

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TERMOPLASTİK TAKVİYELİ EPOKSİ YAPIŞTIRICILARIN KENDİ-KENDİNİ
ONARMA DAVRANIŞININ NÜMERİK VE DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**



ENGİN ERBAYRAK

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. HALİL ÖZER**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TERMOPLASTİK TAKVİYELİ EPOKSİ YAPIŞTIRICILARIN KENDİ-KENDİNİ
ONARMA DAVRANIŞININ NÜMERİK VE DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**

Engin ERBAYRAK tarafından hazırlanan tez çalışması 24.04.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Halil ÖZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Halil ÖZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ali PINARBAŞI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Faruk ŞEN
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi

Prof.Dr.Uğur GÜVEN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr.Öğr.Üyesi Özkan ÖZ
Karabük Üniversitesi



Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2015-06-01-DOP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Doktora tezi süresince bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren ve her daim yanımda olan tez danışmanım sayın Prof.Dr. Halil ÖZER'e teşekkür ederim. Tezim boyunca değerli görüşlerini benimle paylaşan Prof.Dr. Ali PINARBAŞI ve Doç.Dr. Faruk Şen'e teşekkürü bir borç bilirim.

Özellikle deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Dr.Öğr.Üyesi Özkan ÖZ ve Doç.Dr. Fatih ÇAKAR'a çok teşekkür ederim.

Sadece tezimde değil, hayatın her döneminde yanımda olan sevgili eşim Seda ERBAYRAK'a ve hayatımıza getirdiği büyük mutluluk için canım kızım Defne ERBAYRAK'a canı gönülden teşekkürlerimi sunarım.

Nisan, 2018

Engin ERBAYRAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	5
BÖLÜM 2	
KENDİ-KENDİNİ ONARMA YÖNTEMLERİ	7
2.1 Mikrokapsül Onarma Yöntemi.....	9
2.2 Kılcal Damar Ağ Yöntemi.....	12
2.3 Bünyesel Onarma Yöntemi	14
2.4 Termoplastik Takviyeli Onarma Yöntemi.....	16
BÖLÜM 3	
KIRILMA MEKANİĞİ YAKLAŞIMI	19
3.1 Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği (LEKM)	20
3.1.1 Griffith Teoremi	20
3.1.2 Irwin Teoremi	21
3.2 Elastik Plastik Kırılma Mekanikliği (EPKM).....	22
3.3 Kırılma Modları	23

3.4	Kırılma Enerji Deneyleri	24
3.4.1	Çift Ankastre Kiriş Deneyi	24
3.4.1.1	Kiriş Teoremi (KT)	26
3.4.1.2	Modifiye Kiriş Teoremi (MKT)	27
3.4.1.3	Kompliyans Kalibrasyon Teoremi (KKT).....	28
3.4.1.4	Alan Teoremi (AT).....	29
3.4.1.5	Kompliyans Tabanlı Kiriş Teoremi (KTKT).....	29
3.4.2	Çentikli Eğme Deneyi (ÇED)	30
3.4.3	Karışık Mod Eğme Deneyi (KME)	31

BÖLÜM 4

DENEYSEL YAKLAŞIM.....	34
4.1 Malzeme ve Cihazlar	34
4.1.1 Levha	35
4.1.2 Yapıştırıcılar	36
4.1.3 Kumlama Cihazı	39
4.1.4 Ultrasonik Temizleme Cihazı	41
4.1.5 Termoplastik malzeme	42
4.1.6 Vakumlama Cihazı	43
4.1.7 Kalıplar.....	44
4.1.7.1 Yapıştırma Bağlantı Kalıbı.....	44
4.1.7.2 Yapıştırıcı Kürleşme Kalıbı	45
4.1.8 Fırın	47
4.1.9 ÇAK numune deliklerinin hazırlanması	49
4.1.10 Universal Çekme Cihazı	50
4.1.11 Taramalı Elektro Miskroskop	51
4.1.12 Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi.....	52
4.2 Deneysel Ön Hazırlık.....	53
4.2.1 Kürleşme Sıcaklığı (Tk)	53
4.2.1.1 Camsı geçiş sıcaklığı (Tg)	53
4.2.1.2 İzotermal Zaman-Sıcaklık-Geçiş diyagramı.....	57
4.2.1.3 Tam kürleşme camsı geçiş sıcaklığının yapıştırıcının mekanik özelliklerine etkisi	60
4.2.2 Çekme Hızı.....	64
4.2.3 Termoplastik malzemenin yapıştırıcının mekanik özelliklerine etkisi	66
4.3 Yöntem ve Sonuç	76
4.3.1 Deneysel Yöntem	76
4.3.2 Tartışma ve Sonuç	80

BÖLÜM 5

NÜMERİK YAKLAŞIM	91
5.1 Kohesif Yöntem (KY)	92
5.1.1 Eksponansiyel (Exponential) Kohesif Yöntem	93
5.1.2 Bilinear Kohesif Yöntem	96
5.1.3 Trapezoidal Kohesif Yöntem	98

5.1.4 PPR Potansiyel Tabanlı Kohesif Yöntem	99
5.2 Kohesif parametrelerin belirlenmesinde izlenecek yöntem	102
5.2.1 Ekspansiyon kohesif yöntemin uygulanması	103
5.2.2 PPR potansiyel temelli kohesif yöntemin uygulanması	106
5.2.3 İvers Analiz	107
5.3 Yapıştırıcıların onarma sürecindeki kohesif parametre değişimi	110
BÖLÜM 6	
SONUÇ VE ÖNERİLER	118
KAYNAKLAR.....	121
EK-A	
İVERS ANALİZ SONUÇLARI	128
ÖZGEÇMİŞ.....	133

SİMGE LİSTESİ

G_c	Kırılma enerjisi
G_{Ic}	Mod I kırılma enerjisi
Π	Toplam potansiyel enerji
U_e	Elastik birim şekil değiştirme enerjisi
γ	Yüzey enerjisi
σ_c	Kritik çatlak ucu gerilmesi
ν	Poisson oranı
E	Elastisite modülü
K	Gerilme şiddet faktörünü
θ	Çatlak ucu açısı
a_0	Ön çatlak uzunluğu
C	Kompliyans
a_e	Eşdeğer çatlak uzunluğu
ζ	Çatlak içermeyen yapıştırma bağlantısının elastik deformasyonu
T_k	Kürleşme Sıcaklığı
T_{g^∞}	Tam kürleşme camsı geçiş sıcaklığı
η	Onarma verimi
δ_{nc}	Kritik kohesif ayrılma mesafesi
δ_{fn}	Final kohesif ayrılma mesafesi
δ_{ft}	Teğetsel final ayrılma mesafesi
δ_n	Normal ayrılma mesafesi
δ_t, δ_b	Teğetsel ayrılma mesafeleri
δ_n^*	Mod I ayrılma durumu için final ayrılma mesafesi
δ_{tc}	Kritik teğetsel ayrılma mesafesi
σ_0	Kohesif gerilme
ζ_s	Kalibrasyon parametresi
r, q	Boyutsal parametreler
dm	Hasar parametresi
α	Şekil parametresi
m	Boyutsuz üstel sabiti
Δ_n	PPR normal ayrılma mesafesi

Γ_n	Enerji sabiti
λ_n	Başlangıç eğim gösterge
ξ	Normal rijidlik sabiti
Φ	Potansiyel kırılma enerjisi
$G_{IC}^{TP takviye}$	Termoplastik takviyeli yapıştırıcının mod I kırılma enerji değeri
$G_{IC}^{iyileştirme}$	Termoplastik takviyeli yapıştırıcının iyileştirme mod I kırılma enerji değeri



KISALTMA LİSTESİ

AT	Alan Teoremi
ÇAK	Çift Ankastre Kiriş Deneyi
DTK	Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi
EPKM	Elastik Plastik Kırılma Mekanîği
EXP	Eksponansiyal Kohesif yöntem
İYŞ	İyileştirme durumu
KT	Kiriş Teoremi
KKT	Kompliyans Kalibrasyon Teoremi
KTKT	Kompliyans Tabanlı Kiriş Teoremi
KME	Karışık Mod Eğme Deneyi
KY	Kohesif Yöntem
LEKM	Lineer Elastik Kırılma Mekanîği
MKT	Modifiye Kiriş Teoremi
PPR	Park-Paulino-Roesler potansiyel tabanlı Kohesif yöntem
TEM	Taramalı Elektro Miskroskop
VOK	Vakum ortamında karıştırma yöntemi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Uçak gövdesinde yapıştırma bağlantısının kullanılması [27].....7
Şekil 2. 2	Mikrokapsül yaklaşımında kendi-kendine onarma işlem adımları [1]10
Şekil 2. 3	Mikrokapsül üretim aşamaları [28]..... 12
Şekil 2. 4	Kılcal damar ağ yöntemi [5] 13
Şekil 2. 5	Kılcal Damar Ağ üretim aşamaları (a- Mürekkep ile ağ oluşumu b- Kılcal damar ağ yapısı c- Kılcal damar ağ yapısının kalıp içerisine konulması d- Kalıp içinde kûrleşen ağ yapısı e- İyileştirme ajanı eklenmiş ağ yapısının son hali)[29] 14
Şekil 2. 6	Bünyesel onarma yöntemi [30]..... 15
Şekil 2. 7	Termoplastik takviyeli onarma yöntemi [33]..... 18
Şekil 3. 1	Gevrek ve sünek kırılma [34] 19
Şekil 3. 2	Çatlak ilerlemesinin üç farklı hali [35] 23
Şekil 3. 3	Çift ankastre giriş geometrisi 25
Şekil 3. 4	Komplians çatlak uzunluğu grafiği 28
Şekil 3. 5	Alan Teoremi 29
Şekil 3. 6	Çentikli eğme deney geometrisi [46] 31
Şekil 3. 7	Karışık mod eğme (A- KME deney düzeneği, B- ÇAK deney düzeneği, C-ÇE deney düzeneği) [47] 32
Şekil 4. 1	St 37 Levha 35
Şekil 4. 2	St 37 çeliği gerilme –birim şekil değiştirme grafiği 36
Şekil 4. 3	DGBEA kimyasal yapısı [49]..... 37
Şekil 4. 4	Deneyde kullanılan yapıştırıcılar. 39
Şekil 4. 5	Yapıştırma bağlantısı hasar türleri [56]..... 39
Şekil 4. 6	Kumlama cihazı ve kompresör 40
Şekil 4. 7	Kumlama işlemi sonrası levha yüzeyleri 40
Şekil 4. 8	Ultrasonik Yıkama (A-Yıkama öncesi aseton dolu tank haznesi, B- Yıkama sonrası aseton dolu tank haznesi, C- Yıkama cihazı)..... 41
Şekil 4. 9	Ko-polyester kimyasal yapısı[57] 42
Şekil 4. 10	Ko-polyester termoplastik malzeme..... 42
Şekil 4. 11	Vakumla cihazı 44
Şekil 4. 12	Yapıştırma Bağlantı Kalıbı..... 45
Şekil 4. 13	Yapıştırıcı Kûrleşme Kalıbı 46
Şekil 4. 14	Hava sterilizatörlü fırın..... 47
Şekil 4. 15	Dijital sıcaklık ölçer ve termokupl 48

Şekil 4. 16	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının 60 ⁰ C deki kürleşme sıcaklık- zaman grafiği.....	48
Şekil 4. 17	Tezgah tipi matkap.....	49
Şekil 4. 18	Universal Çekme cihazları (a-Mecmesin, B-Instron 5982).....	50
Şekil 4. 19	Taramalı elektro mikroskop cihazı (TEM)	51
Şekil 4. 20	Diferansiyel Tarama Kalorimetri cihazı [60].....	52
Şekil 4. 21	Araldite 2015 camısı geçiş sıcaklığı grafiği (A-60 ⁰ C kürleştirilen numune B-100 ⁰ C de kürleştirilen numune)	55
Şekil 4.22	Genelleştirilmiş İzotermal Sıcaklık Zaman Geçiş Diyagramı	58
Şekil 4.23	Kürleşme esnasında meydana gelen moleküler değişim[65]	59
Şekil 4.24	Araldite 2015 çekme numunesinin elde edilişi (A- kürleşme kalıbı içerisinde ki yapıştırıcı, B- Kürleştirilmiş yapıştırıcı plakasına su jeti kesim işlemi uygulanması, C- Çekme numunesi).....	61
Şekil 4.25	Araldite 2015 gerilme birim şekil değiştirme grafiği	62
Şekil 4.26	Araldite 2015 farklı kürleşme sıcaklıkları ait yük-deplasman grafiği	63
Şekil 4.27	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının farklı yükleme hızları altındaki yük-deplasman grafiği.....	65
Şekil 4.28	Farklı yükleme hızlarının mod I kırılma enerji değerleri	66
Şekil 4.29	Vakumla işlemi uygulanan ve uygulanmayan yapıştırıcı plakası (A- Araldite 2011, B- Araldite Av138M).....	67
Şekil 4.30	Yapıştırıcı çekme numunesi (A- Araldite 2011, B- Araldite Av138M, tüm boyular mm dir)	68
Şekil 4.31	Instron 5982 test cihazı	69
Şekil 4.32	Çekme numunelerinin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri (A-Oda sıcaklığı Araldite 2011, B) 120 ⁰ C Araldite 2011, C)oda sıcaklığı Araldite 2015, D) 120 ⁰ C Araldite 2015, E) oda sıcaklığı Araldite Av138M, F) 120 ⁰ C Araldite Av138m	72
Şekil 4.33	Kalıp içerisinde ki yapıştırma bağlantıları	77
Şekil 4.34	Çekme deneyi esnasında oluşan çatlak uzunluğu	79
Şekil 4.35	Araldite 2011 onarma öncesi ve sonrası yük deplasman grafiği	80
Şekil 4.36	Deney sonunda elde edilen kohesif yüzey	81
Şekil 4.37	Araldite 2011 kırılma enerji değerleri.....	82
Şekil 4.38	Araldite 2011 mikro yapı görüntüsü (a-oda sıcaklığında TP ilaveli b-120 ⁰ C TP ilaveli)	83
Şekil 4.39	Araldite 2015 onarma öncesi ve sonrası yük deplasman grafiği	84
Şekil 4.40	Araldite 2015 kırılma enerji değerleri	85
Şekil 4.41	Araldite 2015 mikro yapı görüntüsü (a-oda sıcaklığında TP ilaveli b-120 ⁰ C TP ilaveli).....	86
Şekil 4.42	Araldite AV138M onarma öncesi ve sonrası yük deplasman grafiği	87
Şekil 4.43	Araldite Av138M kırılma enerji değerleri	88
Şekil 4.44	Araldite AV138M mikro yapı görüntüsü (a-oda sıcaklığında TP ilaveli b-120 ⁰ C TP ilaveli).....	89
Şekil 5.1	Kohesif Yöntem [69]	92
Şekil 5.2	Ekspansiyonel kohesif model [71]	96
Şekil 5.3	Bilineer kohesif model [70]	97
Şekil 5.4	Trapezoidal kohesif model [72]	99

Şekil 5.5	Şekil parametresinin PPR kohesif yöntem üzerindeki etkisi	101
Şekil 5.6	Deforme olmuş bindirme bağlantısında ki kohesif gerilme dağılımının sonlu elamanlar görüntüsü.....	102
Şekil 5.7	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının 60°C kürleşme sıcaklığında elde edilen deney ve nümerik sonucun kıyaslanması (Ekspansiyal)	105
Şekil 5.8	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının 60°C kürleşme sıcaklığında elde edilen deney ve nümerik sonucun kıyaslanması (PPR).....	107
Şekil 5.9	İnvers analiz	108
Şekil 5.10	İnvers analiz sonunda elde edilen nümerik yük deplasman grafiğinin deney sonucu ile kıyaslanması.....	109
Şekil 5.11	Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının ekspansiyal model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri	111
Şekil 5.12	Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının PPR model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri	112
Şekil 5.13	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının ekspansiyal model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri	113
Şekil 5.14	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının PPR model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri	114
Şekil 5.15	Araldite Av138M epoksi yapıştırıcının ekspansiyal model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri	116
Şekil 5.16	Araldite Av138M epoksi yapıştırıcının PPR model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri	117

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Yapıştırma ile birleştirme yönteminin avantaj ve dezavantajları..... 8
Çizelge 2.2	Termoplastik malzemelerin erime ve camsı geçiş sıcaklıkları [31,32] 16
Çizelge 4.1	Yapıştırıcıların mekanik özellikleri [50-55]. 38
Çizelge 4.2	Kopolyester fiziksel özellikler [50,60]..... 43
Çizelge 4.3	Yapıştırıcıların farklı kürleştirme sıcaklıklarına ait camsı geçiş sıcaklığı.. 56
Çizelge 4.4	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının farklı kürleşme sıcaklıklarına ait camsı geçiş sıcaklık değerleri [65] 60
Çizelge 4.5	Araldite 2015 farklı kürleşme sıcaklıklarına ait kırılma enerji değerleri . 63
Çizelge 4.6	Oda sıcaklığında kürleştirilen Araldite 2011 mekanik özellikleri 73
Çizelge 4.7	120 ⁰ C sıcaklığında kürleştirilen Araldite 2011 mekanik özellikleri 74
Çizelge 4.8	Oda sıcaklığında kürleştirilen Araldite 2015 mekanik özellikleri 74
Çizelge 4.9	120 ⁰ C sıcaklığında kürleştirilen Araldite 2015 meknik özellikleri 74
Çizelge 4.10	Oda sıcaklığında kürleştirilen Araldite Av138m mekanik özellikleri 74
Çizelge 4.11	120 ⁰ C sıcaklığında kürleştirilen Araldite Av138m mekanik özellikleri . 74
Çizelge 5.1	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının kohesif gerilme ve final ayrılma mesafe değerleri 103
Çizelge 5.2	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının eksponensiyal kohesif parametre değerleri..... 104
Çizelge 5.3	Araldite 2015 kürleşme sıcaklıklarının PPR kohesif model parametreleri..... 106
Çizelge 5.4	Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının onarma adımları sonrası eksponensiyal kohesif parametre değerleri 110
Çizelge 5.5	Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısının onarma adımları sonrası PPR kohesif model parametreleri 111
Çizelge 5.6	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının onarma adımları sonrası eksponansiyal kohesif model parametreleri 113
Çizelge 5.7	Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısının onarma adımları sonrası PPR kohesif model parametreleri 114
Çizelge 5.8	Araldite Av138M epoksi yapıştırıcının onarma adımları sonrası eksponansiyal kohesif model parametreleri 115
Çizelge 5.9	Araldite Av138M epoksi yapıştırıcısının onarma adımları sonrası PPR kohesif model parametreleri 116

TERMOPLASTİK TAKVİYELİ EPOKSİ YAPIŞTIRICILARIN KENDİ-KENDİNİ ONARMA DAVRANIŞININ NÜMERİK VE DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Engin ERBAYRAK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Halil ÖZER

Yapıştırma bağlantısı, farklı malzemelerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıştırma bağlantılarının kendi-kendini onarması (self-healing) endüstride büyük ilgi uyandırmaktadır. Son zamanlarda, hasarlı bölgenin tespitine gerek kalmaksızın, hasarlı bölgenin kendiliğinden tamir edildiği, kendi-kendini onaran süreç üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Uygulamalardan biri, yapıştırıcı içerisine mikrokapsül ve katalizör ilavesine dayanmaktadır. Diğer bir uygulama, kılcal-damar-ağı yöntemi (Microvascular network metod) dir. Bu yaklaşım, canlılardaki damar ağından etkilenecek elde edilen bir biyo-metottur. Onarma mekanizması, mikro-kapsül yaklaşımı ile aynıdır. Bu metotta, farklı olarak, onarma malzemesi, içi boş tüplerde ve fiberlerde depo edilmiştir. Farklı bir uygulamada ise yapıştırıcı içerisine katılan termoplastik partiküllerin, sıcaklık ile aktif hale getirilerek, yapıştırıcının kendi-kendini onarmasına dayanmaktadır. Bu doktora tezinde, yapıştırıcı bünyesinde bulunan hatalara (boşluk, mikro çatlak) karşı hassasiyeti yüksek olan gevrek ve sünek yapıştırıcılarda oluşacak hasarların yapıştırıcının kendi-kendini onarmasını sağlayan bir mekanizma yardımı ile tamir edilmesi amaçlanmaktadır. Tez kapsamında, yapıştırıcının kendi-kendini onarma davranışı deneysel ve nümerik yöntemler ile incelenecektir. Deneysel yaklaşımda, epoksi yapıştırıcı içerisine termoplastik partiküller katılacaktır. Yapıştırıcının, termoplastik malzemenin erime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta kendi-kendini onarması sağlanacaktır. Bununla birlikte, yapıştırıcıların kürleşme sıcaklığı

belirlenirken, camsı geçiş sıcaklıkları da göz önünde bulundurulmuştur. Yapıştırıcı içerisine eklenecek olan termoplastik partiküllerin, yapıştırıcının camsı geçiş sıcaklığına etkisi de deneysel çalışma kapsamında irdelenecektir. Kendi-kendini onarma süreç verimliliği, onarma öncesi ve sonrasındaki kırılma enerjisinin (fracture energy) karşılaştırılmasına dayanacaktır. Ayrıca, nümerik analizler yapılarak, deney sonuçlarından elde edilen veriler ve kohesif yöntem kullanılarak yapıştırıcının onarma öncesi ve sonrasında ki kohesif parametre değışimleri belirlenecektir. Literatürde yer alan Eksponansiyel (exponential) ve PPR (Potential Based Cohesive Model) kohesif yöntemler nümerik model kapsamında kullanılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kendi-kendini onarma, Kırılma enerjisi, yapıştırma bağlantısı, Kohesif yöntemler



ABSTRACT

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SELF-HEALING BEHAVIOR OF THE EPOXY ADHESIVES REINFORCED WITH THERMOPLASTIC PARTICLES

Engin ERBAYRAK

Department of Mechanical Engineering

Phd. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Halil ÖZER

Adhesive bonding is widely used in bonding different materials. Self-healing of bonded structures is becoming of great interest for the industry. Recently, self-healing process, without the need to identify the damaged areas, which are self-repaired, is under intensive research. One of the methods is based on the addition of microencapsulated healing agent and a catalyst in adhesive. Another method is microvascular network approach. This approach influenced by the vascular network of living organisms. Healing mechanism of this method is similar with the microencapsulated healing method. In this method, differently, healing agent is stored in hollow tubes and fibers. In another method, the thermoplastic particles incorporated into the adhesive are self-repaired by activation of thermoplastic particles with temperature. In this dissertation, it is aimed to investigate self-healing mechanism that facilities to repair the damage of brittle and ductile adhesive that are highly sensitive to defects (voids, micro-cracks) or damages caused by loading. Self-healing of adhesive is going to be examined by experimental and numerical approach in this dissertation. In experimental approach, thermoplastic particles will be incorporated into adhesive. In addition, the temperature of self healing will be chosen above the melting temperature of the thermoplastic material. However, it will be considered the glass

transition temperature of adhesive while obtaining the curing temperature. The effects of incorporation thermoplastic particles on glass transition temperature of adhesive are also considered during the experimental approach. Efficiency of self-healing process was based on comparison between healed and unhealed fracture energies. Moreover, in numerical study, changing of healed and unhealed cohesive parameters were obtained by using experimental datas and cohesive zone models. In literature, exponential and potential based (PPR) cohesive zone models were used as the numerical model.

Keywords: Self-healing, fracture energy, adhesive joints, cohesive zone models



1.1 Literatür Özeti

Yapıştırıcının, dışarıdan müdahale olmaksızın, kendi-kendini onarması son derece önemlidir. Yapıştırıcının bünyesinde mevcut olan kusurlar ve yükleme nedeniyle oluşacak çatlaklar, onarma mekanizmaları yardımı ile onarılabilmektedir. Malzemelerin, kendi-kendini onarması ile ilgili çalışmalar son beş yılda yoğunlaşmıştır. Ancak, yapıştırma malzemesi ve yapıştırma bağlantılarının kendi-kendini onarması ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur.

Banea v.d [1] çalışmalarında, kendi-kendini onaran yapıştırıcı ve bindirme bağlantı yöntemleri ve teknolojileri ile ilgili, kapsamlı bir literatür taraması yapmışlardır. Jinquan v.d. [2], yapıştırıcıda meydana gelen kayma ve soyulma gerilmesi konsantrasyonlarını azaltmak amacıyla, kendi-kendini tamir eden yapıştırıcı kullanarak, basamaklı bindirme bağlantısı geliştirmişlerdir. Bağlantıda, piezoelektrik takviyeli kompozit katmanlarını, sensör olarak kullanmışlardır. Bindirme bağlantısındaki mekanik yüklere bağlı şekil değiştirmeler, piezoelektrik sensörler tarafından kontrol edilmiştir. Birinci dereceden kayma şekil değiştirmesi teorisini kullanarak bir *elektromekanik temelli teorik model* oluşturmuşlardır. Xiaofon v.d. [3], kendi-kendini onaran akıllı yapıştırıcı üzerine yaptıkları çalışmada, yapıştırıcıda yüksek rijitlik değerleri elde etmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları yapıştırıcı rijit ve aynı zamanda tersinebilir özelliktedir. Yapmış oldukları deneylerin sonucunda, yüksek yapıştırma dayanımının yüzeyin yeterli ıslatılması ile PCL kristallerin oluşumuna bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir. Takashi v.d. [4], hidrojel yapıdaki yapıştırıcıya, Beta-silycodekstrin ve 2,2 bi-bridin (bpy)

kimyasal bileşiklerini katarak, akıllı yapıştırıcı elde etmişlerdir. Elde edilen akıllı yapıştırıcıya metal iyonları eklenmiş ve yapıştırıcının uyarılması amacıyla kimyasal uyarıcılar kullanılmıştır. Metal iyonları ile kimyasal bileşimlerin etkileşimi sonucunda, yapıştırıcının makroskopik seviyede çeşitli parçalara kolayca yapışması sağlanmıştır. Kathleen v.d. [5], gevrek levhalar kullanılarak, dört nokta eğme testinde oluşan çatlakların iyileştirilmesini incelemişlerdir. İyileştirme yöntemi olarak, *üç boyutlu kılcal-damar-ağ yaklaşımı* kullanmışlardır. Kılcal damar ağ yaklaşımında, boş tüpler içinde yer alan iyileştirme ajanı, katalizör ile polimerleşerek çatlağın onarılmasını sağlamıştır. Henghua v.d. [6], çalışmalarında tok epoksi yapıştırıcıyı, kendi-kendini onaran akıllı yapıştırıcıya dönüştürmüşlerdir. Yapıştırıcının dönüştürülmesi amacıyla, mikro kapsül teknolojisinden yararlanmışlardır. Katalizör olarak “Grubbs katalizörünü” kullanmışlardır. Farklı miktarda mikro kapsül ve katalizör kullanarak, yapıştırıcı kırılma tokluğundaki değişimi incelemişlerdir. Brown v.d. [7], çalışmalarında, malzemenin kendi-kendini onarmasında kullanılan mikro kapsül teknolojisini incelemişlerdir. Bu kapsamda, üre formaldehit dış çeperli, 10-1000 mikro metre çapında, içerisinde disilikapentadien(DCPD) iyileştirme ajanı bulunan mikrokapsüller üretmişlerdir. Mikro kapsüllerin morfolojik özelliklerini etkileyen faktörleri belirtmişlerdir. Ding Shu Xiao v.d.[8] , mikro kapsül içerisine iyileştirme ajanı olarak epoksi ve $((C_2H_5)_2O BF_3)$ kimyasal bileşiğini kullanmışlardır. $((C_2H_5)_2O BF_3)$ kimyasal bileşiğinin sıcaklık altında kürleşmesi sırasında katyonik zincir polimerizasyonu gerçekleştirdiğini ve bu polimerizasyonunda düşük katalizör takviyesi ile kendi-kendini onarma sürecini gerçekleştirebildiğini belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışmada %80 onarma verimliliği elde etmişlerdir. Liao LePing v.d.[9], üre formaldehit dış çeperli, iyileştirme ajanı “Epoxy 711” yapıştırıcısı olan mikro kapsül üretmişlerdir. Literatürden farklı olarak, iyileştirme ajanı olarak kimyasal bir bileşik yerine, epoksi yapıştırıcı seçmişlerdir. Taramalı elektron mikroskopu ve termal analiz kullanarak, mikro kapsüllerin karakteristik özelliklerini belirlemişlerdir. Sonuç olarak, korozyon önleyici kaplama malzemelerin kendi-kendini onarmasında epoksi yapıştırıcının iyileştirme ajanı olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Rule v.d.[10] çalışmalarında, disilikapentadien iyileştirme ajanı içeren üre formaldehit mikro kapsül üretmişlerdir. Katalizör olarak “Grubbs katalizörünü” kullanmışlardır. Ürettikleri mikro kapsüllerin boyutlarının ve yoğunluğunun kendi-kendini onarma verimliliğini

doğrudan etkilediğini gözlemlemişlerdir. En iyi onarma verimliliği için, optimum mikro kapsül boyutu ve malzeme içerisindeki yoğunluğunu belirlemişlerdir. Zuev v.d. [11] literatürden farklı olarak, melanin formaldehit dış çeperli mikro kapsül üretimini gerçekleştirmişlerdir. Mikro kapsülün içerisine iyileştirme ajanı olarak diglisidil tetra hidro-o- ftalat (DTHP) kimyasal bileşiğini kullanmışlardır. Çalışmalarında, mikro kapsülün morfolojisini incelemişlerdir. Mikro kapsül üretiminde; ortalama kapsül boyutunun, reaksiyon süresi ile başlangıçta çok hızlı arttığını, daha sonra bu artmanın yavaşladığı sonucuna varmışlardır. Chowdhury v.d.[12] kendi-kendi onarma teknolojilerinden biri olan mikro kapsül teknolojisi üzerine çalışmışlardır. Mikro kapsüllerin dış çeperi üre formaldehit ve çaplarını da 30-100 mikron aralığında olacak şekilde üretmişlerdir. Mikro kapsüllerin epoksi yapıştırıcısı içerisinde sentezlenmesinden sonra, vakum inflamasyon yöntemi ile düşük mikro kapsül yoğunluklu kompozit malzeme üretmişlerdir. Kompozit yapı içerisindeki mikro kapsüllerin ayrışma sıcaklığı, yaptıkları DSC analizi ile 235⁰C olarak belirlemişlerdir. Sonuç olarak, termal kararlılığı belirlenmiş, kendi-kendi onarabilen kompozit malzeme üretimini gerçekleştirmişlerdir.

Yapıştırıcıların kendi-kendini onarmasında mikrokapsül yöntemi diğer onarma yöntemlerine göre daha çok tercih edilmektedir. Ancak, mikrokapsül yönteminin pek çok dezavantajı bulunmaktadır. Bunlar; mikrokapsül üretiminin zorluğu, polimerleşme için mikrokapsül ile katalizörün karşılaşmasının gerekmesi, mikrokapsülün yalnızca bir kez onarma işlemini yapabilmesi, şeklinde dezavantajlar literatürde rapor edilmektedir.

Yakın zamanda Li v.d. [13], yapıştırıcı içerisine termoplastik malzeme ekleyerek, LOCTITE Hysol 9460 yapıştırıcının, kendi-kendini onarmasını sağlayan bir mekanizma geliştirmişlerdir. Termoplastik malzeme kullanılarak oluşturulan bu mekanizmada, yapıştırıcı birden fazla kendi-kendini onarabilmektedir. Termoplastik kullanılarak oluşturulan iyileştirme mekanizmalarının onarma veriminin diğer yöntemlere göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. K.Pingkarawat v.d. [14], yapıştırıcı içerisine polietilen-metakrilik asit (EMAA) termoplastik malzeme ekleyerek, yapıştırıcının kendi-kendini onarmasını sağlayan bir mekanizma geliştirmişlerdir. *Çift-ankastre-kiriş* deneyi ile yapıştırıcının *enerji serbest kalma oranı* ve kırılma tokluk değerlerini belirlemişlerdir. Deneylerde yapıştırıcı da oluşan çatlaklı yapıyı, termoplastik partiküllerin ısı altında

polimerleşmesi ile onarmışlardır. Farklı oranlarda termoplastik kullanarak, yapıştırıcı kırılma tokluğundaki değişimi incelemişlerdir. Yapıştırıcı içerisindeki termoplastik yoğunluğu arttığında, kırılma tokluğunun da arttığı sonucuna varmışlardır. K.Pingkarawat v.d. [15], termoplastik takviyeli yapıştırıcının mekanik özelliklerini deneysel ve nümerik yöntemler ile belirlemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı termoplastik malzeme kullanmışlardır (PEGMA, EMAA, EVA). Üç farklı termoplastik malzemenin de yapıştırıcının kendi-kendini onarmasında kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, yapıştırıcı içerisindeki termoplastik malzeme yoğunluğunun artması ile, elastisite modülünün azaldığını gözlemlemişlerdir. Mikro yapı analizleri ile termoplastik partiküllerin yapıştırıcı içerisinde ki homojen dağılımını gözlemlemişlerdir. A. Shojaei v.d. [16], yaptıkları çalışmada, kendi-kendini onaran yapıştırıcılar için çok sayıda deneysel çalışma olmasına rağmen, moleküler seviyede onarılan yapıştırıcının, malzeme özelliklerinin belirlenmesinde, iyileştirme teorilerine (Healing Theories) ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Teorilerin uygulanmasın da Sürekli Hasar-İyileştirme Mekaniği (Continuum Damage Healing Mechanics) yaklaşımını kullanmışlardır. Teorik sonuçlardan elde edilen onarma (healing) parametrelerini sonlu eleman analizlerinde kullanmışlardır. Bu çalışma ile deneysel yaklaşım kullanmadan, iyileştirme teorileri kullanılarak, onarma parametreleri belirlemişlerdir. Kendi-kendini onaran malzeme ve yapıştırıcı bağlantıları ile ilgili daha detaylı bilgi için [17-25] nolu makaleler incelenebilir.

Literatürde, kendi-kendini onaran yapıştırma bağlantılarına ilave olarak mukavemet değerlerini arttırmak amacıyla farklı metotlar kullanan pek çok çalışma vardır. Jinquan v.d. [26], basit bindirmeli bağlantılarda, gerilme konsantrasyonlarını azaltmak amacıyla akıllı yapıştırıcı kullanmışlardır. Gerilme konsantrasyonunun azaltılması amacıyla, yapıştırıcı kenarlarına piezoelektrik yama eklemişler ve elektriksel alan oluşturmuşlardır. Oluşturulan elektriksel alan yardımıyla, bağlantı dayanımının artmasını sağlamışlardır. Deneysel sonuçlarını teorik çözümlerle karşılaştırmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir.

Genel olarak, literatürde kendi-kendini onaran yapıştırıcı ve yapıştırma bağlantıları üzerine kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Özellikle literatürde yaygın kullanılan üç farklı yapıştırıcının (Araldite 2011, Araldite 2015, Av138M) kendi-kendini onarması ile

ilgili çalışmaya rastlanılmamıştır. Bununla birlikte, yapıştırıcıların kendi-kendini onarma sürecinde kohesif parametrelerinde ki değişimi inceleyen çok az sayıda çalışma bulunmaktadır.

Bu doktora tezinde, üç farklı yapıştırıcı için termoplastik malzeme takviyesi ile kendi-kendini onarma mekanizması oluşturularak, yapıştırıcıların hasar durumunda hasarlı yapının onarılması amaçlanmaktadır. Ayrıca, tez çalışması kapsamında kullanılacak nümerik model ile de yapıştırıcıların onarma sürecinde kohesif parametrelerindeki değişimler de izlenebilecektir.

1.2 Tezin Amacı

Yapıştırıcının, dışarıdan müdahale olmaksızın, kendi-kendini onarması son derece önemlidir. Yapıştırıcın bünyesinde mevcut olan kusurlar ve yükleme nedeniyle oluşacak çatlaklar, onarma mekanizmaları ile onarılabilir. Malzemelerin, kendi-kendini onarması ile ilgili çalışmalar son beş yılda yoğunlaşmıştır. Ancak, yapıştırıcıların ve yapıştırma bağlantılarının kendini onarması ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu tez çalışmasında, yapıştırıcının kendi-kendini onarmasını sağlayan bir mekanizma oluşturulması amaçlanmaktadır. Literatürde yaygın kullanılan üç farklı epoksi yapıştırıcının (Araldite 2011, Araldite 2015, Av138M) termoplastik malzeme ilavesi ile sıcaklık altında polimerleşmesi sağlanacaktır. Üç farklı yapıştırıcı kullanılarak, termoplastik partiküllerin, farklı mekanik özelliklere sahip yapıştırıcılar üzerindeki etkisi gözlemlenecektir. Polimerleşme yardımı ile yapıştırıcıların kendi-kendini onarması sağlayan bir mekanizma oluşturulacaktır. Kendi-kendini onarma verimliliği, onarma öncesi ve sonrasındaki kırılma enerjisi (fracture energy) karşılaştırılmasına dayanacaktır. Bununla birlikte, onarma süreci sırasında yapıştırıcıların kohesif parametrelerinde ki değişimde sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenecektir.

1.3 Hipotez

Birleştirme yöntemlerinden biri olan yapıştırıcılar, günümüzde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan yapıştırma bağlantıları özellikle havacılık ve otomotiv alanında tercih edilmektedir. Yapıştırma bağlantılarında en çok rastlanan hasar türü, yapıştırıcı içerisinde oluşan çatlakların, yapıştırıcının

yapısını bozarak, yapıştırma bağlantısını kullanılamaz duruma getirmesidir. Böyle bir durumda, yapıştırma bağlantısının yüzeyi mekanik işlemler uygulanarak temizlenir ve ardından yeniden yapıştırıcı uygulanarak, yapıştırma bağlantısı elde edilir. Ancak, bu durumda hem zaman açısından hem de maliyet açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Bu tez kapsamında, piyasada yaygın kullanılan epoksi yapıştırıcılar ile elde edilmiş bağlantı yapılarının hasar görmeleri durumunda, kendi-kendini onarmasını sağlayacak bir mekanizma oluşturulacaktır. Bu onarma mekanizması sayesinde, yapıştırma yüzeylerinin tekrar hazırlanmasına (mekanik pürüzlendirme, yüzey temizliği v.b) ihtiyaç kalmayacağından dolayı, oluşan ek maliyet ve zaman kayıpları da engellenecektir. Ayrıca, bünyesel kusurlara hassasiyeti yüksek olan gevrek ve sünek yapıştırıcıların hazırlanmasında, yapı içerisinde mevcut veya yapıştırıcının bileşenlerinin (reçine, sertleştirici ve termoplastik parçacık) karıştırılması esnasında oluşan hava boşluklarının engellenmesi amacıyla, vakum ortamında karıştırma (VOK) yöntemi kullanılacaktır.

Litertürde, kendi-kendini onaran yapıştırma bağlantıları ağırlıklı olarak deneysel yaklaşım ile incelenmiştir. Bu tez çalışması ile oluşturulacak nümerik model sayesinde kendi-kendini onaran yapıştırma bağlantılarının kohesif parametre değişimi de gözlemlenecektir.

Henüz yeni olan bu konu ile ilgili çalışmaların yapılması, konu ile ilgili ülkemizin, yapıştırma teknolojileri alanında ilerlemesine katkı sağlayacaktır.

Endüstride yaygın kullanılan birçok malzeme, farklı veya aynı türdeki parçaların birleştirilmesi ile ortaya çıkmaktadır. Birleştirme yöntemlerinden vida, perçin, kaynak yöntemleri sıklıkla kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlere ek olarak yapıştırıcı ile birleştirme yöntemi de kullanılmaktadır. Yapıştırıcı ile birleştirme yöntemi özellikle büyük bölümü kompozit malzemeden oluşan uçak gövdelerinde sıklıkla kullanılan bir birleştirme yöntemidir. Şekil 2.1’ de uçaklarda kullanılan yapısal yapıştırıcılar ve birleştirdikleri malzeme çeşitleri gösterilmektedir.



Yapıştırıcı ile birleştirme yönteminin diğer birleştirme yöntemlerine göre dezavantajları olmasına rağmen, avantajları daha fazladır. Çizelge 2.1 de yapıştırma bağlantılarının diğer birleştirme yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları sınıflandırılmaktadır.

Çizelge 2.1 Yapıştırma ile birleştirme yönteminin avantaj ve dezavantajları [50-55]

Avantaj	Dezavantaj
Yapıştırma yöntemi ile oluşturulan bağlantı elemanlarında delik veya boşluk bulunmaz. Buda gerilme yığılmalarını engelleyen bir özelliktir.	Yapıştırma dayanımının arttırılması için yapıştırılan yüzeylere mekanik işlem uygulanması gerekmektedir.
Yapıştırma yöntemi ile oluşturulan bağlantı elemanlarının ağırlığı diğer birleştirme yöntemleri kullanılarak oluşturulan bağlantı elemanlarının ağırlığından daha hafiftir.	Yapıştırıcıların kürleşme zamanı uzun sürebilir.
Farklı malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlar.	Yapıştırıcılar içerdiği kimyasal bileşikler nedeni ile çevreye zarar verebilirler.
Fiyat bakımından ucuzdur.	Özel çalışma sıcaklıklarına sahiptirler. Çok düşük sıcaklıklarda kürleşmezler.
Bağlantı dayanımı yüksektir.	Yapıştırma bağlantılarında düşük soyulma gerilmesi meydana gelir.
Raf ömrü yüksektir.	İdeal yapışma dayanımına ulaşması için zaman gerekir.
Yorulma dayanımı ve ömrü yüksektir.	Yapıştırma yöntemi ile bağlantı elemanları oluşturulurken özel kalıplara ihtiyaç duyulabilir.

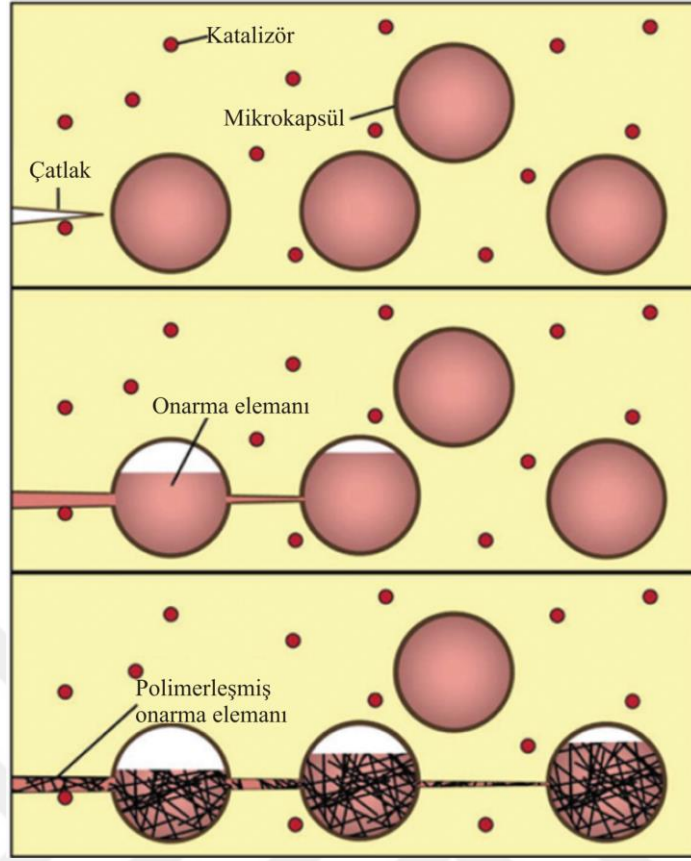
Çizelge 2.1 de görüldüğü gibi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bağlantıların avantajları oldukça fazladır. Bu sebeple, endüstride birçok alanda yapıştırıcı kullanılmaktadır. Yapıştırıcıların yaygın kullanılması ile beraber, yapıştırıcıların iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar son zamanlarda artmıştır. En yaygın çalışma yapıştırıcıların birden fazla kullanılmasına imkân tanıyan kendi-kendini onarma üzerine yapılan çalışmalardır.

Otomotiv, uçak ve tren gibi ulaşım araçlarında yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuş karmaşık geometriye sahip veya de-montesi zor olan malzemelerin dışarıdan müdahale

olmaksızın, kendi-kendini onarması son derece önemlidir. Bu tip malzemelerde oluşabilecek hasarlar, kendi-kendi onarma mekanizmaları ile onarılabilmektedir. Literatürde yer alan kendi-kendini onarma mekanizmaları sırasıyla, mikrokapsül onarma yöntemi, kılcal damar ağ yöntemi, bünyesel onarma yöntemi ve termoplastik takviyesi ile onarma yöntemidir. Bu yöntemler aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

2.1 Mikrokapsül Onarma Yöntemi

Son zamanlarda, hasarlı bölgenin tespitine gerek kalmaksızın, hasarlı bölgenin kendiliğinden tamir edildiği, kendi-kendini onarma süreci üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Yapıştırıcının kendi-kendini onarması il ilgili, literatürde sınırlı sayıda metot önerilmektedir. Bu yaklaşımlardan birisi, matris malzeme içirisine, mikro-kapsül onarma elemanı (microencapsulated healing agent) ve katalizör (catalyst) dâhil edilmesi üzerine dayanmaktadır. Mikro kapsüller boyunca çatlak ilerlediğinde, kapsül içinde bulunan monomer, çatlak boyunca serbest kalmakta ve katalizör ile temas ederek polimerleşme işlemini başlatmakta ve böylece tamir işlemi gerçekleşmektedir. Şekil 2.2 de mikrokapsül onarma yöntemi gösterilmektedir.

