



**KOMPOZİT YAPILARIN DİJİTAL GÖRÜNTÜ
KORELASYON TEKNİĞİYLE MEKANİK
KARAKTERİZASYONU**

Elanur ÇELEBİ KAVDIR

**Doktora Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Murat Demir AYDIN**

**2023
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ

KOMPOZİT YAPILARIN DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYON TEKNİĞİYLE
MEKANİK KARAKTERİZASYONU

Elanur ÇELEBİ KAVDIR

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2023

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

20 / 12 / 2023

Elanur ÇELEBİ KAVDIR

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KOMPOZİT YAPILARIN DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYON TEKNİĞİYLE MEKANİK KARAKTERİZASYONU

Elanur ÇELEBİ KAVDIR

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

Yapıştırma bağlantılarının birçok kritik öneme sahip endüstriyel alandaki kullanımları, onların mekanik davranışlarının belirlenmesinde güvenilir verilerin deneyel, sayısal ve analitik çalışmalarla eldesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmanın ilk aşamasında yapısal bir yapıştırıcı (DP810) ve alüminyum alaşımı yapıştırılan malzemenin (AA2024-T3) birleştirilmesi ile üretilen kompozit yapıların mekanik karakterizasyonu deneysel ve sayısal yaklaşımlar vasıtasıyla incelenmiştir. Deneysel analizlerde tüm deformasyon ölçümleri iki boyutlu dijital görüntü korelasyon tekniği (DIC) ile yapılarak; yapıştırıcıya ait elastik özellikler, Mod I ve Mod II'deki kırılma enerjileri, kohesiv bölge yaklaşımı için gerekli model parametreleri farklı deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Ayrıca, bu parametrelerin sayısal analizlerdeki güvenilirliğinin tespit edilmesi amacıyla AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve DP810 yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan açısız bindirmeli yapıştırma bağlantı numunelerinin farklı yük koşulları (çekme ve üç noktadan eğme) altındaki davranışları deneysel ve Kohesiv Bölge Modelleme (CZM) tekniği yaklaşımıyla sayısal analizleri yapılmıştır. İkinci aşamada, ilk aşamada elde edilen sonuçlar doğrultusunda deneysel parametrelerin güvenilir ve tekrarlanabilir olduğu sonucuna varılarak özellikle havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir bağlantı tipi olan T-yapıştırma bağlantısı üzerinde parametrik çalışmalar yürütülmüştür. Sonuç olarak; deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu, yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit yapıların mekanik karakterizasyonunda DIC tekniğinin önemli bir deformasyon ölçüm aracı olduğu, ayrıca, CZM tekniğinde elastik olmayan etkiler dikkate alındığından özellikle tokluğu yüksek yapısal yapıştırıcıların mekanik davranışları, hasar ve dayanım tahminlerinde doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar türettiği belirlenmiştir.

2023, 133 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Yapıştırma Bağlantıları, Dijital Görüntü Korelasyonu, Kohesiv Bölge Modellemesi, Kırılma Enerjileri, Elastik Özellikler.

ABSTRACT

Ph.D

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF COMPOSITE STRUCTURES USING DIGITAL IMAGE CORRELATION TECHNIQUE

Elanur ÇELEBİ KAVDIR

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

The use of adhesive joints in many critically important industrial areas necessitates obtaining reliable data in determining their mechanical behavior through experimental, numerical and analytical studies. In the first stage of this study, the mechanical characterization of composite structures produced by combining a structural adhesive (DP810) and an aluminum alloy bonded material (AA2024-T3) was examined through experimental and numerical approaches. In experimental analyses, all deformation measurements were made with two-dimensional digital image correlation technique (DIC); elastic properties of the adhesive, fracture energies in Mode I and Mode II, and model parameters required for the cohesive zone approach were determined using different experimental methods. In addition, in order to determine the reliability of these parameters in numerical analyses, experimental and Cohesive Zone Modeling (CZM) technique approach numerical analyzes were conducted on the behavior of scarf joint samples created using AA2024-T3 aluminum alloy and DP810 adhesive under different load conditions (tensile and three-point bending). In the second stage, in line with the results obtained in the first stage, it was concluded that the experimental parameters were reliable and repeatable, and parametric studies were carried out on the T-bonding connection, which is a connection type widely used especially in aviation applications. In conclusion; it was determined that there is a good agreement between experimental and numerical results, the DIC technique is an important deformation measurement tool in the mechanical characterization of adhesive-bonded composite structures, and since inelastic effects are taken into account in the CZM technique, the mechanical behavior, damage and strength predictions of structural adhesives with high toughness can be accurate and repeatable.

2023, 133 page

Keywords: Adhesively Bonded Joints, Digital Image Correlation, Cohesive Zone Modelling, Fracture Energies, Elastic Properties.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim hayatım boyunca çalışmalarına bilgi ve tecrübeleriyle ışık tutan ve her türlü desteği sağlayan saygı değer hocam Sayın Prof. Dr. Murat Demir AYDIN'a en samimi duygularıyla saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Öneri ve eleştirilerinden dolayı bu çalışmaya önemli katkılar sağlayan Tez İzleme Komitesi üyelerinden kıymetli Prof. Dr. İrfan KAYMAZ ve Prof. Dr. Merve MAALI hocalarıma ve Tez savunma jürimde bulunan kıymetli Prof. Dr. Adnan ÖZEL ve Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ hocalarıma saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatımdaki tüm başarılarımın en büyük mimarları olan canım anneme ve hayatta olmamasına rağmen varlığını hep hissettiğim canım babama, çalışmamın her aşamasında maddi manevi desteğini esirgemeyen sevgili eşim İbrahim KAVDIR'a, hayatımın her anında varlığı ile en büyük manevi desteği sağlayan canım oğlum Alparslan KAVDIR'a ve başta kardeşlerim olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Elanur ÇELEBİ KAVDIR
Aralık 2023

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Yapıştırıcılar ve Yapıştırma Bağlantıları	1
1.1.1. Yapıştırıcıların kullanım alanları.....	4
1.1.2. Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları	5
1.1.3. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilmeler.....	6
1.1.4. Yapıştırma bağlantılarında gerilme analizi.....	7
1.1.5. Yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi	9
1.2. Yapıştırıcıların Kırılma Enerjisinin Tespit Edilmesi	12
1.2.1. Çift ankastre kiriş deneyi (DCB)	13
1.2.2. Uç çentikli eğme deneyi (ENF).....	16
1.3. Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) Tekniği	18
1.3.1. Alt küme boyutu (subset size).....	19
1.3.2. Adım boyutu (step size)	20
1.3.3. Korelasyon kriterleri	20
1.3.4. Şekil fonksiyonları	21
1.3.5. DIC analizindeki hata kaynakları.....	22
1.4. Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Tahmini Yaklaşımları	24
1.4.1. Sürekli Ortamlar Mekaniği	24
1.4.2. Kırılma Mekaniği.....	24
1.4.3. Hasar Mekaniği	27
1.5. Kohesif Bölge Modelleme (Cohesive Zone Modelling - CZM).....	27
1.5.1. Çekme yasaları	28
1.5.2. Kırılma modları.....	33

2. KAYNAK ÖZETLERİ	35
2.1. Kırılma Enerjilerinin Tespitine Yönelik Çalışmalar	35
2.2. Eğrisel ve Açısal Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Karakterizasyonuna Tespitine Yönelik Çalışmalar.....	47
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	51
3.1. Giriş.....	51
3.2. Yapıştırıcı ve Yapıştırılan Malzemeler	52
3.2.1. Yapıştırıcı ve bulk numunelerin hazırlanması.....	52
3.2.2. Yapıştırılan malzemeler.....	53
3.3. Bağlantı Numunelerinin Hazırlanması.....	54
3.3.1. DCB ve ENF numunelerinin üretimi	54
3.3.2. TAST numunelerinin üretimi	56
3.3.3. Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının üretimi	57
3.4. Bulk Numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	58
3.5. Bağlantı Formundaki Numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	59
3.5.1. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam – DCB) deneyi.....	60
3.5.2. Uç çentikli eğme deneyi (End Notched Flexure – ENF)	64
3.5.3. TAST Deneyi.....	65
3.5.4. Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının testi	67
3.6. Sonlu Elemanlar Analizi	68
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	73
4.1. Standart Bulk Çekme Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar	73
4.2. Iosipescu Bulk Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar	77
4.3. DCB Testinden Elde Edilen Sonuçlar	80
4.3.1. MBT yönteminden elde edilen kırılma enerjisi sonuçları.....	81
4.3.2. CCM yönteminden elde edilen kırılma enerjisi sonuçları	82
4.3.3. J-integral yönteminden elde edilen sonuçlar.....	84
4.3.4. DCB deneyinde DIC analizi ile elde edilen deformasyon ölçüm sonuçları.....	86
4.4. ENF Testinden Elde Edilen Sonuçlar.....	91
4.5. Kalın Yapıştırılan Malzemeler Kullanılarak Oluşturulmuş Bağlantı Numunelerinden (TAST) Elde Edilen Sonuçlar	93
4.6. Açısal Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarından Elde Edilen Sonuçlar.....	96
4.6.1. Çekme deneyi sonuçları	96

