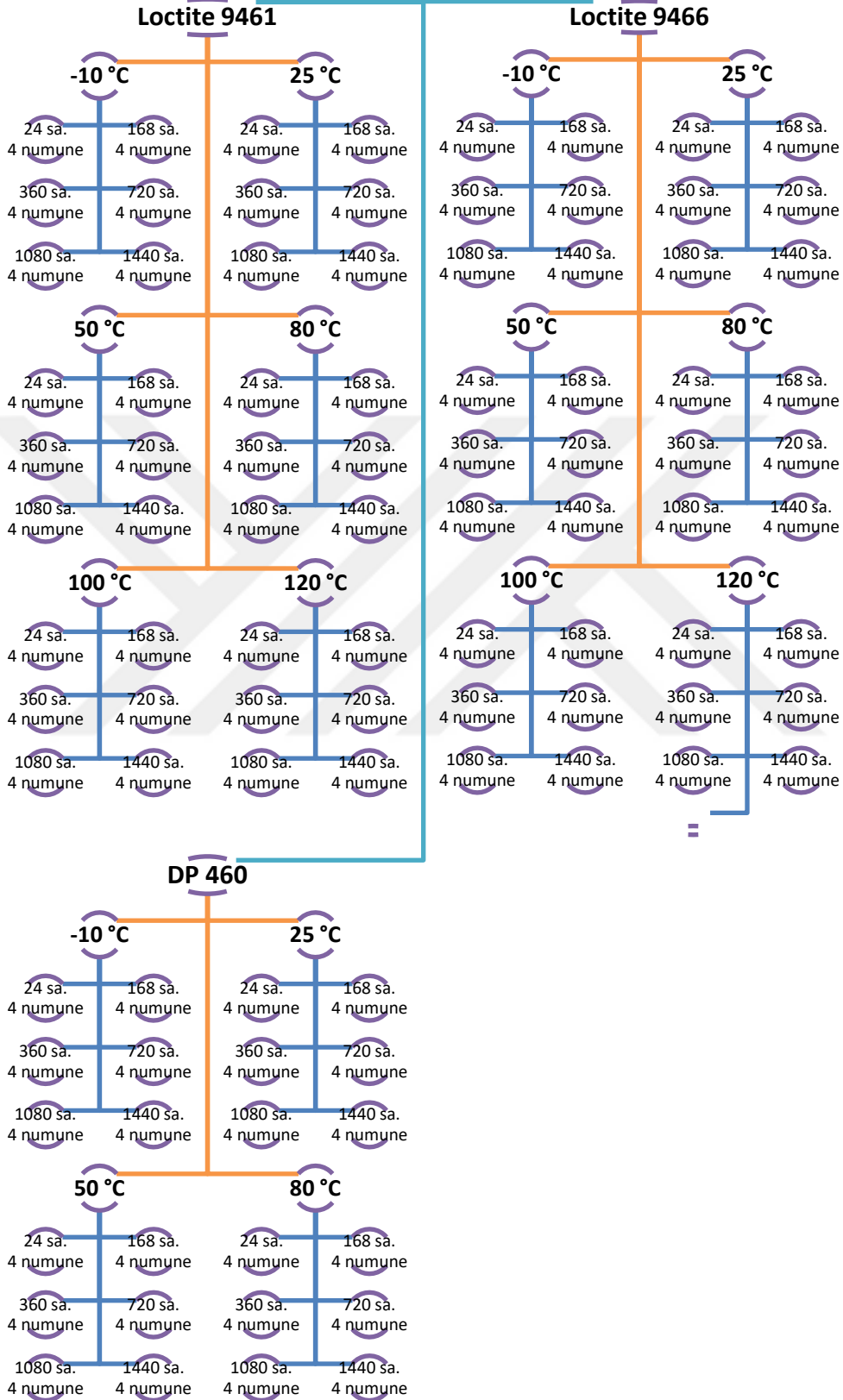
Polimer matris bazlı kompozit borular, üstün özellikleri nedeniyle içme suyu ve atık su, doğal gaz ve benzeri akışkanların yer altı ve yerüstü transferinde yaygın olarak kullanılmaktadır [19]. Bu transfer sırasında polimer matris kompozit borular, yüksek ve düşük sıcaklık, ani sıcaklık değişiklikleri ve nem gibi çevresel etkilere kullanım ömürleri boyunca maruz kalabilirler [20]. Bu çevresel etkiler altında, yapıştırılmış aksamalarının veya polimer kompozit boruların kendilerinin performansları önemli ölçüde etkilenebilir. Bu nedenle, farklı yapıştırıcılarla birleştirilmiş tek bindirmeli polimer matris kompozit numunelerin termal yaşlandırması için ısı transfer yağı Renolin Therm 320 kullanılmıştır. Bu yağ, özellikle 200-300 °C gibi daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesine rağmen, deneylerde uygulanabilecek en yüksek termal yaşlandırma sıcaklığını sınırlayan etken yapıştırıcıların servis çalışma sıcaklık aralığıdır.

Tablo 3. 6 : Deneysel parametre değişkenleri

Yapıştırıcılar	Loctite 9466 Loctite 9461 DP 460
Termal yaşlandırma sıcaklıkları [°C]	-10, 25, 50, 80, 100 ve 120
Termal yaşlandırma süreleri [saat]	168, 360, 720, 1080 ve 1440
Maksimum yaşlandırma sıcaklığı [°C]	80 (DP 460 için) 120 (Loctite 9461 ve 9466 için)
Minimum yaşlandırma sıcaklığı [°C]	-10 (tüm yapıştırıcılar için)
Çekmede kesme mukavemeti testleri için kullanılan numune sayısı	4

Kesme mukavemeti testlerinden güvenilir ve yorumlanabilir sonuçlar elde etmek için, her parametre için ASTM 5868-01'e göre dört örnek test edilmiştir. Bu 96 vaka için toplam 384 test yapar. Deney setleri için parametrik değerler Tablo 3.6'da, detaylı deneysel parametre kategorizasyonuna ait şematik gösterim Şekil 3.20'de verilmiştir.

Termal-yağ Yaşlandırma Deneysel Tasarım Parametreleri

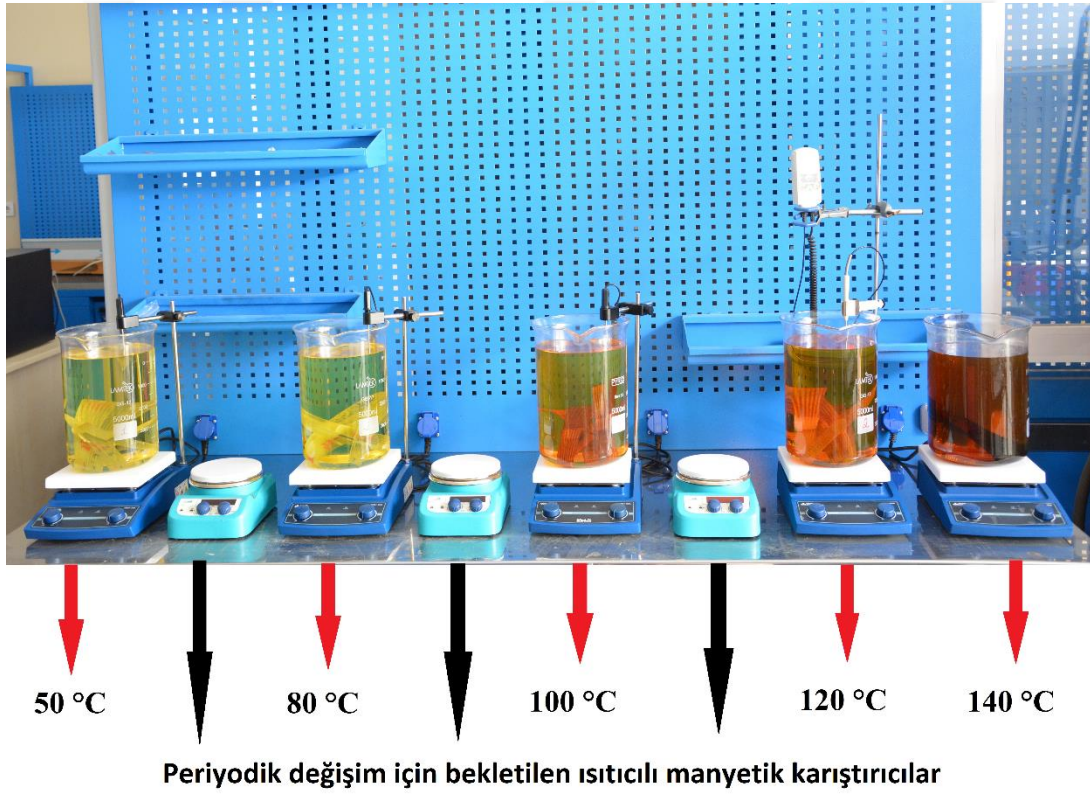


Şekil 3. 20 : Termal-yağ yaşlandırma deneysel tasarım parametreleri şematik gösterimi.

3.7 Termal-yağ Yaşlandırmanın Cam Elyaf/Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Özelliklerine Etkileri Çalışmasının Deney Düzenegi ve Deneysel Parametreleri

3.7.1 Termal-yağ yaşlandırması deney düzeneginin hazırlanması

Gruplandırılan numuneler, termal yaşlandırma için ısı transfer yağı (Renolin therm 320) ile doldurulmuş 5000 ml borosilikat cam laboratuvar beherlerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.21). Isı transfer yağı istenen yaşlandırma sıcaklıklarına (50, 80, 100, 120 ve 140 °C) getirmek için ısıtıcılı manyetik karıştırıcılar kullanılmıştır.



Şekil 3. 21 : Termal-yağ yaşlandırma deney düzenegi.

Numuneler, deney sırasında belirlenen sıcaklıklarda ve belirtilen periyotlarda herhangi bir değişiklik olmaksızın beherlerde başarılı bir şekilde tutulmuştur. Deney sırasında herhangi bir elektronik problem ile karşılaşmamak için, kullanımda olan manyetik karıştırıcılar her 3 günde bir yedek manyetik karıştırıcılar ile değiştirilmiştir; 3 gün,

manyetik bir karıştırıcının tek bir işlemde aralıksız olarak kullanılabilmesi en uzun süredir. Detaylandırılmış deneysel prosedür Şekil 3.22’de verilmiştir.



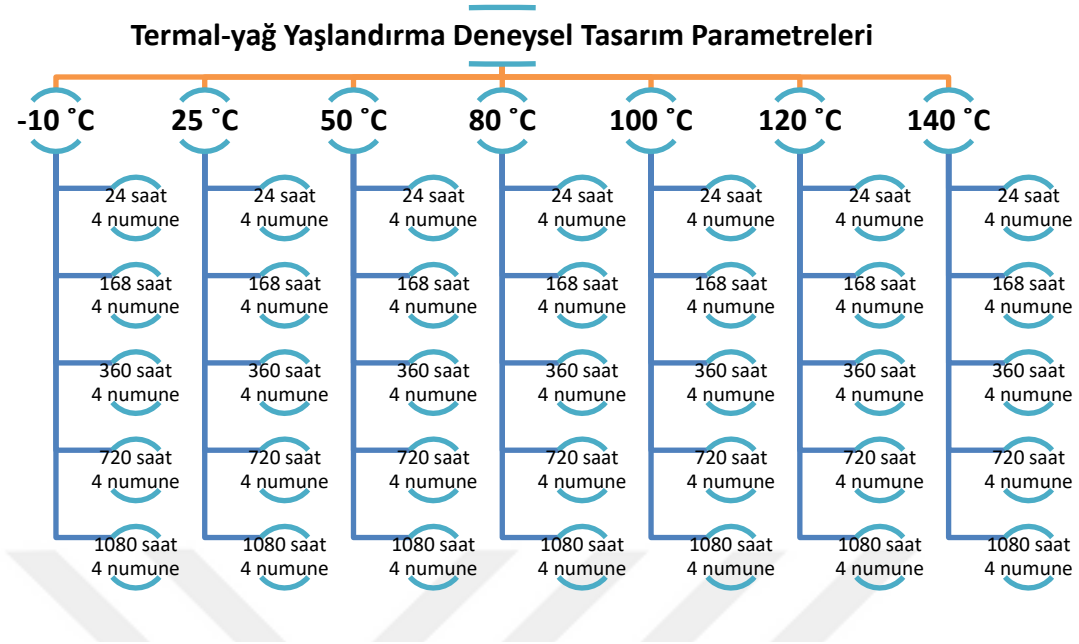
Şekil 3. 22 : Termal-yağ yaşlandırma deney düzeneği.

3.7.2 Deneysel parametrelerin belirlenmesi

Deneysel termal-yağ yaşlandırma sıcaklığı değerleri -10, 25, 50, 80, 100, 120 ve 140 °C olarak belirlenmiştir. Kompozit numuneler, ısıtıcıli manyetik karıştırıcılar vasıtasıyla 50, 80, 100, 120 ve 140 °C sıcaklıklarına ısıtılmıştır. -10 °C'de yaşlandırma için derin dondurucu kullanılmış ve deney sıcaklıkları için düzenli, sürekli, kesintisiz ve sağlıklı şartlar elde etmek amacıyla 50, 80, 100, 120 ve 140 °C sıcaklıkları için ısıtıcıli manyetik karıştırıcılar kullanılmıştır. 25 °C'de tutulacak numuneler oda koşullarında oda sıcaklığında tutulmuştur. Deneysel termal-yağ yaşlandırma maruz kalma süreleri de 24, 168, 360, 720 ve 1080 saat olarak belirlenmiştir. Örneklerin belirlenen yaşlanma sıcaklıklarında, belirlenen yaşlanma süreleri boyunca kalmasına izin verilmiş ve daha sonra karakterizasyon testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel parametre değişkenleri Tablo 3.7'de ve deneysel tasarım parametrelerinin şematik gösterimi de Şekil 3.23'te verilmiştir.

Tablo 3. 7 : Deneysel parametre değişkenleri

Malzeme	Cam elyaf/epoksi kompozit
Termal yaşlandırma sıcaklıkları [°C]	-10, 25, 50, 80, 100, 120 ve 140
Termal yaşlandırma süreleri [saat]	24, 168, 360, 720 ve 1080
Maksimum yaşlandırma sıcaklığı [°C]	140
Minimum yaşlandırma sıcaklığı [°C]	-10
Çekmede kesme mukavemeti testleri için kullanılan numune sayısı	4



Şekil 3. 23 : Termal-yağ yaşlandırma deneysel tasarım parametreleri şematik gösterimi.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

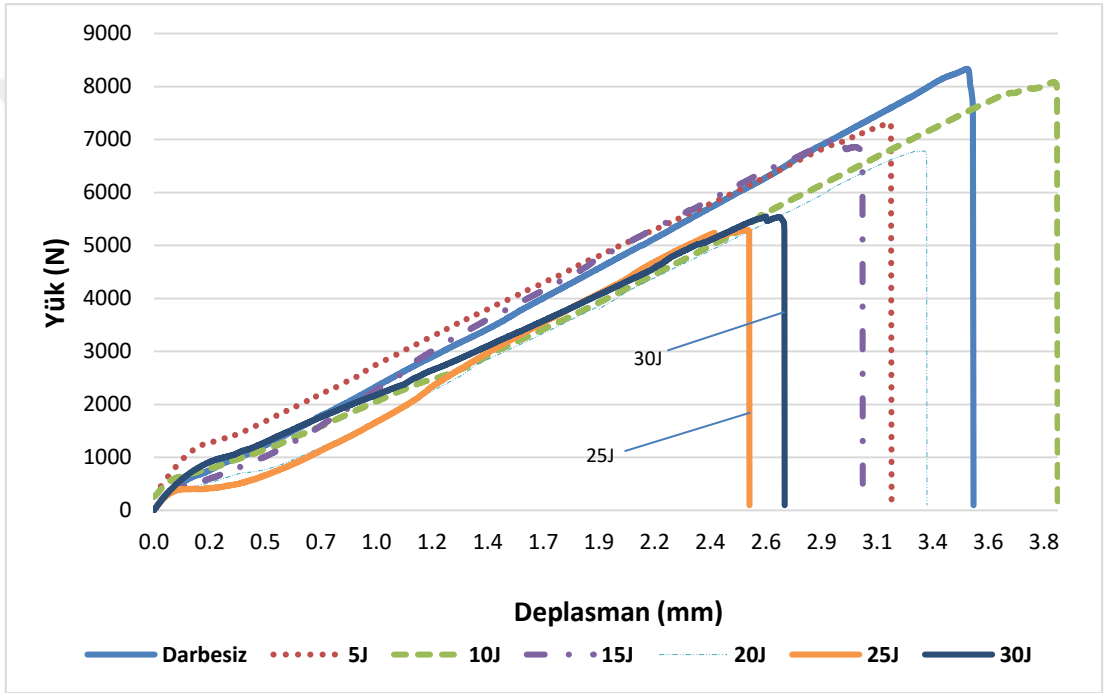
4.1 Düşük Hızlı Darbe ve Termal Yaşlandırmanın Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri

-18, 25 ve 70 °C'de 168 saat yaşlandırılmaya maruz kalmış numunelerin çekme testleri; oda sıcaklığı (25 °C), -18 ve 70 °C'de olmak üzere üç farklı sıcaklık seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sırasında sıcaklığın sabit kalmasını sağlayan aparat Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Buna ek olarak, tek bindirmeli olarak yapıştırılan kompozit numunelere altı farklı enerji seviyesinde (5, 10, 15, 20, 25 ve 30 J) düşük hızlı darbe testi uygulanmıştır ve uygulanan darbenin ayrılma mukavemeti üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

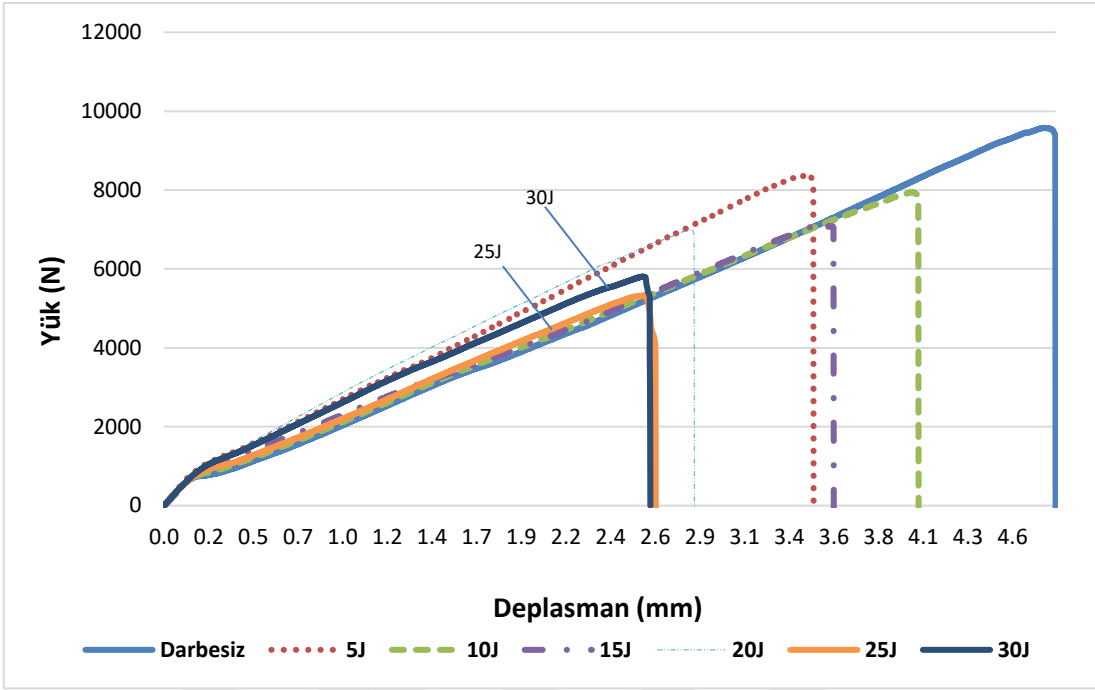


Şekil 4. 1 : Çekme testi esnasında numunelerin sıcaklığını ayarlama aparatı.

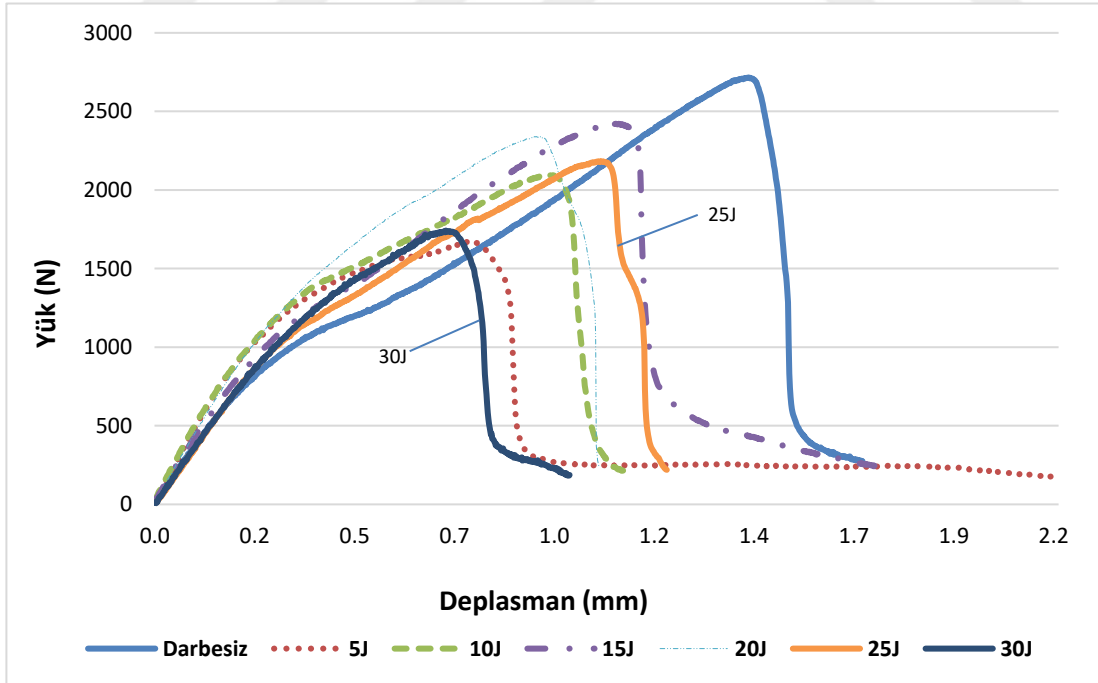
-18 °C'de termal yaşlandırmaya maruz kalan numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.2'de, -18 °C sıcaklıkta çekme deneyleri gerçekleştirilmiş ve maksimum yük taşıma kapasitesi hiç darbe uygulanmamış numunenin eğrisinde gözlenmiştir. Ayrıca, tüm eğrilerin eğimlerinin birbirine oldukça yakın olduğu ve uygulanan darbelerin elastikiyet modülü üzerinde hiçbir etkisi olmadığı da görülebilir. Düşük hızlı darbe tüm enerji seviyelerinde, yapıştırılmış kompozit numunelerin yük taşıma kapasitelerini azaltmıştır.



Şekil 4. 2 : -18 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, -18 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.



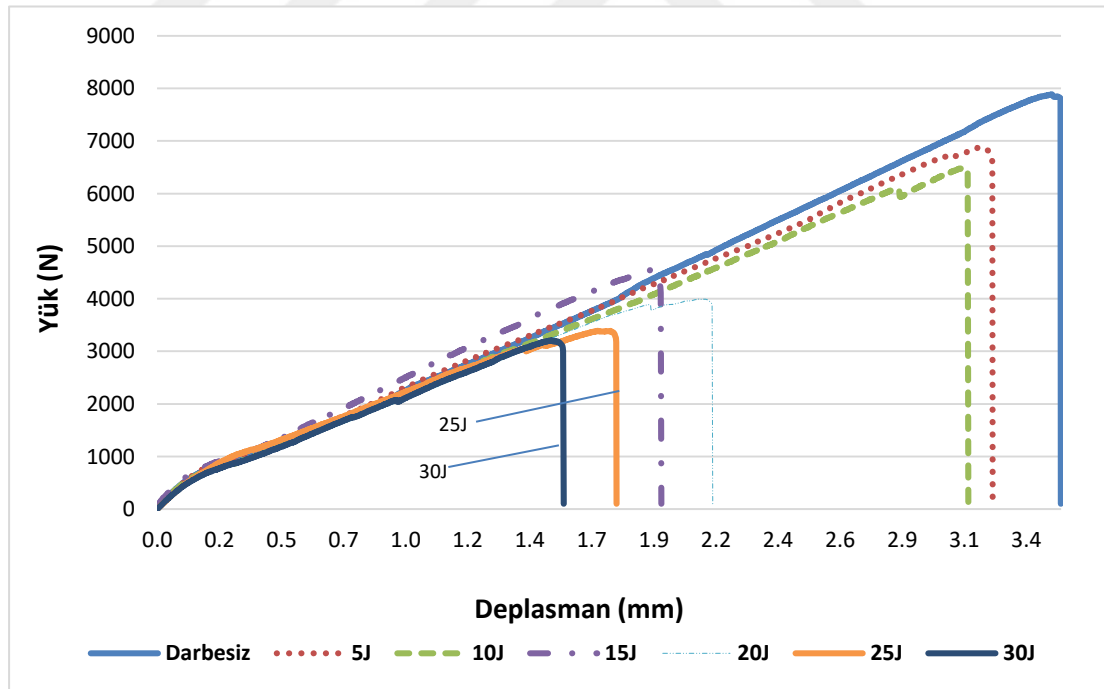
Şekil 4. 3 : -18 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 25 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.



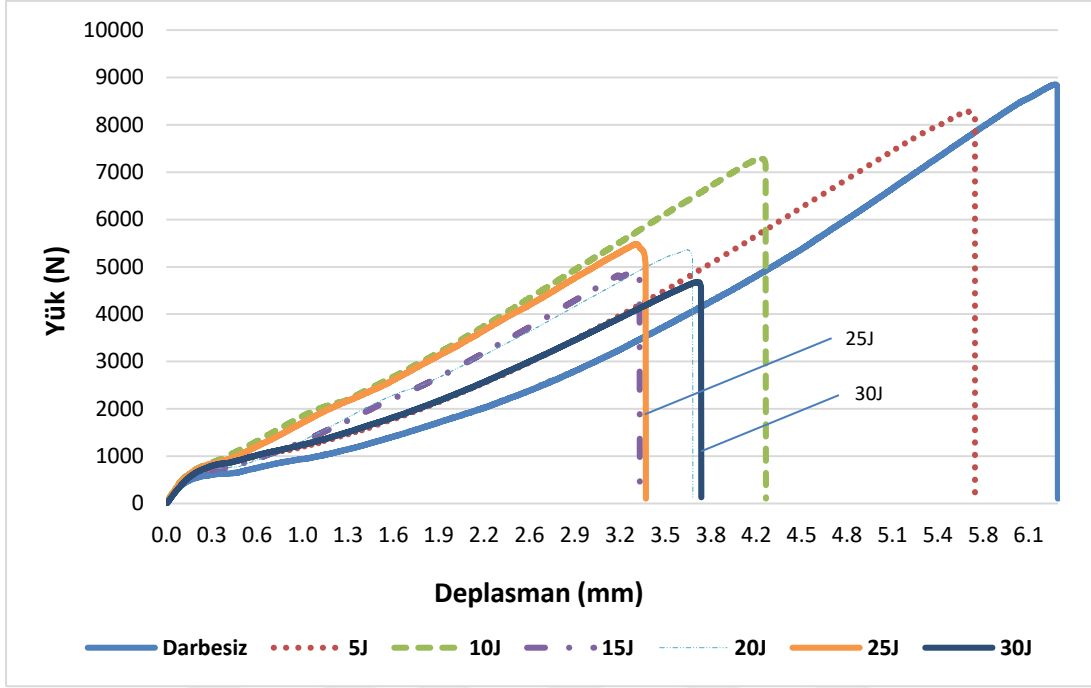
Şekil 4. 4 : -18 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 70 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

-18 °C'de termal yaşlandırmaya maruz kalan ve oda sıcaklığında test edilen numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.3'te verilmektedir. Maksimum yük taşıma kapasitesi ve maksimum uzama, herhangi bir darbe etkisine maruz kalmayan numunelerin eğrisinde gözlenmiştir. Şekil 4.3, darbe enerji seviyesi arttıkça, numunelerin yük taşıma kapasitesinin -18 °C'de test edilenlere göre azaldığını göstermektedir. Çarpmaya maruz kalan numuneler arasında, maksimum uzamaya sahip olan, 10 J ile darbe uygulanmış numunelerdir. Eğrilerin eğimleri karşılaştırıldığında, 5 ve 20 J ile darbe uygulanmış numuneler diğer numunelerden daha yüksek bir eğime sahiptir.

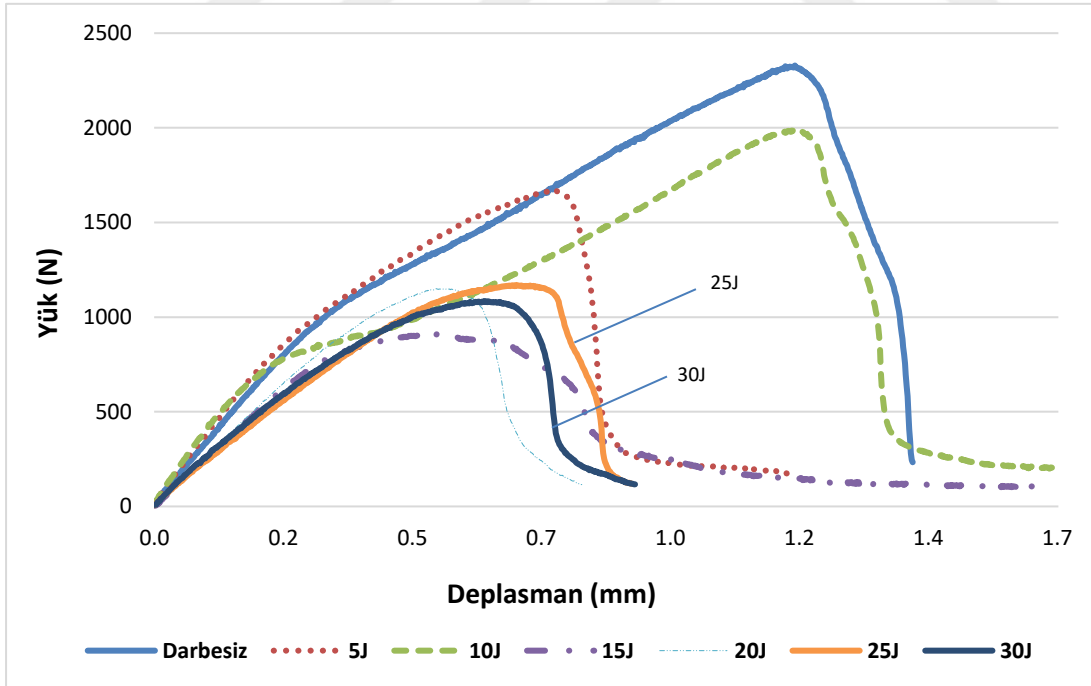
Şekil 4.4'te, çekme testleri 70 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiş ve maksimum yük taşıma kapasitesi darbesiz numunenin eğrisinde gözlenmiştir. Tüm değerler dikkate alındığında, -18 °C'de termal yaşlandırmaya tabi tutulan numuneler arasında, en düşük yük taşıma kapasitesi 70 °C'de test edilen numunelerde gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 5 : 25 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, -18 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.



Şekil 4. 6 : 25 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 25 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

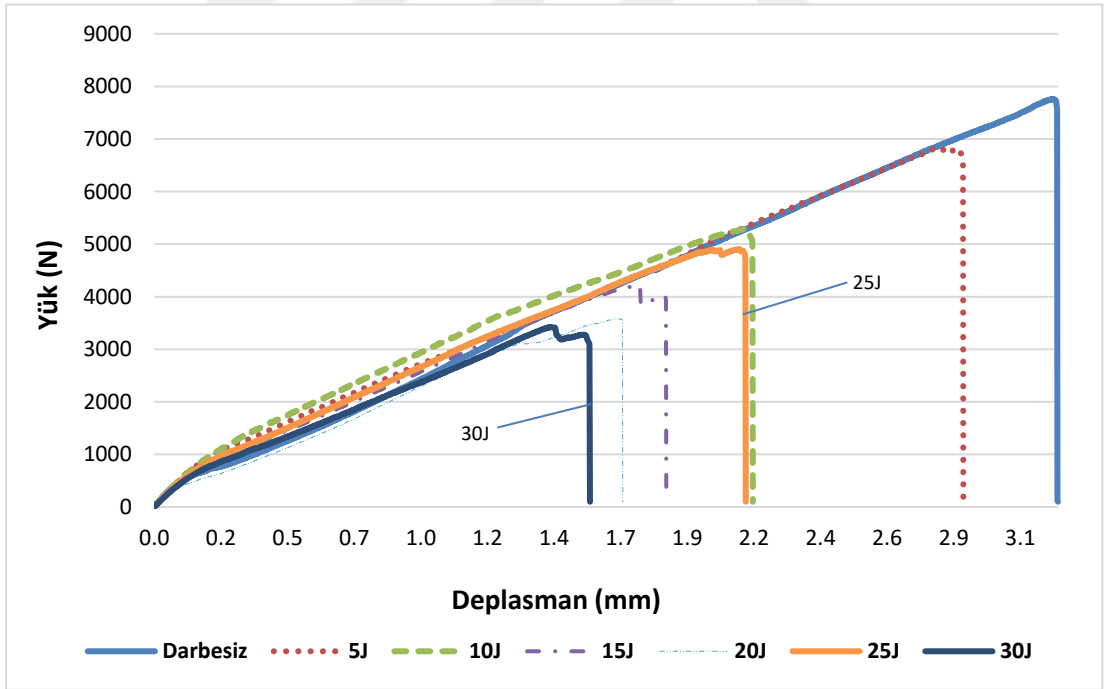


Şekil 4. 7 : 25 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 70 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

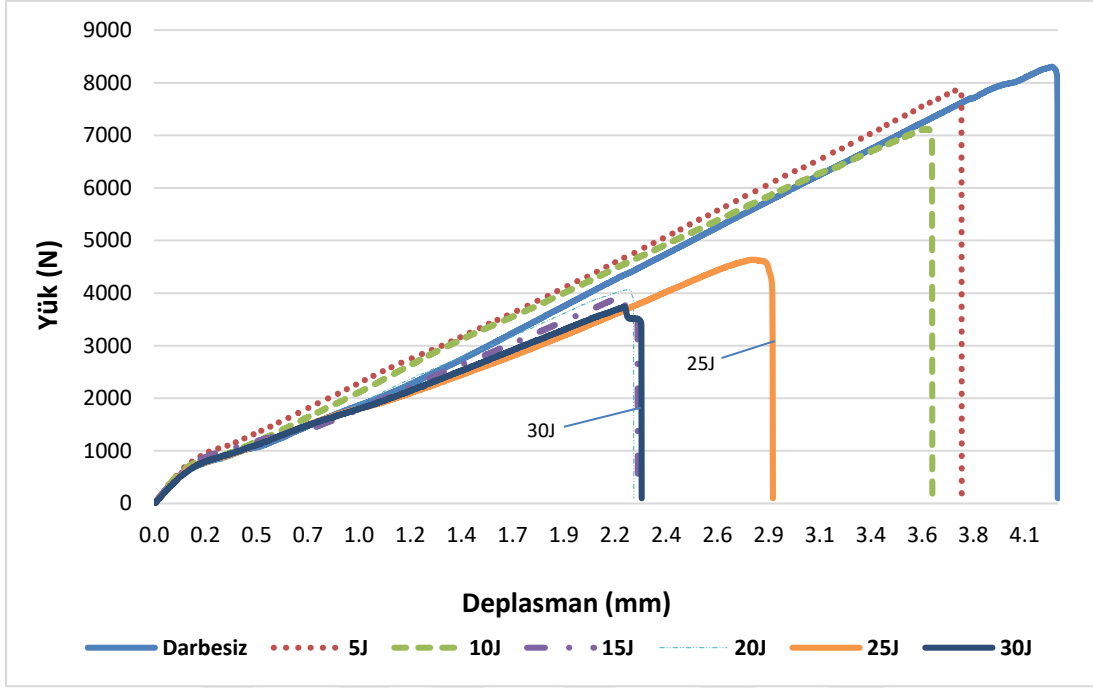
Termal yaşlandırma işlemine 25 °C'de maruz kalan tek bindirmeli yapıştırılmış kompozit numunelerin yük-deplasman eğrileri Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.5'te -18 °C'de çekme testine tabi tutulan örneklerin eğrileri verilmiştir. Maksimum yük taşıma kapasitesi ve maksimum uzama, darbe uygulanmamış numunelerin eğrisinde görülmektedir. Farklı darbe enerji seviyelerinin etkileri, yük-deplasman grafiğindeki eğrilerin eğimlerini değiştirmezken, darbe enerjisi seviyelerindeki artış, yük taşıma kapasitesini ve deplasmanı azaltmıştır.

Şekil 4.6'da, 25 °C'de test edilen farklı darbe enerji seviyelerine tabi tutulan numunelerin eğrileri sunulmaktadır. Yine, darbe uygulanmamış numunelerin eğrisi maksimum yük taşıma kapasitesine ve maksimum uzamaya işaret etmektedir.

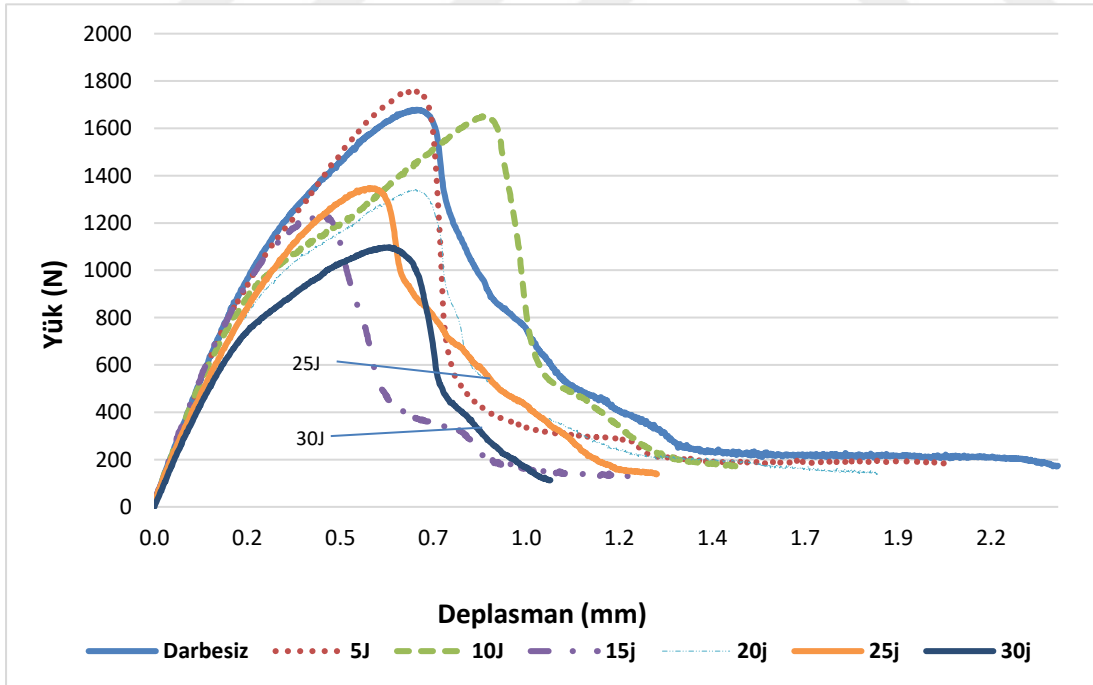
70 °C'de test edilen numunelerin yük taşıma kapasiteleri, diğer test koşullarına kıyasla azalmıştır (Şekil 4.7).



Şekil 4. 8 : 70 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, -18 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

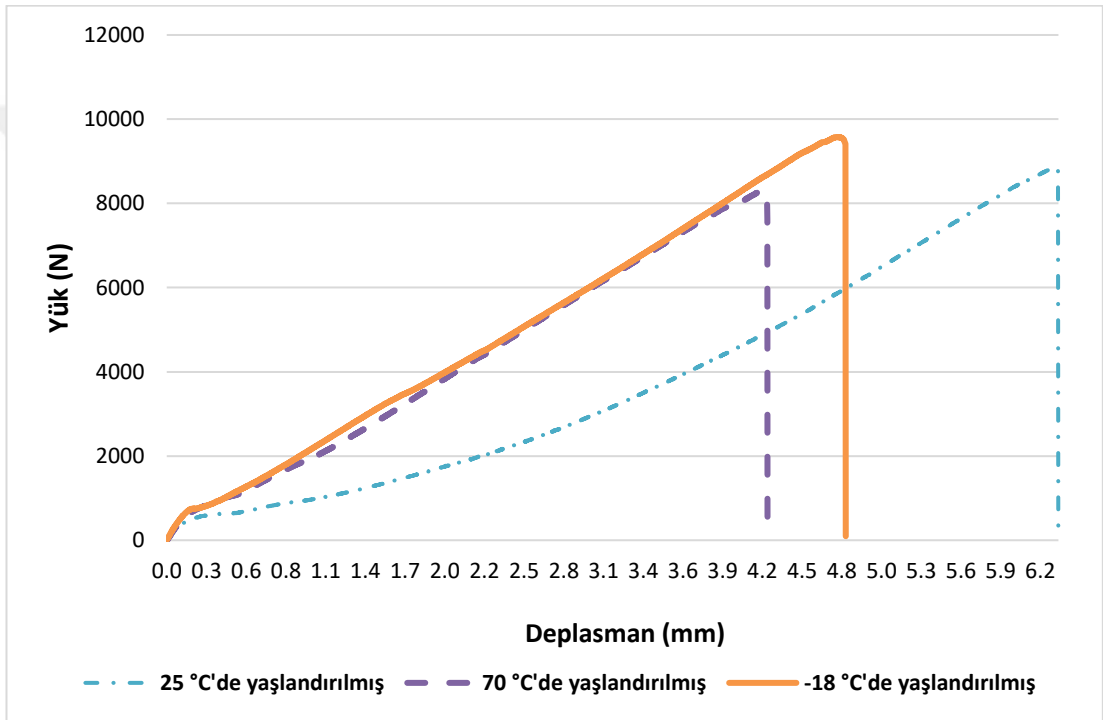


Şekil 4. 9 : 70 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 25 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.



Şekil 4. 10 : 70 °C'de yaşlandırılmış, farklı darbe enerji seviyelerine maruz kalmış, 70 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

70 °C'de termal yaşlanmaya maruz kalan ve farklı sıcaklıklarda test edilen tek bindirmeli yapıştırılmış kompozit numunelerin yük-deplasman eğrileri, Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da sunulmuştur. -18, 25 ve 70 °C'de çekme testlerine tabi tutulan örneklerin önceki eğrilerine benzer şekilde, maksimum yük taşıma kapasitesi ve maksimum uzama darbe uygulanmamış numunelere aittir. Aynı zamanda -18 °C ve 25 °C'de test edilen örneklerin elastisite modüllerinin farklı darbe enerji seviyeleri etkisi ile değişmediği de sonuçlardan biridir. Beklendiği gibi, 70 °C'de çekme testi yapıldığında, numunelerin yük taşıma kapasitesi azalmıştır.



Şekil 4. 11 : Farklı sıcaklıklarda yaşlandırılmış, darbe uygulanmamış, 25 °C'de test edilmiş numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

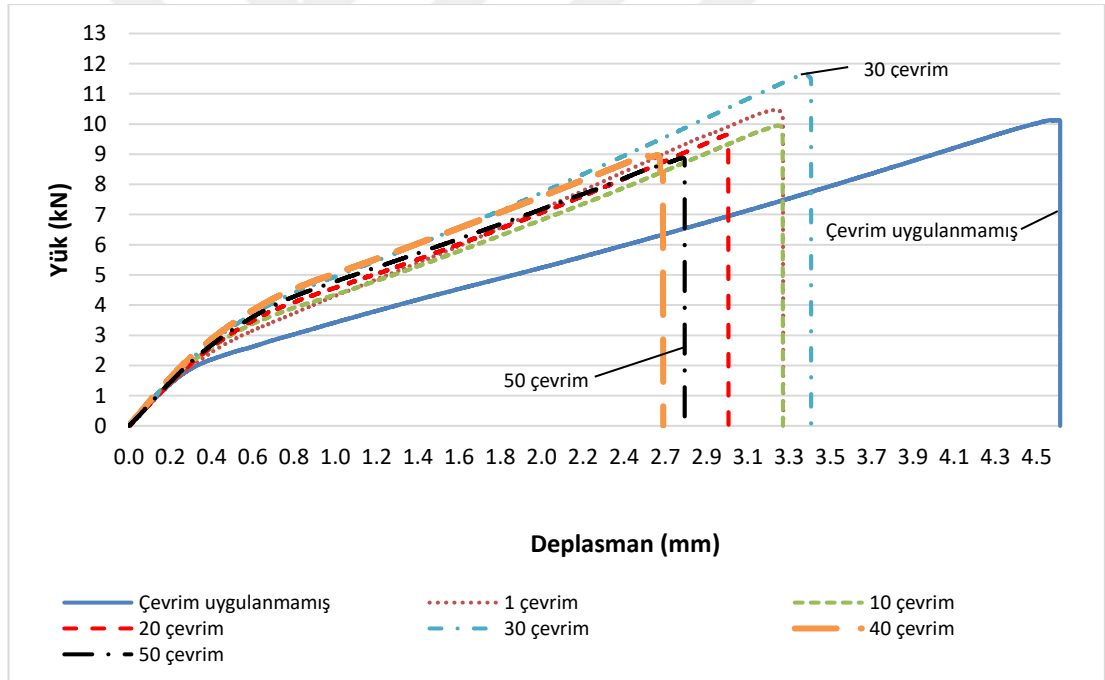
Tüm şekiller göz önüne alındığında, -18 °C'deki termal yaşlandırmanın, tek bindirmeli olarak yapıştırılmış kompozit numunelerin yük taşıma kapasiteleri üzerinde pozitif bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Nitekim -18 °C'de termal yaşlanmaya maruz kalan örneklerin yük taşıma kapasiteleri, 70 ve 25 °C'de termal yaşlanmaya maruz bırakılanlardan daha yüksektir (Şekil 4.11)

Farklı enerji düzeyinde uygulanmış düşük hızlı darbeler, numunelerin yük taşıma kapasitelerini arttırmamıştır. Artan darbe enerji seviyelerinin bir sonucu olarak, yük taşıma kapasitelerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma, şu nedenden kaynaklanabilir: Daha yüksek darbe enerjisi, yapışkan tabakanın darbe kırılma alanını azaltır ve daha büyük bir darbe krateri oluşturur. Oluşan daha derin ve belirgin krater, numunelerin mekanik özelliklerine negatif etkide bulunur.

Sayman ve diğ. [22] mevcut bulgularımızla uyumlu sonuçlar sunmuşlardır. Çekme testi sıcaklıkları birbiriyle kıyaslandığında, en yüksek kopma ve uzama değeri oda sıcaklığında test edilen örneklerde meydana gelmiştir. Diğer taraftan, en düşük değerler 70 °C'de test edilen numunelerde meydana gelmiştir. Yapıştırıcının yapışma yeteneğinde meydana gelen olumsuz etkiler, numunelerin başarısızlık yüklerinin -18 ve 70 °C'de yapılan çekme deneyleri esnasında azalmasına sebep olmuştur. Benzer sonuçlar Osanai ve diğ. [61] tarafından da bulunmuştur.