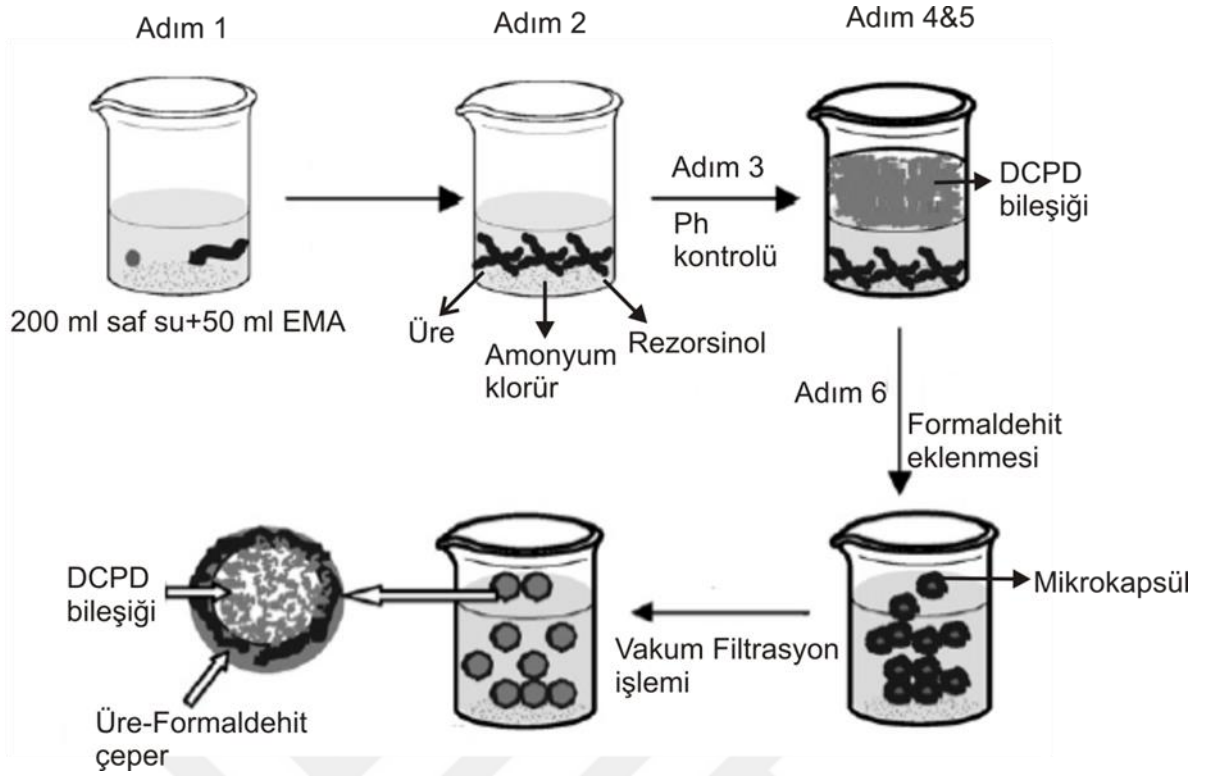


Şekil 2.2 Mikrokapsül yaklaşımında kendi-kendine onarma işlem adımları [1]

Burada malzemenin, kendi-kendini onarma mekanizması, matris malzeme ile mikrokapsül malzemelerinin kompiyansları arasındaki fark nedeniyle, çatlak yolunun mikrokapsüllere doğru yönelmesine dayanmaktadır. Mikrokapsül yaklaşımın avantajı, kapsüllerin polimer malzeme içerisine kolayca katılabilesidir. Dezavantajı ise, mikrokapsüllerin kırılmasının ve onarma malzemesinin katalizör ile karşılaşmasının gerekmesidir. Mikrokapsül sistemin en önemli dezavantajı, yalnızca bir kez onarma işleminin gerçekleştirilebilmesidir. Ayrıca, mikrokapsüllerin üretimi oldukça zordur. Literatürde üre formaldehirt dış çeperli mikrokapsül üretimi adım adım açıklanmıştır. Yue Lond vd [28] yaptıkları çalışmada üre formaldehit dış çeperli mikrokapsül üretimi için ilk olarak 1000 ml beher içerisine 200 ml saf su ve 50 ml EMA (Etilen Maleik Anhidrit) kopolimerinin sulu çözeltisini eklemişlerdir. Bu aşamada maleik anhidrit kullanılmasının temel sebebi ko-polimerizasyonu kolaylaştıran, çok fonksiyonlu bir monomer olmasından kaynaklanmaktadır. İkinci adım da 1000 ml beher içerisine sırasıyla 5 gr üre, 0.5 gr amonyum klorür ve 0.5 gr rezorsinol katılmış, mekanik

karıştırıcı ile 600 d/d (devir/dakika) de karıştırılmıştır. Üçüncü adımda karışımın pH değerini belirlemişlerdir. Mikrokapsül üretimi için en uygun pH seviyesinin 2.6-3.4 aralığı olduğunu belirtmişlerdir. İlk olarak pH kâğıdı kullanılarak karışımın pH değeri ölçülmüş, değer düşük ise pH artırıcı Sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi, yüksek ise pH düşürücü hidroklorik asit (HCL) çözeltisi eklenerek pH değeri istenen aralığa getirilmiştir. Dördüncü adım mikro kapsül içerisinde iyileştirme ajanı olarak kullanılacak disilikonpentadien (DCPD) kimyasal bileşiği, 60 ml bir kap içerisine alınmıştır. Beşinci adım da DCPD kimyasal bileşiği 1000 ml karışımın içerisine yavaşça dökülerek emülsifikasyon gerçekleştirilmiştir. Karışımın stabilize duruma gelmesi için yaklaşık 10 dakika beklenilmiştir. Mikrokapsüllerin dış yüzeyleri üre formaldehit (UF) biçiminde oluşturulmak istenmektedir. Bu sebeple karışımın içerisine üre ile reaksiyon oluşturması için 12.7 gr formaldehit eklenmiştir. Karışıma eklenen formaldehit miktarı üre miktarı göz önüne alınarak belirlenmiştir. Altıncı adımda karışım ısıtıcı plaka ve mekanik karıştırıcı kullanılarak yaklaşık 60 °C ve 900 d/d de 4 saat boyunca mekanik işleme tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrasında karışım içerisinde mikron seviyelerinde üre formaldehit dış yüzeyli mikrokapsüller oluşturulmuştur.

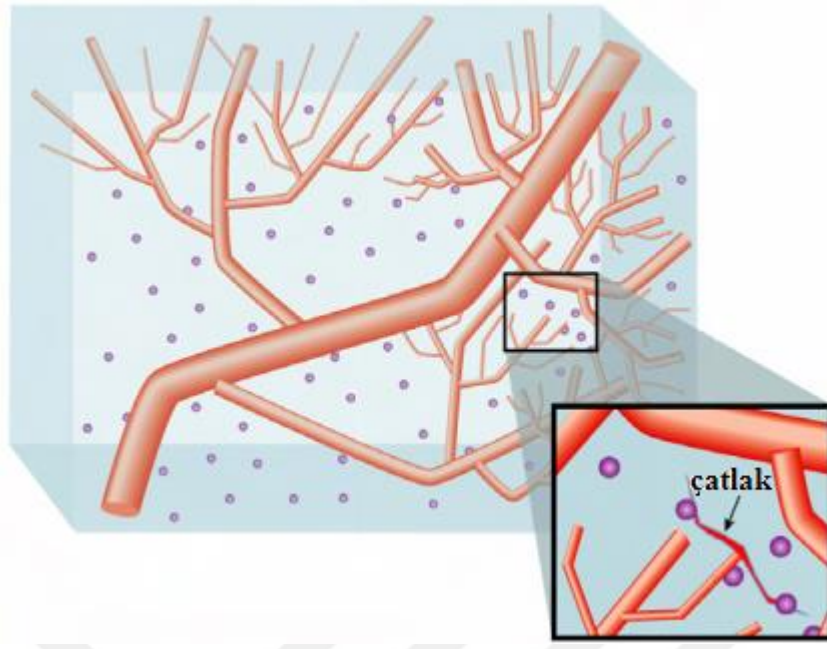
Mikrokapsüller vakum filtrasyon yöntemi kullanılarak karışımdan ayırt edilmiştir. Vakum filtrasyon yöntemi için buncher hunisi, vakum pompası ve konveksiyon fırın kullanılmıştır. Filtrasyon yönteminde ilk olarak buncher hunisi birkaç damla aseton ile ıslatılarak vakum pompasına bağlanmış ve vakumlama işlemi başlatılmıştır. Vakumlama işlemi sırasında mikrokapsül içeren karışım, huni içerisine yavaş yavaş boşaltılmıştır. Vakumlama işlemi sonrasında buncher hunisinin üst kısmında mikrokapsüller ayrıştırılmış olarak elde edilmiştir. Mikrokapsüller daha sonra kurutma işlemi için konveksiyon fırın içerisine konularak 60 °C de 24 saat bekletilmiştir. Kurutma işleminin ardından mikrokapsül üretimi tamamlanmıştır [28]. Şekil 2.3 de mikrokapsül üretim aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Mikrokapsül üretim aşamaları [28]

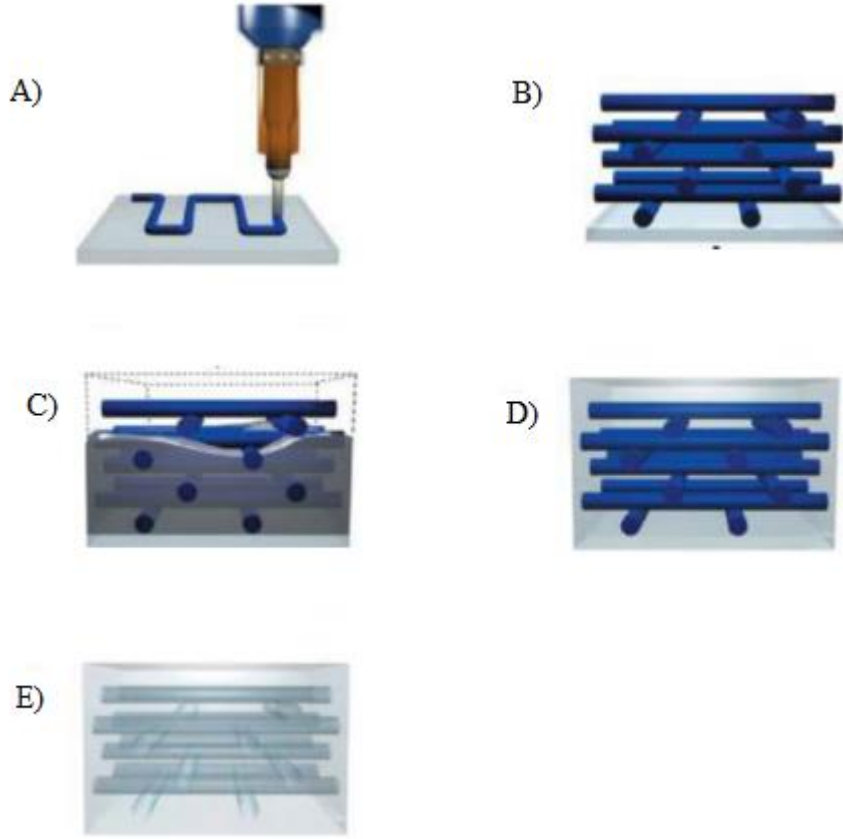
2.2 Kılcal Damar Ağ Yöntemi

Bu yaklaşım, canlılarda ki damar ağından etkilenecek elde edilen bir biyo-metottur. Onarma mekanizması, mikro-kapsül yaklaşımı ile aynıdır. Kılcal damar ağ yönteminde, mikrokapsül yönteminden farklı olarak, kendi-kendini onarma mekanizmasında matris içerisindeki mikro kanallar kullanılır. Mikro kanallar onarma işleminde katalizör görevi görmektedir. İyileştirme ajanı içeren mikrovasküler ağ, mikro kanal içeren matris içerisine yerleştirilir. Onarma mekanizması mikrokapsül sistemine benzer bir şekilde çatlak ilerlemesi ile başlar. Çatlak ilerlemesi esnasında, mikro kanal içerisinde bulunan katalizör serbest kalarak, mikrovasküler ağ yapısında bulunan iyileştirme ajanı ile polimerleşir ve çatlağın kapanmasını sağlar. Kılcal damar ağ yaklaşımında, onarma işlemi birden fazla gerçekleşebilmektedir. Şekil 2.4 de kılcal damar ağ onarma yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Kılcal damar ağ yöntemi [5]

Kılcal damar ağ üretimi oldukça zor bir işlemdir. Kılcal damar ağ yönteminde kullanılan ağlar, yüzde 60 parafin yağı ve yüzde 40 mikrokristalin mumu içeren, uçucu, üç boyutlu yazabilen mürekkep kullanılarak oluşturulmuştur. Ağ yapısı Robocad programında tasarlanmaktadır. Her bir kanal arasında mesafe, ağ yapısının denge durumunu sağlamak ve iyileştirme ajanının etkin bir biçimde kanallarda yer alabilmesi amacıyla 1 mm olarak ayarlanmaktadır. Hazırlanan ağ yapısı 45 mm x 7 mm x 10 mm boyutlarında ve içi eposki ile dolu olan kalıp içerisine yerleştirilerek, yaklaşık 80°C kürleştirilmektedir. Kürleştirilen ağ yapısında fazlalık paraçalar kesilerek yüzey temizlenir. İyileştirme ajanı ultra-viyole ışık yöntemi ile ağ yapısı içerisine yerleştirilmektedir [5]. Kılcal damar ağ yöntem basamakları şekil 2.5 de gösterilmektedir.



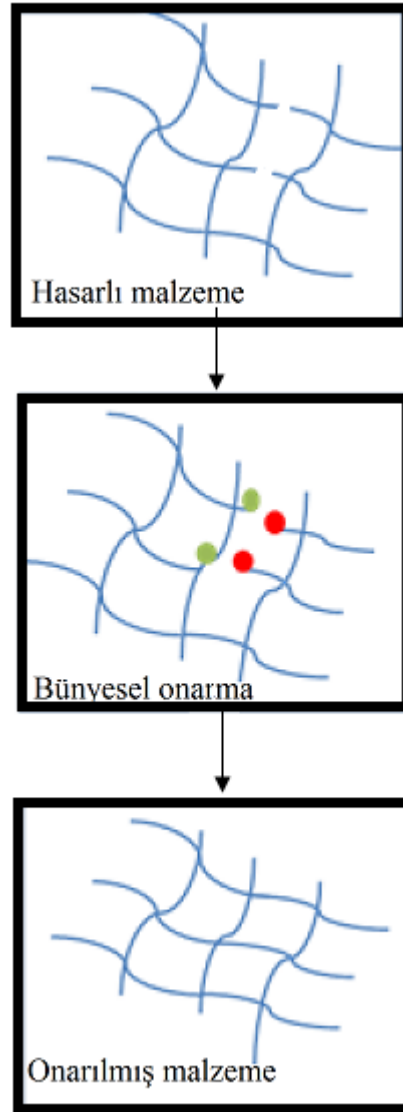
Şekil 2.5 Kılcal Damar Ağ üretim aşamaları (A- Mürekkep ile ağ oluşumu B- Kılcal damar ağ yapısı C- Kılcal damar ağ yapısının kalıp içerisine konulması D- Kalıp içinde kürleşen ağ yapısı E- İyileştirme ajanı eklenmiş ağ yapısının son hali)[29]

2.3 Bünyesel Onarma Yöntemi

Bir diğer kendi-kendini onarma yöntemi bünyesel kendi-kendini onarma (intrinsic self-healing) yöntemidir. Bu yöntemde, ilave onarma elemanı eklenmeksizin, geri-dönebilen termal reaksiyonlar, hidrojen bağlama, moleküler difüzyon vb ile kendi-kendini onarma işlemi gerçekleştirilmektedir. Difüzyon yaklaşımı, hem yapıştırıcının hem de yapıştırılan malzemenin polimerik yapıda olması durumunda geçerlidir.

Difüzyon yöntemi ile oluşan polimerleşme kovalent bağ ile kurulabileceği gibi kovalent bağ oluşmadan da polimerleşme görülebilmektedir. Kovalent bağ kurularak onarılan en yaygın bünyesel onarılan malzeme ise Diels-Alder (andretro-Diels-Alder) reaksiyon malzemeleridir. Bu reaksiyon malzemesinin en büyük avantajı birçok kimyasal malzeme ile kolaylıkla reaksiyona girebilmesidir. Özellikle, birçok mühendislik malzemesinin onarılmasında kullanılan siklopentadien, antrasen ve maleimid gibi

kimyasallarla hızlı işlem kinetiği sayesinde kolaylıkla reaksiyona girebilmektedir. Kovalent bağ oluşumunun görülmediği polimerleşme de ise moleküler arasında geçiş bağları kurularak ağ yapısı oluşturulur. Oluşan ağ yapısı moleküler düzeyde olduğu için süpermoleküler polimerleşme olarak da adlandırılır [30]. Bu yöntem ile polimerleşen malzemenin dayanımı, vizkozitesi ve polimerleşme zincir yapısı; kovalent bağ kurularak polimerleşen malzemeye göre farklılık göstermektedir.



Şekil 2.6 Bünyesel onarma yöntemi [30]

2.4 Termoplastik Takviyeli Onarma Yöntemi

Kendi-kendini onarma yöntemlerinden bir diğeri de termoplastik takviyesi ile onarma yöntemidir. Bu yöntemde takviye edilen termoplastik partiküller sıcaklık altında polimerleşerek, onarma işlemini gerçekleştirirler. Termoplastik takviyesi ile onarma yönteminin diğeri kendi-kendini onarma yöntemlerine göre avantajları daha fazladır. Onarma işleminin karmaşık olmaması, ekstra maliyet gerektirmemesi ve birden fazla onarma işleminin gerçekleştirilebilmesi, başlıca avantajları arasındadır.

Termoplastikler sıcaklığa karşı duyarlı bir plastik grubudur. Termoplastikler ısıtıldıkları zaman yumuşar, soğutuldukları zaman ise sertleşirler. Polimerleşme sırasında kovalent veya van der Waals bağları kurabilirler. Mekanik özellikleri, özellikle de Elastisite modülü ve Kayma modülü diğeri polimerlere göre daha yüksektir. Birden fazla ısı işlem görebilirler. Termoplastiklerin birden fazla ısı işlem görebilme özelliği kendi-kendini onarma yöntemi için de önemli bir özelliktir. Termoplastikler ipliksi moleküler yapıya sahiptirler. Camsı geçiş sıcaklıklarının üstünde sıvı durumda yer alan termoplastikler, çalışma sıcaklığının camsı geçiş sıcaklığının çok üstünde olması durumunda ise dekompoze olarak bozulurlar. Bu sebeple, termoplastiklerin camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığının bilinmesi önemlidir. Endüstride yaygın olarak kullanılan termoplastikler sırasıyla; ko-polyester, ko-poliamid, poli-metil-metakrilat, polistiren, poli vinil klorür (PVC) dir. Yaygın kullanılan termoplastiklerin erime ve camsı geçiş sıcaklıkları çizelge 2.2 de verilmiştir [31].

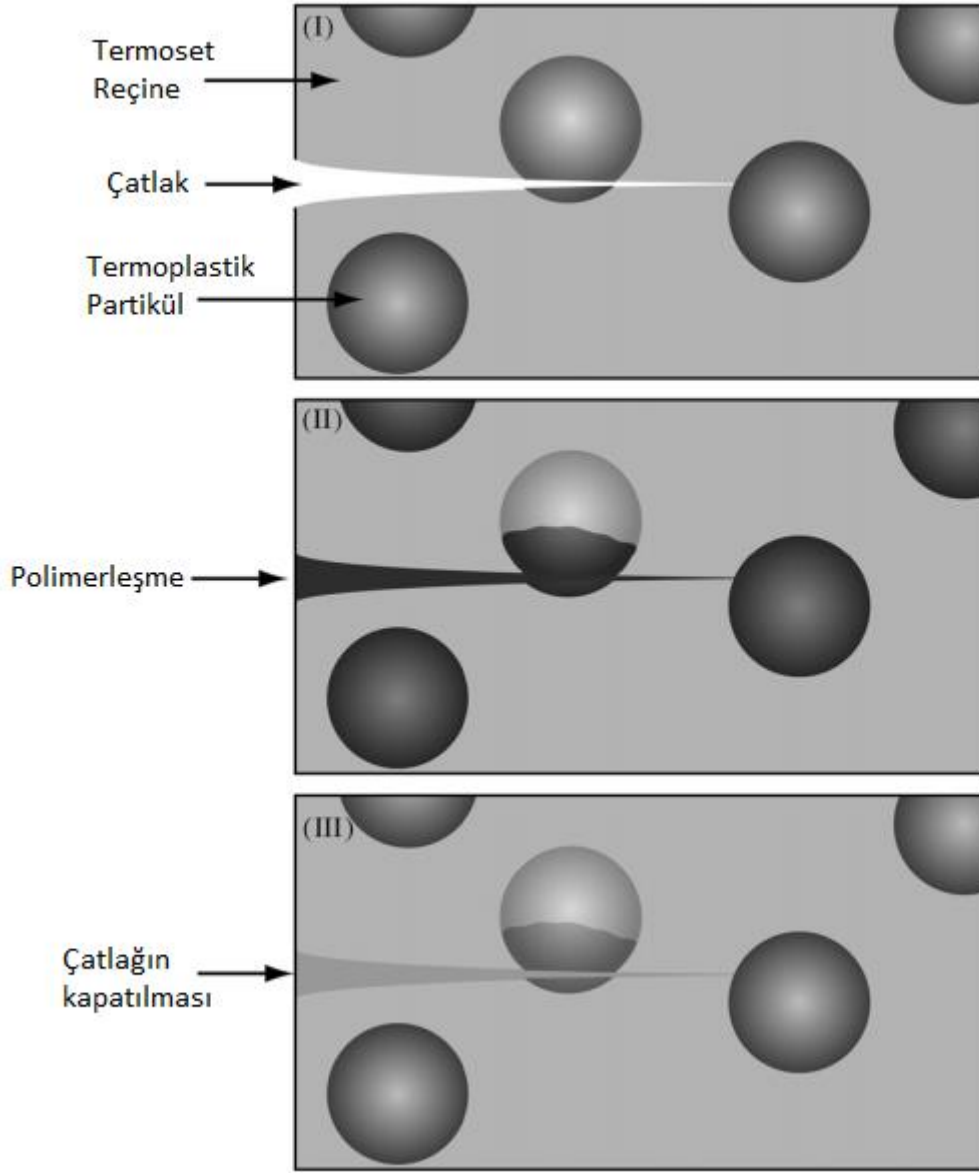
Çizelge 2.2 Termoplastik malzemelerin erime ve camsı-geçiş sıcaklıkları [31,32]

Polimer	Erime Sıcaklığı (°C)	Camsı geçiş sıcaklığı (°C)
Ko-polyester	109-119	130-150
Ko-poliamid	115-125	130-140
Poli-metil-metakrilat	85-100	130-140
Polistiren	70-100	240
Poli Vinil Klorür (PVC)	75-105	100-260

Çizelge 2.2' de erime ve camsı geçiş sıcaklıkları verilen termoplastik malzemeler yapıştırıcıların kendi-kendini onarma yönteminde de kullanılmaktadır.

Termoplastik takviyesi ile onarma yönteminde ilk olarak termoplastik partiküller, termoset yapıda olan epoksi yapıştırıcı içerisine eklenir. Termoplastik partiküller yapıştırıcı içerisine vakum altında karıştırılarak eklenmelidir. Böylelikle, yapı içerisinde mevcut veya yapıştırıcı bileşenlerinin (reçine, sertleştirici ve termoplastik partikül) karıştırılması esnasında oluşan hava boşlukları engellenmiş olur. Termoplastik takviyesi ile onarma işleminde ilk olarak çatlak içeren yapıştırıcının matrisinde bulunan termoplastik partiküllerin sıcaklık altında ergimesi sağlanır. Ergiyen partiküller, çatlak boyunca polimerleşerek, çapraz bağ oluşumunu (cross-link) gerçekleştirir ve çatlağın kapanması sağlanır. Termoplastik partiküllerin polimerleşme işlemi birden fazla da gerçekleşebilmektedir.

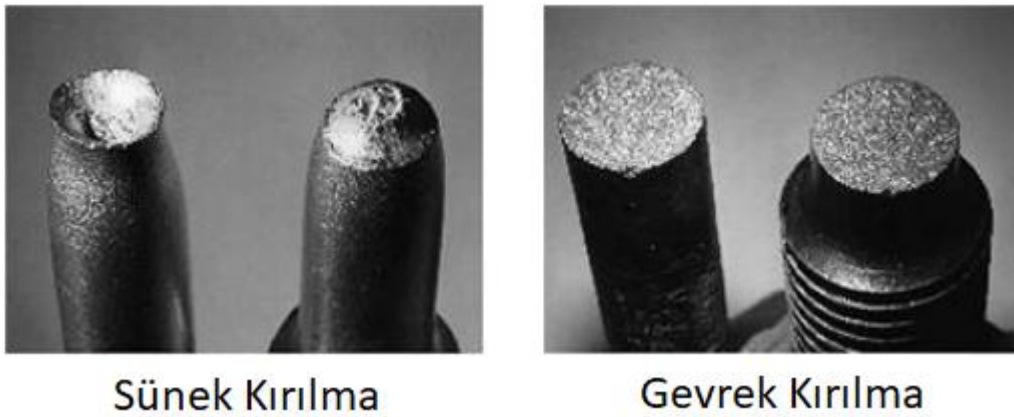
Termoplastik takviyeli onarma yönteminin verimi, kompakt gerilme testi ve kırılma enerjisi gibi kırılma mekaniği teorileri ile belirlenebilmektedir. Onarma veriminin yüksek olabilmesi için termoplastik partiküllerin matris içinde homojen olarak dağılması, ergime sıcaklıklarının epoksi matrisin camsı geçiş sıcaklığının çok üstünde olmaması ve moleküler ağırlığının düşük olması gerekmektedir. Tüm bu şartların sağlanması halinde, termoplastik takviyeli onarma yönteminin yüksek verime ulaşması beklenir. Şekil 2.7 de termoplastik takviyeli onarma yöntemi gösterilmektedir [33].



Şekil 2.7 Termoplastik takviyeli onarma yöntemi [33]

KIRILMA MEKANİĞİ YAKLAŞIMI

Katı bir malzemenin yük altında birden fazla parçaya ayrılmasına kırılma adı verilir. Kırılmanın gerçekleşmesinden önce çatlak oluşumu ve ilerlemesi gözlemlenmektedir. Kırılma, malzeme yapısından kaynaklanabileceği gibi çevresel faktörlerden de kaynaklanabilmektedir. Genel olarak kırılma, gevrek kırılma ve sünek kırılma olarak iki şekilde sınıflandırılabilir. Plastik deformasyonun kırılma yüzeyinde çok görülmediği, düşük enerji gereksiminin olduğu kırılma, gevrek kırılma olarak adlandırılır. Gevrek kırılmada çatlak ilerlemesi oldukça hızlı gözlenmektedir. Kırılma yüzeylerinde yüksek plastik deformasyonun görüldüğü, yüksek enerji gereksiminin olduğu kırılma ise sünek kırılmadır. Sünek kırılma da çatlak ilerleme hızı daha düşük görülmektedir. Şekil 3.1 de alüminyum malzemenin gevrek ve sünek kırılma sonrasındaki yüzey görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.1 Gevrek ve sünek kırılma [34]

Kırılma esnasında çatlak ın ilerlemesini, kritik çatlak uzunluğunu, çatlak başlangıcı için gerekli minimum enerji değerini, çatlak ın kararlı veya kararsız ilerlemesini, kırılma yüzeylerinin mikro ve makro yapısını inceleyen bilim dalı kırılma mekaniğidir. Malzemenin elastik veya plastik davranışı için kırılma mekaniğinde farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Çatlak ucu ve çevresinde meydana gelen gerilme ve deformasyonların elastik bölge içinde incelenmesinde Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) , elastik-plastik bölge içinde incelenmesinde ise Elastik Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) yaklaşımı kullanılmaktadır.

3.1 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM)

Lineer elastik kırılma mekaniği, kırılma sırasında meydana gelen çatlak çevresinde ki gerilme ve deformasyonları, elastik bölge sınırları içerisinde inceleyen bilim dalıdır. LEKM yaklaşımında çatlak ucunda ortaya çıkan gerilme değeri, yeni yüzey oluşturulması için gerekli olan enerji değerinin (limit değeri) üstünde olması halinde çatlak ilerlemesi gerçekleşmektedir. Ayrıca, çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan kırılma enerjisi lineer elastik kırılma mekaniği kapsamında yer alan farklı teoremler kullanılarak hesaplanabilmektedir.

3.1.1 Griffith Teoremi

Griffith Teoremi daha çok gevrek malzemelerin kırılma enerjisinin hesaplandığı bir yöntemdir. Griffith teoremine göre çatlak ın ilerleyebilmesi, çatlak oluşumu sırasında ortaya çıkan elastik enerjinin yeni yüzey oluşumu için gerekli olan yüzey enerjisine eşit veya daha fazla olması halinde mümkün olmaktadır. Çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan kırılma enerjisi [35];

$$G_c = -\frac{\partial \Pi}{\partial A} = \frac{U_e}{\partial A} = 2\gamma \quad (3.1)$$

dir. Burada, G_c kırılma enerjisi, Π toplam enerji, A çatlak içeren yapının alanı, U_e elastik birim şekil değiştirme enerjisi ve γ ise yüzey enerjisidir. $2a$ uzunluğunda çatlak içeren ve eksenel yüklemeye maruz bir levha için Griffith teoremi uygulandığında elastik birim şekil değiştirme enerjisi;

$$U_e = \frac{\pi a^2 \sigma^2}{8\mu} (\kappa + 1) \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, σ çatlak ucu gerilmesi, μ ve κ ise sabittir. Ancak, κ ifadesi plakanın düzlem şekil değiştirme veya düzlem gerilme durumu için farklılık göstermektedir. Düzlem şekil değiştirme için κ ifadesi;

$$\kappa = 3 - 4\nu \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, ν Poisson oranını ifade etmektedir. Denklem 3.3, denklem 3.2' de yerine konulup ve gerekli sadeleştirmeler yapıldığında düzlem şekil değiştirme için kritik gerilme ifadesi;

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a(1-\nu^2)}} \quad (3.4)$$

olarak elde edilir. E levhanın elastisite modülüdür. σ_c ise kritik çatlak ucu gerilmesidir. Düzlem-gerilme durumu içinse κ ifadesi;

$$\kappa = (3 - \nu) / (1 + \nu) \quad (3.5)$$

dir. Denklem 3.5, denklem 3.2'de yerine konulup ve gerekli sadeleştirmeler yapıldığında düzlem gerilme için kritik gerilme ifadesi;

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir[35].

Çatlak ucu plastik bölgenin, kritik çatlak ucu gerilme değeri ve kırılma enerjisi üzerine etkisi Griffith Teoremi içinde değerlendirilmemiştir. Plastik bölge etkisi Irwin teoremi kullanılarak değerlendirilmiştir.

3.1.2 Irwin Teoremi

Irwin teoremi, Griffith yöntemini esas almıştır. Griffith yöntemi sadece çatlak ucu elastik bölgeyi incelemiş, plastik bölge ihmal edilmiştir. Irwin teoremi sayesinde, plastik bölgenin çatlak ucu gerilme değeri ve kırılma enerjisi üzerindeki etkisi incelenerek, Griffith teoreminin kapsamı genişletilmiştir. Irwin ve arkadaşları, çatlak ucunda meydana gelen gerilmenin limit değerinin üstünde yer alması durumunda çatlak

ilerlemesi ve kırılma olayı görüleceğini ve ortaya çıkan yüksek gerilme değerinin çatlak ucunda mutlaka bir plastik bölge oluşturacağını belirtmişlerdir. Dolayısıyla, plastik bölgenin de ihmal edilmemesi gerektiğini savunmuşlardır.

Irwin teoremine göre, çatlak ucunda meydana gelen gerilme ifadesi, çatlak etrafında oluşacak dönmeyi de dikkate alarak [36];

$$\sigma_{ij} \approx \left(\frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \right) f_{ij}(\theta) \quad (3.7)$$

şeklinde ifade etmişlerdir. Burada; K gerilme şiddet faktörünü, r çatlak ucu yarıçapı, θ ise çatlak ucu açısını ifade etmektedir. Çatlak ucu açısı bir fonksiyon ile ifade edilmiştir.

3.2 Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM)

Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) çatlak ucunda meydana gelebilecek büyük ölçekteki plastik deformasyonun incelenmesi için geliştirilen bir kırılma mekaniği dalıdır. EPKM yaklaşımında çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan kırılma enerjisi J integrali ile belirlenir. J integrali ile kırılma enerjisi hesaplanırken, çatlak uzunluğuna küçük arttırmalar verilerek iterasyon sayısı artırılır ve yeni çözümler elde edilir. Optimum çözüm elde edilene kadar iterasyon devam ettirilir. Elastik-Plastik Kırılma Mekaniğinde enerji değeri belirlenirken lineer elastik kırılma mekaniğinde ki gibi toplam enerji kullanılır. Toplam potansiyel enerji [37,38];

$$\Pi = \frac{1}{2} \{q\}^T [R] \{q\} - \{q\}^T \{F\} \quad (3.8)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada q deplasman vektörünü, F yükleri, R ise rijitlik matrisini göstermektedir. Düğüm deplasman değerleri, minimum potansiyel enerji prensibinden;

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{q\}} = [R] \{q\} - \{F\} = 0 \quad (3.9)$$

elde edilir. Lineer elastik durum için kırılma enerjisi J integraline eşit olduğundan, J integrali;

$$J = \frac{\partial \Pi}{\partial a} \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Denklem 3.9 da yer alan denklemin çatlak uzunluğuna göre kısmi türevi alınır ise;

$$J = \frac{\partial \Pi}{\partial a} = -\frac{1}{2} \{q\}^T \frac{\partial [R]}{\partial a} \{q\} + \{q\}^T \frac{\partial \{F\}}{\partial a} - \frac{\partial \{q\}^T}{\partial a} [R] \{q\} - \{F\} \quad (3.11)$$

J integrali elde edilir. (3.11)' de bulunan denklemin sadeleştirilmiş hali;

$$J = -\frac{1}{2} \{q\}^T \frac{\partial [R]}{\partial a} \{q\} + \{q\}^T \frac{\partial \{F\}}{\partial a} \quad (3.12)$$

şeklinde dir. Çatlak uzunluğuna göre türev işlemleri yapıldıktan sonra rijidlik ve kütle matrisi ifadeleri;

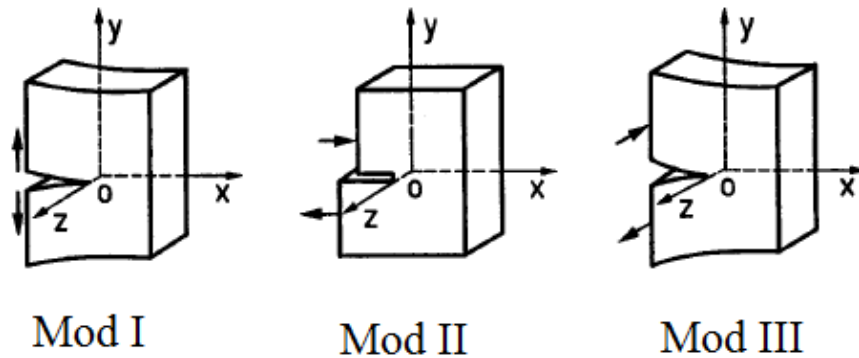
$$\frac{\partial [K]}{\partial a} = \frac{1}{\Delta a} ([R]_{a+\Delta a} - [R]_a) \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \{F\}}{\partial a} = \frac{1}{\Delta a} (\{F\}_{a+\Delta a} - \{F\}_a) \quad (3.14)$$

şeklinde elde edilir [37,38]. Burada Δa çatlak boyunda meydana gelen küçük bir artışı, $[R]_a$ ve $[R]_{a+\Delta a}$ ise genel rijitlik matrisini göstermektedir.

3.3 Kırılma Modları

Kırılma mekaniğinde, malzemeye uygulanan yükleme durumuna göre üç farklı çatlak ilerlemesi gözlemlenmektedir. Bunlar, Mod I (açılma mod), Mod II (kayma mod) ve mode III (yırılma mod) dur. Şekil 3.2 de mod görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Çatlak ilerlemesinin üç farklı hali [35]

Mod I çatlak ilerlemesinde, çatlak ucunda meydana gelen gerilmeler çatlak yüzeyine dik olarak etki etmektedir. Çatlak yüzeyleri birbirine simetrik ve ters yönde hareket etmektedir. Mod II çatlak ilerlemesinde, çatlak ucunda meydana gelen gerilmelerin kayma bileşeni, çatlak yüzeyine paralel olarak etki etmektedir. Çatlak yüzeyleri birbirleri üzerinde kayarak hareket ederler. Mod III çatlak ilerlemesinde, çatlak ucunda meydana gelen gerilmeler çatlak yüzeyine hem dik yönde hem de paralel yönde etki ederler. Çatlak yüzeyleri ise çatlak ucu çizgisine paralel olarak hareket ederler.

3.4 Kırılma Enerji Deneyleri

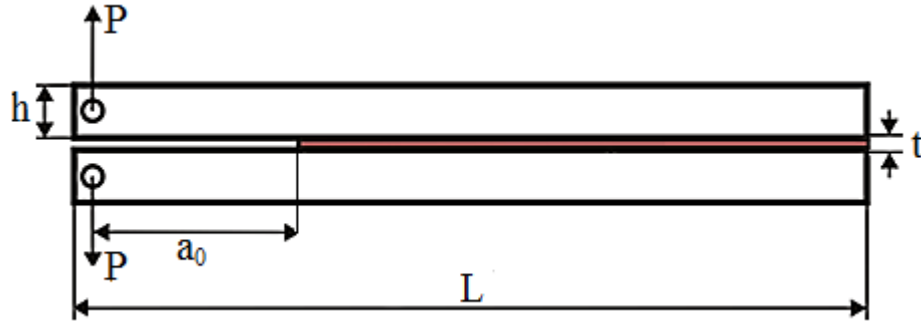
Çatlak ilerlemesi sırasında ortaya çıkan kırılma enerjisi, tüm malzemeler için önemli bir parametredir. Kırılma enerjisi kullanılarak, malzemelerin kırılmaya karşı direnci olarak tanımlanan kırılma tokluğu da belirlenebilmektedir. Literatürde farklı yöntemler kullanılarak malzemelerin kırılma enerjileri ve kırılma toklukları belirlenebilmektedir. Bunlardan bazıları tek çentik kenarlı eğme deneyi (single-edge notched beam test), kompakt çekme deneyi (compact tension test) ve üç nokta eğme (three point flexural test) deneyidir.

Bu tez kapsamında, yapıştırıcıların kendi-kendini onarma verimliliğinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Onarma verimliliği belirlenirken yapıştırıcının kırılma enerjisi değerinden faydalanılacaktır. Bu sebeple, yapıştırma bağlantılarında çatlakın ilerlemesi esnasında ortaya çıkan kırılma enerjisinin deneysel ve teorik yaklaşımları detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Literatürde, yapıştırma bağlantısının Mod I kırılma enerjisi değerinin hesaplanmasında Çift Ankastre Kiriş (Double Cantilever Beam) deneyi kullanılmaktadır. Benzer bir şekilde, Mod II kırılma enerjisi için Çentikli Eğme (End notched flexural) deneyi, mod III içinse karışık-mod eğme (mixed mode flexural) deneyi önerilmektedir.

3.4.1 Çift Ankastre Kiriş Deneyi

Çift Ankastre kiriş deneyi (ÇAK), Mod I çatlak ilerlemesi sırasında ortaya çıkan kırılma enerjisinin hesaplanabildiği bir deneydir. Kırılma enerjisi, deney datalarından hesaplanan Komplians değeri, çatlak uzunluğu, levha genişliği ve kalınlığı kullanılarak hesaplanmaktadır. Yapıştırma bağlantısında çatlak ilerlemesinin düzgün olabilmesi

amacıyla ön-çatlak (a_0) bulunur. Ön çatlak levhalar arasında yapıştırıcının bulunmadığı bölgedir. Deneyde kullanılan yapıştırma bağlantı ölçüleri ASTM D 3433-99 standardına göre belirlenmektedir. Şekil 3.3 de ÇAK deneyi için oluşturulan model görülmektedir.



Şekil 3.3 Çift ankastre kiriş geometrisi

Şekil 3.3 de görüldüğü üzere, h levha kalınlığını, t yapıştırıcı kalınlığını, P deney esnasında uygulanan yükü ve L ise levha boyunu göstermektedir. Yapıştırma bağlantısında ön çatlak ve levha kalınlığı belirlenirken dikkat edilmesi gereken kriterler vardır. Bu kriterler [39,40] ;

$$a_0 \leq 0.042 \left(\frac{E(2h)^3}{G_{IC}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

$$2h \geq 8.48 \left(\frac{G_{IC} a_0^2}{E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.16)$$

dır. Burada E elastisite modülü G_{IC} Mod I kırılma enerjisidir.

Çift ankastre kiriş deneyi sonunda elde edilen yük-deplasman verileri ile farklı teoremler kullanılarak Mod I kırılma enerjisi hesaplanabilmektedir. Literatürde yer alan teoremler sırasıyla Kiriş teoremi (beam theory), Modifiye Kiriş Teoremi (modified beam theory), Komplians Kalibrasyon Teoremi (compliance calibration theory), Alan Teoremi (Area theory) ve Komplians Tabanlı Kiriş Teoremidir (Compliance-based beam theory).

3.4.1.1 Kiriş Teoremi (KT)

Kiriş teoreminde kırılma enerjisi, lineer elastik kırılma mekaniğinde yer alan Toplam Enerjinin çatlak uzunluğuna türevi olarak tanımlanır. Buna göre Mod I kırılma enerjisi [35];

$$G_{IC} = -\frac{\partial \Pi}{b \partial a} = \frac{\partial U}{b \partial a} = \frac{P^2}{2b} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (3.17)$$

dır. Kompliyans ifadesinden başlanıp, ara basamak işlemleri yapılarak, kiriş teoremi için kırılma enerji formülasyonu elde edilmiştir. Kırılma mekaniğinde kompliyans;

$$C = \frac{\Delta}{P} \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, Δ ifadesi deplasmanı temsil etmektedir. Mukavemet yaklaşımından çift ankastre kiriş için deplasman değeri ;

$$\Delta = \frac{2Pa^3}{3EI} \quad (3.19)$$

şeklinde ifade edilir. I dikdörtgen kesitli kiriş için alan atalet momentidir. Denklem 3.19, denklem 3.18 de yerine yazılır ve atalet momenti içinde $bh^3/12$ ifadesi kullanılırsa, kompliyans ifadesi ;

$$C = \frac{8a^3}{Eb^3h^3} \quad (3.20)$$

olarak elde edilir. Denklem 3.17 dikkate alınarak, kompliyans ifadesinin (denklem 3.20) çatlak uzunluğuna göre türevi alınır ise ;

$$\frac{\partial C}{\partial a} = \frac{24a^2}{Eb^3h^3} \quad (3.21)$$

elde edilir. Denklem 3.21, denklem 3.17 de yerine yazılır ve sadeleştirme yapılır ise ;

$$G_{IC} = \frac{12P^2a^2}{Eb^2h^3} \quad (3.22)$$

denklemini elde edilir. Denklemin her iki tarafı da $b.a.(2/3) .(1/P)$ değeri ile çarpılırsa;

$$\frac{2ba}{3P} G_{IC} = \frac{8Pa^3}{Eb^3h^3} = \Delta \quad (3.23)$$

ifadesi elde edilir. Denklem 3.23 den çatlak uzunluğu (a) ifadesi;

$$a = \left(\frac{3\Delta EI}{2P} \right)^{1/3} \quad (3.24)$$

şeklinde elde edilir. Çatlak uzunluğu ifadesi denklem 3.23 de yerine yazılır ise ;

$$\frac{2b}{3P} G_{IC} \left(\frac{3\Delta EI}{2P} \right)^{1/3} = \Delta \quad (3.25)$$

denklemini elde edilir. Denklem de üstel ifade parantez içerisine dağıtılır, atalet momentini içinde $bh^3/12$ ifadesi kullanılır ve sadeleştirme işlemi yapılır ise ;

$$\Delta = \left(b^4 E \right)^{1/3} h \Delta^{1/3} P^{-4/3} \frac{G_{IC}}{3} \quad (3.26)$$

denklemini elde edilir. Denklem 3.26 da G_{IC} ifadesi yalnız bırakılır ise, kiriş teoremi yaklaşımı için mod I kırılma enerji ifadesi;

$$G_{IC} = \frac{3}{h} \left(b^4 E \right)^{-1/3} P^{4/3} \Delta^{2/3} \quad (3.27)$$

şeklinde elde edilir.

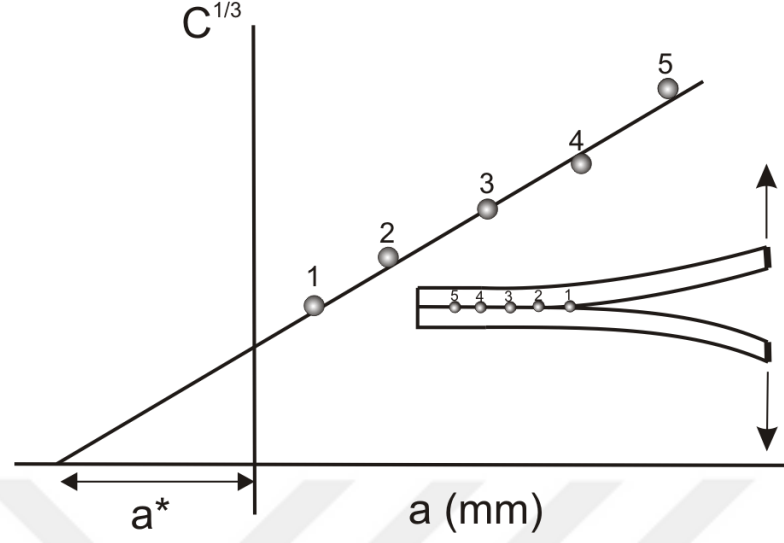
3.4.1.2 Modifiye Kiriş Teoremi (MKT)

Modifiye Kiriş Teoremi, mod I çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan kırılma enerjisinin hesaplanmasında kullanılan bir diğer teoremdir. Bu teoremden de toplam enerjinin çatlak uzunluğuna göre türevi alınarak kırılma enerjisi hesaplanır. Modifiye kiriş teoreminde kullanılan kırılma enerjisi [41];

$$G_{IC} = \frac{3P\Delta}{2b(a+a^*)} \quad (3.28)$$

eşitliği ile belirlenmektedir. Burada a^* ifadesi, çatlak ucunda meydana gelen dönme ve kayma etkisini en aza indirebilmek amacı ile kullanılan düzeltme faktörüdür. Modifiye kiriş teoreminde düzeltme faktörü, komplians-çatlak uzunluğu grafiğinde ki lineer eğrinin x-eksenini kestiği nokta ile orijin arasındaki mutlak değer mesafesidir.

Şekil 3.4 de düzeltme faktörünün komplians çatlak uzunluğu garfiğindeki yeri gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Komplians çatlak uzunluğu grafiği

3.4.1.3 Komplians Kalibrasyon Teoremi (KKT)

Komplians kalibrasyon yöntemi ile mod I kırılma enerjisi hesaplanırken, komplians değeri [42] ;

$$C = ka^n \quad (3.29)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır. Burada n değeri, komplians ve çatlak uzunluğunun logaritmik değerlerinin grafiğinden elde edilir. Komplians ifadesinin çatlak uzunluğuna göre türevi alınır ve denklem 3.17 de yerine konulur ise;

$$G_{IC} = \frac{P^2 n k a^n}{2ba} \quad (3.30)$$

denklemini elde edilir. Komplians ifadesi denklem 3.18 deki gibi ifade edilir ve gerekli sadeleştirme işlemleri yapılırsa, komplians kalibrasyon teoremi için kırılma enerjisi;

$$G_{IC} = \frac{nP\Delta}{2ba} \quad (3.31)$$

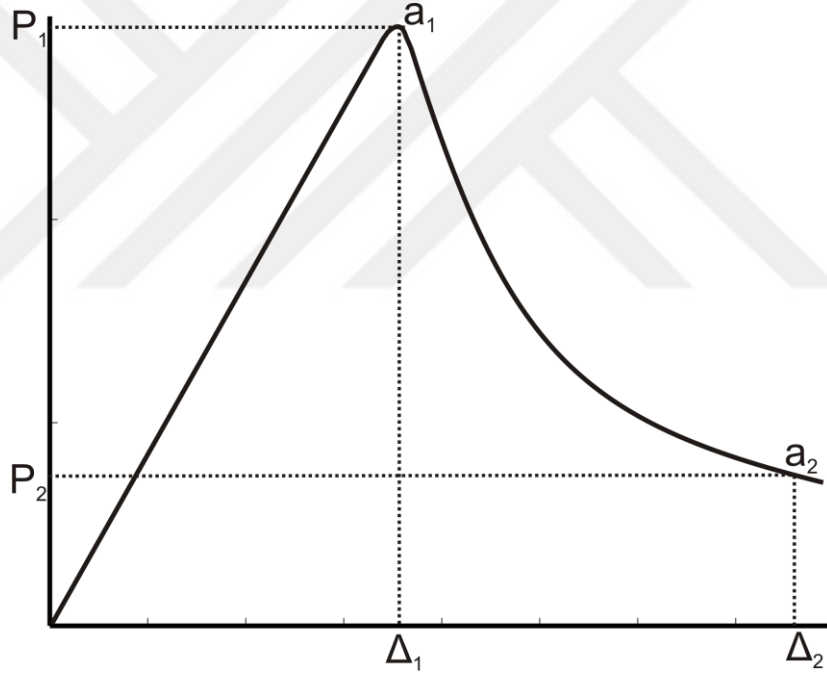
şeklinde ifade edilir.