4.6.2. Üç nokta eğme deneyi sonuçları	105
4.7. T-Yapıştırma Bağlantısının Nümerik Analiz Sonuçları.....	112
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	120
KAYNAKLAR.....	126



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Numune kesit alanı
a	Delaminasyon (çatlak) uzunluğu
a_0	İlk delaminasyon uzunluğu (mm)
b	Numune genişliği
b_{cal}	Kalibrasyon numunesinin genişliği (mm)
c	MMB test aparatının kol uzunluğu (mm)
C_{cal}	Kalibrasyon numunesinin kompliyansı (mm/N)
C_{sys}	Sistemin kompliyansı (mm/N)
E	Elastisite modülü
E_{11}	Numunenin çekme yönündeki eksenel elastisite modülü
E_{1f}	Eğmede ölçülen lif yönünde elastisite modülü
E_{22}	Numunenin yanal elastisite modülü
E_{cal}	Kalibrasyon numunesinin elastisite modülü
G	Karma mod kırılma tokluğu değeri (kJ/m ²)
G_{12}	Düzlem elastik kayma modülü
G_{13}	Numunenin düzlem dışı kayma modülü
G_I	Kırılma tokluğunun Mod-I bileşeni
G_{II}	Kırılma tokluğunun Mod-II bileşeni
h	Test numunesinin yarım kalınlığı, mm
L	Ölçüm boyu
m	Yük-deplasman eğrisinin eğimi, N/mm
m_{cal}	Kalibrasyon numunesinin yük-deplasman eğrisine ait eğim değeri
P	Yük değeri
t	Kalibrasyon numunesinin kalınlığı
T_i	Ara yüzey gerilmesi
T_I	Çekme ara yüzey gerilmesi
T_{II}	Kayma yüzey gerilmesi

$\Delta\varepsilon$	1.000 – 3.000 $\mu\varepsilon$ değerlerini içeren iki gerinim arasındaki fark
ε_i	i. noktadaki birim şekil değiştirme değeri
ε_{xi}	Eksenel yöndeki (çekme yönü) birim şekil değişim değeri
ε_{yi}	Yanal birim şekil değişim değeri
γ_{12i}	i. noktadaki kayma birim şekil değiştirme değeri
$\Delta\gamma_{12}$	1.500 – 4.000 $\mu\varepsilon$ değerlerini içeren iki gerinim arasındaki fark
τ_{12i}	i. noktadaki kayma gerilmesi değeri, MPa
$\Delta\tau_{12}$	1.500 – 4.000 $\mu\varepsilon$ değerleri arasındaki kayma gerilmeleri farkı
δ	Deplasman değeri, mm
δ_c	Maksimum gerilmedeki kritik deplasman değeri, mm
δ_i	i. noktadaki deplasman değeri, mm
δ_m	Maksimum deplasman değeri, mm
σ_i	i. noktadaki normal gerilme değeri, MPa
$\Delta\sigma$	1.000 – 3.000 $\mu\varepsilon$ değerleri arasındaki çekme gerilmeleri farkı
Γ	Yanal modül düzeltme parametresi,
ν	Poisson oranı
χ	Çatlak uzunluğu düzeltme parametresi,

Kısaltmalar

CBBM	Kompliyans Temelli Kiriş Metodu (Compliance Based Beam Method)
CC	Kompliyans Kalibrasyon Metodu (Compliance Calibration Method)
CZM	Kohesiv Bölge Modelleme (Cohesive Zone Modelling)
DCB	Çift Konsol Kiriş Testi (Double Cantilever Beam)
DIC	Dijital Görüntü Korelasyonu (Digital Image Correlation)
ENF	Uç Çentikli Eğilme Testi (End Notched Flexure Test)
FPZ	Kırılma Proses Bölgesi (Fracture Proseses Zone)
MBT	Modifiye Kiriş Teorisi (Modified Beam Theory)
MCC	Modifiye Kompliyans Kalibrasyon Metodu (Modified Compliance Calibration Method)
TAST	Kalın Yapıştırılan Malzeme Kayma Testi (Thick Adherend Shear Test)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Adhezyon ve kohezyon olayları (Loctite 1988)	2
Şekil 1.2. Yapıştırıcıların otomobil ve uçaklarda kullanıldığı bölgeler (Özenç 2007)	4
Şekil 1.3. Yapıştırma bağlantı tipleri: (a) tek tesirli bağlantı, (b) çift tesirli bağlantı, (c) boyun bindirme, (d) pah bağlantı, (e) kademeli bağlantı, (f) alın bağlantı, (g) çift takviyeli alın şerit bağlantısı (Adams and Wake 1984).....	5
Şekil 1.4. Yapıştırma bağlantılarında karşılaşılan gerilme durumları (Aydın 2003).	7
Şekil 1.5. EN ISO 527-2'ye göre çekme numuneleri (boyutlar mm cinsinden): (a) uzun numune, (b) kısa numune (da Silva et al. 2012).....	10
Şekil 1.6. (a) Iosipescu test numunesi, (b) Arcan test numunesi (ASTM D5379).....	11
Şekil 1.7. (a) TAST yönteminde deney kullanılan numuneleri (ASTM D5656, ISO11003–2), (b) TAST yönteminde kullanılan extensometre.....	12
Şekil 1.8. Üç temel çatlak açma modu; (a) Mod I, (b) Mod II, (c) Mod III (Silva 2001)	12
Şekil 1.9. DCB numunesi; (a) Menteşeler ile, (b) yükleme blokları ile (ASTM D5528).....	13
Şekil 1.10. Katsayıların gösterimi; (a) deneysel düzeltme faktörünün (Δ), (b) n katsayısı, (c) A1 katsayısı (ASTM D5528).....	15
Şekil 1.11. ENF Test Fikstürü (ASTM D7905)	16
Şekil 1.12. Kompliyans-delaminasyon uzunluğu ilişkisi.....	16
Şekil 1.13. DIC tekniğinin kurulum şeması.....	18
Şekil 1.14. DIC yönteminde görüntü eşleştirme (Crammond 2013)	19
Şekil 1.15. Deformasyondan önceki bir referans kare alt kümesinin ve deformasyondan sonraki hedef (veya deforme olmuş) altkümenin şematik gösterimi (Pan et al. 2009).....	21
Şekil 1.16. Tipik lens distorsiyonları (Bacher 2014)	23
Şekil 1.17. CZM analizlerinde kullanılan malzeme modelleri (Campilho et al. 2013)	27
Şekil 1.18. Ara yüzey elemanlarının gösterildiği nümerik model (Harper and Hallet 2008)	28