4.2 Termal Yorulmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri

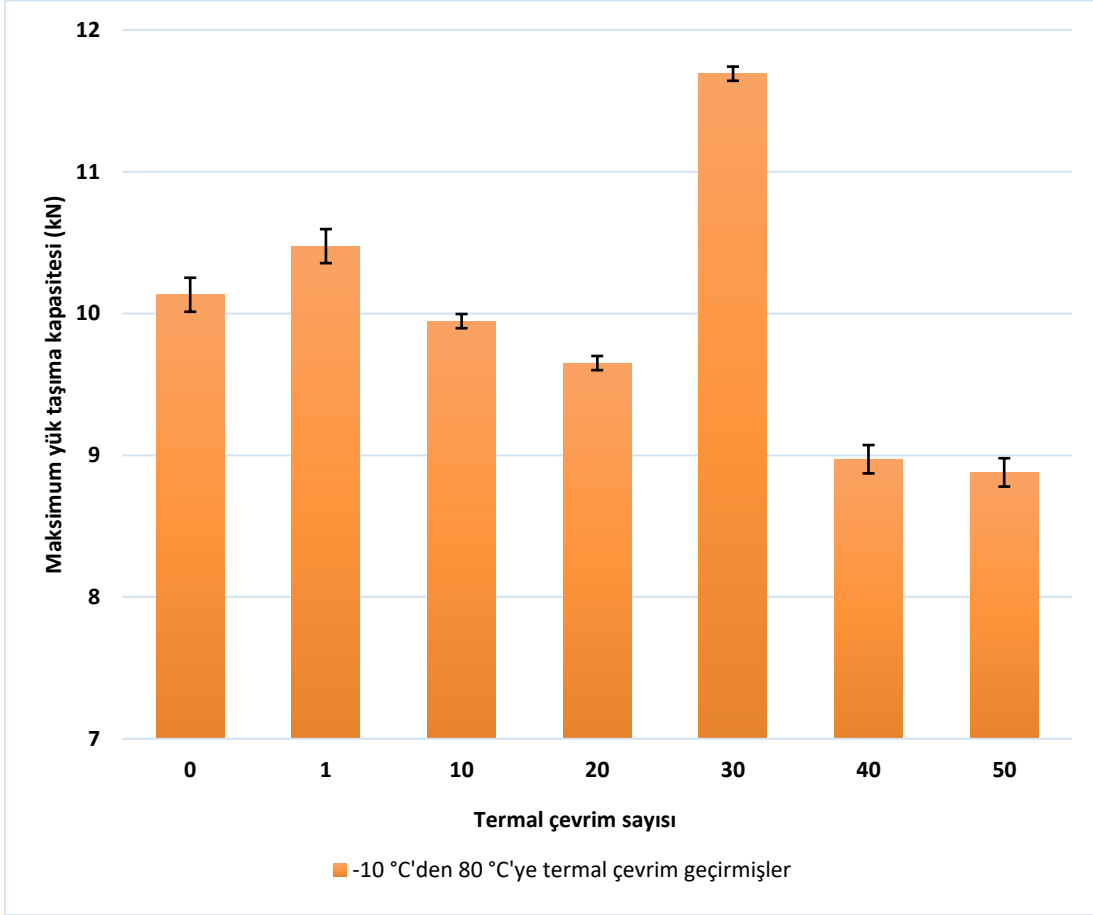
Bindirmeli bağlantıların maksimum yük taşıma kapasitelerini ve buna bağlı olarak uzamalarını belirlemek amacıyla çekmede kesme mukavemeti testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm testler, 100 kN'luk bir maksimum yük kapasitesine sahip Shimadzu AG-100 test cihazı kullanılarak 1 mm/dakikalık bir test hızında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda, termal döngü sayısı 50 olduğunda tüm numunelerin yük taşıma kapasitelerinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca 20-30 kez termal döngüye tabi tutulan numunelerin maksimum yük taşıma kapasitesine sahip oldukları da gözlenmiştir. Çekmede kesme mukavemeti testi sonuçları farklı yapıştırıcı tipleri açısından analiz edildiğinde, bulgular aşağıdaki gibidir.



Şekil 4.12 : DP 460 ile yapıştırılmış, -10 ila 80 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.

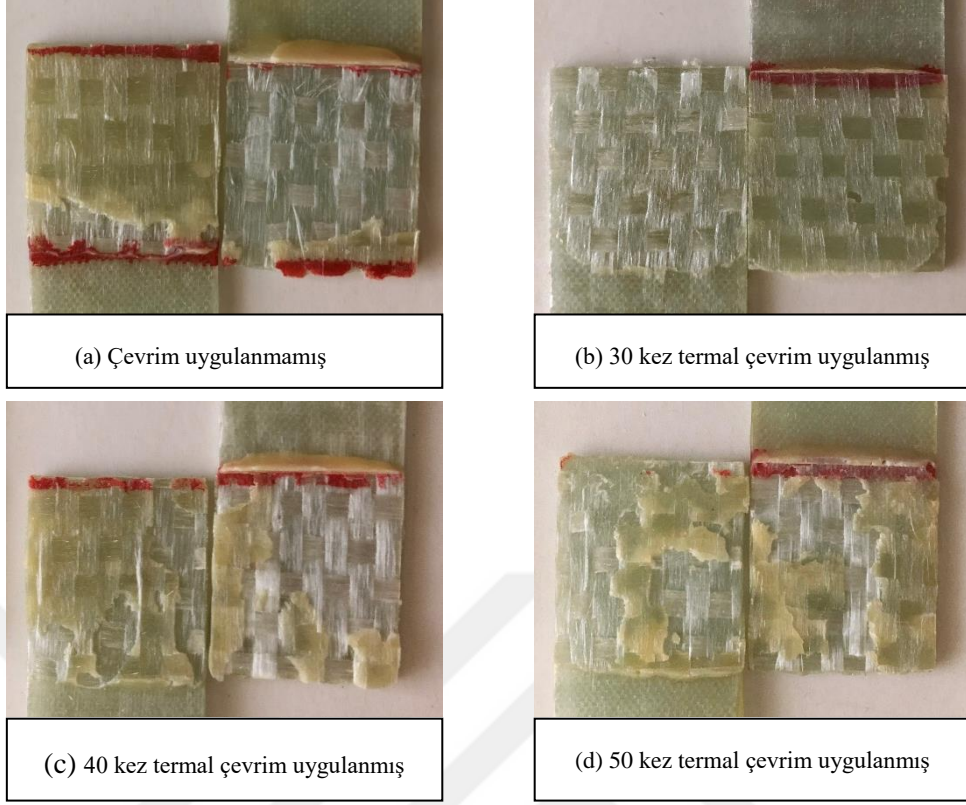
Şekil 4.12'de, DP 460 ile tek bindirmeli olarak yapıştırılmış ve -10 ila 80 °C aralığında termal çevrim uygulanmış örneklerin çekmede kesme mukavemeti test sonuçları sunulmaktadır. Buna göre, termal döngüye tabi tutulmamış numuneler maksimum

uzamaya sahiptir. Bu arada, en düşük yük taşıma kapasitesi 50 defa termal çevrime maruz kalmış örneklerde görülürken, en yüksek yük taşıma kapasitesi 30 defa termal çevrime uğramış olanlarda görülmüştür.



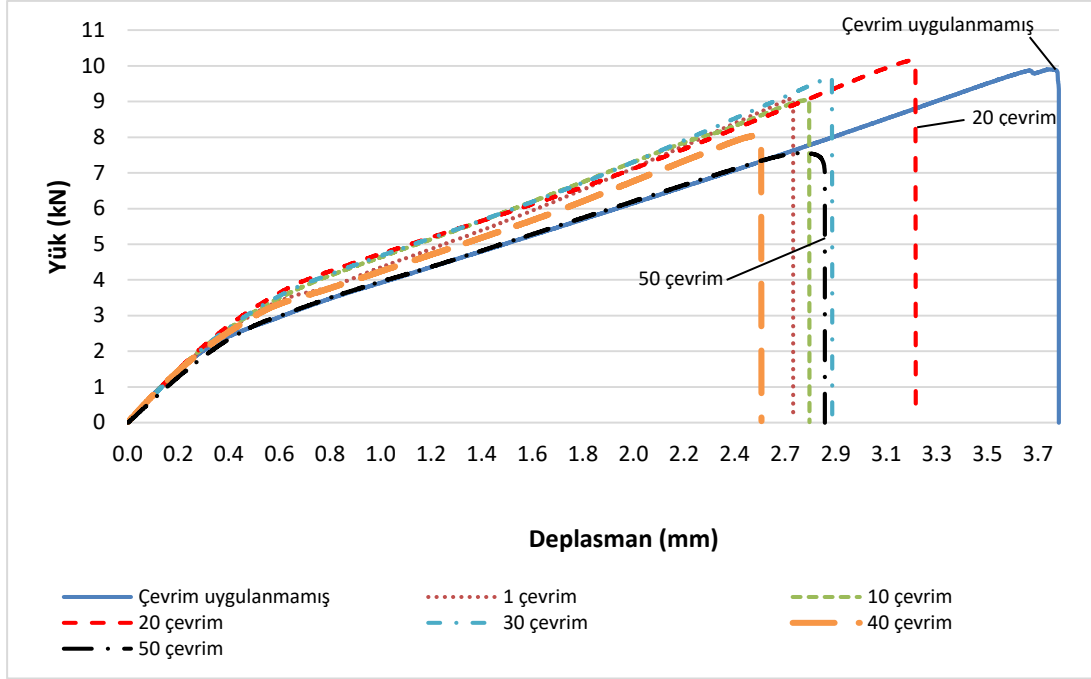
Şekil 4. 13 : DP 460 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal çevrim sayısı grafiği.

Şekil 4.13'te, DP 460 yapıştırıcısı ile birleştirilen numunelerin artan sayıda termal çevrim ile maksimum yük taşıma kapasitesinin değişimi sunulmaktadır. Bu grafik, termal çevrim etkisi altında maksimum yük taşıma kapasitelerinin ortalama ve standart sapma sonuçlarını göstermektedir. Buna göre; numunelerin yük taşıma kapasitesi çevrim uygulanmamış olanlara kıyasla, 30 termal çevrimden sonra %15 oranında artmış ve en yüksek seviyeye ulaşmış, 50 döngüden sonra ise %13'lük bir düşüş göstererek en düşük seviyesine ulaşmıştır.



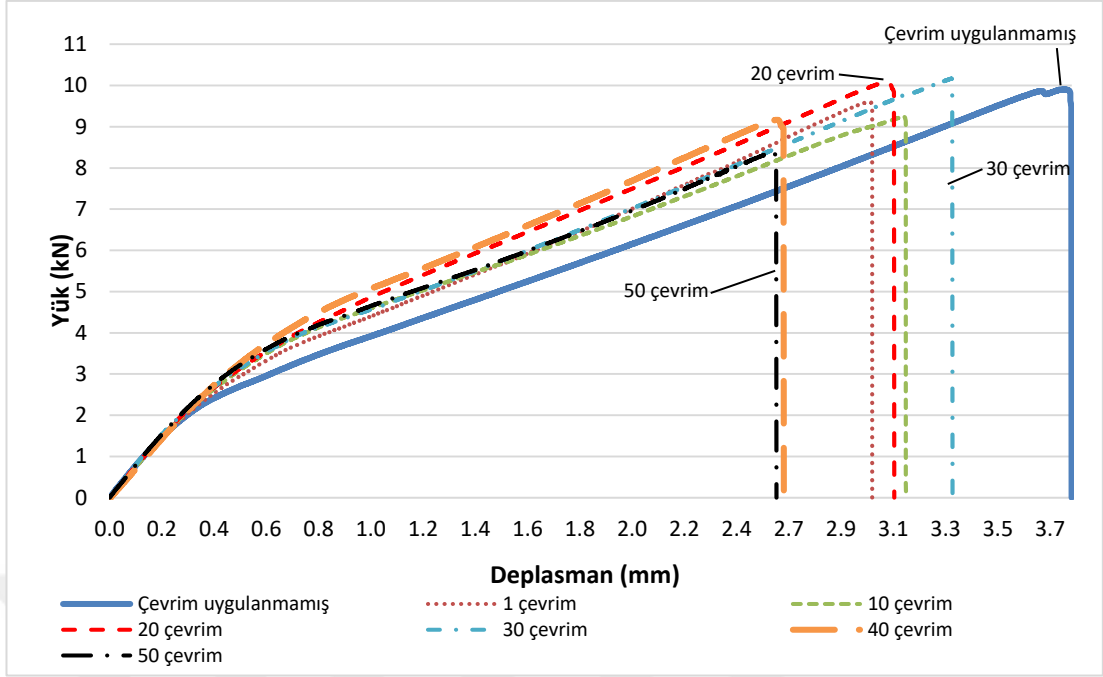
Şekil 4. 14 : DP 460 ile yapıştırılmış, -10 ila 80 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait tipik kırılma yüzeyleri.

Çekmede kesme mukavemeti testlerinin uygulanmasından sonra DP 460 ile yapıştırılmış numunelerin kırılma yüzeyleri Şekil 4.14'te verilmiştir. Termal çevrim uygulanmamış örneklerin yüzeyinde lokal bir yapışkan hasar alanı ve delaminasyon hasar modu olduğu görülmektedir (Şekil 4.14 (a)). Şekil 4.14 (b)'de, 30 kez termal-yağ çevrime tabi tutulmuş DP460 örneklerinin kırılma yüzeyleri delaminasyon hasar moduna sahiptir ve bu örnekler en yüksek değerde mekanik özellik değeri göstermektedir. DP 460 ile yapıştırılmış, 40 ve 50 kez termal-yağ çevrime uğramış örnekler (Şekil 4.14 (c, d)), yapıştırıcı ve kompozit tabaka arasındaki ara yüzde yapıştırıcı hasarı gösterir ve bu numuneler en düşük mekanik özelliklere sahiptir.



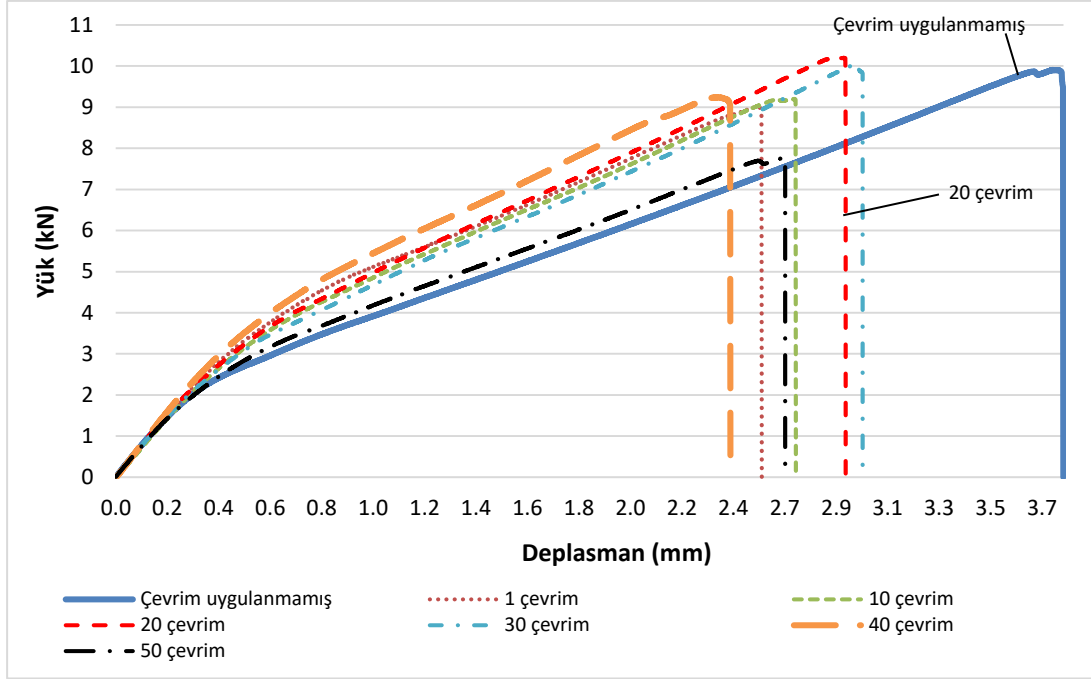
Şekil 4.15 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, -10 ila 80 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.

Loctite 9461 ile yapıştırılmış örneklerin çekmede kesme mukavemeti test sonuçları -10 °C sırasıyla 80, 100 ve 120 °C arasında uygulanan termal döngüyü temsil eden Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17'de verilmiştir. Spesifik olarak Şekil 4.15'e istinaden, örneklerin yük taşıma kapasiteleri genellikle termal döngü sayısı arttıkça azalan bir davranış sergiler, bununla birlikte 20 kez termal döngülü numuneler istisna olarak en yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptir. Şekil 4.15'ten görülebileceği gibi, 80 °C'de termal döngüye tabi tutulan tüm numunelerin uzaması, termal çevrime tabi tutulmamış örneklerin uzamasından daha düşüktür.



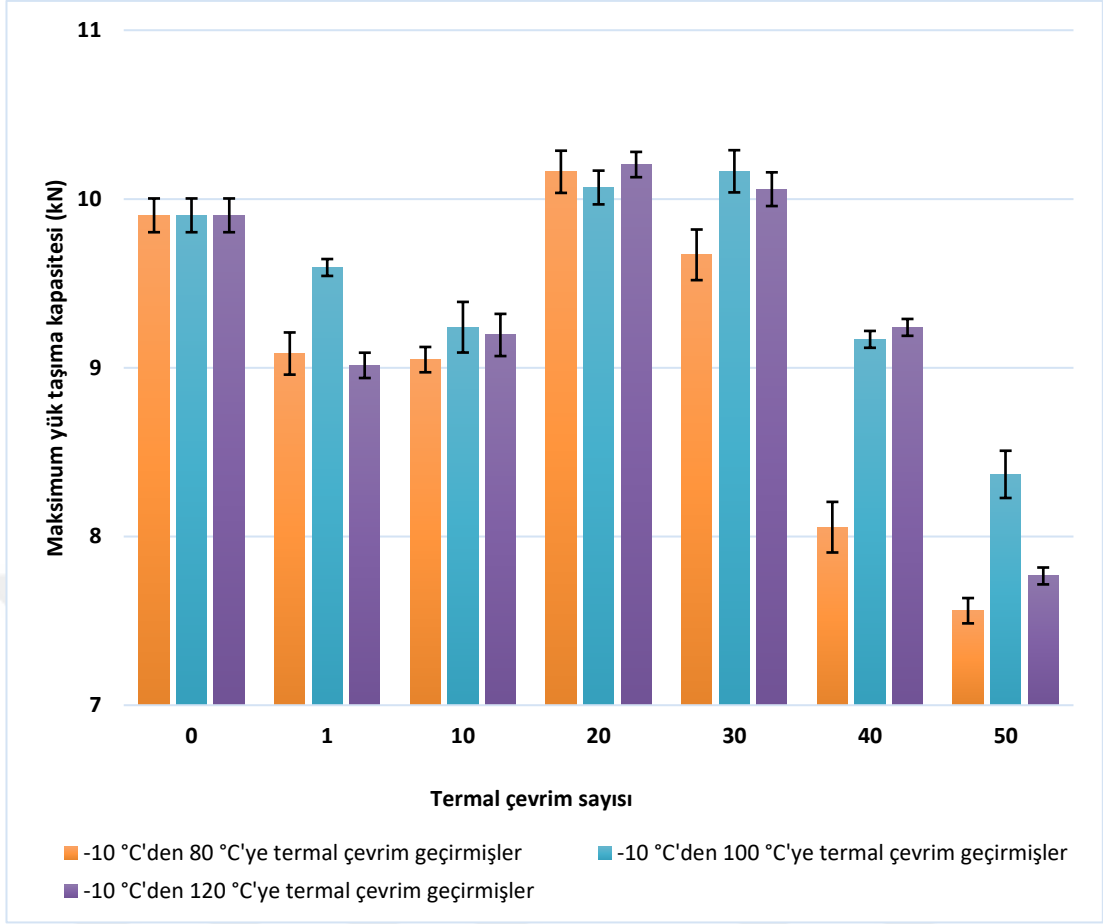
Şekil 4. 16 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, -10 ila 100 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.

-10 ila 100 °C arasında termal çevrime tabi tutulan numunelerin çekmede kesme mukavemeti test sonuçları Şekil 4.16'da verilmiştir. 20-30 kez termal çevrimli ve çevrim uygulanmamış numunelerin neredeyse aynı ve en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip oldukları gözlenmiştir. Şekil 4.16'ya göre, 50 defa termal çevrim geçirmiş numuneler minimum yük taşıma kapasitesine sahiptir. Ayrıca, çevrim uygulanmamış örneklerin maksimum uzamaya sahip olduğu açıkça görülebilir.



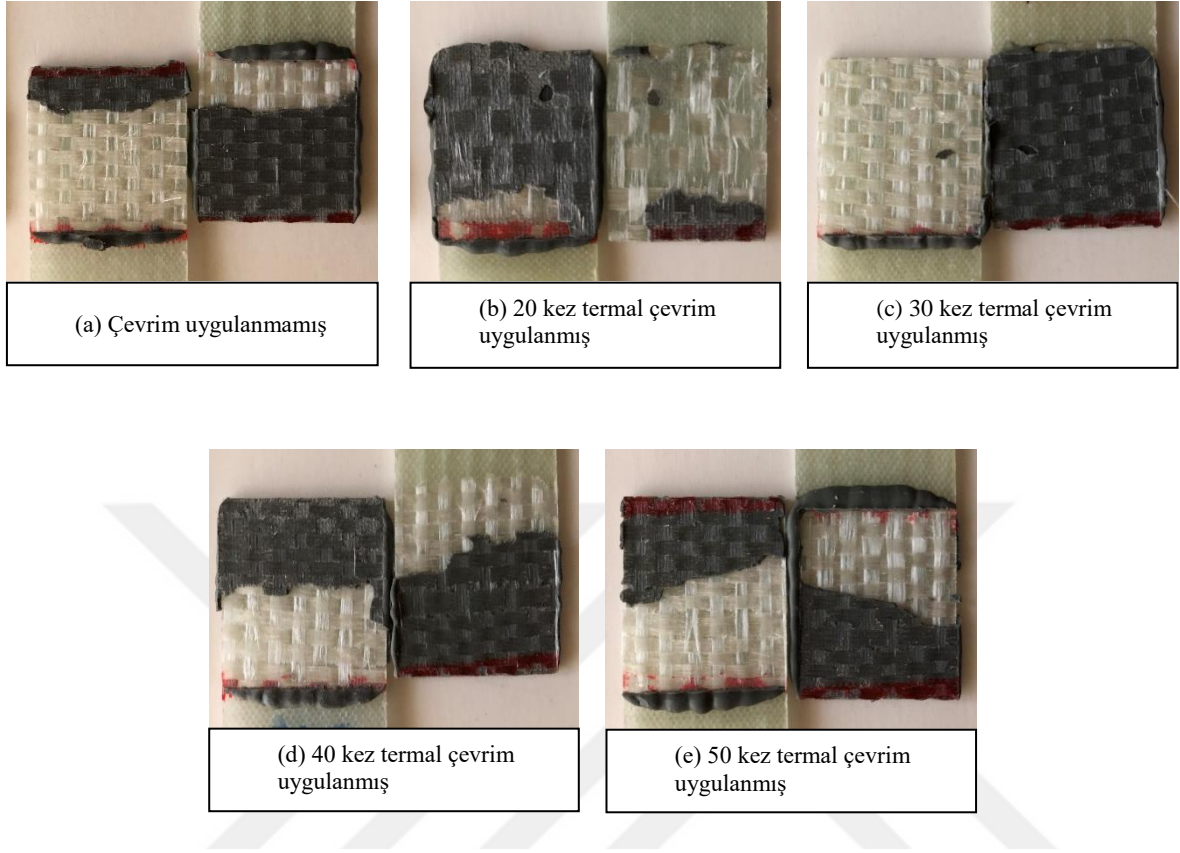
Şekil 4.17 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, -10 ila 120 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.

-10 ila 120 °C arasında termal döngüye tabi tutulmuş numunelerin çekmede kesme mukavemeti test sonuçları Şekil 4.17'de verilmiştir. Yük taşıma kapasiteleri karşılaştırıldığında, en yüksek değer 20 kez termal çevrime uğramış örneklerden ve en düşük değer de 50 kez termal çevrim geçirmiş olanlardan elde edilir. Ayrıca Şekil 4.17'den, 120 °C'de termal çevrim işleminin uzama üzerinde bir azaltıcı etkiye sahip olduğu sonucu da elde edilebilir.



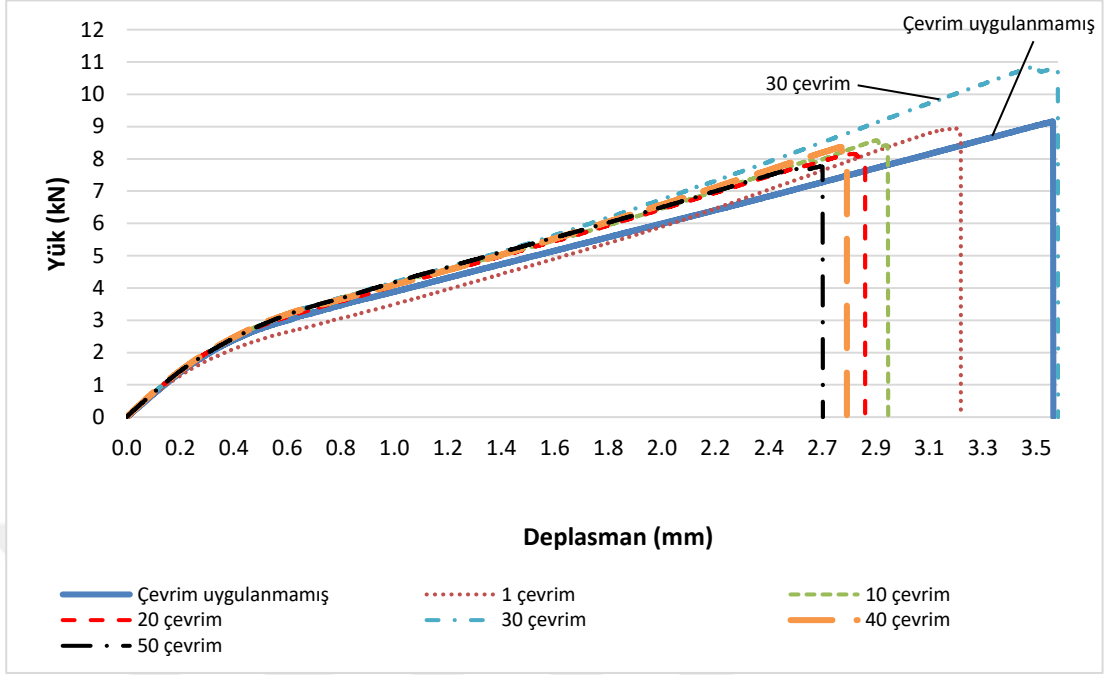
Şekil 4. 18 : Loctite 9461 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal çevrim sayısı grafiği.

Şekil 4.18, termal çevrim etkisi altındaki Loctite 9461 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş kompozit numunelerin maksimum yük taşıma kapasitelerinin ortalama ve standart sapma değerlerini göstermektedir. Tüm termal çevrim sıcaklık aralıklarında, 1, 10, 40 ve 50 kez çevrim uygulanmış numunelerin yük taşıma kapasitelerinde azalma eğilimi görülürken, 20 ve 30 kez termal çevrim uygulanmış olanlarındaki artan bir eğilim görülmüştür. Tüm termal çevrim sıcaklık aralıkları için güven aralıkları dardır, bu da sonuçların güvenilirliğinin yüksek olduğunu ifade etmektedir.



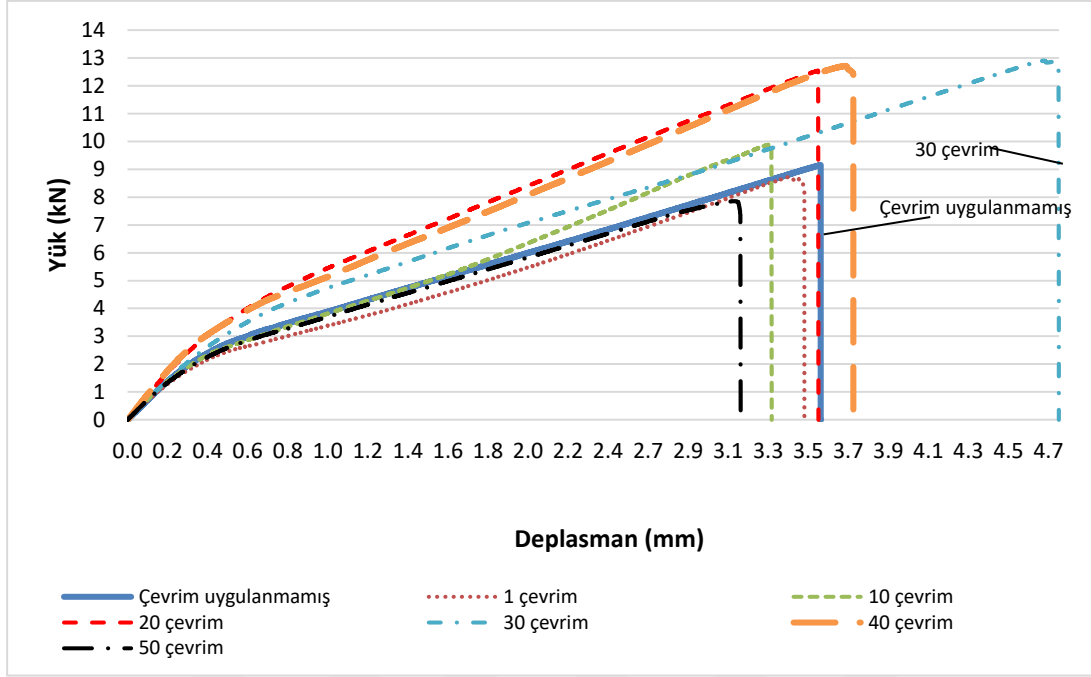
Şekil 4. 19 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, -10 ila 100 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait tipik kırılma yüzeyleri.

Loctite 9461 ile yapıştırılmış kompozit numunelerin çekmede kesme mukavemeti testleri sonucunda ortaya çıkan, 100 °C'de termal olarak tekrarlanan kırılma yüzeyleri, Şekil 4.19'da verilmiştir. Çevrim uygulanmamış (Şekil 4.19 (a)), 40 ve 50 kere termal çevrim uygulanmış örnekler (Şekil 4.19 (d, e)) kompozit ve yapıştırıcı ara yüzünde yapıştırıcı hasarı modunu gösterir. Yapıştırıcı hasarı modu, mekanik özelliklerin daha düşük bir dereceye inmesine neden olur [104]. 20 kez ve 30 kez termal çevrime uğramış örneklerin (Şekil 4.19 (b, c)) kırılma yüzeylerin çoğunda, delaminasyon hasar modu gözlenir. Çekmede kesme mukavemeti testleri, delaminasyon hasar modunun gözlemlendiği örneklerin mekanik özelliklerinin diğerlerinden daha yüksek olduğunu doğrulamaktadır.



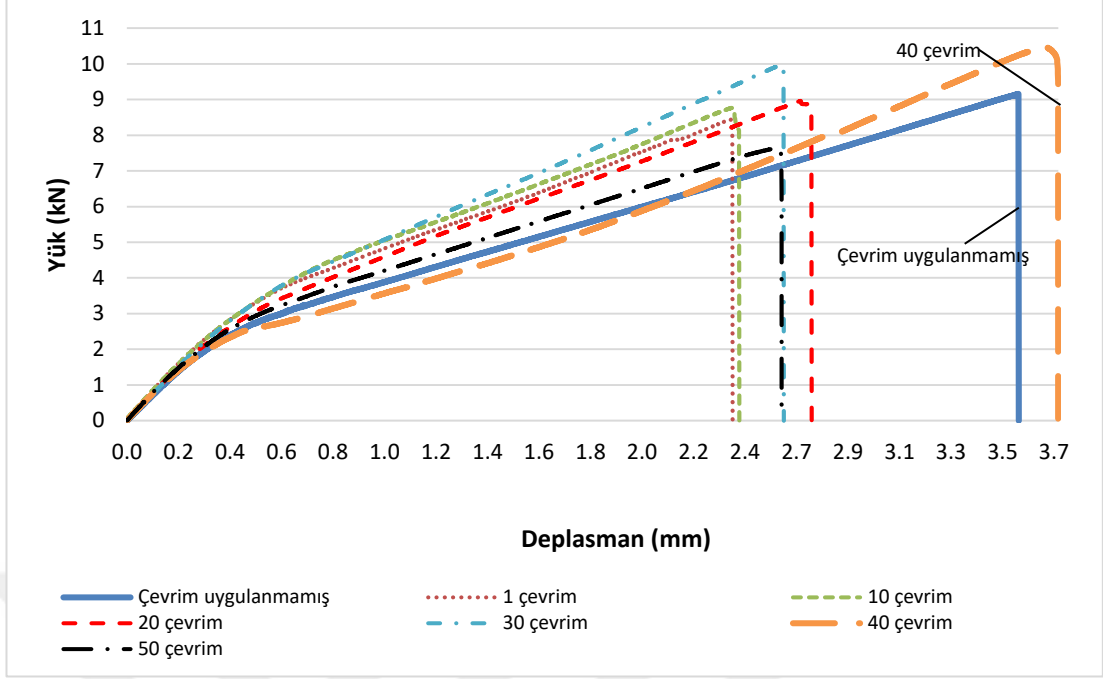
Şekil 4.20 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, -10 ila 80 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.

Loctite 9466 ile yapıştırılmış örneklerin çekmede kesme mukavemeti testlerinin sonuçları Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'de verilmiştir. Loctite 9466 ile yapıştırılan örnekler -10 °C ila sırasıyla 80, 100 ve 120 °C arasında termal döngü işlemi uygulanmıştır. Şekil 4.20'de özellikle göze çarpan, en yüksek yük taşıma kapasitesinin 30 kez termal çevrime tabi tutulmuş numunelere ait olması ve en düşük yük taşıma kapasitesi değerinin de beklendiği üzere, 50 kez termal çevrim uygulanmış olanlara ait olmasıdır. Şekil 4.20'den deplasman ile ilgili değerlendirme, 30 kez termal döngülü numunelerin diğer test sonuçlarından farklı olarak maksimum uzama değerine sahip olduğu şeklinde yapılabilir.



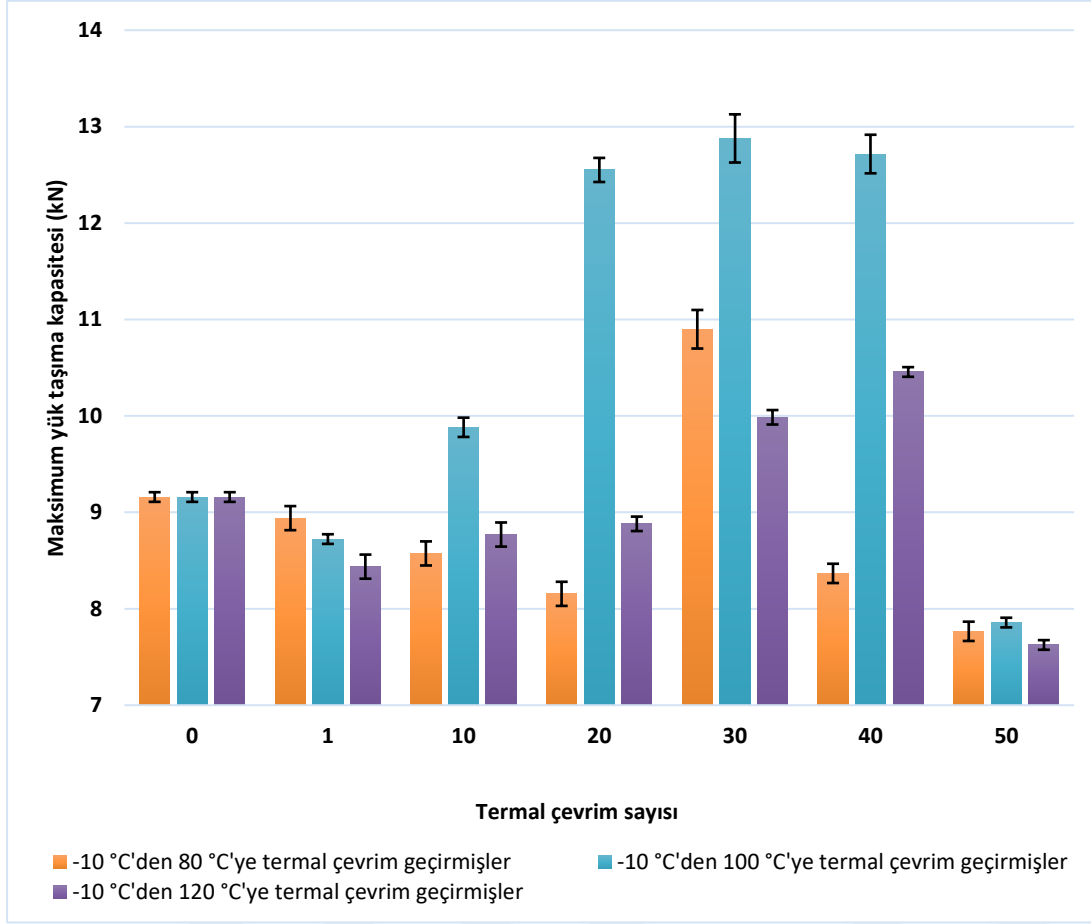
Şekil 4. 21 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, -10 ila 100 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.

Loctite 9466 yapıştırıcısı ile yapıştırılmış, -10 ila 100 °C arasında tekrarlanan termal çevrim uygulaması sonrasında çekmede kesme mukavemeti testlerine tabi tutulmuş kompozit numunelerin test sonuçları Şekil 4.21'de verilmiştir. 100 °C'de termal çevrim işlemine tabi tutulan numuneler arasında, 30 ila 40 kez termal çevrim uygulanmışlar en yüksek yük taşıma kapasitelerine sahiptirler. Şekil 4.21'den de görülebileceği gibi, 30 kez termal çevrim geçirmiş numuneler ise maksimum deplasman değerine sahiptir.



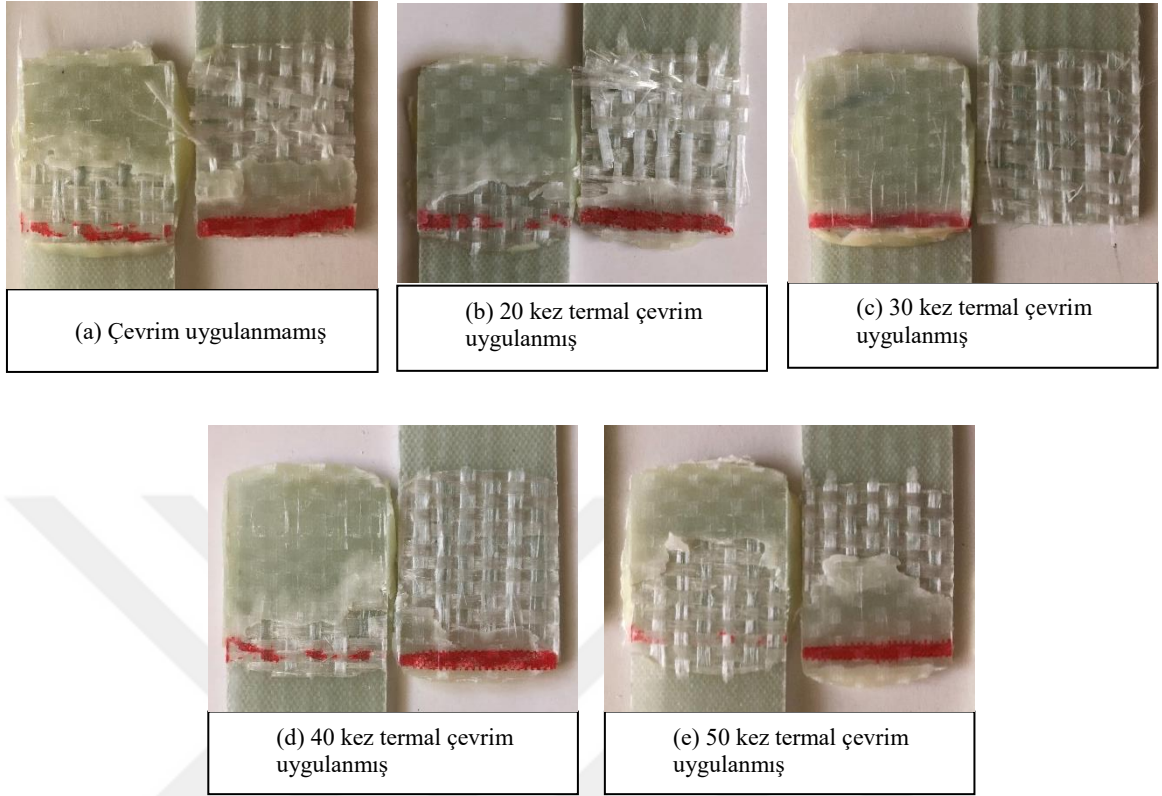
Şekil 4. 22 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, -10 ila 120 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.

Son olarak, -10 ila 120 °C aralığında termal çevrime maruz bırakılan Loctite 9466 ile yapıştırılmış örneklerin çekmede kesme mukavemeti test sonuçları Şekil 4.22'de verilmiştir. Termal çevrime uğramış numuneler arasında 40 kez çevrimlenmiş olanlar maksimum yüksek yük taşıma kapasitesine sahip iken 50 kez termal çevrime uğramış olanlar en düşük değerlere sahiptir. Aynı zamanda Şekil 4.22'den, maksimum yük taşıma kapasitesi değerine ve maksimum uzama değerine eş zamanlı olarak sahip olan 40 kez termal çevrim geçirmiş numunelerin olduğu çıkarılabilir.



Şekil 4. 23 : Loctite 9466 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal çevrim sayısı grafiği.

Loctite 9466 ile yapıştırılmış örneklerin termal çevrim etkisiyle yük taşıma kapasitelerinin standart sapmaları ve ortalama değerleri Şekil 4.23'te verilmiştir. Şekil 4.23'ün en önemli detayı, -10 ila 100 °C arasında termal çevrim uygulamasına maruz kalan örneklerin yük taşıma kapasiteleri 20, 30 ve 40 kez termal çevrim sonrasında sırasıyla %37, 40 ve 38 oranında artmıştır.



Şekil 4. 24 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, -10 ila 100 °C aralığında termal çevrim uygulanmış numunelere ait tipik kırılma yüzeyleri.

Loctite 9466 yapıştırıcı ile yapıştırılmış, 100 °C'de termal olarak çevrime uğramış numunelerin çekmede kesme mukavemeti testlerinden sonra elde edilen kırılma yüzeyleri Şekil 4.24'te verilmiştir. En yüksek mekanik özelliklere sahip termal olarak 30 kez çevrimlenmiş numunelerin kırılma yüzeyi test edilen tüm örneklere göre net delaminasyon sergilemiştir. Termal çevrime uğramamış, 20, 40 ve 50 kez çevrim geçirmiş örneklerde, lokal yapıştırıcı hasar modu gözlemlenmiştir ve bu örneklerin mekanik özellikleri, 30 defa çevrime uğramış olanlara kıyasla nispeten düşüktür.

Yapışkan moleküllerin substratlarla etkileşimleri, mekanik özelliklerin belirlenebilirliği için kritik öneme sahiptir. Gözenekler ve substratın mikro çatlakları içine akan uygun şekilde seçilmiş bir yapıştırıcı daha sonra polimerleşir, bu gözenekleri ve çatlakları doldurur ve sonuçta alt tabaka ve yapıştırıcı arasında bir mekanik bağ oluşturur. Mekanik bağlanma, yapışkan bağın gücünü artırır ve sonuç

olarak, iki yüzeyin zorla ayrılması istenildiğinde, substrat yüzeyinin yırtılmasına daha yatkındır [105-107].

Termal çevrim sayısı ve termal çevrim sıcaklık aralığı arttıkça, kompozit malzemelerin mekanik özellikleri azalır [63, 65]. Termal çevrim sayısı ve termal çevrim sıcaklık aralığının artırılması, matris ve lifler arasındaki arayüzey bağımlı olumsuz yönde etkiler ve termal çevrim sayısındaki artış, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde azalmaya neden olan su emilimini artırır [73]. Epoksi esaslı kompozit materyallere benzer şekilde, epoksi bazlı yapıştırıcı ile birleştirilen kompozit numuneler de hidrofilik bir profil gösterir. Epoksi esaslı yapıştırıcı ile birleştirilen kompozit örneklerde, termal çevrim sayısı ve termal çevrim sıcaklığının arttırılmasıyla oluşan mikro çatlaklardan içeri giren ısı transfer yağı, kompozit malzeme matrisinin epoksi bazlı yapıştırıcıya yapışmasını engeller. Isı transfer yağının mikro çatlaklardan nüfuz etmesi, epoksi esaslı matrisin veya yapışkanın degradasyonu anlamına gelir ve deformasyona neden olur. Yapıştırıcı ve kompozit malzeme arasındaki ara yüz bağının azalmasıyla, malzemeleri bir arada tutan birleştirme kuvveti azalır ve malzeme, hiç çevrime uğramamış olanlardan daha düşük bir gerilme yükünde kırılır.

Üç farklı yapıştırıcı ile yapıştırılan örnekler içerisinde, termal çevrime 50 kez maruz kalan örneklerde en düşük gerilme mukavemeti gözlenmiştir. Üç farklı sıcaklık aralığında termal döngüye tabi tutulan numunelerin yük-deplasman grafikleri incelendiğinde, termal çevrim sıcaklık aralığındaki artış her çevrim sayısı için mekanik özelliklerde etkili bir parametre değildir.

-10 ila 80 °C'de termal çevrime tabi tutulan numuneler arasında en yüksek yük taşıma kapasitesi, 30 çevrim geçirmiş DP 460 numunesinde, 20 çevrim geçirmiş Loctite 9461 numunesinde ve 30 çevrim geçirmiş Loctite 9466 numunesinde elde edilmiştir. Çekmede kesme mukavemeti test sonuçlarına göre, -10 ila 100 °C'de uygulanan termal çevrimde en yüksek yük taşıma kapasitesi Loctite 9461 numuneleri için 20-30 çevrim geçirmişlerde elde edilirken, Loctite 9466 örnekleri için 30-40 termal çevrim uygulanmış olanlarda ortaya çıkmıştır. Son olarak, -10 ila 120 °C'de termal çevrimden sonra alınan örneklerin yük taşıma kapasiteleri, Loctite 9461 numuneleri için 20 döngüde ve Loctite 9466 örnekleri için 40 döngüde en yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Bu karakteristik sonuçlar, tüm yapıştırılmış örneklerin mekanik

özelliklerinin, belirli bir döngüden geçtikten sonra maksimum yük taşıma kapasite değerlerine ulaştığını ve daha sonra beklendiği üzere ilk aşamada termal döngünün etkisi altında mekanik düşüşler yaşadıkları gibi düştüğünü göstermektedir. Sıcaklık değişimleri, numunelerin ara yüz bağlanma kabiliyetlerini ilk etapta azaltırken, belirli bir döngüden sonra en yüksek seviyeye getirmiştir ve bundan sonra yük taşıma kapasiteleri tekrar düşürmüştür. Farklı yapıştırıcılarla yapıştırılan numunelerin yük taşıma kapasitelerindeki artış (genellikle 20 ve 30 döngüden sonra), farklı sıcaklık aralıklarında termal yağ döngüsünün uygulanmasının bir sonucu olarak yapışkanın polimerizasyon seviyesindeki artıştan kaynaklanır. Artan polimerizasyon seviyesi ile, yapıştırıcı daha üst bir seviyede kürlenme sağlar; bu nedenle, substrat ve yapıştırıcı arasındaki yapıştırıcı kuvvetler artar. Sonuç olarak, kompozit malzeme ile yapıştırıcı arasındaki bağ en yüksek seviyesine ulaşır [108-110].