3.4.1.4 Alan Teoremi (AT)

Alan teoreminde kırılma enerjisi, ÇAK deneyi sonrasında elde edilen yük-deplasman grafiği kullanılarak hesaplanır. Yük-deplasman grafiğinin altında kalan alan ile levha genişliği ve çatlak uzunluğu kullanılarak mod I kırılma enerjisi hesaplanır. Alan teoreminde kırılma enerjisi [43] ;

$$G_{IC} = -\frac{\partial \Pi}{b \partial a} = \frac{\frac{1}{2}(P_1 \Delta_2 - P_2 \Delta_1)}{b(a_2 - a_1)} \quad (3.32)$$

formülü ile hesaplanır. Ayrıca, şekli 3.5 de ÇAK deneyi sonrası elde edilebilecek örnek bir yük-deplasman grafiği için alan teoreminin uygulanış şekli gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Alan Teoremi

3.4.1.5 Kompliyan Tabanlı Kiriş Teoremi (KTKT)

Kırılma enerjisi hesaplamalarında kullanılan çatlak uzunluğunun belirlenmesi oldukça zordur. Özellikle gevrek yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan yapıştırma bağlantılarında, deney esnasında çatlak kontrolünün yapılabilmesi oldukça zordur. Bu zorluğun

üstesinden gelebilmek için komplians tabanlı kırış teoremi kullanılmaktadır. Bu teoremden, deney esnasında çatlak uzunluğunun ölçülmesine gerek yoktur. Bu teoride diğer teoremlerden farklı olarak kırılma enerjisi hesaplamasında eğilme elastisite modülü (flexural elasticiy modulus) kullanılır. Eğilme elastisite modülü [44] ;

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + a^*)}{5BhG} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + a^*)^3}{Bh^3} \quad (3.33)$$

olarak ifade edilir. Burada a^* ifadesi kompliyans kalibrasyon yöntemi ile belirleneceği gibi, Wang and Williams [45] tarafından önerilen;

$$a^* = h \sqrt{\frac{E}{11G} \left(3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right)} \quad \text{and} \quad \Gamma = 1.18 \frac{E}{G} \quad (3.34)$$

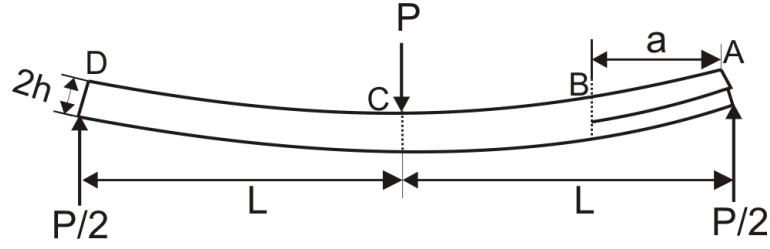
eşitlik ile de hesaplanabilmektedir. Burada G levhanın kayma modülünü göstermektedir. Eğilme elastisite modülü, denklem 3.33 deki eşitlik yardımı ile hesaplanır ve denklem 3.20 de ki komplians eşitliği yeni hesaplanan eğilme elastisite modülü kullanılarak revize edilir ise, kırılma enerjisi

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{B^2h} \left(\frac{2a_e^2}{h^2 E_f} + \frac{1}{5G} \right) \quad (3.35)$$

şeklinde elde edilir. Burada a_e eşdeğer çatlak uzunluğudur [44].

3.4.2 Çentikli Eğme Deneyi (ÇED)

Çentikli eğme deneyi, yapıştırma bağlantılarında mod II çatlak ilerlemesinin inceleyebildiği ve çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan kırılma enerjisinin hesaplanabildiği bir deneydir. Üç nokta eğme deney şartları ile aynı sınır şartları kullanılır. Kayıcı masnetler arasına yerleştirilen yapıştırma bağlantısının tam orta noktasından, yapıştırma bağlantısını eğmeye zorlayacak yük uygulanır. Deney sırasında meydana gelen çatlak ilerlemesi mod II çatlak ilerlemesidir. Çentikli eğme deneyi şekil 3.6 da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Çentikli eğme deney geometrisi [46]

Çentikli eğme deney dataları kullanılarak mod II kırılma enerjisi hesaplanırken, komplians ifadesinin çatlak uzunluğuna göre kısmi türevi alınır. Buna göre mod II kırılma enerji ifadesi [46];

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2b} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (3.36)$$

şeklindedir. Mod II çatlak ilerlemesinde ki komplians değeri;

$$C = \frac{2L^3 + 3a^3}{8Eb^3} \left[1 + \frac{2(1.2L + 0.9a)h^2E}{(2L^3 + 3a^3)G_{13}} \right] \quad (3.37)$$

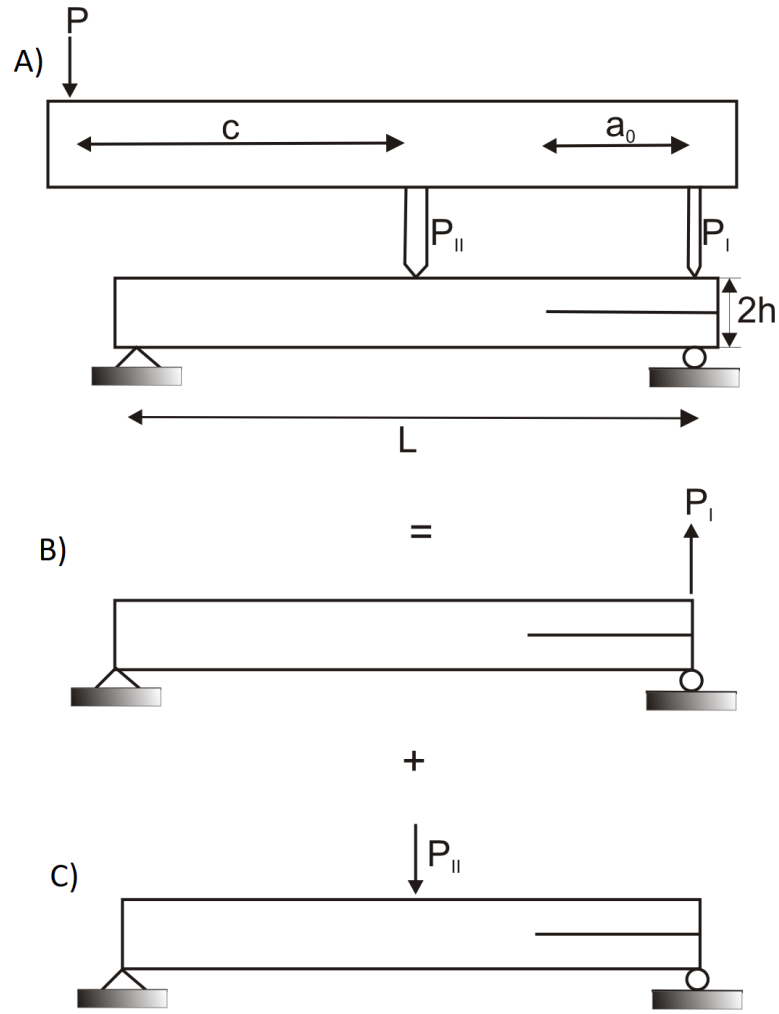
dir. Burada G_{13} xz düzleminde ki kayma modülüdür. Denklem 3.37, denklem 3.36 da yerine konulur ve türev işlemi gerçekleştirilirse, kırılma enerji değeri;

$$G_{IIc} = \frac{9a^2 + P^2}{16Eb^2h^3} \left[1 + 0.2(E/G_{13})(h/a)^2 \right] \quad (3.38)$$

elde edilir [46].

3.4.3 Karışık Mod Eğme Deneyi (KME)

Karışık mod eğme deneyi, yapıştırma bağlantısında yükleme sonucunda ortaya çıkan çatlak ilerlemesinin hem kayma hem de normal kuvvet etkisi altında incelenebildiği bir deney düzeneğidir. Teorik olarak, çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan kırılma enerjisi çift ankastre kiriş ve çentikli eğme deney kırılma enerjileri toplamına eşit olacaktır. Karışık mod eğme deney düzeneği şekil 3.7 de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Karışık mod eğme (A- KME deney düzeneği, B- ÇAK deney düzeneği, C-ÇE deney düzeneği) [47]

Şekil 3.7 de de görüldüğü gibi KME deney düzeneği ÇAK ve ÇE deney düzeneklerinin birleşimi şeklindedir. Bağlantı yapısına uygulanan yükleme ile P_I ve P_{II} yükleri meydana gelmektedir. P_I yükü bağlantı yapısında mod I çatlak ilerlemesine sebep olmaktadır. P_{II} yükü ise yapıştırma bağlantısında mod II çatlak ilerlemesine sebep olmaktadır. P_I ve P_{II} yüklerinin ortaya çıkardığı mod I ve mod II kırılma enerjileri kullanılarak karışık mod (mod III) için kırılma enerji formülasyonu çıkartılmıştır. Şekil 3.7 gösterilen P_I ve P_{II} yüklerini uygulanan P yükü cinsinden ifade edilecek olursa [47];

$$P_I = \frac{3c-L}{4L} P \quad (3.39)$$

$$P_{II} = \frac{c+L}{L} P \quad (3.40)$$

şeklindedir. KME için kırılma enerji değeri mod I ve mod II çatlak ilerlemesi sırasında ortaya çıkan kırılma enerjilerinin toplamına eşit olacağına göre ;

$$G_T = G_{III} = G_{IC} + G_{IIC} \quad (3.41)$$

dır. Mod I ve mod II kırılma enerji formülasyonlarını toplar ve P_I ve P_{II} ifadelerini de ekleyecek olursak, KME için kırılma enerji formülasyonu [47];

$$G_{III} = \frac{12P_I^2 a^2}{Eb^2 h^3} \left(1 + \frac{2h}{\zeta a} + \frac{h^2}{\zeta^2 a^2} + \frac{Eh^2}{10G_{12}a^2} \right) + \frac{9P_{II}^2 a^2}{16Eb^2 h^3} \left(1 + \frac{Eh^2}{5G_{12}a^2} \right) \quad (3.42)$$

şeklinde elde edilir. Burada ζ çatlak içermeyen yapıştırma bağlantısının elastik deformasyonunu ifade eder.

BÖLÜM 4

DENEYSEL YAKLAŞIM

Doktora tezinde, yapıştırıcılarda meydana gelebilecek hasarların, kendi-kendini onarabilmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple, Bölüm 2 de detaylı olarak açıklanan kendi-kendini onarma yöntemlerinden Termoplastik-Takviyeli onarma yöntemi, bu tez çalışmasında kullanılacaktır. Termoplastik-takviyeli onarma yönteminin kullanılmasının temel sebebi, sıcaklık altında polimerleşen termoplastik partiküller sayesinde onarma işleminin birden fazla gerçekleşebilecek olmasıdır. Buda maliyet açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Termoplastik-takviyeli onarma mekanizmasının deneysel yaklaşımı bu bölümde irdelenecektir. Deneysel yaklaşım üç kısımdan oluşacaktır. Birinci kısımda deneylerde kullanılacak malzeme ve cihazlar tanıtılacaktır. İkinci kısım deney koşullarının ve termoplastik malzemenin yapıştırıcılar üzerindeki etkisinin belirleneceği ön hazırlık bölümü olacaktır. Üçüncü kısım ise onarma deneylerinin kapsamlı anlatıldığı ve sonuçlarının değerlendirildiği yöntem ve sonuç bölümü olacaktır.

4.1 Malzeme ve Cihazlar

Termoplastik-takviyeli onarma mekanizmasında onarma işlemi yapıştırma bağlantısı kullanılarak gerçekleştirilir. Yapıştırma bağlantılarının düzgün oluşturulabilmesi ve onarma mekanizmasının yüksek verimli olabilmesi için birçok cihaz ve malzeme kullanılması gerekmektedir. Termoplastik-takviyeli onarma mekanizması için kullanılan malzeme ve cihazlar sırasıyla, yapıştırma bağlantısında kullanılan levhalar, yapıştırıcılar, levhaların yüzey işlemlerinde kullanılan cihazlar, onarma malzemesi olarak kullanılan

termoplastik malzeme, yapıştırıcı ile termoplastik partiküllerin karıştırıldığı vakumlama cihazı, yapıştırma bağlantılarının oluşturulduğu kalıplar, termoplastik partiküllerin polimerleşmesi için kullanılan fırın ve fırın sıcaklığının kontrol edildiği termokupl, levhaların standart ölçülerde delinmesinde kullanılan matkap, onarma mekanizmasının test edileceği universal çekme cihazı, termoplastik malzemenin yapıştırıcı içerisinde dağılımının ve ergime durumunun gözlemleneceği taramalı elektron mikroskopudur. Bu bölüm kapsamında yukarıda listelenen malzeme ve cihazlar detaylı olarak açıklanacaktır.

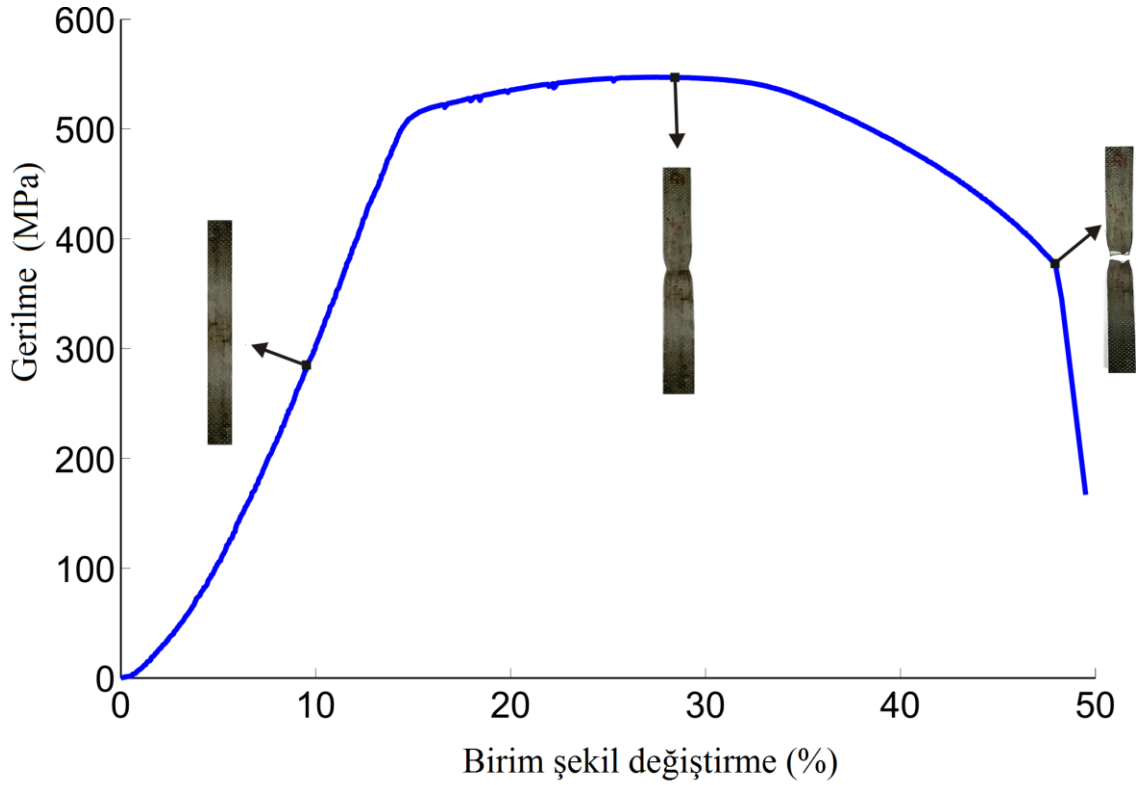
4.1.1 Levha

Yapıştırma bağlantısında levha malzemesi olarak St37 çelik malzeme kullanılmıştır. Soğuk çekme tekniği kullanılarak elde edilen St37 çeliği, düşük ve orta karbonlu çeliklere göre dayanımı ve sertliği daha yüksektir. Ayrıca ısı işlem görmüş çelik malzemesine göre yüzey kalitesi daha yüksektir [48]. Yapıştırma bağlantılarında kullanılacak levhalar istenilen ölçülerde hidrolik kesme makinesi yardımı ile kesilmiştir. Şekil 4.1 de deneylerde kullanılan levha görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.1 St 37 levha

Kesilen levhalar mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla çekme testine tabii tutulmuştur. Çekme testi sonucunda, St 37 çelik levhanın gerilme-birim şekil değiştirme grafiği elde edilerek, levhanın akma ve maksimum çekme dayanımları belirlenmiştir. Şekil 4.2 de levhanın çekme deneyi sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiği verilmektedir.



Şekil 4.2 St 37 çeliği gerilme–birim şekil değiştirme grafiği

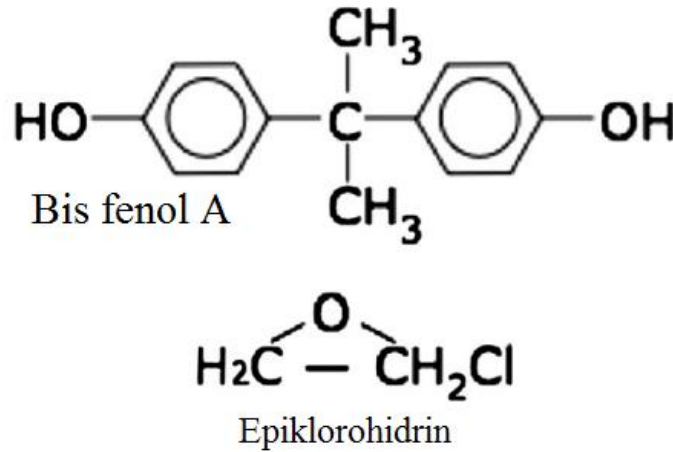
Şekil 4.2 de görüldüğü gibi St 37 soğuk haddelenmiş yapı çeliğinin akma gerilmesi yaklaşık olarak 480-500 MPa aralığında, maksimum çekme gerilmesi ise 510-550 MPa aralığındadır. Koptuğu anda ki gerilme değeri de yaklaşık 400 MPa civarındadır.

4.1.2 Yapıştırıcılar

Kendi-kendini onarma deneylerinde, yapıştırma bağlantısı için üç farklı yapıştırıcı kullanılacaktır. Deneyler de kullanılması düşünülen üç farklı yapıştırıcı sırasıyla, Araldite 2011, Araldite 2015 ve Araldite Av138m epoksi yapıştırıcılardır. Üç farklı yapıştırıcının kullanılmasının sebebi, termoplastik partiküllerin farklı mekanik özelliklere sahip yapıştırıcıların onarma verimine ve mekanik özelliklerine etkisini gözlemlemektir. Literatürde de belirtildiği üzere, Araldite 2011 sünek, Araldite 2015 orta sünek, Araldite Av138m ise gevrek yapıda bir epoksi yapıştırıcıdır.

Epoksi yapıştırıcıların kimyasal yapısı ve kimyasal yapısını oluşturan elementlerin bilinmesi önemlidir. Deneylerde kullanılması planlanan epoksi yapıştırıcılar, DGBEA (Diglycidyl Ether of Bisphenol A) kimyasal yapısına sahip yapıştırıcılardır. DGBEA

kimyasal yapısında epiklorohidrin bileşiği katalizör görevi görmektedir. Epoksi yapıştırıcılar, kimyasal yapılarında bulunan karbon (C), hidrojen(H) ve oksijen (O) elementleri ile kovalent bağ kurarak çapraz bağ sistemi oluştururlar. Şekil 4.3 de DGBEA kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.3 DGBEA kimyasal yapısı [49]

Deneylerde kullanılacak yapıştırıcılardan Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısı, tiksotropik ve çift komponentli bir yapıştırıcıdır. Çelik, odun, seramik vb malzemelerinin birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Yüksek kayma ve soyulma gerilmesine sahip sünek bir yapıştırıcıdır. Statik ve dinamik yüklere karşı direnci yüksektir. Farklı kürleşme sıcaklıklarına ait kürleşme zaman değerleri yapıştırıcının teknik tablosunda yer almaktadır[52]. Buna göre 23 (oda sıcaklığı) ,40,60,100,120⁰C kürleşme sıcaklıklarına karşılık gelen kürleşme zamanları sırasıyla 7 saat, 2 saat,30 dakika,6 dakika,4 dakikadır.

Araldite 2015 epoksi esaslı, çift komponentli bir yapıştırıcıdır. Kompozit malzemelerden cam fiber(fiber glass) malzemesinin üretimde kullanılır. 10 mm yapıştırma kalınlığına kadar etkin bir şekilde kullanılabilir. Yüksek kayma ve soyulma gerilmesine sahiptir. Farklı kürleşme sıcaklıklarına ait kürleşme zaman değerleri yapıştırıcının teknik tablosunda yer almaktadır[53]. Buna göre 23 (oda sıcaklığı) ,40,60,100,120⁰C kürleşme sıcaklıklarına karşılık gelen kürleşme zamanları sırasıyla 6 saat, 2 saat,35 dakika,7 dakika,5 dakikadır.

Araldite Av138M epoksi esaslı, tiksotropik ve çift komponentli bir yapıştırıcıdır. Av138M epoksi yapıştırıcısı reçine ve HV998 sertleştiricinin 100/40 oranında homojen olarak karıştırılması sonucunda kullanılabilir. Çalışma sıcaklık aralığı 5-120⁰C dir. Kimyasal dayanımı oldukça yüksektir. Farklı kürleşme sıcaklıklarına ait kürleşme zaman değerleri yapıştırıcının teknik tablosunda yer almaktadır[54]. Buna göre 23 (oda sıcaklığı) ,40,60,100,120⁰C kürleşme sıcaklıklarına karşılık gelen kürleşme zamanları sırasıyla 24 saat, 16 saat,1 saat,10 dakika,7 dakikadır.

Deneylerde kullanılacak üç yapıştırıcının mekanik özellikleri çizelge 4.1 de detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca, deneyde kullanılacak yapıştırıcılar şekil 4.4 de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 Yapıştırıcıların mekanik özellikleri [50-55].

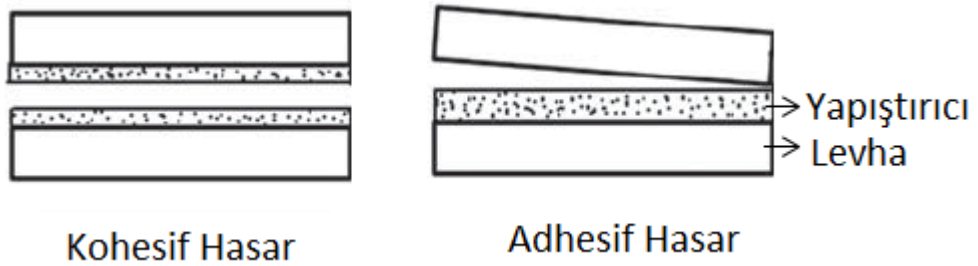
Özellik	Araldite 2011	Araldite 2015	Araldite Av138m
Elastisite Modülü (GPa)	1.6±0.18	1.85±0.21	4.89±0.81
Poisson oranı	0.41	0.33	0.35
Çekme akma gerilmesi (MPa)	30	12.63±0.61	36.49±2.47
Çekme hasar gerilmesi (MPa)	33	21.63±1.61	39.45±3.18
Kayma modülü (GPa)	0.58±0.2	0.56±0.21	1.56±0.01
Mod I kırılma enerjisi (N/mm)	0.531±0.03	0.526±0.02	0.346



Şekil 4.4 Deneyde kullanılan yapıştırıcılar.

4.1.3 Kumlama Cihazı

Yapıştırma bağlantılarında, uygulanan yükün tam olarak yapıştırıcıya iletilmesi, yapıştırıcının mukavemet ve kırılma değerlerinin belirlenmesinde son derece önemlidir. Yapıştırma bağlantılarında yükün tam olarak iletilmediği durumlarda, levha yüzeylerinde adhesif hasar görülürken, yükün tam iletilildiği durumlarda ise kohesif hasar görülmektedir. Şekil 4.5 de adhesif ve kohesif hasar gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Yapıştırma bağlantısı hasar türleri[56]

Şekil 4.5 de görüldüğü üzere, adhesif hasarda, yapıştırıcı tek bir levha üzerinde kalırken, kohesif hasar da yapıştırıcı her iki levha yüzeyinde de yer almaktadır. Yapıştırıcının her iki levha yüzeyinde, eşit dağılımda yer alması, uygulanan yükün tam olarak yapıştırıcıya iletilmesi halinde gerçekleşmektedir. Levha yüzeylerinde kohesif hasarın elde edilebilmesi için yapıştırıcı ile levha yüzeleri arasında oluşturulacak yapışma

dayanımının yüksek olması gerekmektedir. Yüksek yapışma dayanımı içinde levha yüzeylerinin pürüzlendirilmesi gerekmektedir. Levha yüzeylerinin pürüzlendirilmesi işleminde kumlama cihazı kullanılacaktır. Kumlama cihazında, tane büyüklüğü 300-425 µm ölçülerinde olan, siyah silisyum karbür aşındırıcı kum kullanılacaktır. Kumlama cihazının basıncı, 500 litre kapasiteli çift pistonlu kompresör tarafından karşılanacaktır. Ayrıca, kumlama cihazı üzerinde yer alan şartlandırıcı kullanılarak kumlama basıncı ayarlanabilmektedir. Kumlama işlemi kabin içerisinde yer alan kumlama nozulu ile gerçekleştirilecektir. Kumlama işlemi levha yüzeyleri mat bir yapıya ulaşana kadar devam ettirilecektir. Kumlama cihazı ve kompresör şekil 4.6 da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Kumlama cihazı ve kompresör

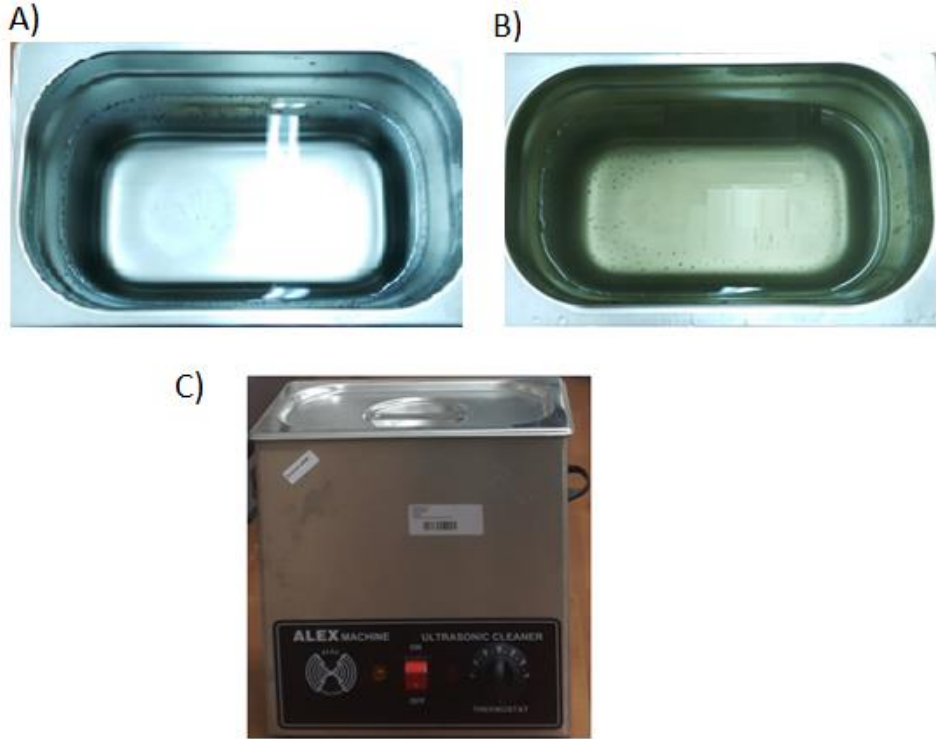
Kumlama işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen levha yüzeyleri şekil 4.7 de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Kumlama işlemi sonrası levha yüzeyleri

4.1.4 Ultrasonik Temizleme Cihazı

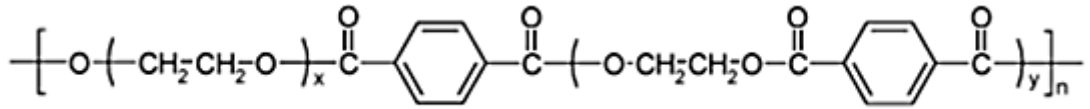
Kumlama işlemi sonrasında yüzeyleri pürüzlendirilen levhaların, kumlama işlemi esnasında oluşan kir ve tozdan mutlaka arındırılması gerekmektedir. Saf aseton kullanılarak silinen levha yüzeylerinde istenilen düzeyde temizliğin olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, yüzeylerin kir ve tozdan tamamen arındırılabilmesi için ultrasonik temizleme cihazı kullanılmıştır. Kumlama işleminden sonra yüzeyi pürüzlendirilmiş levhalar, içi aseton ile doldurulmuş ultrasonik yıkama kabini içerisine yerleştirilerek, 10 dk süre ile işleme tabi tutulmuştur. Ultrasonik yıkama cihazı, yüksek frekanslı ses dalgaları ile içi aseton dolu yıkama tankını titreştirerek levha yüzeylerinin temizlenmesini sağlamaktadır. Ayrıca, cihaz üzerinde yer alan termostat ile istenilen sıcak altında da yüzey temizleme işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 4.8 de ultrasonik yıkama öncesi ve sonrasında yıkama tankının görüntüsü ve ultrasonik yıkama cihazı gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Ultrasonik Yıkama (A-Yıkama öncesi aseton dolu tank haznesi, B- Yıkama sonrası aseton dolu tank haznesi, C- Yıkama cihazı)

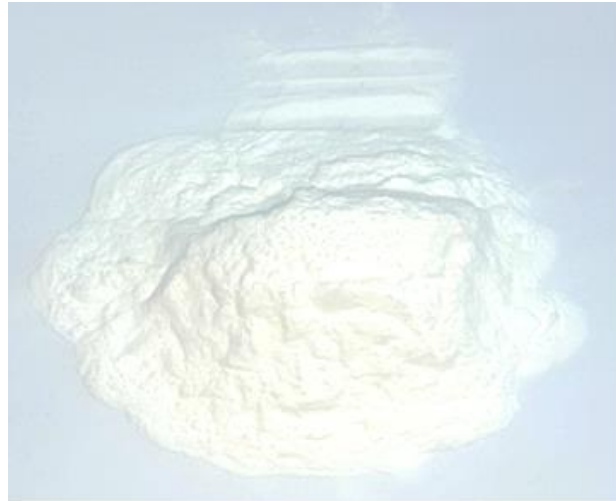
4.1.5 Termoplastik malzeme

Deneyde kullanılan yapıştırma bağlantılarının dışarıdan müdahale olmaksızın kendi kendini onarma sürecinde onarma elamanı olarak termoplastik malzeme kullanılmıştır. Termoplastik malzeme için, literatürde onarma malzemesi olarak kullanılan ko-polyester termoplastik malzeme seçilmiştir. Karmaşık kimyasal bağ yapısına sahip ko-polyester, dimetil tereftalat, 1,4-bütandiol, 2-bütün-1,4-diol ve bir -hidro-w-hidroksipoli (oksietilen) bileşiklerinden türetilmiştir[57]. Ko-polyester termoplastik malzemesinin kimyasal bağ yapısı şekil 4.9 da gösterilmektedir.



Şekil 4.9 Ko-polyester kimyasal yapısı[57]

Deneylerde ko-polyester malzemesi, yapıştırıcı ile homojen karıştırılabilmesi için 80 mikron büyüklüğünde kullanılmıştır. Schaetti firması tarafından üretilen, sertliği ve ısıl direci yüksek ko-polyester termoplastik malzeme şekil 4.10 da gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Ko-polyester termoplastik malzeme

Ayrıca, ko-polyester termoplastik malzemenin fiziksel özellikleri detaylı olarak çizelge 4.2 de verilmektedir[58,59].

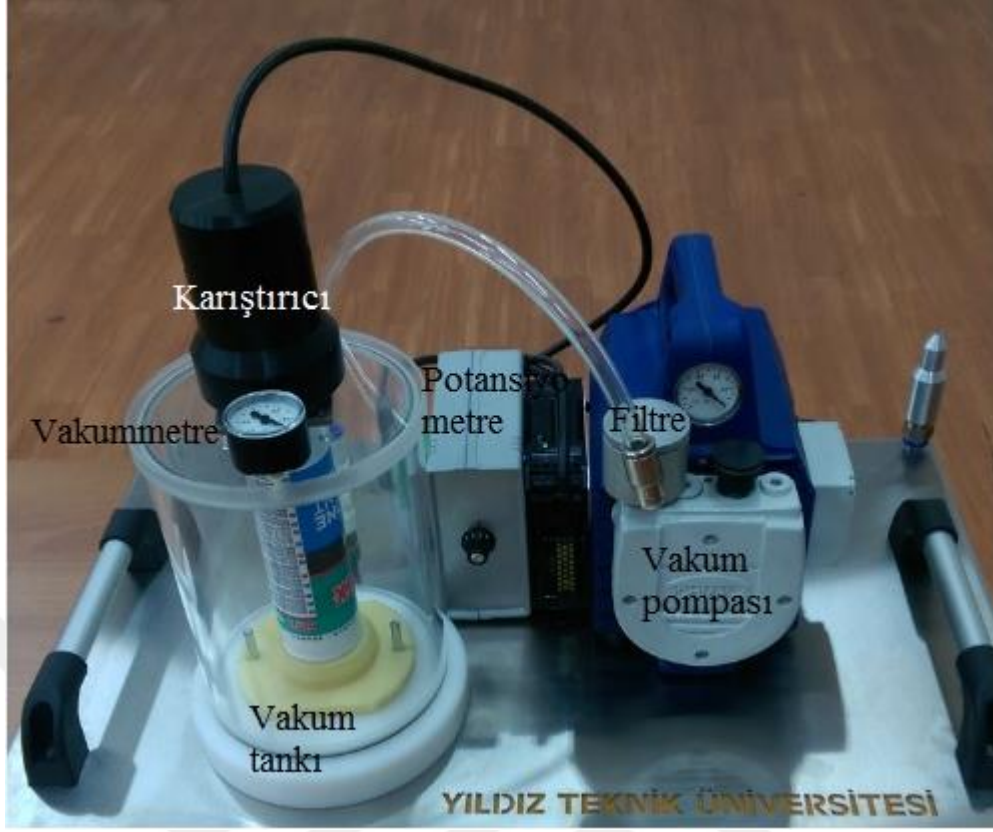
Çizelge 4.2 Kopolyester fiziksel özellikler [50,60]

Özellik	Schaetti ko-polyester
Erime noktası (°C)	109-119
Sertlik (Shore)	D70
Yoğunluk (g/cm ³)	1.29
Partikül büyüklüğü (mikron)	80

4.1.6 Vakumlama Cihazı

Bünyesel kusurlara karşı hassasiyeti yüksek olan gevrek ve sünek yapıştırıcıların hazırlanmasında, yapı içerisinde mevcut veya yapıştırıcı bileşenlerinin (reçine, sertleştirici ve termoplastik parçacık) karıştırılması esnasında oluşan hava boşluklarının engellenmesi amacıyla, vakum ortamında karıştırma (VOK) yöntemi kullanılacaktır.

Vakum ortamında karıştırma sistemi sırasıyla vakum tankı, yapıştırıcının karıştırılacağı plastik kap, DC motor, karıştırıcı uç, potansiyometre, vakummetre, filtre, vana, vakum pompası ve karıştırma kabında bulunan hava tahliye sibobu elemanlarından oluşmaktadır. Kullanılacak vakum pompasının kapasitesi 850mbar dır. Ayrıca vakum tankı ile vakum pompası arasında bulunan vana ile vakum ortamı istenilen basınçta sabit tutulabilecektir. Karıştırma ünitesinde yer alan potansiyometre ile vakum altında istenilen devirde karıştırma işlemi yapabilecektir. Vakumlama sitemi şekil 4.11 de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Vakumla cihazı

4.1.7 Kalıplar

Deneylerde, yapıştırma bağlantısının üzerine yük uygulanması esnasında, levhaların yanal olarak kaydığı gözlemlenmiştir. Bu olumsuzluğun giderilmesi için, yapıştırma işlemi sırasında ve kürleşme süresince, yapıştırma bağlantısının sabitlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple, deneyde kullanılan yapıştırma bağlantıları özel hazırlanmış kalıplar kullanılarak elde edilmiştir. Yapıştırma bağlantısının dışında, yapıştırıcının termoplastik takviyeli-takviyesiz halinden üretilen çekme numuneleri için de özel kalıp kullanılmıştır.

4.1.7.1 Yapıştırma Bağlantı Kalıbı

Yapıştırma bağlantı kalıbında, boyu 300 mm, genişliği 100 mm ve kalınlığı 10 mm olan iki tane karbon çeliği (CK45) kullanılmıştır. Kalıp üzerine yanal kaymanın önlenmesi amacı ile 23 adet destek pimi eklenmiştir. Destek pimleri arasındaki mesafe yapıştırma bağlantısında kullanılacak levhaların girebileceği kadardır. Yapıştırma bağlantı kalıbında

3 adet ayarlama pimi kullanılmıştır. Böylelikle farklı levha uzunlukları ile de kalıp etkin bir biçimde kullanılabilir. Alt kalıpta 4 adet sabitleme pimi kullanılmıştır. Sabitleme pimleri, kalıp kapatılmasından sonra oluşabilecek kaymaları engellemek içindir. Yapıştırma bağlantıları kalıp içerisine yerleştirilmeden önce kalıba, kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Şekil 4.12 de yapıştırma bağlantı kalıbı gösterilmektedir.

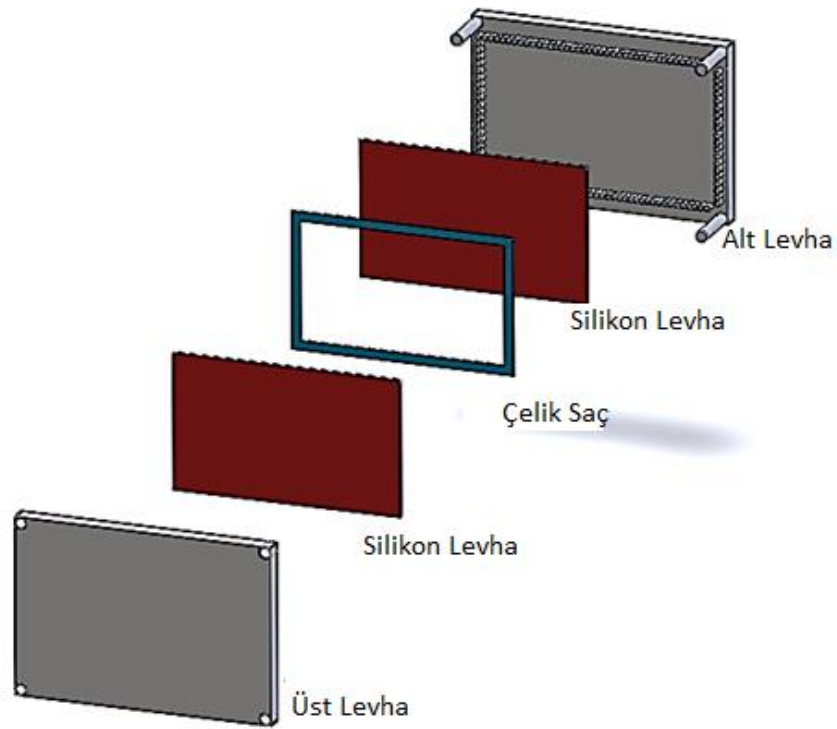


Şekil 4.12 Yapıştırma Bağlantı Kalıbı

4.1.7.2 Yapıştırıcı Kürleşme Kalıbı

Tez çalışmasının amaçlarından biri de, yapıştırıcıya eklenen termoplastik partiküllerin yapıştırıcının mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılmasıdır. Bu sebeple, yapıştırıcının termoplastik takviyeli-takviyesiz halinden çekme numuneleri elde edilecektir. Yapıştırıcıdan çekme numuneleri elde edilebilmesi için yapıştırıcılar özel bir kalıp içerisine dökülerek, plaka halinde kürleştirilmiştir. Kürleşme kalıbı, 250 mm boyunda, 200 mm genişliğinde ve 20 mm kalınlığında iki adet susuz karbon çeliği (CK45) levhadan, 4 adet merkezleme ve 4 adet destek piminden, bir adet yapıştırıcı

plakaların oluşturulacağı, 170 mm boyunda, 120 mm genişliğinde, 2 mm kalınlığında çelik saçtan meydana gelmektedir. Kalıbın kullanımı sırasında ilk olarak, 20 mm kalınlığındaki alt levhanın üstüne 3 mm kalınlığında silikon levha konulacaktır. Silikon levha kullanılmasının sebebi, yapıştırıcının silikon yüzeye yapışmamasından dolayıdır. Silikon levha üzerine 2 mm kalınlığında çelik saç konulacaktır. Yapıştırıcı bu çelik saç içerisine dökülerek, üzerine ikinci silikon levha yerleştirilecektir. Kalıp içerisinde yer alan merkezleme ve destek pimleri kullanılarak çelik saçın ve silikon levhaların yanıl kaymaları engellenecektir. En son aşamada, kalıp kapatılarak, kalıp üzerinde yer alan sıkıştırma pimleri ile kalıp sıkıştırılacak ve yapıştırıcının kürleşmesi için bekletilecektir. Solidworks® tasarım programında tasarlanan kürleşme kalıp görüntüsü şekil 4.13 de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Yapıştırıcı Kürleşme Kalıbı

4.1.8 Fırın

Deneylerde, yapıştırıcı içerisine eklenecek termoplastik partiküllerin, sıcaklık altında polimerleşebilmesi için hava sterilizatörlü fırın kullanılacaktır. Deneyde kullanılacak olan fırının çalışma sıcaklık aralığı, termoplastik partiküllerin ergime sıcaklığının

üstünde olması gerekmektedir. Bu sebeple, deneylerde çalışma sıcaklığı 5-250°C olan ve iç hacmi 120 litre olan fırın kullanılacaktır. Ayrıca fırın üzerinde yer alan PID mikro işlemcili kontrol ünitesi sayesinde fırın istenilen sıcaklıkta ve zamanda çalıştırılabilmektedir. Şekil 4.14 de hava sterilizatörlü fırın görülmektedir.



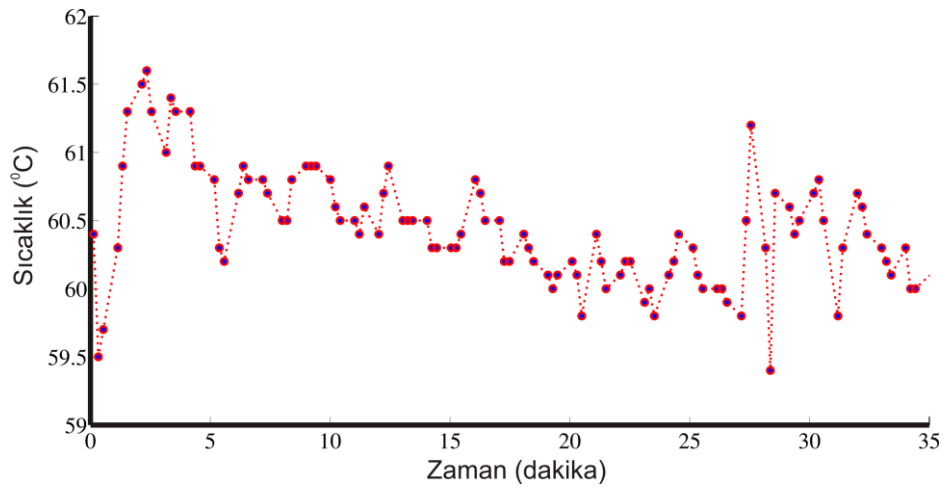
Şekil 4.14 Hava sterilizatörlü fırın

Fırın sıcaklığı ile fırın içerisinde kürleştirilen yapıştırıcı sıcaklığı arasında ki fark, dijital sıcaklık ölçüm cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Ölçüm cihazında bulunan termokupllar fırın içerisinde kürleştirilen yapıştırıcı kalıbına bağlanarak sıcaklık farklılığı kaydedilmiştir. Şekil 4.15 te deneylerde kullanılan sıcaklık ölçüm cihazı ve termokupl görülmektedir.



Şekil 4.15 Dijital sıcaklık ölçer ve termokupl

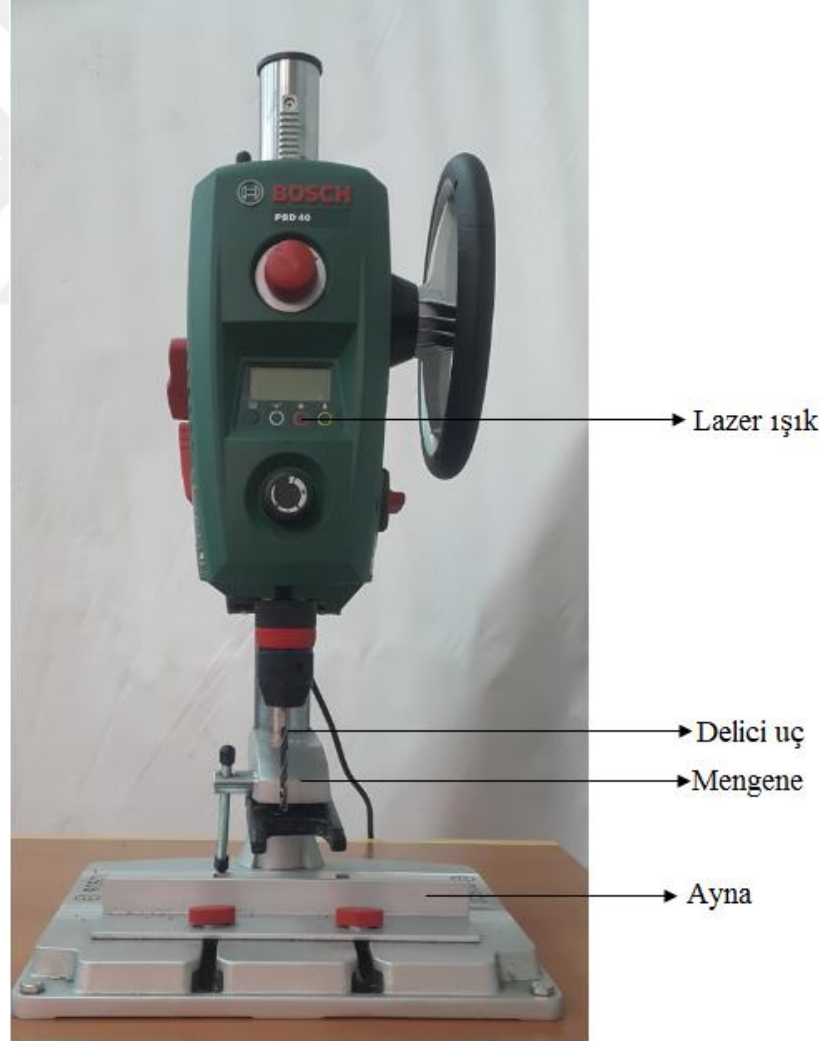
Ayrıca yapıştırıcıların kürleşme sıcaklıkları ve zamanları da dijital ölçüm cihazı kullanılarak kaydedilebilmektedir. Deneyde kullanılan üç yapıştırıcının da kürleşme sıcaklık zaman grafikleri dijital sıcaklık ölçme cihazı ile elde edilmiştir. Örnek olarak, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının 60°C de 35 dakika fırın içerisinde kürleşmesinin sıcaklık zaman grafiği şekil 4.16 de gösterilmektedir.