Şekil 1.19. Bağlantı yüzeyleri arasındaki nispi deplasmanların ve bilineer çekme yasasının gösterimi (Khoramishad et al. 2010).....	29
Şekil 1.20. Trapez çekme yasası (Noorman 2014)	31
Şekil 1.21. Üstel CZM yasası (Noorman 2014).....	32
Şekil 1.22. Hasar modları (Noorman 2014).....	33
Şekil 1.23. Karma mod üstel CZM yasası (Noorman 2014)	34
Şekil 2.1. ENF testi sonucunda elde edilen; (a) yük-deplasman eğrisi, (b) kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrisi (R-curve), (c) kırılma enerjisi-nispi deplasman eğrisi, (d) kohezyon yasası (Xavier et al. 2014).	36
Şekil 2.2. Deneysel CZM eğrileri; (a) normal gerilme-deplasman eğrisi, (b) kayma gerilmesi-deplasman eğrisi (de Moura 2015).	37
Şekil 2.3. Kayma gerilmesi – çatlak önü kayma deplasmanı eğrisi (Fernandes <i>et al.</i> 2015)	38
Şekil 2.4. DIC ile elde edilen eksenel ve yanal şekil değişim haritaları (Deák ve Kowalik, 2019).....	39
Şekil 2.5. Farklı deney hızlarında elde edilen gerçek CZM eğrileri; (a) 0.03 mm/dk, (b) 0.3 mm/dk, (c) 3 mm/dk (Rajan et al. 2018).	39
Şekil 2.6. Farklı deney hızlarında elde edilen çekme yönündeki yüzey gerinim haritaları; (a) 0.3 mm/dk, (b) 3 mm/dk (Rajan et al. 2018).	40
Şekil 2.7. Farklı hız oranlarında CZM eğrilerinin dağılımı (Sun et al. 2021).....	41
Şekil 2.8. DIC ve nümerik analizler ile elde edilen noktasal deplasman değerlerinin karşılaştırılması (Cricri et al. 2022).	42
Şekil 2.9. Mod-II kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrileri; (a) Doğrudan giriş metodu (DBT) ile elde edilen eğriler, (b) kompliyans temelli giriş teorisinden (CBBM) elde edilen eğriler (Reiner et al. 2022).....	43
Şekil 2.10. (a) Bulk çekme numunesi, (b) farklı zaman dilimlerine ait DIC yüzey gerinim haritaları, (c) – 37 °C ve (d) – 15 °C altındaki gerilme-gerinim tepkileri (Khafagy et al. 2022).	44
Şekil 2.11. Bağlantı numunelerinin farklı sıcaklıklardaki; (a) kuvvet-deplasman eğrileri, (b) kayma gerilmesi-sıcaklık eğrisi (Khafagy et al. 2022).....	45
Şekil 2.12. (a) Bağlantı numunesinin geometrisi, (b) bağlantı açısı ve bağlantı yükü arasındaki ilişki (Alves et al. 2018).....	49
Şekil 2.13. Bağlantı geometrisine ait yapıştırma bölgesinin gösterimi (Çitil et al. 2019)	49

Şekil 3.1. Bulk numunelerin üretim aşamalarının gösterilmesi.....	53
Şekil 3.2. (a) DCB ve ENF bağlantılarına ait üretim aşamalarının gösterilmesi.....	55
Şekil 3.3. TAST numunelerinin üretim aşamaları.....	56
Şekil 3.4. Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantısına ait geometrik özellikler	57
Şekil 3.5. DCB numunesinde yükleme sonucu oluşan dönme açıları (Simões 2022)....	59
Şekil 3.6. ENF numunesinde yükleme sonucu oluşan dönme açıları (Simões 2022).....	60
Şekil 3.7. DCB deneyi kurulumu	61
Şekil 3.8. (a)Çatlak önü deplasmanını belirlemek için kullanılan sanal noktalar, (b) çatlak uzunluğunu belirlemek için kullanılan sanal noktalar.	62
Şekil 3.9. DIC analizlerinde alt ve üst yapıştırılan malzemelerin dönme açılarının tespit edilmesinde kullanılan sanal noktaların gösterimi.	63
Şekil 3.10. DIC analizinde kullanılan; (a) A,B,C,D hatlarının gösterimi, (b) çatlak önü deplasmanı değerinin belirlenmesinde kullanılan farklı uzaklıklardaki noktaların gösterimi.....	64
Şekil 3.11. ENF deney kurulumu	65
Şekil 3.12. Çatlak önü kayma deplasmanını belirlemek için kullanılan sanal noktalar	65
Şekil 3.13. DIC analizi ile kayma özelliklerinin belirlendiği noktaların gösterilmesi ...	66
Şekil 3.14. Yapıştırma bağlantılarının; (a) çekme deneyi yük ve sınır şartları, (b) üç nokta eğme deneyi yük ve sınır şartları.....	68
Şekil 3.15. Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantısının mesh yapısı ve yük ve sınır şartları; (a) çekme, (b) üç nokta eğme.....	70
Şekil 3.16. T-bağlatısının geometrik özellikleri	71
Şekil 3.17. T-bağlatısının; (a) mesh yapısı, (b) yük ve sınır şartları	72
Şekil 4.1. Standart bulk çekme numunesi deneyi; (a) Çekme numuneleri, (b) deformasyon sonrası numuneler, (c) kırılma yüzeyleri, (d) yük- deplasman eğrileri.	73
Şekil 4.2. (a) DIC analizinde kullanılan eksenel ve yanal ekstansometrelerin gösterimi, (b) çekme numunelerinin eksenel gerinim haritaları.	75
Şekil 4.3. BULK_1 numunesinin DIC analizinde kullanılan; (a) eksenel ekstansometrelerin gösterimi, (b) yanal ekstansometrelerin gösterimi, (c) verilen ekstansometrelere ait gerinim-zaman grafiği.	76

Şekil 4.4. BULK_1 numunesinin DIC analizinde kullanılan; (a) eksenel ekstansometrelerin gösterimi, (b) verilen ekstansometrelere ait gerinim-zaman grafiği.....	77
Şekil 4.5. (a) Deney kurulumu, (b) numune yükleme durumu, (c) DIC analizi ile kayma gerinimlerinin belirlenmesinde kullanılan sanal ekstansometrelerin gösterimi, (d) Iosipescu kayma numunelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri.	78
Şekil 4.6. Iosipescu kayma numunelerinin hasara yakın bir andaki kayma gerinimi haritaları.	79
Şekil 4.7. MBT teorisinde kullanılan düzeltme faktörü.....	81
Şekil 4.8. (a) MBT yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrisi (R-curve), (b) ASTM D5528 standartında verilen başlangıç kırılma enerjisinin tespit edildiği noktaların gösterimi.	82
Şekil 4.9. CCM yönteminde kullanılan düzeltme katsayısı.	82
Şekil 4.10. CCM yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrisi.....	83
Şekil 4.11. (a) MBT ve CCM yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrilerinin karşılaştırılması, (b) DCB numunelerinin hasar yüzeyleri.	83
Şekil 4.12. J-integral yönteminde kırılma enerjisinin belirlenmesinde kullanılan yük önü dönme açıları.	84
Şekil 4.13. (a) J-integral yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi-çatlak önü açılma deplasmanı eğrisi, (b) deneysel CZM eğrisi.	85
Şekil 4.14. DCB numunesinde farklı zaman dilimlerinde oluşan eksenel gerinim haritaları ve eksenel gerinim-hat uzunluğu eğrileri; (a) $P=0$ N, (b) $P=1.076,89$ N, (c) $P=1.017,12$ N, (d) $P=748,23$ N.....	87
Şekil 4.15. Çatlak önü açılma deplasman değerlerinin değerlendirilmesinde kullanılan noktalar.	90
Şekil 4.16. Farklı uzaklıktaki noktalar arasından elde edilen nispi deplasman değerleri; (a) Çatlak ucundaki noktalardan alınan değerler (point_1,6), (b) çatlak ucunun 1 mm ilerisindeki noktalardan alınan deplasman değerleri (point_7,12).	91
Şekil 4.17. ENF deneylerinden elde edilen yük-deplasman eğrileri.....	92
Şekil 4.18. (a) ENF-1 numunesinden elde edilen R-curve, (b) ENF_1 numunesine ait yük-deplasman eğrisi.	93