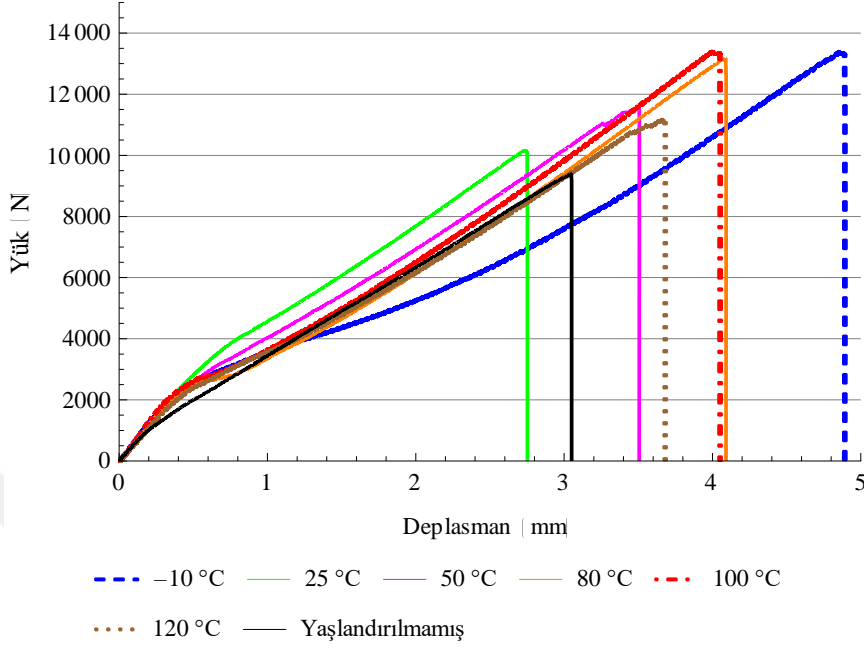
Çekmede kesme mukavemeti testlerinin uygulanmasıyla, yapıştırıcılarda biriken artık gerilmelerden dolayı yük uzama eğrilerinin başlangıcında bi-lineer davranışlar gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, artık gerilmeleri aşıttıktan sonra eğriler doğrusal olarak ilerler. Ayrıca yük-deplasman eğrilerinden, termal çevrime uğramış numunelerin elastik sınırlarının genellikle çevrim uygulanmamışlardan daha yüksek olduğu sonucu çıkarılabilir. Termal döngü işleminin uygulanmasından dolayı kürlenme hızlarında artış gösteren örneklerin elastik deformasyon bölgesi artmaktadır.

4.3 Termal-yağ Yaşlandırmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri

Deneysel çalışmanın mekanik sonuçlarını yorumlayabilmek için, tek bindirmeli kompozit numunelere çekmede kesme mukavemeti testlerinde her bir parametrede 4 örnek kullanılmıştır. Belirlenen süreler için yaşlandırılan örnekler, gerekli temizlik ve kurutma işlemlerinin gerçekleştirilmesinden hemen sonra çekmede kesme mukavemeti testlerine tabi tutulmuştur. Kompozit malzemelerin elastisite modülü, ASTM D3039 standardına göre üretilen numunelerle [83] (25mmx250mmx2mm) bulunmuştur. Tek bindirmeli kompozit numunelerin çekmede kesme mukavemeti testleri ve kompozit materyallerin çekme testleri, 100 kN'luk maksimum yük kapasitesine sahip bir Shimadzu AG-100 test makinesi kullanılarak 1 mm/dk.'lık bir hız ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin gerilme testi sırasında deplasmanı ölçmek için bir video ekstansometre kullanılmıştır. Farklı yaşlandırma sıcaklıkları ve süreleri için kompozit malzemenin elastisite modülü belirlenirken, ASTM D3039'a göre her parametre için en az 3 numune kullanılmıştır.

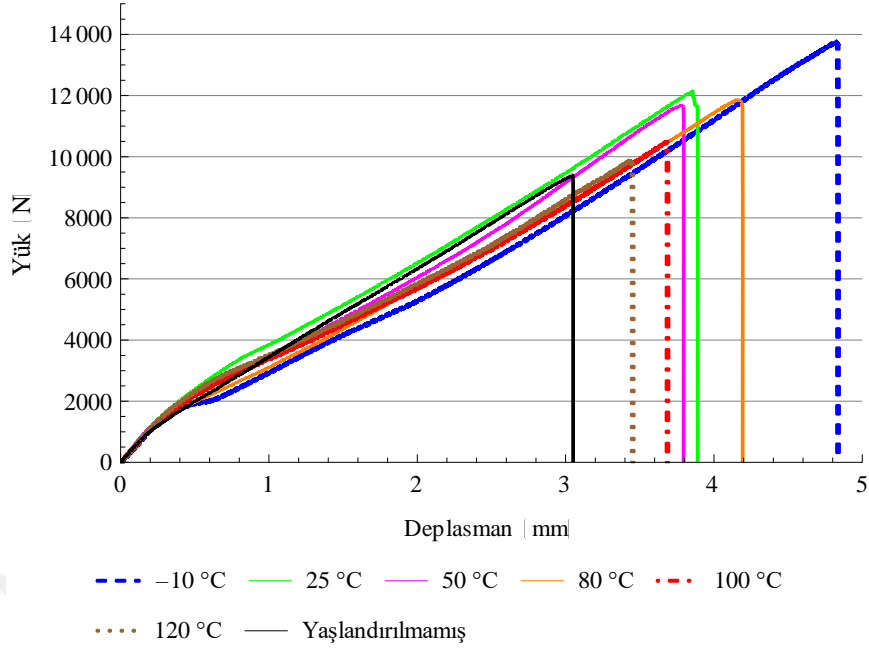
Yük-deplasman grafikleri, her bir yapıştırıcı için 24, 168, 360, 720, 1080 ve 1440 saat yaşlanma süreleri için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Her bir grafik, aynı zaman zarfında farklı sıcaklıklarda bulunan örneklerin ve yaşlandırılmamışların mekanik davranışlarını gösterir.

4.3.1 Loctite 9466 ile yapıştırılmış numunelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu



Şekil 4. 25 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, 168 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

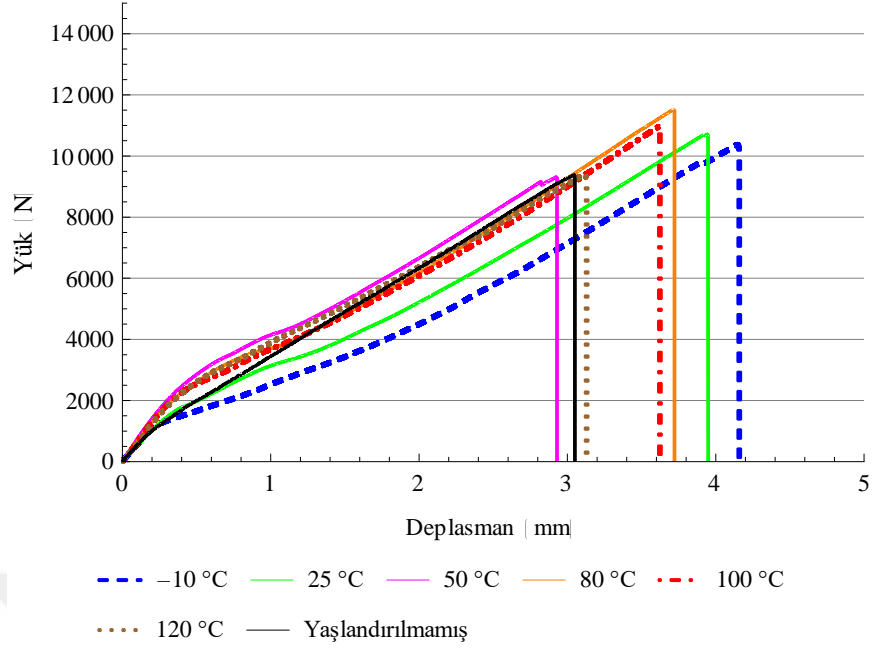
168 saat yaşlandırılmış, Loctite 9466 ile tek bindirmeli olarak yapıştırılmış kompozit numunelere ait Yük – Deplasman grafiği Şekil 4.25'te verilmiştir. Bu numuneler arasında maksimum yük taşıma kapasitesinin -10, 80 ve 100 °C'de yaşlandırılmış olanlara ait olduğu ve minimum değer yaşlı olmayan örnekler için olduğu gözlemlenmiştir. 168 saat yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış örneklerin yük taşıma kapasiteleri karşılaştırıldığında, 168 saat termal yaşlanma ile tüm örneklerin taşıma kapasitesinin yükseldiği görülmektedir. -10 °C'de yaşlanan örnekler, en yüksek deplasman değerine sahiptir (Şekil 4.25).



Şekil 4. 26 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, 360 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

360 saat yaşlandırılmış Loctite 9466 örnekleri incelendiğinde, -10 ° C'de yaşlandırılan örneklerin maksimum yük taşıma kapasitesine ve deplasman değerine sahip olduğu görülmüştür.

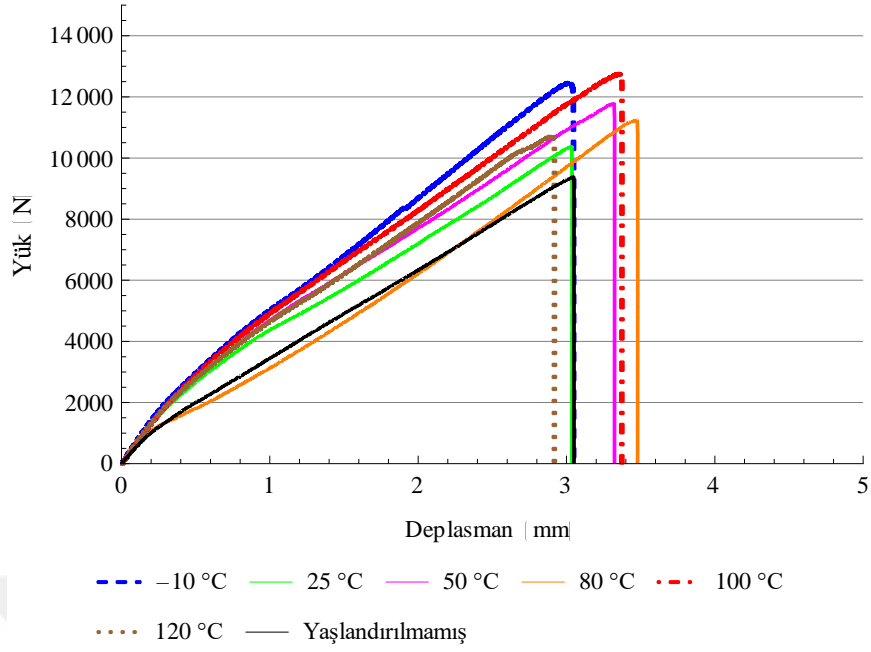
Şekil 4.25 ve 4.26 80, 100 ve 120 °C'de yaşlandırılan numunelerin yük taşıma kapasitelerinin, yaşlandırılmamışlarına yaklaştığını ortaya koymaktadır.



Şekil 4.27 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, 720 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

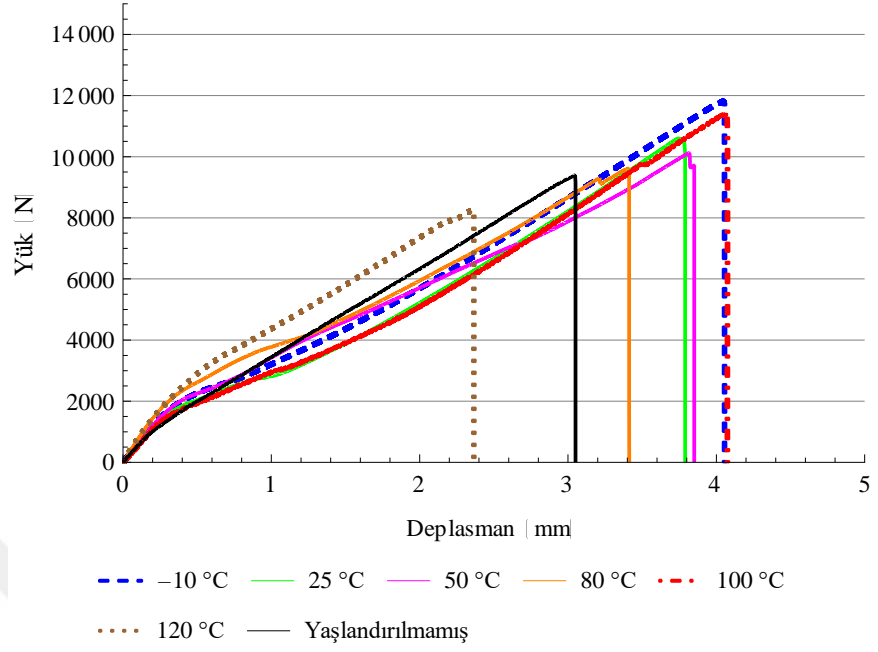
720 saat yaşlandırılmış numunelerden maksimum yük taşıma kapasitesine sahip olanlar -10 ve 100 °C'de yaşlandırılmış olanlardır (Şekil 4.27).

Önceki değerlere (168 ve 360 saatlik yaşlandırma) kıyasla, -10, 80 ve 100 °C'de yaşlandırılan örneklerin, yük taşıma kapasitelerinde hafif bir düşüş gösterdiği, buna rağmen 25 ve 50 °C'de yaşlandırılan numunelerin yük taşıma kapasite değerlerini koruduğu gözlemlenmiştir. Yük taşıma kapasitelerinde artış ve azalışa rağmen, tüm örneklerin deplasman değerleri 720 saatlik termal yaşlandırmadan sonra bir düşüş göstermektedir.



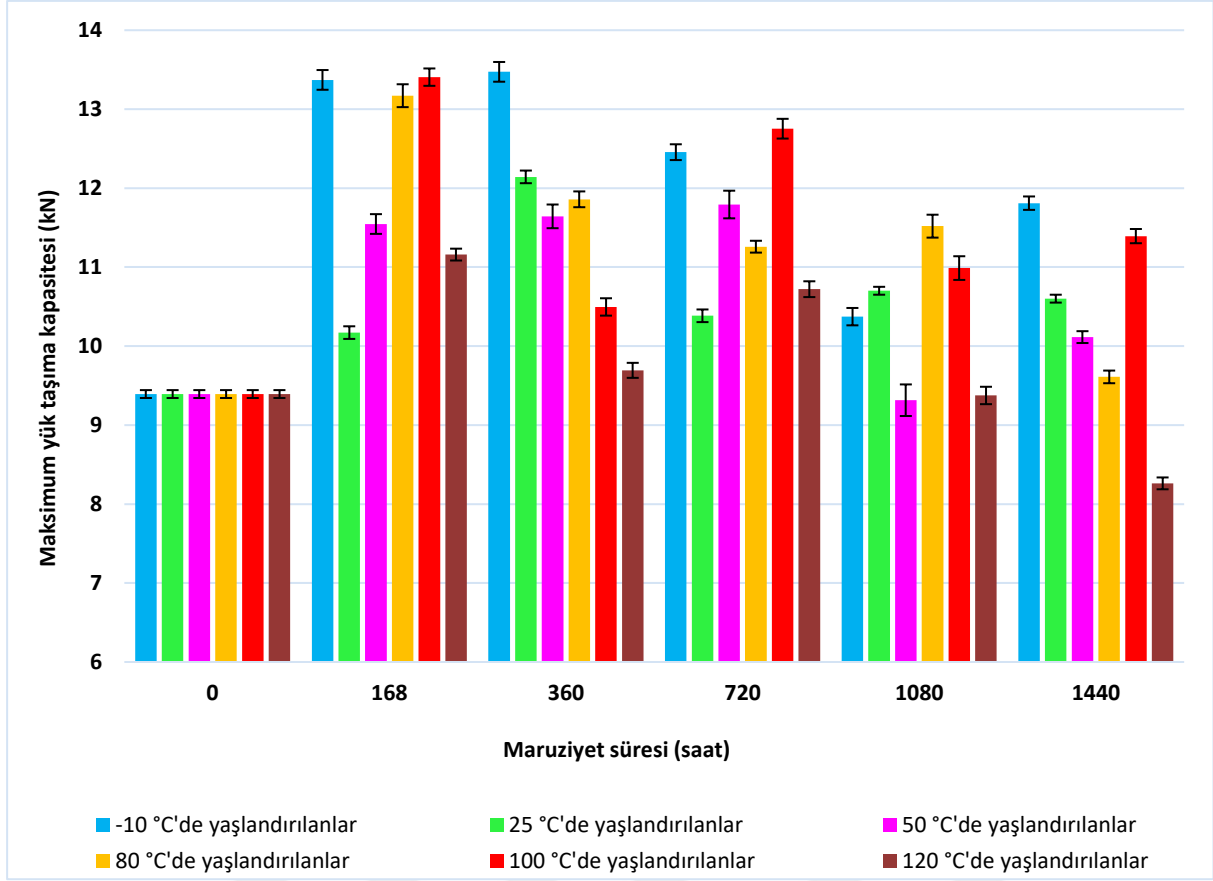
Şekil 4. 28 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, 1080 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

1080 saat yaşlandırılmış örnekler arasında (Şekil 4.28), maksimum uzama ve maksimum yük taşıma kapasitesi sırasıyla 80 ve -10 °C'de yaşlandırılan örneklerde görülmektedir. 1080 saat yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış numunelerin uzama değerleri karşılaştırıldığında, sünekliğin genel olarak arttığı, 50 ve 120 °C'de yaşlandırılan örneklerin yük taşıma kapasitelerinin yaşlandırılmamış örneklerinininkine yakın değerde olduğu söylenebilir.

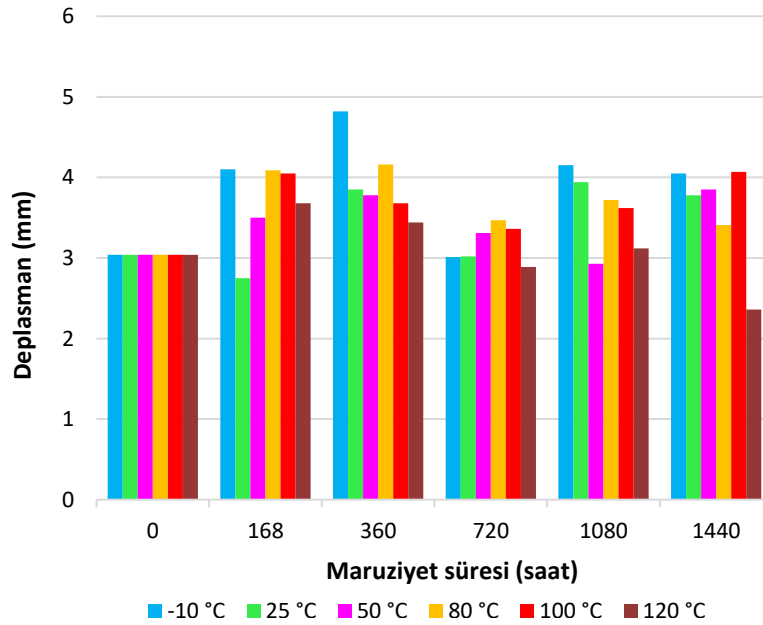


Şekil 4. 29 : Loctite 9466 ile yapıştırılmış, 1440 saat yaşlandırılmış numunelere ait yük-deplasman eğrileri.

En uzun termal yaşlandırma periyodu olan 1440 saatlik termal yaşlandırma grafiği incelendiğinde (Şekil 4.29), maksimum yük taşıma kapasitesi ve uzama değerinin -10 ve 100 °C'de yaşlandırılan örneklere ait olduğu görülmektedir.



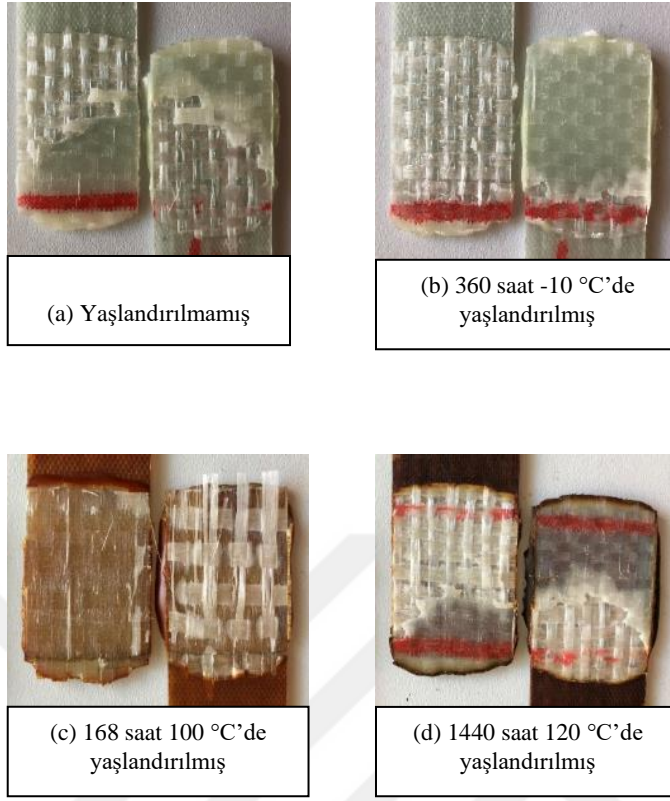
Şekil 4. 30 : Loctite 9466 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal-yağ yaşlandırma maruziyet süresi grafiği.



Şekil 4. 31 : Loctite 9466 ile yapıştırılan numunelere ait Deplasman – Maruziyet süresi grafiği.

Loctite 9466 ile yapıştırılmış tüm örnekleri dikkate alarak;

- En düşük yük taşıma kapasitesi ve uzama değerinin, 120 °C'de 1440 saat yaşlandırılmış örneklerde gözlemlendiği sonucuna varılabilir (Şekil 4.30 ve 4.31).
- -10 °C'de yaşlandırılan numuneler tüm yaşlandırma periyotları için genellikle en yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptir ve bu numunelerin yük taşıma kapasiteleri tüm yaşlandırma süreleri için yaşlandırılmamış numunelerinkinden yüksektir (Şekil 4.30).
- Termal yaşlanma süresi arttıkça -10, 50 ve 80 °C'de yaşlandırılan örneklerin yük taşıma kapasitelerinde azalmalar görülür.
- Loctite 9466 yapıştırıcısı için en yüksek çalışma sıcaklığı olan 120 °C'de yaşlandırılan numunelerin yük taşıma kapasiteleri, tüm termal yaşlanma süreleri için yaşlandırılmamışlara çok yakındır ve 1440 saat sonunda bunların da altındadır.
- Loctite 9466 ile birleştirilmiş numuneler için yer değiştirme ve yük taşıma kapasitesi değerleri birlikte değerlendirildiğinde, -10 °C'da 360 saat yaşlandırılan örneklerin diğer yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış örneklere göre daha yüksek değerlere sahip olduğu söylenebilir.



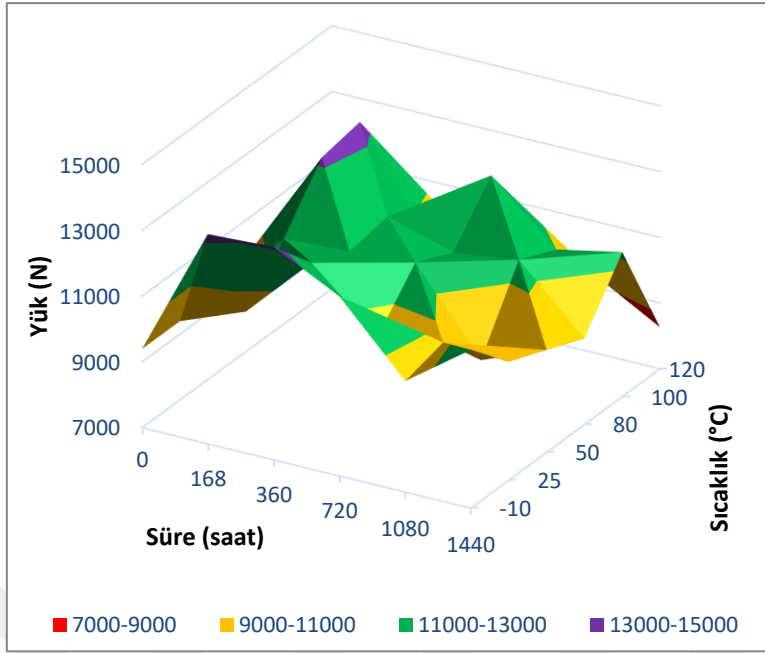
Şekil 4. 32 : Loctite 9466 ile yapıştırılan numunelere ait kırılma yüzeyleri.

Loctite 9466 ile yapıştırılmış örneklerin çekmede kesme mukavemeti testlerinden sonra elde edilen kırılma yüzeyleri Şekil 4.32'de gösterilmektedir. Şekil, en yüksek ve en düşük yük taşıma kapasiteli ve yaşlandırılmamış numunelerin yüzeylerinden görüntüler alınarak derlenmiştir. Substrat yüzeyinde kohezif hasar modundan kaynaklanan temiz bir kompozit yüzeyi delaminasyonu -10 °C'de 360 saat yaşlandırılan (Şekil 4.32 (b)) ve 100 °C'de 168 saat yaşlandırılan (Şekil 4.32 (c)) örneklerinde görülebilir. Yaşlandırılmamış numuneler (Şekil 4.32 (a)) ve 1440 saat 120 °C'de yaşlandırılmış örnekler (Şekil 4.32 (d)), substrat yüzeyindeki delaminasyonla birlikte lokal yapıştırıcı hasar modu sergilerler. Yaşlandırılmamış örneklerle mukayese edildiğinde, -10 °C'de 360 saat süreyle yaşlandırılan numunelerin yük taşıma kapasitesi %43 artışla 13473 N'a, 100 °C'de 168 saat yaşlandırılan numunelerin yük taşıma kapasitesi %43 artışla 13406 N'a yükselmiş ve 120 °C'de 1440

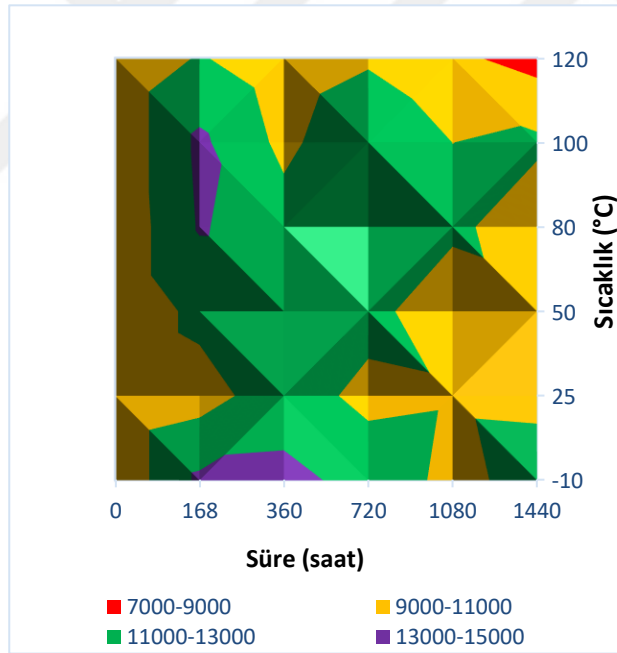
saat süre ile yaşlandırılan numunelerin yük taşıma kapasitesi de %12 düşüşle 8262 N'a gerilemiştir.

Buna ek olarak, sıcaklıktan bağımsız olarak sadece termal yaşlanma süresinin yük taşıma kapasitesi değerleri üzerindeki etkisi araştırılacak olursa, 1080 saate kadar tüm numunelerin yük taşıma kapasitesi değerleri genel olarak sarı renkten (9000-11000 N) yeşil renk aralığına (11000-13000 N) geçiş yapar ve daha sonra çoğunlukla sarı renk aralığına (9000-11000 N) geri döner (Şekil 4.33).





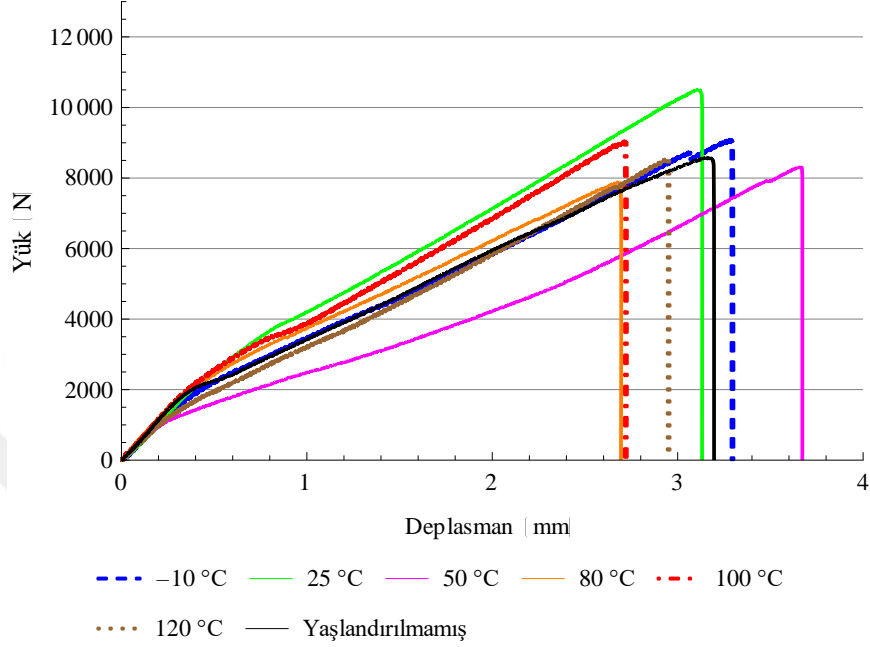
(a)



(b)

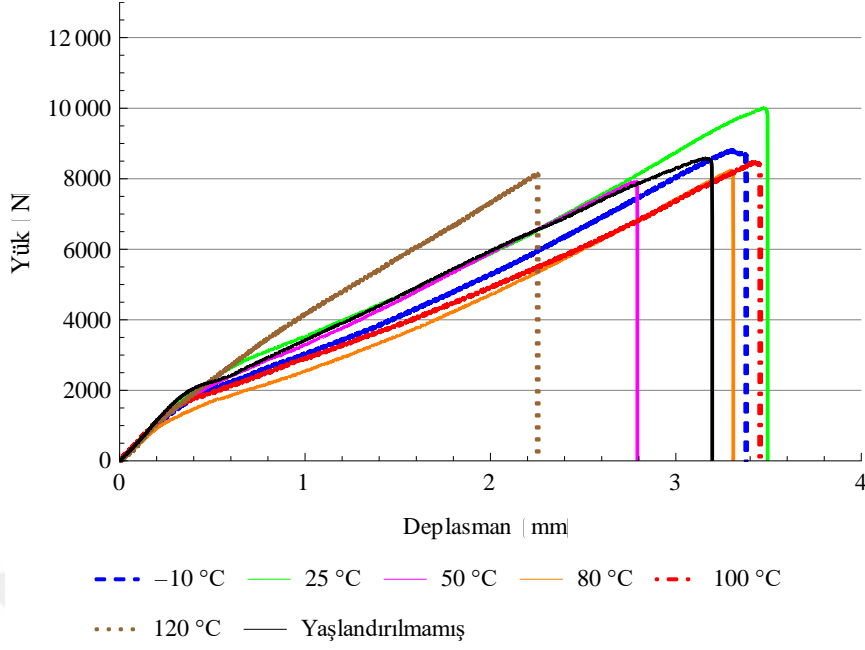
Şekil 4. 33 : Loctite 9466 ile yapıştırılan numunelere ait Yük – Süre - Sıcaklık grafiği (a) ve grafiğin üstten görünüşü (b).

4.3.2 Loctite 9461 ile yapıştırılmış numunelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu



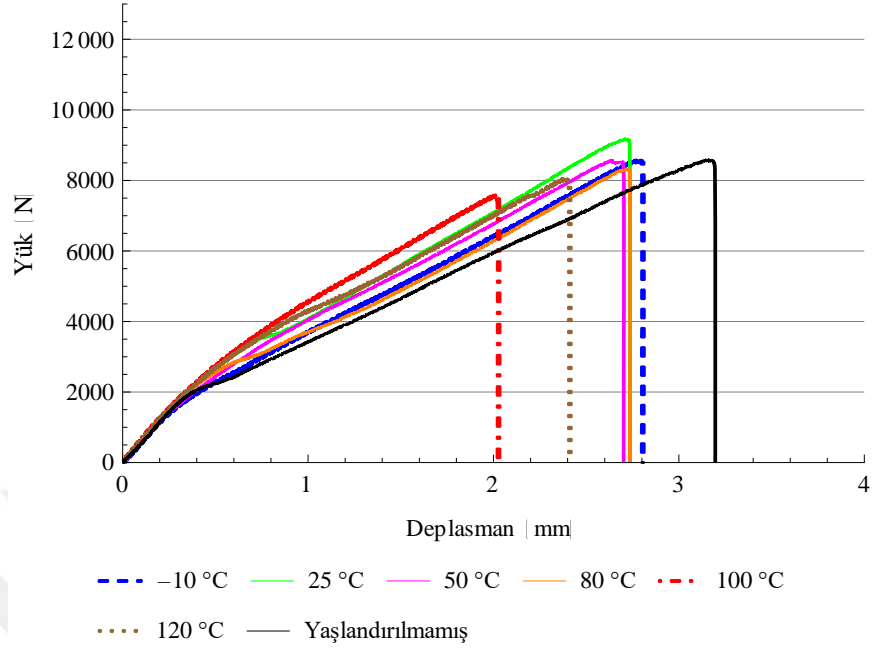
Şekil 4. 34 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, 168 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

168 saat yaşlandırılmış, Loctite 9461 ile yapıştırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri Şekil 4.34'te verilmiştir. 25 °C'de yaşlanan örneklerin maksimum yük taşıma kapasitesi değerine sahip olduğu ve 50 °C'de yaşlandırılanların, yaşlandırılmamış örneklere kıyasla en yüksek uzamaya sahip olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.34).



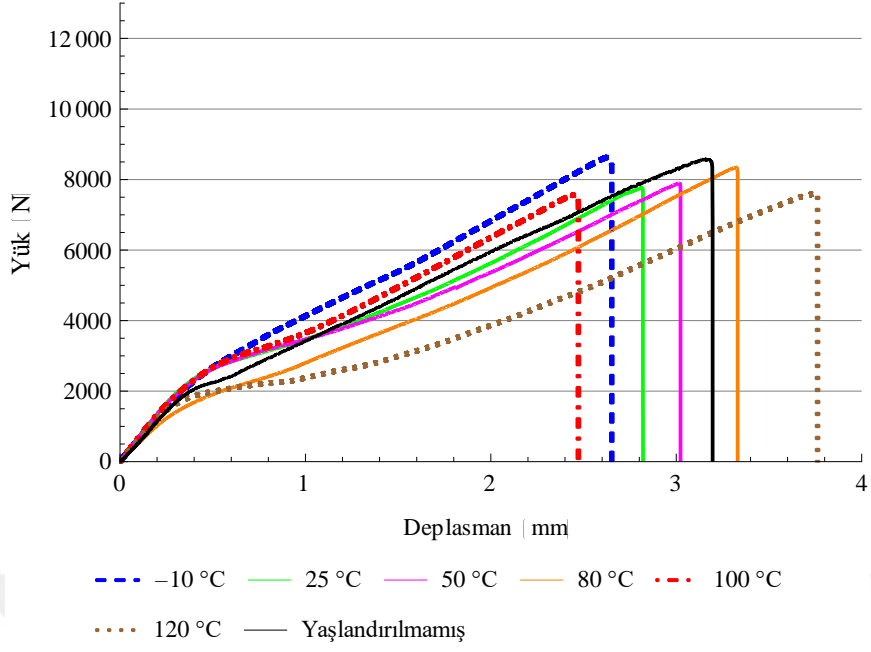
Şekil 4. 35 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, 360 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

360 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük – Deplasman eğrileri Şekil 4.35’te verilmiştir. Şekil 4.34 ve 4.35 birlikte değerlendirildiğinde, 168 ve 360 saatlik yaşlandırma sonucunda tüm örneklerin yük taşıma kapasitelerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca termal yaşlandırma maruziyet süresinin Loctite 9461 tek bindirmeli yapıştırılmış kompozit numunelerin dayanım ve deplasman değerleri üzerinde bir azaltıcı etkiye sahip olduğu şekil 4.34 ve 4.35’ten görülebilir.

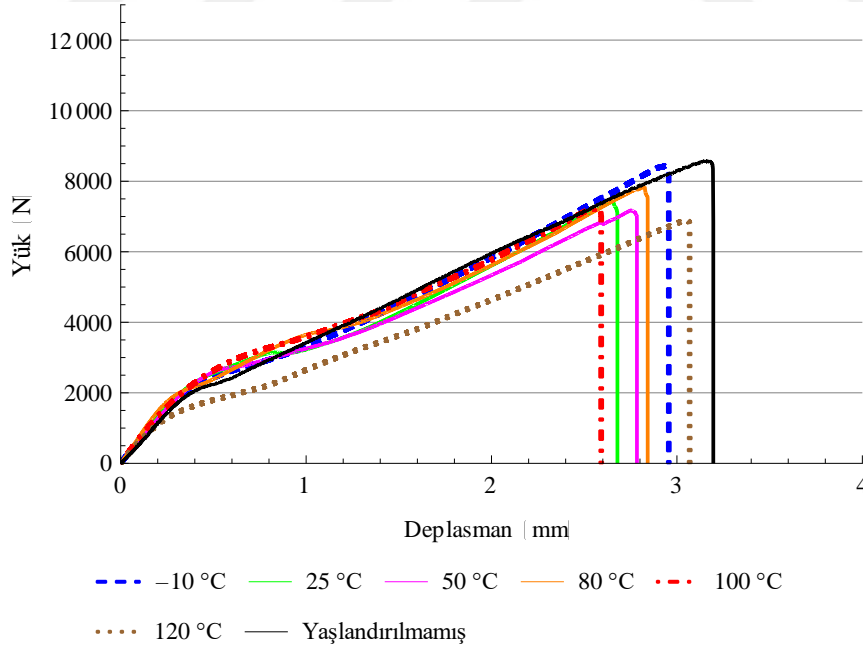


Şekil 4. 36 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, 720 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

Şekil 4.36'da 720 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük – Deplasman eğrileri verilmiştir. Örneklerin yük taşıma kapasiteleri 720 saatlik yaşlandırmadan sonra azalmaktadır. Yukarıda ifade edildiği gibi, termal yaşlanma maruziyet süresinin numunelerin kırılma noktaları üzerindeki bu azaltıcı etkisi geçerliliğini 720 saat yaşlanma sonunda da sürdürmektedir (Şekil 4.36).

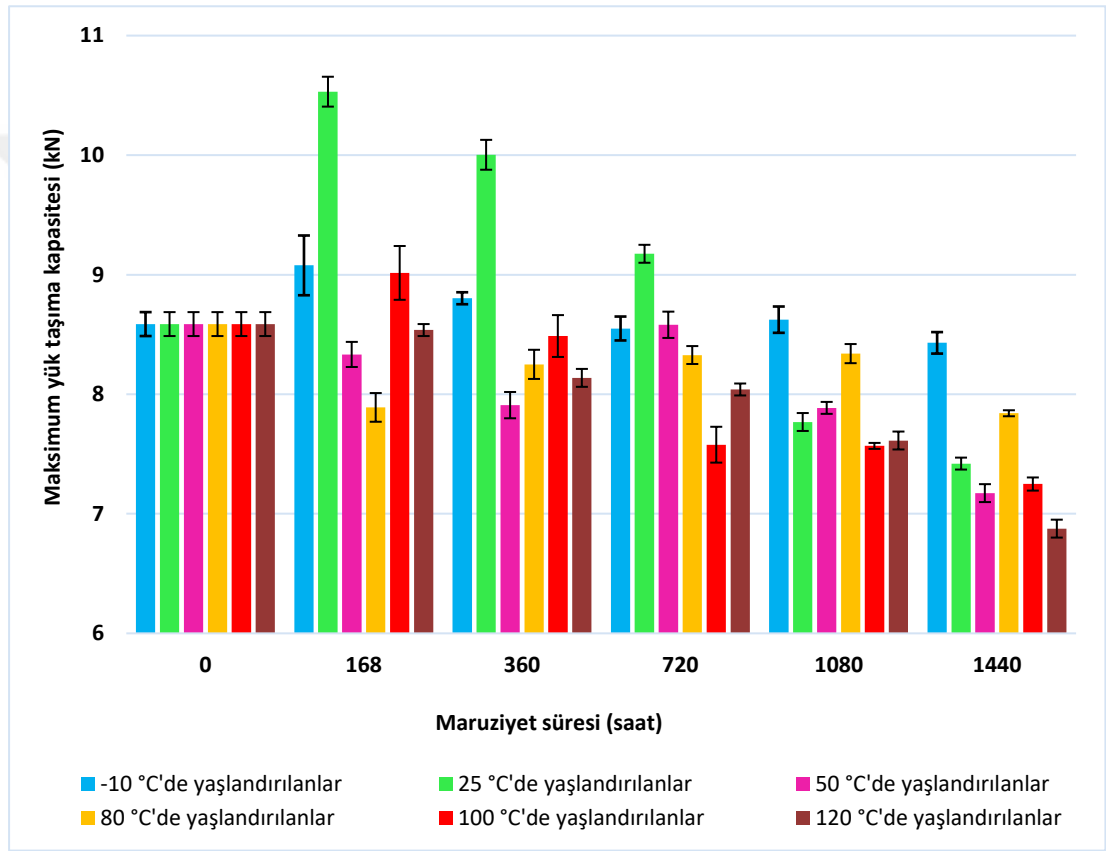


Şekil 4. 37 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, 1080 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.



Şekil 4. 38 : Loctite 9461 ile yapıştırılmış, 1440 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

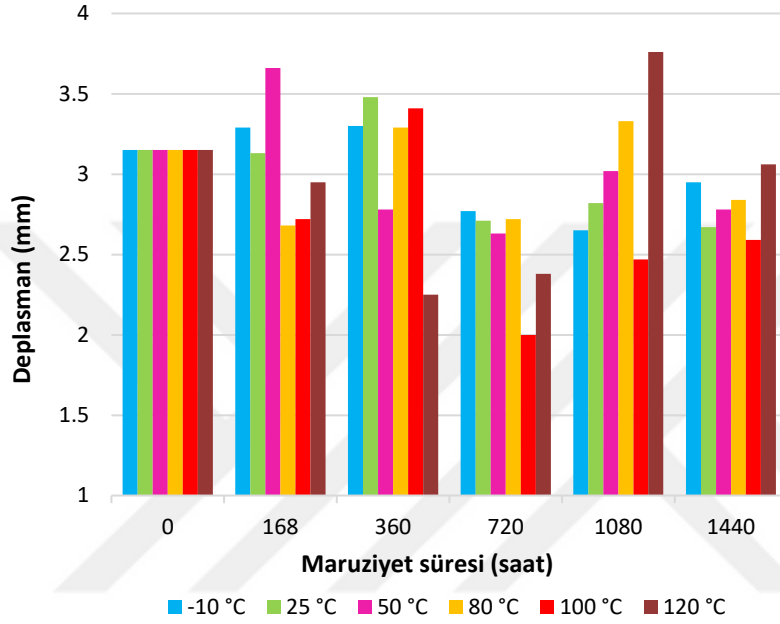
Tek bindirmeli kompozit numunelerin 720, 1080 ve 1440 saat yaşlanması sonrasında elde edilen deplasman değerleri göz önünde bulundurulduğunda (Şekil 4.36-4.38), 100 °C'de yaşlandırılmış örneklerin deplasman değerleri diğerlerine göre en düşüktür. 1080 saat ve 1440 saatin sonunda en düşük kopma yükü değerleri 100 ve 120 °C'de yaşlandırılanlara aittir. 1440 saatlik termal yaşlandırma sonunda, termal yaşlanma sürecinin yaşlı örneklerin kırılma noktaları üzerinde zararlı bir etkisi olduğu ve en yüksek etkinin 120 °C'de yaşlandırılan numunelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 39 : Loctite 9461 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Maruziyet süresi grafiği.

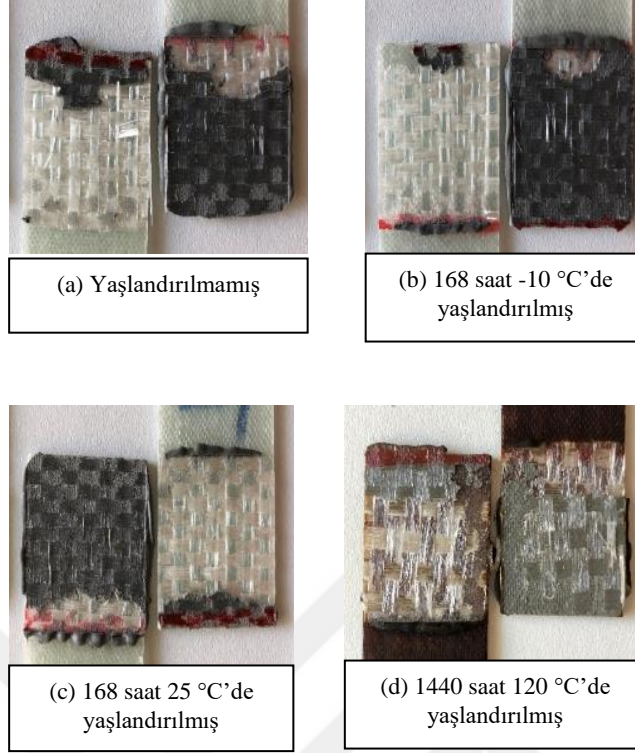
Şekil 4.39'da Loctite 9461 ile yapıştırılmış numunelerin Maksimum yük taşıma kapasitesi – Maruziyet süresi grafiği verilmiştir. Buna göre, 720 saate kadar yaşlandırılan numuneler arasında en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olanlar oda sıcaklığında (25 °C) yaşlandırılanlardır, ancak yük taşıma kapasitesi yaşlandırılmamış örneklere kıyasla 720 saat sonra azalır. 50 °C'de yaşlandırılmış örnekler

incelendiğinde, yük taşıma kapasitesinin 720 saat sonunda zirve yaptığı ve bundan sonra bir düşüş gösterdiği bulunmuştur. -10 ve 80 °C'de yaşlandırılan numuneler 1440 saate kadar yaşlandırılmamış numunelerin yük taşıma kapasitesine yakın değerleri gösterirken, 100 ve 120 °C'de yaşlandırılanların yük taşıma kapasiteleri ise termal yaşlanma maruziyeti ile sürekli olarak azalan bir davranış sergilerler.