Şekil 4.16 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının 60°C deki kürleşme sıcaklık- zaman grafiği

4.1.9 AK numune deliklerinin hazırlanması

Deneylerde kullanılan yapıştırma bağlantıları ASTM 3433-99 standartına [59] göre hazırlanmıştır. Standartta alt ve üst levhada 6 mm çapında delikler bulunmaktadır. Levhalarda bulunan bu delikler çekme cihazının çenesine bağlanarak deney gerçekleştirilecektir. Levhalar, 2000 rev/dak dönme hızlı, delme çapı elik malzemede maksimum 13mm olan, 710 W gücünde tezgah tipi matkap kullanılarak delinmiştir. Ayrıca, levhada bulunan deliklerin birbirine simetrik ve eş merkezli olması son derece önemlidir. Matkap üzerinde yer alan mengene, ayna ve delme takip lazer ışığı sayesinde levhaların eş merkezli delinmesi sağlanmıştır. Şekil 4.17 de deneyde kullanılan matkap görülmektedir.

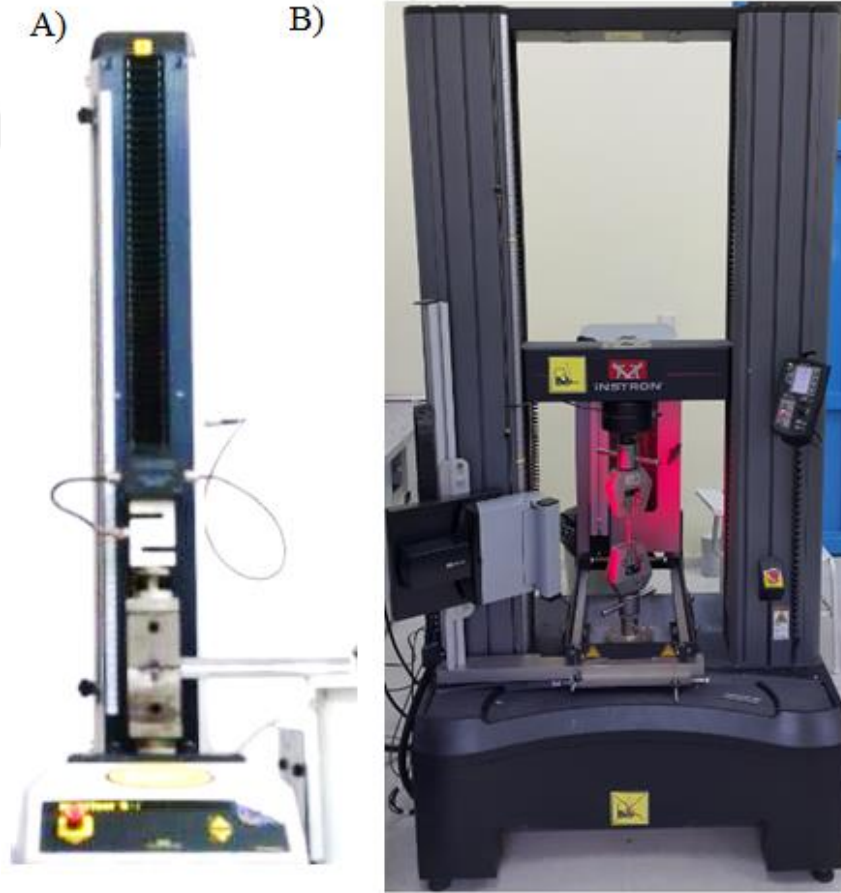


Şekil 4.17 Tezgah tipi matkap

4.1.10 Universal Çekme Cihazı

Yapıştırma bağlantılarında oluşacak hasarın, kendi-kendini onarma verimi çekme deneyi sonunda elde edilecek yük deplasman verileri kullanılarak hesaplanacaktır. Bu sebeple, yapıştırma bağlantısının çekme deneyleri, üzerinde yük hücresi bulunan, 5KN maksimum yük taşıma kapasiteli, programlanabilen arayüzü sayesinde çevrimli ve çevrimsiz yük uygulanabilen, tek sütunlu Mecmesin universal test cihazında yapılacaktır.

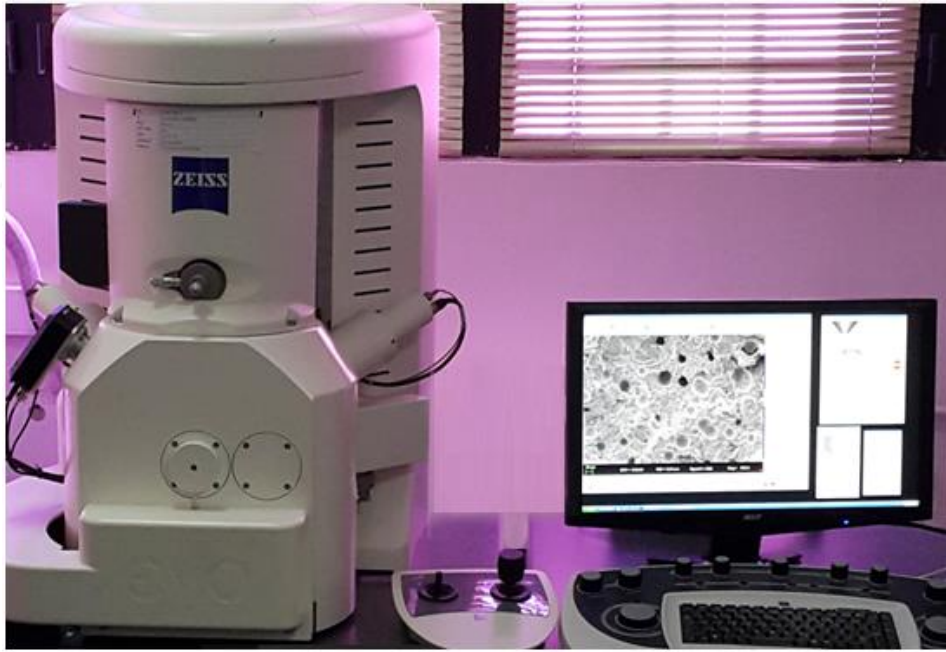
Ayrıca, termoplastik takviyesinin yapıştırıcıların mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, yapıştırıcılardan elde edilen çekme numuneleri, 80KN maksimum yük taşıma kapasiteli, üzerinde yer alan videoeksansometre sayesinde gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerinin elde edilebildiği, çift sütunlu Instron 5982 universal çekme cihazında test edilecektir. Deneylerde kullanılan çekme cihazları şekil 4.18 de gösterilmiştir.



4.18 Universal Çekme cihazları (a-Mecmesin, B-Instron 5982)

4.1.11 Taramalı Elektro Miskroskop

Deneyde kullanılan yapıştırıcıların kendi-kendini onarma veriminin yüksek olabilmesi için yapıştırıcı içerisine eklenen termoplastik partiküllerin homojen dağılması ve ergiyerek polimerleşmesi gerekmektedir. Tez kapsamında, yapıştırıcı içerisinde ki termoplastik partiküllerin ergimesi ve homojen dağılımı taramalı elektro mikroskop (TEM) yardımı ile incelenecektir. TEM cihazının çalışma prensibi, vakumlu bir ortam altında, incelenecek olan örneğe elektron göndermek ve bu işlem sonrası cisimden saçılan elektronları toplayarak ekrana görüntüyü yansıtmaktır. Gönderilen elektron sayısı büyütme derecesi arttıkça fazlalaşır. Fazla elektron gönderimi numunenin yanmasına neden olabilir. Bu sebeple, analize başlamadan önce numuneler altın ve paladyum kullanılarak kaplanır. Şekil 4.19 da deneylerde kullanılan TEM cihazı gösterilmektedir.



4.19 Taramalı elektro mikroskop cihazı (TEM)

4.1.12 Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi

Yapıştırıcıların kürleşme sıcaklıkları belirlenirken mutlaka camsı geçiş sıcaklıklarının da belirlenmesi gerekmektedir. Camsı geçiş sıcaklığının üstünde kürleştirilen yapıştırıcıların mekaniksel özelliklerinde ciddi oranda düşme görülmektedir. Bu sebeple, deneyde kullanılan üç farklı yapıştırıcı içinde kürleşme sıcaklıklarına ait camsı geçiş sıcaklıkları belirlenmiştir. Ayrıca, yapıştırıcı içerisine eklenecek olan termoplastik partiküllerin, yapıştırıcının camsı geçiş sıcaklığına etkisi de incelenmiştir.

Camsı geçiş sıcaklığının belirlenmesinde birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar, Diferansiyel Tarama Kalorimetri, Dinamik Mekaniksel Analiz, Termo Mekaniksel Analizdir. Bu yöntemler içerisinde yaygın olarak kullanılan yöntem diferansiyel tarama kalorimetri (DTK) yöntemidir. Bu tez kapsamında camsı geçiş sıcaklığı belirlenirken diferansiyel tarama kalorimetri yöntemi kullanılacaktır. Bu yönteme ait cihaz (Pyris 6 DSC) şekil 4.20 de gösterilmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı belirlenecek numuneler, şekilde gösterilen hazneden cihaza yerleştirilmektedir.



4.20 Diferansiyel Tarama Kalorimetri cihazı [60]

4.2 Deneysel Ön Hazırlık

Doktora tezinde, yapıştırma bağlantılarının kendi-kendini onarma mekanizması deneysel yaklaşım ile incelenecektir. Deneysel yaklaşıma geçmeden önce, deney koşullarının ve deneyi etkileyecek parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı, deneylerden önce ön hazırlık yapılarak, deneylerin en uygun koşullarda gerçekleştirilmesi sağlanacaktır. Ön hazırlık aşamasında ilk olarak, yapıştırma bağlantılarının onarma deneylerinde ki kürleşme sıcaklığı belirlenecektir.

4.2.1 Kürleşme Sıcaklığı (T_k)

Onarma deneylerinde kullanılacak olan yapıştırıcıların uygun kürleşme sıcaklığı ön hazırlık kısmında belirlenecektir. Bununla birlikte, deneyler de kullanılan yapıştırıcıların farklı kürleşme sıcaklıklarında ki davranışları da detaylı olarak bu bölümde irdelenecektir.

Yapıştırıcıların kürleşme sıcaklıkları belirlenirken, camsı geçiş sıcaklıklarının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu sebeple, ön hazırlık kapsamında, yapıştırıcıların camsı geçiş sıcaklıkları da belirlenecektir.

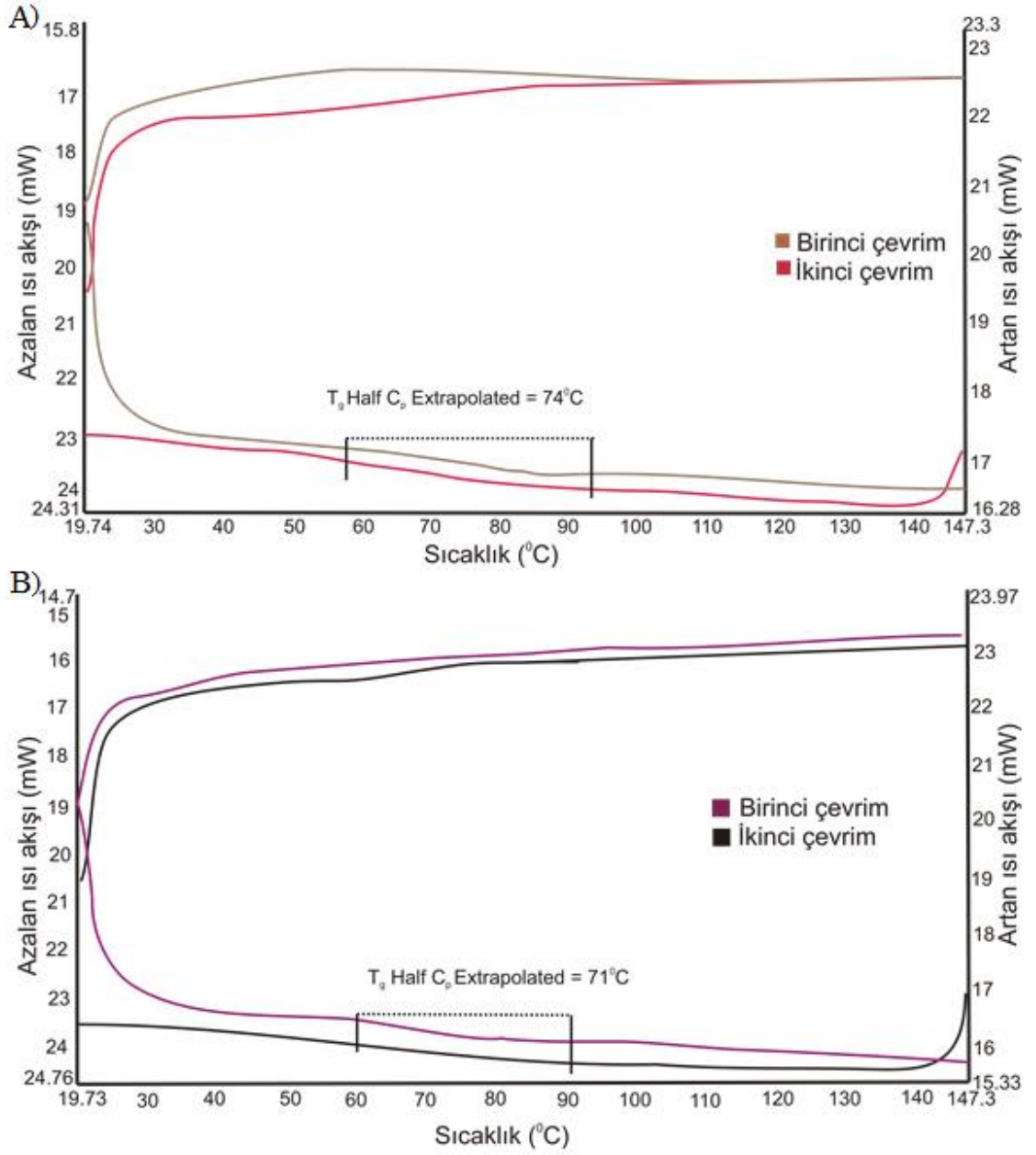
4.2.1.1 Camsı geçiş sıcaklığı (T_g)

Camsı geçiş sıcaklığı, malzemeler için önemli bir ayırt edici özelliktir. Camsı geçiş sıcaklığı, malzemelerin kimyasal veya fiziksel etki altında camsı özelliklerinin azalmaya, viskoz özelliklerinin artmaya başladığı sıcaklık değeridir. Polimerik malzemelerde, moleküler zincir yapısı, bağlar arasında meydana gelebilecek dallanma ve moleküler ağırlık camsı geçiş sıcaklığını etkileyen parametrelerdir. Genellikle, malzemelerin camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklık değerinden daha düşük olmaktadır [61].

Tez kapsamında farklı sıcaklıklarda kürleştirilen yapıştırıcıların camsı geçiş sıcaklıkları belirlenecektir. Deneysel çalışmalarda kullanılan Araldite 2011 ve Araldite Av138m epoksi yapıştırıcıların farklı kürleşme sıcaklıklarına ait camsı geçiş sıcaklık değerleri literatürde yer almaktadır. Carbas ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [62], Araldite 2011 ve Araldite Av138m epoksi yapıştırıcılarını sırasıyla 23, 40, 60, 80, 100, 120°C de kürleştirmiş ve herbir kürleşme sıcaklığına karşılık gelen camsı geçiş sıcaklığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte, literatürde, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının farklı

kürleşme sıcaklıklarında ki camı geçiş sıcaklık değerleri yer almamaktadır. Bu sebepten dolayı, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının farklı kürleşme sıcaklıklarında ki camı geçiş sıcaklıkları tez kapsamında belirlenecektir.

Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının farklı kürleşme sıcaklıklarına ait camı geçiş sıcaklık değerleri Diferansiyel Tarama Kalorimetri cihazı kullanılarak elde edilmiştir. DTK cihazı ile camı geçiş sıcaklığı belirlenirken, farklı sıcaklıklar da kürleştirilmiş yapıştırıcıdan 10 mg ağırlığı aşmayacak şekilde örnek numuneler alınmıştır. Bu numuneler DTK cihazına ait küçük alüminyum potalar içerisine yerleştirilerek, ölçümler yapılmıştır. DTK analizleri iki döngü halinde yapılmıştır. Numuneler iki kez ısıtılıp, iki kez soğutulmuştur. İki döngü halinde yapılmasının temel sebebi, hem soğutma hem ısıtma sırasında döngüde meydana gelen lineer değişim bölgesinin (**Step transition region**) net olarak belirlenebilmesi içindir. Her iki döngüde de numuneler cihaza yerleştirildikten sonra 150⁰C-200⁰C aralığına kadar ısıtılıp sonra oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Sıcaklığın artış ve azalışı kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Camı geçiş sıcaklığı hem soğutma hem ısıtma sırasında döngüde meydana gelen lineer değişim bölgesi esas alınarak hesaplanmıştır. Lineer bölge seçilerek cihaza tanımlatılmış ve orta noktası cihaz tarafından otomatik olarak belirlenerek, camı geçiş sıcaklık değeri hesaplanmıştır. Örnek olarak, Şekil 4.21 de, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının 60 ve 100 ⁰C kürleşme sıcaklığında ki DTK grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 4.21 Araldite 2015 camısı geçiş sıcaklığı grafiği (A-60°C kürleştirilen numune B-100°C de kürleştirilen numune)

Deneyde kullanılan yapıştırıcıların farklı kürleşme sıcaklıklarına ait camısı geçiş sıcaklıkları, çizelge 4.3 de gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 Yapıştırıcıların farklı kürleştirme sıcaklıklarına ait camsı geçiş sıcaklığı

Araldite 2011 [62]		Araldite 2015		Araldite Av138M [62]	
$T_{\text{Kürleşme}}$	$T_{\text{Camsı geçiş}}$	$T_{\text{Kürleşme}}$	$T_{\text{Camsı geçiş}}$	$T_{\text{Kürleşme}}$	$T_{\text{Camsı geçiş}}$
23 °C	64 °C	23°C	66°C	23 °C	77 °C
40 °C	66 °C	40°C	68°C	40°C	71 °C
60 °C	72 °C	60°C	74°C	60°C	81 °C
80 °C	70 °C	80°C	68°C	80°C	100 °C
100 °C	61 °C	100°C	71°C	100°C	105 °C
120 °C	58 °C	120°C	65°C	120°C	98 °C
SS =4.9°C					

Çizelge 4.3 de görüldüğü gibi, Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısında 60 °C kürleşme sıcaklığına kadar camsı geçiş sıcaklığı artış gösterirken, 60 °C kürleşme sıcaklığından sonra camsı geçiş sıcaklığında düşme görülmektedir. Ayrıca, maksimum camsı geçiş sıcaklığı da 60 °C kürleşme sıcaklığından elde edilmiştir. Benzer durum Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısı için 60 °C de, Araldite Av138M epoksi yapıştırıcısı içinse 100 °C de görülmektedir. Genelleme yapılacak olursa, kürleşme sıcaklığının artması ile beraber camsı geçiş sıcaklığı artarak, maksimum sıcaklık değerine gelir. Bu sıcaklık değerinden sonra kürleşme sıcaklığının artması ile beraber camsı geçiş sıcaklığında azalma başlar. Camsı geçiş sıcaklığının maksimum olduğu kürleşme sıcaklığı tam kürleşme camsı geçiş sıcaklığı olarak adlandırılmaktadır ($T_{g\infty}$). Araldite 2011 ve Araldite 2015 için 60 °C, Araldite Av138M içinse 100 °C tam kürleşme camsı geçiş sıcaklıklarıdır. Çizelge de görülen SS ifadesi standart sapma değerini göstermektedir. Standart sapma değeri referans [63] verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

Kürleşme esnasında ortaya çıkan faz değişimleri ve bu faz değişimlerinde yer alan camsı geçiş sıcaklık değerleri İzotermal Zaman-Sıcaklık-Geçiş diyagramında incelenmektedir.

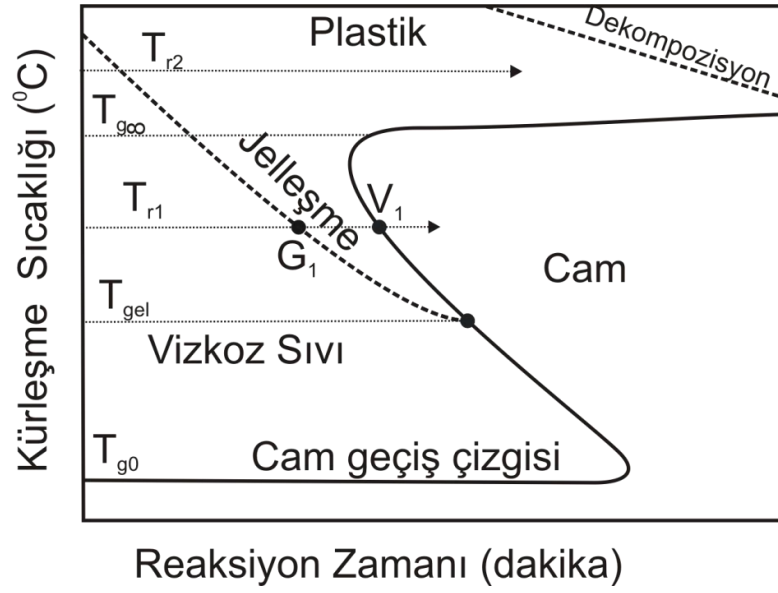
4.2.1.2 İzotermal Zaman-Sıcaklık-Geçiş diyagramı

Kürleşme esnasında, yapıştırıcıda meydana gelen fiziksel hal değişimlerini gösteren diyagrama izotermal zaman-sıcaklık-geçiş diyagramı adı verilir. Şekil 4.22' de izotermal zaman-sıcaklık-geçiş diyagramı gösterilmiştir. Diyagram üzerinde 'S' şeklinde camsı geçiş çizgisi görülmektedir.

Bu çizgi kürleşme esnasında ortaya çıkan hal değişimlerini birbirinden ayıran çizgidir. Diyagram üzerinde üç temel fiziksel hal değişimi söz konusudur. Bunlar jelleşme(gelation), vitrifikasyon (vitrification) ve kürleşmenin tamamen gerçekleştiği tam kürleşme hal durumudur. Camsı geçiş çizgisinin başlangıç sıcaklığı T_{g0} sıcaklığıdır. Bu sıcaklık aynı zamanda yapıştırıcının teknik özelliklerinde yer alan uygun koşullar altındaki saklama sıcaklığıdır[64].

Camsı geçiş çizgisinin altındaki alanda yapıştırıcı viskozitesi düşük, jelleşmenin olmadığı camsı bir yapıya sahiptir. Kürleşme sıcaklığı arttıkça yapıştırıcının camsı geçiş sıcaklığı da artarak, viskoz sıvı durumuna geçiş yapar. Vitrifikasyon noktası camsı geçiş sıcaklığının kürleşme sıcaklığına eşit olduğu noktadır. Bu noktaya kadar yapıştırıcının yapısında jelleşme olmaz. Yapıştırıcı viskoz sıvı durumdadır.

Diyagram üzerinde bu noktanın karşılık geldiği sıcaklık, jelleşme sıcaklığı (T_{gel}) olarak ifade edilir. Jelleşme sıcaklığı(T_{gel}) ile tam kürleşme sıcaklığı ($T_{g\infty}$) arasında, yapı önce viskoz sıvı durumundan visko elastik duruma, sonra plastik (rubber) ve en sonunda katı jel cam haline dönüşmektedir. Katı jel cam bölgenin üst sınırı olan ve ayrıca S eğrisinin bittiği sıcaklık tam kürleşme camsı geçiş sıcaklığı ($T_{g\infty}$) olarak ifade edilir. Kürleşme işlemi bu sıcaklık üzerinde devam ettirilirse yapıştırıcı belli bir zaman sonra bozulmaya uğrayacaktır. Bu kısım diyagramda dekompozisyon bölgesi olarak gösterilmiştir

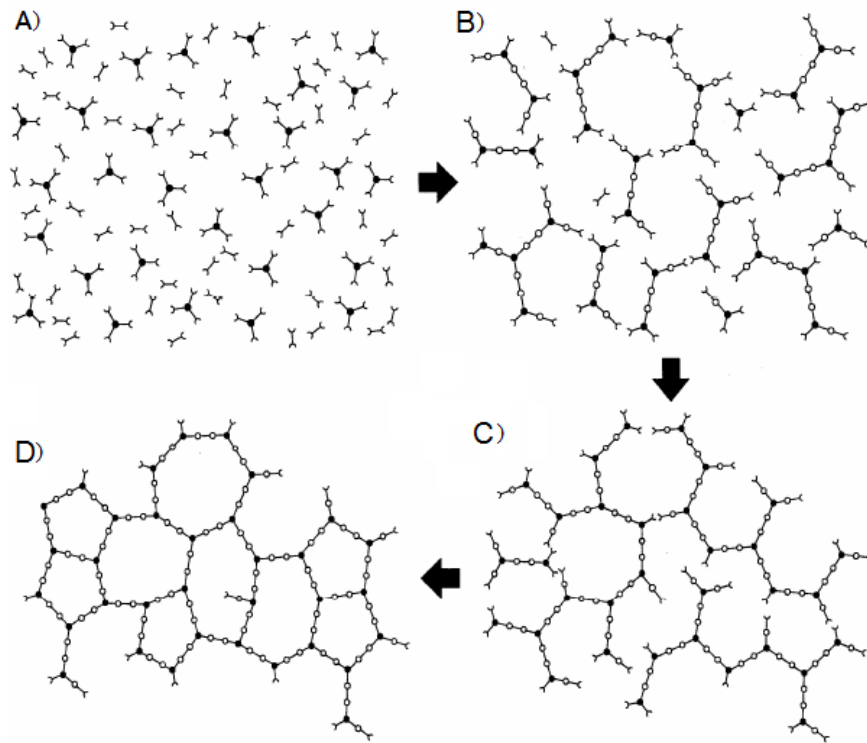


Şekil 4.22 Genelleştirilmiş İzotermal Sıcaklık Zaman Geçiş Diyagramı

İzotermal sıcaklık zaman geçiş diyagramının net bir şekilde anlaşılabilmesi amacıyla, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının kırleşme davranışı grafik üzerinde yorumlanmıştır. Diyagram üzerinde gösterilen T_{r1} sıcaklık çizgisi Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının 60°C de kırleşme esnasında ki hal değişimini, T_{r2} sıcaklık çizgisi ise Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının 100°C kırleşme esnasında ki hal değişimini göstermektedir. Diyagramda da görüldüğü gibi yapıştırıcı 60°C de vizkoz sıvı durumundadır. Kırleşme zamanı ilerledikçe, sıcaklık eğrisinin jelleşme eğrisi ile kesiştiği nokta olan G_1 noktasında yapıştırıcıda hal değişimi görülmeye başlanır. Yapı, vizkoz sıvıdan plastik (rubber) hale dönüşmeye başlar. Kırleşme zamanı devam ettikçe T_{r1} sıcaklık eğrisinin S eğrisini kestiği noktaya gelinir. Bu nokta vitrifikasyon noktasıdır(V_1). Bu noktada kırleşme sıcaklığı camsı geçiş sıcaklığına eşit olmaktadır. Bu noktadan sonra kırleşme zamanı ilerledikçe yapı katı jel camsı haline dönüşerek, tam kırleşme haline gelir. Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısı için Diferansiyel Tarama Kalorimetre cihazı kullanılarak yapılan analizde, tam kırleşme camsı geçiş sıcaklığı ($T_{g\infty}$) 74°C bulunmuştur (bakınız çizelge 4.3 & 4.4). T_{r1} kırleşme sıcaklığı, tam kırleşme camsı geçiş sıcaklığının altında bir değer olduğundan yapıştırıcının kırleşme esnasında ki hal değişimleri sırasıyla vizkoz sıvı, plastik bölge ve son olarak da cam jel katı hal olmaktadır. Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının T_{r2} kırleşme sıcaklığında ki durumu incelendiğinde başlangıçta yapıştırıcının vizkoz sıvı durumunda olduğu görülmektedir. T_{r2} sıcaklık eğrisinde hal

değişimi, vizkoz durumdan plastik bölgeye geçiş ile tamamlanır. T_{r2} kürleşme sıcaklığı tam kürleşme camsı geçiş sıcaklığının üstünde bir değer olduğundan, kürleşme zamanı arttırıldıkça, yapı bozulmaya(dekompozisyon) doğru gitmektedir.

İzotermal sıcaklık zaman geçiş diyagramında da görülen faz değişimleri sırasında yapıştırıcının moleküler yapısında ki değişim şekil 4.23 de gösterilmektedir. T_{g0} sıcaklığının altında, yapıştırıcı içerisinde serbest moleküller bulunmaktadır. Bu hal durumunda moleküller arasında bağ kurulmadığından polimerleşme olmaz. Ancak, moleküller bağ kurulmasına hazır durumda olduğu için bu hal durumu ön polimerleşme olarak adlandırılmaktadır(şekil A). Kürleşme sıcaklığı arttırıldıkça, yapıştırıcı viskoz sıvı hal durumuna geçer. Jelleşme noktasının altındaki bu hal durumunda moleküller birbirleriyle çapraz bağ (cross-linked) kurarak polimerleşme işlemine başlarlar(şekil B). Jelleşme noktasından sonra yapıştırıcı önce visko-elastik sonra plastik konuma geçer. Bu hal durumunda moleküller arasında kurulan çapraz bağ sayısı artar ancak polimerleşme tam olarak tamamlanmamıştır(şekil C). Vitrifikasyon noktasından sonra yapıştırıcı camsı katı jel hale geçer, tam kürleşme sıcaklığına ulaşarak, polimerleşme tamamlanır (şekil D).



Şekil 4.23 Kürleşme esnasında meydana gelen moleküler değişim[65]

Yapıştırıcının $T_{g\infty}$ sıcaklığının üstünde kürleştirilmesi, yapıştırıcının dekompoze olmasına ve moleküler bağlarının kopmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte, literatürde, $T_{g\infty}$ sıcaklığı üzerinde kürleştirilen yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin olumsuz etkilendiği belirtilmektedir[62]. Bu sebeple $T_{g\infty}$ sıcaklık değerinin yapıştırıcının mekanik özelliklerine etkisi tez kapsamında incelenmiştir.

4.2.1.3 Tam kürleşme camısı geçiş sıcaklığının yapıştırıcının mekanik özelliklerine etkisi

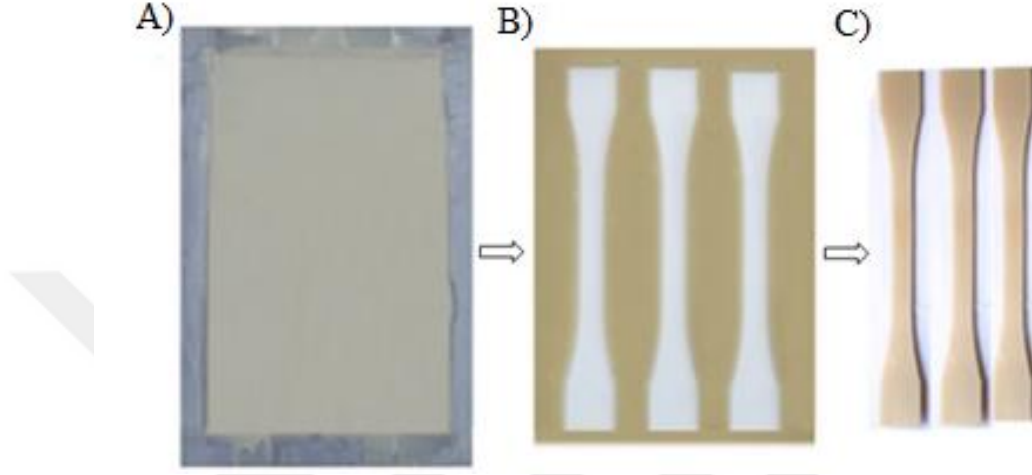
Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının tam kürleşme camısı geçiş sıcaklığı, çizelge 4.3 de 74°C olarak gösterilmektedir. $T_{g\infty}$ sıcaklık değerinin net olarak belirlenmesi yapıştırıcılar için son derece önemlidir. Bu yüzden, $T_{g\infty}$ sıcaklık değerinin tam olarak belirlenebilmesi amacı ile 60°C kürleşme sıcaklığının 10°C üstü ve altında yapıştırıcı kürleştirilerek, camısı geçiş sıcaklık değerlerine bakılmıştır. Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısının sırasıyla $50, 60$ ve 70°C kürleşme sıcaklıkları için elde edilen camısı geçiş sıcaklık değerleri çizelge 4.4 de gösterilmektedir.

Çizelge 4.4 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının farklı kürleşme sıcaklıklarına ait camısı geçiş sıcaklık değerleri [65]

Kürleşme ($^{\circ}\text{C}$)	T_g ($^{\circ}\text{C}$)
50	67
60	74
70	68

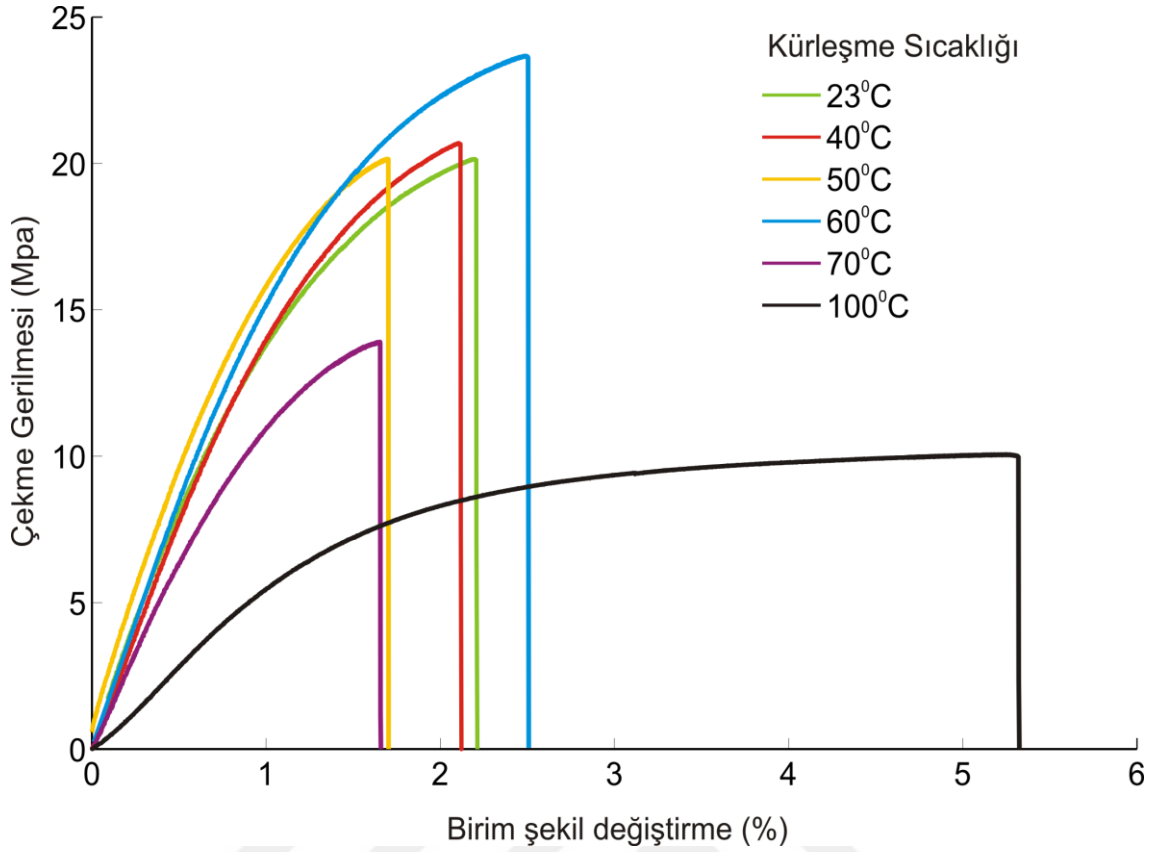
Çizelge 4.4 de açıkça görüldüğü üzere, 50°C kürleşme sıcaklığından, 60°C kürleşme sıcaklığına doğru camısı geçiş sıcaklığı artarken, 60°C kürleşme sıcaklığından, 70°C kürleşme sıcaklığına doğru ise camısı geçiş sıcaklığı azalmaktadır. Hem çizelge 4.3 hem de çizelge 4.4, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının $T_{g\infty}$ değerinin, 60°C kürleşme sıcaklığına karşılık gelen camısı geçiş sıcaklığı olduğunu net bir şekilde göstermektedir. $T_{g\infty}$ değeri tam olarak belirlendikten sonra, $T_{g\infty}$ sıcaklık değerinin yapıştırıcının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bunun için Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısından

çekme numuneleri (dog-bone) elde edilmiştir. Çekme numuneleri, yapıştırıcı kürleşme kalıbı (bkz şekil 4.13) kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4.24 de Araldite 2015 epoksi yapıştırıcıdan çekme numunelerinin elde edilişi gösterilmektedir. Yapıştırıcılardan çekme numunesinin elde edilişi ilerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılacaktır.



Şekil 4.24 Araldite 2015 çekme numunesinin elde edilişi (A- kürleşme kalıbı içerisinde ki yapıştırıcı, B- Kürleştirilmiş yapıştırıcı plakasına su jeli kesim işlemi uygulanması, C- Çekme numunesi)

Elde edilen çekme numuneleri 1 mm/dak çekme hızında test edilmiştir. Çekme cihazında yer alan video eksansometre sayesinde çekme numunelerinin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.25 de farklı kürleştirme sıcaklıklarından elde edilen Araldite 2015 çekme numunelerinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği görülmektedir.

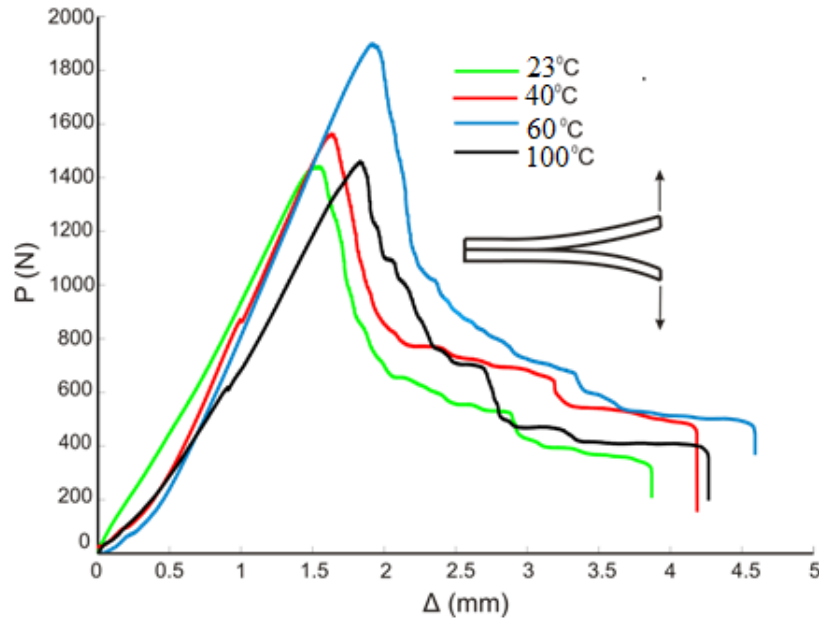


Şekil 4.25 Araldite 2015 gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

Şekil 4.25 de görüldüğü gibi, maksimum çekme gerilmesi 60 °C kürleşme sıcaklığında elde edilmektedir. Minimum çekme gerilmesi ise 100 °C kürleşme sıcaklığında elde edilmektedir. $T_{g\infty}$ sıcaklık değerinin elde edildiği 60 °C kürleşme sıcaklığından sonra, maksimum çekme gerilmesinde kürleşme sıcaklığının artması ile beraber azalma gözlemlenmektedir. Buda yapıştırıcı dayanımının azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, 100 °C kürleşme sıcaklığında yapıştırıcının sünek bir davranış gösterdiği de gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, gerek yapıştırıcıların moleküler yapısına gerekse de mekanik özelliklerine olumsuz etkisinden dolayı, yapıştırıcıların $T_{g\infty}$ sıcaklık değerinin üstünde kürleştirilmemesi gerekmektedir.

Deneysel ön hazırlık çalışmaları kapsamında, yapıştırma bağlantılarının $T_{g\infty}$ sıcaklık değerinin üstünde ve altında kürleştirilmesinin kırılma enerjisine etkisi de incelenmiştir. Örnek olarak, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı ve st 37 yapısal çelik levhadan oluşan yapıştırma bağlantısı, dört farklı kürleşme sıcaklığında (23,40,60,100°C) kürleştirilmiştir. Elde edilen yapıştırma bağlantıları Mecmesin deney cihazında test edilerek, yük-

deplasman grafiği elde edilmiştir. Deneyler sonunda elde edilen yük-deplasman grafiği, şekil 4.26 da gösterilmektedir.



4.26 Araldite 2015 farklı kürleşme sıcaklıkları ait yük-deplasman grafiği

Şekil 4.26 da görüldüğü üzere maksimum yük değeri 60°C kürleşme sıcaklığında elde edilirken, minimum yük değeri 100°C kürleşme sıcaklığında elde edilmektedir. Ayrıca $T_{g\infty}$ sıcaklığının elde edildiği 60°C kürleşme sıcaklığına kadar maksimum yük değerinde artış görülürken, 60°C kürleşme sıcaklığından sonra maksimum yük değerinde azalma görülmektedir. Deney sonunda elde edilen yük deplasman değerleri mod I kırılma enerji yöntemlerinden, modifiye kiriş teoremi, kompliyans kalibrasyon ve alan teoremlerinde (bkz bölüm 3) kullanılarak, farklı kürleşme sıcaklıklarının kırılma enerji değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.5 de Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının farklı kürleşme sıcaklık değerlerine ait kırılma enerjileri görülmektedir.

Çizelge 4.5 Araldite 2015 farklı kürleşme sıcaklıklarına ait kırılma enerji değerleri

Kürleşme (°C)	Deneysel G_{Ic} (N/mm)			
	MKT	KKT	AT	SD
23	0.500	0.510	0.543	0.022
40	0.705	0.710	0.767	0.034
60	0.789	0.795	0.863	0.041
100	0.544	0.554	0.635	0.049
SD	0.135	0.133	0.141	

Çizelge 4.5 de görüldüğü gibi, $T_{g\infty}$ sıcaklık değerinin altında kürleştirilen yapıştırıcıda kırılma enerjisi, kürleşme sıcaklığının artması ile beraber artış gösterirken, $T_{g\infty}$ sıcaklık değerinin üstünde kürleştirilen yapıştırıcıda kırılma enerjisi, kürleşme sıcaklığının artması ile beraber azalma gösterdiği görülmektedir.

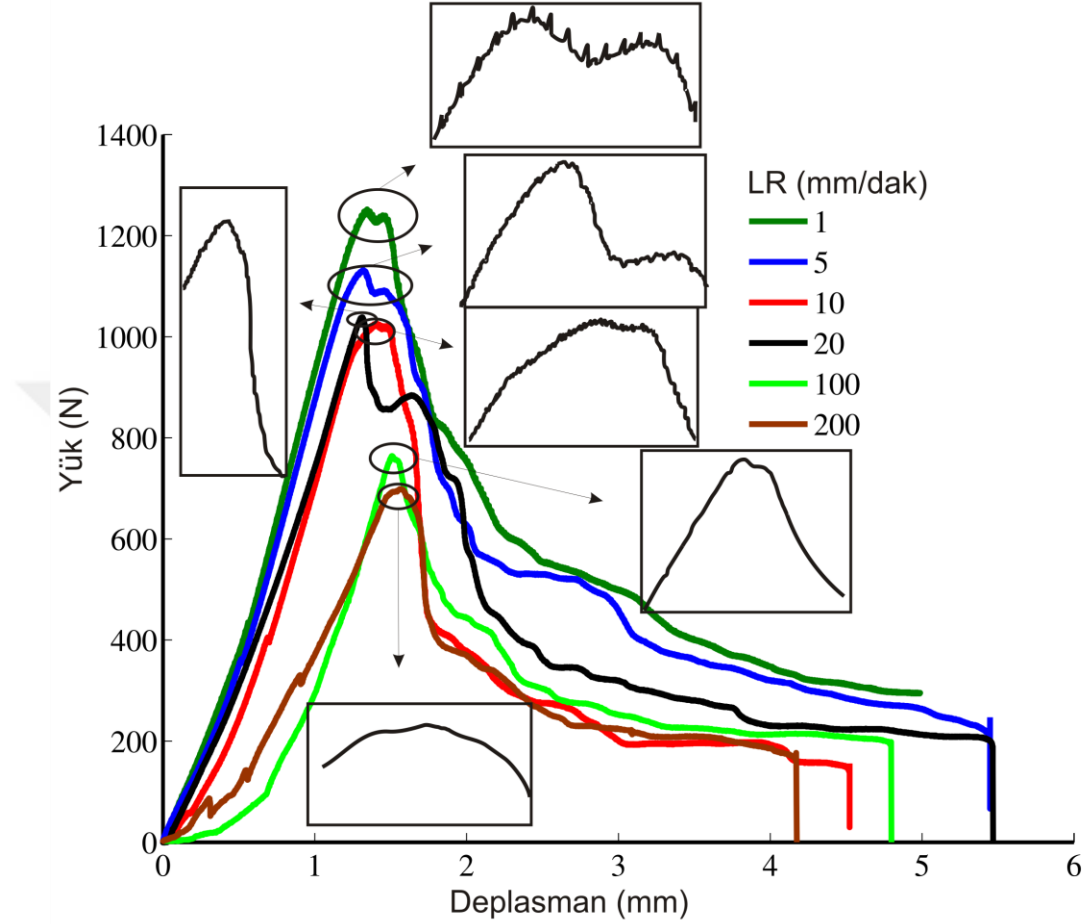
Ön hazırlık kapsamında yapıştırıcıların, $T_{g\infty}$ sıcaklık değerleri, mekanik özelliklerinin değişimi ve kırılma enerji değerleri göz önüne alındığında, kendi-kendini onarma deneylerinde kullanılacak yapıştırma bağlantıları için en uygun kürleşme sıcaklık değerlerinin 23, 40 ve 60 °C olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, 40 ve 60 °C kürleşme sıcaklıklarında termoplastik partiküllerin faz değişimi gösterebilecek olmasından dolayı, onarma deneylerinde kullanılacak olan yapıştırma bağlantılarının kürleşme sıcaklığı 23°C olarak belirlenmiştir.

4.2.2 Çekme Hızı

Yapıştırma bağlantılarının kendi-kendini onarmasında kullanılacak olan yapıştırıcılar ve termoplastik malzemeler polimer grubunda yer alan kimyasal malzemelerdir. Polimer malzemelerin mekanik özellikleri, sıcaklık ve moleküler yapıda meydana gelecek değişimlerden etkilenmektedir. Bununla birlikte, polimer malzemelere uygulanan farklı yükleme hızları da polimer malzemelerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Literatürde yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) termoplastik malzemenin farklı yükleme hızları altında mekanik özelliklerinin değiştiği rapor edilmektedir[66]. Benzer bir şekilde, polimer yapıdaki yapıştırıcıların mekanik özellikleri de yükleme hızına bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla, termoplastik malzeme ve yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan yapıştırma bağlantılarının uygun yükleme hızında test edilmesi gerekmektedir.