Şekil 4.19. (a) kayma deplasmanının belirlenmesinde kullanılan noktaların gösterimi, (b)TAST deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi-kayma deplasmanı eğrileri.	94
Şekil 4.20. TAST ve Iosipescu deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi- kayma gerinimi eğrilerinin karşılaştırılması.	95
Şekil 4.21. (a) Yapıştırma bağlantılarının çekme yükü - yer değiştirme grafiği, (b) DIC yöntemi ile yer değiştirme datalarının belirlendiği sanal ekstansometrenin gösterimi, (c) yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri.	97
Şekil 4.22. (a) Farklı zaman dilimlerinde oluşan aksenal gerinim haritaları, (b) bindirme hattının zamana bağlı aksenal gerinim dağılımı, (c) numunenin hasar anına ait görüntüsü.	98
Şekil 4.23. (a) Referans görüntüdeki bindirme hattının (curve 1) gösterimi, (b) $P=14.189,48$ N'daki aksenal gerinim haritası (ϵ_x), (b) $P=14.189,48$ N'daki yanal gerinim haritası (ϵ_y), (d) $P=14.189,48$ N'daki kayma gerinim haritası (γ_{xy}), (e) $P=14.189,48$ N'daki eşdeğer gerinim haritası ($\epsilon_{equivalent}$) , (f) bindirme hattı boyunca oluşan düzlemsel gerinim eğrileri ($P=14.189,48$ N).	100
Şekil 4.24. Çekme yüküne maruz açısallı bindirmeli yapıştırma bağlantısının deneysel ve nümerik yüzey gerinim haritalarının karşılaştırılması; (a) karşılaştırmada kullanılan bölgenin gösterilmesi, (b) çekme yönündeki (ϵ_x) gerinim haritalarının karşılaştırılması, (c) kayma (γ_{xz}) gerinim haritalarının karşılaştırılması, (d) eşdeğer (ϵ_{eq}) gerinim haritalarının karşılaştırılması.	101
Şekil 4.25. Deneysel ve nümerik yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması.....	102
Şekil 4.26. (a) Nümerik yük-zaman eğrisi, (b) $t=10.s$ 'deki ayrılma bölgesinin detaylı gösterilmesi, (c) yapıştırıcı tabakasına ait maksimum yük değerindeki normal gerilme haritası, (d) yapıştırıcı tabakasına ait analiz sonundaki normal gerilme haritası, (e) yapıştırıcı tabakasına ait maksimum yük değerindeki kayma gerilmesi haritası, (f) yapıştırıcı tabakasına ait analiz sonundaki kayma gerilmesi haritası.	103
Şekil 4.27. (a) AB hattında oluşan normal gerilme dağılımı, (b) AB hattında oluşan kayma gerilmesi dağılımı (c) AB hattında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı.	105

Şekil 4.28. (a) Yapıştırma bağlantılarının eğme yükü - yer değiştirme grafiği, (b) yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri, (c) DIC yöntemi ile yer değiştirme datalarının belirlendiği sanal noktanın gösterimi.	106
Şekil 4.29. P=1.318,74 N'da (maksimum yük) bindirme hattı boyunca oluşan şekil değişim dağılımları.....	107
Şekil 4.30. Eğme yüküne maruz açısız bindirmeli yapıştırma bağlantısının deneysel ve nümerik yüzey gerinim haritalarının karşılaştırılması; (a) karşılaştırmada kullanılan bölgenin gösterilmesi, (b) basma yönündeki (ϵ_z) gerinim haritalarının karşılaştırılması, (c) yanal yöndeki (ϵ_x) gerinim haritalarının karşılaştırılması, (d) eşdeğer (ϵ_{eq}) gerinim haritalarının karşılaştırılması.	108
Şekil 4.31. Yapıştırma bağlantısının üç nokta eğme yükleme durumuna ait deneysel ve nümerik yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması.	109
Şekil 4.32. Yapıştırıcı tabakasında oluşan normal, kayma ve eşdeğer gerilme haritaları; (a) Basma yönündeki (σ_x), (b) σ_y , (c) σ_z , (d) τ_{xy} , (e) τ_{yz} , (f) τ_{xz} , (g) σ_{eq}	109
Şekil 4.33. Yapıştırıcı tabaksının bindirme hattında oluşan normal, kayma ve eşdeğer gerilme dağılımları (a) normal gerilmelerin kıyaslanması, (b) kayma gerilmelerinin kıyaslanması, (c) eşdeğer gerilme dağılımı, (d) AB hattı ve referans alınan eksen takımının detaylı gösterimi.	111
Şekil 4.34. T-bağlantıda oluşan von-Mises gerilme dağılımı; (a) Tip-I, (b) Tip-II, (c) Tip-III, (d) Tip-IV.....	112
Şekil 4.35. T-bağlantısında deplasman değerlerinin belirlendiği A noktasının gösterimi.....	113
Şekil 4.36. T-bağlantılarına ait nümerik yük-deplasman eğrileri.....	114
Şekil 4.37. T-bağlantısında kritik hasar yüzeylerinin gösterilmesi	114
Şekil 4.38. T-bağlantılarının kritik hasar yüzeylerinde oluşan eşdeğer gerilme haritaları; (a) TİP-I bağlantısının ABCD yüzeyi, (b) TİP-I bağlantısının GHKL yüzeyi, (c) TİP-II bağlantısının ABCD yüzeyi, (d) TİP-II bağlantısının GHKL yüzeyi, (e) TİP-III bağlantısının ABCD yüzeyi, (f) TİP-III bağlantısının GHKL yüzeyi, (g) TİP-IV bağlantısının ABCD yüzeyi, (h) TİP-IV bağlantısının GHKL yüzeyi.....	115

Şekil 4.39. T-bağlantılarının kritik AB hattında oluşan gerilme dağılımları; (a) S_x (çekme yönü), (b) S_y , (c) S_z , (d) S_{xz} , (e) S_{eq} (von-Mises gerilmesi), (f) AB hattı ve referans eksen takımının gösterilmesi. 117

Şekil 4.40. T-bağlantılarının AB ve BC hattında oluşan eş değer gerilme dağılımları. 119



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Tek tesirli bindirme bağlantılarının literatürde bulunan analitik çözümlerine genel bakış (da Silva et al. 2009).	9
Çizelge 3.1. Deneyler planı.....	51
Çizelge 3.2. AA2024-T3 alüminyum alaşım ve AISI 1040 çeliğinin mekanik özellikleri (Aydın et al. 2015).	53
Çizelge 3.3. Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının isimlendirilmesi.....	57
Çizelge 3.4. DP810 yapıştırıcısının mekanik özellikleri	69
Çizelge 3.5. T-bağlantılarının isimlendirilmesi.....	71
Çizelge 4.1. Standart bulk çekme numunesinden elde edilen sonuçlar	73
Çizelge 4.2. Iosipescu bulk numunesinden elde edilen sonuçlar.....	78
Çizelge 4.3. DCB numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	80
Çizelge 4.4. DCB numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar.	93
Çizelge 4.5. Yapıştırma bağlantılarının çekme testlerinden elde edilen sonuçlar.....	96
Çizelge 4.6. Yapıştırma bağlantılarının üç nokta eğme testlerinden elde edilen sonuçlar	105

1. GİRİŞ

Eski çağlardan günümüze, yapısal elemanların kullanım amaçlarına uygun olarak birbirine eklemek ve kullanım ömürleri süresince bir arada tutmak amacıyla birçok malzeme ve teknik (civata, perçin, kaynak, yapıştırma vb.) kullanılmıştır. Her bir yöntemin sağladığı avantaj ve dezavantajlar dikkate alındığında, yapıştırıcı ile birleştirme tekniği özellikle havacılık ve uzay sanayi, otomotiv vb. birçok endüstriyel alanda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bununla birlikte yapıştırma bağlantılarının sağladığı avantajlardan etkin bir şekilde faydalanabilmek, tasarımlarında kullanılan parametrelerin güvenilir bir şekilde belirlenmesini ve kullanım ömürlerinin maksimum seviyeye çıkarılmasını sağlayacak önlemlerin alınmasını zorunlu kılar. Bu durum, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mekanik karakterizasyonunda doğru, güvenilir ve tekrarlanabilir veriler üretecek araçların geliştirilmesine bağlıdır. Günümüzde yapıştırma bağlantıları yaygın bir biçimde çalışılmaktadır.

Bu bölümde; yapıştırıcıların genel özellikleri, sınıflandırılması, kullanım alanları, yapışma olayı, yapıştırma bağlantıları, yapıştırılacak yüzeylerin hazırlanması, yapıştırma bağlantılarında gerilme analizleri, hasar mekanizmaları ve yapıştırma bağlantılarında mekanik özelliklerin tespitine yönelik teorik bilgiler ele alınacaktır.