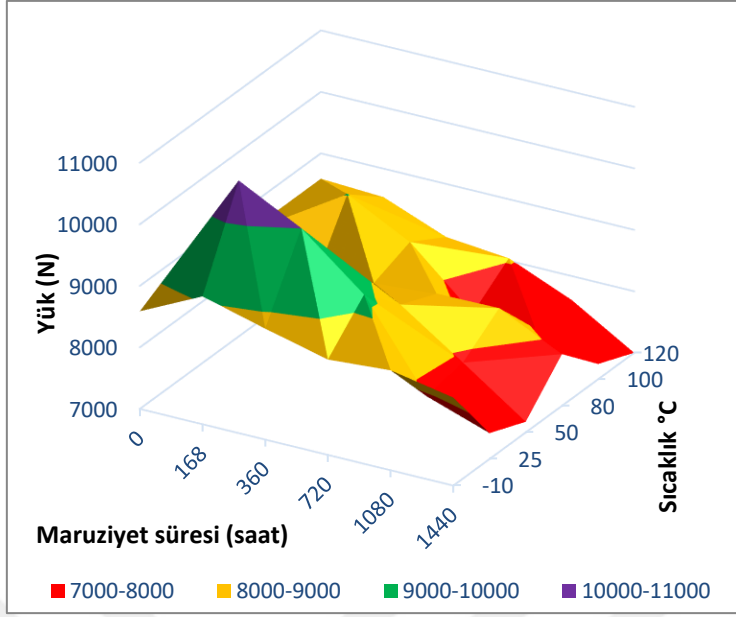
Şekil 4. 40 : Loctite 9461 ile yapıştırılan numunelere ait Deplasman – Maruziyet süresi grafiği.

Tüm yaşlandırma süreçleri için, Loctite 9461 ile yapıştırılmış numunelerin çekmede kesme mukavemeti esnasında göstermiş olduğu deplasman değerleri Şekil 4.40'da verilmiştir. Buna göre; 25, 50, 80, 100 °C'de yaşlandırılan numuneler en düşük deplasman değerlerini 720 saat yaşlandırmadan sonra göstermektedirler.

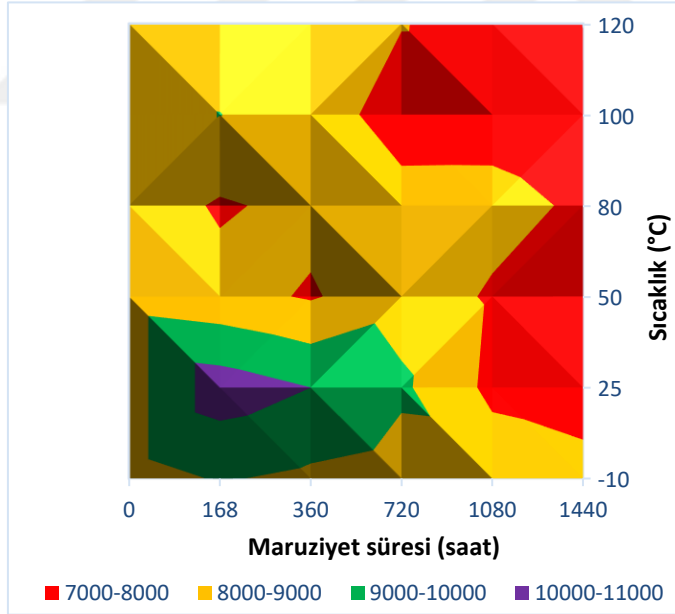


Şekil 4. 41 : Loctite 9461 ile yapıştırılan numunelere ait kırılma yüzeyleri.

Loctite 9461 ile yapıştırılan kompozit numunelerin kırılma yüzeyleri, Şekil 4.41'de gösterilmiştir. -10 °C'de (Şekil 4.41 (b)) ve 25 °C'de (Şekil 4.41 (c)) 168 saat yaşlandırılan numunenin neredeyse tüm kırılma yüzeyinin, kompozit substrat yüzeyin kohezif hasar modundan kaynaklanan bir delaminasyon hasarına sahip olduğu görülmüştür. Kompozit substratın lokal delaminasyonu ve yapıştırıcı hasar modları, yaşlandırılmamış (Şekil 4.41 (a)) ve 1440 saat 120 °C'de yaşlandırılmış (Şekil 4.41 (d)) numunelerin kırılma yüzeylerinde gözlenir. Yaşlandırılmamış ile karşılaştırıldığında, 25 °C'de 168 saat süreyle yaşlandırılan örneklerin yük taşıma kapasitesi %23 artışla 10531 N'a çıkarken, 120 °C'de 1440 saat süreyle yaşlandırılan örneklerin yük taşıma kapasitesi ise %20 azalışla 6876 N'a geriler.



(a)

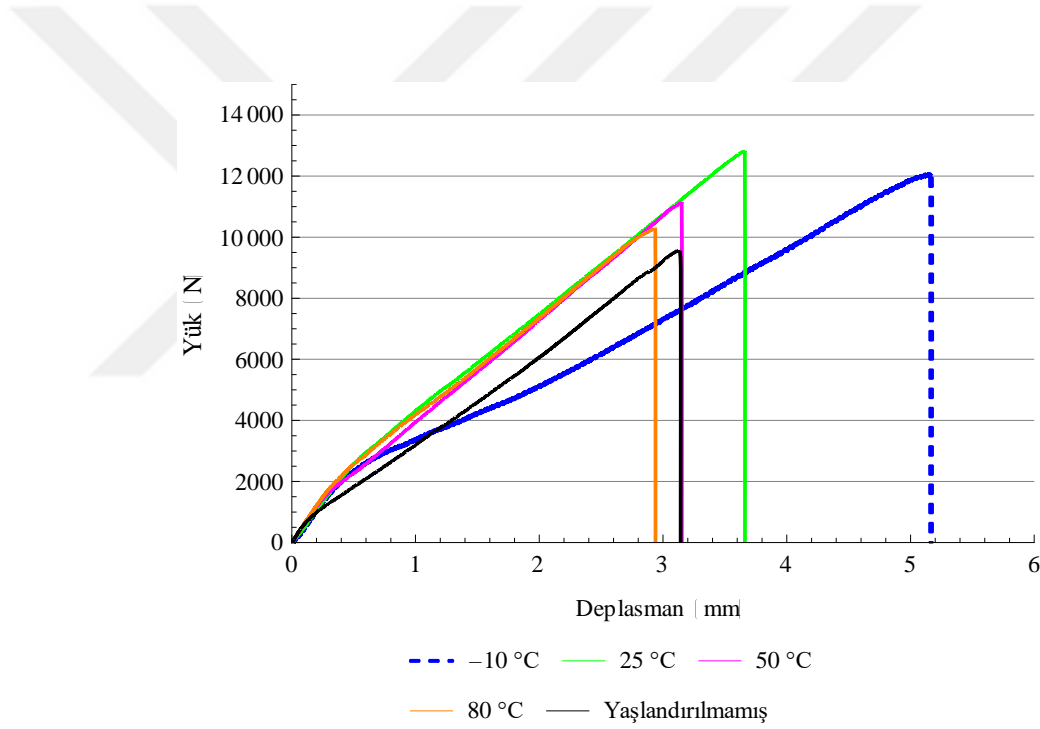


(b)

Şekil 4. 42 : (a) Loctite 9461 ile yapıştırılan numnelere ait Yük – Süre - Sıcaklık grafiği ve (b) grafiğin üstten görünüşü.

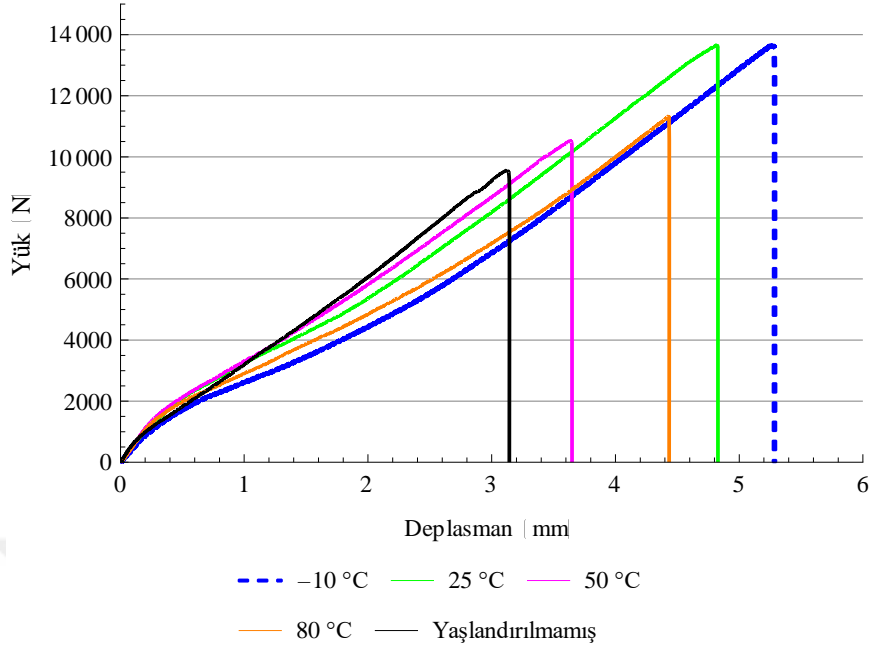
Şekil 4.42’de Loctite 9461 ile yapıştırılan numunelerin Yük – Maruziyet süresi – Sıcaklık grafiği verilmiştir. Termal yaşlanma süresinin yük taşıma kapasitesi değerleri üzerindeki etkisi yaşlandırma sıcaklıkları göz önüne alınmadan analiz edilirse, yük taşıma kapasitesi değerleri genellikle 1080 saat yaşlandırmadan sonra sarı renk aralığından (8000-9000 N) kırmızı renk aralığına (7000-8000 N) dönüşmüştür. Öte yandan, grafik yaşlandırma süresine bakılmaksızın incelendiğinde, sıcaklık yükseldikçe yük taşıma kapasitesi değerlerinin yeşil (9000-10000 N) ve mor renk aralıkları (10000-11000 N) kaybolur (Şekil 4.42 (b)).

4.3.3 DP 460 ile yapıştırılmış numunelerin mekanik özelliklerinin karakterizasyonu



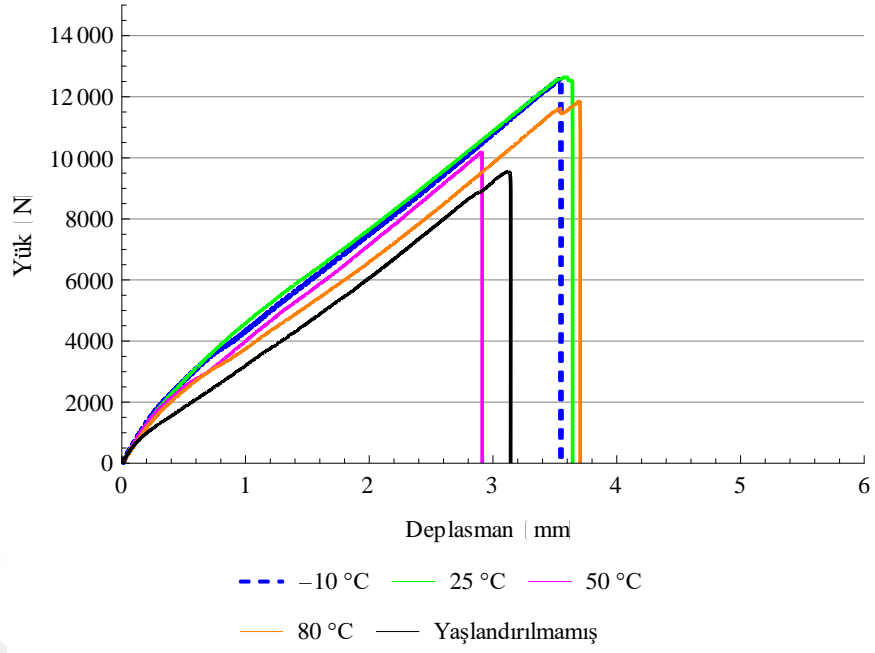
Şekil 4. 43 : DP 460 ile yapıştırılmış, 168 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

Şekil 4.43’te 168 saat yaşlandırılmış, DP 460 ile yapıştırılmış numunelere ait Yük – Deplasman eğrileri verilmiştir. Bunlar içerisinde en yüksek yük taşıma kapasitesi ve deplasman değeri -10 °C’de yaşlandırılanlara aittir. En düşük yük taşıma kapasitesi hiç yaşlandırılmamış olanlara ve en düşük deplasman değeri de 80 °C’de yaşlandırılanlara aittir. 168 saat yaşlandırılanlar tüm numunelerin yük taşıma kapasitesi yaşlandırılmamış olanlara kıyasla daha yüksektir.



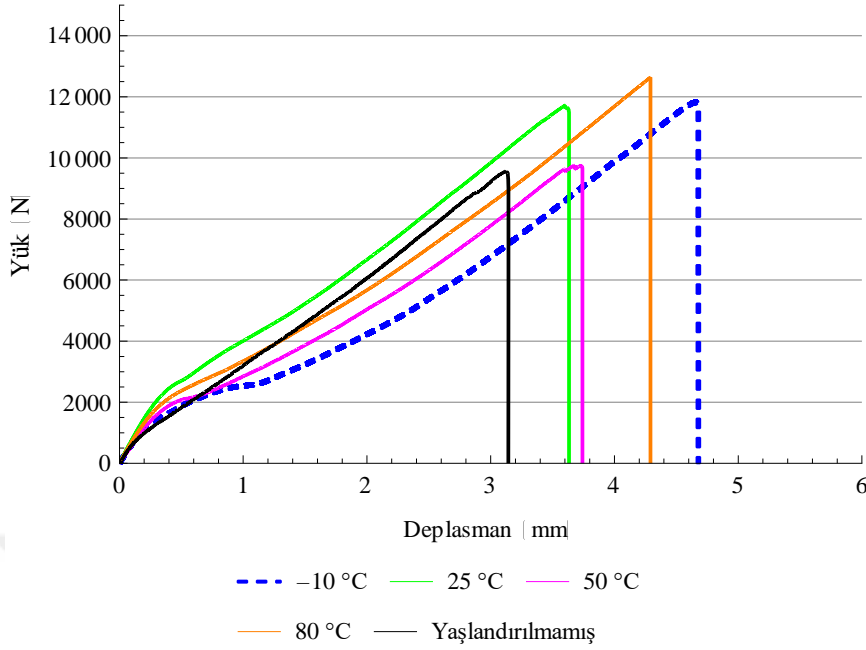
Şekil 4. 44 : DP 460 ile yapıştırılmış, 360 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

Şekil 4.44'te DP 460 ile yapıştırılmış, 360 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük – Deplasman grafiği verilmiştir. 360 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozit numunelerden en yüksek yük taşıma kapasitesi ve deplasmana sahip olan -10 ve 25 °C'de yaşlandırılanlardır. 360 saat yaşlandırma neticesinde tüm numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve deplasman değerleri yaşlandırılmamışlardan yüksektir. 168 ve 360 saat yaşlandırılanlar arasında en yüksek yük taşıma kapasitesi ve yer değiştirme değerleri, 25 ve -10 °C'de yaşlandırılanlarda meydana gelmektedir; -10 ve 25 °C'de 360 saat yaşlandırılmış örneklerin yük taşıma kapasiteleri %30'a kadar bir artış gösterirken, yaşlandırılmamış numunelerin yük taşıma kapasitesi 9500 N civarındadır. 168 ve 360 saatlik yaşlanmadan sonra, -10 °C'de yaşlandırılan örneklerin kopma uzaması, yaşlandırılmamışlardan %65-70 daha yüksektir.



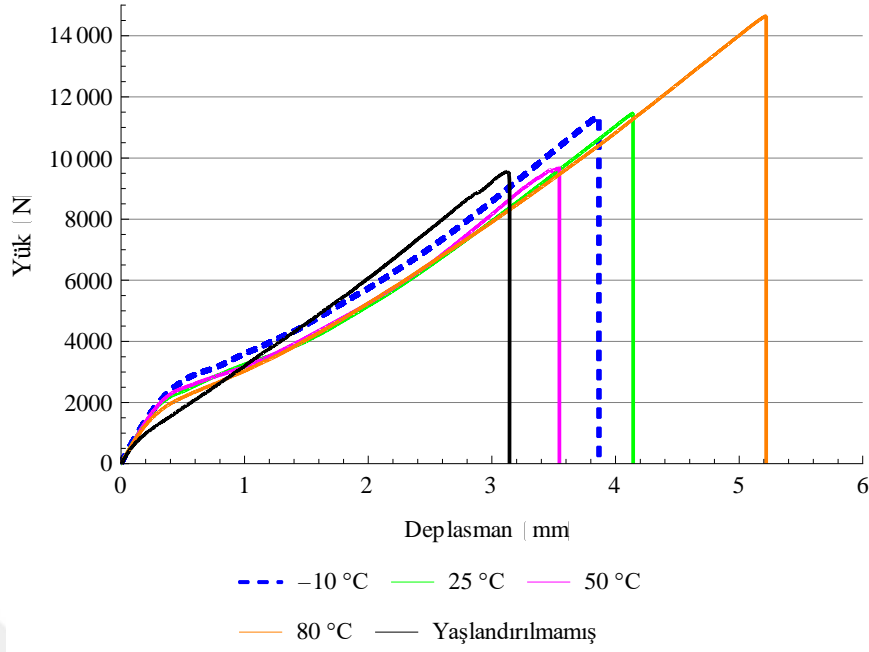
Şekil 4. 45 : DP 460 ile yapıştırılmış, 720 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

Şekil 4.45'te, 720 saat yaşlandırmanın etkisi ile tüm numunelerin yük taşıma kapasiteleri ile deplasman değerlerinin düştüğü görülmektedir. En düşük yük taşıma kapasitesi yaşlandırılmamışlara aittir, en düşük deplasman değeri 50 °C'de yaşlandırılanlara aittir. En yüksek yük taşıma kapasitesinin -10 ve 25 °C'de yaşlandırılanlara ait olduğu gözlemlenirken en yüksek deplasman değeri 80 °C'de yaşlandırılanlara aittir.



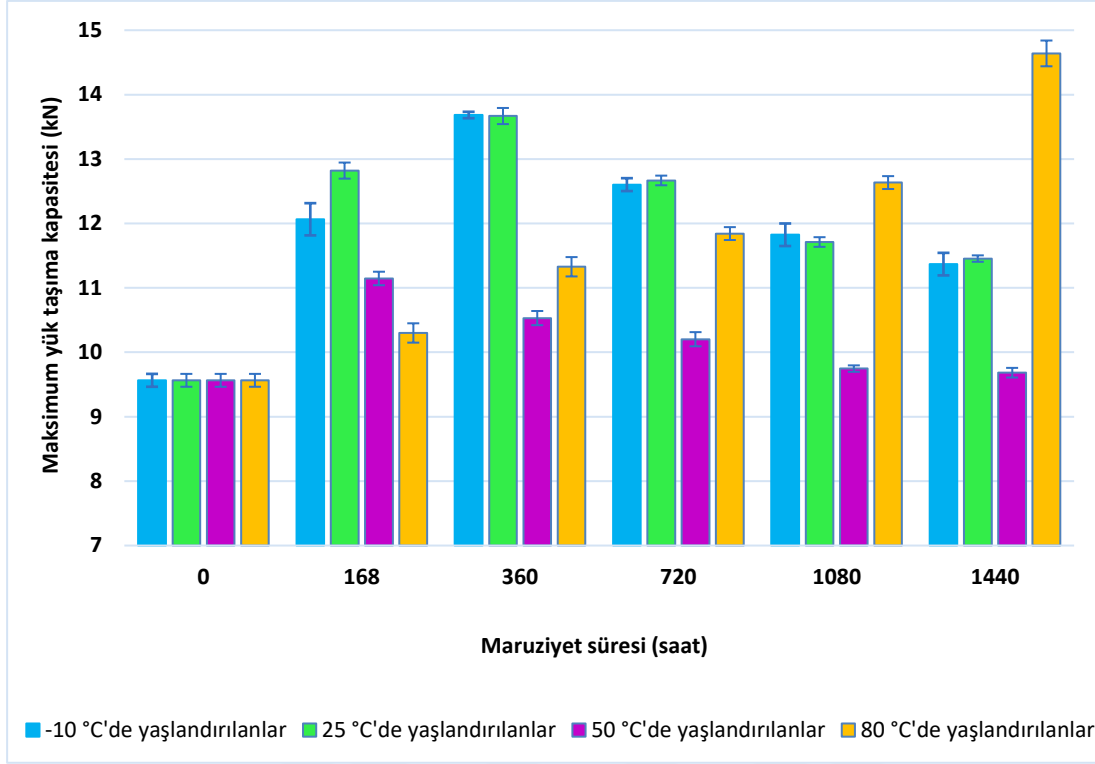
Şekil 4. 46 : DP 460 ile yapıştırılmış, 1080 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

Şekil 4.46’da, 1080 saat yaşlandırma neticesinde en yüksek yük taşıma kapasitesinin 80 °C’de yaşlandırılanlara ve en yüksek kopma uzamasının da -10 °C’de yaşlandırılanlara ait olduğu görülmektedir. -10 ve 25 °C’de yaşlandırılanların 80 °C’de yaşlandırılanlara yakın kopma mukavemeti değeri gösterdiği grafikten çıkan sonuçlar arasındadır. En düşük kopma mukavemeti değerini hiç yaşlandırılmamışlar ve 50 °C’de yaşlandırılanlar gösterirken, en düşük kopma uzaması değeri yaşlandırılmamış numunelere aittir.

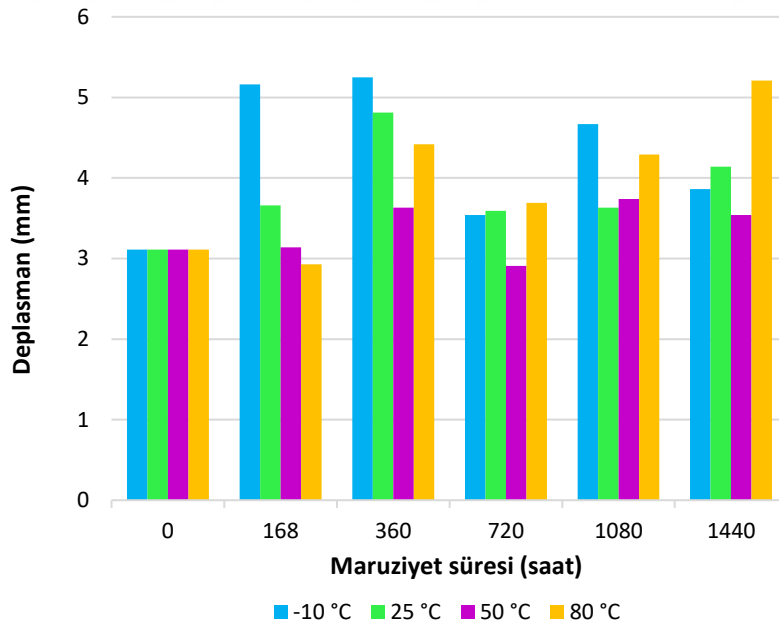


Şekil 4.47 : DP 460 ile yapıştırılmış, 1440 saat yaşlandırılmış numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

Şekil 4.47’de, 1440 saat yaşlandırmanın etkisi ile maksimum kopma mukavemeti ve kopma uzamasının 80 °C’de yaşlandırma geçirmiş olanlara ait olduğu görülmektedir. Minimum yük taşıma kapasitesi ve deplasman değerleri ise yaşlandırılmamış olanlar ile 50 °C’de yaşlandırılanlara aittir. DP 460 ile yapıştırılmış örneklerin 720, 1080 ve 1440 saat yaşlandırma sonuçlarına göre (Şekil 4.45-4.47), -10, 25 ve 80 °C’de yaşlandırılmış numunelerin en yüksek yük taşıma kapasitesi ve kopma uzamasına sahip oldukları görülmektedir. Bununla birlikte, 80 °C’de 1440 saat boyunca yaşlandırılan örneklerin maksimum yük taşıma kapasitesi ve deplasman değerleri, 1440 saat boyunca diğer sıcaklıklarda yaşlandırılan ve yaşlandırılmamış örneklerden oldukça yüksektir. Yaşlandırılmamış örneklere ait yük taşıma kapasitesi ve deplasman değeri, sırasıyla, ortalama 9500 N ve 3.10 mm’dir. 1440 saatlik termal yaşlandırmadan sonra (Şekil 4.47), 50 °C’de yaşlandırılan numuneler haricinde diğerlerinin maksimum kırılma yükleri yüzde 15 ila 53 oranında artarken kırılma uzamaları yüzde 14 ila 67 arasında artmaktadır. 50 °C’de yaşlandırılan örneklerin tüm yaşlandırma periyotlarında yaşlandırılmamış olanların kopma uzaması ve kopma mukavemeti değerine yakın değerlerde seyrettiği grafiklerden çıkan sonuçlar arasındadır.



Şekil 4. 48 : DP 460 ile yapıştırılan numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal-yağ yaşlandırma maruziyet süresi grafiği.



Şekil 4. 49 : DP 460 ile yapıştırılan numunelere ait Deplasman – Maruziyet süresi grafiği.

Şekil 4.48 incelendiğinde, -10 ve 25 °C'de yaşlandırılmış numunelerin 360 saatlik yaşlandırmanın sonunda en yüksek yük taşıma kapasitesi değerine ulaştığı, ancak 50 °C'de yaşlandırılan örneklerin yük taşıma kapasitelerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Öte yandan, 80 °C'de yaşlandırılan örneklerin yük taşıma kapasiteleri termal yaşlanma süresi ile doğru orantılı olarak artmakta ve en yüksek değerini 1440 saat yaşlandırma sonunda almaktadır.

Şekil 4.49'da ise DP 460 ile yapıştırılmış numunelerdeki deplasmanın termal-yağ yaşlandırma maruziyet süresi ile değişimi görülmektedir.

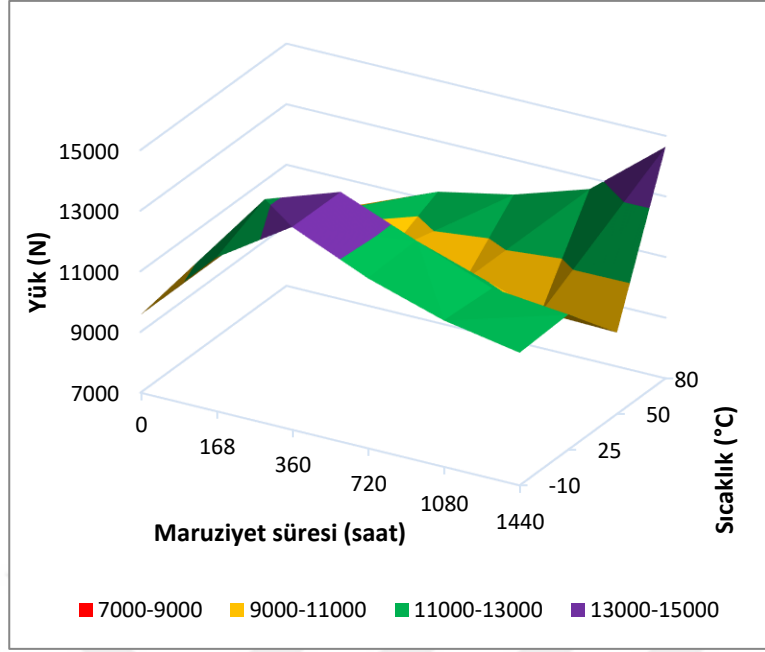


Şekil 4. 50 : DP 460 ile yapıştırılan numunelere ait kırılma yüzeyleri.

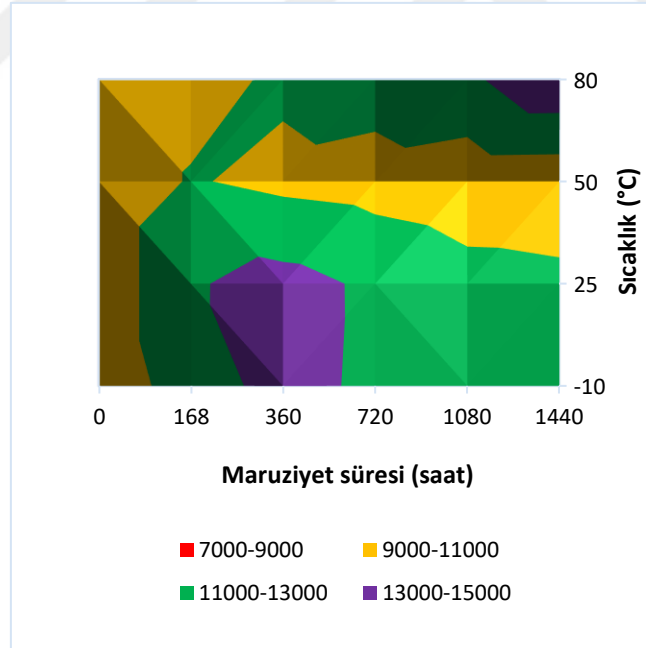
DP 460 ile yapıştırılmış yaşlandırılmamış kompozit numunenin kırılma yüzeyinde lokal yapıştırıcı hasar modu ve lokal kohezif hasar modu gözlenir (Şekil 4.50 (a)). Buna ek olarak, 50 °C'de 1440 saat yaşlandırılmış örneklerin (Şekil 4.50 (c)) hemen hemen tüm kırılma yüzeyinde yapıştırıcı hasar modu gözlenir ve yapışma alanında

birçok yapışkan parça görülebilir. 360 saat boyunca $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de (Şekil 4.50 (b)) yaşlandırılmış örneklerin kırılma yüzeyi delaminasyona uğramış kohezif substrat hasar modu gösterirken, 1440 saat $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yaşlandırılan örneklerin kırılma yüzeyinde (Şekil 4.50 (d)) kompozit yüzeyin temiz bir şekilde delaminasyonu görülür. $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 1440 saat boyunca yaşlandırılan numuneler, cam elyaf takviyeli polimer kompozit substrat ve yapıştırıcı arasında iyi düzeyde bir yapışma olduğunu gösterir. Yaşlandırılmamışlara kıyasla, DP 460 ile yapıştırılmış, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 360 saat süreyle yaşlandırılmış örneklerin yük taşıma kapasitesi %26 oranında artarak 12065 N 'a, 1440 saat $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yaşlandırılanları ise %53 oranında artış göstererek 14640 N 'a ulaşmıştır. Kompozit substrat yüzeyinde temiz bir delaminasyon göstererek kohezif hasar moduna sahip numunelerin yük taşıma kapasitelerinin, birleşik hasar modu ve yapıştırıcı hasar modu gösteren örneklerin yük taşıma kapasitesi değerlerinden daha yüksek değerler gösterdiği, çekmede kesme mukavemeti testlerine göre elde edilen eğriler yardımıyla söylenebilir. Bunun tersine, sadece yapıştırıcı hasar modu gözlemlenen örneklerin nispeten düşük yük taşıma kapasitelerinin olduğu fark edilmiştir.

Örneklerin bazıları termal yaşlanmaya maruz kalmasına rağmen daha yüksek bir kopma mukavemeti değerine sahiptir (örn., $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 1440 saat yaşlandırılan DP 460 numuneleri, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 168 saat yaşlandırılan Loctite 9461 numuneleri ve $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 168 saat yaşlandırılan Loctite 9466 numuneleri). Bu örneklerin daha yüksek yük taşıma kapasitelerine sahip olmalarının nedeni, madde yapıştırıcı moleküller ve substrat kompozit malzeme molekülleri arasındaki polimerizasyonun daha iyi bir seviyeye ulaşması olabilir. Polimerizasyon seviyesindeki iyileşme aynı zamanda yapıştırıcı ile kompozit substrat arasında daha yüksek bir mekanik bağlama seviyesine de yol açabilir. Bu nedenle, geliştirilmiş polimerizasyon seviyesi, yapıştırılmış tek bindirmeli numunelerin, çekmede kesme mukavemeti testleri sırasında kompozit alt-tabakaya en yakın olan en üst tabakadan yırtılmasına neden olur. Bu testler sırasında substratta delaminasyon gösteren kohezif hasar modu olan numunelerin en yüksek yük taşıma kapasitesi değerlerine sahip olması yukarıdaki ifadeyi doğrular niteliktedir.



(a)



(b)

Şekil 4. 51 : (a) DP 460 ile yapıştırılan numunelere ait Yük – Süre - Sıcaklık grafiği ve (b) grafiğin üstten görünüşü.

Şekil 4.51 incelendiğinde, yük taşıma kapasitesi değerleri 50 °C'nin dışındaki bölgelerde çoğunlukla yeşil renk aralığındadır (11000-13000 N), bu da termal yaşlandırmanın yük taşıma kapasitesi değerleri üzerinde pozitif bir artışa neden olduğu anlamına gelmektedir.

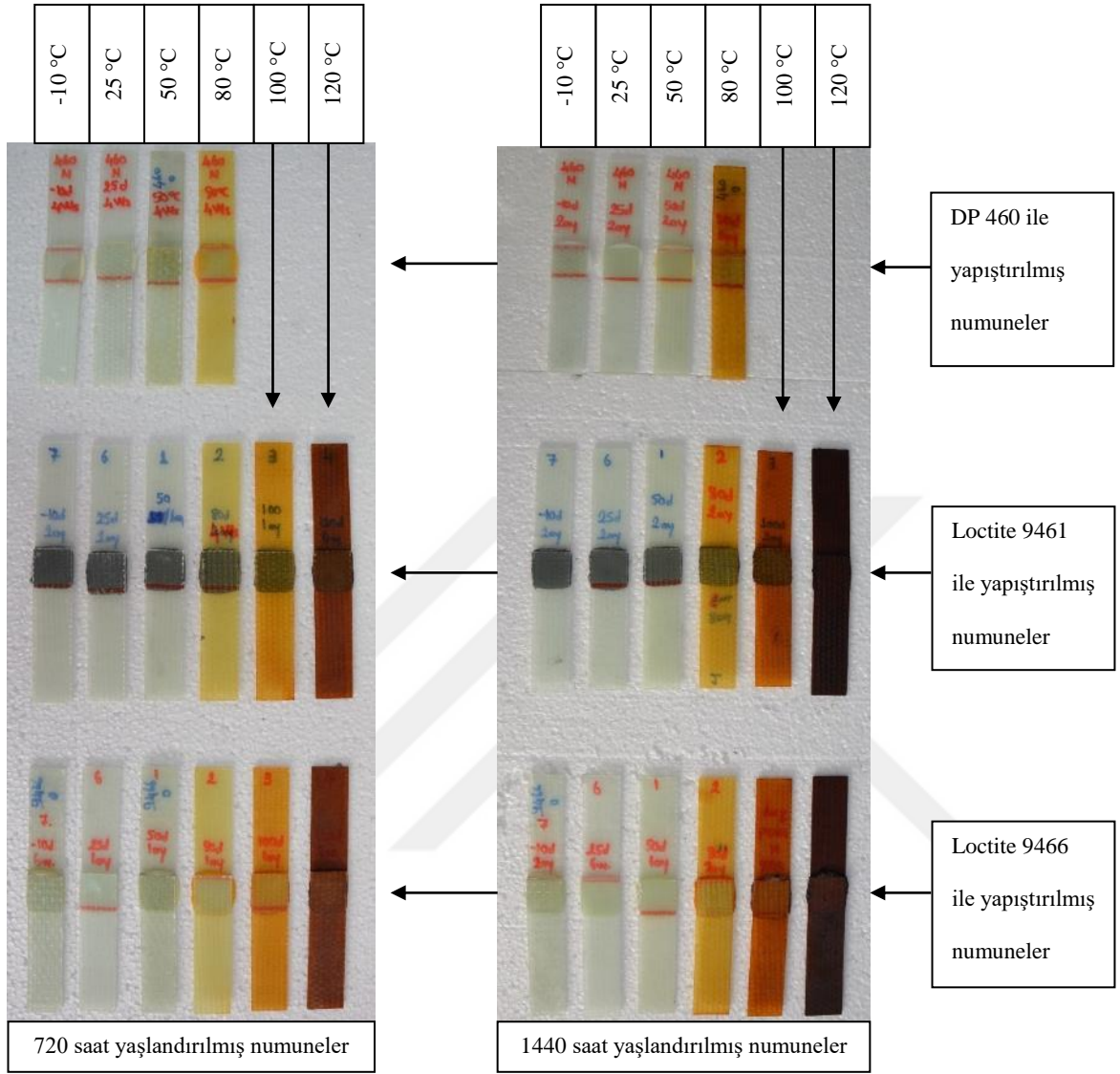
Flore ve diğ. [111] kimyasal yaşlanmanın cam elyaf/epoksi kompozitlerin statik ve yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini tespit etmek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda, cam elyaf/epoksi takviyeli kompozit numuneler için en önemli hasar faktörü, termal bozunmadır. Hasarın seviyesini belirlemek için en uygun yöntem olarak kilo kaybı gösterilmiştir. Buna ek olarak, 120 ve 150 °C'de, başlangıçta gerilme mukavemeti hafifçe azalmış, ancak 2000 saatlik bir yaşlanmadan sonra orijinal değerine dönmüştür. 180 °C'de 2000 saatlik bir yaşlandırma sonrasında çekme mukavemetinde %20'lik bir kayıp ölçülebilir. Dayanımdaki azalma şu şekilde açıklanmıştır; bu azalma matris sisteminin kırılabilirliğinden kaynaklanmıştır, bu durum, erken çatlaklara neden olmuş ve lifler ile matris arasında optimum yük transferini önlemiştir [111].

Yaşlanma süresi ile numunelerin mukavemetindeki azalmanın nedeni, matris sisteminin ve epoksi bazlı yapıştırıcıların gevrekleşmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkan erken çatlaklar ve yüzey bozunması olabilir. Bu mikro çatlaklar ve yüzey bozulmaları nedeniyle, hasarlı matris, fiber matris sistemine yapıştırıcı tarafından iletilmesi gereken optimum yük iletimini engeller.

Öte yandan, DP 460 yapıştırıcısı ile birleştirilmiş, en yüksek yaşlandırma sıcaklığı olan 80 °C'de yaşlandırılmış kompozit numunelerin kopma mukavemetleri, yaşlanma süresinin uzamasıyla artmaktadır. Bazı durumlarda, yaşlanma periyodunun uzaması ile yük taşıma kapasitesinin artmasının sebebinin, yapıştırıcı ile matris sistemi arasındaki polimerizasyon seviyesinin post-kürleme etkisi ile artışından kaynaklandığı söylenebilir. Artan polimerizasyon seviyesiyle, matris ve yapıştırıcı arasında daha güçlü birleştirme kuvveti meydana gelir.

4.3.4 Yaşlandırılmış numunelerin renk değişimi

Yaşlandırılmış örneklerdeki en belirgin değişiklik, çıplak gözle görülebilen renk değişimidir. Tek bindirmeli yapıştırılmış kompozit numuneler başlangıçta açık yeşil renkteyken termal yaşlanma sıcaklığı arttıkça kahverengi tonlarına doğru dönüşür ve en koyu halini 120 °C'de alır. [112]'e göre kompozit malzemenin üst tabakası, sıcaklık yükseldikçe daha koyu bir renk almaya başlar. Bu etki, tüm görünür alanda (400-700 nm) radyasyonun emilmesine neden olan oksidasyon ürünlerinden kaynaklanır. Şekil 4.52, yaşlanma sıcaklığının termo-oksidatif mekanizmasının renk değişiminin ana nedeni olduğunu ortaya koymaktadır. Farklı yaşlandırma sürelerinde fakat aynı sıcaklıkta yaşlandırılmış tüm numuneler dikkate alındığında, termal yaşlanma maruziyet süresinin renk değişimlerine küçük bir katkısı olduğu görülmektedir.

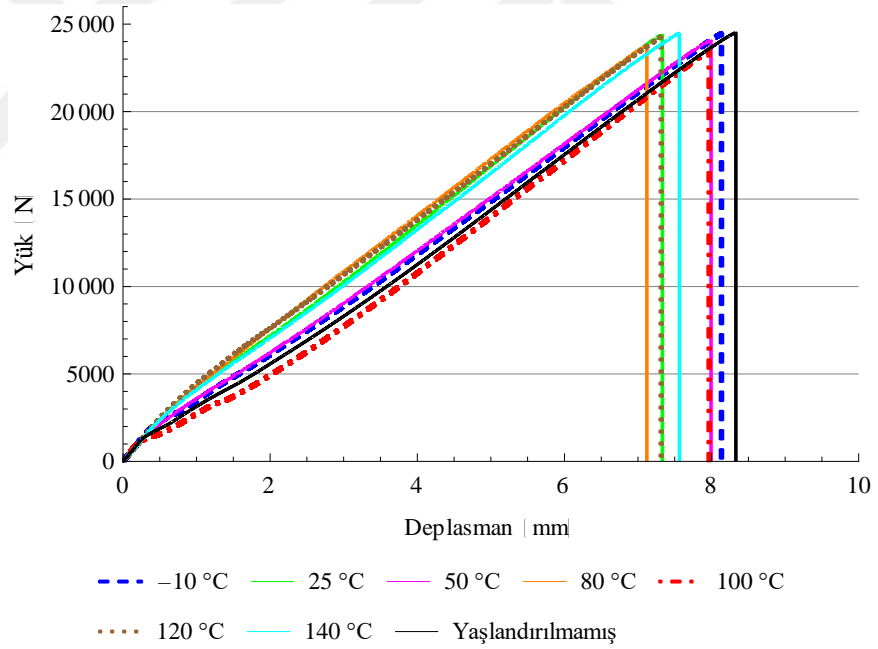


Şekil 4. 52 : Yaşlandırılmış kompozit numunelerin renk değişimi.

4.4 Termal-yağ Yaşlandırmanın Cam Elyaf/Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Özelliklerine Etkileri

4.4.1 Termal-yağ yaşlandırmanın mekanik özelliklere etkisi

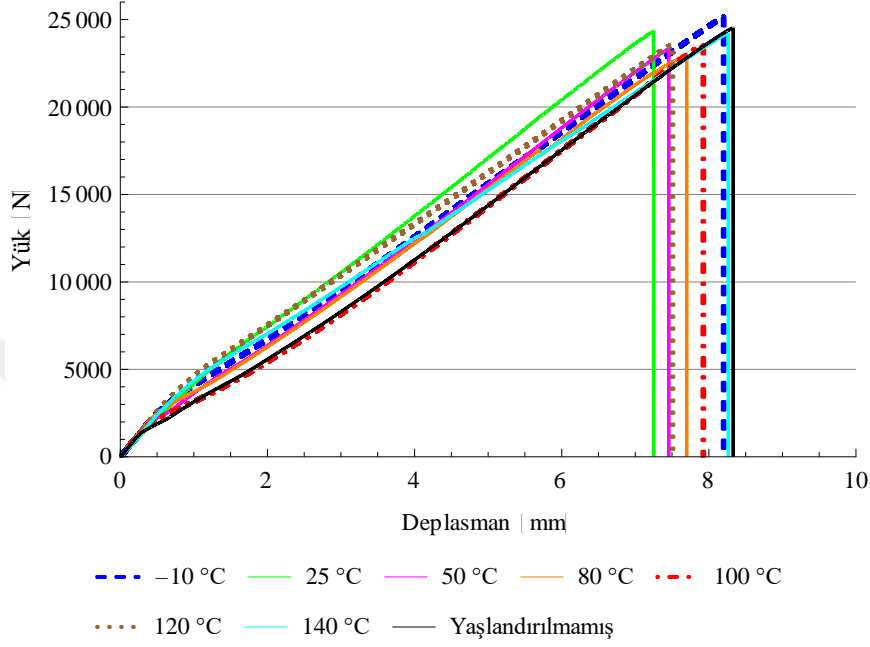
Dış yüklere karşı gösterilen tepki mekanik davranış olarak adlandırılır. Bu davranış biçimi de mekanik özelliği belirler. Uygulanan dış kuvvete karşı gerilim ve şekil değişimi deneysel olarak belirlenir. Bu çalışmada mekanik özelliklerin belirlenmesi için çekme testleri yapılmıştır. Her yaşlandırma periyodu için farklı sıcaklıklarda termal yaşlandırmadan sonra elde edilen numuneler, çekme testlerine tabi tutulmuş ve sonuçlar, her bir yaşlanma dönemi için karşılaştırmalı Yük - Deplasman grafiğine dönüştürülmüştür. Çekme testleri, oda sıcaklığında, bir Shimadzu 100 kN kapasiteli cihaz kullanılarak, 1 mm/dk.'lık bir hızla ve parametre başına en az dört numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.53 : 24 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

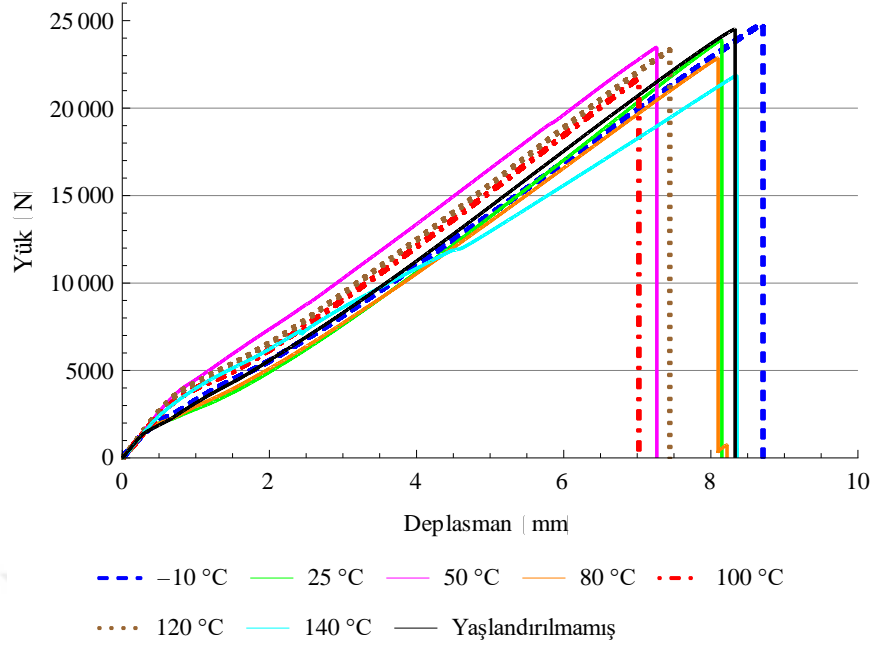
24 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozit numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri Şekil 4.53'te verilmiştir. Bu grafiğe göre; yaşlandırılmamış örneklere kıyasla yaşlandırılmış örneklerin yük taşıma kapasitelerinde anlamlı bir

değişiklik gözlenmemiştir. 24 saatlik yaşlandırma, kompozit numunelerin deplasman değerlerini her yaşlandırma sıcaklığındaki numuneler için düşürmüş ve böylece proses numuneleri gevrekletmiştir.



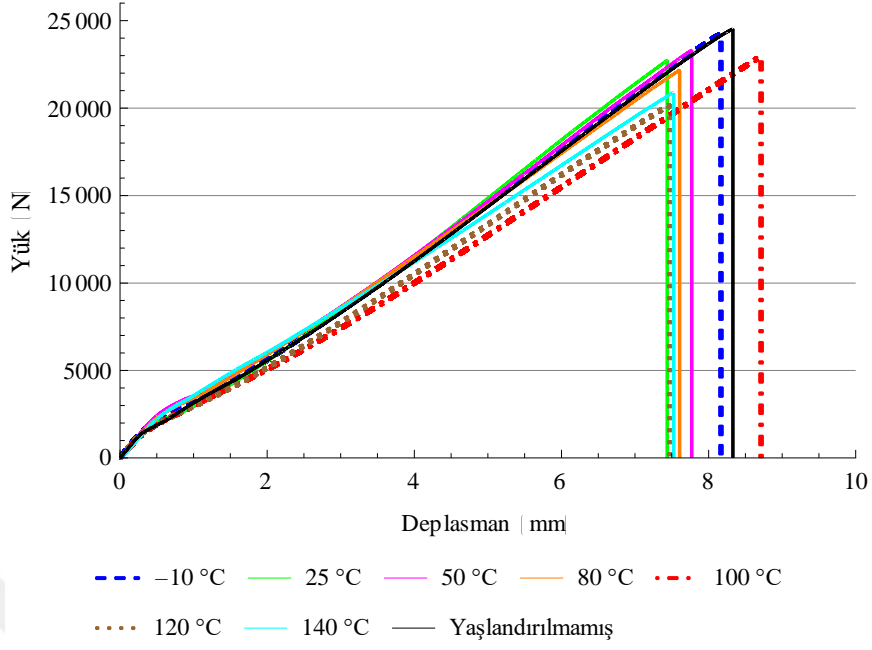
Şekil 4. 54 : 168 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

Şekil 4.54'te 168 saat yaşlandırılmış numunelerin Yük - Deplasman eğrileri incelendiğinde, -10 °C'de yaşlandırılmış örneklerin 25136 N ile en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğu ve 80 °C'de yaşlandırılmış örneklerin 23018 N ile en düşük yük taşıma kapasitesine sahip olduğu söylenebilir. Yaşlandırılmamış örnekler 168 saat yaşlandırılan numuneler arasında en yüksek uzama değerine sahiptir.