Deneylerde kullanılan üç farklı epoksi yapıştırıcıdan, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısı, yükleme hızının etkisini belirlemek amacı ile ön hazırlık deneylerinde kullanılmıştır. Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan yapıştırma bağlantıları oda sıcaklığında kürleştirilmek üzere yapıştırma bağlantı kalıbına konulmuştur. Kendi-kendini onarma deney süreçlerinin açıklandığı bölümde, yapıştırma bağlantılarının oluşturulması daha detaylı olarak açıklanacaktır. Kalıp içerisinde kürleştirilen

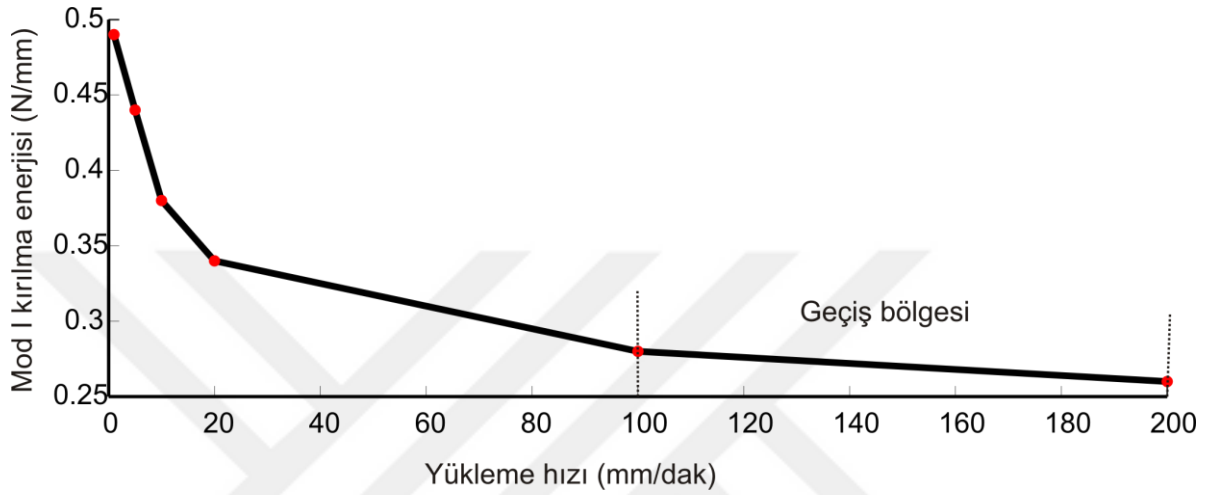
yapıştırma bağlantısı, Mecmesin universal test cihazında sırasıyla 1,5,10,20,100,200 mm/dak yükleme hızı ile test edilerek, yük-deplasman grafikleri elde edilmiştir. Şekil 4.27 de deney sonunda elde edilen yük-deplasman grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 4.27 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının farklı yükleme hızları altındaki yük-deplasman grafiği

Şekil 4.27 de görüldüğü üzere, yükleme hızı arttıkça, yapıştırıcının yük kapasitesinde azalma görülmektedir. Maksimum yük, 1 mm/dak yükleme hızı ile elde edilirken, minimum yük ise 200 mm/dak yükleme hızı ile elde edilmiştir. Bununla birlikte, yükleme hızı, çatlak ilerlemesinin kararlı veya karasız oluşunu da etkilemektedir. Kusaka ve arkadaşları düşük yükleme hızlarında karasız çatlak ilerlemesi görüleceğini ve yük deplasman grafiğinde çatlak ilerlemesinin başladığı bölgenin testere dişi görünümünde olacağını belirtmişlerdir [67]. Yapılan deneyler sonucunda literatürde rapor edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir (bkz şekil 4.27). Ayrıca şekil 4.27 görülen LR ifadesi yükleme hızı anlamında kullanılmıştır.

Yapıştırma bağlantılarının kendi-kendini onarma verimliliği mod I kırılma enerjisi ile hesaplanacaktır. Bu sebepten dolayı, farklı yükleme hızlarının kırılma enerjisi üzerindeki etkisi de ön hazırlık aşamasında incelenmiştir. Bölüm 3 te detaylı olarak anlatılan, mod I kırılma enerji yöntemlerinden Kompliyans Tabanlı Kiriş Teoremi kullanılarak, farklı yükleme hızlarının kırılma enerji değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.28 da farklı yükleme hızlarının kırılma enerji değerleri görülmektedir.



Şekil 4.28 Farklı yükleme hızlarının mod I kırılma enerji değerleri

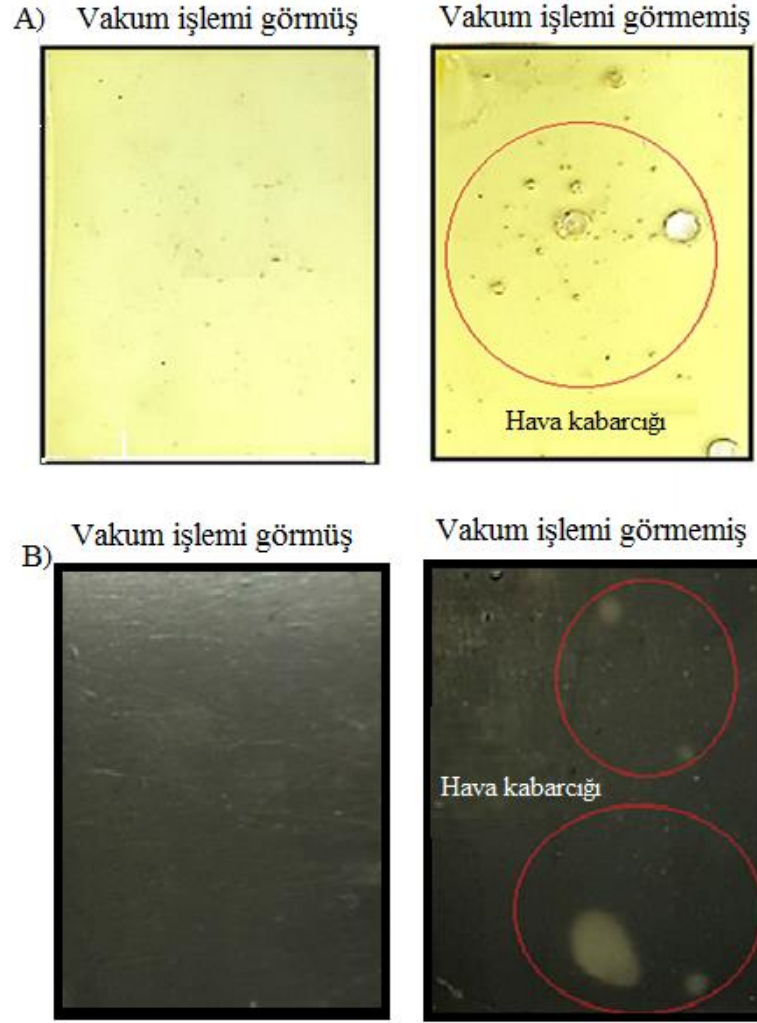
Şekil 4.28 de görüldüğü üzere, yükleme hızı arttıkça kırılma enerji değerlerinde azalma görülmektedir. Ayrıca, 100 mm/dak ile 200 mm/dak yükleme hızları arasında, yükleme hızının değişmesine rağmen, kırılma enerjisinin neredeyse sabit kaldığı bir bölge oluşmuştur. Bu bölge geçiş bölgesi olarak adlandırılmaktadır.

Yükleme hızının, yapıştırıcının maksimum yük kapasitesine ve kırılma enerji değerlerine etkisi incelendiğinde, onarma deneylerinde kullanılacak yapıştırma bağlantılarının yükleme hızı, 1 mm/dak olarak belirlenmiştir.

4.2.3 Termoplastik malzemenin yapıştırıcının mekanik özelliklerine etkisi

DeneySEL ön çalışmanın son aşamasında, onarma deneylerinde kullanılacak olan ko-polyester termoplastik malzemenin, deneylerde kullanılacak yapıştırıcılar üzerindeki etkisi incelenecektir. Bunun için, yapıştırıcıların termoplastik ilavesiz hali ile termoplastik takviyeli halinden çekme numuneleri elde edilecektir. Elde edilen numuneler, çekme cihazında test edilecektir.

Yapıştırıcılardan çekme numuneleri hazırlanırken, ilk olarak vakum altında karıştırma işlemi uygulanır. Bu işlem yapıştırıcının termoplastik takviyeli-takviyesiz durumu için de uygulanır. Termoplastik takviyesiz hali için uygulanmasının sebebi, yapıştırıcı bileşenlerinden reçine ve sertleştiricinin karıştırılması esnasında ortaya çıkabilecek hava kabarcıklarının giderilmesi içindir.

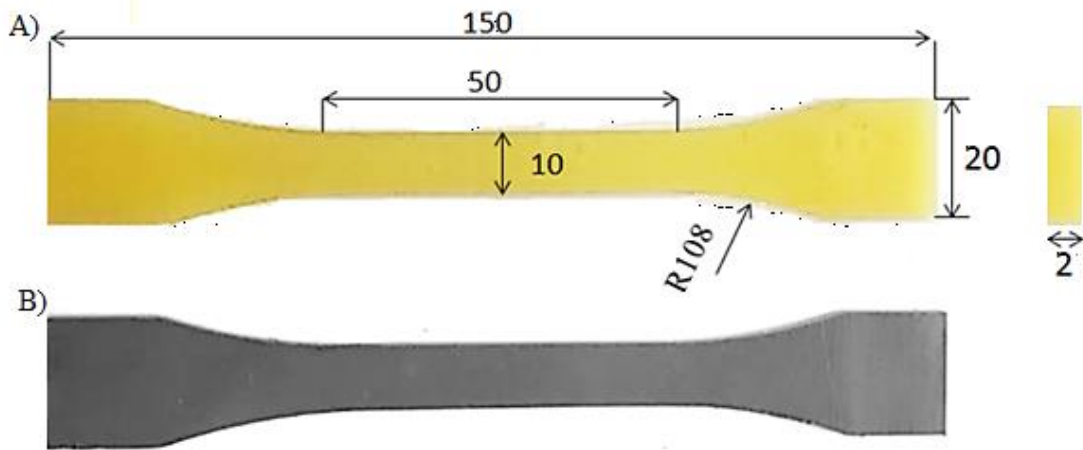


Şekil 4.29 Vakumla işlemi uygulanan ve uygulanmayan yapıştırıcı plakası (A- Araldite 2011, B- Araldite Av138M)

Şekil 4.29 da açıkça görüldüğü üzere, vakum işlemi uygulanmadan elde edilen yapıştırıcı plakalarında hava kabarcıkları oluşmaktadır. Bu hava kabarcıkları deneyler sırasında çentik etkisi oluşturmakta, buda deney sonuçlarını olumsuz etkilemektedir.

Dolayısıyla, özellikle epoksi bazlı yapıştırıcılardan plaka elde edilirken, mutlaka kürleştirilmeden önce vakum ortamında karıştırılması gerekmektedir.

Vakumlama işleminden sonra, yapıştırıcının termoplastik takviyeli-takviyesiz hali, iki farklı kürleşme sıcaklığında, kürleşme kalıbı kullanılarak, kürleştirilmiştir. İki farklı kürleşme sıcaklığı sırasıyla, oda sıcaklığı ve 120°C kürleşme sıcaklığıdır. Oda sıcaklığının seçilmesinin nedeni, üç yapıştırıcı içinde en uygun kürleşme sıcaklığı olmasından dolayıdır. Bununla birlikte, ko-polyester termoplastik malzemenin ergime sıcaklığının yaklaşık 120°C olması sebebiyle, 120°C ikinci kürleşme sıcaklığı olarak belirlenmiştir. Yapıştırıcının 120°C de kürleştirilmesi, konveksiyonel fırın içerisinde ve dijital sıcaklık ölçer ile kontrol edilerek yapılmıştır. Kürleştirilen yapıştırıcı plakalarından su jeti yardımı ile çekme numuneleri elde edilmiştir. Su jeti ile kesim işlemi 80 mikron boyutunda aşındırıcı kum ve 3800 bar su basıncında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, su jeti kesim cihazı, programlanabilir ve hassasiyeti yüksek bir cihaz olduğundan çekme numuneleri kusursuz olarak elde edilmiştir. Su jeti kesimi sonunda elde edilen çekme numunesi şekil 4.30 da gösterilmiştir. Çekme numuneleri BS 2782 standartına uygun olarak hazırlanmıştır.



Şekil 4.30 Yapıştırıcı çekme numunesi (A- Araldite 2011, B- Araldite Av138M, tüm boyutlar mm dir)

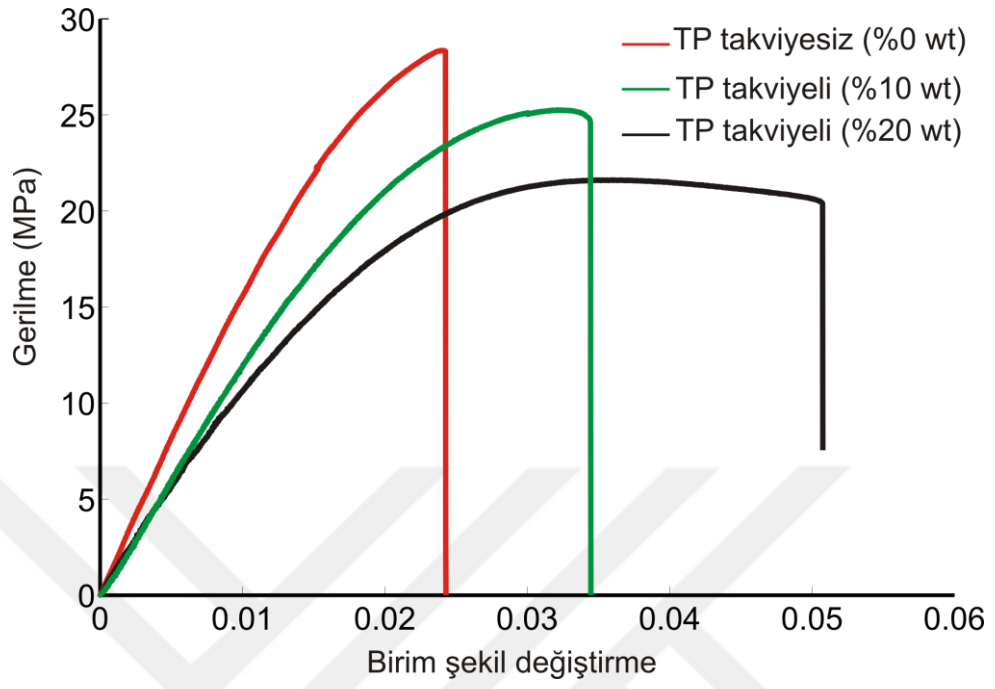
Üç farklı yapıştırıcı için çekme numuneleri elde edilmiştir. Çekme numuneleri, Instron 5982 video eksansometre özelliği bulunan çekme cihazında, 1mm/dak hız ile test edilmiştir. Şekil 4.31 de çekme deneyi esnasında ki görüntü gösterilmektedir.



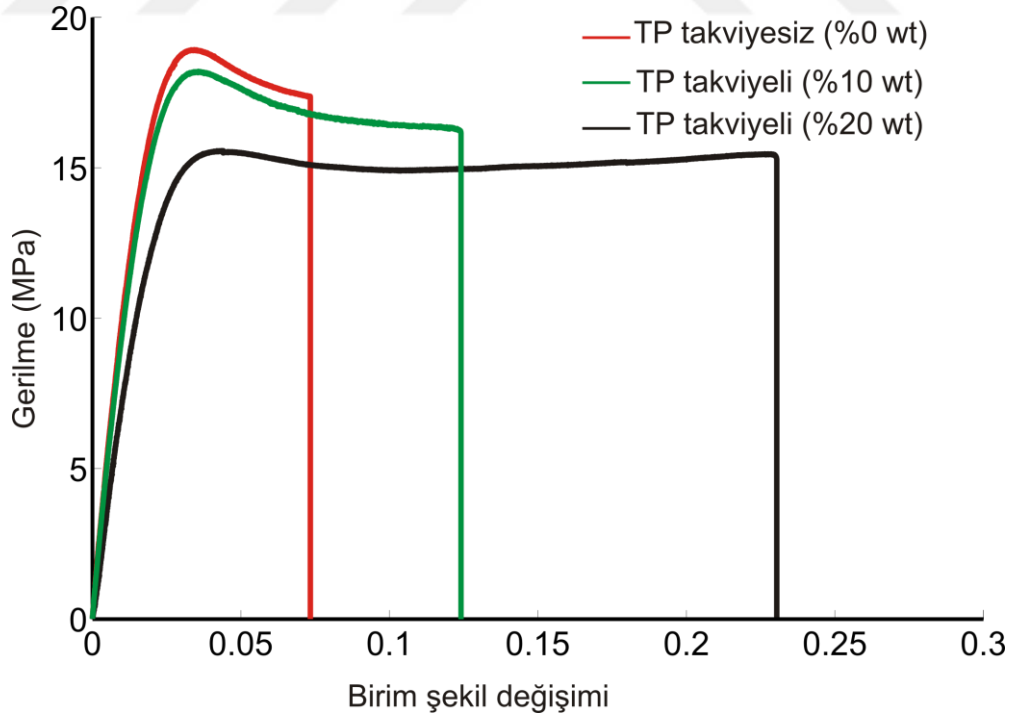
Şekil 4.31 Instron 5982 test cihazı

Çekme deneylerinde, yapıştırıcıların iki farklı kürleşme sıcaklığı ve termoplastik takviyeli hali için, her birinden 4 adet olmak üzere, toplam 72 adet çekme numunesi test edilmiştir. Deneyler sonunda, elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri şekil 4.32 de gösterilmiştir. Şekil 4.32 de görülen T_p ifadesi termoplastik takviyesini, wt ise yüzdece ağırlık oranını göstermektedir.

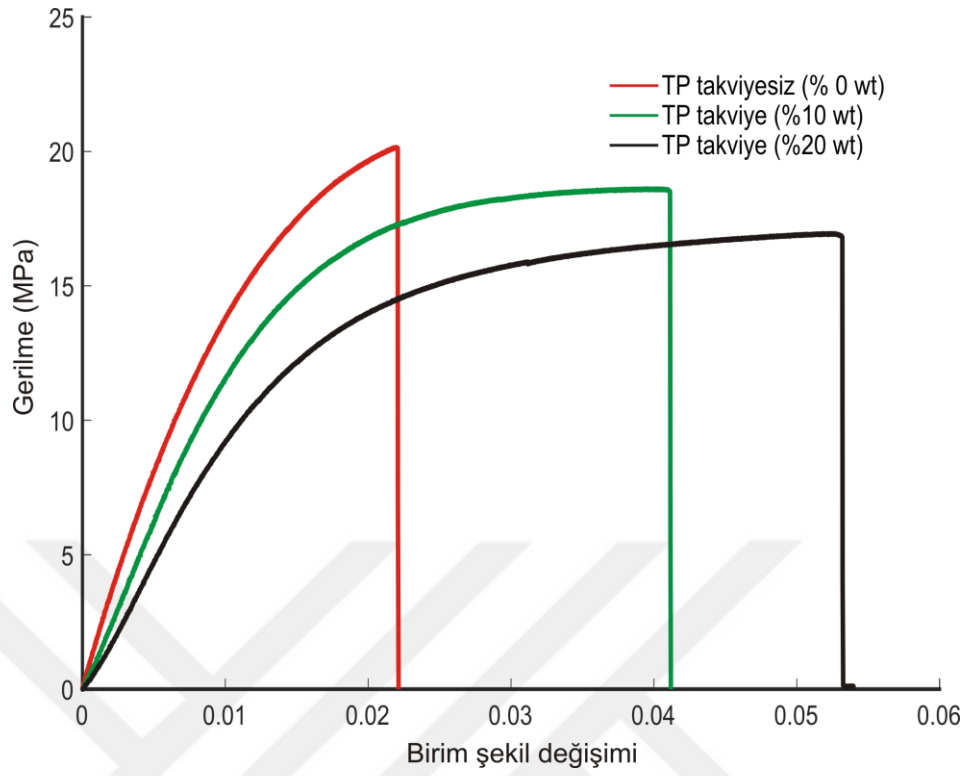
A)



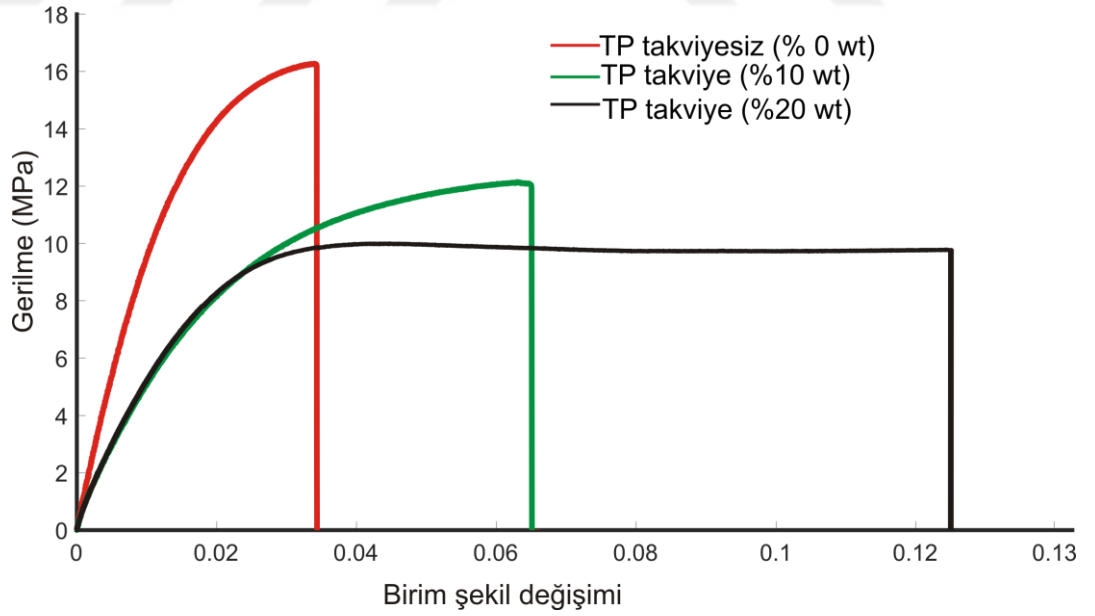
B)



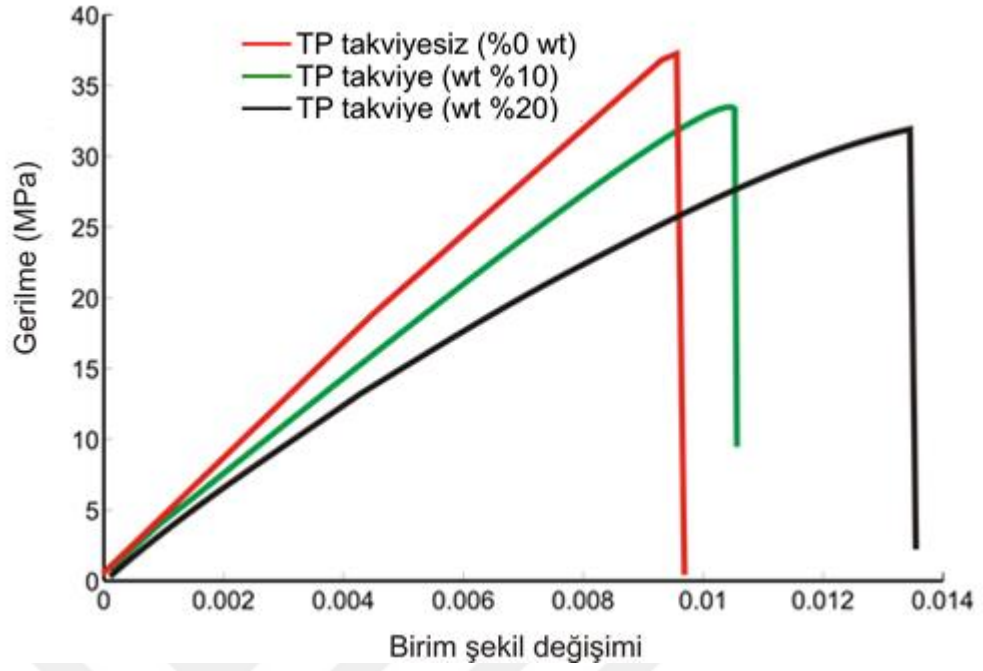
C)



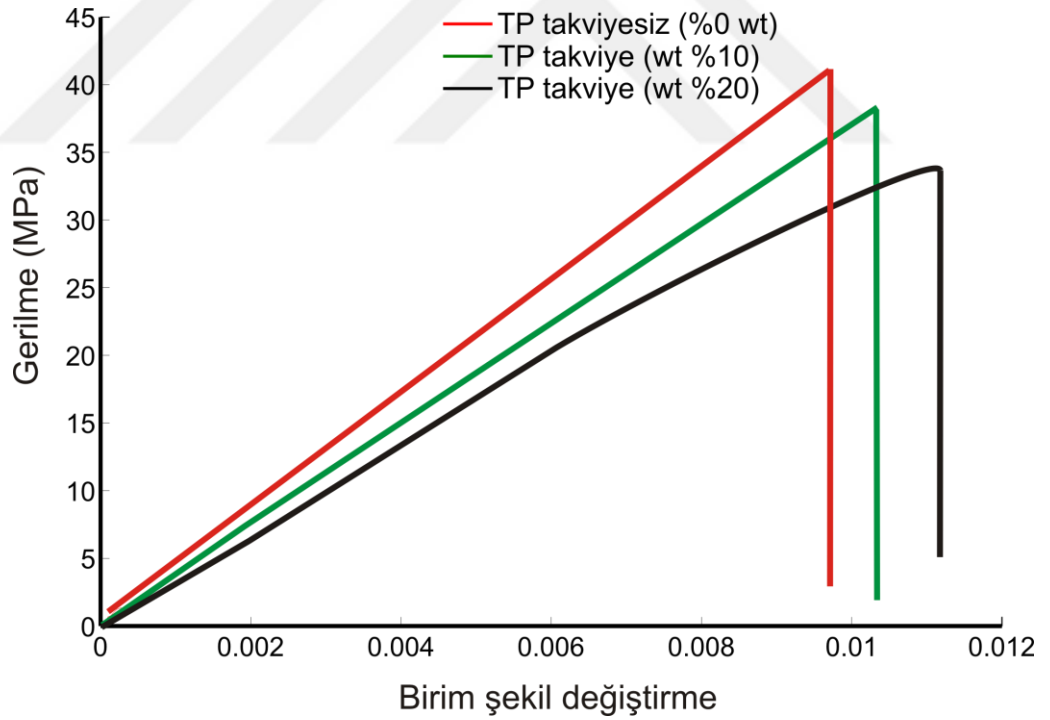
D)



E)



F)



Şekil 4.32 Çekme numunelerinin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri (A-Oda sıcaklığı Araldite 2011, B) 120⁰C Araldite 2011, C)oda sıcaklığı Araldite 2015, D) 120⁰C Araldite 2015, E) oda sıcaklığı Araldite Av138M, F) 120⁰C Araldite Av138m

Şekil 4.33 de görüldüğü gibi, kopolyester takviyeli epoksi yapıştırıcıların çekme gerilme değerleri azalırken, kopma deformasyon değerleri artmaktadır. Buda, deneylerde kullanılan kopolyester termoplastik malzemenin yapıştırıcıları sünek bir yapıya çevirdiğini göstermektedir. Deney sonuçları incelendiğinde en yüksek kopma deformasyonu, Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının 120⁰C kürleşme sıcaklığında ve yüzde yirmi termoplastik takviyeli durumundan elde edildiği görülmektedir. En düşük kopma deformasyonu ise Araldite Av138M epoksi yapıştırıcının 23⁰C (oda sıcaklığı) kürleşme sıcaklığında ve termoplastik takviyesiz halinden elde edildiği görülmektedir. Deney sonuçları, Araldite Av138M epoksi yapıştırıcısında, termoplastik takviyesiz ve yüzde on termoplastik takviyeli durum için hem oda sıcaklığı hem de 120⁰C kürleşme sıcaklığında ki kopma deformasyon değerlerinin birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir. Bu durum Araldite Av138M gevrek bir yapıştırıcı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, termoplastik malzemenin yapıştırıcı üzerindeki etkisinin net görülebilmesi için termoplastik malzemenin, yapıştırıcı içerisinde ki ağırlığı, tüm yapıştırıcılar da aynı oranda kullanılmak üzere yüzde yirmiye çıkarılmıştır.

Yapılan deneyler göstermiştir ki, kopolyester termoplastik takviyesi sünek ve orta sünek yapıda ki yapıştırıcıları daha sünek bir duruma getirirken, gevrek yapıdaki yapıştırıcıya ise sünek özellik kazandırmıştır.

Deneyler sonunda yapıştırıcının değişen mekanik özellik değerleri sırasıyla Çizelge 4.6-4.11 de verilmektedir.

Çizelge 4.6 Oda sıcaklığında kürleştirilen Araldite 2011 mekanik özellikleri

	TP takviyesiz	TP takviye (%10)	TP takviye (%20)
Elastisite Modülü (MPa)	1667.7	1234.549	1153.78
Çekme Gerilmesi (MPa)	28.351	25.25	21.61
Kopma deformasyonu	0.025	0.035	0.052

Çizelge 4.7 120⁰C sıcaklığında kürleştirilen Araldite 2011 mekanik özellikleri

	TP takviyesiz	TP takviye (%10)	TP takviye (%20)
Elastisite Modülü (MPa)	1114.93	1054.331	758.79
Çekme Gerilmesi (MPa)	18.92	18.20	15.56
Kopma deformasyonu	0.073	0.129	0.23

Çizelge 4.8 Oda sıcaklığında kürleştirilen Araldite 2015 mekanik özellikleri

	TP takviyesiz	TP takviye (%10)	TP takviye (%20)
Elastisite Modülü (MPa)	1756.03	1283.92	991.17
Çekme Gerilmesi (MPa)	20.34	18.6	15.12
Kopma deformasyonu	0.023	0.042	0.053

Çizelge 4.9 120⁰C sıcaklığında kürleştirilen Araldite 2015 meknik özellikleri

	TP takviyesiz	TP takviye (%10)	TP takviye (%20)
Elastisite Modülü (MPa)	1556.25	1120.3	867.72
Çekme Gerilmesi (MPa)	16.27	12.14	10.08
Kopma deformasyonu	0.035	0.061	0.123

Çizelge 4.10 Oda sıcaklığında kürleştirilen Araldite Av138m mekanik özellikleri

	TP takviyesiz	TP takviye (%10)	TP takviye (%20)
Elastisite Modülü (MPa)	4204.91	3973.51	3379.97
Çekme Gerilmesi (MPa)	37.24	33.35	31.90
Kopma deformasyonu	0.0096	0.0105	0.0135

Çizelge 4.11 120⁰C sıcaklığında kürleştirilen Araldite Av138m mekanik özellikleri

	TP takviyesiz	TP takviye (%10)	TP takviye (%20)
Elastisite Modülü (MPa)	4906.47	4466.67	3614.39
Çekme Gerilmesi (MPa)	40.9	37.34	33.91
Kopma deformasyonu	0.0097	0.0103	0.0112

Çizelgeler de verilen sonuçlarda, rijitlik birimi olan elastisite modülünün tüm yapıştırıcılarda termoplastik takviyesinin artması ile beraber azaldığı görülmektedir. Bu durum da termoplastik malzemenin yapıştırıcıları sünek bir yapıya dönüştürdüğünün bir göstergesidir. Ayrıca, bu çalışma sırasında ilginç bir sonuç ile de karşılaşılmıştır. Sünek ve orta sünek yapıda olan Araldite 2011 ve Araldite 2015 epoksi yapıştırıcılarının termoplastik takviyesiz hali, 120°C kürleşme sıcaklığında sünek bir davranış göstermektedirler. Bununla birlikte, Araldite Av138M gevrek yapıştırıcısı 120°C kürleşme sıcaklığında sünek özellik göstermemekle birlikte daha çok gevrek bir yapıya dönmektedir.

Onarma deney şartlarının belirlenmesi ve kopolyester termoplastik malzemenin farklı mekanik özelliklere sahip yapıştırıcılara etkisini gözlemlemek için yapılan ön hazırlık çalışmasında aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir;

- Onarma deneylerinde kullanılacak yapıştırma bağlantıları 23°C oda sıcaklığında kürleştirilecektir.
- Onarma deneylerinde kullanılacak yapıştırma bağlantıları çekme deneyinde 1mm/dak yükleme hızı ile test edilecektir.
- Kopolyester termoplastik malzemenin farklı mekanik özelliklere sahip yapıştırıcıları sünek bir yapıya çevirdiği gözlemlenmiştir. Benzer bir davranış yapıştırıcı ve termoplastik malzemeden oluşan yapıştırma bağlantısının onarma deneylerinden de beklenmektedir.

4.3 Yöntem ve Sonuç

Doktora tezinin bu bölümünde, yapıştırma bağlantılarının kendi-kendini onardığı mekanizmanın deneysel yaklaşımı açıklanacaktır. Deneyler sonunda elde edilen sonuçlar, tartışma ve sonuç kısmında değerlendirilerek, onarma mekanizmasının verimi belirlenecektir.

4.3.1 Deneysel Yöntem

Yapıştırma bağlantılarının kendi-kendini onarma mekanizması bu bölümde detaylı olarak incelenecektir. Deneysel yöntem iki aşamada gerçekleştirilecektir. Birinci aşama yapıştırma bağlantılarının oluşturulması, ikinci aşama ise yapıştırma bağlantılarının çekme deneyinde test edilmesi olacaktır.

Deneysel yöntemin birinci aşamasında yapıştırma bağlantıları elde edilmiştir. Yapıştırma bağlantıları ASTM D 3433-99 standardına göre oluşturulmuştur. Yapıştırma bağlantıları iki adet st 37 yapısal çelik levhadan ve epoksi yapıştırıcıdan meydana getirilmiştir. Epoksi yapıştırıcının termoplastik takviyeli-takviyesiz durumu için ayrı ayrı yapıştırma bağlantısı oluşturulmuştur. İlk olarak, yapıştırma bağlantısında kullanılacak levhalar, silisyum karbür kumu ile kumlanmışlardır. Kumlama işlemi tamamlandıktan sonra, levha yüzeyleri önce aseton daha sonra ultrasonik yıkma cihazı kullanılarak temizlenmiştir. Temizlenen levha yüzeylerine yapıştırıcı uygulaması bağlantı kalıbı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Yapıştırma bağlantıları oluşturulurken, yapıştırıcı kalınlığı 0.2 mm kalınlığında ki mylar bant ile sağlanmıştır. Yapıştırma bağlantıları kalıp içerisinde, ön hazırlık kısmında belirlenen 23 °C sıcaklık altında kürleştirilmiştir. Yapıştırma bağlantılarının kalıp içerisindeki görünümü şekil 4.33 de gösterilmektedir.

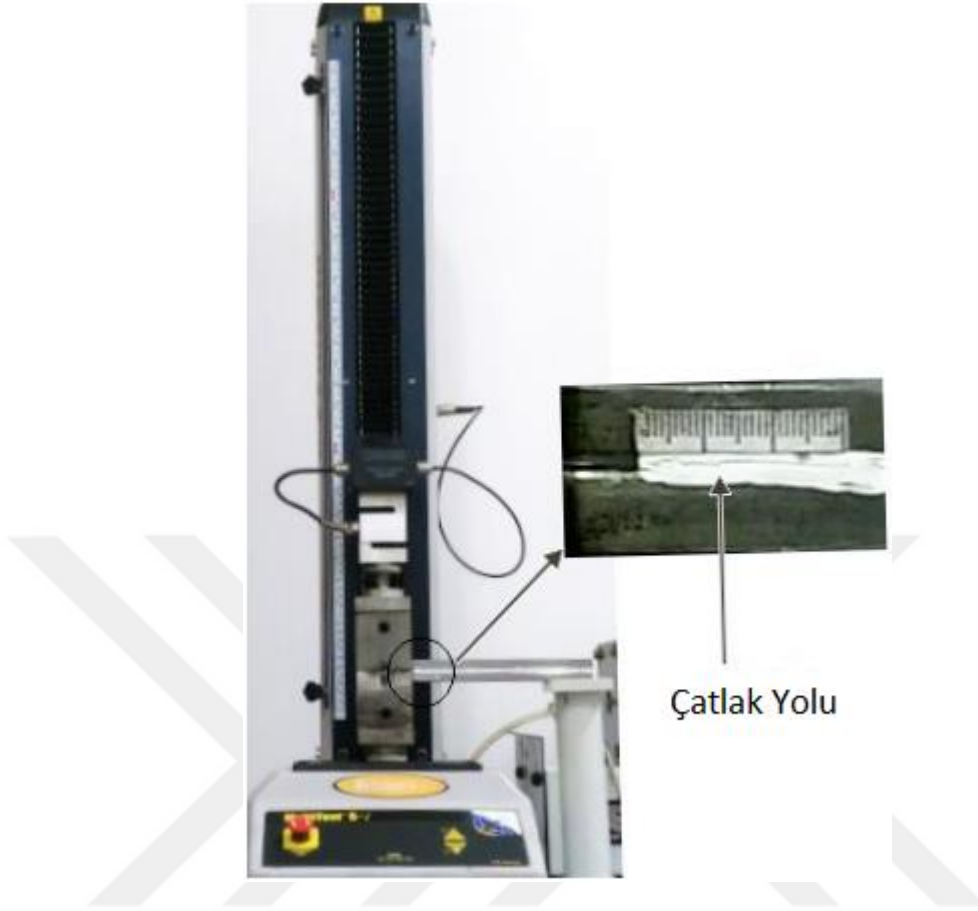


Şekil 4.33 Kalıp içerisinde ki yapıştırma bağlantıları

Yapıştırma bağlantıları, yapıştırıcıların termoplastik takviyeli-takviyesiz hali, birinci iyileştirme ve ikinci iyileştirme durumları için ve her birinden en az 4 adet olmak üzere toplam 48 adet üretilmiştir. Kendi-kendini onarma deneyleri 4 aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada yapıştırıcıların termoplastik takviyesiz halinden elde edilen yapıştırma bağlantıları çekme deneyinde test edilmiştir. Çekme deneyleri ön hazırlık kısmında belirlenen 1 mm/dak hız ile gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada yapıştırıcıların termoplastik takviyeli durumu için yapıştırma bağlantıları elde edilmiştir. Termoplastik takviyesi, yapıştırıcı ağırlığının yüzde onunu aşmayacak şekilde ve vakum ortamında yapıştırıcı ile karıştırılarak yapılmıştır. Termoplastik takviyeli yapıştırma bağlantıları çekme deneyinde 1 mm/dak hız ile test edilmişleridir. Deneylerde, termoplastik takviyeli-takviyesiz yapıştırma bağlantıları tamamen ayrılana kadar eksenel yüke maruz bırakılmışlardır. Üçüncü aşamada termoplastik takviyeli yapıştırma bağlantısı çekme deneyinde test edilmiştir. Ancak bu sefer yapıştırma bağlantısı tamamen ayrılana kadar eksenel yükleme uygulanmamıştır. Deney esnasında, yapıştırma bağlantısı üzerinde oluşan çatlak uzunluğu 30 mm olduğunda deney durdurulmuştur. Bu aşamada yapıştırma bağlantısındaki çatlak uzunluğunun takip edilebilmesi oldukça önemlidir. Bu sebeple, çatlak uzunluğunun rahat belirlenebilmesi amacıyla, yapıştırma bağlantısında yapıştırıcının olduğu bölge daksil ile boyanmıştır. Ayrıca, yapıştırma bağlantısında ön çatlağın bittiği noktaya karşılık gelen levha üzerine

30 mm uzunluğunda, 1 mm aralıklarla derecelendirilmiş kağıt cetvel yerleştirilmiştir. Bu noktada belirtilmelidir ki, literatürde yer alan termoplastik takviyeli onarma deneylerinde, onarma işlemi çatlağın yaklaşık 30 mm civarında olması ile başlamaktadır [68]. Bu sebepten dolayı çatlak uzunluğu 30 mm olarak seçilmiştir. Çatlak uzunluğu 30 mm olan termoplastik takviyeli yapıştırma bağlantısı, hava stalizatörlü fırın içerisinde, 120⁰C derece sıcaklıkta, üzerinde herhangi bir yükleme olmadan, 30 dakika işlem görmüştür. 120⁰C sıcaklık termoplastik malzemenin ergime sıcaklığıdır. Fırın içerisinde ki yapıştırma bağlantısının sıcaklık kontrolü dijital sıcaklık ölçer ve termokupl ile sağlanmıştır. Fırın içerisinden çıkarılan yapıştırma bağlantısı oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan yapıştırma bağlantısı çekme deneyinde test edilmiştir. Çekme deneyi, yapıştırma bağlantısının tamamen ayrıldığı ana kadar devam ettirilmiştir. Deney sonunda yük-deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu aşama birinci iyileştirme durumu olarak adlandırılmaktadır. Dördüncü ve son aşamada, termoplastik takviyeli yapıştırma bağlantısı 30 mm çatlak uzunluğu oluşana kadar çekme cihazında eksenel yüke maruz bırakılmıştır. Birinci iyileştirme durumuna benzer şekilde, 30 mm çatlak uzunluğuna sahip yapıştırma bağlantısı 120⁰C sıcaklığında ki fırında 30 dakika bekletilmiş ve sonrasında oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Birinci iyileştirme durumundan farklı olarak, yapıştırma bağlantısı çekme cihazında yeniden 30 mm çatlak uzunluğuna kadar teste tabi tutulmuş, 120⁰C sıcaklığında ki fırında yeniden 30 dakika bekletilmiş ve sonrasında oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. İkinci kez oda sıcaklığında soğuyan yapıştırma bağlantısı çekme deneyinde, levhaların birbirinden tamamen ayrıldığı ana kadar test edilmiştir. Deney sonunda yük-deplasman değerleri elde edilmiştir. Bu aşama ikinci iyileştirme durumu olarak adlandırılmaktadır.

Onarma deneyleri Mecmesin çekme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.34 te Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan yapıştırma bağlantısında deney esnasında oluşan 30 mm çatlak uzunluğu gösterilmektedir.



Şekil 4.34 Çekme deneyi esnasında oluşan çatlak uzunluğu

Onarma yönteminin verimi kırılma enerjisi üzerinden hesaplanabilmektedir. Bu sebeple, yapıştırıcının termoplastik takviyeli-takviyesiz, birinci ve ikinci iyileştirme durumu için çekme deneyleri sonunda elde edilen yük deplasman değerleri ile bölüm üçte mod I çatlak ilerlemesi için verilen kiriş yöntemi (KY) kullanılarak kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Onarma verimi, yapıştırıcının iyileştirme durumu sonrasında elde edilen kırılma enerjisinin, termoplastik takviyeli halinden elde edilen kırılma enerjisine bölünerek hesaplanmaktadır. Denklem 4.1 de onarma verim formülü verilmektedir.

$$\eta = \frac{G_{IC}^{\text{İyileştirme}}}{G_{IC}^{\text{TPtakviye}}} \times 100 \quad (4.1)$$

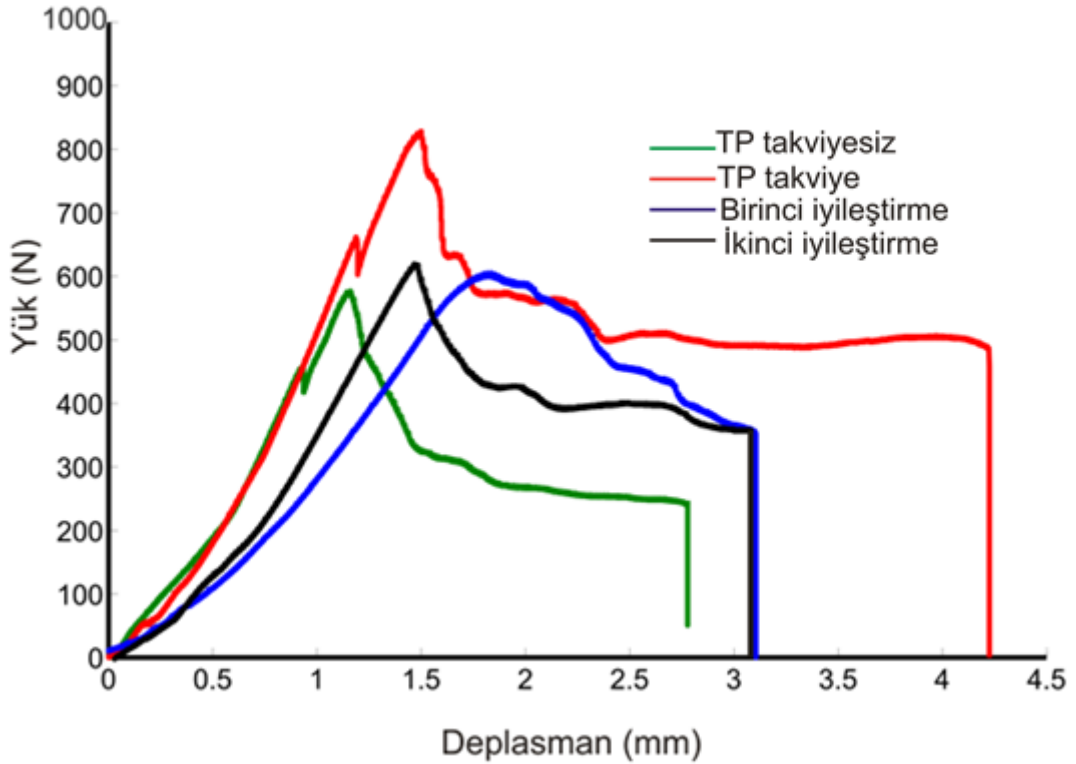
Burada, η onarma verimini, $G_{IC}^{TP\text{takviye}}$ termoplastik takviyeli yapıştırıcının mod I kırılma enerji değerini, $G_{IC}^{\text{iyileştirme}}$ yapıştırıcının iyileştirme sonrası mod I kırılma enerji değerini ifade etmektedir.

Tartışma ve sonuç kısmında, deneylerde kullanılan üç farklı yapıştırıcının deney sonuçları ve onarma verim değerleri yorumlanacaktır.

4.3.2 Tartışma ve Sonuç

Deneyler de kullanılan üç farklı yapıştırıcının termoplastik takviyeli-takviyesiz hali, birinci iyileştirme ve ikinci iyileştirme durumları için kırılma enerji değerleri hesaplanmıştır. Kırılma enerji değerleri kullanılarak onarma verimleri belirlenmiştir.

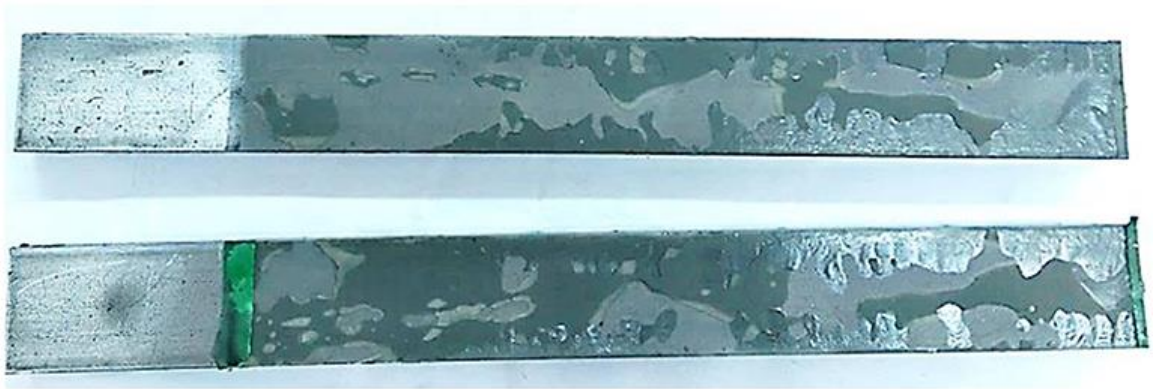
Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının onarma deneyleri sonunda elde edilen yük deplasman grafiği şekil 4.35 de gösterilmektedir.