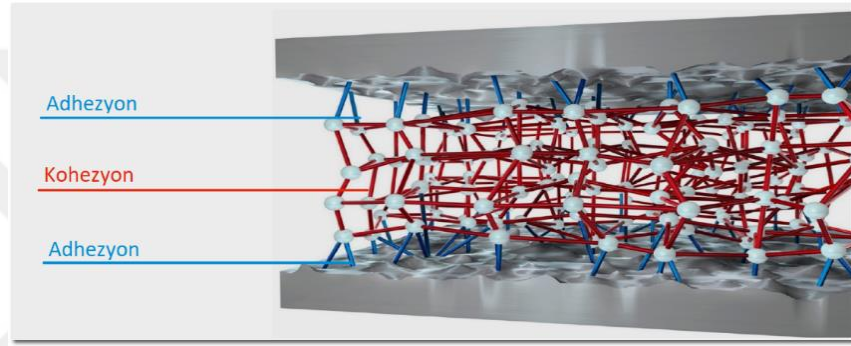
1.1. Yapıştırıcılar ve Yapıştırma Bağlantıları

Yüzeylere uygulandığında bunları bir arada tutan ve ayrılmaya karşı direnç gösteren malzeme olarak tanımlanan yapıştırıcıların kimyasal ve fiziksel özellikleri yapıştırma işleminin başarısını büyük oranda etkilemektedir. Sağlam bağlantıların oluşturulmasında yapıştırıcılar; yapıştırıcının yapışan yüzeye homojen bir şekilde dağılmasını ve yeterli ıslatmayı sağlayacak uygun viskoziteye sahip olması, yapıştırıcının yapışan yüzey ile kimyasal tepkime vermemesi ve yapıştırıcının yapışan yüzeye tam yayılımını sağlayacak yeterli yüzey gerilimine sahip olması gibi özelliklere sahip olmalıdır.

Yapışma; iki yüzeyin moleküller, iyonlar ve atomlar arası etkileşiminden doğan çekim kuvvetleriyle bir arada tutturulması olarak tanımlanan yapışma, yapıştırıcı ile

1. GİRİŞ

yapıştırılan malzeme yüzeyi arasında gerçekleşen bir olaydır (Kinloch 1987). Yapışma; adhezyon ve kohezyon olarak isimlendirilen iki temel mekanizmaya dayanmaktadır. *Adhezyon olayı* yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasındaki etkileşimden meydana gelmektedir. Bu etkileşim ara yüzey kuvvetleri (valans kuvvetleri) tarafından sağlanmaktadır. Literatürde; mekanik kilitleme, elektrostatik, kimyasal yapışma, zayıf sınır tabaka, difüzyon teorileri gibi adhezyon teorileri bulunmaktadır. *Kohezyon olayı* ise yapıştırıcının polimerizasyonu aşamasında meydana gelen yapıştırıcıyı oluşturan kütle bileşenlerinin kimyasal ve fiziksel kuvvetler tarafından bir arada tutulması olayıdır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Adhezyon ve kohezyon olayları (Loctite 1988)

Yapıştırıcılar, birçok uygulamada ihtiyacı karşılayabilme noktasında kimyasal kompozisyon, fiziksel form, uygulama şekli, fonksiyonu, maliyeti ve kullanım alanı gibi çeşitli şartlara göre sınıflandırılmaktadırlar. Kullanım alanlarına göre; yapısal, tabakalı ve basınca duyarlı olarak sınıflandırılmaktadır. Yapısal yapıştırıcılar, yapışma alanının tüm yüzey alanına oranla küçük kaldığı durumlarda kullanılan yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olan yapıştırıcılardır. Siyanoakrilatlar, akrilikler, anaerobikler, poliüretanlar, epoksiler gibi yaygın kullanılan yapısal yapıştırıcılar otomotiv endüstrisi, uzay ve uçak sanayisi gibi önemli mühendislik alanlarında kullanılmaktadır (Apalak et al. 2003).

Kullanım alanları dışında yapılarına göre yapıştırıcıların sınıflandırılmasında doğal ve sentetik yapıştırıcılar olmak üzere iki grup kullanılmaktadır. Doğal yapıştırıcılar hayvan dokuları ve bitki özlerinden elde edilmektedir. Bu gruptaki yapıştırıcılar genellikle ahşap birleştirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Sentetik yapıştırıcılar ise yapıştırma bağlantılarında doğal yapıştırıcılar ile sağlanamayan üstün mekanik ve termal

1. GİRİŞ

özellikler sağlamak amacıyla insan eliyle üretilen yapıştırıcılardır (termoset, termoplastik, elastomerik ve hibrit).

Termoset yapıştırıcılar; epoksi ve üretan yapıştırıcılar gibi ilk ısıtma sonrasında tekrar ısıtılamayan ve yumuşatılamayan yapıştırıcı malzemelerdir. Termoset yapıştırıcılarda kullanılan yapıştırıcı türüne bağlı olarak belirli sıcaklıklarda çapraz bağlanma olarak isimlendirilen geri dönüşü mümkün olmayan bir kimyasal reaksiyon ile kürleştirilmektedir (Petrie 1975; Bauer 1979).

Termoplastik yapıştırıcılar; moleküler yapıları lineer zincir veya dallanmış formda olan termoplastik yapıştırıcıları termosetlerden ayıran en önemli özelliği sıcaklık altında kürleşmemesidir. Termoplastik yapıştırıcılar ısıtıldıklarında çapraz bağlanma olmaması sebebiyle erimekte-dirler. Çapraz bağlanma olmaması sebebiyle düşük sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahip olan bu gruptaki yapıştırıcılar, yüksek sıcaklıklarda termoset yapıştırıcılara nispeten oldukça kötü mekanik özellikler sergilemektedirler. Termoplastik yapıştırıcıların uzun süreli kullanımlarındaki sürünme hasarları (Li and Dasgupta 1993; Zhang et al. 2004) kimyasal ortamlara ve çözücülere termosetler kadar dayanıklı olmamaları, yapısal alanlarda bu yapıştırıcıların kullanımına dair önemli engeller oluşturmaktadır.

Elastomerik yapıştırıcılar; yüksek tokluk ve uzamaya sahip elastomerik polimerlerden (doğal veya sentetik) elde edilen elastomerik yapıştırıcılar kendilerine özgü reolojik özelliklerden dolayı ayrı olarak sınıflandırılmaktadırlar (Christensen and McKinley 1998). Termoset veya termoplastik esaslı olabilen elastomerik yapıştırıcıların sahip olduğu yüksek viskozite ve tokluk özelliklerinden dolayı yapıştırma bağlantılarına yüksek soyulma mukavemeti ve esneklik kazandırması bu yapıştırıcıların kullanım alanlarını oldukça genişletmiştir.

Hibrit Yapıştırıcılar; farklı karakterdeki yapıştırıcı türlerinden her birinin en iyi özelliğinden faydalanabilmek amacıyla termoset, termoplastik ve elastomerik yapıştırıcıların birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Genel olarak yüksek sıcaklıklarda rijit özellik gösteren reçinelere yüksek soyulma mukavemeti ve tokluk kazandırmak amacıyla termoplastik veya elastomer reçineler ile birleştirme gerçekleştirilmektedir.

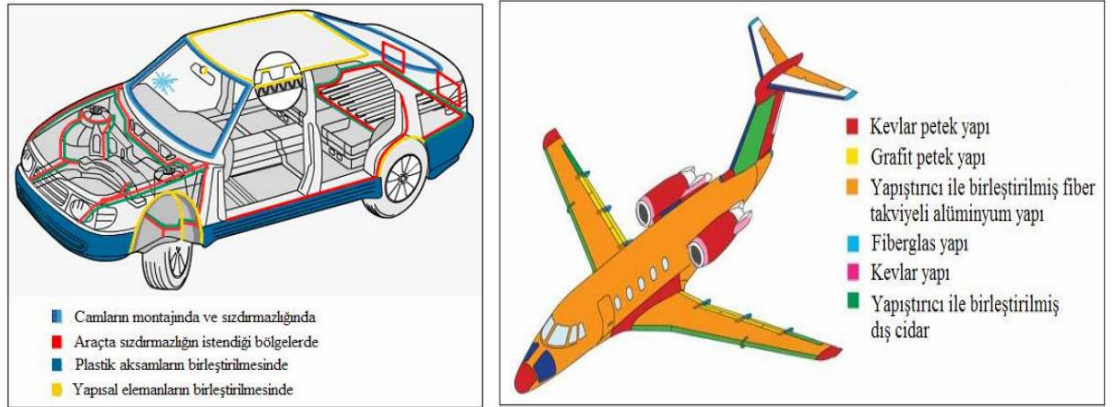
1. GİRİŞ

Ayrıca hibrit reçinelerin tokluğunu arttırılması amacıyla esnek reçineler ile de birleştirilmektedir.