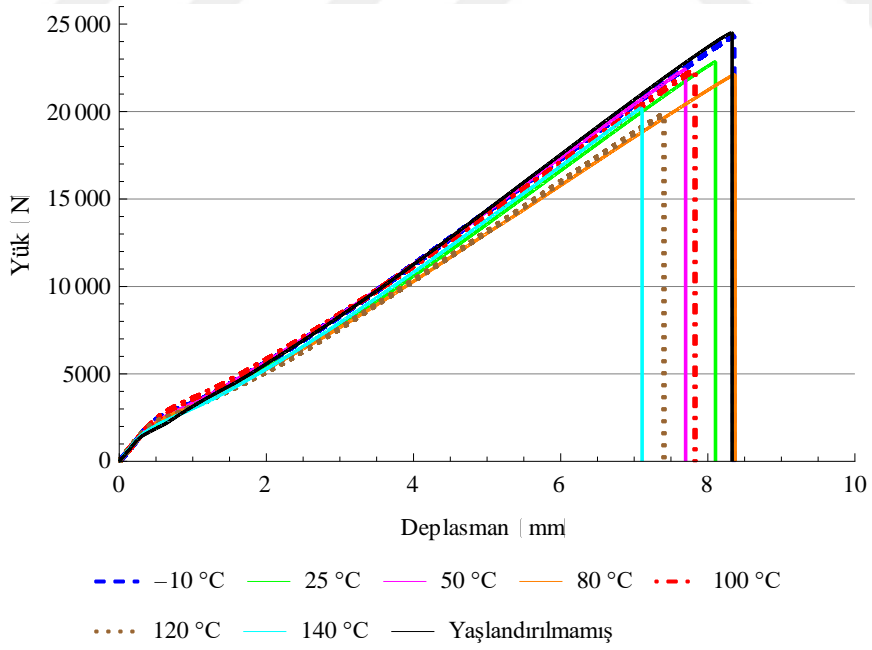


Şekil 4. 55 : 360 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

360 saat yaşlandırılan örneklerin Yük – Deplasman eğrilerine göre (Şekil 4.55), yük taşıma kapasitelerinin, 100 °C'de yaşlandırılanların gösterdiği 21691 N ve -10 °C'de yaşlandırılan örneklerin gösterdiği 24787 N arasında değiştiği ifade edilebilir. -10 °C'de yaşlandırılan örnekler en yüksek yük taşıma kapasitesine ve uzama değerlerine sahiptir. Yük taşıma kapasitelerindeki azalma, diğer yaşlandırma sıcaklıkları için devam etmektedir.

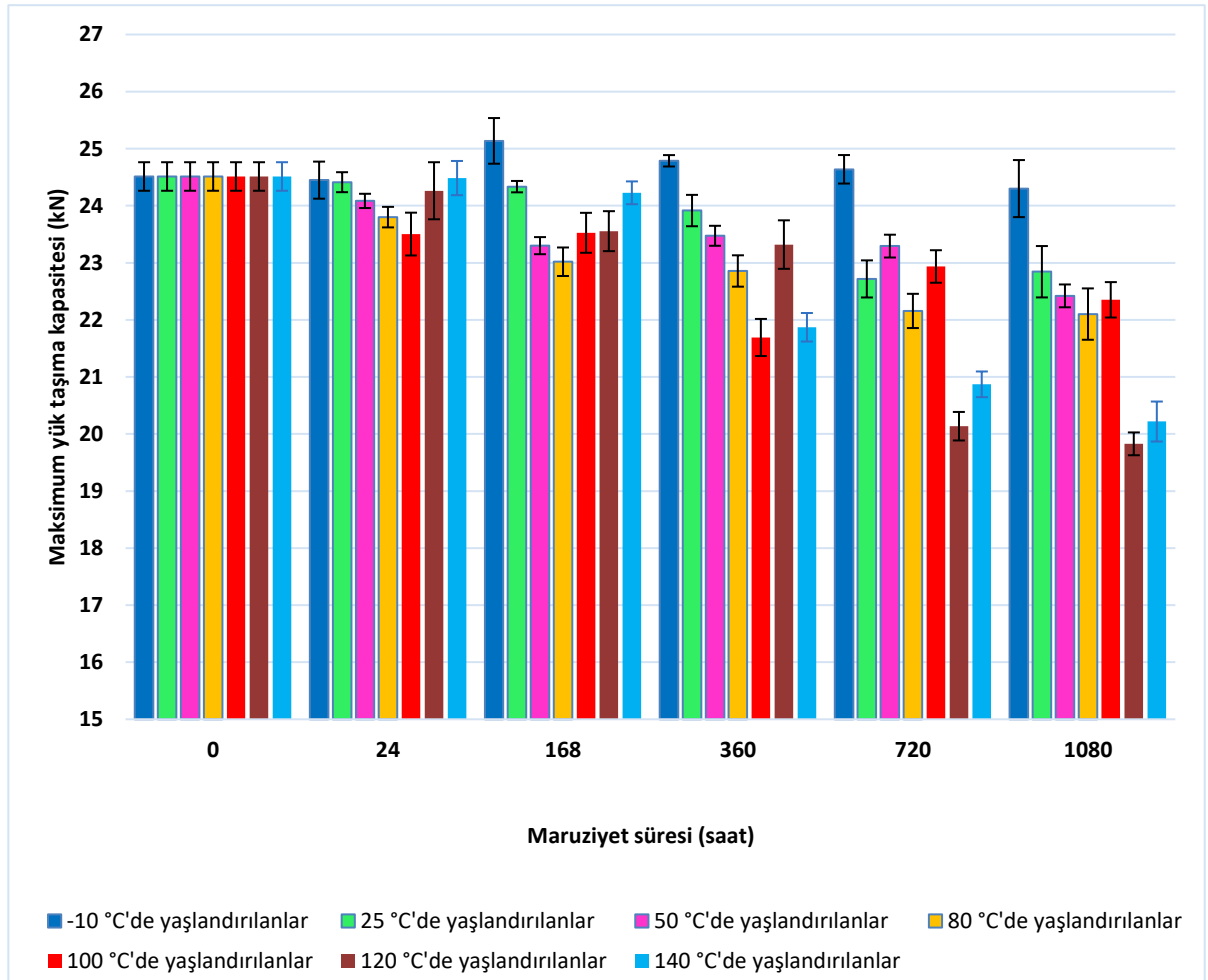


Şekil 4. 56 : 720 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

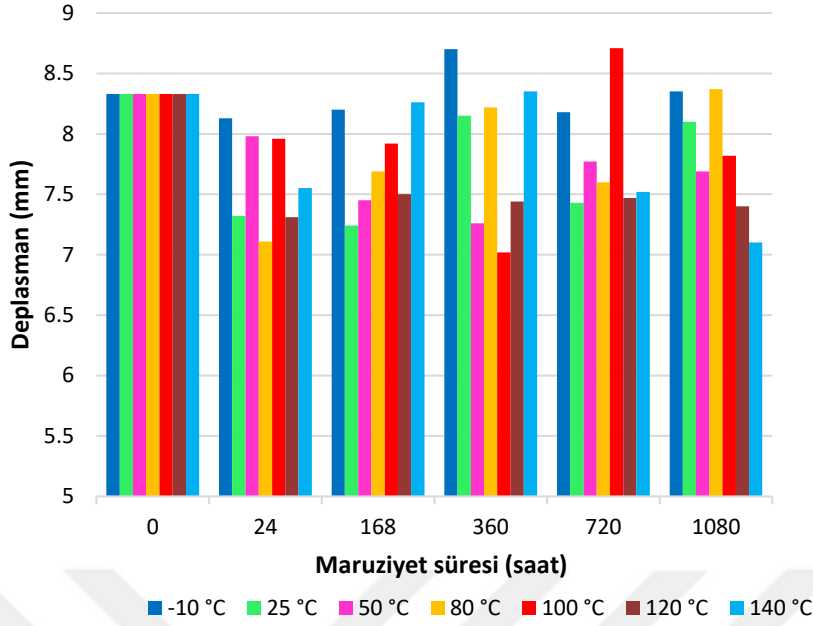


Şekil 4. 57 : 1080 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Yük - Deplasman eğrileri.

720 ve 1080 saat yaşlandırılan örneklerin Yük-Deplasman eğrileri sırasıyla Şekil 4.56 ve 4.57'de sunulmuştur. Bu grafiklerden elde edilen bilgilere göre, 720 saat yaşlandırılmış örnekler 20136 N ile 24638 N arasında değişen yük taşıma kapasitelerine sahiptir. Bu değerlerden en düşüğü 120 °C'de yaşlandırılanlara ve en yükseği de -10 °C'de yaşlandırılanlara aittir. 1080 saat yaşlandırılan örnekler arasında, -10 °C'de yaşlandırılanlar 24300 N ile en yüksek yük taşıma kapasitesine ve 120 °C'de yaşlandırılan örnekler ise 19827 N ile en düşük yük taşıma kapasitesine sahiptir.



Şekil 4. 58 : Kompozit numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Termal-yağ yaşlandırma maruziyet süresi grafiği.



Şekil 4. 59 : Kompozit numunelere ait Deplasman – Maruziyet süresi grafiği.

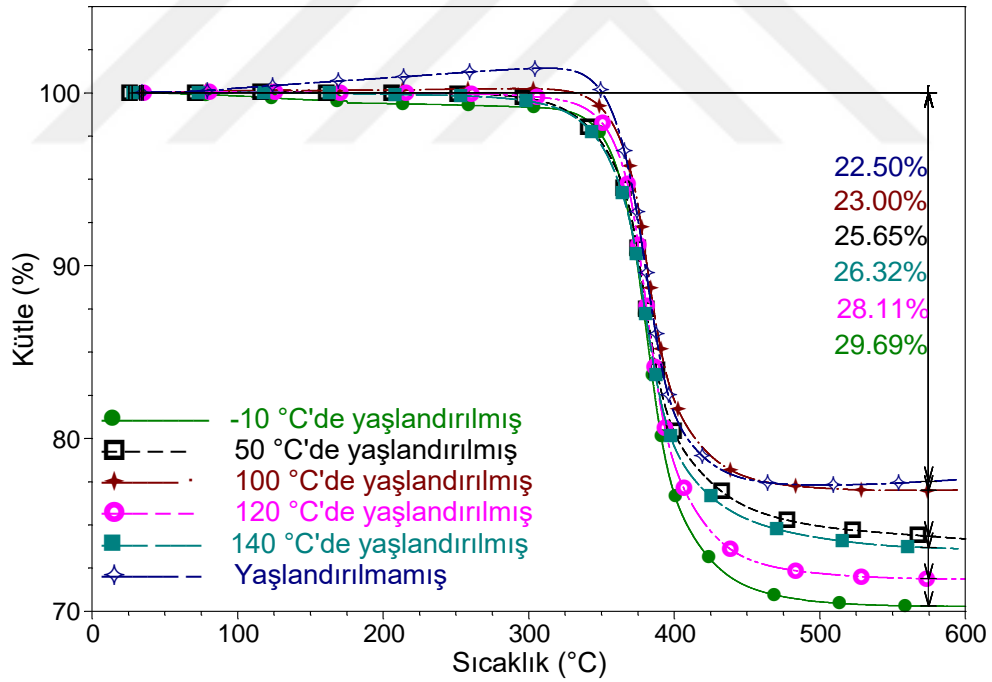
Şekil 4.58’de kompozit numunelere ait Maksimum yük taşıma kapasitesi – Maruziyet süresi grafiği verilmiştir. -10 °C’de yaşlandırılmış örnekler 25136 N ile 24222 N arasında, 25 °C’de yaşlandırılanlar 24412 N ila 22717 N arasında, 50 °C’de yaşlandırılanlar 24084 N ila 22420 N arasında, 80 °C’de yaşlandırılanlar 23800 N ila 22101 N arasında, 100 °C’de yaşlandırılanlar 23503 N ila 22351 N arasında, 120 °C’de yaşlandırılanlar 24262 N ve 19827 N arasında ve 140 °C’de yaşlandırılanlar ise 24484 N ve 20218 N arasında yük taşıma kapasitesine sahiptirler. -10 °C’de yaşlandırılan numuneler en yüksek yük taşıma kapasitesine 360 saat sonunda erişirler ve bu nokta aynı zamanda tüm yaşlandırma süreçleri içerisinde görülen maksimum yük taşıma kapasitesi değeridir. Tüm yaşlandırma sıcaklıkları arasında 25, 50, 80, 120 ve 140 °C’de yaşlandırılan numunelerin yük taşıma kapasiteleri artan yaşlandırma süresi ile birlikte azalan bir trende sahiptir.

Şekil 4.59’de kompozit numunelere ait Deplasman – Maruziyet süresi grafiği verilmiştir. Tüm yaşlandırma süre ve sıcaklıkları içerisinde en yüksek deplasman değeri -10 °C’de 360 saat yaşlandırılan ve 100 °C’de 720 saat yaşlandırılan numunelere aittir. Genel olarak, termal-yağ yaşlandırma prosesi malzemelerin yük taşıma kapasitesi değerlerini olumsuz yönde etkiler ve 120 ile 140 °C’deki örneklerde bu etki

en belirgin biçimde fark edilir. Farklı sıcaklık ve sürelerde termal-yağ yaşlandırma aynı zamanda malzemenin süneklik özelliklerini, birkaç istisna dışında olumsuz yönde etkiler ve malzeme kırılma dayanıklılığını artırır (Şekil 4.59).

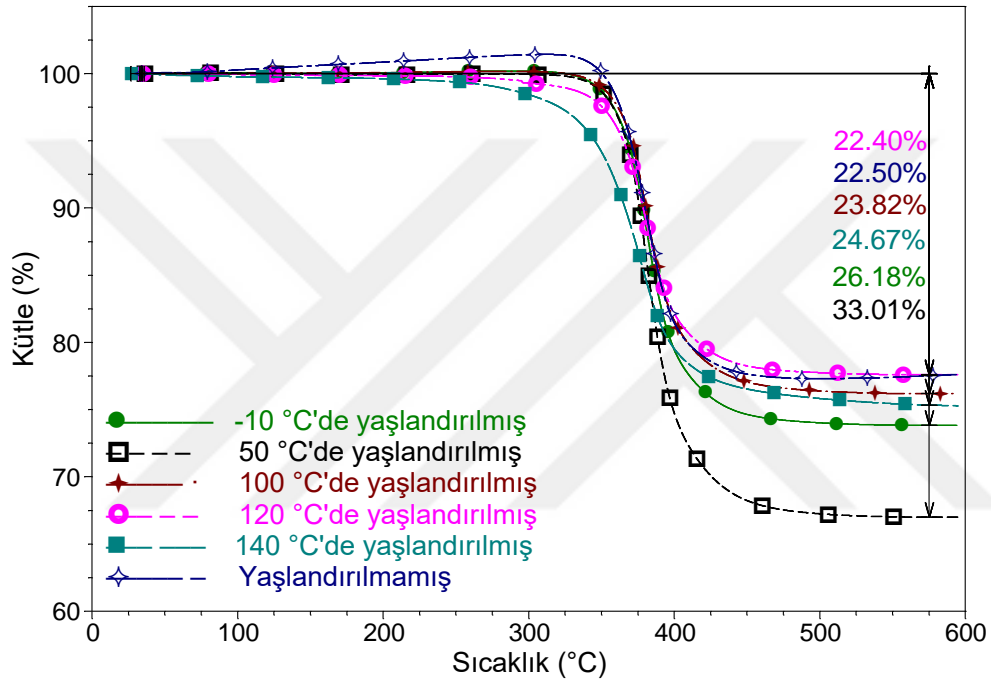
4.4.2 Termal-yağ yaşlandırmanın termal özelliklere etkisi

Yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozitlerin termal özelliklerini belirlemek için Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) analizleri yapılmıştır. Termal-yağ yaşlandırmanın kompozit malzemenin ısıl stabilitesine etkisini ve yaşlanma sürecinden sonra kompozit malzemenin termal özelliklerini belirlemek için termal testler uygulanmıştır. Numunelerin TGA ve DTA'sı, 50 ml/dk.'lık bir akış hızındaki azot atmosferi altında, 10 °C/dk.'lık hızda TA TGA-SDT Q600 termal analiz aleti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 10-20 mg'lık örnekler bir platinyum pana yerleştirilmiş ve 30 °C'den 600 °C'ye kadar ısıtılmıştır.



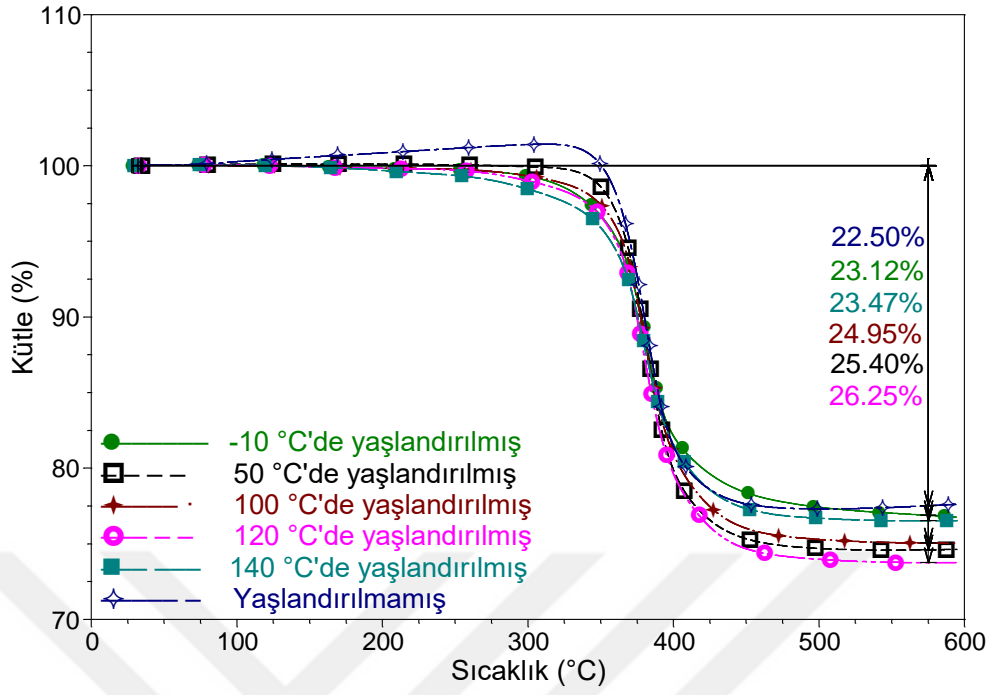
Şekil 4. 60 : 24 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Kütle - Sıcaklık grafiği.

Şekil 4.60 ila 4.64'te, termal olarak yaşlandırılmış cam elyaf/epoksi numunelerin TGA sonuçları verilmiştir. Şekil 4.60'ta, 24 saat yaşlandırılmış numunelerin ağırlık yüzdesindeki değişim, sıcaklığın zamana bağlı olarak artırılması ile görülebilir. 32 °C test başlangıç sıcaklığından 600 °C test bitiş sıcaklığına kadar geçen süreçte, yaşlandırılmamış örnek en düşük bozunma oranına (%22,50) sahip iken -10 °C'de yaşlandırılmış numune en yüksek bozunma oranına (%29,69) sahiptir.



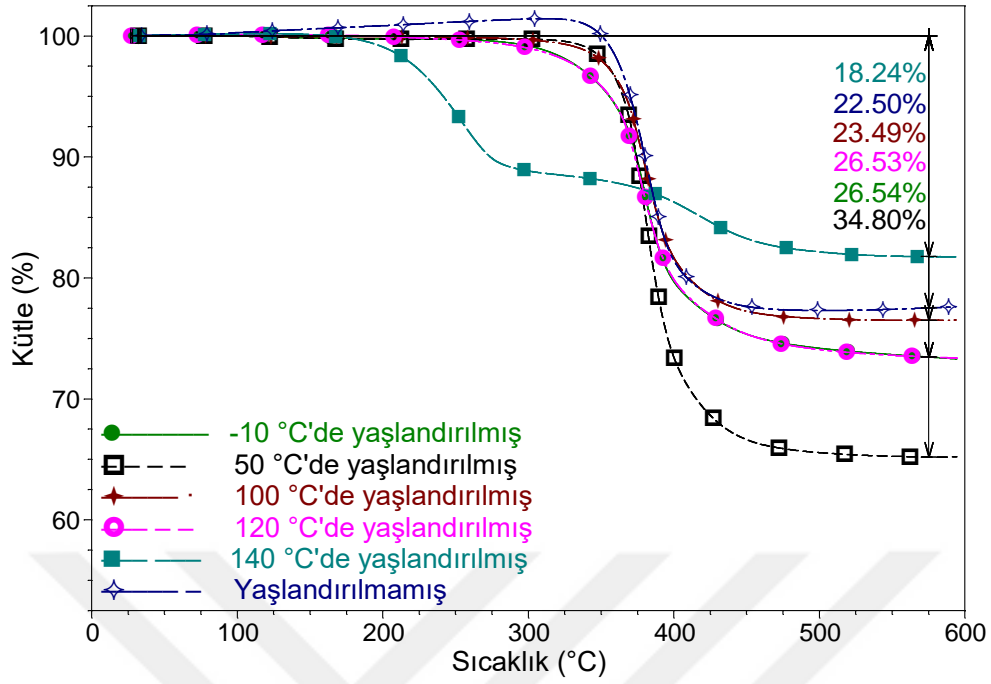
Şekil 4. 61 : 168 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Kütle - Sıcaklık grafiği.

168 saat yaşlandırılmış örneklerin TGA sonuçlarına göre (Şekil 4.61), en düşük bozulma oranı %22.40 ve %22.50'dir, sırasıyla 120 °C'de yaşlandırılmışta ve yaşlandırılmamış örnekte görülür. En yüksek bozunma değeri ise %33.01'dir ve 50 °C'de yaşlandırılan örnekte görülür. 24 saat ve 168 saat yaşlandırılmış örnekler birbiriyle karşılaştırıldığında, en düşük bozunma, yaşlandırılmamış örnekte gözlenmiştir.



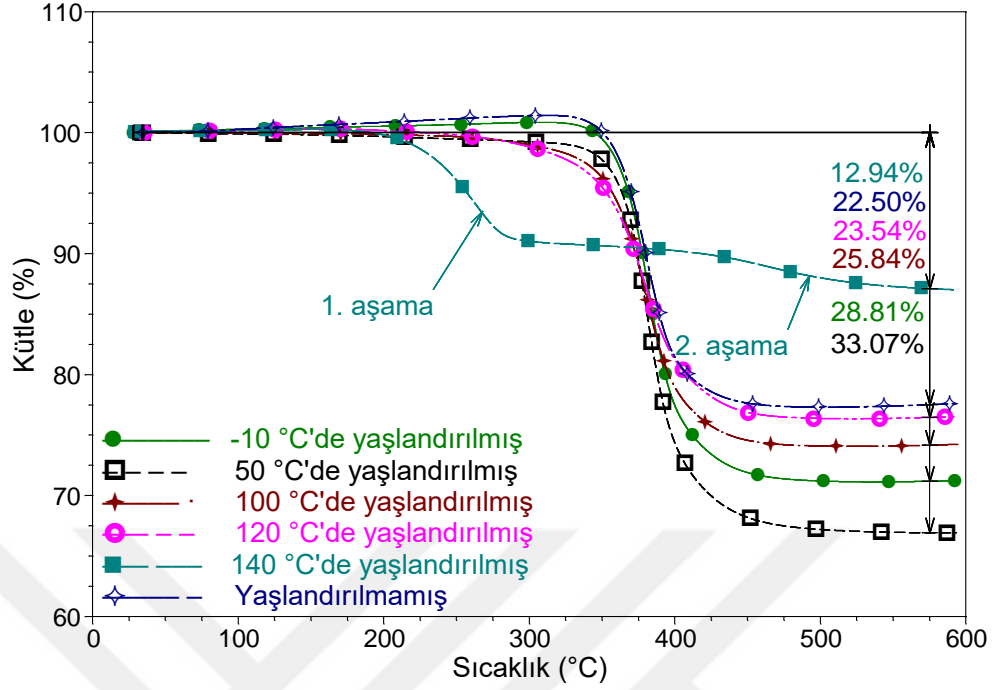
Şekil 4. 62 : 360 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Kütle - Sıcaklık grafiği.

360 saat boyunca yaşlandırılan örneklerin TGA sonuçlarına göre (Şekil 4.62), bozunmalar %22.5 ile %26.25 arasında değişmektedir, en düşük değer yaşlandırılmamış numuneye ve en yüksek değer 120 °C'de yaşlandırılmış numuneye aittir.



Şekil 4. 63 : 720 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Kütle - Sıcaklık grafiği.

720 saatlik termal yaşlanmaya maruz kalan cam elyaf/epoksi kompozit numunelerin TGA sonuçlarına göre (Şekil 4.63), en düşük bozunma oranı, %18.24 ile 140 °C'de yaşlandırılmış numuneye aittir ve en yüksek bozunma oranı %34.80 ile 50 °C'de yaşlandırılan örnekte bulunmuştur. Degradasyon, 720 saat 140 °C'de yaşlandırılan örnek için iki aşamada gerçekleşir. Özellikle birinci aşamada, ısı transfer yağının 225 °C'de kaynamaya başladığı ve yaklaşık 290 °C'de tamamen buharlaştığı görülür. Isı transfer yağının 140 °C'de yaşlandırılan örnekten böyle ayırt edici bir şekilde buharlaşmasının nedeni, yaşlanma süresi arttıkça kompozit malzeme tarafından emilen ısı transfer yağı miktarındaki artıştır. 140 °C'de 720 saat boyunca yaşlandırılan örnek için, termal yaşlandırma prosesinin etkisiyle oluşan mikro çatlaklar yoluyla kompozit malzemenin yüzeyinden derinlemesine nüfuz eden ısı transfer yağı, ağırlık kaybının büyük bir yüzdesini oluşturur.

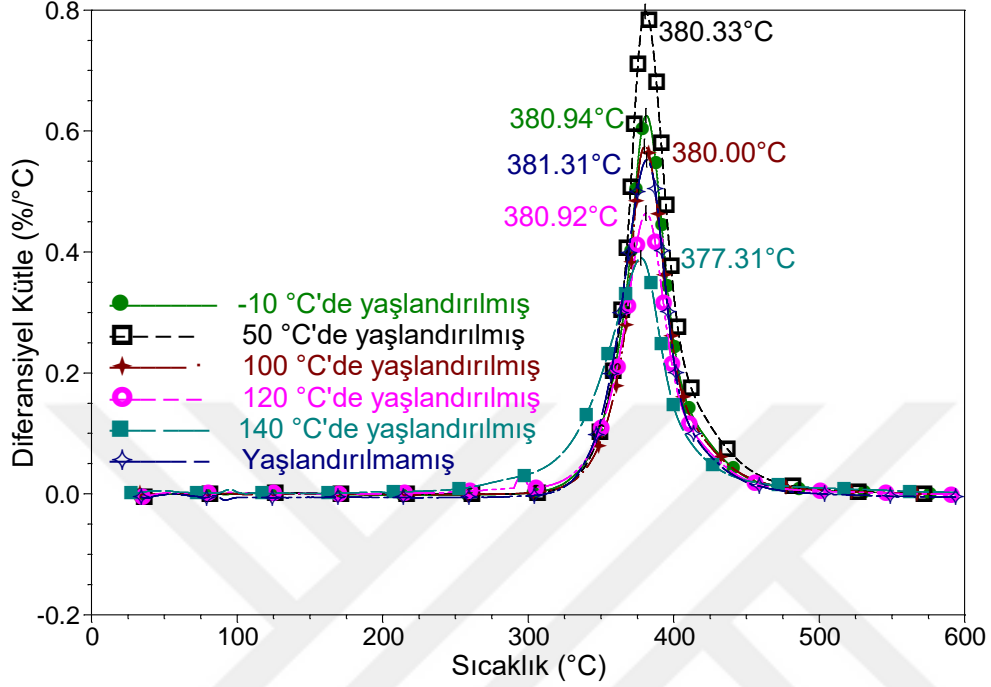


Şekil 4. 64 : 1080 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Kütle - Sıcaklık grafiği.

1080 saat yaşlandırılan kompozitlerin TG eğrilerini gösteren Şekil 4.64'e istinaden, en düşük ağırlık kaybı yüzdesi %12.94 ile 140 °C'de yaşlandırılmış numunelere aittir. 50 °C'de yaşlandırılan örnek ise %33.07 ile en yüksek ağırlık kaybını gösterir. Yine Şekil 4.64'te görüldüğü üzere, 140 °C'de yaşlanan numunenin ağırlık kaybı iki aşamada ortaya çıkar. Bu aşamalardan 225 °C'de başlayıp 300 °C'ye kadar süren birinci aşamada, toplam kilo kaybının büyük bir yüzdesi gerçekleşir. Şekil 4.63 ve Şekil 4.64 dikkate alındığında, 1080 saat boyunca 140 °C'de yaşlandırılan örnek, 720 saatten daha az kütle kaybı oranına sahiptir. 140 °C'de 720 ve 1080 saat boyunca yaşlandırılan numuneler, 2. aşamaya kadar sırasıyla %89.14 ve %91.19 artık kütleyle sahiptir.

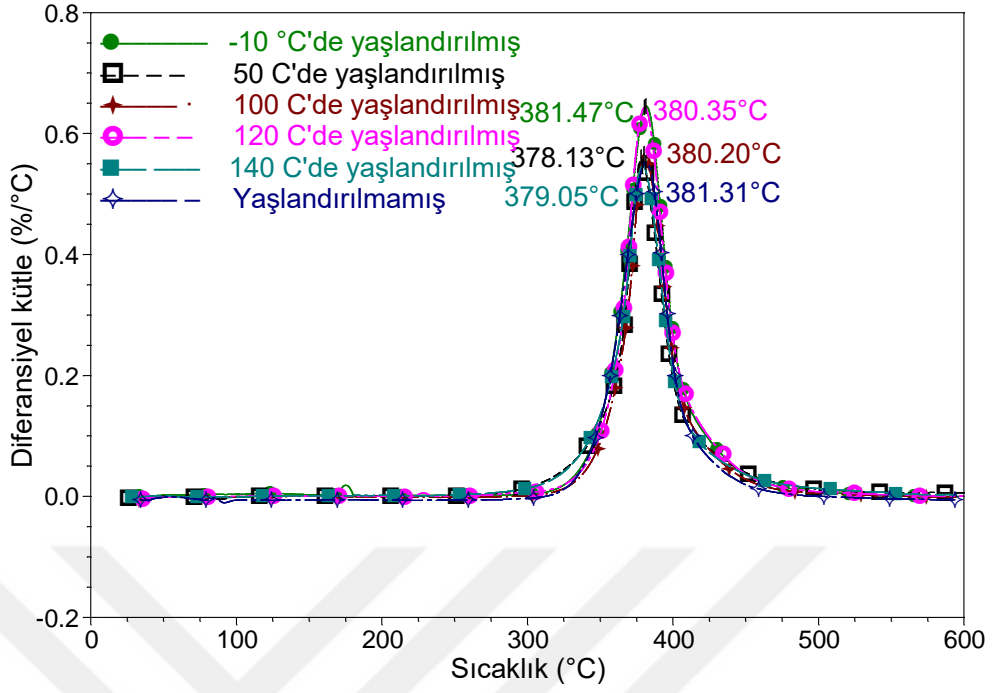
Şekil 4.65'ten 4.69'a kadar, farklı koşullar altında cam elyaf/epoksi numunelerinin Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafikleri verilmiştir. Bu grafikler vasıtasıyla, farklı sıcaklıklarda aynı yaşlanma süresine tabi tutulmuş kompozit materyallerin her yaşlandırma sıcaklığı için ayrı ayrı bozunma oranının en yüksek olduğu sıcaklık belirlenebilir. Bozunma piki, malzemenin sıcaklığa karşı direncini ve buna ek olarak,

termal yaşlanma süreci gibi iç ve dış faktörler tarafından etkilendiğini ve değiştirilebildiğini belirten karakteristik bir veridir.



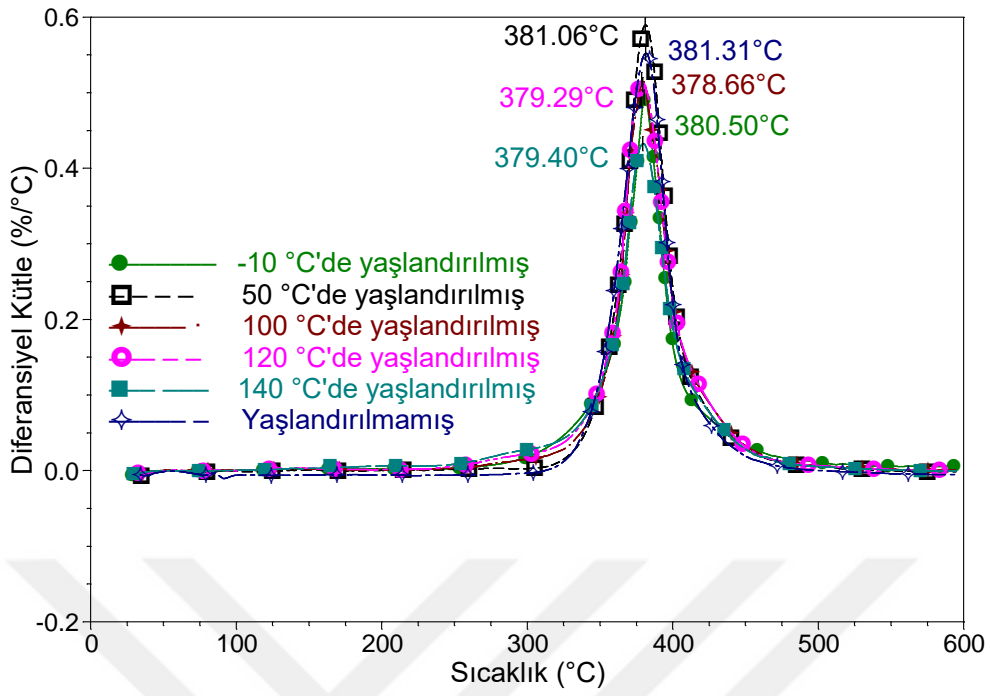
Şekil 4. 65 : 24 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafiği.

Şekil 4.65'te, 24 saat yaşlandırılanlar arasında bozunma pikinin en yüksek olduğu sıcaklığın -10 °C'de yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış olan örnekler için olduğu ve bu değerlerin sırasıyla 381.47 °C ve 381.31 °C olduğu görülmektedir. Ek olarak, 50 °C'de yaşlandırılmış örnek, en yüksek bozunma oranına 378.13 °C'de ulaşır, bu da 24 saat yaşlandırılanlar içinde en düşük sıcaklıktır.



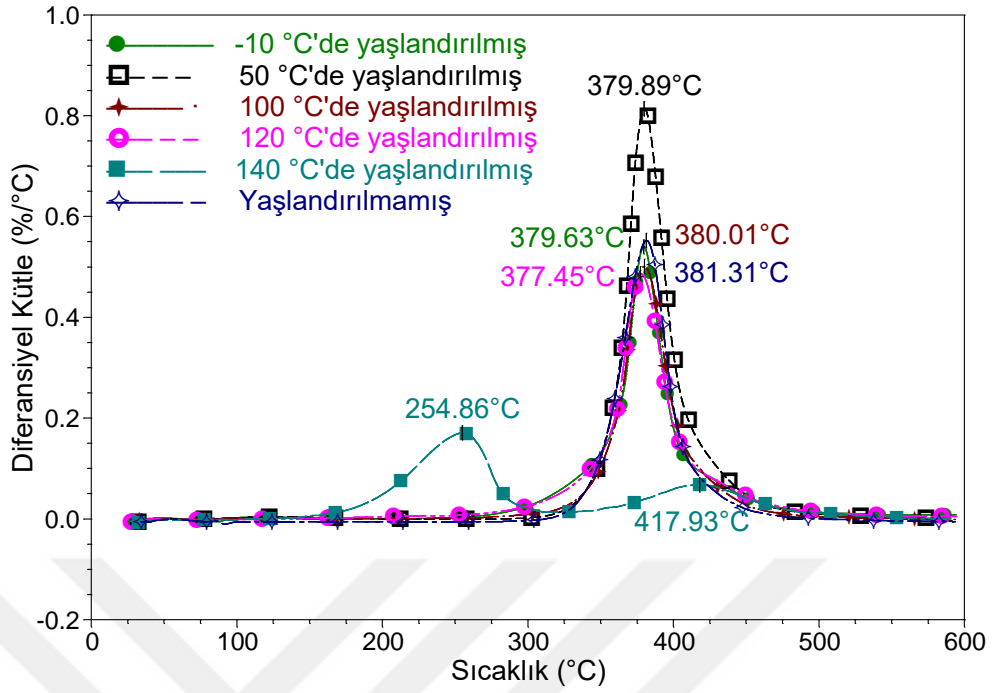
Şekil 4. 66 : 168 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafiği.

168 saat yaşlandırılmış kompozit numunelerin en yüksek degradasyon sıcaklıkları Şekil 4.66'da verilmiştir. Buna göre 168 saat yaşlandırılanlar arasında en yüksek degradasyon sıcaklığına 381.31 °C ile yaşlandırılmamış numuneler, en düşük degradasyon sıcaklığına ise 377.31 °C ile 140 °C'de yaşlandırılmış numuneler sahiptir. -10, 50, 100 ve 120 °C'de yaşlandırılan numunelerin bozunma pikleri birbirine oldukça yakındır. 140 °C'de yaşlandırılanların ise belirgin bir biçimde düşük olduğu şekilden görülebilir.



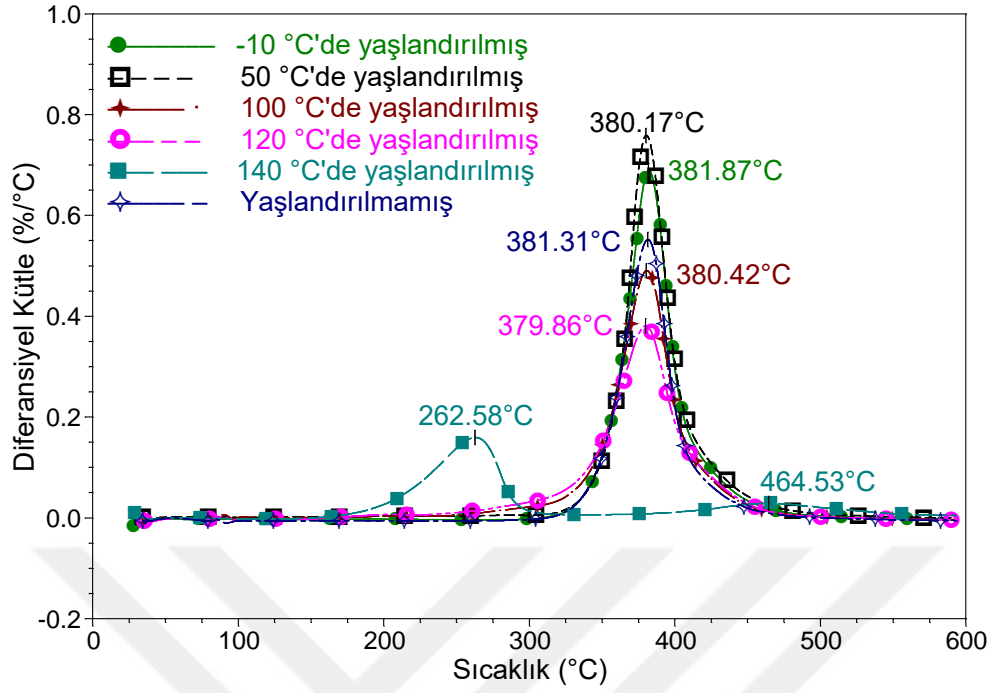
Şekil 4. 67 : 360 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafiği.

Şekil 4.67’de 360 saat yaşlandırılmış numunelere ait DTA sonuçları verilmiştir. Buna göre; yaşlandırılmamış numune 381.31 °C ile en yüksek, 100 °C’de yaşlandırılmış numune ise 378.66 °C ile en düşük degradasyon sıcaklığına sahiptir.



Şekil 4. 68 : 720 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafiği.

Şekil 4.68’de 720 saat yaşlandırılmış numunelere ait DTA sonuçları verilmiştir. Buna göre; 140 °C’de yaşlandırılmış numuneler, diğer örnekler tarafından tipik olarak sergilenenlere 720 saate kadar benzer sonuçlar gösterirken, bu süreden sonra (720 ve 1080 saat) belirgin olarak farklı karakteristik degradasyon doruklarını gösterir. 140 °C’de yaşlandırılan numuneler için, maksimum kütle kaybı sıcaklığı 720 saate kadar 377.31 ila 379.40 °C arasında değişmekte, 720 saat için 254.86 °C ve 1080 saat için 262.58 °C olmaktadır. 720 saatlik termal yaşlandırmadan sonra, 140 °C’de yaşlandırılan numunenin sırasıyla 254.86 ve 417.93 °C olan iki tepe noktası vardır. 140 °C için, maksimum bozunma ilk tepe sırasında meydana gelir. 720 saat yaşlandırılmış numunelerde, 140 °C’de yaşlandırılmış olanlar, diğer sıcaklıklarda yaşlandırılan örneklerden daha fazla ısı transfer yağınını emer. Sıcaklık ve maruz kalma süresindeki artışla, kompozitin ısı transfer yağınını emme kabiliyeti süratle gelişir. Bu TGA testi sırasında, emilen sıvının, ısı transfer yağınını kaynama sıcaklığında buharlaşmaya başladığı görülmektedir. 720 saat yaşlandırılanlar arasında en yüksek bozunma sıcaklığına 381.31 °C ile tekrar yaşlandırılmamış numuneler sahip olmuştur.



Şekil 4. 69 : 1080 saat yaşlandırılmış kompozit numunelere ait Diferansiyel kütle - Sıcaklık grafiği.

Şekil 4.69'da 1080 saat yaşlandırılmış numunelere ait DTA sonuçları verilmiştir. 140 °C'lik yaşlanma sıcaklığı için, kütle bozunumunun 720 saatlik yaşlanma sürecinden sonra iki aşamada gerçekleştiği gözlemlenmiştir. 140 °C'de yaşlanan numunenin eğrisinde ilk pik 262.58 °C'de ve ikinci pik ise 464.53 °C'dedir. Tüm yaşlandırma süreleri için oluşturulan grafikler incelendiğinde, neredeyse tüm periyotlarda en yüksek bozunma sıcaklığına yaşlandırılmamış numunelerin sahip olduğu görülmektedir.

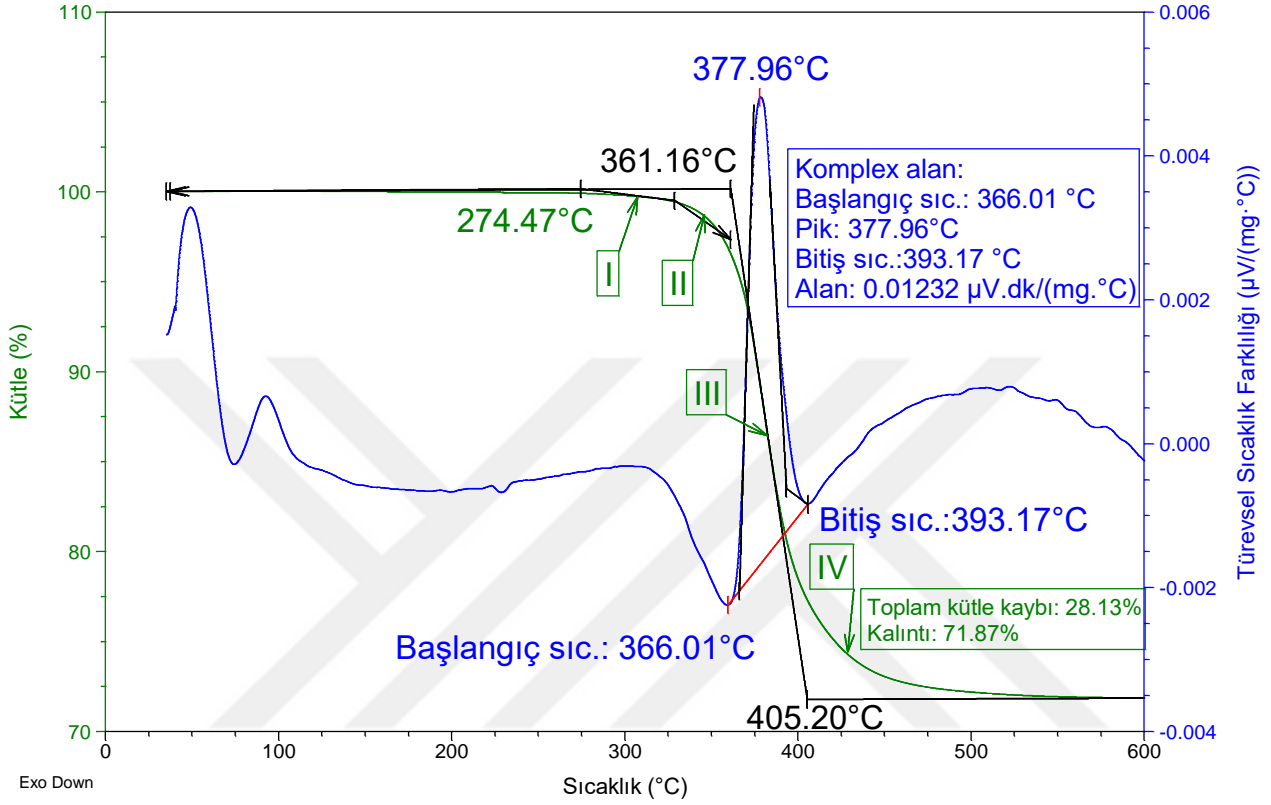
Tablo 4.1 : Yaşlandırılmış numuneler için maksimum degradasyon pik sıcaklıkları.

Termal Yaşlandırma Sıcaklığı	24 Saat (°C)	168 Saat (°C)	360 Saat (°C)	720 Saat (°C)	1080 Saat (°C)
Yaşlandırılmamış	381.31	381.31	381.31	381.31	381.31
-10 °C	381.47	380.94	380.50	379.63	381.87
50 °C	378.13	380.33	381.06	379.89	380.17
100 °C	380.20	380.00	378.66	380.01	380.42
120 °C	380.35	380.92	379.29	377.45	379.86
140 °C	379.05	377.31	379.40	254.86	262.58

Tablo 4.1'den, yaşlandırılmamış numunenin en yüksek bozunma sıcaklığının 381.31 °C olduğu söylenebilir. Farklı termal yaşlandırma maruziyet süreleri için -10, 50, 100 ve 120 °C'deki numunelerin bozunma piklerinin 377.45 ve 381.87 °C arasında değiştiği görülebilir. Bu sıcaklıklar için karakteristik olarak, en yüksek kütle kaybının olduğu minimum sıcaklık, 377.45 °C ile 120 °C'de 720 saat yaşlandırılan örnekte ve maksimum olarak da 381.87 °C ile 1080 saat -10 °C'de yaşlandırılan örnekte ölçülmüştür.