Şekil 4.35 Araldite 2011 onarma öncesi ve sonrası yük-deplasman grafiği

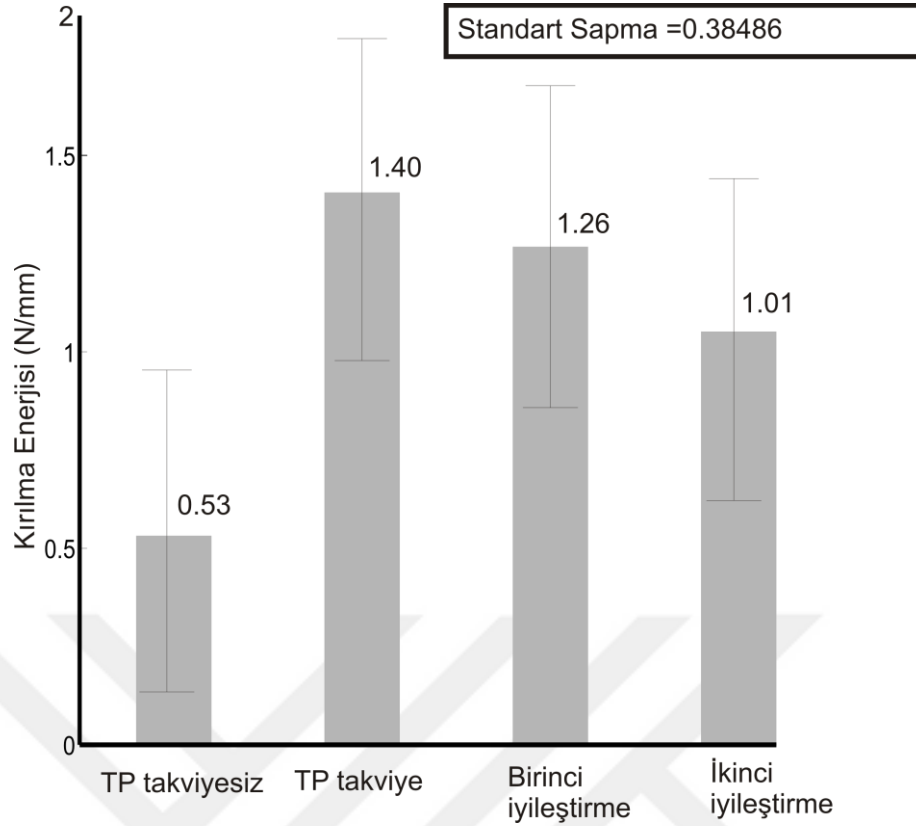
Şekil 4.35 de görüldüğü gibi, termoplastik takviyeli yapıştırma bağlantısında maksimum kopma deformasyonu ve maksimum yük değeri elde edilmiştir. Bununla

birlikte, birinci ve ikinci iyileştirme durumlarından elde edilen yük değerleri, yapıştırıcının termoplastik takviyesiz halinden daha yüksektir. Deneylerde maksimum yüke karşılık gelen deplasman değeri, ikinci iyileştirme durumunda en yüksek değerindedir. Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde, termoplastik takviyesinin yapıştırma bağlantılarını daha sünek bir yapıya dönüştürdüğü gözlemlenmiştir. Deneyler sonunda levha yüzeylerinde kohesif hasar gözlemlenmiştir. Onarma deneyleri sonunda elde edilen levha yüzeyi Şekil 4.36 da gösterilmiştir.



Şekil 4.36 Deney sonunda elde edilen kohesif yüzey

Yük-deplasman değerleri kullanılarak yapıştırıcının kırılma enerji değerleri her bir onarma aşaması için hesaplanmıştır. Kırılma enerji değerleri ve değerler arasında ki standart sapma değeri şekil 4.37 de gösterilmektedir.

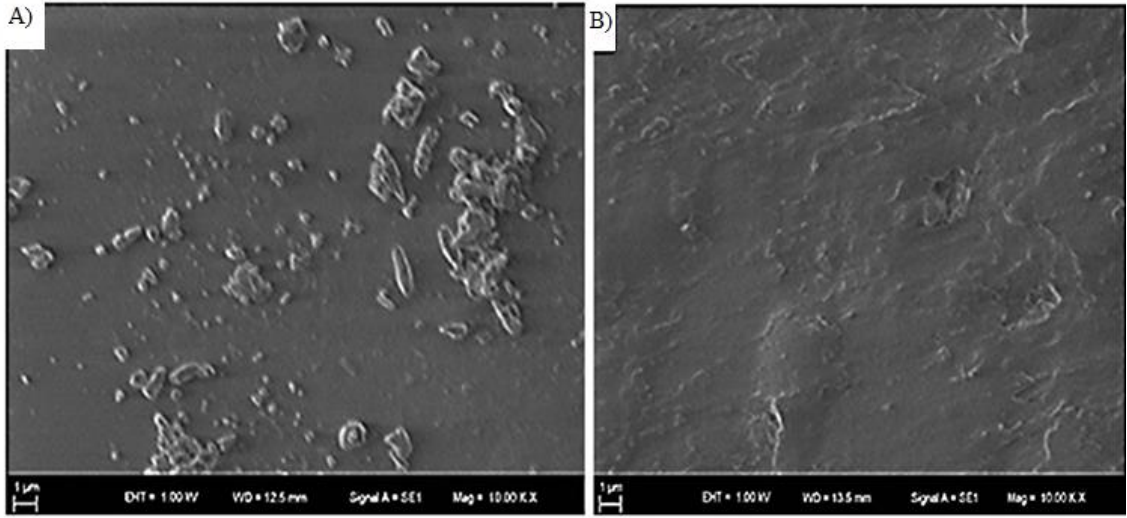


Şekil 4.37 Araldite 2011 kırılma enerji değerleri

Şekil 4.37 de onarma deneyinde kullanılan Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının dört farklı durumu için hesaplanan enerji değerleri görülmektedir. Yapılan enerji hesaplamalarında en yüksek enerji değeri termoplastik takviyeli durum için hesaplanırken, en düşük enerji değeri yapıştırıcının termoplastik takviyesiz hali için hesaplanmıştır. Elde edilen enerji değerleri denklem 4.1 de kullanılarak, onarma verimi hesaplanmıştır.

Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı için onarma verim değerleri, birinci iyileştirme için %90, ikinci iyileştirme durumu için %72 olarak hesaplanmıştır. Onarma verim sonuçları yapıştırma bağlantısında oluşacak olan çatlağın tez kapsamında önerilen termoplastik takviye yöntemi ile etkin bir şekilde onarabileceğini göstermektedir.

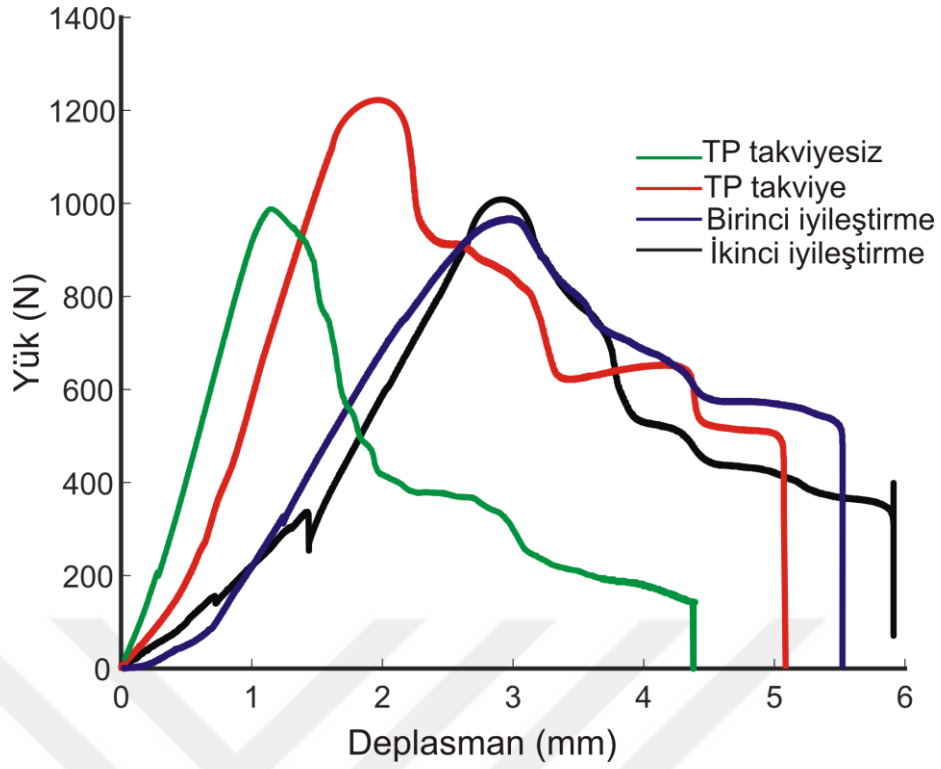
Onarma deneylerinde yapıştırıcı içerisine eklenen termoplastik partiküllerin davranışlarının incelenebilmesi amacı ile mikro yapı analizi de yapılmıştır. Mikro yapı analizi yapıştırıcının oda sıcaklığında kürleştirilmiş termoplastik takviyeli hali ile 120°C sıcaklığında kürleştirilmiş termoplastik takviyeli durumu için gerçekleştirilmiştir. Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının mikro yapı görüntüsü şekil 4.38 de gösterilmektedir.



Şekil 4.38 Araldite 2011 mikro yapı görüntüsü (a-oda sıcaklığında TP ilaveli b-120°C TP ilaveli)

Mikro yapı analizinde görüldüğü üzere oda sıcaklığında kürleştirilen termoplastik takviyeli yapıştırıcı da termoplastik partiküller yapıştırıcı içerisinde belirgin olarak gözlemlenmektedir (şekil 4.38 A). Termoplastik malzemenin ergime sıcaklığı olan 120°C de ise termoplastik partiküllerin tamamen ergidiği gözlemlenmiştir (şekil 4.38 B). Mikro yapı analizi 10000 büyütme altında yapılmıştır. Ayrıca, analiz sırasında yüksek büyütme altında net sonuç alabilmek amacı ile mikro yapı analizlerinde yapıştırıcı numuneleri altın-paladyum ile kaplanmıştır.

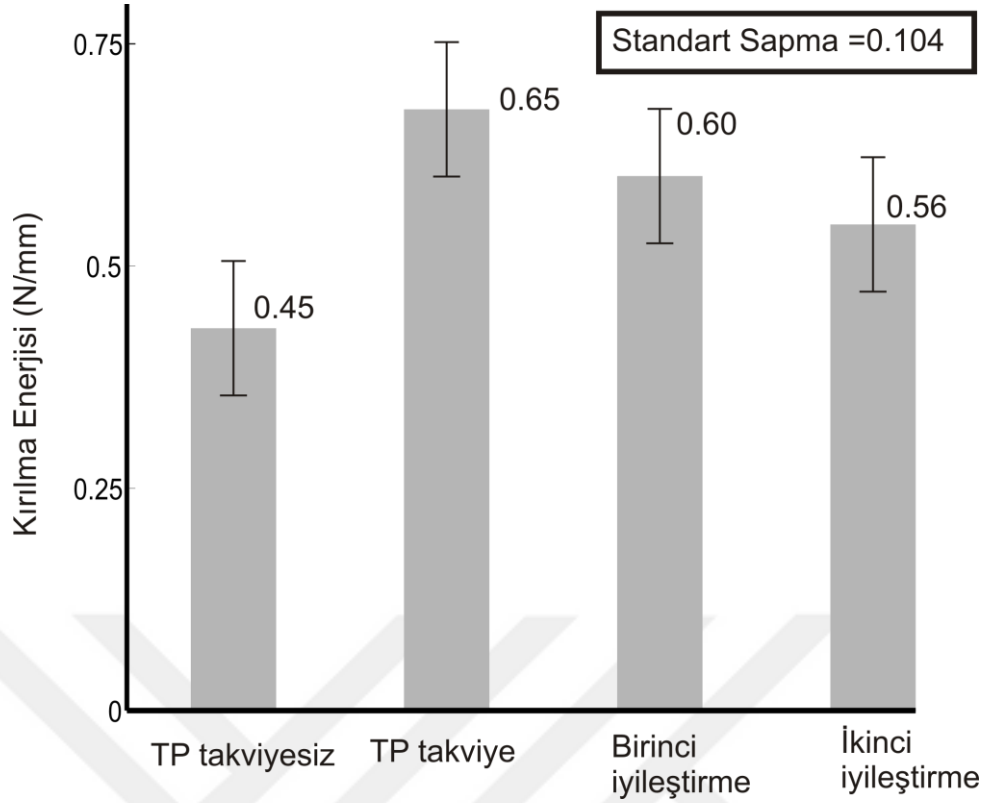
Onarma deneylerinde kullanılan bir diğer yapıştırıcı Araldite 2015 epoksi yapıştırıcıdır. Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının onarma deneyleri sonunda elde edilen yük deplasman grafiği şekil 4.39 da gösterilmektedir.



Şekil 4.39 Araldite 2015 onarma öncesi ve sonrası yük deplasman grafiği

Şekil 4.39 da görüldüğü gibi, maksimum yük değeri termoplastik takviyeli yapıştırma bağlantısından elde edilmiştir. Maksimum kopma deformasyonu ise yapıştırma bağlantısının ikinci iyileştirme durumu için elde edilmiştir. Bununla birlikte, birinci ve ikinci iyileştirme durumlarının maksimum yük değerleri birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı kullanılarak hazırlanan yapıştırma bağlantılarının onarma deney sonuçlarına benzer olarak, termoplastik takviyesinin yapıştırma bağlantılarını daha sünek bir yapıya dönüştürdüğü net bir şekilde gözlemlenmiştir.

Yük-deplasman değerleri kullanılarak yapıştırıcının kırılma enerji değerleri her bir onarma aşaması için hesaplanmıştır. Kırılma enerji değerleri ve değerler arasında ki standart sapma değeri Şekil 4.40 da gösterilmektedir.

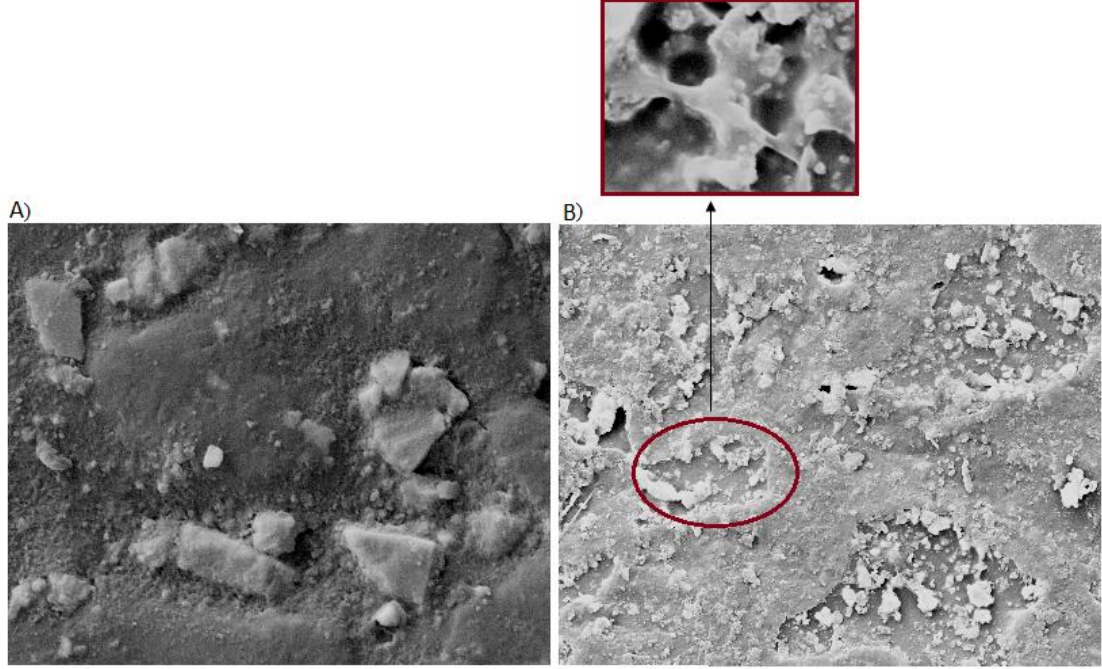


Şekil 4.40 Araldite 2015 kırılma enerji değerleri

Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısının dört farklı durumu için hesaplanan enerji değerleri incelendiğinde, maksimum kırılma enerji değeri termoplastik takviyeli durumundan elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, birinci ve ikinci iyileştirme durumlarının kırılma enerjileri ile termoplastik takviyeli durum için elde edilen kırılma enerjisi arasında sırasıyla yüzde 7.69 ve 13.84 lük bir fark ortaya çıkmaktadır. Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısının onarma sonuçlarına benzer olarak, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısında da en düşük kırılma enerjisi yapıştırıcısının termoplastik takviyesiz halinden elde edilmiştir. Enerji değerleri denklem 4.1 de yerine konulup, onarma verimi belirlenmiştir.

Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı için onarma verim değerleri birinci iyileştirme için %92, ikinci iyileştirme durumu için %86 olarak hesaplanmıştır. Onarma verim sonuçları yapıştırma bağlantısında oluşacak olan çatlağın tez kapsamında önerilen termoplastik takviye yöntemi ile etkin bir şekilde onarabileceğini göstermektedir.

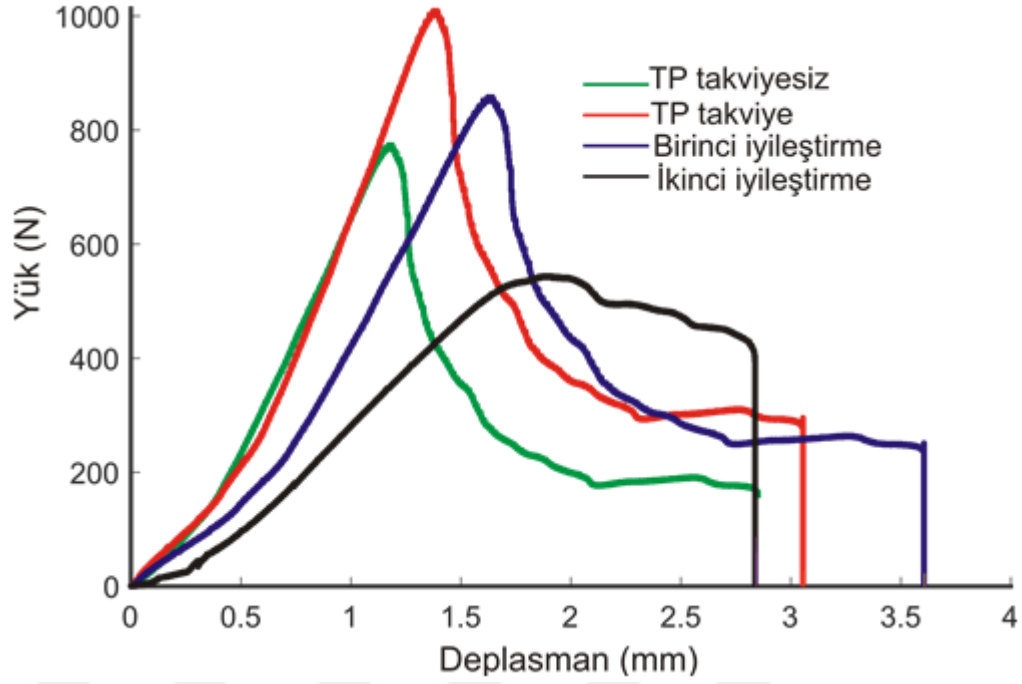
Onarma verimi belirlenen Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının mikro yapı analizi sonrasında elde edilen görüntüsü şekil 4.41 de gösterilmiştir.



Şekil 4.41 Araldite 2015 mikro yapı görüntüsü (a-oda sıcaklığında TP ilaveli b-120°C TP ilaveli)

Şekil 4.41 de termoplastik partiküllerin oda sıcaklığında ergimeden yapıştırıcı içinde dağılımı görülmektedir (Şekil 4.41 A). Ayrıca, 120°C de ergiyen termoplastik partiküllerin yapıştırıcı içerisinde ki görüntüsü de görülmektedir(Şekil 4.41 B). Bununla birlikte termoplastik partiküllerin ergiyerek, polimerleşmeye başlaması ve bağ oluşumu da mikro yapı analizinde 10000 büyütme ile gözlemlenebilmektedir.

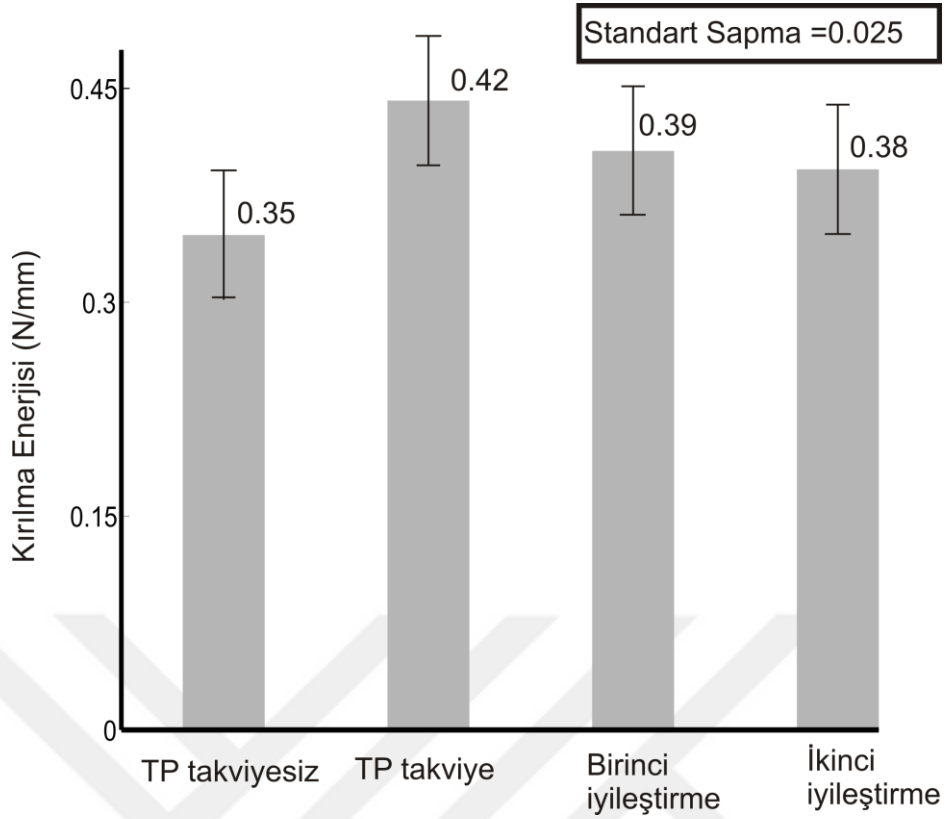
Onarma deneylerinde son olarak Araldite AV138M epoksi yapıştırıcısı kullanılmıştır. Araldite AV138M epoksi yapıştırıcının onarma deneyleri sonunda elde edilen yük deplasman grafiği Şekil 4.42 de gösterilmektedir.



Şekil 4.42 Araldite AV138M onarma öncesi ve sonrası yük deplasman grafiği

Şekil 4.42 de görüldüğü üzere maksimum yük kapasitesi, deneyde kullanılan diğer iki yapıştırıcıda da olduğu gibi yapıştırıcının termoplastik takviyeli durumdan elde edilmiştir. Bununla birlikte, maksimum kopma deformasyonu birinci iyileştirme durumundan elde edilmiştir. En düşük yük kapasitesi ikinci iyileştirme durumu için elde edilmiştir. Termoplastik takviyesi, gevrek yapıdaki Araldite AV138m epoksi yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantılarına süneklik kazandırdığı yapılan deneyler sonunda gözlemlenmiştir.

Onarma deneyleri sonunda elde edilen yük deplasman grafiğindeki veriler kullanılarak kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Enerji değerleri arasında ki standart sapma değeri ve kırılma enerji değerleri Şekil 4.43 de gösterilmiştir.

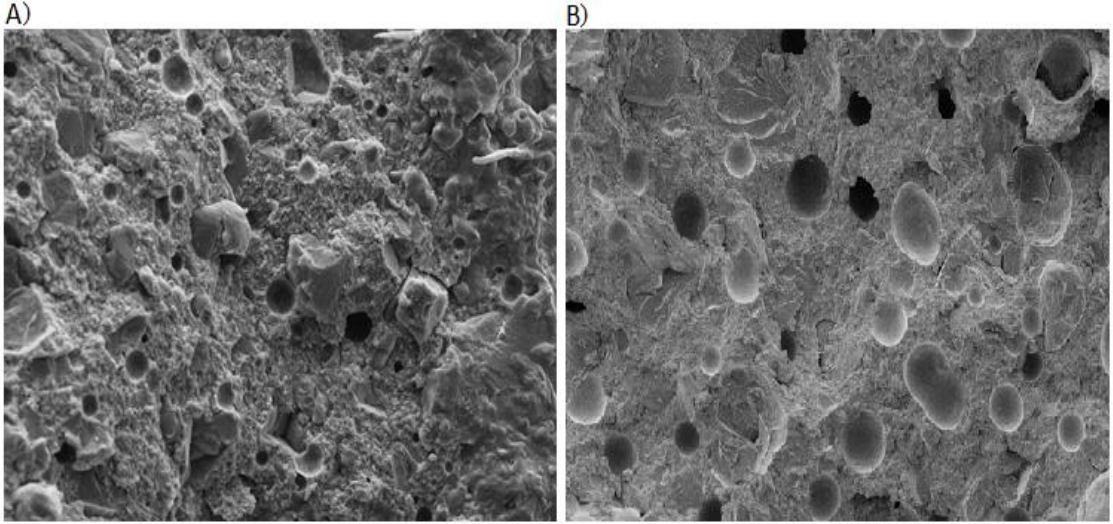


Şekil 4.43 Araldite Av138M kırılma enerji değerleri

Kırılma enerji değerleri arasında en yüksek değer termoplastik takviyeli durum için elde edilmiştir. Bununla birlikte, en düşük kırılma enerji değeri yapıştırıcının yapıştırıcının termoplastik takviyesiz halinden elde edilmiştir. Standart sapma oranı, onarma deneylerinde kullanılan üç yapıştırıcı içerisinde en az Av138M epoksi yapıştırıcının deney sonuçlarından hesaplanmıştır. Onarma deneyleri sonunda hesaplanan kırılma enerji değerleri ile onarma verimi hesaplanmıştır.

Araldite Av138M epoksi yapıştırıcı için onarma verim değerleri birinci iyileştirme için %93, ikinci iyileştirme durumu için %90 olarak hesaplanmıştır. Onarma verim sonuçları yapıştırma bağlantısında oluşacak olan çatlağın tez kapsamında önerilen termoplastik takviye yöntemi ile etkin bir şekilde onarabileceğini göstermektedir.

Onarma deneylerinin son aşamasında yapıştırıcının mikro yapı analizi yapılmıştır. Araldite Av138m epoksi yapıştırıcısının mikro yapı görüntüsü Şekil 4.44 de gösterilmektedir.



Şekil 4.44 Araldite AV138M mikro yapı görüntüsü (a-oda sıcaklığında TP ilaveli b-120°C TP ilaveli)

Mikro yapı analizi sonrasında termoplastik partiküllerin oda sıcaklığında yapı içinde homojen dağıldığı, 120°C de ise tamamen eridiği gözlemlenmiştir. Böylelikle, onarma mekanizması için kullanılan termoplastik partiküllerin, onarma işlemi için yapıştırıcı ile uyumlu olduğu da belirlenmiştir.

Onarma deneyleri sonunda elde edilen yük deplasman dataları kiriş teoreminde kullanılarak yapıştırıcıların kırılma enerji değerleri hesaplanmıştır. Kırılma enerji değerleri ile onarma işleminin verimliliği belirlenmiştir. Ayrıca termoplastik malzemenin yapıştırıcı içerisindeki davranışları mikro yapı analizinde incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda;

- En yüksek onarma verimi, birinci iyileştirme durumlarından elde edilmiştir. Yaklaşık % 90 oranında yapıştırıcının onarılması sağlanmıştır.
- İkinci iyileştirme onarma verimleri arasında en düşük onarma verimi Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantısından elde edilmiştir.
- İkinci iyileştirme onarma verimleri arasında en yüksek onarma verimi Araldite Av138M epoksi yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantısından elde edilmiştir.

- Onarma verim sonuçları incelendiğinde, yapıştırma bağlantısında oluşacak olan çatlağın tez kapsamında önerilen termoplastik takviye yöntemi ile etkin bir şekilde onarılabileceği görülmektedir.
- Yapıştırıcı içerisine katılan termoplastik partiküllerin yapıştırma bağlantılarına sünek özellik kattığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, onarma deneyleri sonunda maksimum yük, termoplastik takviyeli yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantılarından elde edilmiştir.
- Mikro yapı analizleri sonunda yapıştırıcıların içerisine katılan termoplastik partiküllerin homojen olarak dağıldığı ve yüksek sıcaklıkta ergiyerek polimerleştiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple kopolyester termoplastik malzemesi onarma deneylerinde kullanılan Araldite 2011, Araldite 2015 ve Araldite AV138M epoksi yapıştırıcısı ile uyumlu olduğu kanaatine varılmıştır.

NÜMERİK YAKLAŞIM

Yapıştırma bağlantılarının kendi-kendini onarma işlemi sonunda ki kohesif parametre değişimi nümerik yaklaşım içerisinde incelenecektir. Nümerik yaklaşım, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak uygulanacaktır. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık problemleri en basite indirgeyerek, çözüm üreten sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal, ısı, modal, dinamik, çarpışma gibi birçok analiz kolaylıkla yapılabilmektedir.

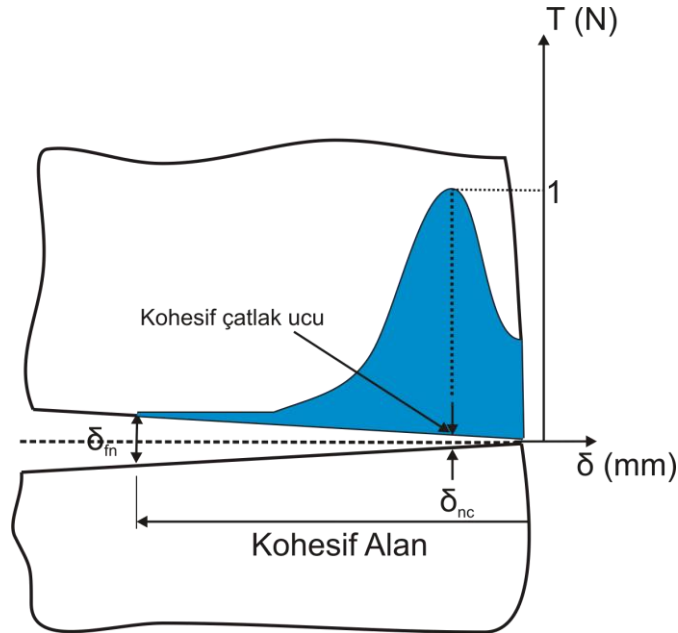
Yapıştırma bağlantılarının analizlerinde sonlu elemanlar yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Bağlantı yapısında meydana gelen gerilme değişimleri, yer değiştirme miktarları, gerilme yığılmalarının olduğu bölgeler sonlu eleman analizleri ile kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Sonlu elemanlar analizinde incelenecek modelin sınır şartlarının, yükleme koşullarının, malzeme ve model parametrelerinin doğru seçilmesi analiz için oldukça önemlidir.

Doktora tezinin bu aşamasında, kendi-kendini onaran yapıştırma bağlantılarında kullanılan yapıştırıcıların kohesif parametreleri belirlenecektir. Tez kapsamında belirlenecek kohesif parametreler, yapıştırıcıların teknik data çizelgelerinde yer almamaktadır. Dolayısıyla, yapıştırıcıların nümerik modellenmesinde son derece önemli olan kohesif parametrelerin belirlenmesi literatürde ki önemli bir boşluğu da kapatacaktır.

Farklı mekanik özelliklere sahip yapıştırıcıların kohesif parametreleri kohesif yöntem(Cohesive Zone Model) kullanılarak belirlenmektedir. Bu bölümde ilk olarak kohesif yöntem detaylı olarak anlatılacaktır. İkinci olarak, yapıştırıcıların kohesif parametreleri belirlenirken izlenecek yol açıklanacaktır. Son olarak, onarma deneyleri sonunda elde edilen veriler ile nümerik yaklaşım kullanılarak, yapıştırıcıların kohesif parametreleri belirlenecektir.

5.1 Kohesif Yöntem (KY)

Dugdale (1960) kohesif yöntem ile ilgili ilk çalışma yapan bilim adamıdır. Model daha sonra sırasıyla Barenblatt (1962), Rice (1968), Atkinson,(1987), Needleman (1987), Xu and Needleman (1994) bilim adamları tarafından geliştirilmiştir. Kohesif yöntem, yapıştırma bağlantılarında kohesif yükleme (traction) ve yüklemeye bağlı olarak meydana gelen deplasman (seperation) arasında ki bölgeyi incelemektedir. Bir başka deyişle, ayrılma bölgesinde ki yüzeyler arasında meydana gelen hasarın modellenerek incelenmesi temeline dayanır. Bu bölge üzerinde oluşacak çatlakın ilerlemesi de kohesif yöntem kullanılarak incelenebilmektedir. Yükleme koşullarının normal kuvvet etkisi altında olduğu (mod I) ve teğetsel kuvvet etkisi altında olduğu (mod II) durumları için kohesif model kullanılabilir. Kohesif yöntem şekil 5.1 de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Kohesif Yöntem [69]

Şekil 5.1 de kohesif yük ve deplasman etkisi altında meydana gelen ayrılma bölgesi görülmektedir. Bu bölge literatürde kohesif delemantasyon (cohesive delamination) olarak da bilinmektedir. Kohesif yöntem içerisinde iki tane önemli deplasman değeri mevcuttur. Bunlar, maksimum kohesif yüklemeye karşılık gelen kritik kohesif ayrılma mesafesi (δ_{nc}) ve hasarın tamamen gerçekleştiği noktaya karşılık gelen final kohesif ayrılma mesafesidir (δ_{fn}).

Kohesif yöntem yapıştırıcının mekanik özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Yapıştırıcının sünek davranışı için eksponansiyel (exponential) yöntemi kullanılır. Gevrek yapıştırıcılar içinse bilineer kohesif yöntem (bilinear) kullanılmaktadır. Karışık mod (mod I,II) yükleme durumunun kohesif modellenmesinde trapezoidal kohesif model kullanılmaktadır. Ayrıca Park ve arkadaşları tarafından önerilen potansiyel temelli kohesif yöntem (PPR) ile de farklı mekanik özellikteki yapıştırıcılar modellenabilmektedir.

5.1.1 Eksponansiyel (Exponential) Kohesif Yöntem

Eksponansiyel kohesif yöntem, sünek malzemelerin modellenmesinde sıklıkla kullanılan kohesif yöntemlerden biridir. Diğer kohesif yöntemlere göre avantajları yüksektir. Kohesif yükleme ve yüklemenin ayrılma mesafesine göre türevleri devamlılık içerir. Bu durum matematiksel hesaplamayı kolaylaştırmaktadır. Eksponansiyel kohesif modelde ara yüzey için tek bir kontak elemana ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu yaklaşım ilk olarak Needleman tarafından 1987 yılında denenmiştir. Needleman, kohesif yükleme ve ayrılma mesafesi altında kalan alanı kullanarak model oluşturmuştur. Bu alanı potansiyel olarak ifade etmiş ve potansiyel ifadesini normal ve teğetsel ayrılma mesafelerine göre düzenlemiştir. Elde ettiği eşitlik [70];

$$\Phi(\delta_n, \delta_t, \delta_b) = \frac{27}{4} \sigma_0 \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right)^2 \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \xi \left(\frac{\delta_t}{\delta_n^*} \right)^2 \left[1 - 2 \left(\frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right) + \left(\frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} \xi \left(\frac{\delta_b}{\delta_n^*} \right)^2 \left[1 - 2 \left(\frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right) + \left(\frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right)^2 \right] \right\} \quad (5.1)$$

şeklindedir. Burada, Φ potansiyeli, δ_n normal ayrılma mesafesini, δ_t, δ_b teğetsel ayrılma mesafelerini, ξ normal ve teğetsel rijitlik sabitini, σ_0 kohesif gerilmeyi, δ_n^* ise mod I ayrılma durumu için final ayrılma mesafesini göstermektedir.

Elde edilen potansiyel ifadenin normal ayrılma mesafesine göre türevi alındığında, kohesif normal kuvvet ifadesi,

$$\frac{\partial \Phi(\delta_n, \delta_t, \delta_b)}{\partial \delta_n} = T_n = \frac{27}{4} \sigma_0 \left(\frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right) \left[1 - 2 \left(\frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right) + \left(\frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right)^2 \right] \quad (5.2)$$

şeklinde elde edilir. Teğetsel kohesif kuvvet ifadeleri ise,

$$T_t = \xi \frac{27}{4} \sigma_0 \left(\frac{\delta_t}{\delta_n^*} \right), \quad T_b = \xi \frac{27}{4} \sigma_0 \left(\frac{\delta_b}{\delta_n^*} \right) \quad (5.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu yaklaşımda, mod I ayrılma durumunun kırılma enerji değeri,

$$G_{IC} = \Phi_n = \frac{9}{16} \sigma_0 \delta_n^* \quad (5.4)$$

şeklinde elde edilmektedir [70].

Needleman tarafından eksponansiyel modeli 1990 yılında tekrar revize edilmiştir. Bu kapsamda potansiyel ifadesi trigonometrik yaklaşım ile ifade edilmiştir. Bu yaklaşım içerisinde potansiyel ifadesi [70],

$$\Phi(\delta_n, \delta_t) = \frac{\sigma_0 e \delta_n^*}{z} \left\{ 1 - \left[1 + \frac{z \delta_n}{\delta_n^*} - \zeta_s z^2 \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi \delta_t}{\delta_t^*} \right) \right] \right] \exp \left(- \frac{z \delta_n}{\delta_n^*} \right) \right\} \quad (5.5)$$

şeklindedir. Burada, e ifadesi $\exp(1)$ değerini, z ifadesi ise $16e/9$ değerini temsil etmektedir. Diğer modelden farklı olarak, bu yaklaşımda kalibrasyon parametresi (ζ_s) kullanılmıştır. Model içinde kalibrasyon parametresi değeri $\zeta_s = 1/2\pi e z$ eşitliği ile hesaplanmaktadır.

Potansiyel ifadesinin normal ve teğetsel ayrılma mesafelerine göre türevi alındığında elde edilen kohesif kuvvet değerleri,

$$T_n = \sigma_0 e^{\left\{ \left[\frac{z\delta_n}{\delta_n^*} - \zeta_s z^2 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi\delta_t}{\delta_t^*}\right) \right] \right] \right\} \exp\left(-\frac{z\delta_n}{\delta_n^*}\right)} \quad (5.6)$$

$$T_t = \sigma_0 e^{\left\{ \left[2\pi\zeta_s z \left(\frac{\delta_n^*}{\delta_t^*}\right) \sin\left(\frac{2\pi\delta_t}{\delta_t^*}\right) \right] \right\} \exp\left(-\frac{z\delta_n}{\delta_n^*}\right)} \quad (5.7)$$

şeklindedir. Mod I kırılma enerji değeri bu yaklaşımda,

$$G_{IC} = \frac{\sigma_0 e \delta_n^*}{Z}$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir [70].

Ekspansiyon kohesif yöntem 1994 yılında Xu ve Needleman tarafından yeniden tasarlanarak, günümüzde kullanılan model haline getirilmiştir. Bu kapsamda, potansiyel ifadesi [70],

$$\Phi(\delta_n, \delta_t) = \Phi_n + \Phi_t \exp\left(-\frac{\delta_n}{\delta_f}\right) \left\{ \left[1 - r + \frac{\delta_n}{\delta_{fn}} \right] \frac{1-q}{r-1} - \left[q + \frac{r-q}{r-1} \frac{\delta_n}{\delta_f} \right] \exp\left(\frac{\delta_t^2}{\delta_{ft}^2}\right) \right\} \quad (5.8)$$

eşitliği ile belirlenmektedir. Burada, δ_{fn} normal final ayrılma mesafesini, δ_{ft} teğetsel final ayrılma mesafesini ifade etmektedir. Ayrıca eşitlik içinde kullanılan r ve q ifadeleri boyutsal parametrelerdir. Boyutsal parametrelerden r ifadesi $r = \frac{\delta_n}{\delta_{fn}}$ eşitliği ile q ifadesi

ise $q = \Phi_n / \Phi_t$ eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Önceki model yaklaşımlarında olduğu gibi, potansiyel ifadesinin normal ve teğetsel ayrılma mesafelerine göre türevleri alındığında [71],

$$\begin{aligned} T_n &= \frac{\partial \Phi}{\partial \delta_{fn}} = \frac{\Phi_n}{\delta_{nc}} \left(\frac{\delta_{fn}}{\delta_{nc}} \right) \exp\left(-\frac{\delta_{fn}}{\delta_{nc}}\right) \\ T_t &= \frac{\partial \Phi}{\partial \delta_{ft}} = 2 \frac{\Phi_t}{\delta_{tc}} \left(\frac{\delta_{ft}}{\delta_{tc}} \right) \left(1 + \frac{\delta_{fn}}{\delta_{nc}} \right) \exp\left(-\frac{\delta_{ft}^2}{\delta_{tc}^2}\right) \exp\left(-\frac{\delta_{fn}}{\delta_{nc}}\right) \end{aligned} \quad (5.9)$$

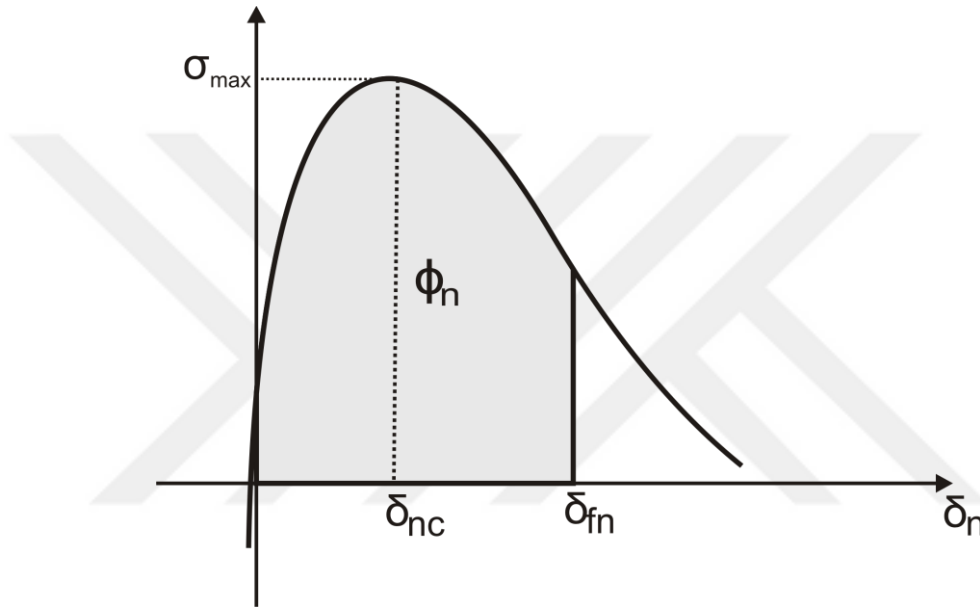
eşitlikleri elde edilmiştir. Burada, δ_{nc} kritik normal ayrılma mesafesini, δ_{tc} kritik teğetsel ayrılma mesafesini ifade etmektedir.

Denklem 5.9 da normal ve teğetsel kohesif kuvvet değerleri belirlenirken q ve r boyutsal parametreler 0 kabul edilmiştir. Ekspansiyonel modelin bu son yaklaşımda kırılma enerji değeri

$$\Phi_n = \sigma_{\max} \delta_{nc} \exp(1) \quad (5.10)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir [71].

Ekspansiyonel kohesif yöntemde kullanılan normal parametrelerin grafik üzerinde gösterimi şekil 5.2 de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Ekspansiyonel kohesif model [71].

5.1.2 Bilinear Kohesif Yöntem

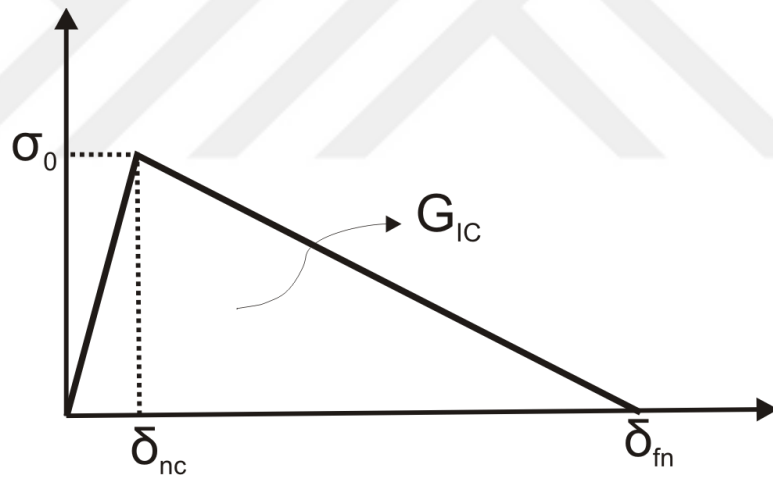
Bilineer kohesif yöntem gevrek özellikte ki yapıştırıcıların modellenmesinde kullanılmaktadır. Bilineer kohesif yöntemi ilk olarak Planas tarafından 1999 yılında kohesif yöntem olarak önerilmiştir. Daha sonra, Guinea tarafından 2000 yılında model geliştirilmiştir. Bilineer kohesif yöntem ilk olarak beton yapıların kohesif modellenmesinde kullanılmıştır. Bilineer kohesif modellenmesinde diğer modellerden farklı olarak, arayüzey elemanı yerine kontak elemanı kullanılmaktadır. Bununla birlikte kohesif rijidlik sabitleri de modelleme için gerekli olan parametrelerdir.

Bilineer modelde normal ve teğetsel kohesif kuvvet ifadelerinin ayrılma mesafeleri kullanılarak ifade edilişleri [70],

$$T_n(\delta_{fn}) = \sigma_0 \frac{\delta_{nf}}{\delta_{nc}} \quad \text{for } 0 \leq \delta_{nc} \leq \delta_{fn} \quad (5.11)$$

$$T_t(\delta_t) = \tau_0 \frac{|\delta_{tf}|}{\delta_{tc}} \quad \text{for } 0 \leq |\delta_{tf}| \leq \delta_{ft} \quad (5.12)$$

şeklindedir. Burada, σ_0 bilineer model için normal kohesif gerilmeyi, τ_0 ise kayma gerilmesini ifade etmektedir. Mod I açılma durumu için elde edilen bilineer kohesif model şekil 5.3 de gösterilmektedir.



Şekil 5.3 Bilineer kohesif model [70].