1.1.1. Yapıştırıcıların kullanım alanları

Yapıştırma teknolojisindeki gelişmelerden dolayı yapıştırıcılar; otomotiv endüstrisi, inşaat sektörü, havacılık sektörü gibi önemli mühendislik alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle kompozit malzeme kullanımının artması bağlı olarak kompozit metal bağlantılarının birleştirilmesinde başka birleştirme tekniklerinin mümkün olmaması yapıştırıcıların kullanımı gerekli kılmıştır.

Otomotiv endüstrisi ile uzay ve uçak sanayinde yapıştırıcılar oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıştırıcılar otomobil tasarımında kapı panellerinin oluşturulması, cam ve plastik malzemelerin birleştirilmesi, rulmanlı yatakların montaj işlemleri gibi birçok bölgede kullanılırken (Şekil 1.2a), günümüzde uçak gövdeleri, kanatları gibi birçok bölgenin üretilmesinde yapıştırıcılar kullanılmaktadır (Şekil 1.2b).



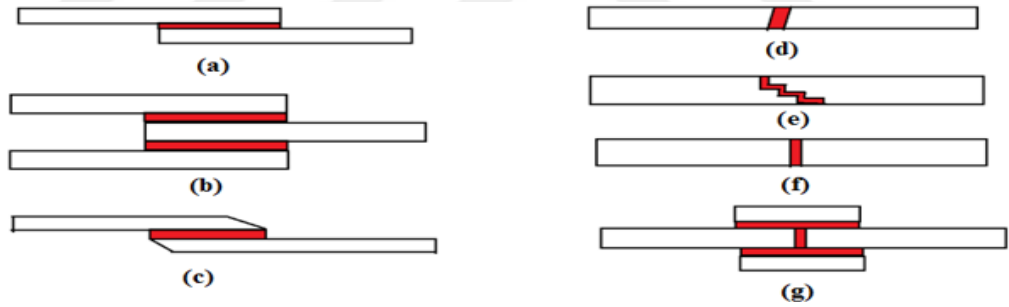
Şekil 1.2. Yapıştırıcıların otomobil ve uçaklarda kullanıldığı bölgeler (Özenç 2007)

İnşaat sektöründe, köprü tasarımlarında epoksi reçinelerin kullanılması, beton içerisine cıvataların tespitinde epoksi ve polyesterlerin kullanılması gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Ayrıca metro, tramvay, tren gibi demiryolu araçlarının hafif sürgülü kapı imalatı uygulamalarını içeren demir yolu alanında; teknelerin gövde ve üst panel bağlantı uygulamaları gibi denizcilik uygulamalarında; çiplerin montajı elektronik bileşenlerin kaplanması uygulamaları gibi elektrik elektronik alanda ve cerrahi, dişçilik

ve veterinerlik gibi alanların medikal uygulamalarında yapıştırıcıların önemli bir kullanım alanı bulunmaktadır.

1.1.2. Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları

Yapıştırma bağlantılarının tasarımı yapılırken; yapıştırılan yüzeylerin özellikleri, yüzey hazırlama teknikleri, yapıştırıcıların özellikleri gibi parametreler dikkate alınarak uygun tasarım yapılmaktadır. Örneğin; farklı genleşme özelliklerine sahip malzemelerin kullanımı ile rijit bir birleşme sistemi oluşturulmasında esnek yapıdaki yapıştırıcıların kullanılması gerekmektedir. Yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bir bağlantının yüklenmesi durumunda oluşacak yüklerin belirlenmesi ve gerekli analitik sayısal çalışmaların pratik bir şekilde yapılması yapıştırıcı teknolojisi alanında önemli bir yer tutmaktadır. Bundan dolayı Şekil 1.3'te gösterildiği gibi çeşitli bağlantı tasarımları oluşturulmuştur. Bu tasarımlar arasında en yaygın kullanılan bağlantı tipi üretim ve analizinin kolay olması sebebiyle tek tesirli bindirme bağlantılarıdır.



Şekil 1.3. Yapıştırma bağlantı tipleri: (a) tek tesirli bağlantı, (b) çift tesirli bağlantı, (c) boyun bindirme, (d) pah bağlantı, (e) kademeli bağlantı, (f) alın bağlantı, (g) çift takviyeli alın şerit bağlantısı (Adams and Wake 1984).

Geleneksel birleştirme yöntemlerinde olduğu gibi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bağlantıların önemli avantajlara sahip olmasının yanında kullanım sınırları da bulunmaktadır. Bundan dolayı yapıştırma bağlantılarının kullanım sınırları ve faydaları alanında birçok çalışma yapılmış ve bu çalışmaların birinde aşağıda belirtilen avantaj ve dezavantajlar ifade edilmiştir (Edwards 1998).

Avantajları

- Düzgün gerilme dağılımı sayesinde yüksek yük taşıma kapasitesi,
- Benzer veya farklı malzemelerin birleştirilmesi,
- Tekrarlı yük ve yorulma dayanımı,
- Düzgün birleşme yüzeyi,
- Yüksek darbe ve titreşim sönümlene kabiliyeti,
- İnce ya da kalın tüm malzeme geometrilerinde kullanılabilmesi,
- Yalıtkan olması,
- Farklı malzemeler arasında oluşan elektro kimyasal korozyonun önlenmesi,

Dezavantajları

- Özenli bir yüzey hazırlığı gerektirmesi,
- Düşük darbe ve soyulma mukavemeti,
- Yapıştırıcının mekanik özelliklerinde sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişikliklerin oluşması,
- Yapıştırma bağlantısının çevresel etkilere bağlı olarak farklı özellikler sergilemesi,

1.1.3. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilmeler

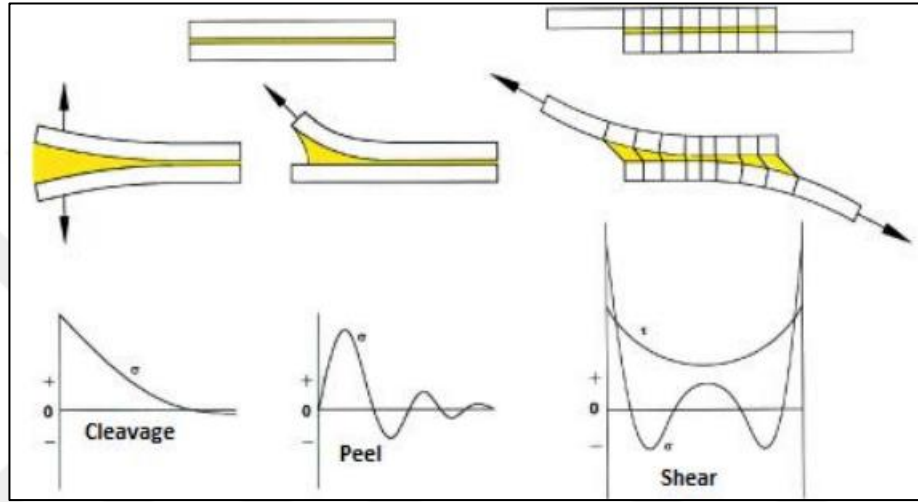
Yapıştırma bağlantıları yükleme durumlarına bağlı olarak kayma (shear), çekme (butt), soyulma (peel) ve çekme-makaslama (cleavage) olmak üzere farklı gerilmelere maruz kalmaktadır. Yapıştırma bağlantılarına kesme kuvveti etki ettiğinde gerilme yapışma alanının tamamına düzgün bir şekilde yayılacağından dolayı bağlantı ömrünü arttırmaktadır. Dolayısıyla tasarım yapılırken bağlantının mümkün oldukça kayma gerilmelerine maruz kalmasını sağlamak önemlidir. Şekil 1.4'te yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme durumları özetlenmiştir.