DTA grafiğindeki pik alanlara karşılık gelen kütle kayıpları, TGA grafiğinde görülebilir. Bu grafikler, ısı transfer yağında yaşlandırılan cam fiber/epoksi kompozit malzemelerin 4 adımda bozunduğunu göstermektedir. İlk iki ayrışma basamağında, kütle kayıpları nem kaybından ve diğer uçucu içeriklerin ayrılmasından kaynaklanır. Üçüncü bozunma basamağında, numunenin ağırlık kaybı yüzdesi sürekli artar. Bu, termal stabilitede bir azalma olduğu ve aynı zamanda, lifte bozunmanın meydana geldiği anlamına gelir [113]. Degradasyonun üçüncü basamağı, DTA grafiğindeki kompleks alan olarak da anılır, kimyasal bağların kırılması sonucu lifin bozunması söz konusudur. Kompleks alan iki endotermik pik ve bir kompleks pik içerir. DTA grafiğinde gözlemlenen bu alanın TGA eğrisindeki ciddi kütle kayıplarına karşılık geldiği söylenebilir. Bu karmaşık alanın başlangıç sıcaklığı (T_B), kompozit malzemelerin termal stabilitesini gösterir, çünkü kütle kayıpları, kompozitin ayrışmasından dolayı bu sıcaklığın üzerinde başlar [114]. Kompozit malzemeler

yüksek termal stabiliteye sahiptir ve başlangıç sıcaklığına kadar güvenle kullanılabilirler [115].



Şekil 4. 70 : 120 °C’de 24 saat yaşlandırılmış numuneye ait TGA – DTA grafiği.

24 saat 120 °C’de yaşlandırılan numuneye ait termogram Şekil 4.70’de görülebilir. Bu grafikte, 4 adım dekompozisyon aşaması tanımlanabilir. DTA sonucuna göre, ilk dehidrasyon pikinin yaklaşık 50 °C’de olduğu gözlenmiştir. Bu kayıp, dehidrasyon sıcaklığı nedeniyle lifte bulunan nemin buharlaşmasıyla ilişkili kütle kaybını temsil eder. Bu hafif kütle kaybı, banyo akışkanı asetonunun malzemedeki buharlaşmasını temsil eder. 90-100 °C arasında, ikinci dehidrasyon doruğunda, fiberdeki su buharlaşır [116-118]. Kompleks alanda, liflerin parçalanması kimyasal bağların kırılmasıyla gerçekleşir. Örnek olarak Şekil 4.70’te verildiği gibi, tüm yaşlandırma sıcaklıkları ve süreleri için ayrı ayrı TGA – DTA grafikleri oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar tablolastırılmıştır.

TGA ve DTA sonucuna göre (Şekil 4.70), örnek, 366.01 °C'lik bir başlangıç sıcaklığına, 377.96 °C'lik bir tepe noktasına ve 393.17 °C'lik bir bitiş sıcaklığına sahiptir. Testten sonra, toplam kütle kaybı %28.13 ve kalan kütle %71.87'dir.



Tablo 4. 2 : 24 saat yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelere ait dekompozisyon sıcaklıkları.

Numune adı	I. degradasyon basamağı			3. degradasyon basamağı			Kompleks pik sıcaklıkları (DTA grafiklerinden)				% toplam kütle kaybı	% kalıntı
	T _{1i} °C	T _{1f} °C	% kütle kaybı	T _{3i} °C	T _{3f} °C	% kütle kaybı	T _B °C	T _S °C	T _{Pik} °C	Alan $\mu V \cdot min / (mg \cdot ^\circ C)$		
24sa@-10°C	293.17	360.74	3.53	360.74	404.64	19.84	367.23	397.63	380.56	0.00827	29.69	70.31
24sa@50°C	286.84	357.84	3.51	357.84	401.86	15.99	367.40	394.31	392.36	0.01043	25.65	74.35
24sa@100°C	287.77	362.47	1.93	362.47	403.87	15.91	368.66	393.89	378.55	0.01069	23.00	77.00
24sa@120°C	274.47	361.16	2.68	361.16	405.20	19.22	366.09	392.96	377.96	0.01209	28.11	71.89
24sa@140°C	283.65	356.49	3.50	356.49	403.29	16.96	364.83	392.97	376.64	0.01441	26.32	73.68
Yaşlandırılmış	277.35	359.55	1.74	359.55	403.65	17.61	356.88	395.89	379.24	0.01037	22.50	77.50

24 saat yaşlandırılmış cam elyaf/epoksi kompozit numunelerin ayrışma sıcaklıkları ve kütle kayıpları Tablo 4.2'de sunulmaktadır. Tablo 4.2'den en düşük başlangıç sıcaklığının (T_B) 356.88 °C ile yaşlı olmayan örneğe ve en yüksek olanın da 368.66 °C ile 100 °C'de yaşlandırılan numuneye (24s@100°C) ait olduğu açıkça görülmektedir. En yüksek termal stabiliteye sahip numuneyi belirlerken, en yüksek ilk ve final dekompozisyon sıcaklıklarına sahip örnekler belirlenir ve daha sonra en yüksek başlangıç sıcaklığına sahip olan numune seçilir. Bu tanım uyarınca, ilk deformasyon sıcaklıkları (T_{1i}) ve final ayrışma sıcaklıkları (T_{3f}) dikkate alındığında, en yüksek ilk deformasyon sıcaklığına sahip numunenin 293.17 °C ile 24s@-10°C olduğu görülmektedir. Bu, -10 °C'de yaşlandırılmış numunenin, 24 saat yaşlandırılmış numuneler arasında maksimum termal stabiliteye sahip olduğu ve yaşlandırılmamış numunenin minimum termal stabiliteye sahip olduğu anlamına gelir. 24s@-10°C, 293.17 °C'lik bir ilk ayrışma sıcaklığına (T_{1i}), 404,64 °C'lik bir final ayrışma sıcaklığına (T_{3f}) ve 367.23 °C'lik bir başlangıç sıcaklığına (T_B) sahiptir. Buna ek olarak, Tablo 4.2'den en düşük kalıntı oranı %70.31 ile 24s@-10°C örneğine ve en yüksek kalıntı oranı %77,50 ile yaşlandırılmamış örneğe aittir. Ayrıca DTA ve TGA sonuçlarına göre 24s@-10°C, 367.23 °C'lik bir başlangıç sıcaklığına, 380.56 °C'lik bir tepe sıcaklığına (T_{pik}) ve 390.63 °C'lik bir bitiş sıcaklığına (T_s) sahip kompleks bir alan göstermektedir.

Tablo 4. 3 : 168 saat yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelere ait dekompozisyon sıcaklıkları.

Numune adı	I. degradasyon basamağı			3. degradasyon basamağı			Kompleks pik sıcaklıkları (DTA grafiklerinden)				% toplam kütle kaybı	% kalıntı
	T _{1i} °C	T _{1f} °C	% kütle kaybı	T _{3i} °C	T _{3f} °C	% kütle kaybı	T _B °C	T _S °C	T _{Pik} °C	Alan $\mu V \cdot min / (mg \cdot ^\circ C)$		
168sa@-10°C	286.90	361.80	2.43	361.80	403.62	18.09	367.76	396.18	379.53	0.01124	26.22	73.88
168sa@50°C	272.51	363.28	2.78	363.28	404.35	22.70	367.15	394.15	378.18	0.01604	33.05	76.95
168sa@100°C	281.27	362.79	2.05	362.79	403.88	16.38	366.95	392.81	377.19	0.01192	23.83	76.17
168sa@120°C	282.55	357.60	3.04	357.60	404.86	15.20	367.12	397.14	380.34	0.00645	22.43	77.57
168sa@140°C	282.95	343.33	4.29	343.33	402.33	16.10	360.14	389.34	378.72	0.00640	24.74	75.26
Yaşlandırılmış	277.35	359.55	1.74	359.55	403.65	17.61	356.88	395.89	379.24	0.01037	22.50	77.50

168 saat yaşlandırılmış numunelerin termal ayrışma sıcaklıklarının gösterildiği Tablo 4.3'e göre, en yüksek ve en düşük termal stabilite, sırasıyla 168s@-10°C ve yaşlandırılmamış numuneye aittir. 168h@-10°C numunesi için termogravimetrik sonuca göre, tüm uçucu ve nem içeriği (%2.43) 361.80 °C'ye kadar buharlaşır, kompozit malzemenin kimyasal bağları 361.80 ve 403.62 °C arasında kırılır ve en büyük kütle kaybının meydana geldiği üçüncü kütle bozunma aşamasında kütle kaybı %18.09'dur. 168 saat yaşlandırılmış numunelerin DTA eğrileri incelendiğinde, kompleks alan, 360.14 ila 367.76 °C'lik başlangıç sıcaklıklarını (TB), 389.34 ila 397.14 °C arasında bitiş sıcaklıklarını (TS) ve 377.19 ila 380.34 °C'lik pik sıcaklıklarını (Tpik) gösterir.



Tablo 4. 4 : 360 saat yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelere ait dekompozisyon sıcaklıkları.

Numune adı	I. degradasyon basamağı			3. degradasyon basamağı			Kompleks pik sıcaklıkları (DTA grafiklerinden)				% toplam kütle kaybı kalıntı	
	T _{li} °C	T _{lf} °C	% kütle kaybı	T _{3i} °C	T _{3f} °C	% kütle kaybı	T _B °C	T _S °C	T _{Pik} °C	Alan $\mu V \cdot min / (mg \cdot ^\circ C)$		
360sa@-10°C	271.32	357.18	3.84	357.18	402.29	13.99	375.71	388.93	386.67	0.00925	23.12	76.88
360sa@50°C	230.93	360.33	2.25	360.33	404.15	17.98	366.04	395.48	378.98	0.01009	25.40	74.60
360sa@100°C	261.87	357.54	3.06	357.54	405.53	16.60	363.71	388.59	374.94	0.01067	24.95	75.05
360sa@120°C	250.95	354.74	3.55	354.74	406.01	17.57	363.44	394.31	373.98	0.01067	26.25	73.75
360sa@140°C	241.91	351.74	3.98	351.74	406.31	15.17	364.09	396.32	376.08	0.00744	23.47	76.53
Yaşlandırılmış	277.35	359.55	1.74	359.55	403.65	17.61	356.88	395.89	379.24	0.01037	22.50	77.50

Tablo 4.2, Tablo 4.3 ve Tablo 4.4 birlikte değerlendirildiğinde, -10, 50 ve 140 °C'de yaşlandırılmış örneklerin ilk dekompozisyon sıcaklıkları sürekli düşüş eğilimindedir ve özellikle 360 saatlik yaşlanmadan sonra ciddi bir düşüş göstermektedir. 100 ve 120 °C'de yaşlandırılmış numuneler, 168 saatlik yaşlanmadan sonra önemli bir düşüş göstermektedir ve en düşük değerler 360 saat yaşlandırmadan sonra ortaya çıkar. İlk ayrışma sıcaklıkları ve başlangıç sıcaklıkları göz önüne alındığında -10 °C'de yaşlandırılmış numuneler hala en yüksek termal stabiliteye sahiptir. 360s@-10°C, termal test protokolünün sonunda 271.32 °C T_{1i} 'ye, 402.29 °C T_{3f} 'ye ve 375.71 °C T_B 'a ve ek olarak %23.12'lik bir toplam kütle kaybına sahiptir (Tablo 4.4). 360 saatlik yaşlandırılmış numunelerin DTA eğrileri, 363.44 ila 375.71 °C arasında değişen bir başlangıç sıcaklığına, 373.98 ila 386.67 °C arasında değişen bir pik sıcaklığına ve 388.59 ila 396.32 °C arasında değişen bir bitiş sıcaklığına işaret etmektedir.

Tablo 4. 5 : 720 saat yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelere ait dekompozisyon sıcaklıkları.

Numune adı	I. degradasyon basamağı			3. degradasyon basamağı			Kompleks pik sıcaklıkları (DTA grafiklerinden)				% toplam kütle kaybı	% kalıntı
	T _{1i} °C	T _{1f} °C	% kütle kaybı	T _{3i} °C	T _{3f} °C	% kütle kaybı	T _B °C	T _S °C	T _{Pik} °C	Alan $\mu V \cdot \min / (mg \cdot ^\circ C)$		
720sa@-10°C	286.26	355.85	4.65	355.85	402.26	15.65	380.37	391.29	389.20	0.01213	26.54	73.46
720sa@50°C	258.37	362.07	3.10	362.07	404.14	23.65	365.74	392.29	376.67	0.01642	34.80	65.20
720sa@100°C	270.04	358.39	2.58	358.39	405.22	16.15	364.32	395.86	375.36	0.01025	23.49	76.51
720sa@120°C	259.86	351.60	4.00	351.60	404.93	16.60	364.15	395.44	370.79	0.00657	26.53	73.47
720sa@140°C	153.59	209.40	1.40	209.40	316.76	9.96	202.49	264.79	257.11	0.00502	18.24	81.76
Yaşlandırılmış	277.35	359.55	1.74	359.55	403.65	17.61	356.88	395.89	379.24	0.01037	22.50	77.50

Tablo 4.5'ten, -10 °C'de yaşlandırılmış kompozitin, 720 saatlik yaşlanmanın sonunda en yüksek termal stabilitesini koruduğu anlaşılabilir. 720s@-10°C numunesi, 286.26 °C'lik bir ilk deformasyon sıcaklığına, 402.26 °C'lik bir final ayrışma sıcaklığına, 380.37 °C'lik bir başlangıç sıcaklığına ve %73.46'lık bir artık kalıntı kütlesine sahiptir. Bu tabloda dikkat çeken diğer bir detay ise, şimdiye kadar karşılaşılan en düşük T_{li} (153.59 °C), T_{3f} (316.76 °C) ve en düşük kalıntı kütle oranına (%18.24) sahip 720h@140°C numunesidir. 720 saat yaşlandırılmış numunelerin DTA eğrileri, başlangıç sıcaklıklarının (T_B) 202.49 ve 380.37 °C arasında değiştiğini, pik sıcaklıkların (T_{pik}) 257.11 ve 389.20 °C arasında değiştiğini ve bitiş sıcaklıklarının 264.79 ve 395.89 °C arasında değiştiğini göstermektedir.



Tablo 4. 6 : 1080 saat yaşlandırılmış cam fiber/epoksi kompozit malzemelere ait dekompozisyon sıcaklıkları

Numune adı	I. degradasyon basamağı			3. degradasyon basamağı			Kompleks pik sıcaklıkları (DTA grafiklerinden)				% toplam kütle kaybı T_{fi} °C	% kalıntı T_{fi} °C
	T_{fi} °C	T_{fr} °C	% kütle kaybı	T_{3i} °C	T_{3f} °C	% kütle kaybı	T_B °C	T_S °C	T_{Pik} °C	Alan $\mu V \cdot min / (mg \cdot ^\circ C)$		
1080sa@-10°C	281.49	361.27	1.07	361.27	405.08	21.15	366.27	397.44	381.21	0.01344	28.83	71.17
1080sa@50°C	234.74	361.68	3.41	361.68	404.15	22.37	365.19	392.85	377.45	0.01562	33.07	66.93
1080sa@100°C	251.01	352.45	3.61	352.45	406.15	18.05	358.82	397.63	381.00	0.00760	25.84	74.16
1080sa@120°C	243.36	344.32	3.50	344.32	409.60	16.46	358.90	397.32	380.85	0.00557	23.54	76.46
1080sa@140°C	181.64	223.93	1.31	223.93	292.77	7.59	223.64	275.21	257.57	0.00469	12.94	87.06
Yaşlandırılmamış	277.35	359.55	1.74	359.55	403.65	17.61	356.88	395.89	379.24	0.01037	22.50	77.50

TG ve DT analizleri sonucunda; 1080 saat yaşlandırma neticesinde, en yüksek termal stabiliteye sahip olan 1080s@-10°C numunesi, 281.49 °C T_{1i} , 405.08 °C T_{3f} , 366.27 °C T_B sıcaklıklarını göstermektedir (Tablo 4.6). 1080 saat yaşlandırılmış numunelerin DTA ve TGA eğrilerine göre; başlangıç sıcaklıkları 223.64 ve 366.27 °C arasında, pik sıcaklıkları 257.57 ile 381.21 °C arasında, bitiş sıcaklıkları da 275.21 ile 397.63 °C arasında değişmektedir.

Yukarıda verilen TGA ve DTA analiz sonuçlarından; yaşlanma süresi arttıkça 50, 100, 120 ve 140 °C'de yaşlandırılmış örneklerin termal stabilitesinin ve termal direncinin azaldığı görülebilmektedir. -10 °C'de yaşlandırılan kompozit numuneler, 366.27 ila 380.37 °C arasında değişen bir başlangıç sıcaklığına (T_B) sahiptir ve en yüksek değer 720 saatlik yaşlandırılmış numuneden elde edilir. Diğer taraftan, 50 °C'de yaşlandırılmış kompozit numunelerin termal sonuçları incelendiğinde, başlangıç sıcaklıklarının 365.19 ve 367.40 °C arasında değiştiği, en yüksek olanın 24 saat yaşlandırılan numuneden elde edildiği söylenebilir. 50 °C'de yaşlandırılmış numuneler, 24 saat yaşlandırmadan sonra sabit bir düşüş eğilimi gösterir ve 1080 saat yaşlandırmadan sonra 365.19 °C'ye düşer. Yaşlanma süresi arttıkça 100 °C'de yaşlandırılmış örneklerin başlangıç sıcaklıkları sürekli olarak azalır. 24s@100°C örneği, 368.66 °C'lik bir başlangıç sıcaklığına sahipken, 1080h@100°C örneğinin başlangıç sıcaklığı 358.82 °C'dir. 120 °C'de yaşlandırılmış numuneler, 1080 saatlik yaşlanmadan sonra 358.90 °C ile en düşük başlangıç sıcaklığına sahiptir. En belirgin termal özellik değişikliğini yaşayan 140 °C'de yaşlandırılmış numuneler, 720 saat yaşlandırmadan sonra 202.49 °C'lik bir başlangıç sıcaklığına sahipken, 1080 saat sonra 223.64 °C'lik bir başlangıç sıcaklığına sahiptir. Herhangi bir yaşlanma süresinde -10, 50, 100 ve 120 °C'de yaşlandırılmış numunelerin başlangıç sıcaklığı yaşlandırılmamış olandan daha yüksektir. 720 saat sonra 140 °C'de yaşlanan numunenin başlangıç sıcaklığı, yaşlı olmayan ile karşılaştırıldığında büyük ölçüde düşmekte ve böylece 720 saatlik yaşlandırmadan sonra örneğin termal stabilitesi, hiç yaşlandırılmamışa göre daha düşük olmaktadır.

İlk ayrışma sıcaklıkları göz önüne alınarak belirlenen ve termal stabilitenin belirleyicileri olan başlangıç sıcaklıkları, -10 °C'de yaşlandırılmış örneklerin termal stabilitesinin, 24 saat hariç tüm yaşlanma süreleri için tüm örnekler içinde en yüksek

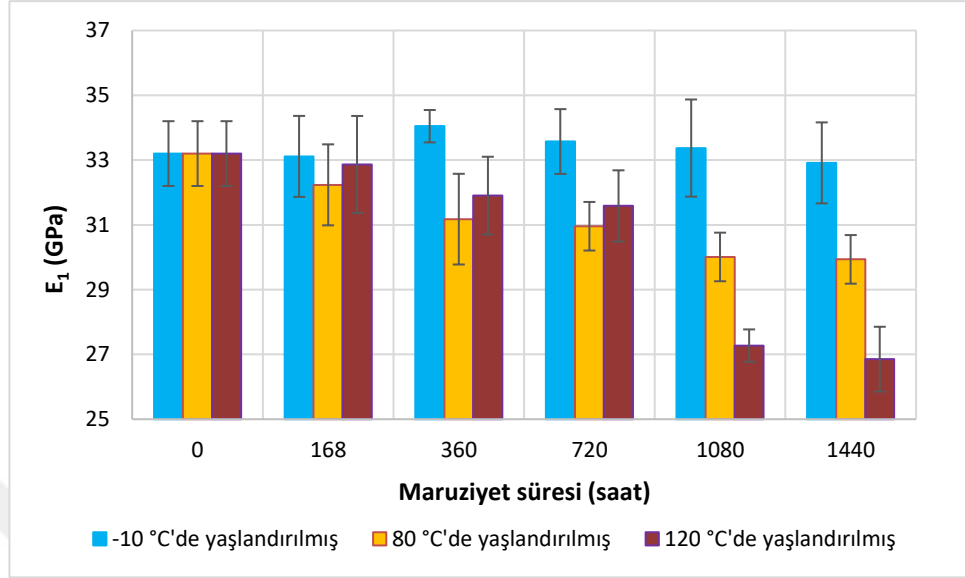
olduğunu göstermektedir. 50, 100, 120 ve 140 °C'de yaşlandırılmış numuneler için, termal stabilite 168 saatlik yaşlanmadan sonra azalır. Her yaşlandırma sıcaklığı için, 1080 saat yaşlandırma sonunda numuneler en düşük başlangıç sıcaklıklarını alırlar. Bu düşüşler malzemelerin ısı kararlılığını ve termal direncini olumsuz yönde etkiler. Termal stabilite ve termal direnç, özellikle 50, 100, 120 ve 140 °C'de yaşlandırılan numuneler için termal yaşlanma maruz kalma süresi ile ters orantılıdır. Polimer reçine takviyeli liflerin termal stabilitesi arttıkça, fiber ve matris arasında iyi bir kilitlenme meydana gelecektir ve bu kilitlenme neticesinde mekanik özelliklerde de artma beklenebilir [119].

Malzemelerin ilk deformasyon sıcaklıkları incelendiğinde; 50, 100, 120 ve 140 °C'de yaşlandırılmış örneklerin ilk ayrışma sıcaklıklarının, yaşlanma süresi arttıkça azalan bir eğilime girdiği açıkça görülebilir. Bu düşüşler 360 saat yaşlandırılanlara ait TGA sonuçlarında belirginleşir, tüm değerler yaşlandırılmayan numunenin ilk dekompozisyon sıcaklığının altına düşer ve 360 saat yaşlandırma ile başlayan düşüş eğilimi yaşlanma periyodu sona erene kadar devam eder. 50 °C'de yaşlandırılan numunelerin ilk ayrışma sıcaklıkları (T_{1i}) 230.93 ile 286.84 °C arasındadır ve 24h@50°C en yüksek değere sahipken 360h@50°C en düşük değere sahiptir. 100 °C'de yaşlandırılan numuneler için, bu aralık 251.01 ila 287.77 °C arasında değişir ve en düşük değer 1080 saatlik yaşlandırmadan sonra elde edilir. 243.36 ila 282.55 °C aralığında ilk deformasyon sıcaklığına sahip 120 °C'deki numuneler, 1080 saatlik yaşlandırmanın sonunda en düşük değerini alır. 140 °C'de yaşlandırılan numuneler için, ilk ayrışma sıcaklıkları 153.59 ila 283.65 °C arasındadır ve en düşük değerler 720 saat ve 1080 saat yaşlandırmadan sonra elde edilir.

Elyafın nem içeriğine ve uçucu içeriğine bağlı olarak, bozunma sıcaklıkları marjinal olarak farklılıklar gösterebilir [119-121].

Bütün dekompozisyon sıcaklık tabloları birlikte değerlendirildiğinde, tüm yaşlanma periyotları için en yüksek termal stabiliteye -10 °C'de yaşlandırılan numunelerin sahip oldukları açıkça söylenebilir. En yüksek termal stabiliteye sahip numune belirleme aşamasında hem ilk hem de final ayrıştırma sıcaklıklarının değerleri göz önüne alınarak belirlemenin doğruluk değeri kanıtlanır.

4.4.3 Termal-yağ yaşlandırmanın elastisite modülü ve camsı geçiş sıcaklıklarına etkisi



Şekil 4. 71 : Kompozit malzeme Young modülü – Maruziyet süresi – Sıcaklık grafiği.

Şekil 4.71’de, elastisite modüllerinin (E_1) üç farklı sıcaklıkta (-10, 80 ve 120 °C) termal yaşlandırma sürelerine göre değişimi verilmiştir. Buna göre, -10 °C’de yaşlandırma prosesi uygulanmış ile yaşlandırılmamış kompozit malzemelerin elastisite modülü tüm yaşlanma süreleri için yaklaşık olarak aynı değerleri sergiler. 80 °C’de yaşlandırılan numuneler, sürekli bir düşüş eğilimi gösterir ve 1440 saat sonunda en düşük değerini alır. 120 °C’deki numuneler, 720 saate kadar yavaş bir düşüş oranı gösterir, 1080 saatte keskin bir düşüş gösterir ve 1440 saatin sonunda da en düşük değerini alır. Silva ve diğ. [122], substrat malzemenin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin, tek bindirmeli numunelerin çekmede kesme mukavemeti testlerinden elde edilen değerleri etkilediğini bulmuştur. Substratın akma dayanımı, kalınlığı ve elastikiyetindeki artış, yapıştırılmış kompozit malzemelerin kayma mukavemetini olumlu yönde etkilemektedir. Buna göre, örneğin 120 °C’deki yaşlandırmanın, substratın Young modülünü ve yapıştırılmış kompozit örneklerin kesme mukavemetlerini azalttığı söylenebilir.

Ayrıca üreticileri tarafından sağlanan özellikler [77] ile nümerik olarak elde edilen Young modülü ile deneysel olarak elde edilen değerler arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

Üretimi yapılan kompozit plakada, 2540 kg/m³ özgül kütle (ρ_f) değerine sahip dokuma cam elyaf 8 kat olarak kullanılmış ve matris olarak da Araldite LY 1564 epoksi ve Aradur 3487 sertleştirici karışımı kullanılmıştır. Matrise ait özgül kütle değeri (ρ_m) bulunurken, Araldite LY 1564 epoksi reçine kütlece birleşme oranı ($W_{Araldite}$) ve Aradur 3487 sertleştirici kütlece birleşme oranı (W_{Aradur}) sırasıyla 100 ve 34 olarak alınmıştır.

$$\rho_m = \frac{\rho_{Araldite} W_{Araldite} + \rho_{Aradur} W_{Aradur}}{W_{Araldite} + W_{Aradur}} \quad (4.1a)$$

Araldite LY 1564 epoksi reçineye ait en düşük özgül kütle değeri ($\rho_{Araldite\min}$) ve Aradur 3487 sertleştiriciye ait en düşük özgül kütle değerleri ($\rho_{Aradur\min}$) alınıp Denklem (4.1b)'de yerlerine yazılırsa, matrise ait en düşük özgül kütle değeri ($\rho_{m\min}$) bulunabilir.

$$\rho_{m\min} = \frac{\rho_{Araldite\min} W_{Araldite} + \rho_{Aradur\min} W_{Aradur}}{W_{Araldite} + W_{Aradur}} \quad (4.1b)$$

$$\rho_{m\min} = \frac{(1.1)(100) + (0.98)(34)}{(100) + (34)}$$

$$\rho_{m\min} = 1.07 \frac{g}{cm^3} = 1070 \frac{kg}{m^3}$$

Aynı şekilde, Araldite LY 1564 epoksi reçineye ait en yüksek özgül kütle değeri ($\rho_{Aralditemaks}$) ve Aradur 3487 sertleştiriciye ait en yüksek özgül kütle değeri ($\rho_{Aradurmaks}$) alınıp Denklem (4.1c)'de yerlerine yazılırsa, matrise ait en yüksek özgül kütle değeri (ρ_{mmaks}) bulunabilir.

$$\rho_{mmaks} = \frac{\rho_{Aralditemaks} W_{Araldite} + \rho_{Aradurmaks} W_{Aradur}}{W_{Araldite} + W_{Aradur}} \quad (4.1c)$$

$$\rho_{mmaks} = \frac{(1.2)(100) + (1.0)(34)}{(100) + (34)}$$

$$\rho_{mmaks} = 1.15 \frac{g}{cm^3} = 1150 \frac{kg}{m^3}$$

Minimum ve maksimum özgül kütle değerlerinden (ρ_{min} ve ρ_{maks}), ortalama özgül kütle değeri (ρ_{mort}) bulunabilir.

$$\rho_{mort} = \frac{\rho_{min} + \rho_{maks}}{2} \quad (4.2)$$

$$\rho_{mort} = \frac{(1070) + (1150)}{2}$$

$$\rho_{mort} = 1.11 \frac{g}{cm^3} = 1110 \frac{kg}{m^3}$$

Araldite LY 1564 epoksi reçine ile Aradur 3487 sertleştiricinin belirtilen kütlece birleşme oranları ile elde edilen matrise ait maksimum özgül kütle değeri (ρ_{maks}) 1150 kg/m³, minimum özgül kütle değeri (ρ_{min}) 1070 kg/m³ ve ortalama özgül kütle değeri (ρ_{mort}) ise 1110 kg/m³ bulunmuştur.

Kompozite ait kütle değeri (w_k), fiber kütlesi (w_f) ile matris kütlesinin (w_m) toplamına eşittir [123].

$$w_k = w_f + w_m \quad (4.3)$$

Kompozit laminata ait kütle değeri (w_k), kompozit özgül kütle değeri (ρ_c) ile hacim değerinin (v_c) çarpımına eşit olacaktır. Aynı ayrı matris ve fibere ait kütle değerleri

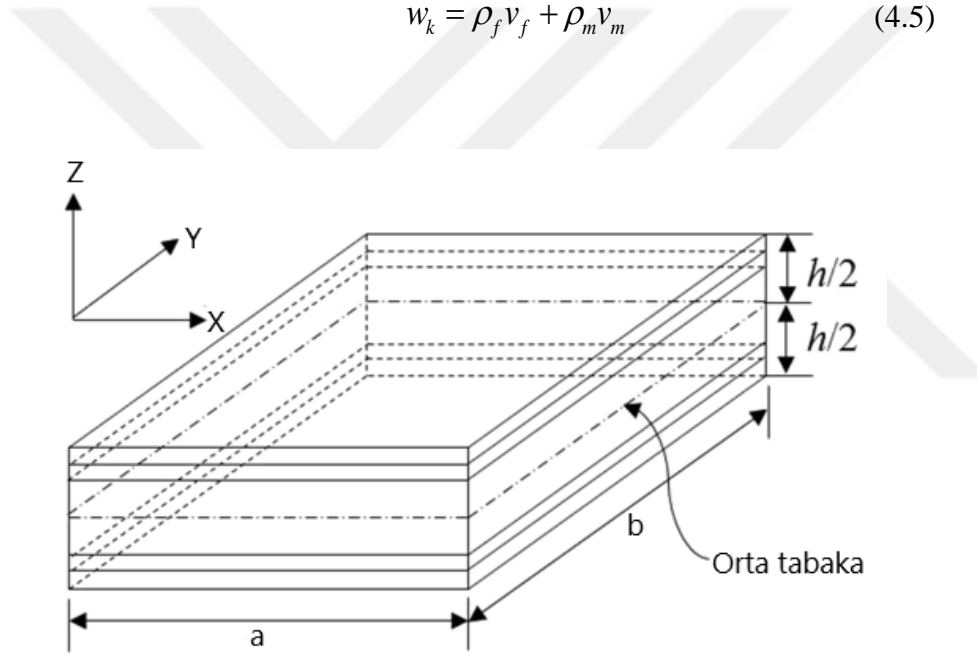
de (w_f ve w_m), matris ve fibere ait özgül kütle değerleri (ρ_m ve ρ_f) ile matris ve fibere ait hacim değerlerinin (v_m ve v_f) çarpımına eşittir [123].

$$w_k = \rho_k v_k \quad (4.4a)$$

$$w_f = \rho_f v_f \quad \text{ve} \quad w_m = \rho_m v_m \quad (4.4b,c)$$

Denklem (4.4a) ve Denklem (4.4b,c), Denklem (4.3)'teki yerlerine yazılırsa Denklem (4.5)'e ulaşılabilir.

$$w_k = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (4.5)$$



Şekil 4. 72 : Kompozit plaka ölçüleri

Kompozit laminata ait hacim değeri (v_k), her bir uzva ait uzunluk değerlerinin çarpımına eşittir.

$$v_k = abh \quad (\text{a: en, b: boy ve h: yükseklik}) \quad (4.6a)$$

$$v_k = (1.5)(1.8)(2 \times 10^{-3})$$

$$v_k = 5.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

8 katlı düz örgü cam elyaf kumaşın istiflenmesi ile elde edilen laminat içerisindeki fiber hacmi (v_f) aşağıdaki şekilde bulunmuştur. Her bir laminaya ait cam elyaf kumaşın kalınlığı (h_f) 0.14 mm olarak alınmıştır.

$$v_f = ab(8 \times h_f) \quad (4.6b)$$

$$v_f = (1.5)(1.8)(8 \times 0.14 \times 10^{-3})$$

$$v_f = 3.02 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Matrise ait hacim değeri (v_m) ile fiberlere ait hacim değerinin (v_f) toplamı kompozit laminata ait hacim değerini (v_k) verecektir.

$$v_k = v_m + v_f \quad (4.7)$$

$$v_m = v_k - v_f$$

$$v_m = (5.4 \times 10^{-3}) - (3.02 \times 10^{-3})$$

$$v_m = 2.38 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Fiber özgül ağırlık (ρ_f) ve fiber hacim (v_f) değerleri Denklem (4.4a)'ya yazıldığında, fiber kütlesi (w_f) bulunur. Cam elyafa ait özgül kütle değeri 2540 kg/m^3 olarak alınmıştır [124].

$$w_f = (2540)(3.02 \times 10^{-3})$$

$$w_f = 7.67 \text{ kg}$$

Bulunan değerler Denklem (4.5)'te yerine koyulursa, kompozite ait kütle değeri bulunmuş olur.

$$w_k = (1110)(2.38 \times 10^{-3}) + (2540)(3.02 \times 10^{-3})$$

$$w_k = 10.31 \text{ kg}$$

Matris hacimce birleşme oranı (V_m), kompozit laminat hacmi (v_k) ve matris hacminin (v_m) birbirlerine oranıdır [123].

$$V_m = \frac{v_m}{v_k} \quad \text{ve} \quad V_f = \frac{v_f}{v_k} \quad (4.8a,b)$$

$$V_m = \frac{(2.38 \times 10^{-3})}{(5.40 \times 10^{-3})}$$

$$V_m = 0.44$$

Buna göre fiberin hacimce birleşme oranı da (V_f) bulunmuş olur.

$$V_f + V_m = 1 \quad (4.9)$$

$$V_f = 0.56$$

Kompozite ait özgül kütle (ρ_k) ise, Denklem (4.3)'e, Denklem (4.4a), Denklem (4.4b) ve Denklem (4.4c)'nin yazımı ile aşağıdaki gibi bulunmuştur [123].

$$w_k = w_m + w_f$$

$$\rho_k v_k = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (4.10)$$

$$\rho_k = \rho_f \frac{v_f}{v_k} + \rho_m \frac{v_m}{v_k} \quad (4.11)$$

$$\rho_k = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (4.12)$$

$$\rho_k = (2540)(0.56) + (1110)(0.44)$$

$$\rho_k = 1910.80 \frac{kg}{m^3}$$

Fiberlerin kütle oranı (W_f) ve matrisin kütle oranı (W_m) olarak tanımlanırsa Denklem (4.13a) ve Denklem (4.13b) yazılabilir [123].

$$W_f = \frac{w_f}{w_k} \quad \text{ve} \quad W_m = \frac{w_m}{w_k} \quad (4.13a,b)$$

$$W_f + W_m = 1 \quad (4.14)$$

Fiber (W_f) ve matrise (W_m) ait kütle oranları, Denklem (4.13a)'ya Denklem (4.14) ve Denklem (4.8a,b)'nin konulması ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [123].

$$W_f = \frac{\rho_f}{\rho_k} V_f \quad \text{ve} \quad W_m = \frac{\rho_m}{\rho_k} V_m \quad (4.15a,b)$$

Kütle ve hacim birleşme oranları, fiber ve matrise ait özellikler cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [123].

$$W_f = \frac{\frac{\rho_f}{\rho_m} V_f}{\frac{\rho_f}{\rho_m} V_f + V_m} \quad (4.16a)$$

$$W_f = \frac{\frac{(2540)}{(1110)}}{\frac{(2540)}{(1110)}(0.56) + (0.44)} \quad (0.56)$$

$$W_f = 0.74$$

$$W_m = \frac{1}{\frac{\rho_f}{\rho_m}(1 - V_m) + V_m} V_m \quad (4.16b)$$

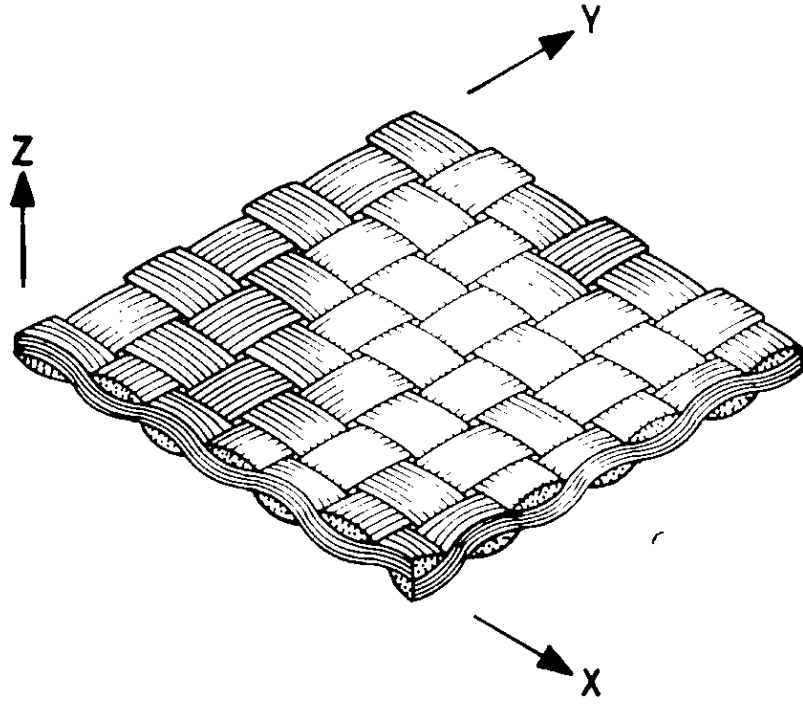
$$W_m = \frac{1}{\frac{(2540)}{(1110)}(1 - 0.56) + (0.56)} \quad (0.56)$$

$$W_m = 0.26$$

$$W_m + W_f = 0.74 + 0.26$$

$$W_m + W_f = 1$$

Buradan görülmektedir ki, fiber ve matrise ait kütlece ve hacimce birleşme oranları farklılık göstermektedir. Matris kütlece birleşme oranı 0.26 iken fiber kütlece birleşme oranı 0.74 çıkmıştır. Hacimce birleşme oranlarına bakıldığında ise matris hacimce birleşme oranı 0.44 iken fiber hacimce birleşme oranı 0.56 bulunmuştur.

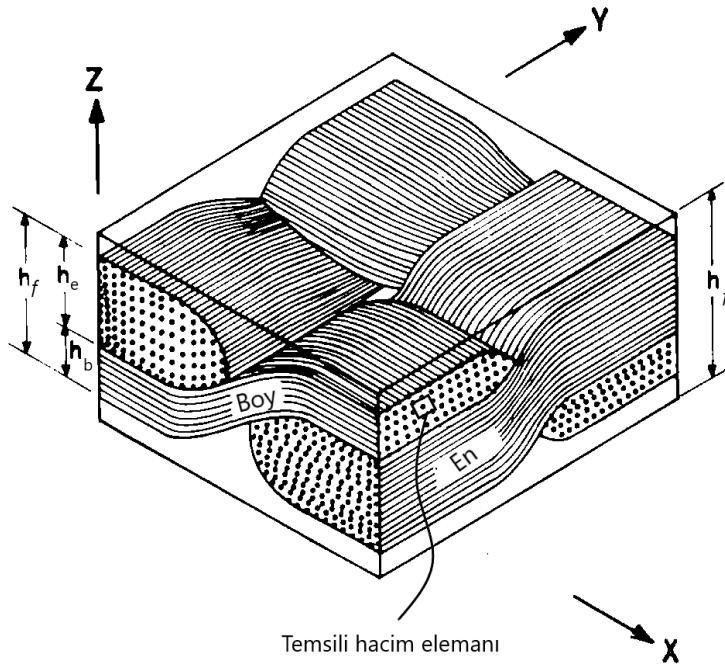


Şekil 4. 73 : Düz örgü kumaş yapısına sahip cam elyaf kumaş şematik gösterimi [125].

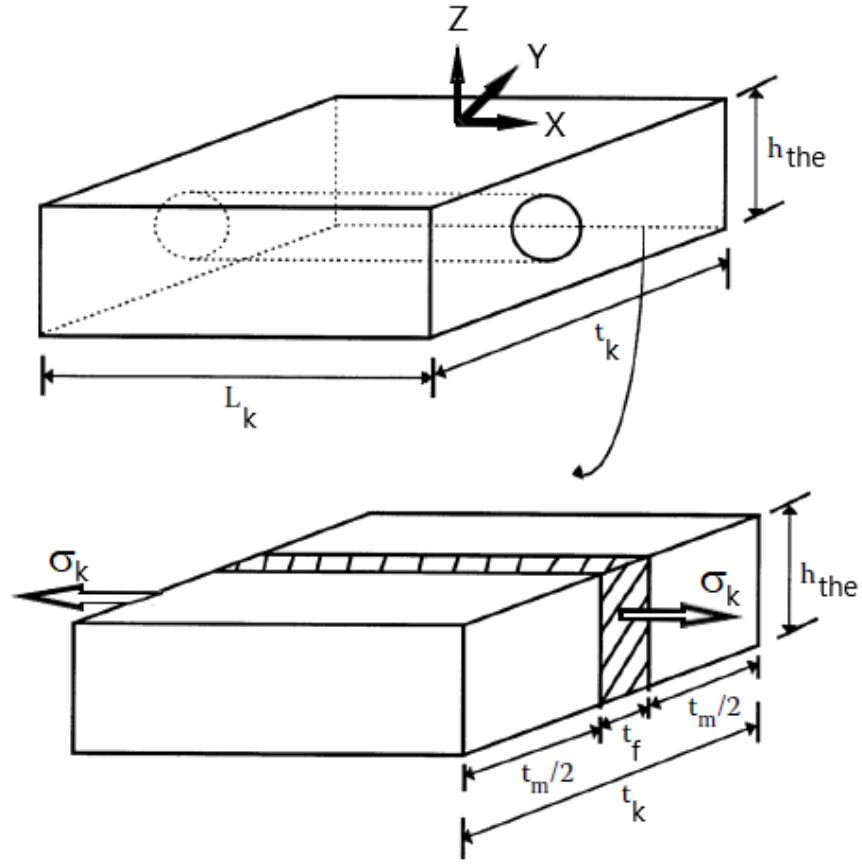
İki karşılıklı dik elastik simetri düzlemine sahip özel bir anizotropik malzeme türü ortotropik malzeme olarak adlandırılır. Bu elastik simetri düzlemleri ortotropi düzlemleridir ve enine kesitleri ortotropi eksenleridir. En yaygın kullanılan ortotropik malzemeler ahşap, kontrplak, cam takviyeli plastik, laminat ve diğer kompozit malzemelerdir. Bu materyaller, esas olarak, bir düzlem gerilme durumuna sahip olan plakalar biçiminde kullanılmaktadır [126, 127]. Şekil 4.73'te, bir düzlem gerilimli

ortotropik bir levhanın (dokunmuş kumaş) elemanı gösterilmiştir. X ve y eksenleri ortotropi düzlemleri ile çakışır ve z ekseni elemanın düzlemine diktir.

Şekil 4.74'te düz örgü cam elyaf kumaşın enine ve boyuna fiberleri şematik olarak gösterilmiştir. Bir laminanın kalınlığı, kendisini oluşturan enine ve boyuna fiberlerin kalınlığı (h_e ve h_b) kadardır. Bu lamina içerisinde temsili bir hacim elemanı şekil üzerinde belirtilmiştir [125].



Şekil 4. 74 : Enine ve boyuna fiber kalınlıkları şematik gösterimi [125].



Şekil 4. 75 : Temsili hacim elemanı [123]

Şekil 4.75'te temsili hacim elemanı verilmiştir. Fiber, matris ve kompozitin aynı yükseklik değerine ($h_k=k_f=h_m$) sahip olduğu kabul edilir ve her bir elemanın genişliği sırasıyla t_f , t_m ve t_k ile gösterilirse kompozitin, fiberin ve matrisin alanı (A_k , A_f , A_m) aşağıdaki şekilde ifade edilir [123].

$$A_k = t_k h \quad (4.17a)$$

$$A_f = t_f h \quad \text{ve} \quad A_m = t_m h \quad (4.17b,c)$$

Fiber hacim oranı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [123].

$$V_f = \frac{A_f}{A_k} \quad (4.18a)$$

$$V_f = \frac{t_f}{t_k}$$

Aynı şekilde matris hacim oranı da aşağıdaki bağıntı ile bulunur [123].

$$V_m = \frac{A_m}{A_k} \quad (4.18b)$$

$$V_m = \frac{t_m}{t_k}$$

Şekil 4.75'te temsili hacim elemanı ve bu temsili hacim elemanı üzerine etki eden boylamasına F_k yükünden dolayı meydana gelen boylamasına σ_k gerilmesi gösterilmiştir. Tek eksenli F_k yükü fiber ve matris tarafından (F_f ve F_m) paylaşılır.

$$F_k = F_m + F_f \quad (4.19)$$

Temsili hacim elemanına uygulanan yüklerin paylaşımı ile oluşan F_k , F_f ve F_m yükleri ve bu yüklerin kesit alanları A_k , A_f ve A_m 'ye bağlı olarak oluşturduğu kompozit, fiber ve matris gerilmesi (σ_k , σ_f ve σ_m) aşağıdaki şekilde gösterilir [123].

$$F_k = \sigma_k A_k \quad (4.20a)$$

$$F_f = \sigma_f A_f \quad \text{ve} \quad F_m = \sigma_m A_m \quad (4.20b,c)$$

Fiber, matris ve kompozit için Hooke Kanununun geçerli olduğu kabul edilir ve gerilme-şekil değiştirme bağıntıları aşağıdaki şekilde yazılabilir. ε_k , ε_f ve ε_m sırasıyla kompozit, fiber ve matristeki şekil değiştirmeler olarak ifade edilir [123].

$$\sigma_k = E_1 \varepsilon_k \quad (4.21a)$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad \text{ve} \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_m \quad (4.21b,c)$$

Elde edilen eşitlikler Denklem (4.19)'da yerine koyulursa Denklem (4.22) elde edilir.