Şekil 5.3 de görüleceği üzere kritik ayrılma mesafesine karşılık gelen gerilme kohesif gerilme değeri iken, gerilme ve ayrılma mesafesi altında kalan alan kırılma enerji değeri olarak ifade edilmektedir.

5.1.3 Trapezoidal kohesif yöntem

Karışık mod yükleme durumunun nümerik modellenmesinde trapezoidal kohesif yöntem kullanılmaktadır. Hasar mekaniği yaklaşımını temel alan yöntem de karışık mod yükleme durumu için uygulanan gerilme değerleri kullanılarak normal ve teğetsel kohesif gerilmeler elde edilebilmektedir. Kohesif gerilmeler için belirlenen kriter[72],

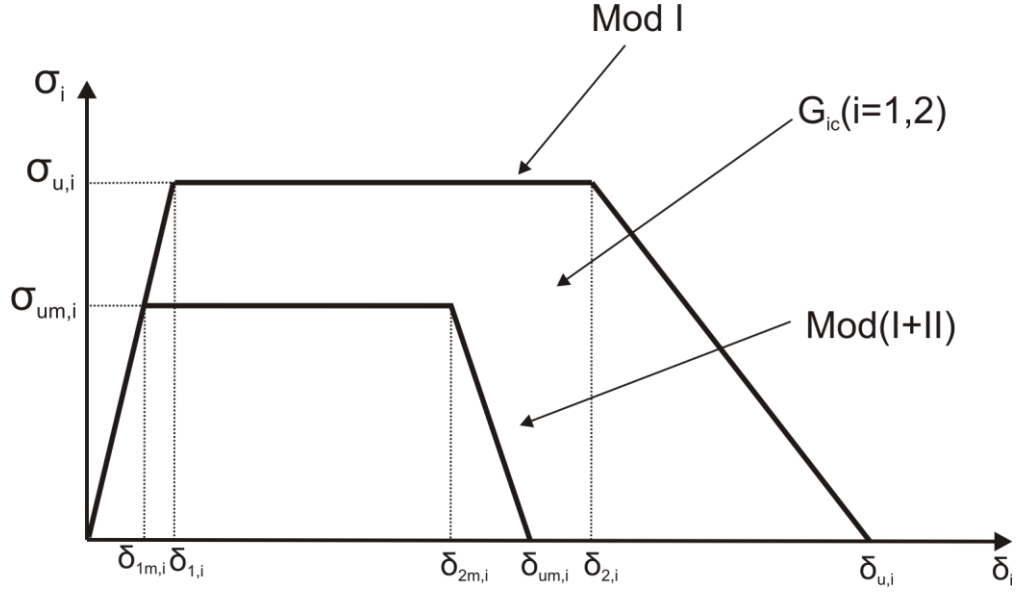
$$\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_{U,I}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_{U,II}}\right)^2 = 1 \quad \text{Eğer } \sigma_I > 0 \quad (5.13)$$
$$\sigma_{II} = \sigma_{U,II} \quad \text{Eğer } \sigma_I \leq 0$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, σ_I ve σ_{II} dışarıdan uygulanan mod I ve mod II gerilme değerlerini, $\sigma_{u,I}$ mod I ayrılma durumunda ki kohesif gerilmeyi, $\sigma_{u,II}$ ise mod II ayrılma durumunda ki kohesif gerilme değerini ifade etmektedir. Denklem 5.13 de görüleceği üzere, mod I yükleme durumunda uygulanan gerilme değerinin negatif veya pozitif değer almasına göre kohesif gerilme değerlerinde değişiklik olabilmektedir.

Bu model de kohesif ayrılma mesafeleri hasar parametresi üzerinden tanımlanmaktadır. Hasar parametresinin kohesif ayrılma mesafeleri ile ifadesi[72],

$$d_m = 1 - \frac{\delta_{1m}(\delta_{um} - \delta_m)}{\delta_m(\delta_{um} - \delta_{2m})} \quad (\delta_{2m} \leq \delta_m \leq \delta_{um}) \quad (5.14)$$

şeklindedir. Burada d_m hasar parametresidir. Denklem 5.14 de verilen ayrılma mesafeleri ve bu mesafelere karşılık gelen kohesif gerilme değerleri şekil 5.4 de gösterilmiştir. Şekil üzerinde hem mod I hem de mod II ayrılma durumlarına ait kohesif gerilme ve ayrılma mesafeleri gösterilmektedir.



Şekil 5.4 Trapezoidal kohesif model [72]

5.1.4 PPR potansiyel tabanlı kohesif yöntem

Park, Paulino, ve Roesler (PPR) potansiyel tabanlı kohesif yöntem literatürde yer alan en yeni kohesif yöntemdir. Bu yöntem, Park, Paulino, ve Roesler tarafından 2009 yılında farklı yumuşama davranışı (softening behavior) gösteren malzemelerin kohesif modellenebilmesi için geliştirilmiştir. En önemli özelliği model içerisinde yer alan şekil parametreleri sayesinde yumuşama davranışları kolaylıkla kontrol edilebilmektedir.

Bu yöntemde normal ayrılma durumu için potansiyel ifadesi [73],

$$\phi(\Delta_n) = \phi_n + \Gamma_n \left(1 - \frac{\Delta_n}{\delta_{fn}} \right)^\alpha \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\Delta_n}{\delta_{fn}} \right)^m \quad (5.15)$$

şeklinde olmaktadır. Burada α şekil parametresini, m ise boyutsuz üstel sabitini, Δ_n ise normal ayrılma mesafesini ifade etmektedir. Ayrıca, Γ_n ifadesi enerji sabitini göstermektedir. Bu model içerisinde enerji sabiti,

$$\Gamma_n = -\phi_n \left(\frac{\alpha}{m} \right)^m \quad (5.16)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır[73].

PPR kohesif yönteminde potansiyel ifadesinin normal ayrılma mesafesine göre kısmi türevi alındığında normal kohesif kuvvet ifadesi[73],

$$T_n = \frac{\partial \phi}{\partial \Delta_n} = \frac{\phi_n}{\delta_n} \left(\frac{\alpha}{m} \right)^m \left(1 - \frac{\Delta_n}{\delta_n} \right)^{\alpha-1} \left(\frac{m}{\alpha} + \frac{\Delta_n}{\delta_n} \right)^{m-1} (\alpha + m) \frac{\Delta_n}{\delta_n} \quad (5.17)$$

şeklinde olmaktadır. Denklem içerisinde yer alan boyutsuz üstel m ifadesi,

$$m = \frac{\alpha(\alpha-1)\lambda_n^2}{(1-\alpha\lambda_n^2)} \quad (5.18)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada kullanılan λ_n ifadesi başlangıç eğim göstergesi olarak isimlendirilmektedir[73]. Bu ifade,

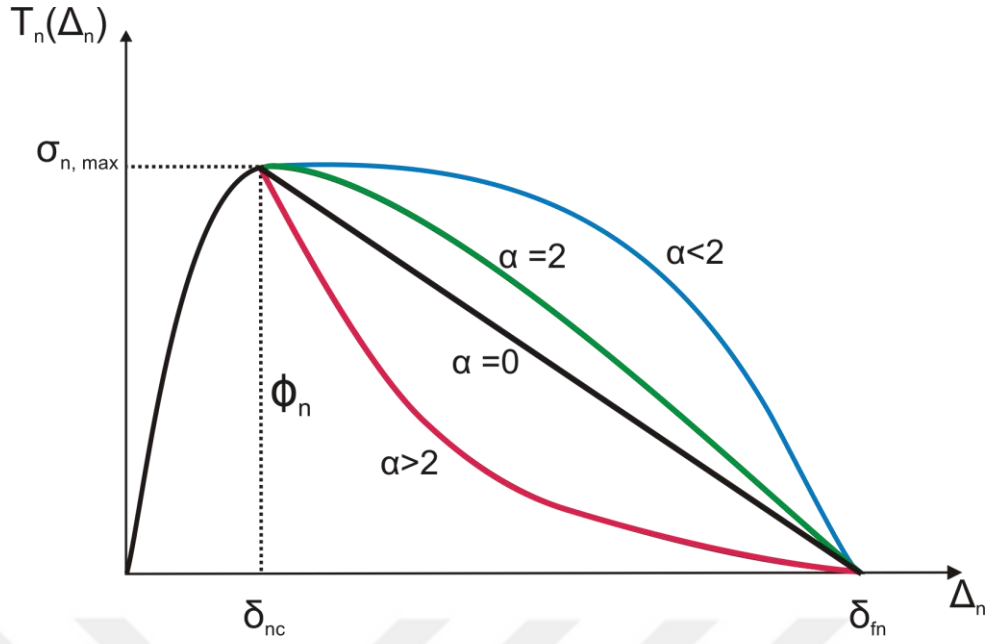
$$\lambda_n = \frac{\delta_{nc}}{\delta_{fn}} \quad (5.19)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır. Denklem 5.19 yer alan final normal kohesif ayrılma mesafesi,

$$\delta_{fn} = \frac{\phi_n}{T_{n,max}} \alpha \lambda_n (1 - \lambda_n)^{\alpha-1} \left(\frac{\alpha}{m} + 1 \right) \left(\frac{\alpha}{m} \lambda_n + 1 \right)^{m-1} \quad (5.20)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır[73].

Şekil parametresi α 'nın malzemenin yumuşama davranışına etkisi şekil 5.5 de gösterilmektedir.



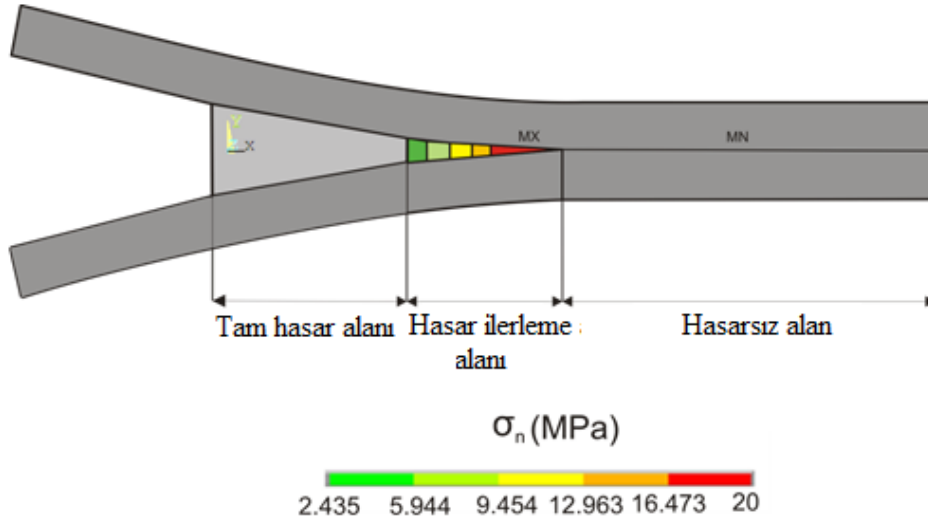
Şekil 5.5 Şekil parametresinin PPR kohesif yöntem üzerindeki etkisi

Şekil 5.5 de görüldüğü gibi, şekil parametreleri ile malzeme davranışları kolaylıkla belirlenebilmektedir. Örnek olarak, gevrek malzeme modellenmesinde şekil parametresi yaklaşık 2 ye eşit alınırken, sünek malzeme modellenmesinde şekil parametresinin $1 < \alpha \ll 2$ arasında alındığı gözlemlenmektedir. Ayrıca, yarı gevrek malzemelerin modellenmesinde şekil parametresinin 2 den çok büyük ($\alpha \gg 2$) seçilmesi gerekmektedir.

Literatürde yer alan kohesif modeller şekil parametresi kullanılarak elde edilebilmektedir. Şekil parametresinin sıfır seçilmesi durumunda bilineer kohesif yöntem elde edilebilmektedir.

5.2 Kohesif parametrelerin belirlenmesinde izlenecek yöntem

Doktora tezinin bir diğer amacı da onarma deneyleri sonunda yapıştırıcıların kohesif parametrelerinde ki değişimi incelemektir. Bu sebeple yapıştırıcıların kohesif parametreleri literatür de yer alan kohesif yöntemlerin uygulanması ile belirlenmiştir. Kohesif yöntemler Ansys® sonlu elemanlar programı kullanılarak uygulanmıştır. Sonlu elemanlar programında analiz yapılırken ilk olarak deney koşullarında oluşturulan bindirme bağlantısı ile aynı geometrik değerlere sahip model hazırlanmıştır. Hazırlanan modelin iki boyutlu bir model olmasından dolayı analiz başlangıcında düzlem şekil değiştirme durumu (plain strain) göz önüne alınmıştır. Sonlu eleman analizinde levhalar dört düğüm noktalı yapısal eleman (Plane 182) kullanılarak modellenmiştir. Yapıştırıcı ise ara yüzey (Inter 202) elemanı kullanılarak modellenmiştir. Bağlantı elemanında yapıştırıcı kullanılan bölge kohesif ağ (CZMESH) komutu kullanılarak sonlu elemanlarına ayrılmıştır. Sonlu elemanlar analizinde 155 kohesif eleman olmak üzere toplamda 4955 eleman oluşturulmuştur. Ayrıca, non-lineer analiz yöntemi uygulanmış ve 159 iterasyon gerçekleştirilmiştir. Ansys programı kullanılarak modellenen bağlantı yapısının görüntüsü şekil 5.6 da gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Deforme olmuş bindirme bağlantısında ki kohesif gerilme dağılımının sonlu elemanlar görüntüsü

Kohesif parametrelerin belirlenmesinde izlenecek yol, deneysel ön hazırlık kısmında uygun kürleşme sıcaklığının belirlenmesi amacı ile yapılan deney sonuçları kullanılarak belirlenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak, literatürde yer alan eksponensiyal kohesif yöntem kullanılmıştır.

5.2.1 Eksponensiyal kohesif yöntemin uygulanması

Eksponensiyal kohesif yöntem Ansys sonlu eleman programı içerisinde yer almaktadır. Eksponensiyal kohesif yöntemde kohesif gerilme ve final normal ayrılma mesafesi deney sonuçları ile uyumlu olacak şekilde denenecek belirlenmiştir. Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiğinde ki maksimum yük ve maksimum yüke karşılık gelen deplasman değeri not edilerek, bu değerleri sağlayacak kohesif gerilme ve ayrılma mesafe değerleri sonlu eleman programı içerisinde denenmiş ve optimum sonuç elde edilmiştir.

Campilho ve arkadaşları, yapıştırıcıların kohesif gerilme değerlerinin belirlenmesinde yapıştırıcının literatürde veya teknik datasında yer alan gerilme değerlerinin yeterli olmadığını belirtmişlerdir[74]. Bu sebeple, eksponensiyal kohesif yöntemde ki kohesif parametreler deney sonuçlarını sağlayacak değerler elde edilene kadar denenmiştir. Çizelge 5.1 de Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının farklı kürleşme sıcaklıkları için denenilen kohesif gerilme ve final ayrılma mesafe değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının kohesif gerilme ve final ayrılma mesafe değerleri

Kürleşme Sıc (°C)		Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Ortalama	SD
RT	$\sigma_{n,max}$	18	19	20	21	22	20	1.581
	δ_{fn}	0.225	0.215	0.205	0.185	0.175	0.201	0.020
40 °C	$\sigma_{n,max}$	20	21	22	23	24	22	1.581
	δ_{fn}	0.245	0.230	0.220	0.210	0.205	0.222	0.016
60 °C	$\sigma_{n,max}$	22	23	24	25	26	24	1.581
	δ_{fn}	0.300	0.295	0.290	0.285	0.280	0.290	0.007
100 °C	$\sigma_{n,max}$	15	16	17	18	19	17	1.581
	δ_{fn}	0.330	0.325	0.320	0.310	0.300	0.317	0.012

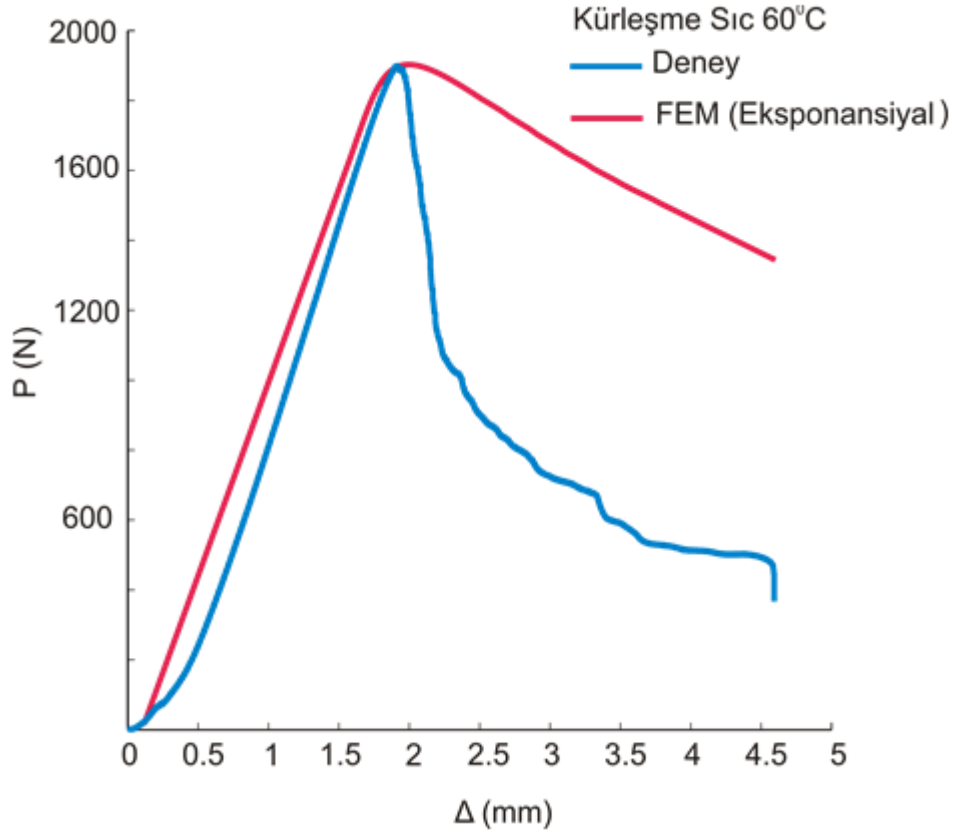
Çizelge 5.1 deki kohesif gerilme ve final ayrılma mesafe değerleri, sonlu eleman programında yer alan kodlara yazılarak eksponensiyal model çözündürülmüştür.

Ekspansiyal yöntem kullanılarak yapılan analiz sonrasında elde edilen kohesif parametreler çizelge 5.2 de gösterilmektedir. Çizelgede yer alan kırılma enerji değerleri, alan yöntemi (AM) uygulanarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, yapıştırıcının kritik normal ayrılma değerleri ise denklem 5.10 kullanılarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.2 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının ekspansiyal kohesif parametre değerleri

Kürleşme Sıc (°C)	ϕ_n (N/mm)	$\sigma_{n,max}$ (MPa)	δ_{nc} (mm)	δ_{fn} (mm)
RT	0.543	20	0.009987	0.201
40 °C	0.767	22	0.012825	0.220
60 °C	0.863	24	0.013228	0.290
100 °C	0.635	17	0.013741	0.317
SD	0.141	2.98	0.00168	0.055

Çizelge 5.2 de kohesif parametreleri verilen farklı kürleşme sıcaklığında ki Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının, örnek olarak 60°C kürleşme sıcaklığında ki deney ve nümerik analiz sonunda elde edilen yük-deplasman grafikleri şekil 5.7 de kıyaslanmaktadır. Diğer sıcaklık değerleri içinde deney ve nümerik analiz sonuçları kıyaslanmış ve 60°C kürleşme sıcaklığı ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.7 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının 60°C kürleşme sıcaklığında elde edilen deney ve nümerik sonucun kıyaslanması (Eksponansiyal)

Eksponensiyal yöntem sonunda elde edilen maksimum yük ve maksimum yüke karşılık gelen deplasman değeri deney sonucu ile uyumlu olmasına rağmen, maksimum yükten sonraki davranışta deney ile nümerik model arasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, literatürde yer alan bir başka kohesif yöntemin denenmesine karar verilmiştir. Bu noktada farklı mekanik özellikte ki yapıştırıcıların modellenmesinde kolaylık sağlayan PPR potansiyel temelli kohesif yönteminin denenmesine karar verilmiştir. Analiz de incelenen problemin mod I ayrılma problemi olmasından ve kayma modunun (mod II) etkilerinin ihmal edilmesinden dolayı trapezoidal kohesif yöntemi tez kapsamında uygulanmamıştır.

5.2.2 PPR potansiyel temelli kohesif yöntemin uygulanması

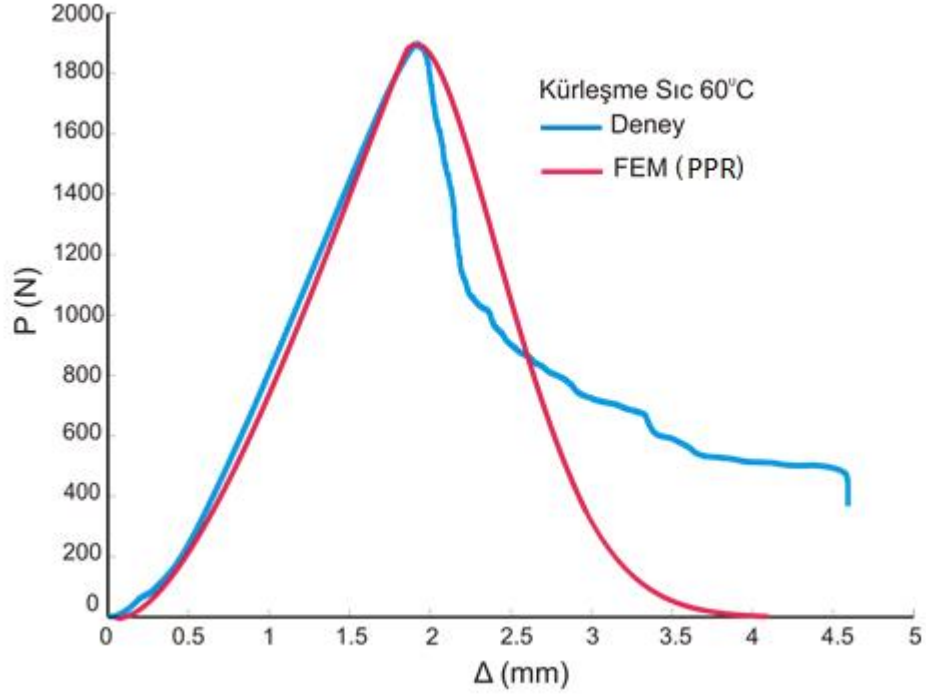
Sonlu eleman yöntemi ile yapıştırıcıların kohesif parametreleri belirlenirken eksponensiyel kohesif yöntemin yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, şekil parametresi kullanarak farklı malzeme davranışlarının kolaylıkla modellenenbildiği PPR potansiyel temelli kohesif yöntem, kohesif model olarak denenmiştir.

Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının farklı kürleşme sıcaklıkları altında kohesif parametre değişimi PPR kohesif model kullanılarak gözlemlenmiştir. Ancak, PPR model Ansys sonlu eleman programı içerisinde tanımlı değildir. Bu yüzden, PPR kohesif yöntem Matlab programı kullanılarak uygulanmıştır. Matlab programında analiz, PPR kohesif yöntemin matematiksel eşitlikleri üzerinden uygulanmıştır. Kohesif gerilme ve kırılma enerji değerleri eksponensiyel kohesif model ile aynı seçilmiştir. PPR kohesif yöntem sonunda elde edilen kohesif parametreler çizelge 5.3 de verilmiştir.

Çizelge 5.3 Araldite 2015 kürleşme sıcaklıklarının PPR kohesif model parametreleri

Kürleşme Sıc (°C)	ϕ_n (N/mm)	$\sigma_{n,max}$ (MPa)	δ_{nc} (mm)	δ_{fn} (mm)	α	Γ_n
RT	0.543	20	0.01325	0.1325	12	-12.988
40 °C	0.767	22	0.01590	0.1590	12	-17.174
60 °C	0.863	24	0.01680	0.1680	12	-20.093
100 °C	0.635	17	0.01770	0.1770	12	-14.956
SD	0.141	2.986	0.00192	0.0192	----	3.051

Çizelge 5.3 de görüldüğü gibi, kritik normal ayrılma mesafesi ve final normal ayrılma mesafesi kürleşme sıcaklığının değişimi ile beraber değişmektedir. Bununla birlikte, şekil parametreleri tüm kürleşme sıcaklıkları için sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Kürleşme sıcaklığına (60°C) ait kohesif parametreler kullanılarak elde edilen yük-deplasman grafiği, deney sonunda elde edilen yük deplasman grafiği ile karşılaştırılmıştır (bkz şekil 5.8).

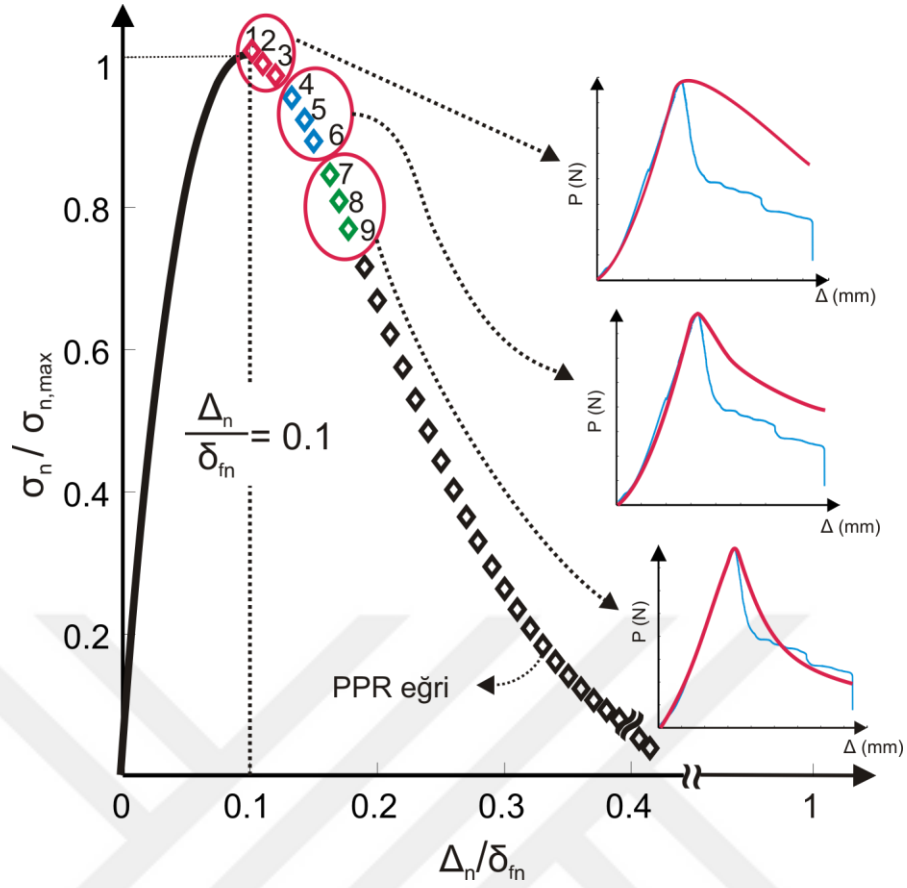


Şekil 5.8 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının 60°C kürleşme sıcaklığında elde edilen deney ve nümerik sonucun kıyaslanması (PPR)

Şekil 5.8 de görüldüğü üzere, PPR kohesif yöntem sonunda elde edilen yük deplasman grafiği ile deney sonuçları kıyaslandığında eksponensiyel kohesif yöntemle göre sonuçların birbiri ile daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, hala tam uyum yakalanamamıştır. Bu sebeple, uyumsuzluğun ortadan kaldırılması amacı ile invers analiz uygulanmıştır.

5.2.3 İvers Analiz

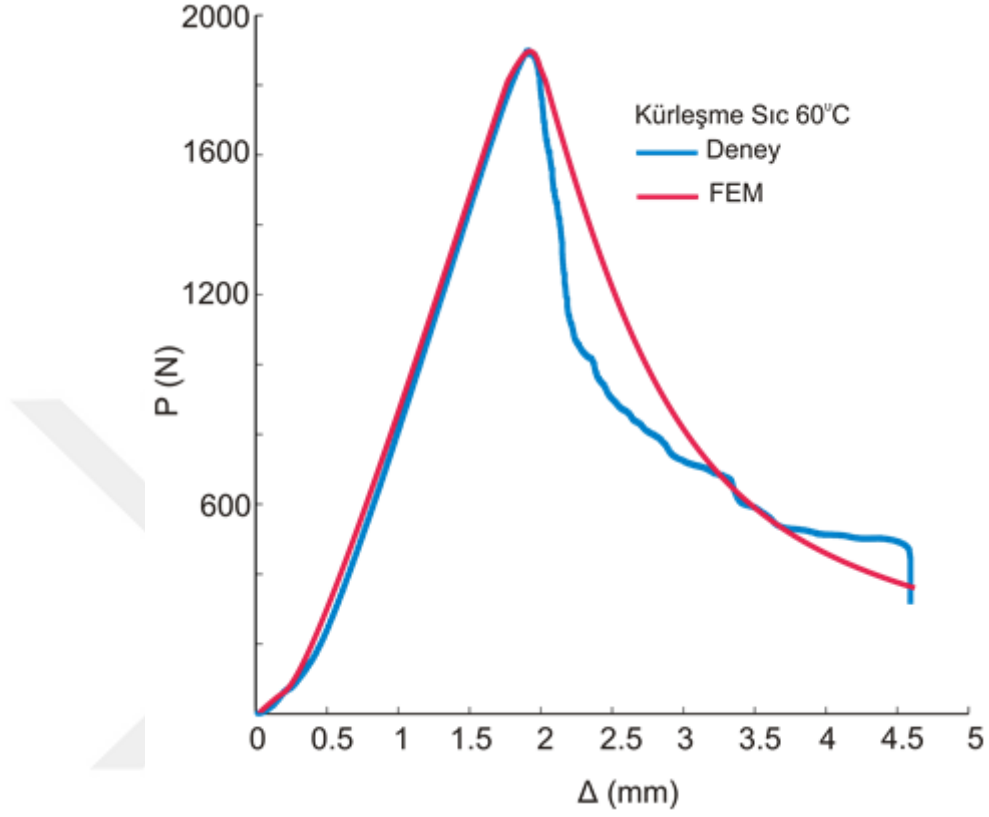
Eksponensiyel ve PPR kohesif yöntemlerden sonra deney ile nümerik sonuç arasında meydana gelen uyumsuzluğun giderilmesi için invers analiz yapılmıştır. İvers analizin uygulanışı Şekil 5.9 da gösterilmektedir.



Şekil 5.9 İvers analiz

İvers analizin uygulanışını özetleyecek olursak, ilk olarak, PPR kohesif yöntemde yer alan denklem 5.17 kullanılarak, Matlab programında PPR modelin grafiği çıkarılmıştır. Grafik elde edilirken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ayrılma mesafe oranının 0.1 olduğu değerde maksimum kohesif gerilme değerinin olması gerekmektedir [75]. Grafik elde edildikten sonra ikinci olarak, grafik üzerinden 3 nokta seçilmiştir. Seçilen noktaların gerilme ve ayrılma mesafe değerleri not edilmiştir. Üçüncü adımda kohesif gerilme ve ayrılma mesafeleri Ansys sonlu eleman programı üzerinden tek tek girilerek üç farklı yük-deplasman grafiği elde edilmiştir. Son adımda deney sonuçları ve sonlu eleman analizi sonunda elde edilen gerilme sonuçları Matlab programına aktarılmış ve program içinde yer alan temel araçlar menüsü kullanılarak polinomial regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analiz sonucunda deney sonuçları ile nümerik sonuçlar tam uyumlu olmadığında, PPR grafiği üzerinden başka bir üç nokta seçilerek invers analiz tekrar edilmiştir. Bu noktada belirtilmelidir ki benzer invers analiz adımları

literatürde de yer almaktadır[76]. İnvers analiz sonunda 60°C de kürleşme sıcaklığının deney ve nümerik analiz sonuçlarının kıyaslanması Şekil 5.10 da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 İnvers analiz sonunda elde edilen nümerik yük deplasman grafiğinin deney sonucu ile kıyaslanması

İnvers analiz sonunda deney ile nümerik sonuçların birbirine oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Onarma deneyleri sonunda yapıştırıcıların kohesif parametreleri belirlenirken izlenecek yol yapılan bu çalışma ile birlikte belirlenmiştir. Böylece, ilk olarak eksponansiyal kohesif yöntem denenecek, deney ile nümerik sonuçlar arasında uyumsuzluk gözlemlenmesi halinde PPR kohesif yöntem denenecektir. İstenilen uyum elde edilmemişse en son olarak invers analiz denenerek nümerik model tamamlanacaktır.

5.3 Yapıştırıcıların onarma sürecindeki kohesif parametre değişimi

Yapıştırıcıların onarma işlemlerinden sonra kohesif parametrelerinin değişimi bu bölüm altında detaylı incelenecektir. Yapıştırıcıların kohesif parametreleri sırasıyla eksponansiyal kohesif yöntem, PPR kohesif yöntemi ve son olarak invers analiz uygulanarak belirlenecektir. Kohesif yöntemin ve invers analizin uygulanışı, bölüm 5.2 de açıklandığı gibi olacaktır.

Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantısının onarma, birinci ve ikinci iyileştirme deney sonuçlarını nümerik olarak modellemek için eksponansiyel yöntem kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen kırılma enerjileri kullanılarak, termoplastik takviyeli ve iyileştirme durumları için Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının kohesif parametreleri belirlenmiştir (bkz çizelge 5.4).

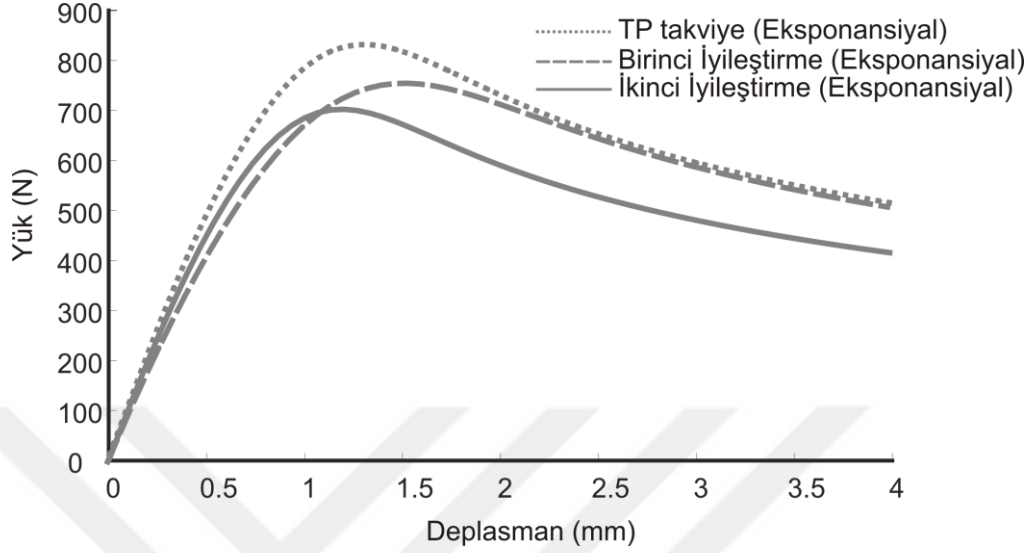
Çizelge 5.4 Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının onarma adımları sonrası eksponansiyal kohesif parametre değerleri

Onarma Adım	ϕ_n (N/mm)	$\sigma_{n,max}$ (MPa)	δ_{nc} (mm)	δ_{fn} (mm)
Tp takviye	1.4	20	0.026	0.17
1 st İyş	1.26	17	0.027	0.16
2 nd İyş	1.01	15	0.025	0.24
SD	0.16	2.05	0.0008	0.036
İyş = iyileştirme				

Çizelge 5.4 de görüldüğü gibi iyileştirme işlemlerinden sonra elde edilen kohesif parametre değerleri onarma kohesif parametre değerlerine oldukça yakındır. Ancak burada belirtilmelidir ki, ikinci iyileştirme durumundan elde edilen final kohesif ayrılma mesafesi, onarma ve birinci iyileştirme durumunda ki final ayrılma mesafelerine göre yüksek değerdedir. Final kohesif ayrılma mesafesinin yüksek değerde elde edilmesinin sebebi deney sonucundan kaynaklanmaktadır. Deney sonuçları irdelendiğinde (bkz şekil 4.36) maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerinin ikinci iyileştirme durumunda en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Bu durum, deney sonuçları temelinde uygulanan kohesif modeli etkilemektedir.

Onarma deneylerinden elde edilen yük-deplasman grafikleri ile nümerik analiz sonunda elde edilen yük-deplasman grafikleri arasında tam uyum olmadığı gözlemlenmiştir.

Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısının eksponansiyal kohesif model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri şekil 5.11 de verilmektedir.



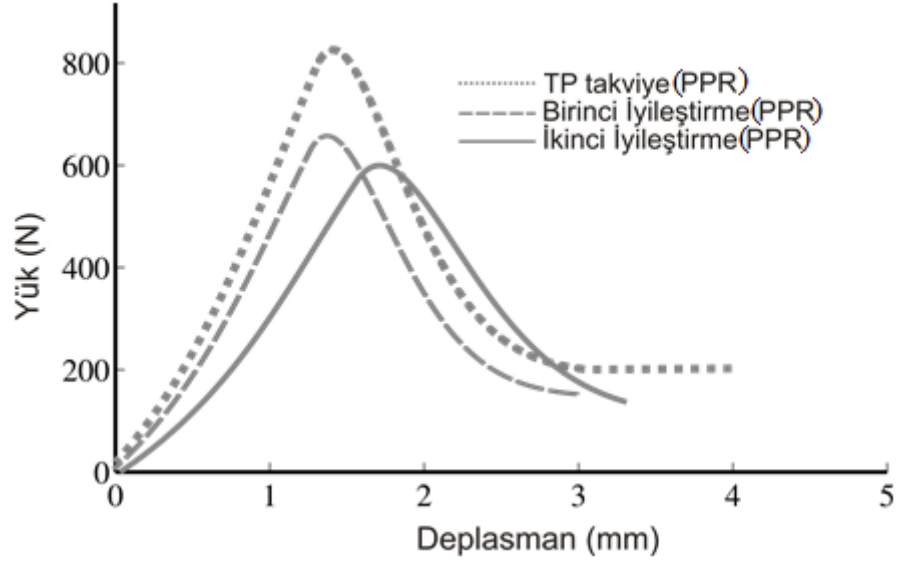
Şekil 5.11 Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısının eksponansiyal model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri

Deney ve nümerik grafikler arasında ki uyumsuzluğun giderilebilmesi amacı ile PPR kohesif yöntem denemiştir. PPR model uygulanarak elde edilen kohesif parametreler çizelge 5.5 de gösterilmiştir. Eksponansiyal yöntemde olduğu gibi onarma ve iyileştirme durumları için elde edilen kohesif ayrılma mesafeleri birbirine oldukça yakındır.

Çizelge 5.5 Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısının onarma adımları sonrası PPR kohesif model parametreleri

Onarma Adım	ϕ_n (N/mm)	$\sigma_{n,max}$ (MPa)	δ_{nc} (mm)	δ_{fn} (mm)	α	Γ_n
Tp takviye	1.4	20	0.0315	0.315	12	-31.678
1 st İyş	1.26	17	0.0335	0.335	12	-28.510
2 nd İyş	1.01	15	0.0305	0.305	12	-22.853
SD	0.16	2.05	0.0012	0.012	----	3.651

PPR kohesif model sonunda elde edilen yük deplasman grafiği ile deney grafiklerikıyaslandığında, eksponansiyal yöneme göre sonuçların birbiri ile daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, hala tam uyum yakalanamamıştır. PPR model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri şekil 5.12 de gösterilmektedir.



Şekil 5.12 Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının PPR model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri

Son olarak deney ve nümerik analiz sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiklerinin daha uyumlu olabilmesi için invers analiz denenmiştir. İnvers analiz ile Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının onarma, birinci ve ikinci iyileştirme durumlarına ait yük-deplasman grafiklerine polinomial regresyon analizi yapılmıştır. İnvers analiz sonucunda elde edilen deneysel ve nümerik yük-deplasman grafikleri Ek A da verilmektedir. İnvers analizden elde edilen grafikler incelendiğinde deney ile nümerik sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

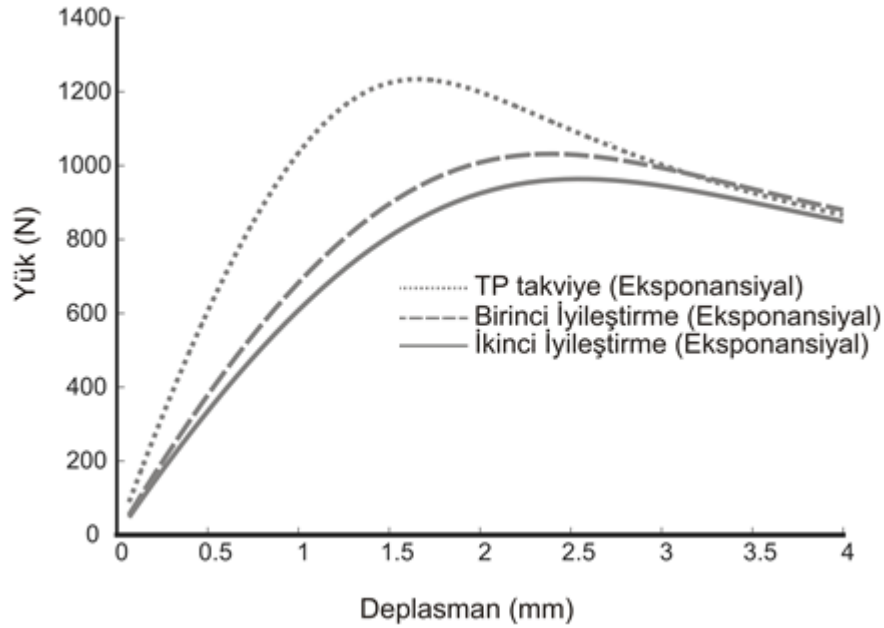
Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantısının termoplastik takviye , birinci ve ikinci iyileştirme deney sonuçları için eksponansiyel yöntem Ansys sonlu elemanlar programında oluşturulmuştur. Çizelge 5.6 da Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının eksponansiyel kohesif model parametreleri verilmektedir.

Çizelge 5.6 da Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının onarma adımları sonrası eksponansiyel kohesif model parametreleri

Onarma Adım	ϕ_n (N/mm)	$\sigma_{n,max}$ (MPa)	δ_{nc} (mm)	δ_{fn} (mm)
TP takviye	0.65	20	0.0119	0.24
1 st İyş	0.6	18	0.0122	0.46
2 nd İyş	0.56	17	0.0121	0.42
SD	0.04	1.24	0.0001	0.09

Araldite 2015 eksponansiyel kohesif model parametreleri incelendiğinde, kritik kohesif ayrılma mesafelerinin onarma ve iyileştirme aşamalarında yaklaşık aynı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, hem kırılma enerji değerlerinin hem de kohesif gerilme değerlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının eksponansiyel kohesif yöntem sonunda elde edilen yük-deplasman grafikleri şekil 5.13 de verilmiştir.



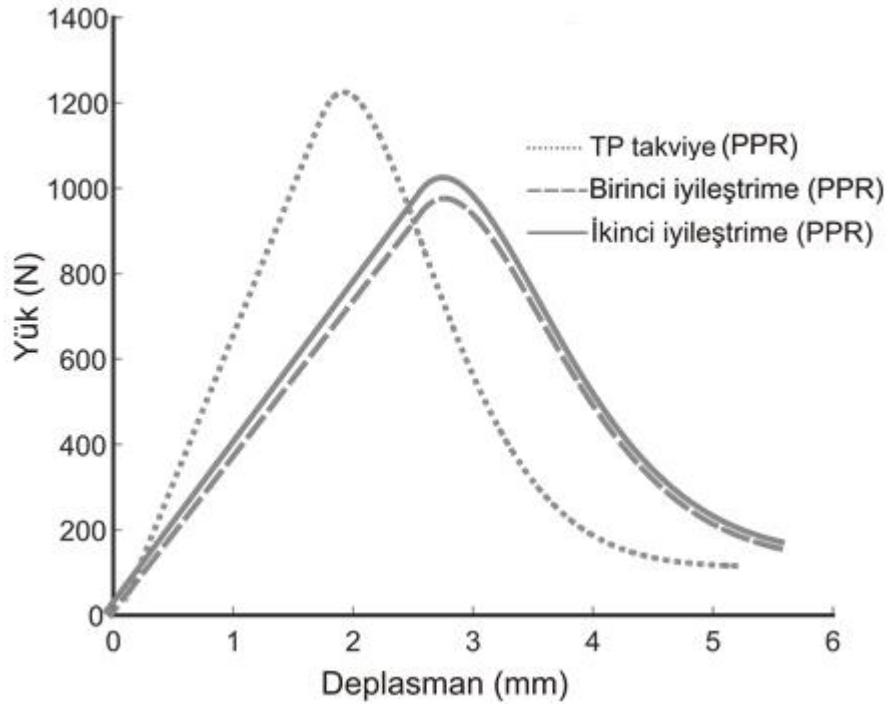
Şekil 5.13 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının eksponansiyel model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri

Deney ve nümerik grafikler arasında ki uyumsuzluğun giderilebilmesi amacı ile Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı için PPR kohesif yöntem denenmiştir. PPR modellemesinden elde edilen kohesif parametreler çizelge 5.7 de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısının onarma adımları sonrası PPR kohesif model parametreleri

Onarma Adım	ϕ_n (N/mm)	$\sigma_{n,max}$ (MPa)	δ_{nc} (mm)	δ_{fn} (mm)	α	Γ_n
TP takviye	0.65	20	0.0145	0.145	12	-14.707
1 st İyş	0.6	18	0.0150	0.150	12	-13.576
2 nd İyş	0.56	17	0.0155	0.155	12	-12.671
SD	0.04	1.24	0.0012	0.012	----	3.651

Çizelge 5.7 de görüleceği gibi termoplastik takviye ve iyileştirme kohesif parametre değerleri birbirlerine oldukça yakındır. PPR model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri şekil 5.14 de gösterilmektedir.



Şekil 5.14 Araldite 2015 epoksi yapıştırıcısının PPR model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri

PPR kohesif model sonunda elde edilen yük-deplasman grafikleri deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, istenilen uyumun yakalanamadığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple, daha yakınsak bir uyumun elde edilebilmesi amacıyla invers analiz uygulanmıştır.

İnvers analiz sonucunda elde edilen deneysel ve nümerik yük deplasman grafikleri Ek A da verilmiştir.