Yapıştırma bağlantılarına çekme ve basma yükleri etkilediğinde yapıştırma bölgesi boyunca sabit bir gerilme dağılımı oluşurken soyulma ve ayrılma gerilmelerini doğuracak yükleme durumlarında ise bağlantının uç noktalarındaki gerilme değerleri birbirinden oldukça fazla olacaktır. Çeki ve bası yüklemelerinde eksenden kaçık yükleme durumunun

1. GİRİŞ

oluşması eğilme etkisi sebebiyle bağlantının uç noktalarında yüksek gerilmelere sebep olarak erken hasara sebep olmaktadır.

Bağlantı sınırlarında çok yüksek gerilmelere sebep soyulma gerilmelerinin oluşumu yapıştırılan malzemelerden birinin veya her ikisinin de esnek olmasını gerektirmektedir (Hart-Smith 1985). Bu tür yüklemelerin oluşma ihtimali olan durumlarda geniş bağlantı alanı kullanımı ve düşük yük uygulamaları gerekmektedir.



Şekil 1.4. Yapıştırma bağlantılarında karşılaşılan gerilme durumları (Aydın 2003)

1.1.4. Yapıştırma bağlantılarında gerilme analizi

Yapıştırma bağlantıları yapıştırma teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak yüksek güvenlik önlemleri gerektiren havacılık alanı da dahil olmak üzere birçok mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarının belirlediği güvenlik sınırları içerisinde yapıştırma bağlantılarının etkin bir şekilde kullanımı bağlantıların maruz kaldığı yükleme durumlarına bağlı olarak gerilme analizlerinin yapılmasını gerekli kılmıştır. Bu bağlamda, birçok deneysel ve nümerik çalışmalar yapılarak yapıştırma bağlantılarında oluşacak gerilmelerin analitik ve sayısal çözümleri ortaya konulmuştur.

Literatür incelendiğinde farklı formlarda bulunan yapıştırma bağlantılarının gerilme analizleri üzerine teorik çözümler sunan analitik yaklaşımlara yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar içerisinde tek tesirli bindirme bağlantılarının

(üretim ve analiz kolaylığından dolayı) gerilme analizleri üzerine çalışmalar oldukça geniş yer almaktadır. Tek tesirli bindirme bağlantıları üzerine yapılan çalışmalar; Volkersen (1938) tarafından yapılan analitik çalışmaya dayanmaktadır. Bu çalışmada; yapıştırıcı tabakada sadece kayma deformasyonunun olduğu ve yapıştırılan malzemelerin ise sadece çekme yükü etkisi ile deforme olduğu yani eksenden kaçık çekme yükünün etkisi ile oluşacak eğilme etkisinin ihmal edildiği bir analitik yaklaşım ile çözümler gerçekleştirilmiştir. Ancak eğilme etkisinin özellikle bağlantının uç noktalarında yüksek gerilmeler sebep olması açısıyla Goland and Reissner (1944) tarafından yapılan çalışmada bu etkiyi dikkate alan bir analitik yaklaşım sunulmuştur. Yapıştırılan malzemelerde oluşan dönme etkilerinin yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımına etkisi üzerine Oplinger (1994) tarafından dikkate alınarak çalışmalar yapılmıştır. Yapıştırma bağlantılarındaki önemli geometrik parametrelerden olan bindirme uzunluğu ve yapıştırıcı tabaka kalınlığı değerlerindeki değişimlerin tek tesirli bindirme bağlantılarının serbest uçlarında oluşan dönmeler üzerine etkileri Tsai and Morton (1994a) tarafından yapılan analitik çalışma ile sunulmuştur. Çizelge 1.1’de tek tesirli bindirme bağlantılarının analitik çalışmalarına ait literatürde bulunan çalışmalar özetlenmiştir.

1. GİRİŞ

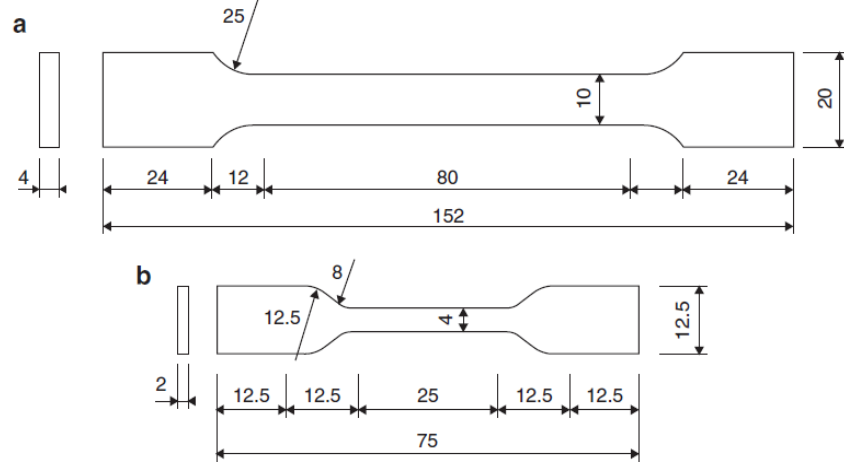
Çizelge 1.1. Tek tesirli bindirme bağlantılarının literatürde bulunan analitik çözümlerine genel bakış (da Silva et al. 2009).

	Malzeme		Yapıştırılan Malzeme Tipi				Yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilmeler			Çözüm Yöntemi				
	Yapıştırıcı		Yapıştırılan		İzotropik	Kompozit	Aynı	Farklı		σ_x	σ_y	τ_{xy}	Analitik	Sayısal
	Linear	Non-Linear	Linear	Non-Linear				Kalınlık	Malzeme					
Volkersen [1]	X		X		X		X	X				X	X	
Goland and Reissner [2]	X		X		X		X			X	X		X	
Wah [21]	X		X		X	X	X	X			X	X	X	X
Hart-Smith [13,50]	X	X	X		X		X			X	X		X	
Pirvics [22]	X		X		X		X	X	X	X	X			X
Grimes and Greimann [58]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
Renton and Vinson [23–24]	X		X		X	X	X	X	X	X	X			
Srinivas [25]	X		X		X	X	X	X	X	X	X		X	
Allman [18]	X		X		X	X	X			X	X		X	
Ojalvo and Eidinoff [16]	X		X		X		X		X	X	X		X	
Detale et al. [32]	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	
Bigwood and Crocombe [12]	X		X		X		X	X	X	X	X			X
Bigwood and Crocombe [51]	X	X	X		X		X	X	X	X	X		X	
Cheng et al. [26]	X		X		X		X	X	X	X	X			X
Crocombe and Bigwood [59]	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X			X
Adams and Mallick [31]	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X		X	
Tong [54]	X	X	X		X		X			X	X		X	
Yang and Pang [27]	X		X		X	X	X	X	X	X	X			X
Frostig et al. [48]	X		X		X	X	X	X	X	X	X			X
Sawa et al. [28]	X		X		X		X	X	X	X	X			X
Mortensen and Thomsen [33]	X	X	X		X	X	X	X	X		X			
Adams et al. [61]	X	X	X	X	X		X						X	
Wang et al. [60]	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X			X
Smeltzer and Klang [56]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X

Yapıştırma bağlantılarında analitik yaklaşımlar ile çözümün mümkün olmayacağı karmaşık gerilme durumlarında sayısal çalışmalar; çeşitli yükleme durumlarını içeren deneyler ile belirlenen güvenilir ve tekrarlanabilir dataların kullanılması ile yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeye ait uygun malzeme modellerinin kurulması şartıyla güvenilir çözümler sunmaktadır.

1.1.5. Yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Yapıştırıcıların kullanım alanlarında belirlenen güvenlik sınırları içerisinde güvenilir bir şekilde kullanılması, kullanım alanındaki performansının belirlenmesi ve ileri tasarım modellerinin oluşturulması noktasında yapıştırma teknolojisi alanında yapılması gereken en temel çalışma yapıştırıcıların ve yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesidir. Bu çalışmalara ait deneyler; sadece yapıştırıcılar kullanılarak üretilen bulk numunelere ait deneyler ve bağlantının kullanım alanındaki yükleme durumunu en iyi temsil edecek bağlantı numunelerinin kullanılması ile yapılan deneyler olmak üzere iki temel bölüm altında incelenmektedir.