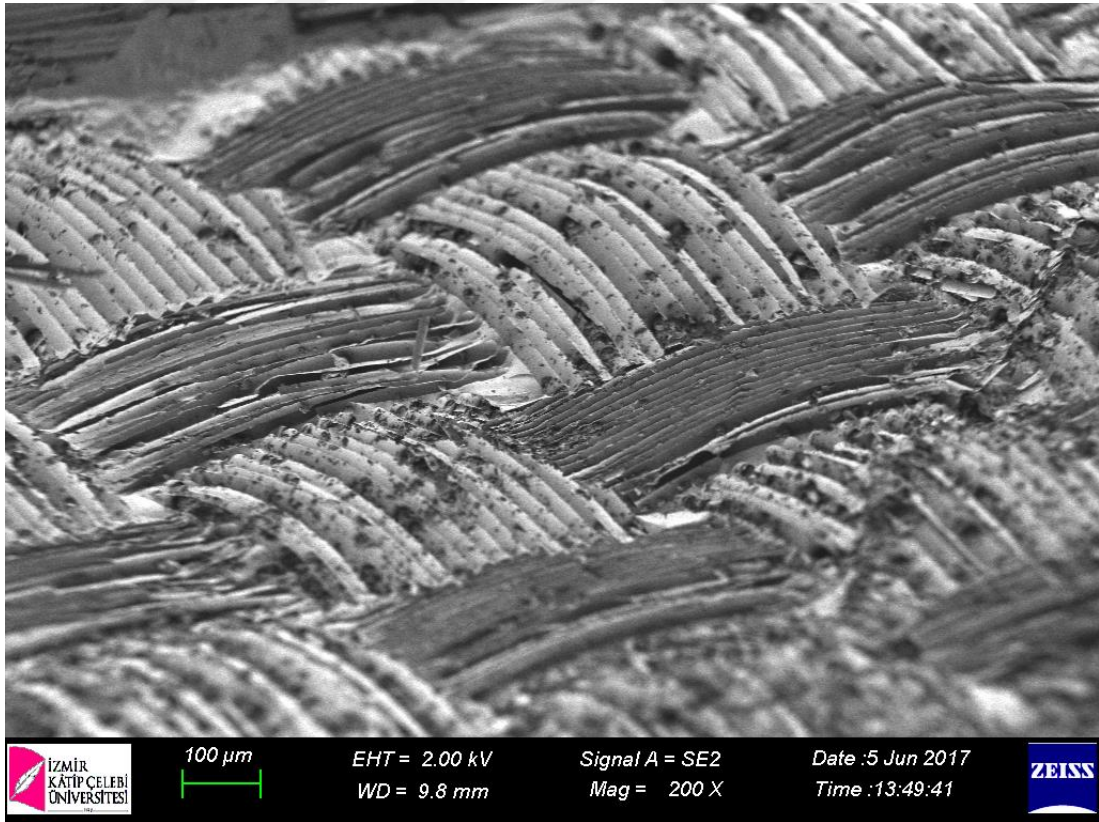
$$E_1 \varepsilon_c A_c = E_f \varepsilon_f A_f + E_m \varepsilon_m A_m \quad (4.22)$$

Kompozit, fiber ve matristeki şekil değiştirmelerin eşit olduğu kabulü yapılmış ve boylamasına elastisite modülü için aşağıdaki eşitlik elde edilmiştir [123].

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A_c} + E_m \frac{A_m}{A_c} \quad (4.23)$$

Denklem 4.23'te, alan oranları cinsinden yazılmış hacim oranları (Denklem (4.18a,b)) yazılırsa aşağıdaki eşitliğe ulaşılabilir [123].

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (4.24)$$



Şekil 4. 76 : Düz örgü cam alyaf kumaş yüzeyi.

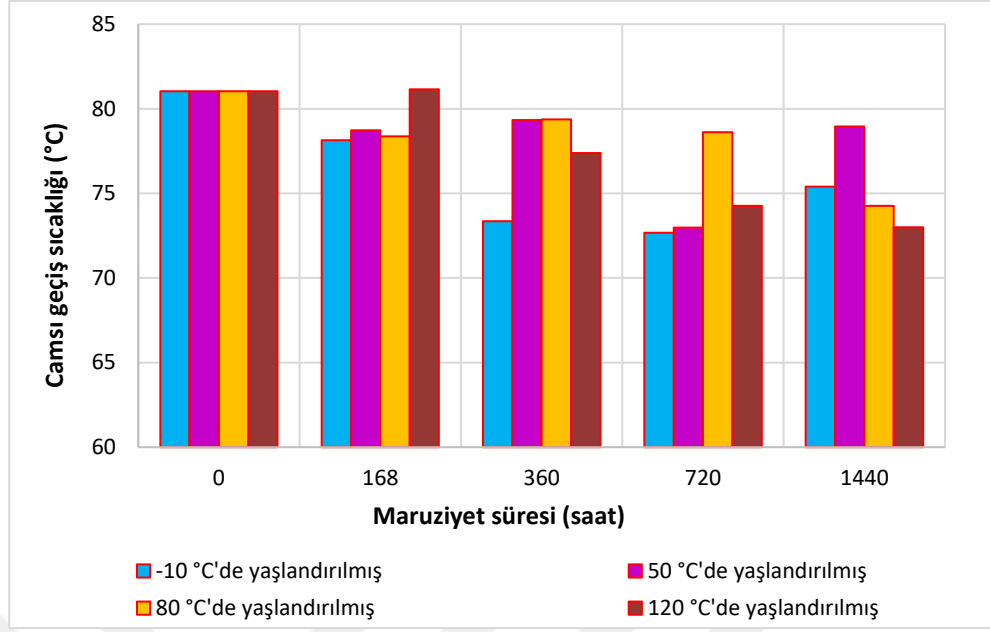
Şekil 4.76'da cam elyaf/epoksi kompozit malzemenin yüzey mikrografı verilmiştir. Şekilde düz örgü şeklinde fiberler görülmektedir. Boylamasına elastisite modülü bulunurken, yükün uygulandığı yönde yükü paylaşacak olan fiberler eşit olarak X ve Y yönüne dağıldığından ötürü fiber hacim oranı $V_f/2$ olarak alınacaktır. Buna göre değerler Denklem (4.24)'te yerlerine yazılırsa boylamasına elastisite modülü bulunur. Fiberlere ait elastisite modülü 80 GPa [128] ve matrise ait elastisite modülü de 3.1 GPa [77] olarak alınmıştır.

$$E_1 = (80)(0.28) + (3.1)(0.44)$$

$$E_1 = 23.76 \text{ GPa}$$

Boylamasına elastisite modülü teorik olarak 23.76 GPa ve deneysel olarak da en düşük 32.2 GPa olarak bulunmuştur. Buna göre teorik değer ile deneysel değer arasında %26'lık bir farkın olduğu görülmektedir.

Termal yaşlanmaya maruz kalan polimerik kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinde meydana gelen düşüşün ana sebebi, malzemenin bozunma mekanizmasıdır. Literatürde, bozunma mekanizmasının oluşumu şu şekilde ifade edilir; bozunma mekanizmasının ana nedenleri yüzey bozunumu ve yüzeye dik olan mikro çatlaklardır. Polimerik kompozit malzemedeki zincir kırılmaları, bozunuma uğramış yüzey ve mikro çatlaklar ile meydana gelir. Zincir kırılımının görünümü ile termal yaşlanma ürünleri matrise yayılır. Termal yaşlanma ürünleri ve oksijen, matris içerisine dağıldığı için, matris ile oksijen arasında ve matris ile diğer bozunma ürünleri arasında reaksiyonlar meydana gelir [28, 111, 127, 129]. Bu reaksiyonlarla, malzeme bozunumu hızlanır. Malzeme bozunumunun oluşumu ile birlikte, yük taşıma kapasitelerinde veya mekanik özelliklerde azalma gözlemlenebilir.



Şekil 4. 77 - Kompozit malzeme camsı geçiş sıcaklığı (T_g) – Maruziyet süresi – Sıcaklık grafiği.

Kompozit malzemelerin camsı geçiş sıcaklıklarını belirlemek için TA DSC Q2000 cihazı kullanılmıştır. 10-15 mg'lık örnekler alüminyum panlara konulmuş ve 10 °C/dk. hızında 25 ila 300 °C arasında ısıtılmıştır. Cam elyaf/epoksi kompozit malzemenin termal yaşlanma süreleri ile camsı geçiş sıcaklıklarındaki (T_g) değişiklikler Şekil 4.77'de gösterilmektedir. 1440 saat yaşlandırılanlar arasında, en düşük T_g 120 °C'de yaşlandırılan örneklere aittir, en yüksek değer ise 50 °C'de yaşlandırılmışlara aittir. Şekil 16'da gösterildiği gibi, orjin (yaşlı olmayan numunelere ait) camsı geçiş sıcaklığı değeri, tüm yaşlanma süreleri için diğer numunelere ait değerlerden daha yüksektir.

T_g ve Young modülü grafikleri (Şekil 4.71, 4.77) birlikte değerlendirildiğinde, 120 ve 80 °C'de yaşlandırılmış kompozitlerin T_g ve Young modülü değerleri benzer davranış gösterir. Loctite 9461 ve 9466 ile yapıştırılmış numuneler, 80 ve 120 °C'de 1440 saat yaşlandıktan sonra en düşük kopma mukavemeti değerlerini alır ve aynı koşullar altında yaşlandırılmış kompozitler de en düşük T_g ve Young modülü değerlerini alırlar. 80 °C'deki kompozitlerin T_g ve Young modülü değerleri sabit bir düşüş eğilimi gösterirken, DP 460 ile yapıştırılmış örneklerin yük taşıma kapasitesi değerleri sürekli olarak artmaktadır. Bu, substrat ve yapıştırıcı arasındaki polimerizasyon seviyesindeki artışa bağlı olarak oluşan daha güçlü bağlanma kuvvetlerinden kaynaklanabilir.

Kompozitin mekanik özelliklerinde meydana gelen azalmalar yapıştırılmış kompozit numunelerin yük taşıma kapasitesi değerlerini olumsuz yönde etkilese de kesme mukavemeti testleri sırasında herhangi bir kompozit numunede stok kırılma ya da lif yırtılması hasarına rastlanılmamıştır [130]. Yaşlandırma, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini düşürse de kırılma noktaları her durumda tek bindirmeli yapıştırılmış kompozit numunelerin kesme mukavemeti değerlerinin üzerinde kalmıştır. Çalışmalar, epoksi esaslı yapıştırıcıların T_g 'lerinin, kesme mukavemeti, elastisite modülü ve mekanik özellikleri ile ilişkili olduğunu ve yapıştırıcıların T_g 'lerinin mekanik özelliklerle doğru orantılı olduğunu göstermiştir [131-134]. Böylece, tek bindirmeli yapıştırılmış numunelerin T_g değerlerinin düşüş göstermesi, numunelerin kesme mukavemetlerinin azalmasına ve T_g değerlerinin artış göstermesi de numunelerin kayma mukavemetlerinde artış göstermesi beklenmektedir. [135]'e göre, termal yaşlanma etkisi ile T_g değerlerinde azalma, termal bozunma ve termo-oksitatif mekanizmaların neden olduğu zincir kırılmaları ile ilgilidir. Bazı yaşlanma koşullarının T_g değerlerini artırmasının nedeni, termo-oksitatif mekanizmanın T_g değerinin değişmesine olumlu katkıda bulunmasıdır [111].

4.4.4 Termal-yağ yaşlandırmanın morfolojik özelliklere etkisi

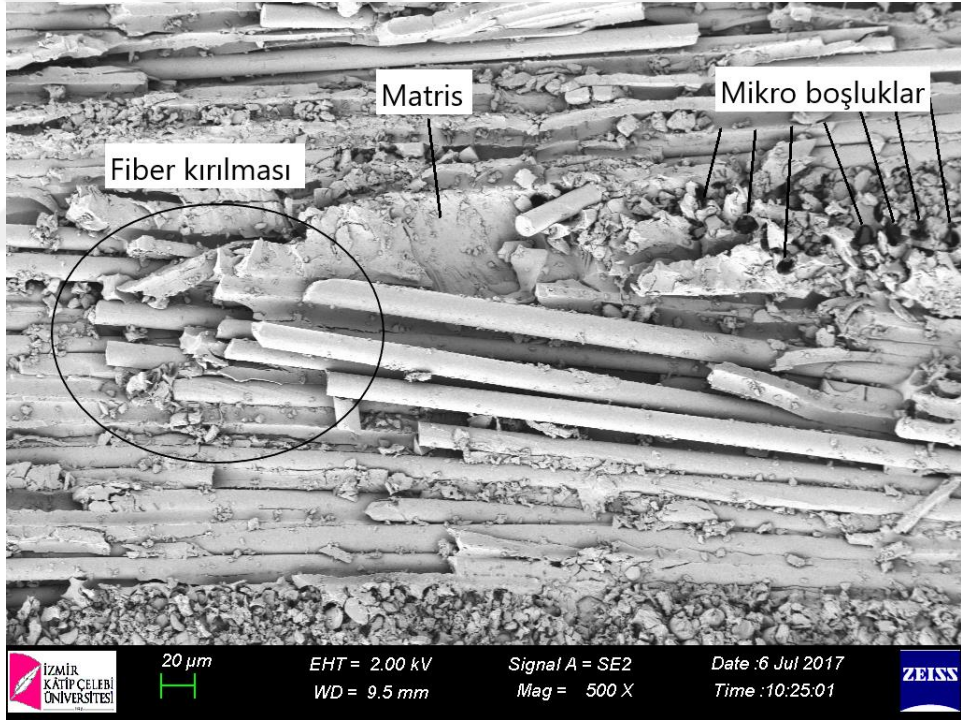
Çekme testi uygulanmış numunelerden görüntüler elde edilmeden önce, numuneler 5 nm altın vanadyum ile kaplanmıştır. Kompozit numunelerin yüzeyleri, alan emisyon taramalı elektron mikroskobu Carl Zeiss 300VP ile incelenmiştir.

Lif çekilmesi ve lif ayrılması, kompozit malzemelerin kopması sırasında enerji yayılımına neden olan başlıca faktörlerden ikisidir. Kısa ve kırık lifler içeren kompozitler daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Bu nedenle, yükleme sırasında, bu lifler matrislerden kolayca çekilebilmekte ve bu da zayıf gerilim transferine katkıda bulunmaktadır. Kompozitin maksimum yük taşıma kapasitesi, fiberler ve matrisler arasındaki ara yüzey yapışmasından önemli ölçüde etkilenmektedir [115].

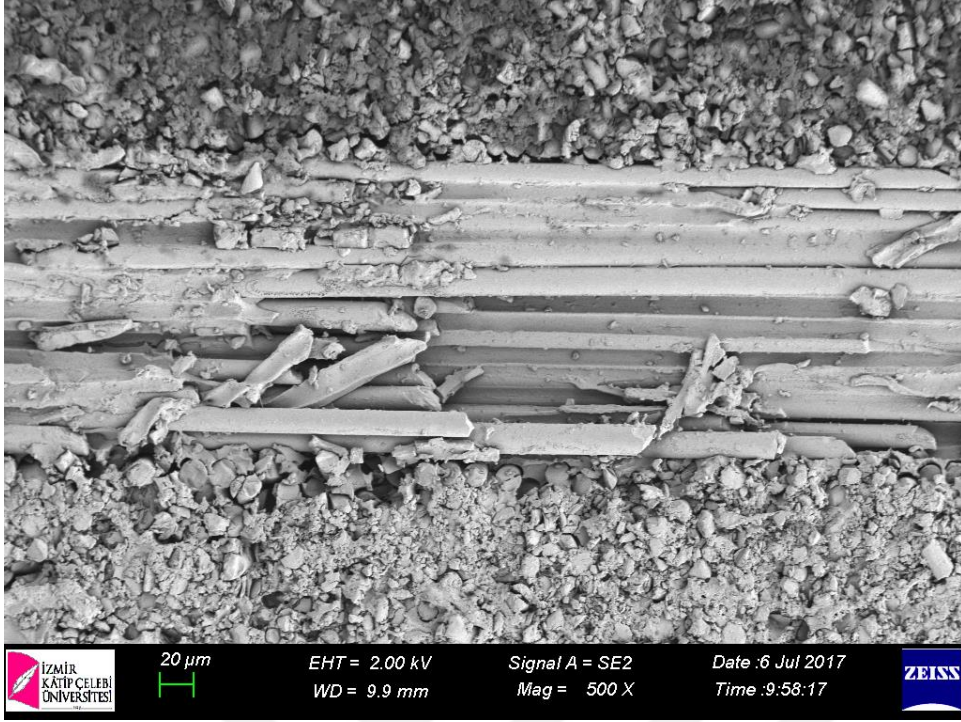
Farklı sıcaklıklarda 720 saat süreyle yaşlandırılan cam elyaf/epoksi kompozit yüzeylerin SEM mikrografları Şekil 4.78'de verilmiştir. -10 °C'den 140 °C'ye kadar farklı sıcaklıklarda yaşlandırılan cam elyaf/epoksi takviyeli kompozitler, fiber ve matris arasındaki arayüz bağında önemli farklılıklar göstermektedir. Lifin

süreksizliğinin lifin kırılmasına ve çekilmesine neden olduğu mikrograflardan açıkça görülebilir (Şekil 4.78 (a), (b)). Sonuç olarak, Şekil 4.78 (a) ve (b) 'de görülebileceği gibi, lifin çekmesi nedeniyle matrislerde mikro boşluklar mevcuttur.

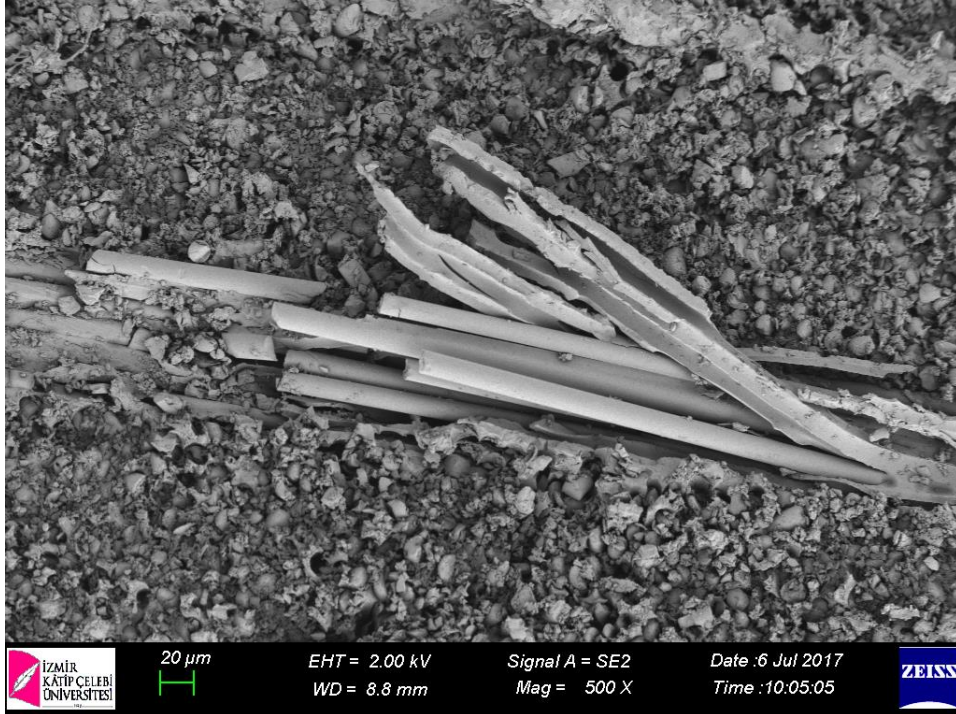
Görüntüler dikkatlice incelendiğinde, termal yaşlanma sıcaklığı arttıkça matris malzemesinin liflerden ayrıştığını gözlemleyebiliriz. Pürüzlü ve deforme olmuş matrisin yüzeyi, özellikle 140 °C'de (Şekil 4.78 (e)), kompozit malzemenin en dış tabakasının mekanik özelliklerine katkıda bulunmaz ve bu bulgu, gerçekleştirilen gerilme testleriyle tutarlıdır. 140 °C'de 720 saat yaşlandırılan örnekler, yaşlı olmayan örneklerle karşılaştırıldığında, yaklaşık %20'lik bir yük taşıma kapasitesi kaybına sahiptir.



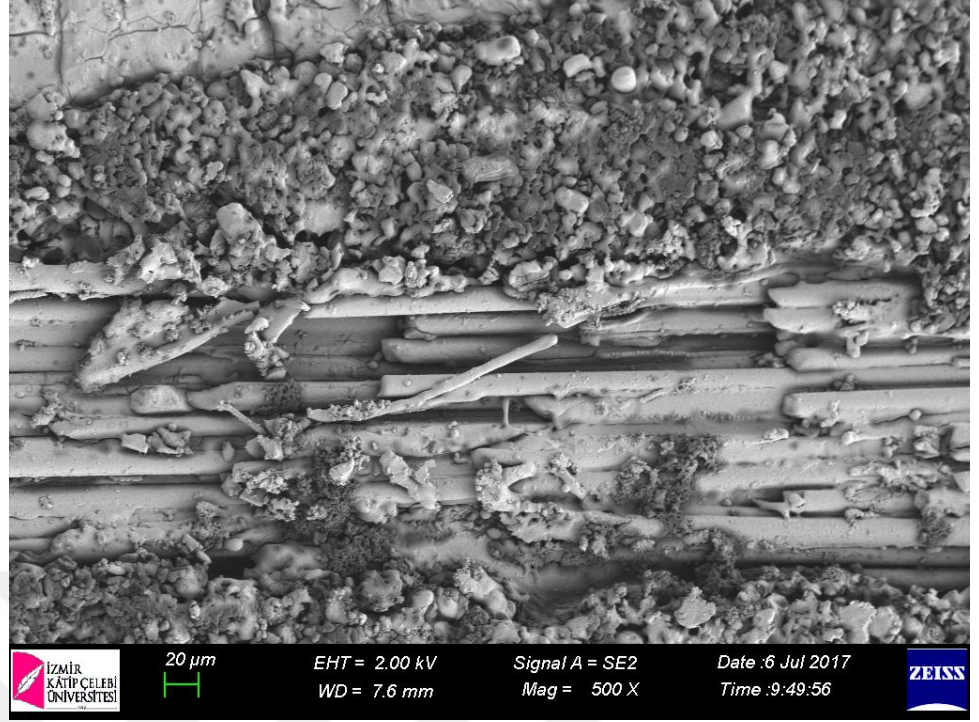
(a) -10 °C'de 720 saat yaşlandırılmış kompozitin SEM mikrografı



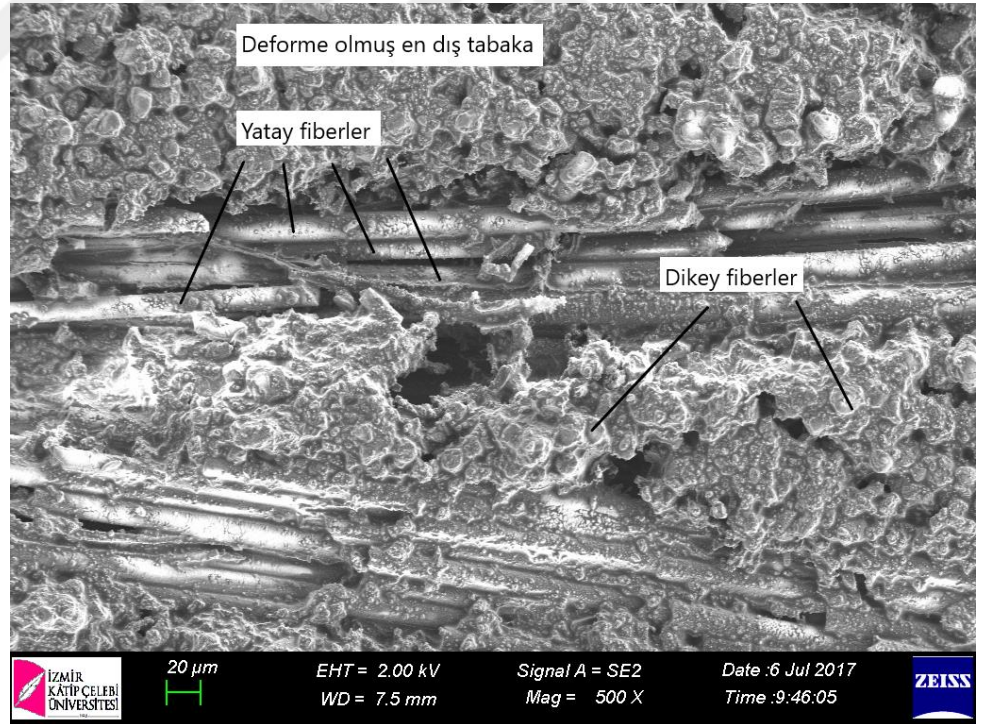
(b) 50 °C’de 720 saat yaşlandırılmış kompozitin SEM mikrografı



(c) 80 °C’de 720 saat yaşlandırılmış kompozitin SEM mikrografı



(d) 120 °C'de 720 saat yaşlandırılmış kompozitin SEM mikrografı

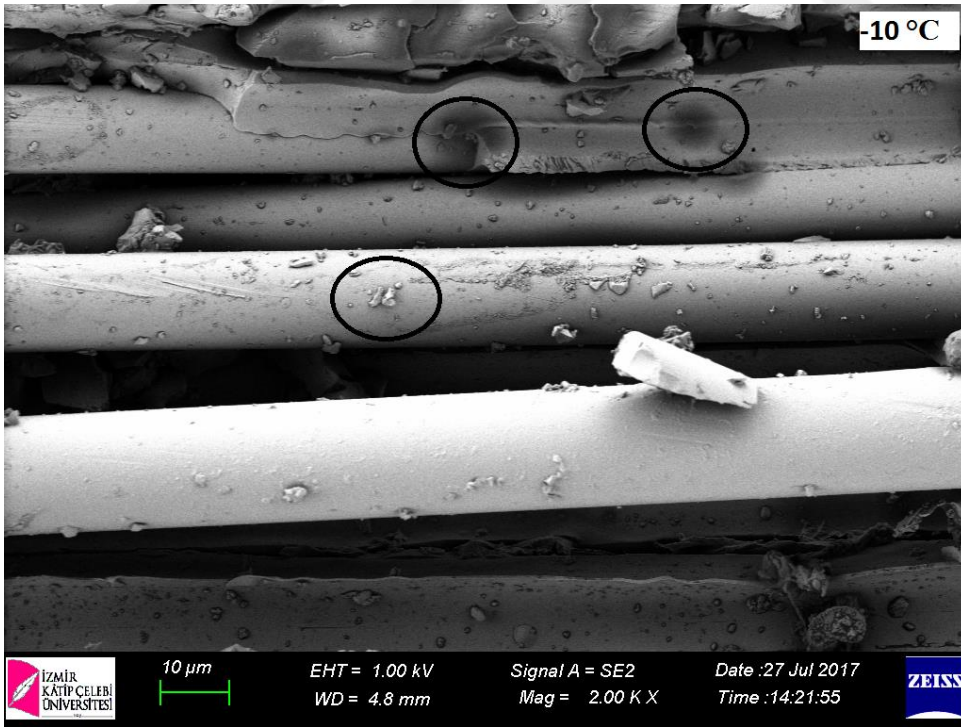


(e) 140 °C'de 720 saat yaşlandırılmış kompozitin SEM mikrografı

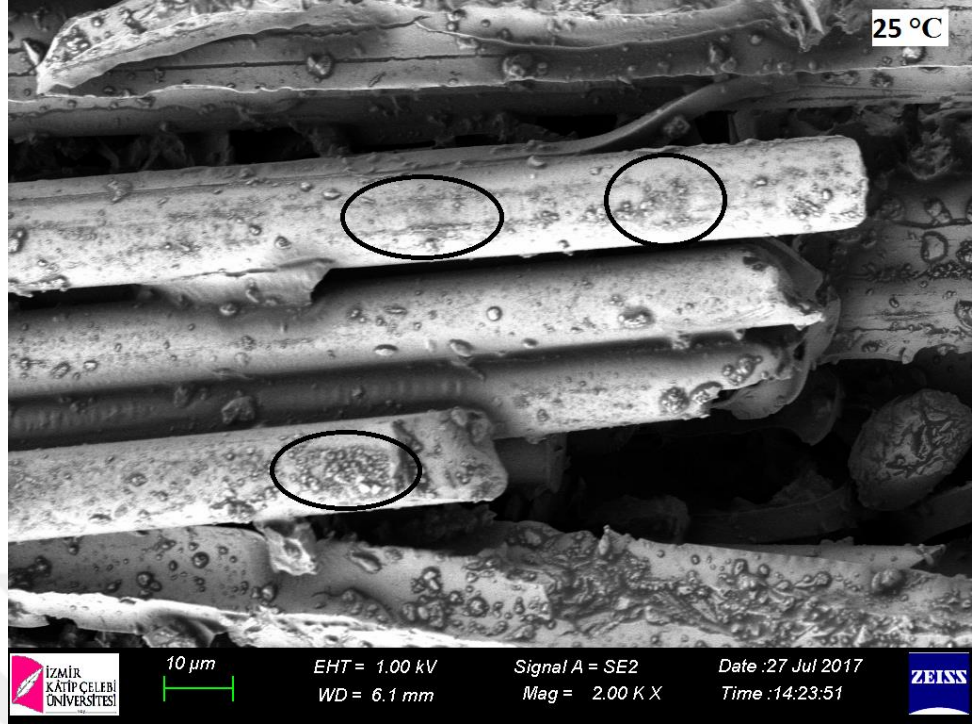
Şekil 4. 78 : 720 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları

Fiber ve matris arasındaki yapışma, yaşlandırma sıcaklığının artmasıyla azalır ve fiberlere yapışan matris fiberlerden ayrılır. Bu yapışmadaki azalma, yüklemeyi telafi etmesi gereken liflerin mekanik özelliklerinin azaldığı anlamına gelir. Mekanik çekme testleri bu verileri doğrulamaktadır. Yaşlanma süresinin uzaması nedeniyle, mekanik özellikleri azaltan daha fazla çatlak ve ayrık lif ortaya çıkar. Ayrıca, yaşlanma sıcaklığının artmasıyla matris yüzey bozunması ortaya çıkmaktadır.

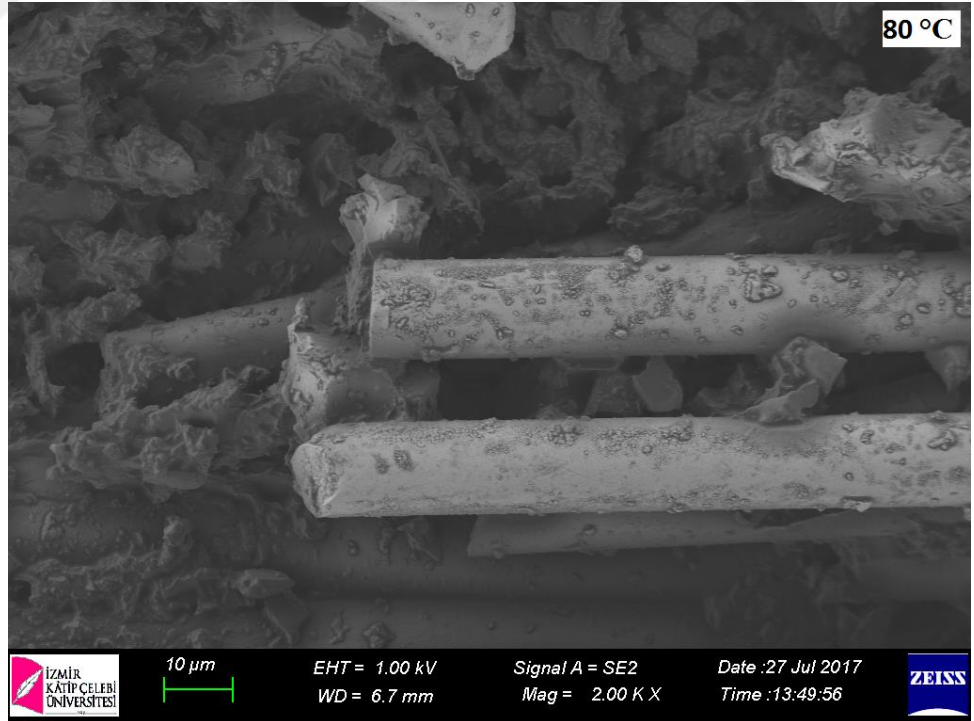
1080 saatlik termal-yağ yaşlandırma prosesi uygulanmasından sonra, cam elyaf yüzeyindeki lekeler belirginleşir ve bu da cam elyaf yüzeyinde daha fazla hasar olduğunu gösterir (Şekil 4.79-4.84). Bu lekeler termal yaşlandırma sıcaklığındaki artışla daha belirgin hale gelir. Bu nedenle, en az miktardaki leke, -10 °C'de yaşlandırılmış örnekte görülür (Şekil 4.79 (a)). Örneklerin liflerindeki deformasyon, özellikle 100 °C, 120 °C ve 140 °C'de yaşlandırılanlarda daha belirgindir (Şekil 4.79 (d)-(i)). Bu hasar, malzemenin çekme testi esnasında taşıyabileceği maksimum yükün azalmasına neden olan faktörlerden biridir, çünkü bu hasarlar, yükleme sırasında gerilme konsantrasyonları olarak hareket etmektedirler [59].



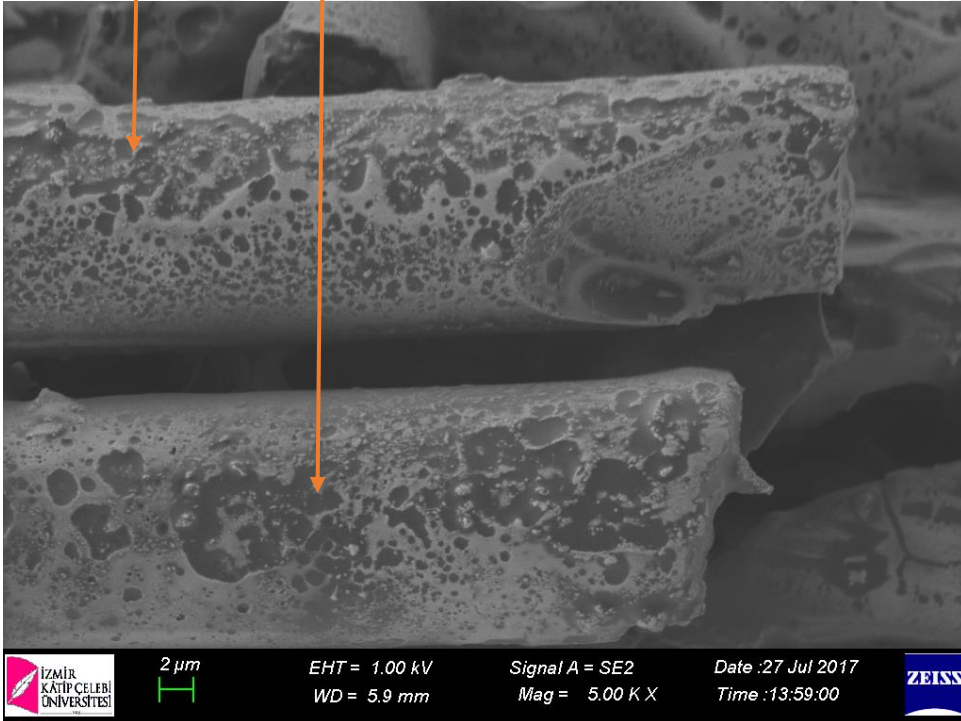
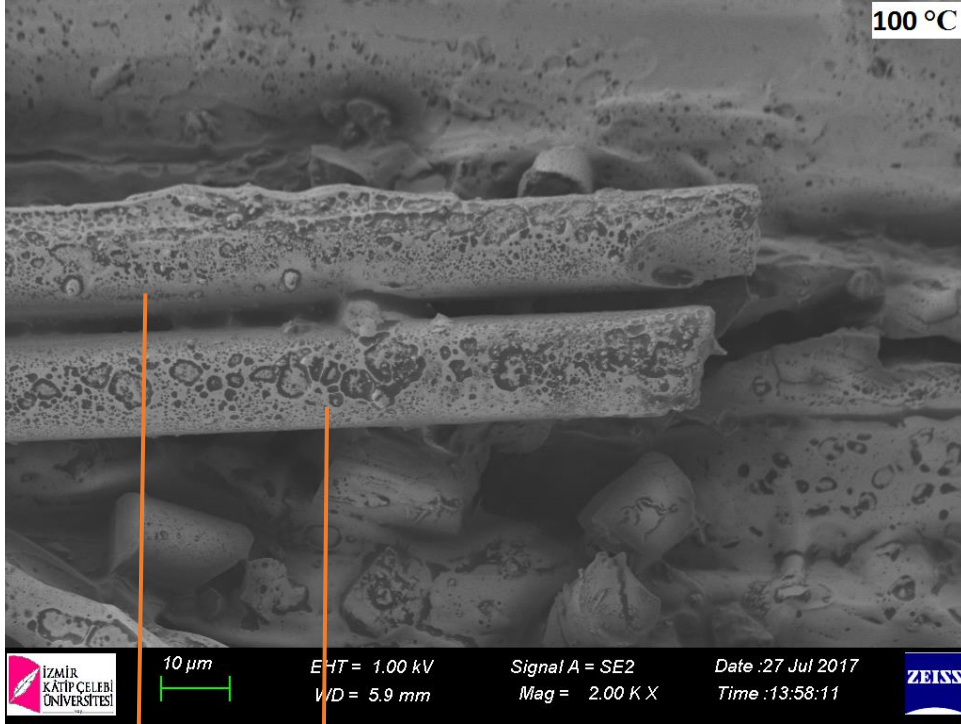
Şekil 4. 79 : -10 °C'de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitin SEM mikrografları.



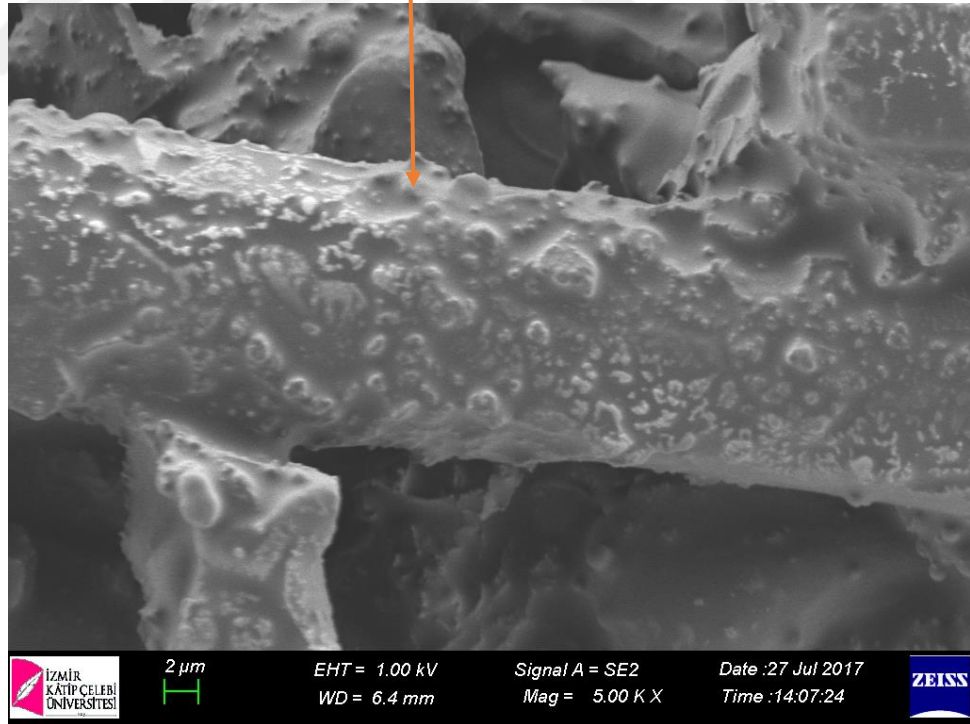
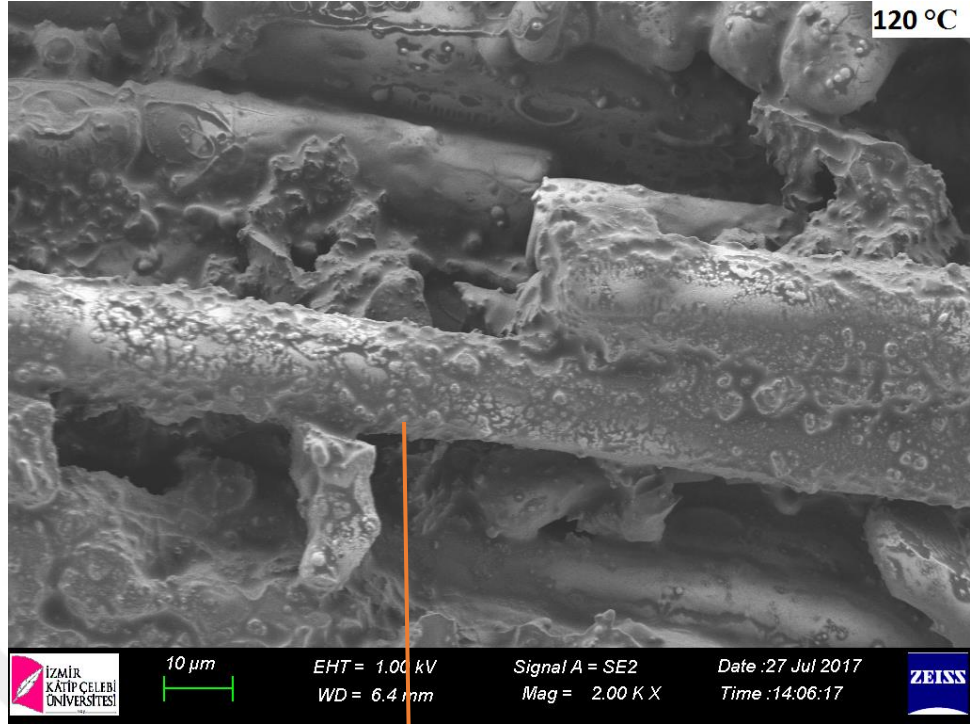
Şekil 4. 80 : 25 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.



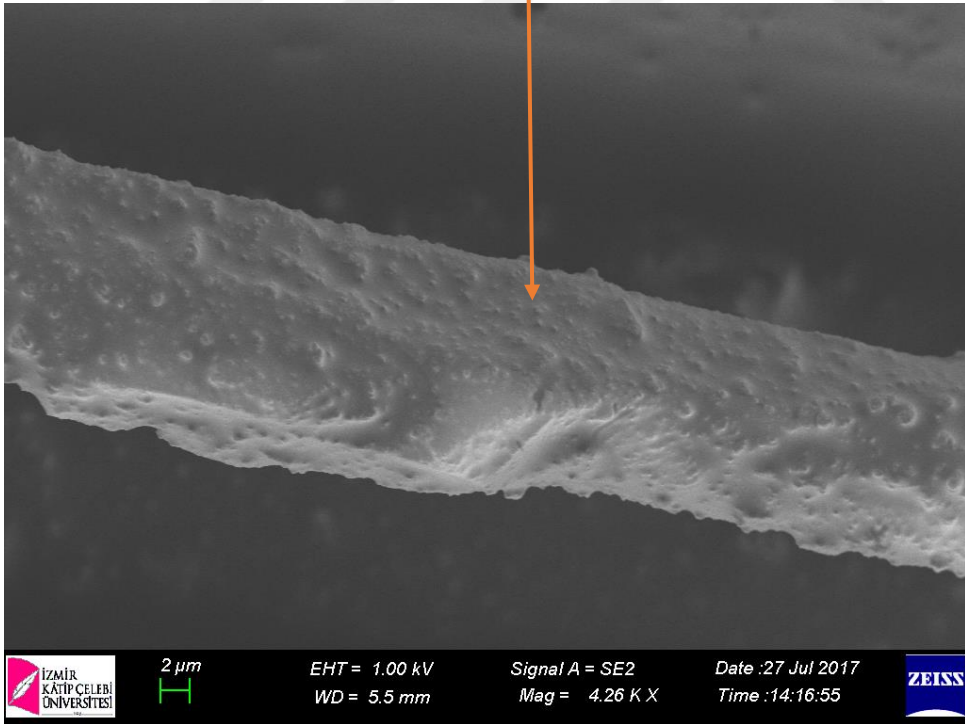
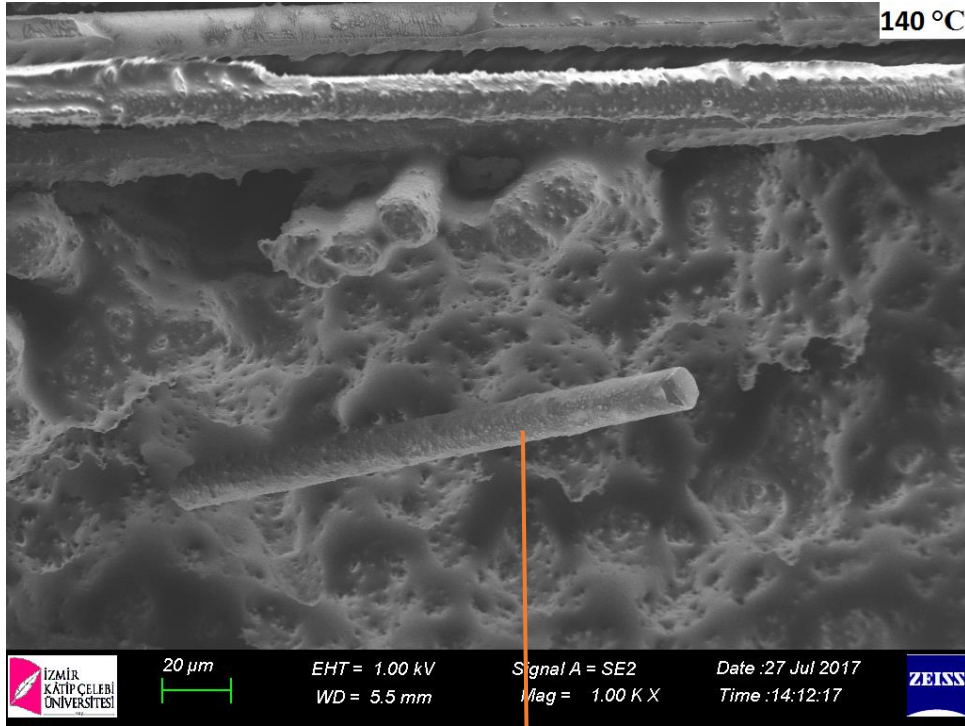
Şekil 4. 81 : 80 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.



Şekil 4. 82 : 100 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.



Şekil 4. 83 : 120 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.



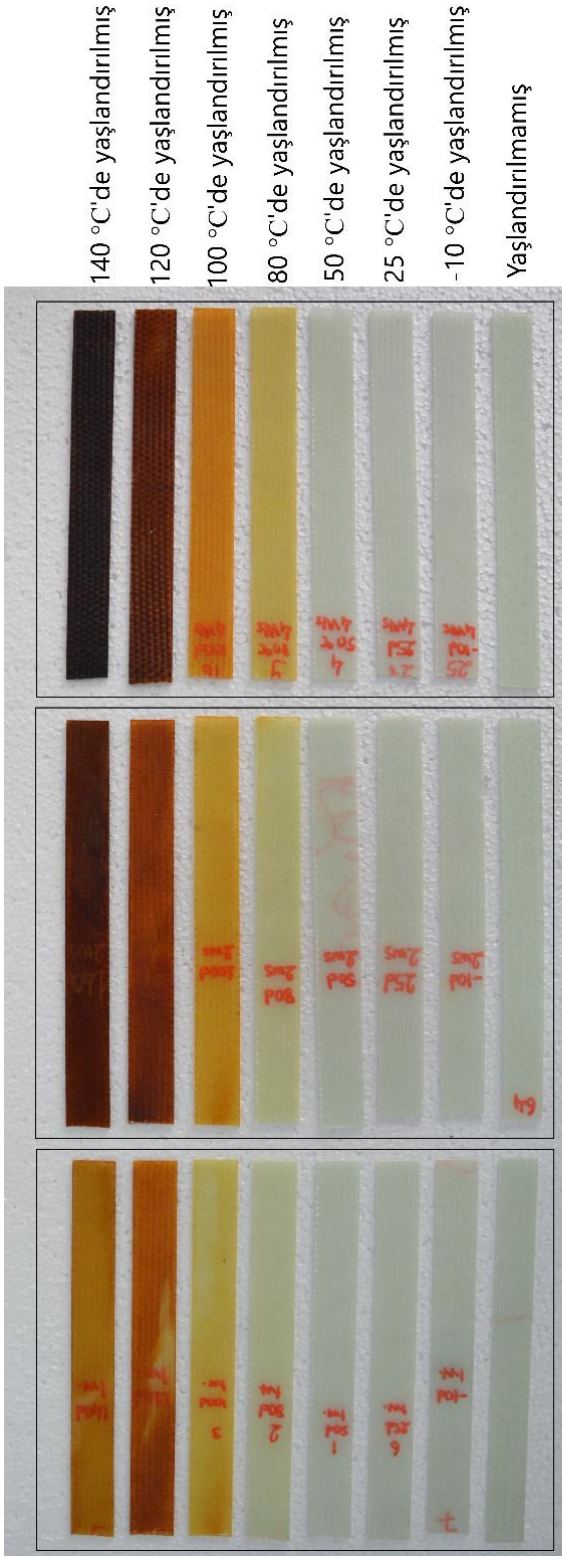
Şekil 4. 84 : 120 °C’de 1080 saat termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerin SEM mikrografları.