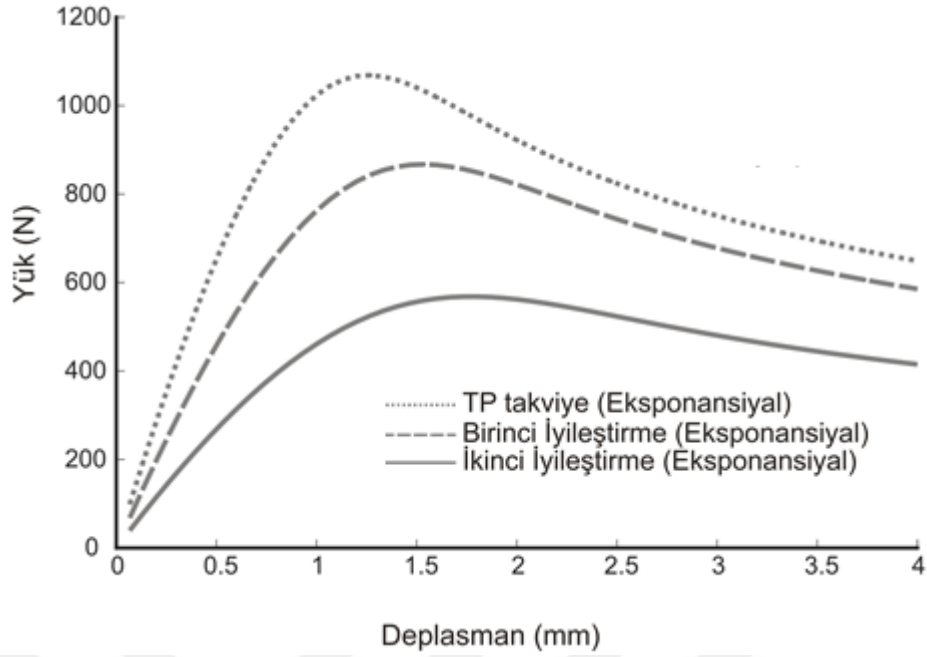
Onarma deneylerinde kullanılan Araldite Av138M epoksi yapıştırıcısının nümerik modellenmesinde diğer iki yapıştırıcı da olduğu gibi ilk olarak eksponansiyel kohesif yöntem kullanılmıştır. Eksponansiyel kohesif yöntem sonunda elde edilen kohesif parametreler çizelge 5.8 de gösterilmektedir.

Çizelge 5.8 da Araldite Av138M epoksi yapıştırıcısının onarma adımları sonrası eksponansiyel kohesif model parametreleri

Onarma Adım	ϕ_n (N/mm)	$\sigma_{n,max}$ (MPa)	δ_{nc} (mm)	δ_{fn} (mm)
Tp takviye	0.42	19	0.0081	0.17
1 st İyş	0.39	17	0.0085	0.23
2 nd İyş	0.38	16	0.0088	0.29
SD	0.02	1.24	0.0003	0.05

Çizelge 5.8 da görüleceği gibi, onarma aşamalarının kohesif parametre değerleri, final kohesif ayrılma mesafe değerleri hariç, birbirine oldukça yakındır. Final kohesif ayrılma mesafe değerleri arasında ki farklılık, onarma deneyleri sonunda elde edilen deplasman değişiminden kaynaklanmaktadır. Birinci ve ikinci iyileştirme durumlarında maksimum yüke karşılık gelen deplasman değerleri onarma aşamasında ki deplasman değerine göre daha büyüktür.

Eksponansiyel kohesif model parametreleri kullanılarak elde edilen yük deplasman grafikleri şekil 5.15 de gösterilmektedir.



Şekil 5.15 Araldite Av138M epoksi yapıştırıcının ekspansiyal model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri

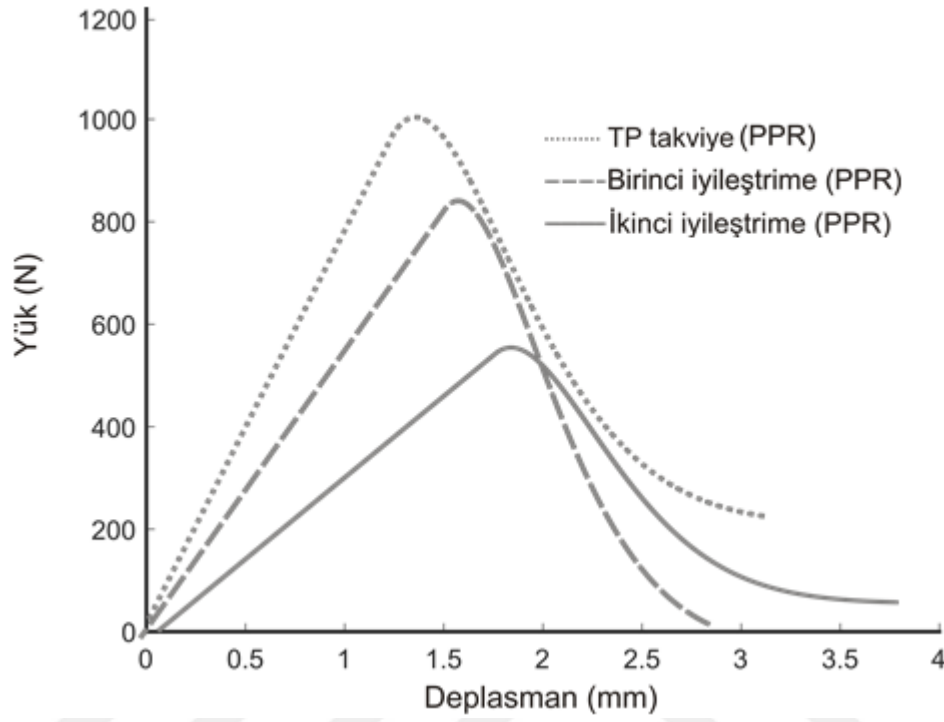
Ekspansiyal kohesif model sonunda elde edilen yük-deplasman grafikleri deney sonuçları ile karşılaştırıldığında tam uyumlu olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak, burada belirtmelidir ki ikinci iyileştirme durumu için elde edilen ekspansiyal yük deplasman grafiği deney grafikleri ile oldukça uyumludur. Ancak daha uyumlu sonuçların elde edilebilmesi için PPR analiz denenmiştir.

Araldite Av138M epoksi yapıştırıcının PPR model sonunda elde edilen kohesif parametreler çizelge 5.9 da gösterilmektedir.

Çizelge 5.9 Araldite Av138M epoksi yapıştırıcısının onarma adımları sonrası PPR kohesif model parametreleri

Onarma Adım	ϕ_n (N/mm)	$\sigma_{n,max}$ (MPa)	δ_{nc} (mm)	δ_{fn} (mm)	α	Γ_n
TP takviye	0.42	19	0.01	0.1	12	-9.509
1 st İyş	0.39	17	0.0105	0.105	12	-8.824
2 nd İyş	0.38	16	0.011	0.11	12	-8.598
SD	0.02	1.24	0.0004	0.04	----	0.387

PPR kohesif model sonunda elde edilen kohesif parametrelerin eksponansiyel kohesif modele göre daha yakın olduğu görülmektedir. PPR model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri şekil 5.16 da gösterilmektedir.



Şekil 5.16 Av138M epoksi yapıştırıcının PPR model sonunda elde edilen yük deplasman grafikleri

PPR model sonunda elde edilen yük-deplasman grafikleri, deney sonuçları ile kıyaslandığında, uyumsuzluğun giderilmediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, invers analiz uygulanmıştır. İnvers analiz sonunda deney ve nümerik sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. İnvers analiz sonuçları Ek A da verilmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Doktora tezinde, bindirmeli yapıştırma bağlantısının kendi-kendini onarma süreci deney ve sonlu elemanlar modeli kullanılarak incelenmiştir. Literatürde önerilen onarma mekanizmalarından, termoplastik takviyeli onarma mekanizması, deneysel olarak incelenmiştir. Mekanik özellikleri farklı üç yapıştırıcının termoplastik takviyesi ile kendi-kendi onarması sağlanmıştır. Onarma deneylerine başlamadan önce, deney koşullarının ve deneyi etkileyecek parametrelerin belirleneceği ön hazırlık çalışmaları yapılmıştır. Ön hazırlık aşamasında, yapıştırıcılar için uygun kürleşme sıcaklıkları belirlenmiştir. Yüksek kürleşme sıcaklığının, yapıştırıcının mekanik ve kırılma özelliklerine olumsuz etki yaptığı gözlemlenmiştir. Kürleşme sıcaklığının dışında, çekme deneyleri sırasında uygulanacak olan çekme hızının da yapıştırıcının kırılma ve mekanik özelliklerini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, onarma deneylerinde uygulanacak çekme hızı, ön hazırlık kısmında belirlenmiştir. Son olarak, termoplastik malzemenin, yapıştırıcıların mekanik davranışları üzerindeki etkisi de ön hazırlık kısmında incelenmiştir. Ön hazırlık kısmından sonra, onarma deneylerine geçilmiştir. Deneyler sonunda elde edilen yük-deplasman değerleri kullanılarak, onarma adımlarındaki kırılma enerji değerleri hesaplanmıştır. Doktora tezinde, beş farklı yöntem kullanılarak kırılma enerji değerleri hesaplanmıştır. Kırılma enerji değerleri kullanılarak, termoplastik takviyeli onarma işleminin verimliliği hesaplanmıştır. Ayrıca, mikro yapı analizi de yapılmıştır. Mikro yapı analizi kullanılarak, termoplastik

partiküllerin yapıştırıcı içerisinde homojen dağılımı ve polimerleşme durumları incelenmiştir.

Tez kapsamında, deneysel çalışmalara ilave olarak nümerik çalışmada yapılmıştır. Yapıştırıcıların kendi-kendini onarma sürecinde kohesif parametrelerin değişimleri, nümerik analizler yapılarak incelenmiştir. Nümerik analizler, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Yapıştırıcıların kohesif parametreleri, eksponansiyel ve PPR kohesif yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, deney sonuçları ile nümerik analiz sonuçlarının birbiri ile yeterince uyumlu olabilmesi için invers analiz de yapılmıştır. İnvers analiz, Matlab programında yer alan polinomial regresyon analiz ile gerçekleştirilmiştir.

Tezde elde edilen çıktılar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kopolyester termoplastik malzemenin farklı mekanik özelliklere sahip yapıştırıcıları sünekleştirdiği gözlemlenmiştir. Benzer bir davranış yapıştırıcı ve termoplastik malzemeden oluşan yapıştırma bağlantısının onarma deneylerinde de gözlemlenmiştir.
- Termoplastik takviyeli onarma mekanizmasının onarma verim değerleri oldukça yüksek elde edilmiştir. Buda, onarma deneylerinin başarılı olduğunun göstergesidir.
- En yüksek onarma verimi, yapıştırıcıların birinci iyileştirme durumlarından elde edilmiştir. Yaklaşık % 90 oranında yapıştırıcının onarılması sağlanmıştır.
- İkinci iyileştirme oranları arasında en düşük onarma verimi, Araldite 2011 epoksi yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantısında elde edilmiştir.
- İkinci iyileştirme oranları arasında en yüksek onarma verimi, Araldite Av138M epoksi yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan bindirme bağlantısında elde edilmiştir.
- Onarma verim sonuçları incelendiğinde, yapıştırma bağlantısında oluşacak olan çatlağın, tez kapsamında önerilen termoplastik takviye yöntemi ile etkin bir şekilde onarılabilceği gösterilmiştir.

- Mikro yapı analizleri sonunda yapıştırıcıların içerisine katılan termoplastik partiküllerin yapıştırıcı içerisinde homojen olarak dağıldığı ve yüksek sıcaklıkta ergiyerek polimerleştiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple kopolyester termoplastik malzemesi onarma deneylerinde kullanılan Araldite 2011, Araldite 2015 ve Araldite AV138M epoksi yapıştırıcısı ile uyumlu olduğu kanaatine varılmıştır.
- Tez kapsamında uygulanan nümerik analiz ile yapıştırıcıların kohesif parametre değişimlerinin, onarma işlemleri boyunca birbirlerine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- Üç farklı yapıştırıcının da kohesif gerilme, kohesif kritik ayrılma mesafesi ve final kohesif ayrılma mesafe değerleri nümerik analiz ile belirlenmiştir. En yüksek kohesif gerilme değeri Araldite 2011 ve Araldite 2015 epoksi yapıştırıcıların onarma durumları için elde edilmiştir. Tez kapsamında elde edilen kohesif parametreler, yapıştırıcıların teknik datalarında yer almadığından, literatüre önemli bir katkı sağlanmıştır.
- Tez kapsamında kullanılan PPR kohesif yöntemi Araldite 2015, Araldite 2011 ve Av138M epoksi yapıştırıcıları için ilk kez bu çalışmada denenmiştir.

Doktora tezinde, yapıştırma bağlantısının onarılması termoplastik takviye ile gerçekleştirilmiştir. Termoplastik malzeme olarak kopolyester termoplastik malzeme kullanılmıştır. Ancak, farklı termoplastik malzeme (kopoliamid, PVC, vb) kullanılarak da onarma mekanizmaları geliştirilebilir. Nümerik yaklaşım için de özellikle sünek davranış gösteren yapıştırıcıların modellenmesinde eksponansiyel model yerine trapezoidal kohesif yöntem yapılarak, nümerik analiz geliştirilebilir. İnvers analiz için de regrasyon analizi yerine genetik algoritma denenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Banea, M.D, Da Silva.L.F.M.,Campilho, D.S.G, Sato,C. (2014). "Smart Adhesive Joints: An Overview of Recent Developments", International Journal of Adhesion & Adhesives, 90: 16–40.
- [2] Jinguang,C, Taheri, F, Han,H.,(2006) "Strength Improvement of smart adhesive bonded joint system by partially integrated piezoelectric patches", Journal of Adhesion Science and Technology,20:503-518.
- [3] Xiaofan,L, Lauber, K. E, Mathe, P.T., (2010) "A thermally responsive, rigid, and reversible adhesive", Polymer ,51: 1169–1175.
- [4] Takashi,N, Takashima,Y, Hashidzum,A, Yamaguchi,H, Harada,A., (2014), " A metal-ion-responsive adhesive material via switching of molecular recognition properties", Nature Communications, DOI: 10.1038.
- [5] Kathleen,S, Toohey,S,R.W, Jennifer A.L, Nancy R.S.(2007), "Development of a protocol for microvascular self-healing", Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials,18-20 April 2007, Netherlands.
- [6] Henghua,J, Miller,G.M, Pety,S.J, Griffin A.S, Stradley D.S, Roach D, Sottos N.R, White,S.R.,(2013) " Fracture behavior of a self-healing, toughened epoxy adhesive", International Journal of Adhesion & Adhesives, 44: 157–165.
- [7] Brown,E.N, Kessler,M.R, Sottos,N.R, White S.R., (2003), " In situ poly(urea-formaldehyde) microencapsulation of dicyclopentadiene", Journal of Microencapsulation, 11: 603–614.
- [8] Xiao,D.S, Yuan,Y.C, Rong,M.Z, Zhang,M.Q.,(2009), "Self-healing epoxy based on cationic chain polymerization", Polymer, 50:2967–2975.
- [9] LePing,L, Wei,Z, Yi, X,HongMei,W, Yang,Z, WuJun,L.I.,(2011), "Preparation and characterization of microcapsule containing epoxy resin and its self-healing

performance of anticorrosion covering material”, Chinese Science Bulletin, 56:439–443.

- [10] Rule,J.D, Sottos,N.R, Scott R.,(2007), “White, Effect of microcapsule size on the performance of self-healing polymers”, Polymer,48: 3520-3529.
- [11] Zuev,V.V, .Lee,J, Kostromin,S.V, Bronnikov,S.V, Bhattacharyya,D. (2013) “ Statistical analysis of the self-healing epoxy-loaded microcapsules across their synthesis”, Materials Letters, 94:79–82.
- [12] Chowdhury,A.R, Mahesh,V, Hosura, M.D, Nuruddina,A.T.N.A.K, Veera,B, Shaik,J., (2015), “Self-healing epoxy composites: preparation,characterization and healing performance”,Journal of Material Research technology, DOI: 10.1016/j.jmrt.2014.10.016.
- [13] Li,G, Ji,G, Ouyang,Z., (2012), “ Adhesively bonded healable composite joint”, International Journal of Adhesion & Adhesives, 35: 59–67.
- [14] Pingkarawat,K, Wang, C.H, Warley, R.J, Mouritz,A.P., (2012) “ Self-healing of delamination cracks in mendable epoxy matrix laminates using poly[ethylene-co-(methacrylic acid) thermoplastic”, Composites,43:1301-1307.
- [15] Pingkarawat,K, Wang, C.H, Warley, R.J, Mouritz,A.P., (2014), “Mechanical properties of mendable composites containing self-healing thermoplastic agents”, Composites , 65: 10-18.
- [16] Shojaei,A, Sharafi,S, Li,G., (2015) “A multiscale theory of self-crack-healing with solid healing agent assisted by shape memory effect”, Mechanics of Materials, 81:25-40.
- [17] Li,G, Xu W., (2011) “ Thermomechanical behavior of thermoset shape memory polymer programmed by cold-compression: Testing and constitutive modeling”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 59: 1231–1250.
- [18] Xu,W, Li,G., (2010), “Constitutive modeling of shape memory polymer based self-healing syntactic foam”, International Journal of Solids and Structures, 47:1306–1316.
- [19] Li,G, Uppu,N., (2010) “ Shape memory polymer based self-healing syntactic foam: 3-D confined thermomechanical characterization”, Composites Science and Technology, 70: 1419–1427.
- [20] Yougoubare,Y.Q, Pang,S.S., (2014), “ Effects of programming and healing temperatures on the healing efficiency of a confined healable polymer composite”, Smart Material Structural, DOI:10.1088/0964-1726/23/2/025027.

- [21] Nji,J, Li,G., (2010), “ A biomimic shape memory polymer based self-healing particulate composite”, *Polymer*, 51: 6021-6029.
- [22] Li,G, Nettless,D., (2010) “ Thermomechanical characterization of a shape memory polymer based self-repairing syntactic foam”, *Polymer*, 51,:755–762.
- [23] Ratna,D, Kocsis,J.K., (2008) “Recent advances in shape memory polymers and composites: a review”, *Journal of Material Science* ,43:254–269.
- [24] Nji,J, Li,G., (2010), “ A self-healing 3D woven fabric reinforced shape memory polymer composite for impact mitigation”, *Smart Material. Structure*, DOI: 10.1088/0964-1726/19/3/035007.
- [25] Kirkby,E.L, Rule,J.D, Michaud,V.J, Sottos,N.R, White,S.R, Manso,J.E., (2008), “Embedded Shape-Memory Alloy Wires for Improved Performance of Self-Healing” *Polymers, Advance. Functional. Material*, 18: 2253–2260.
- [26] Jinguang,C, Wu,X, Li,G, Taheri,F, Pang,S.S., (2007), “Design and analysis of a smart adhesive single-strap joint system integrated with the piezoelectrics reinforced composite layers”, *Composites Science and Technology*, 67:1264–1274.
- [27] Messler Jr.,R. W., (2004). *Joining of Materials and Structures*, Elsevier, New York.
- [28] Long,Y, David,Y, Zhang,Z, Preece,J.A., (2009), “Microcapsules with low content of formaldehyde: preparation and characterization”, *Journal of Materials Chemistry*, DOI: 10.1039/b902832c.
- [29] Therriault,D, Shepherd,R.F, White,S.R, Lewis,J.A., (2005), “Fugitive Inks for Direct-Write Assembly of Three-Dimensional Microvascular Networks”, *Advanced Materials*, 17:395–399.
- [30] Mphahlele,K, Ray, S.S, Kolesnikov,A., (2017), “Self-Healing Polymeric Composite Material Design, Failure Analysis and Future Outlook: A Review”, *Polymers*, DOI: 10.3390/polym9100535.
- [31] Tekstil sayfası: termoplastik özellikleri,<https://tekstilsayfasi.blogspot.com.tr>, 01 ocak 2012.
- [32] Schaetti. High Performance Thermoplastic Copolyester-Copoliamid., <http://www.schaetti.com>, 01 January 2015.
- [33] Wu,D.Y, Meure,S, Solomon, D., (2008), “Self-healing polymeric materials: A review of recent developments”, *Progress in Polymer Science*, 33:479-522.

- [34] The Hand Book on Mechanical Maintenance: Fracture: <http://practicalmaintenance.net/?p=1135>, 01 mayıs 2012.
- [35] Gdoutos, E.E., (2005). Fracture Mechanics An Introduction, Second Edition, Springer., Netherland.
- [36] Erdogan,F., (2000), “Fracture mechanics”, International Journal of Solids and Structures, 37: 171-183.
- [37] Topçu, M. ve Taşgetiren, S., (1998). “Mühendisler için Sonlu Elemanlar Methodu”, 7, PAÜ, Mühendislik Fakültesi Matbaası , Denizli.
- [38] Erbayrak, E., (2013). “Araldite 2015 epoksi yapıştırıcı mod I kırılma tokluk değerinin deney ve sonlu elemanlar metodu ile belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [39] Franklin, V.A ve Christopher, T., (2013), “Fracture energy estimation of DCB specimens made of Glass/Epoxy: An experimental study”, Advanced Materials Science Engineering, ID:412601:1–7.
- [40] O’Brien,T.K., (1991). Composite materials: fatigue and fracture, Third Edition, ASTMSTP1110., Philadelphia.
- [41] Khoshravan, M ve Mehrabadi, F.A., (2012), “Fracture analysis in adhesive composite material/aluminum joints under mode-I loading; experimental and numerical approaches” , International Journal of Adhesion & Adhesives, 39:8-14.
- [42] Korjakin A ve Ricards R., (1998), “Comparative study of interlaminar fracture toughness of GFRP with different fiber surface treatments” , Polymer Composites, 19: 793–806.
- [43] Bardis, J. D. ve Kedward, K. T., (2002), “Surface Preparation Effects on Mode I Testing of Adhesively Bonded Composite Joints” , Journal of Composites Technology & Research, JCTRER, 24:30–37.
- [44] De Moura, M.F.S.F, Campilho, R.D.S.G, Gonçalves, J.P.M.,(2009), “ Crack Equivalent Concept Applied to the Fracture Characterization of Bonded Joints under Pure Mode I Loading”,Composites Science and Technology, 68 : 2224-2230.
- [45] Wang,Y ve William, J.G., (1992) ,“Corrections for mode II fracture toughness specimens of composites materials”, Composites Science and Technology, 43:251-256.

- [46] Carlsson, L.A, Gillespie, J.W, Pipes, JR and R.B., (1986) ,“ On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing”, Journal of Composite Materials, 20:594-603.
- [47] Van der Meer, F.P, Sluys, L.J., (2009) ,“ A phantom node formulation with mixed mode cohesive law for splitting in laminates”, International Journal of Fracture, 158:107–124.
- [48] KALİTELİ METAL ST-37: <http://ozgurdemircelik.com/st37>, 01 ocak 2018.
- [49] Julina, P.B.S, Joao, M.L.R., (2013) ,“ Thermal behavior of DGEBA (Diglycidyl Ether of Bisphenol A) adhesives and its influence on the strength of joints”, Applied Adhesion Science, 1:1-10.
- [50] Ozer, H. ve Erbayrak, E., (2016). “Experimental Investigation on the Self-Healing Efficiency of Araldite 2011 Adhesive Reinforced with Thermoplastic Microparticles”, Adhesives - Applications and Properties, 23 Kasım 2016, Hırvatistan, 169-185; Derleyen: Rudawska, A., (2016), Intech., Hırvatistan.
- [51] Campilho, R.S.G.D, Banea, M.D, Neto, J.A.B.P, da silva, L.F.M., (2013). “Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer”, International Journal of Adhesion & Adhesives, 44:48-56.
- [52] Araldite 2011 epoxy adhesive: <https://www.intertronics.co.uk/wp-content/uploads/2015/12/ara2011.pdf>, nisan 2007.
- [53] Araldite 2015 epoxy adhesive: <https://www.intertronics.co.uk/wp-content/uploads/2015/12/ara2015.pdf>, nisan 2007.
- [54] Araldite Av 138m epoxy adhesive: <http://www.lindberg-lund.fi/files/Tekniske%20datablad/VAN-AV138M-TD.pdf>, eylül 2000.
- [55] da silva, L.F.M, de Magalhães,F.A.C.G.R, Chaves, F.J.P, de Moura, M.F.S.F., (2010). “Mode II Fracture Toughness of a Brittle and a Ductile Adhesive as a Function of the Adhesive Thickness”, The Journal of Adhesion, 86:891-905.
- [56] Patel, A.K, Mathias,J.D, Michaud, P., (2013). “Polysaccharides as Adhesives: A Critical Review”, Revision of Adhesion and Adhesives, DOI: 10.7569/RAA.2013.09731.
- [57] Chen, Y, Tan,L, Chen, L, Yang ,Y, Wang,X., (2008). “Study on biodegradable aromatic/aliphatic copolyesters”, Kinetics and catalysis; reaction engineering; and materials science, DOI: 10.1590/S0104-66322008000200011.

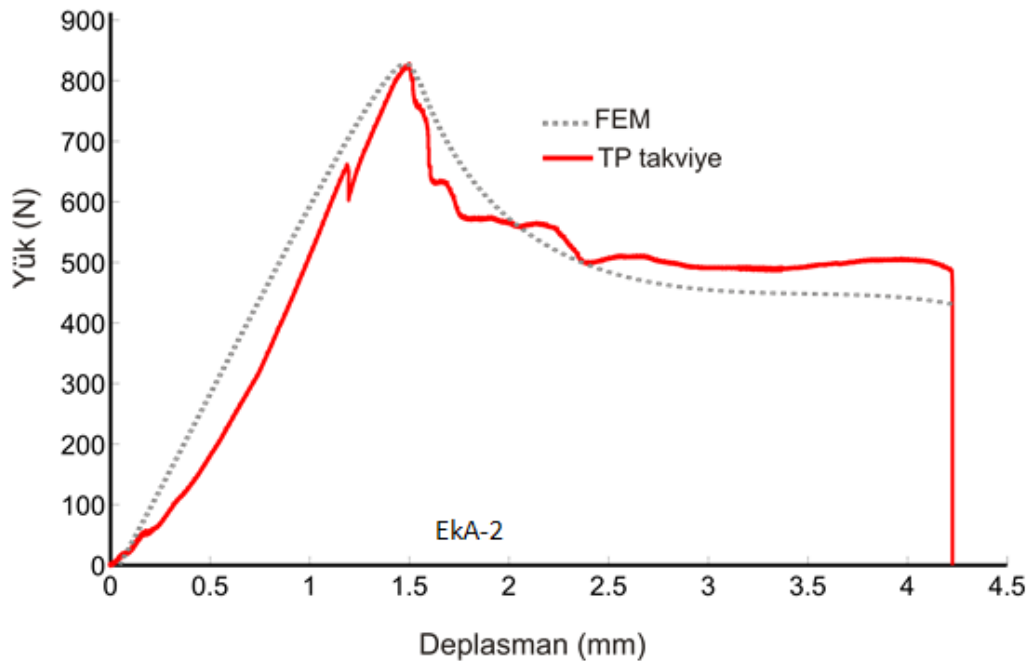
- [58] Schaetti, High Performance Thermoplastic Copolyester, http://www.schaetti.com/fileadmin/content/pdf/maerkte_produkte/4_Construction, Ekim 2012
- [59] ASTM 3433-99, (2012). Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints, ASTM, Philadelphia.
- [60] PerkinElmer Pyris, http://researchnddevelopment.com/index.php?main_page=product_info&cPath=4&products_id=66, Ocak 2018
- [61] Callister, W.D, Rethwisch, D.G., (2014). Materials Science and Engineering, Ninth Edition, Wiley., New Jersey.
- [62] 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, 90:104–119.
- [63] Newbold, P, Carlson, W.L, Thorne, B.M., (1994). Statistics for Business and Economics, Fourth Edition, Prentice Hall., New Jersey.
- [64] Prime, R.B., (1997). "Thermosets", Thermal Characterization of Polymeric Materials, 23 1997, San Diego, 453-460; Derleyen: Turi, E. A., (1997). Academic Press., ABD.
- [65] Ozer, H, Erbayrak, E., (2017). "The effects of curing temperature on fracture energy and cohesive parameters for the adhesive Araldite 2015", DOI: 10.1080/01694243.2017.1410080.
- [66] Brown, R., (2002). "Handbook of polymer testing: Short term mechanical test", First Edition Rapra Polymer Testing Series., United Kingdom.
- [67] Kusaka, T, Hojo, M, Mai, Y.W, Kurokawa, T, Nojima, T, Ochiaib, S., (1998). "Rate dependence of mode I fracture behaviour in carbon-fibre/epoxy composite laminates", Composite Science and Technology, 58: 591-602.
- [68] Li, G, Ji, G, Ouyang, Z., (2012), "Adhesively bonded healable composite joint", International Journal of Adhesion & Adhesives, 35 : 59-67.
- [69] Kozinov, S, Kuna, M, Roth, S., (2014), "A cohesive zone model for the electromechanical damage of piezoelectric/ferroelectric materials", Smart Materials and Structures, DOI : 10.1088/0964-1726/23/5/055024.
- [70] Nguyen, N, Waas, A.M., (2016), "A novel mixed-mode cohesive formulation for crack growth analysis", Composite Structural, 156: 253-262.

- [71] Van den Bosch, M.J, Schreurs, P.J.G, Geers, M.G.D.,(2006) , “An improved description of the exponential Xu and Needleman cohesive zone law for mixed-mode decohesion”. *Engineering Fracture Mechanics*, 73:1220-1234.
- [72] Campilho, R.D.S.G, de Moura, M.F.S.F, Ramantani, A.D, Morais, J.J.L, Domingues, J.J.M.S.,(2009) , “Buckling Behaviour of Carbon–Epoxy Adhesively-Bonded Scarf Repairs”. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 23:1493-1513.
- [73] Park, K, Paulino, G.H, Roesler, J.R., (2009). “A unified potential-based cohesive model of mixed-mode fracture”, *Journal of mechanical physics and solids*, 57:891-908.
- [74] Campilho, R.D.S.G, de Moura, M.F.S.F, Ramantani, A.D, Gonçalves, J.P.M., (2008). “Obtaining the cohesive laws of a trapezoidal mixed-mode damage model using an inverse method”, *Ciencia Tecnologia Materials*, 20:81-86.
- [75] Park, K, Paulino, G.H., (2012). “Computational implementation of the PPR potential-based cohesive model in Abaqus: educational perspective”, *Engineering Fracture Mechanics*, 93:239-262.
- [76] Kwon, S.H, Zhao, Z, Shah, S.P., (2008). “Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part II. Inverse analysis and softening curve”, *Cement and Concrete Research*, 38:1061-1069.
- [77] ANSYS,(2016). *Command References and Gui*,U.S.A

İNVERS ANALİZ SONUÇLARI

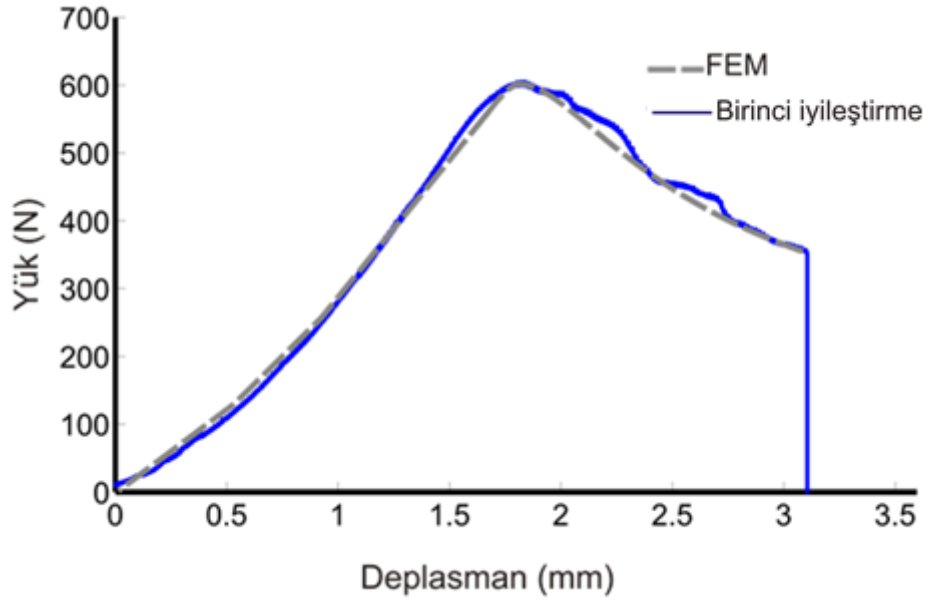
Üç yapıştırıcının invers analiz uygulanarak, onarma basamakları için elde edilen yük deplasman grafikleri verilmektedir.

Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının onarma işlemi sonunda elde edilen deneysel yük-deplasman grafiği ile invers analiz sonucun da elde edilen yük deplasman grafiği EkA-1 verilmektedir.



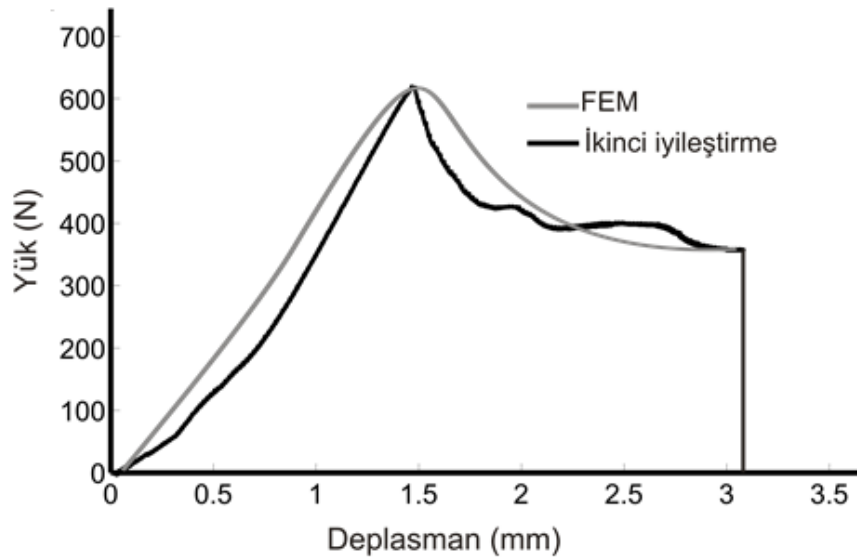
Şekil A.1

Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının birinci iyileştirme işlemi sonunda elde edilen deneysel yük-deplasman grafiği ile invers analiz sonucun da elde edilen yük deplasman grafiği EkA-2 de verilmektedir.



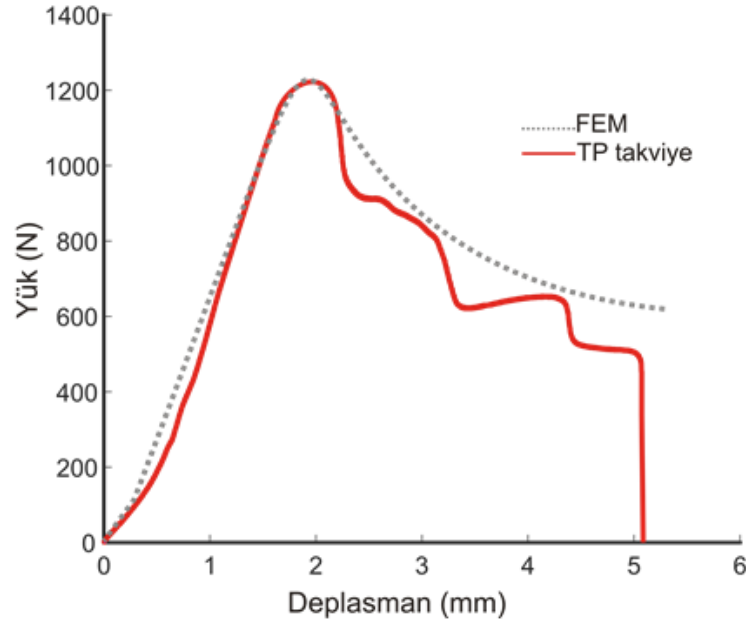
Şekil A.2

Araldite 2011 epoksi yapıştırıcının ikinci iyileştirme işlemi sonunda elde edilen deneysel yük-deplasman grafiği ile invers analiz sonucun da elde edilen yük deplasman grafiği EkA-3 de verilmektedir.



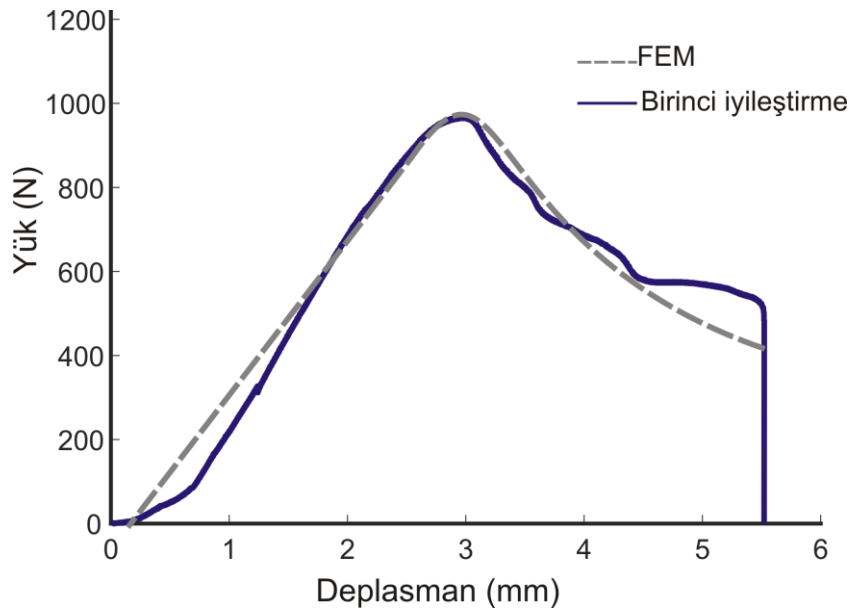
Şekil A.3

Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının onarma işlemi sonunda elde edilen deneysel yük-deplasman grafiği ile invers analiz sonucun da elde edilen yük deplasman grafiği EkA-4 verilmektedir.



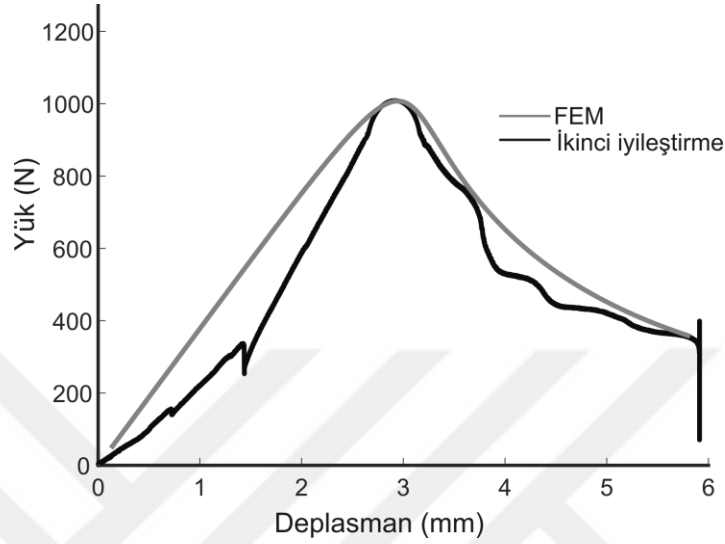
Şekil A.4

Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının birinci iyileştirme işlemi sonunda elde edilen deneysel yük-deplasman grafiği ile invers analiz sonucun da elde edilen yük deplasman grafiği EkA-5 de verilmektedir.



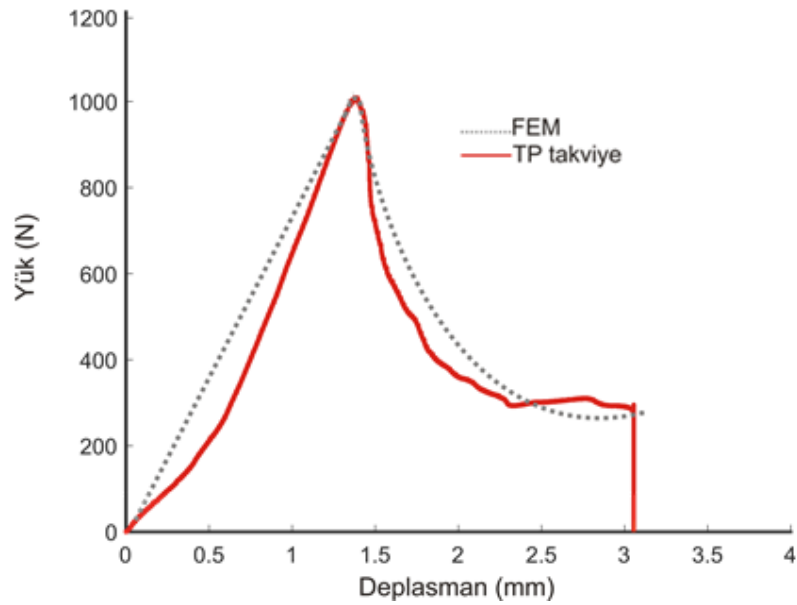
Şekil A.5

Araldite 2015 epoksi yapıştırıcının ikinci iyileştirme işlemi sonunda elde edilen deneysel yük-deplasman grafiği ile invers analiz sonucun da elde edilen yük deplasman grafiği EkA-6 de verilmektedir.



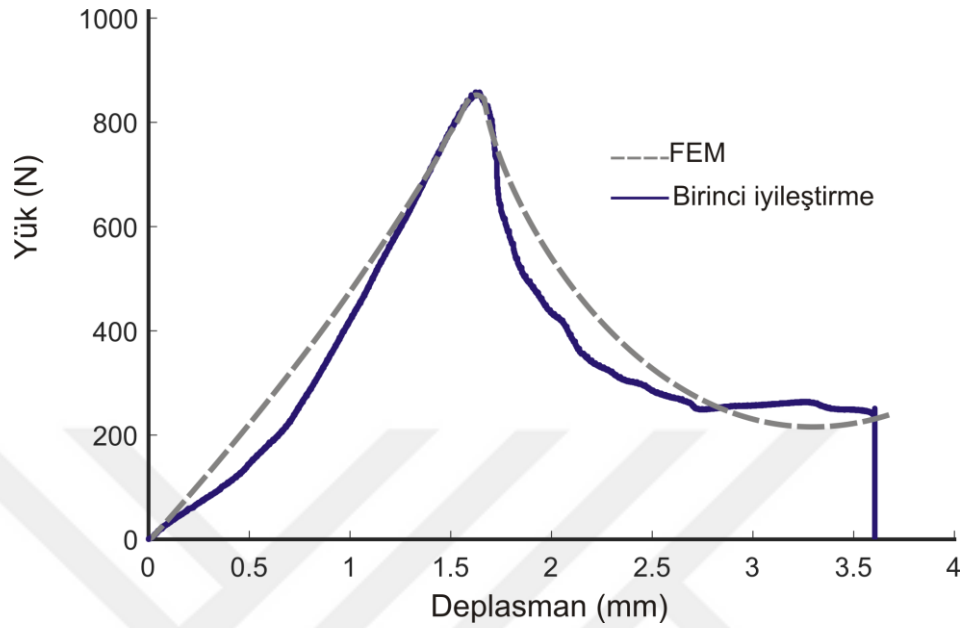
Şekil A.6

Araldite Av138M epoksi yapıştırıcının onarma işlemi sonunda elde edilen deneysel yük-deplasman grafiği ile invers analiz sonucun da elde edilen yük deplasman grafiği EkA-7 de verilmektedir.



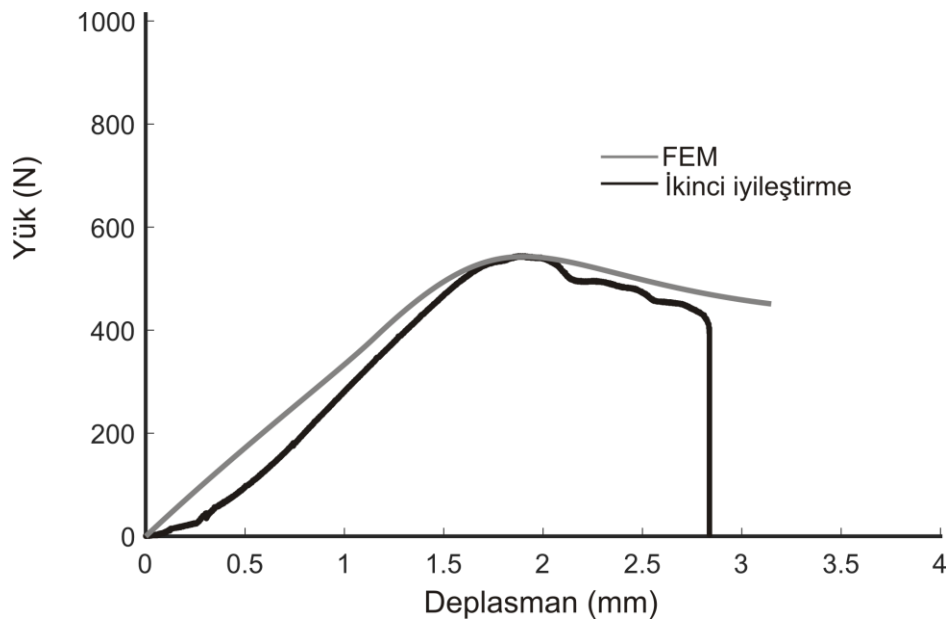
Şekil A.7

Araldite Av138M epoksi yapıştırıcının birinci iyileştirme işlemi sonunda elde edilen deneysel yük-deplasman grafiği ile invers analiz sonucun da elde edilen yük deplasman grafiği EkA-8 de verilmektedir.



Şekil A.8

Araldite Av138M epoksi yapıştırıcının ikinci iyileştirme işlemi sonunda elde edilen deneysel yük-deplasman grafiği ile invers analiz sonucun da elde edilen yük deplasman grafiği EkA-9 da verilmektedir.



Şekil A.9

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Engin ERBAYRAK
Doğum Tarihi ve Yeri : 04.11.1985, Seydişehir
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : enginerbayrak@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lisans	Makine Mühendisliği	Doğu Akdeniz Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	Antalya Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2018-Halen	Bayburt Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011- 2017	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Ozer, H, Erbayrak, E., (2017). "The effects of curing temperature on fracture energy and cohesive parameters for the adhesive Araldite 2015", Journal of Adhesion Science and Technology, 32: 1287-1312.

Bildiri

1. Erbayrak, E, Ozer, H, Erbayrak, S, Ceper, K, Agirkol, B, Guner, E., "Effect of adhesive type on free transverse vibration of single lap joint", 3rd international conference on advances in mechanical engineering istanbul 2017. Congress, 19-21 December 2017, Istanbul
2. Erbayrak, E, Ozer, H, Erbayrak, S., "Experimental Determination of Mode I Fracture Toughness of Araldite AV138M Adhesive", 15TH International Conference on Fracture and Damage Mechanics. Congress, 14-16 September 2016, Alicante
3. Erbayrak, E, Ozer, H, Ozertug, B, Ozbek, T, Ozdemir, Y., "Experimental and numerical study on determination of critical buckling load for single lap joint", International Conference On Energy Systems. Congress, 23-25 December 2015, Istanbul
4. Erbayrak, E, Ozer, H., "Effects of Loading Rate on Mode I Fracture Toughness and Cohesive Parameter". 3rd international conference on structural adhesive bonding. Congress, 2-3 July 2015, Porto
5. Erbayrak, E, Ozer, H., "Determination of Mode 1 Fracture Toughness for Araldite 2015 Epoxy: A Comparative Study", 31th Danubia-Adria Symposium, Congress, 24-27 September 2014, Kempten

Kitap

1. Ozer, H. ve Erbayrak, E., (2016). "Experimental Investigation on the Self-Healing Efficiency of Araldite 2011 Adhesive Reinforced with Thermoplastic Microparticles", Adhesives - Applications and Properties, 23 Kasım 2016, Hırvatistan, 169-185; Derleyen: Rudawska, A., (2016), Intech., Hırvatistan.

Proje

1. Kendi-kendini Onaran Akıllı Yapıştırıcı Kırılma Toklugunun Nümerik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Arastirmacı, , 26/01/2015 (Tamamlandı) (ULUSAL)