4.4.5 Yaşlandırılmış kompozitlerin renk değişimi

Termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş numunelerde çıplak gözle renk değişimi fark edilebilir; özellikle yüksek sıcaklıklarda yaşlandırılan örneklerin renklerinde koyulaşma belirginleşmektedir (Şekil 4.85). Yaşlandırma sıcaklıkları 120 ve 140 °C olan örnekler yaşlanmaya maruz kalmadan önce yeşil tonlarda görülürler, ancak 24 saatlik bir yaşlanmadan sonra bile kahverengi tonlarına doğru kararmaya başlarlar. Bu örnekler, 1080 saatlik yaşlandırmanın sonunda en karanlık hallerini alırlar. 80, 100, 120 ve 140 °C'deki örneklerde renk değişimi gözlenirken, -10, 25, 50 °C'deki örneklerde renk değişikliği gözlenmez. Yaşlandırma sürelerine göre renkteki değişime odaklanıldığında, özellikle 80, 100, 120 ve 140 'de yaşlandırılanların renklerinin koyulaştığı sonucuna varılabilir.

[112]'e göre, sıcaklık arttıkça, kompozit levha üst tabakasının daha karanlık renk tonlarına doğru dönmeye başlar; bu değişiklik, görünür alanın tamamında (400-700 nm) radyasyon emilimine neden olan oksidasyon ürünlerinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.85'te görüldüğü gibi, yaşlanma süresi, renk kararmasında yaşlanma sıcaklığı kadar etkili değildir. Bununla birlikte, yaşlanma süresinin, renk kararmasını bir dereceye kadar arttırdığı belirtilmelidir. Karartmanın temel nedeninin yaşlanma sıcaklığı olduğu açıktır.



Şekil 4. 85 : Termal-yağ yaşlandırmasına tabi tutulmuş kompozitlerde renk değişimi

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışması dört ayrı çalışmadan oluşmaktadır. Bu çalışmalar şunlardır;

- Düşük hızlı darbe ve termal yaşlandırmanın yapıştırılmış kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkileri,
- Termal yorulmanın çeşitli yapıştırıcılar ile yapıştırılmış kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkileri,
- Termal-yağ yaşlandırmanın çeşitli yapıştırıcılar ile yapıştırılmış kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkileri,
- Termal-yağ yaşlandırmanın cam elyaf/epoksi kompozit malzemelerin mekanik ve termal özelliklerine etkileri.

Tezin birinci adımını oluşturan “Düşük Hızlı Darbe ve Termal Yaşlandırmanın Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri” başlıklı çalışmada, üç farklı sıcaklıkta (-18, 25 ve 70 °C) termal yaşlandırmanın, altı farklı enerji seviyesine (5, 10, 15, 20, 25 ve 30J) sahip düşük hızlı düşey darbenin ve üç farklı test sıcaklığının (-18, 25 ve 70 °C) tek bindirmeli olarak yapıştırılmış fiber/epoksi kompozit numunelerin çekme özellikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Buna göre, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Yaşlandırılmamış numunelerin yük taşıma kapasiteleri sadece -18 °C'de uygulanan termal yaşlandırma prosesinin etkisi ile artar.
- -18 °C'de termal yaşlandırma, darbe uygulanmış numunelerin yük taşıma kapasitelerini artırır.
- Oda sıcaklığında test edilen örneklerde en yüksek deplasman, termal yaşlanma uygulanmamış örneklerin eğrisinde gözlenir.
- Darbe enerjisi arttıkça, yapıştırılmış kompozit numunelerin yük taşıma kapasiteleri azalır.

- -18 ve 70 °C'de yapılan çekme testlerinde, numunelerin kopma yükünde azalma gözlenmiş, buna karşın oda sıcaklığında yapılan çekme testlerinde maksimum kopma yükü gözlemlenmiştir.

Tezin ikinci basamağını oluşturan “Termal-yağ Çevrimi Sebebiyle Oluşan Termal Yorulmanın Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri” başlıklı çalışmada, farklı maksimum sıcaklıklarda (80, 100 ve 120 °C) termal çevrim işleminin neden olduğu termal yorgunluğun üç farklı tür yapıştırıcı (Loctite 9466, Loctite 9461 ve DP 460) ile tek bindirmeli olarak yapıştırılmış cam fiber/epoksi kompozit numunelerin gerilme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibidir;

- DP 460 yapıştırıcı ile yapıştırılmış örneklerin yük taşıma kapasiteleri -10 ila 80 °C aralığında 30 kez termal döngü işlemi ile artmaktadır.
- -10 ila 80 °C arasında termal çevrim (DP 460 için maksimum servis sıcaklığı), 30 kez termal döngüde olanlar hariç olmak üzere, DP 460 yapıştırıcı ile yapıştırılan örneklerin yük taşıma kapasitesini azaltır.
- Termal çevrim prosesi, DP 460 yapıştırıcı ile yapıştırılmış numunelerin uzaması üzerinde azaltıcı bir etkiye sahiptir.
- Loctite 9466 yapıştırıcı ile yapıştırılmış numunelerin yük taşıma kapasiteleri, 80 ve 100 °C sıcaklıklarında 30 kez termal döngü işlemi ile artar. Buna ek olarak, 120 °C sıcaklıkta 40 kez termal döngü işlemi yük taşıma kapasitesini de arttırmıştır.
- Loctite 9466 yapıştırıcısı ile yapıştırılmış numunelerin tüm gerilme test sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, maksimum uzamaya sahip numunelerin aynı zamanda en yüksek yük taşıma kapasitesi değerlerine sahip olduğu görülmüştür.
- Loctite 9461 yapıştırıcı ile bağlanmış numunelerin yük taşıma kapasiteleri, 20 kez termal döngü işlemi ile artar.

- Loctite 9461 yapıştırıcı ile bağlanmış termal çevrime uğramamış örnekler, her koşulda maksimum uzama değerlerine sahiptir.
- Yapılan tüm gerilme testleri değerlendirildiğinde, farklı türde yapıştırıcılar ile yapıştırılmış olan 50 kez termal çevrime uğramış numuneler, tüm termal çevrim işlem sıcaklıkları (80, 100 ve 120 °C) için en düşük yük taşıma kapasitelerine sahiptir.

Tez kapsamında yapılan çalışmaların üçüncü basamağı olan “Termal-yağ Yaşlandırmanın Çeşitli Yapıştırıcılar ile Tek Bindirmeli Yapıştırılmış Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkileri” başlıklı çalışmada, farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan termal-yağ yaşlandırma sürecinin, farklı yapıştırıcı tipleri ile yapıştırılan cam elyaf/epoksi kompozit numunelerin mekanik özellikleri ve performansları üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Buna göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Loctite 9466 için, tüm yaşlanma sıcaklıkları ve süreleri göz önüne alındığında, numunelerin gerilme testlerinde gösterdikleri deplasman değerleri genellikle (1440 saat 120 °C'deki yaşlandırılanlar haricinde) artar.
- Loctite 9466 için, farklı süreler için farklı sıcaklıklarda bulunan hemen hemen tüm numunelerin maksimum yük taşıma kapasiteleri, 1440 saat 120 °C'de yaşlandırılanlar hariç, yaşlandırılmamış örneklerden daha yüksektir.
- Loctite 9461 ile yapıştırılmış numunelerin maksimum yük taşıma kapasiteleri, tüm yaşlanma sıcaklıkları için yaşlanma süresinin uzamasıyla azalır.
- 1440 saat yaşlandırılmış tüm Loctite 9461 numunelerinin deplasman değerleri, yaşlandırılmamışlara kıyasla azalır.
- DP 460 ile yapıştırılan numuneler için, 1440 saat yaşlandırma neticesinde tüm örneklerin uzaması, yaşlandırılmamış numunelerinkine kıyasla artar.
- DP 460 ile yapıştırılmış kompozit numuneler için, 80 °C'de yaşlandırılmış numunelerin maksimum yük taşıma kapasiteleri, diğerlerinin aksine sabit bir

artış trendi gösterir ve aynı zamanda süneklik genel olarak tüm termal yaşlanma süreleri için artar.

- Termal yaşlanma sıcaklığı arttıkça, kompozit numunelerin rengi koyulaşır ve en karanlık form 120 °C'de meydana gelir.
- -10, 25 ve 50 °C'deki kompozit numunelerin renkleri yaşlı olmayanlarla karşılaştırıldığında, hiçbir renk değişikliği olmadığı gözlenmiştir.
- 80, 100 ve 120 °C'de 720 ve 1440 saat yaşlandırılan numunelerin renkleri karşılaştırıldığında, yaşlanma sıcaklığının termal yaşlanma süresine göre renk koyulaşmasında daha etkili olduğu görülmüştür.

Tez çalışmasının son basamağı olan “Termal-yağ Yaşlandırmanın Cam Elyaf/Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Özelliklerine Etkileri” başlıklı çalışmada, farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanan termal-yağ yaşlanma sürecinin cam elyaf/epoksi kompozit numunelerin mekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çekme deneyleri ile TGA ve DTA analizleri yapılmış, SEM mikrografları alınmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Çekme testinin sonuçlarına göre, termal yaşlanma sürecinin, -10 °C'de yaşlandırılmış örneklerin mekanik özellikleri üzerinde artma veya azalma etkisinin olmadığı bulunmuştur.
- Termal yaşlanma süresi arttıkça 25, 50, 80, 100, 120 ve 140 °C'de yaşlandırılan örneklerin maksimum yük taşıma kapasiteleri azalır.
- Numunelerin mekanik özelliklerini en çok düşüren yaşlandırma sıcaklıkları 120 ve 140 °C'dir. Özellikle uzun süreli termal yaşlanma süreleriyle kanıtlandığı üzere, örnekler bu termal yaşlanma sıcaklıklarında en düşük mekanik özelliklere sahiptir.

- Yapılan tüm TG ve DT analizlerinin sonuçlarına göre, yaşlanma süresinin uzamasıyla birlikte 50, 100, 120 ve 140 °C'de yaşlandırılmış örneklerin termal stabilitesi ve termal direnci azalmaktadır.
- En belirgin termal stabilite düşüşü, 140 °C'de yaşlandırılan numuneler tarafından sergilenmektedir. En düşük bozunma başlangıç sıcaklığı, 720 saate kadar 364 °C'ye kadar ulaşırken, 720 saatten sonra 202 °C'ye kadar düşer.
- Özellikle 50, 100, 120 ve 140 °C'lik yaşlanma sıcaklıklarında yaşlandırılan numunelerde, termal stabilite ve termal direnç, termal yaşlandırma süresiyle ters orantılı olarak değişir.
- Tüm yaşlanma süreleri ve tüm yaşlanma sıcaklıkları göz önüne alındığında, -10 °C'de yaşlandırılan numuneler, en yüksek termal kararlılığa ve termal dirence sahiptir.
- Termal yağ yaşlandırma sıcaklığı arttıkça, kompozit numunelerin renkleri koyulaşır ve en karanlık form 140 °C'de meydana gelir.
- -10, 25 ve 50 °C'de yaşlandırılmış kompozit örneklerin renkleri yaşlandırılmamışlar ile karşılaştırıldığında, hiç renk değişikliği olmadığı gözlenmiştir.
- Yaşlandırma sıcaklığı 80, 100, 120 ve 140 °C ve maruziyet süresi 168, 360 ve 720 saat olan tüm numunelerin renkleri karşılaştırıldığında, termal yaşlandırma ve maruziyet süresinin yaşlandırma sıcaklığına göre renk koyulaşmasında daha etkili olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, farklı süreler boyunca farklı sıcaklıklarda agresif yaşlanma faktörlerine maruz kalan cam elyaf/epoksi kompozit malzemelerin mekanik ve termal davranışlarındaki değişimler incelenmiştir. En yüksek yük taşıma kapasitesi, termal yaşlanma sürecinin mekanik özellikler üzerinde hiçbir olumlu veya olumsuz etkiye sahip olmadığı -10 °C'deki örneklerde gözlenir. Termal yaşlandırma sürecine maruz kalmış ve kalmamış numunelerin termal stabilite değerleri karşılaştırıldığında, -10 °C'de yaşlandırılmış örneklerin, en yüksek termal stabilite değerlerine sahip

olduğu görülmektedir. Bulgular ayrıca, -10 °C'nin dışındaki tüm yaşlandırma sıcaklıklarında, yaşlanma süresinin mekanik özellikler üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğunu ve kompozitlerin, 120 ve 140 ° C'de 1080 saat boyunca yaşlandıktan sonra en düşük mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. 140 °C'de yaşlanan en düşük termal stabiliteye sahip numuneler, 720 ve 1080 saatlik yaşlanmayla elde edilir. Yaşlanma süresinin, -10 °C hariç, tüm yaşlanma sıcaklıkları için termal stabilite üzerinde azaltıcı bir etkisi vardır.



KAYNAKLAR

- [1] **Berthelot, J. M.** (1999). *Composite Materials Mechanical Behavior and Structural Analysis*: Springer.
- [2] **Mallick, P.K.** (2008). *Fiber-reinforced composites materials, manufacturing, and design*: CRC Press, Taylor and Francis.
- [3] **Mazumdar, S.** (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*: CRC Press, Taylor and Francis.
- [4] **Balasubramanian, M.** (2014). *Composite materials and processing*: CRC Press, Taylor and Francis.
- [5] **Bulut, M.** (2017). Doktora tezi: *Investigation of impact behavior of laminated hybrid composite plates*.
- [6] **Wu, S.** (1982). *Polymer interface and adhesion*: CRC Press, Taylor and Francis.
- [7] **Petrie, E. M.** (2000). *Handbook of adhesives and sealants*: McGraw-Hill.
- [8] **da Silva, L. F. M., Ochsner, A. ve Adams, R. D.** (2011). *Handbook of adhesion technology*: Springer.
- [9] **Ebnesajjad, S.** (2011). *Handbook of adhesives and surface preparation: Technology, applications and manufacturing*: Elsevier.
- [10] **Sharpe, L. H.** (1966). The materials, processes and design methods for assembly with adhesives. *Machine Design*, 38(19), 179-200.
- [11] **Harper, C. A.** (1996). *Handbook of plastics and elastomers*: McGraw-Hill.
- [12] **De Lollis, N. J.** (1970). *Adhesives for metals-Theory and technology*: Industrial Press.
- [13] **Ebnesajjad, S.** (2008). *Adhesives technology handbook*: Elsevier.
- [14] *Handbook of Plastics Joining: A practical guide.* (1997). Elsevier.
- [15] **Ebnesajjad, S. ve Ebnesajjad, C. F.** (2006). *Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding*: Elsevier.

- [16] **Tracton, A. A.** (2001). *Coatings Technology Handbook*: CRC Press, Taylor and Francis.
- [17] **Possart, W.** (2005). *Adhesion: Current research and application*: Wiley.
- [18] **Budhe, S., Banea, M. D., de Barros, S. ve da Silva, L. F. M.** (2017). An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 72, 30-42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010>
- [19] **Deniz, M. E., Ozen, M., Ozdemir, O., Karakuzu, R. ve İçten, B. M.** (2013). Environmental effect on fatigue life of glass–epoxy composite pipes subjected to impact loading. *Composites Part B: Engineering*, 44, 304-312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.001>
- [20] **Deniz, M. E., Ozdemir, O., Ozen, M. ve Karakuzu, R.** (2013). Failure pressure and impact response of glass–epoxy pipes exposed to seawater. *Composites Part B: Engineering*, 53, 355-361. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.047>
- [21] **Tita, V., Carvalho, J. D. ve Vandepitte, D.** (2008). Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: Experimental and numerical approaches. *Composite Structures*, 83, 413–428. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.06.003>
- [22] **Sayman, O., Arikan, V., Dogan, A., Soykok, İ. F. ve Dogan, T.** (2013). Failure analysis of adhesively bonded composite joints under transverse impact and different temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 54, 409–414. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.017>
- [23] **Vaidya, U. K., Gautama, A. R. S., Hosurb, M. ve Duttac, P.** (2006). Experimental-numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, 184–198. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.03.013>
- [24] **Sayman, O., Soykok, I. F., Dogan, T., Dogan, A ve Arikan, V.** (2014). Effects of axial impacts at different temperatures on failure response of adhesively bonded

woven fabric glass fibre/epoxy composite joints. *Journal of Composite Materials*, 49(11), 1331-1344. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998314533598>

[25] Galliot, C., Rousseau, J. ve Verchery, G. (2012). Drop-weight tensile impact testing of adhesively bonded carbon/epoxy laminate joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 35, 68–75. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.02.002>

[26] Kemiklioglu, U., Sayman, O., Batar, T., Soykok, İ. F., Akderya, T. ve Akan, E. (2015). Strength comparison of ductile and brittle adhesives under single and repeated impacts. *Applied Adhesion Science*, 3, 15. doi:

<https://doi.org/10.1186/s40563-015-0042-4>

[27] Ghanbari, E., Sayman, O., Pekbey, Y. ve Özdemir, O. (2016). Experimental analysis of single-lap composite joints with two different adhesives at various conditions. *Journal of Composite Materials*, 50, 1709-1715. doi:

<https://doi.org/10.1177/0021998315595532>

[28] Tsotsis, T. K. (1995) Thermo-oxidative aging of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 29(3), 410-422. doi:

<https://doi.org/10.1177/002199839502900307>

[29] Zhang, D., He, M., He, W., Zhou, Y. Qin, S. ve Yu, J. (2017). Influence of thermo-oxidative ageing on the thermal and dynamical mechanical properties of long glass fibre-reinforced poly(butylene terephthalate) composites filled with dolo. *Materials*, 10, 500. doi: <https://dx.doi.org/10.3390%2Fma10050500>

[30] Kruželák, J., Sýkora, R. ve Hudec, I. (2015). Influence of mixed sulfur/peroxide curing system and thermo-oxidative ageing on the properties of rubber magnetic composites. *Journal of Polymer Research*, 22, 636. doi:

<https://doi.org/10.1007/s10965-014-0636-8>

[31] Daily, C., Barnard, D. J., Jones, R., McClelland, J. F., Bowler, N. (2016). Dielectric and infrared inference of thermo-oxidative aging of a bismaleimide composite material. *Composites Part B: Engineering*, 101, 167-175. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.004>

- [32] **Barbosa, A. P., Fulco, A. P., Guerra, E. S. S., Francisco K. Arakaki, F. K., Tosatto, M., Costa M. C. B. ve Melo, J. D.** (2017). Accelerated aging effects on carbon fiber/epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 110, 298-306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.004>
- [33] **Buch, X. ve Shanahan, M. E. R.** (2000). Thermal and thermo-oxidative ageing of an epoxy adhesive. *Polymer Degradation and Stability*, 68, 403-411. doi: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(00\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00028-8)
- [34] **Barjasteh, E., Bosze, E. J., Tsai, Y. I. ve Nutt, S.R.** (2009). Thermal ageing of fibreglass/carbon-fibre hybrid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(12), 2038–2045. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.015>
- [35] **Rudzinski, S., Häußler, L., Harnisch, Ch., Mäder, E. ve Heinrich, G.** (2011). Glass fibre reinforced polyamide composites: Thermal behaviour of sizings. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(2), 157-164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.10.018>
- [36] **Fan, W., Li, J., Zheng, Y., Liu, T., Tian, X. ve Sun R.** (2016). Influence of thermo-oxidative aging on the thermal conductivity of carbon fiber fabric reinforced epoxy composites. *Polymer Degradation and Stability*, 123, 162-169. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.11.016>
- [37] **Scida, D., Assarar, M., Poilâne, C. ve Ayad, R.** (2013). Influence of hygrothermal ageing on the damage mechanisms of flax-fibre reinforced epoxy composite. *Composites Part B: Engineering*, 48, 51-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.12.010>
- [38] **Islam, M. S., Pickering, K. L. ve Foreman, N. J.** (2010). Influence of hygrothermal ageing on the physico mechanical properties of alkali treated industrial hemp fibre reinforced polylactic acid composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 18, 696-704. doi: <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0225-9>
- [39] **Anstice, P. D. ve Beaumont, P. W. R.** (1983). Hygrothermal ageing and fracture of glass fibre--epoxy composites. *Journal of Materials Science*, 18, 3404-3408. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00544167>

- [40] **Valentin, D., Paray, F. ve Guetta, B.** (1987). The hygrothermal behaviour of glass fibre reinforced Pa66 composites: a study of the effect of water absorption on their mechanical properties. *Journal of Materials Science*, 22, 46-56. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01160550>
- [41] **Rocha, I. B. C. M., Raijmaekers, S., Nijssen, R. P. L., van der Meer, F. P. ve Sluys, L. J.** (2017). Hygrothermal ageing behaviour of a glass/epoxy composite used in wind turbine blades. *Composite Structures*, 174, 110-122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.028>
- [42] **Jiang, X., Kolstein, H., Bijlaard, F. ve Qiang, X.** (2014). Effects of hygrothermal aging on glass-fibre reinforced polymer laminates and adhesive of FRP composite bridge: Moisture diffusion characteristics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57, 49-58. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.11.002>
- [43] **Foulca, M. P., Bergereta, A., Ferrya, L., Ienny, P. ve Crespy, A.** (2005). Study of hygrothermal ageing of glass fibre reinforced PET composites. *Polymer Degradation and Stability*, 89, 461-470 doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.01.025>
- [44] **Hu, Y., Lang, A. W., Li, X. ve Nutt, S. R.** (2014). Hygrothermal aging effects on fatigue of glass fiber/polydicyclopentadiene composites. *Polymer Degradation and Stability*, 110, 464-472. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.10.018>
- [45] **Xin, H., Liu, Y., Mosallam, A., Zhang, Y. ve Wang, C.** (2016). Hygrothermal aging effects on flexural behaviour of pultruded glass fibre reinforced polymer laminates in bridge applications. *Construction and Building Materials*, 127, 237-247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.151>
- [46] **Berketis, K. ve Tzetzis, D.** (2009). Long-term water immersion ageing characteristics of GFRP composites. *Journal of Materials Science*, 44(13), 3578-3588. doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3485-9>
- [47] **Fitriah, S. N., Abdul Majid, M. S., Ridzuan, M. J. M., Daud R., Gibson A. G. ve Assaleh, T. A.** (2017). Influence of hydrothermal ageing on the compressive

behaviour of glass fibre/epoxy composite pipes. *Composite Structures*, 159, 350-360. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.078>

[48] Soykok, I. F., Sayman, O. ve Pasinli, A. (2013). Effects of hot water ageing on failure behaviour of mechanically fastened glass fibre/epoxy composite joints. *Composites Part B: Engineering*, 54, 59–70. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.073>

[49] Alessi, S., Pitarresi, G., ve Spadaro, G. (2014). Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 67, 145-153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.06.006>

[50] El-Abbassi, F. E., Assarar, M., Ayad, R., Lamdouar, N. (2015). Effect of alkali treatment on Alfa fibre as reinforcement for polypropylene based eco-composites: Mechanical behaviour and water ageing. *Composite Structures*, 133, 451-457. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.112>

[51] Cheour, K., Assarar, M., Scida, D., Ayad, R. ve Gong X.-L. (2016). Effect of water ageing on the mechanical and damping properties of flax-fibre reinforced composite materials. *Composite Structures*. 152, 259-266. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.045>

[52] Klasztorny, M., Nycz, D. B., Romanowski, R. K., Gotowicki, P., Kiczko, A. ve Rudnik, D. (2017). Effects of operating temperatures and accelerated environmental ageing on the mechanical properties of a glassvinylester composite. *Mechanics of Composite Materials*, 53(3), 335-350. doi: <https://doi.org/10.1007/s11029-017-9665-9>

[53] Nicholas, J., Mohamed, M., Dhaliwal, G. S. ve Chandrashekhara, K. (2016). Effects of accelerated environmental aging on glass fiber reinforced thermoset polyurethane composites. *Composites Part B: Engineering*, 94, 370-378. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.059>

[54] Guzmán, E., Cugnoni, J., Gmür, T. (2014). Multi-factorial models of a carbon fibre/epoxy composite subjected to accelerated environmental ageing. *Composite Structures*, 11, 179–192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.12.028>

- [55] Shaoquan, W., Shangli, D., Yub, G. ve Yungang, S. (2017). Thermal ageing effects on mechanical properties and barely visible impact damage behaviour of a carbon fibre reinforced bismaleimide composite. *Materials and Design*, 115, 213-223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.062>
- [56] Liu, X., Zhao, J., Yang, R., Iervolino, R. ve Barbera, S. (2018). Effect of lubricating oil on thermal aging of nitrile rubber. *Polymer Degradation and Stability*, 151, 136-143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.03.004>
- [57] Boubakri, A., Haddar, N., Elleuch, K. ve Bienvenu Y. (2011). Influence of thermal aging on tensile and creep behavior of thermoplastic polyurethane. *Comptes Rendus Mécanique*, 339, 666-673. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2011.07.003>
- [58] Karsli, N. G., Demirkol, S. ve Yilmaz, T. (2016). Thermal aging and reinforcement type effects on the tribological, thermal, thermomechanical, physical and morphological properties of poly(ether ether ketone) composites. *Composites Part B: Engineering*, 88, 253-263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.013>
- [59] Kwon, D., Shin, P., Kim, J, Baek, Y., Park, H., DeVries, L. K. ve Park, J. (2017). Interfacial properties and thermal aging of glass fiber/epoxy composites reinforced with SiC and SiO₂ nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*, 130, 46-53. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.045>
- [60] Soykok, I. F., Sayman, O., Ozen, M. ve Korkmaz, B. (2013). Failure analysis of mechanically fastened glass fibre/epoxy composite joints under thermal effects. *Composites Part B: Engineering*, 45, 192–199. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.08.008>
- [61] Osanai, K. R. ve Reis, J. M. L. (2012). Temperature effect on the strength of adhesively bonded single lap joints. *Thermal Engineering*, 11, 03-06.
- [62] Banea, M. D. ve Silva, L. F. M. (2009). The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry. *The Journal of Materials: Design and Applications*, 224, 51-62. doi: <https://doi.org/10.1243/14644207JMDA283>

- [63] **Ghasemi, A. R. ve Moradi, M.** (2016). Low thermal cycling effects on mechanical properties of laminated composite materials. *Mechanics of Materials*, 96, 126-137. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2016.01.012>
- [64] **Liang, S., Gning, P. B. ve Guillaumat, L.** (2012). A comparative study of fatigue behaviour of flax/epoxy and glass/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 72, 535-543. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.01.011>
- [65] **Alvarez, V. ve Vazquez, A. J.** (2007). Cyclic Water Absorption Behavior of Glass–Vinylester and Glass–Epoxy Composites. *Journal of Composite Materials*, 41, 1275-1289. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998306067311>
- [66] **Dai, G. ve Jr, L. M.** (2014). Fatigue of hybrid glass/carbon composites: 3D computational studies. *Composites Science and Technology*, 94, 71–79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.01.014>
- [67] **Mostafa, N. H., Ismarrubie, Z. N., Sapuan, S. M. ve Sultan, M. T. H.** (2016). Effect of fabric biaxial prestress on the fatigue of wovenE-glass/polyester composites. *Materials and Design*, 92, 579-589. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.109>
- [68] **Longbiao, L.** (2016). Cyclic fatigue behavior of carbon fiber-reinforced ceramic–matrix composites at room and elevated temperatures with different fiber preforms. *Materials Science and Engineering A*, 654, 368-378. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.069>
- [69] **Bhuyan, M. K., Bhuyan, M. S., Rodriguez-Devora, J. I. ve Yanez, M.** (2012). Delamination behavior of bidirectional S2 glass epoxy laminated composite due to combined moisture and temperature cyclic loading. *Journal of Composite Materials*, 47, 3421-3432. doi: <https://doi.org/10.1177/0021998312466120>
- [70] **Eftekhari, M. ve Fatemi, A.** (2016). On the strengthening effect of increasing cycling frequency on fatigue behavior of some polymers and their composites: Experiments and modeling. *International Journal of Fatigue*, 87, 153-166. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.01.014>

- [71] Helmy, S. and Hoa, S. V. (2014). Tensile fatigue behavior of tapered glass fiber reinforced epoxy composites containing nanoclay. *Composites Science and Technology*, 102, 10-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.05.038>
- [72] Lee, S., Nam, J., Ahn, K., Chung, K. ve Seferis, J. C. (2001). Thermo-Oxidative Stability of High Performance Composites under Thermal Cycling Conditions. *Journal of Composite Materials*, 35, 433-454. doi: <https://doi.org/10.1177/002199801772662172>
- [73] Zhang, M., Li, K., Shi, X., Guo, L., Sun, J. ve Shen, Q. (2017). Effects of low temperature thermal cycling treatment on the microstructures, mechanical properties and oxidation resistance of C/C-ZrC-SiC composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 721, 28-35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.263>
- [74] Marques, E. A. S., da Silva L. F. M., Banea M. D. ve Carbas R. J. C. (2015). Adhesive Joints for Low- and High-Temperature Use: An Overview. *The Journal of Adhesion*, 91, 556-585. doi: <https://doi.org/10.1080/00218464.2014.943395>
- [75] da Costa Mattos, H. S., Monteiro, A. H. ve Palazzetti, R. (2012). Failure analysis of adhesively bonded joints in composite materials. *Materials and Design*, 33, 242–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.031>
- [76] O'Mahoney, D. C., Katnam, K. B., O'Dowd, N. P. McCarthy, C. T. ve Young T.M. (2013). Taguchi analysis of bonded composite single-lap joints using a combined interface-adhesive damage model, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 40, 168–178. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.06.001>
- [77] HUNTSMAN - Araldite® LY 1564* / Aradur® 3486* / Aradur® 3487*. <https://www.swiss-composite.ch/pdf/t-Araldite-LY1564-Aradur3486-3487-e.pdf> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [78] ASTM D5868 – 01: Standard test method for lap shear adhesion for fibre reinforced plastic (FRP) bonding. <https://www.astm.org/Standards/D5868.htm> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [79] ASTM D2093 – 03: Standard Practice for Preparation of Surfaces of Plastics Prior to Adhesive Bonding. <https://www.astm.org/Standards/D2093.htm> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).

- [80] Loctite - Technical Data Sheet LOCTITE® EA 9461.
<http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/EA%209461-EN?pid=EA%209461&format=MTR&subformat=HYS&language=EN&plant=WERC> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [81] Loctite - Technical Data Sheet LOCTITE® EA 9466™.
<http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/EA%209466-EN?pid=EA%209466&format=MTR&subformat=REAC&language=EN&plant=WE> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [82] 3M - Scotch-Weld™ Epoxy Adhesives DP460 Off-White and DP460NS.
<http://multimedia.3m.com/mws/media/661220/3mtm-scotch-weld-tm-epoxy-adhesive-dp460-ns-and-off-white.pdf> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [83] ASTM D3039 / D3039M – 17: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. <https://www.astm.org/Standards/D3039> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [84] ACS - Environmental Test Chambers. <http://www.acstestchambers.com/> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [85] T.C. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü İklimlendirme Kabini. <http://makina.deu.edu.tr/wp-content/uploads/2017/02/biyomekanik-lab-iklimlendirme.pdf> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [86] ACS - Climatic chambers & thermostatic chambers.
http://www.acstestchambers.com/Product/Prodotta?id_fam=1&id_prod=383# (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [87] Fuchs – Product Information – Renolin Therm 320 Heat transfer fluid.
http://www.lukoilmarine.com/files/getfile/oil_grade_model/pdf/79/146003929992/ (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [88] DIN EN ISO 3104 - Petroleum products - Transparent and opaque liquids - Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity.
<https://www.din.de/en/getting-involved/standards-committees/nmp/wdc-beuth:din21:279196067> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).

[89] DIN 51757 - Testing of mineral oils and related materials - Determination of density. <https://www.beuth.de/en/standard/din-51757/136322149> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).

[90] ASTM D1500 – 12: Standard Test Method for ASTM Colour of Petroleum Products. <https://www.astm.org/Standards/D1500.htm> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).

[91] DIN EN ISO 2592 - Petroleum and related products - Determination of flash and fire points - Cleveland open cup method. <https://www.din.de/en/getting-involved/standards-committees/nmp/drafts/wdc-beuth:din21:247493569> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).

[92] DIN ISO 3016 - Petroleum products - Determination of pour point. <https://www.din.de/en/getting-involved/standards-committees/nmp/wdc-beuth:din21:278983355?sourceLanguage&destinationLanguage> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).

[93] Fuchs - Product Portfolio Gear and circulating oils. https://www.fuchs.com/fileadmin/uk/Media/Brochures/Industrial/FUCHS_RENOLIN_Industrial_Gear_Oils.pdf (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).

[94] **Sayman, O.** (2012). Elasto-plastic stress analysis in an adhesively bonded single-lap joint. *Composites Part B: Engineering*, 43, 204-209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.08.006>

[95] **Arikan, V., Dogan, A., Dogan, T., Sabanci, E. ve Al-Shamary A. K. J.** (2015). Effects of Temperature and Hole Drilling on Adhesively Bonded Single-Lap Joints. *The Journal of Adhesion*, 91(3), 177-185. doi: <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.874293>

[96] **Baba, B. O.** (2017). Curved sandwich composites with layer-wise graded cores under impact loads. *Composite Structures*, 159, 1-11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.054>

[97] **Yurddaskal, M., Ozmen, U., Kir, M. ve Baba, B. O.** (2018). The effect of foam properties on vibration response of curved sandwich composite panels.

Composite Structures, 183, 278-285. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.054>

[98] **Kemiklioğlu, U., Sayman, O., Soykok, İ. F., Akderya, T. ve Dere, R.** (2016).

The mechanical behaviour of adhesively bonded composite joints under repeated axial impacts at different temperatures. *Science and Engineering of Composite Materials*, 24(6), 865-873. DOI: <https://doi.org/10.1515/secm-2015-0509>

[99] **Arenas, J. M. Alía, C., Ocaña, R. ve Narbón, J. J.** (2013). Degradation of adhesive joints for joining composite material with aluminium under immersion in water and motor oil. *Procedia Engineering*, 63, 287-294. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.218>

[100] **Ozel, A., Yazici, B., Akpınar, S., Aydın, M. D. ve Temiz, Ş.** (2014). A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends. *Composites Part B: Engineering*, 62, 167-174. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.03.001>

[101] Loctite - Product Selector Industrial Adhesive, Sealant and Functional Coating Solutions.

http://hybris.cms.henkel.com/medias/sys_master/catalogsync/catalogsync/9030422331422.pdf (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).

[102] **Jojibabu, P., Ram, G. D. J., Deshpande, A. P. ve Bakshi S. R.** (2017). Effect of carbon nano-filler addition on the degradation of epoxy adhesive joints subjected to hygrothermal aging. *Polymer Degradation and Stability*, 140, 84-94. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.04.017>

[103] **Atas, C. ve Dogan, A.** (2015). An experimental investigation on the repeated impact response of glass/epoxy composites subjected to thermal ageing. *Composites Part B: Engineering*, 75, 127-134. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.032>

[104] **Machado, J. J. M., Gamarra, P. M. -R., Marques, E. A. S. ve da Silva, L. F. M.** (2018). Improvement in impact strength of composite joints for the automotive industry. *Composites Part B: Engineering*, 138, 243-255. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.038>

- [105] **Doyle, D. J.** (1989). A review of ultraviolet (UV) radiation as an adhesive curing agent, *Society of Manufacturing Engineers Technical Paper, Adhesives '89*, (AD89-534), Atlanta, Georgia.
- [106] **Doyle, D. J.** (1990). Criteria for proper adhesive selection: From application to viscosity, *Society of Manufacturing Engineers Technical Paper, Adhesives '90*, (AD90-450), Schaumburg, Illinois.
- [107] **Doyle, D. J.** (1990). Viscosity and its importance to adhesive dispensing, *Society of Manufacturing Engineers Technical Paper, Adhesives '90*, (AD90-710), Dearborn, Michigan.
- [108] Epotek, Epoxy Adhesive Application Guide, Retrieved from http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/adhesive_application_guide.pdf (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [109] 3M, Choosing and Using a Structural Adhesive, Retrieved from <http://multimedia.3m.com/mws/media/7956930/choosing-and-using-a-structural-adhesive-white-paper.pdf> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [110] **Soares, G. P., Silva, G. G., Ambrosano, G. M. B., Lima, D. A. N. L., Marchi, G. M., Lovadino J. R. ve Aguiar F. H. B.** (2013). Effect of polymerization mode and time of adhesive system on microleakage in composite resin restorations. *Journal of Investigative and Clinical Dentistry*, 5, 289-294. doi: <https://doi.org/10.1111/jicd.12060>
- [111] **Flore, D., Wegener, K., Seel, D., Oetting, C. C. ve Bublat, T.** (2016). Investigation of chemical ageing and its effect on static and fatigue strength of continuous fibre reinforced plastics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 359–370. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.08.001>
- [112] **Bowles, K. J.** Thermal and mechanical durability of graphite fibre reinforced PMR-15 composites at elevated temperatures. (1998). *Progress in durability analysis of composite systems*, 32, 838–853.
- [113] **Bennehalli, B., Venkateshappa, S. C., Punyamurthy, R. D., Sampathkumar, D., Sampathkumar, D. ve Gowda, R. P. G. R.** (2017). Influence

of Surface Modification on the Thermal Stability and Percentage of Crystallinity of Natural Abaca Fiber. *Handbook of Composites from Renewable Materials*: Wiley.

[114] Milanese, A. C., Cioffi, M. O. H. ve Voorwald, H. J. C. (2012). Thermal and mechanical behaviour of sisal/phenolic composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(7), 2843-2850. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.048>

[115] Anbukarasi, K. ve Kalaiselvam, S. (2015). Study of effect of fibre volume and dimension on mechanical, thermal, and water absorption behaviour of luffa reinforced epoxy composites. *Materials and Design*, 66, 321-330. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.078>

[116] Monteiro, S. N., Calado, V., Rodriguez, R. J. S. ve Margem, F. M. (2012). Thermogravimetric behavior of natural fibers reinforced polymer composites - An overview. *Materials Science and Engineering: A*, 557, 17-28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.109>

[117] Ramnath, B. V., Kokan, S. J., Raja, R. N., Sathyanarayanan, R., Elanchezian, C., Prasad, A. R. ve Manickavasagam, V. M. (2013). Evaluation of mechanical properties of abaca–jute–glass fibre reinforced epoxy composite. *Materials and Design*, 51, 357-366. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.102>

[118] Elkhaoulani, A., Arrakhiz, F. Z., Benmoussa, K, Bouhfid, R., Qaiss, A. (2013). Mechanical and thermal properties of polymer composite based on natural fibers: Moroccan hemp fibers/polypropylene. *Materials and Design*, 49, 203-208. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.063>

[119] Tanobe, V., Sydenstricker, T. H. D., Munaro, M. ve Amico, S. C. (2005) A comprehensive characterization of chemically treated Brazilian sponge-gourds (*Luffa cylindrica*). *Polymer Testing*, 24, 474-482. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2004.12.004>

[120] Aji, I. S., Zainudin, E. S., Khalina, A., Sapuan, S. M. ve Khairul, M. D. (2012). Thermal property determination of hybridized kenaf/PALF reinforced HDPE composite by thermogravimetric analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(2), 893-900. doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1807-z>

- [121] Mahmud, C. K., Md Haque, A., Chowdhury, A. M. S., Abdul Ahad, M. ve Abdul Gafur, Md. (2014). Preparation and Characterization of Polyester Composites Reinforced with Bleached, Diospyros perigrina (Indian persimmon) Treated and Unbleached Jute Mat. *Journal of Advanced Chemical Engineering*, 4, 114. doi: <https://doi.org/10.4172/2090-4568.1000114>
- [122] da Silva, L. F. M, Critchlow, G.W. ve Figueiredo, M. A. V. (2008). Parametric Study of Adhesively Bonded Single Lap Joints by the Taguchi Method. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 22(13), 1477-1494. doi: <https://doi.org/10.1163/156856108X309585>
- [123] Kaw A. K. (2006). *Mechanics of composite materials*: CRC Press, Taylor and Francis.
- [124] Daniel, I. M ve Ishai, O. (1994). *Engineering mechanics of composite materials*: Oxford University Press.
- [125] Naik, N.K. ve Shembekar, P.S. (1992). Elastic behavior of woven fabric composites: I - lamina analysis. *Journal of Composite Materials*, 26, 2196-2225. doi: <https://doi.org/10.1177/002199839202601502>
- [126] Penava, Z., Penava, D. S. ve Knezić, Z. (2014). Determination of the elastic constants of plain woven fabrics by a tensile test in various directions. *Fibres and textiles in Eastern Europe*, 22, 57-63.
- [127] Mlyniec, A. ve Uhl, T. (2011). Modelling and testing of ageing of short fibre reinforced polymer composites. *The Journal of Mechanical Engineering Science*, 226(1), 16-31. doi: <https://doi.org/10.1177/0954406211411552>
- [128] E-Glass Fibre – Material properties. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=764> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).
- [129] Tsotsis, T. K., Keller, S., Lee, K., Bardis, J. ve Bish, J. (2001). Aging of polymeric composite specimens for 5000 hours at elevated pressure and temperature. *Composites Science and Technology*, 61(1), 75-86. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00196-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00196-2)

[130] Banea, M. D. ve da Silva, L. F. M. (2016). Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *The Journal of Materials: Design and Applications*, 223(1), 1-18. doi: <https://doi.org/10.1243/14644207JMDA219>

[131] Tg - Glass Transition Temperature for Epoxies.
<http://www.epotek.com/site/files/Techtips/pdfs/tip23.pdf> (Son ulaşım: 26 Haziran 2018).

[132] Carbas, R. J. C., Marques, E. A. S., da Silva, L. F. M., Lopes, A. M. (2014). Effect of Cure Temperature on the Glass Transition Temperature and Mechanical Properties of Epoxy Adhesives. *The Journal of Adhesion*, 90(1), 104-119. doi: <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.779559>

[133] Kotynia, R., Adamczewska, K., Strakowska, A., Maslowski, M. ve Strzelecb, K. (2017). Effect of accelerated curing conditions on shear strength and glass transition temperature of epoxy adhesives. *Procedia Engineering*, 193, 423-430. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.233>

[134] Cassidy, P. E., Johnson, J. M. ve Locke C. E. (2006). The Relationship of Glass Transition Temperature to Adhesive Strength. *The Journal of Adhesion*, 4(3), 183-191. doi: <https://doi.org/10.1080/00218467208072222>

[135] Gates, T. (2008). *Ageing of composites: The physical and chemical ageing of polymeric composites*: Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

ÖZ GEÇMİŞ

Ad - Soyad : Tarkan AKDERYA
E-posta : takderya@gmail.com



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yükseklisans** : 2014, Gediz Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İşletme Ana Bilim Dalı
- **Doktora** : 2018, Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yayın Listesi:

SCI Endekli Uluslararası Dergilerde Yayınlanmış Makaleler:

- 1- Akderya, T., Kemiklioğlu, U., Sayman, O. ve Arap, O. (2018). 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: <https://doi.org/10.1080/00218464.2018.1440213>
- 2- Akderya, T., Çevik, M. ve Sayman, O. (2018). A Comparative Study on Influence of Thermal-oil Ageing on Mechanical Performance of E-Glass Fibre/Epoxy Composite Joints Bonded with a Diverse Set of Adhesives. *Journal of Adhesion*. doi: <https://doi.org/10.1080/00218464.2018.1480371>
- 3- Akderya, T., Kemiklioğlu, U. ve Sayman, O. (2016). Effects of thermal ageing and impact loading on tensile properties of adhesively bonded fibre/epoxy composite joints. *Composites Part B: Engineering*, 95, 117-122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.073>
- 4- Kemiklioğlu, U., Sayman, O., Soykok, I. F., Akderya, T. ve Dere, R. (2016). The mechanical behaviour of adhesively bonded composite joints under repeated axial impacts at different temperatures. *Science and Engineering of Composite Materials*, 05-09. doi: <https://doi.org/10.1515/secm-2015-0509>
- 5- Akderya T., Çevik M. Investigation of Thermal-Oil Environmental Ageing Effect on Mechanical and Thermal Behaviours of E-Glass Fibre/Epoxy Composites. *Journal of Polymer Research* (Under review).

Uluslararası İndeksli Dergilerde Yayınlanan Makaleler:

- 1- **Kemikliolu, U., Sayman, O., Batar, T., Soykok, I. F., Akderya, T. ve Akan, E.** (2015). Strength comparison of ductile and brittle adhesives under single and repeated impacts. *Applied Adhesion Science*, 3-15. doi: <https://doi.org/10.1186/s40563-015-0042-4>

Uluslararası Sempozyum / Konferans / Kongre Bildirileri:

- 1- **Akderya, T., Çevik, M.** (Mayıs 2018). Influence of Thermal-oil Ageing on Mechanical and Thermal Properties of E-Glass Fibre/Epoxy Composites. 2. *International Students Science Conference*, Türkiye/Izmir.
- 2- **Akderya, T., Kemikliolu, U., Arap, O. ve Sayman, O.** (Mayıs 2018). Önceden Hasara Uğramış Kompozit Borularda Tamiratın Etkisinin İncelenmesi. 2. *International Students Science Conference*, Türkiye/Izmir.
- 3- **Akderya, T., Çevik, M.** (Temmuz 2017). Influence of Thermal Ageing on Mechanical Performance of E-Glass Fibre/Epoxy Composite Joints. *25th Annual International Conference on Composites and Nano Engineering*, İtalya/Roma.
- 4- **Akderya, T., Çevik, M.** (Mayıs 2017). Influence of Thermal Cycling on Mechanical Properties of Composite Joints Bonded with Brittle Characteristic Adhesive. 1. *International Students Science Conference*, Türkiye/Izmir.
- 5- **Akderya, T., Kemikliolu, U., Sayman, O. ve Arap, O.** (Eylül 2016). Effects of thermal fatigue on mechanical properties of glass fibre/epoxy composites. *19th International Conference on Composite Structures*, Portekiz.
- 6- **Kemikliolu, U., Akderya, T. ve Sayman, O.** (Eylül 2016). Vibration Effects of E –Glass and Carbon Fibre Reinforced Composites Under Centrifugal Forces. *19th International Conference on Composite Structures*, Portekiz.
- 7- **Akderya, T., Kemikliolu, U. ve Sayman, O.** (Temmuz 2016). Effects of Thermal Fatigue on Mechanical Properties of Adhesively Bonded Glass Fibre/Epoxy Single Lap Composite Joints. *24th Annual International Conference on Composites and Nano Engineering*, July 2016, China.

Projeler:

- 1- **Çevik, M., Akderya, T.** (Mart 2017 – Kasım 2017). Effects of thermal ageing and thermal fatigue caused by thermal cycling on mechanical, fractographic and thermal properties of carbon fibre epoxy - glass fibre epoxy composites and adhesively bonded composite joints. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (Proje no: 2017-TDR-FEBE-0030).