Şekil 1.5. EN ISO 527-2'ye göre çekme numuneleri (boyutlar mm cinsinden): (a) uzun numune, (b) kısa numune (da Silva et al. 2012).

Yapıştırıcıların, test numunesi geometrisine uygun olarak üretilmiş kalıp içerisine enjekte edilmesi veya plakalar arasında basınç uygulanmasıyla üretilen *bulk numuneler* üzerinden yapılan deneyler yapıştırıcıların çekme ve kayma mekanik özelliklerinin tespitine yönelik testlerdir. Bulk çekme numuneleri Şekil 1.5'te verilen geometrilerde üretilerek 1 mm/dk 'lık şekil değişim hızı ve 25°C ve %50 nem içeren çevresel şartlar altında yapılmaktadır. Üretilen bulk numune kalınlığının yapıştırıcıların kullanım yerini temsil edecek düzeyde ve üretim hatalarının minimum seviyede barındıracak incelikte olması önemlidir. Ancak ince numunelerin üretiminin zor olası sebebiyle genellikle 2 mm kalınlığında numuneler üretilmektedir. Bulk çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme-gerinim ilişkileri vasıtasıyla yapıştırıcıya ait elastisite modülü, poisson oranı, akma gerilmesi gibi mekanik özellikler belirlenmektedir.

Bulk numunelerin kayma testlerinde, numune geometri şekli ve yükleme tipi farklılığını içeren V-çentikli kiriş kayma yöntemi (Iosipescu) ve çentikli plaka kayma yöntemi (Arcan) olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Şekil 1.6'da bu numunelere ait standartlarda bulunan geometrik ölçüler verilmiştir.

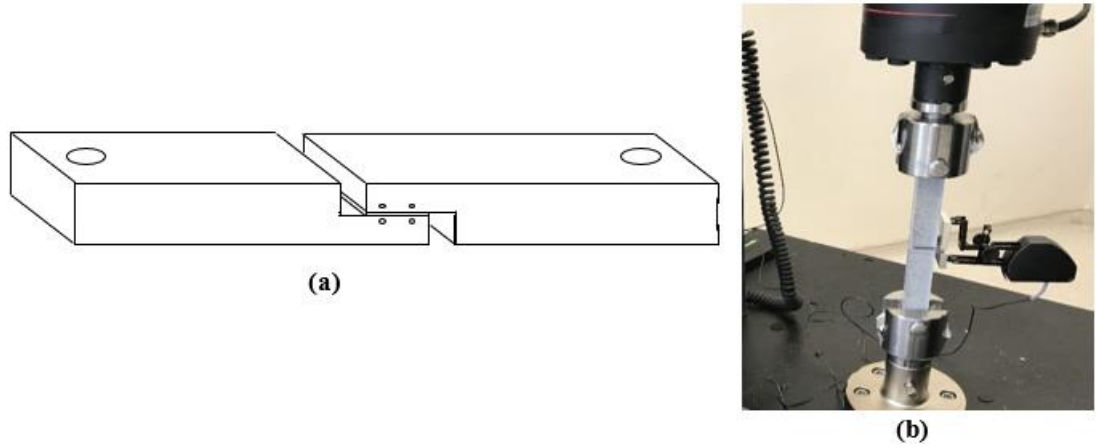


(b)

üzere Denklem 1.1’de belirtilen şekilde tespit edilmektedir.

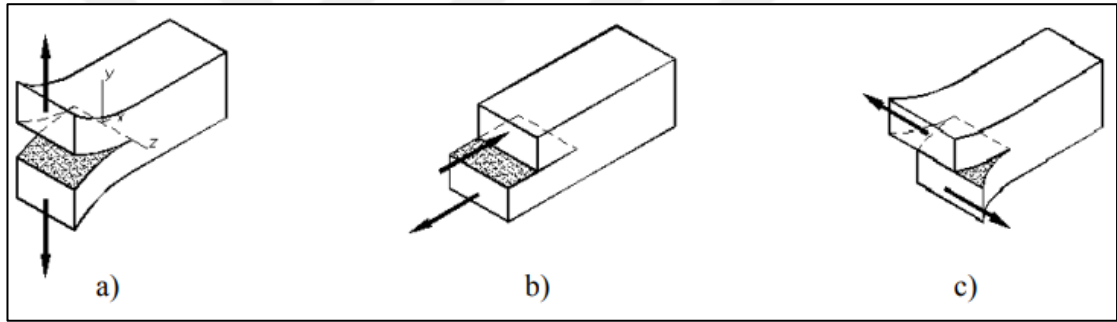
(1.1)

değiştirme eğrisi, kayma modülü vb.) tespit edilmektedir.



Şekil 1.7. (a) TAST yönteminde deney kullanılan numuneleri (ASTM D5656, ISO11003–2), (b) TAST yönteminde kullanılan extensometre.

1.2. Yapıştırıcıların Kırılma Enerjisinin Tespit Edilmesi



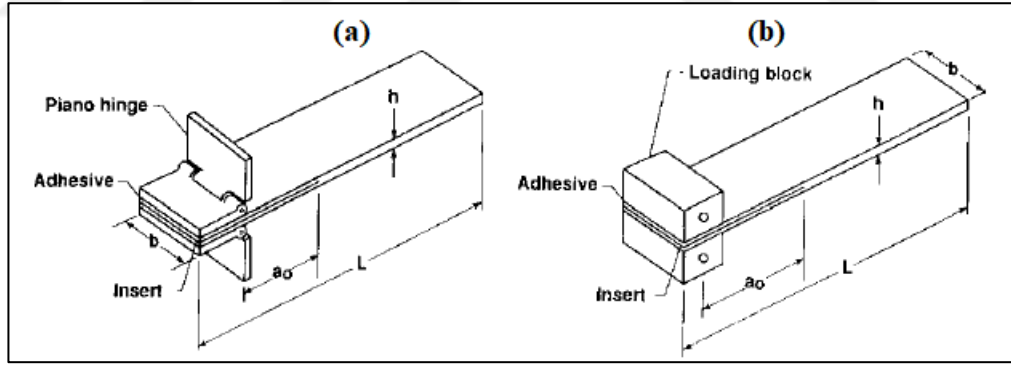
Şekil 1.8. Üç temel çatlak açma modu; (a) Mod I, (b) Mod II, (c) Mod III (Silva 2001)

Lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımı analizlerde çatlak içeren ara yüzey elemanı yükleme durumuna bağlı olarak temelde Mod I (açılma modu), Mod II (kayma modu) ve Mod III (karma mod) olmak üzere üç farklı çatlak ilerleme modu ile hasara uğramaktadır (Şekil 1.8). Çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan kırılma enerjisi önemli bir malzeme parametresi olmakla birlikte malzemelerin kırılma dayanımının ölçüsü olarak bilinen kırılma tokluğu değerinin belirlenmesinde de önemli bir parametredir. Literatür incelendiğinde; yapıştırma bağlantılarındaki çatlak ilerlemesi esnasında ortaya çıkan kırılma enerjisinin tespitinde farklı yöntemler kullanılmakla birlikte Mod I yükleme durumunda Çift Ankastre Kiriş (Double Cantilever Beam – DCB) ve Mod II yükleme durumunda ise Uç Çentikli Eğme (End Notched Flexure – ENF) deneyleri yaygın olarak yapılmaktadır.

1.2.1. Çift ankastre kiriş deneyi (DCB)

DCB deneyi Mod I yükleme durumunda ortaya çıkan kırılma enerjisinin tespit edilmesinde yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu deney sonucunda elde edilen yük, deplasman ve çatlak uzunluğu dataları vasıtasıyla DCB testine uygun hazırlanan standartlarda belirtilen data indirgeme metotları kullanılarak Mod I kırılma enerjisi tespit edilmektedir. DCB deney analizini içeren ASTM D5528 ve ASTM D3433 standartları Mod I kırılma enerjisinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında ASTM D5528 standardında yer alan talimatlar doğrultusunda yapılan deneyler yer aldığından ve yine aynı standartta yer alan kırılma enerjisi hesaplama prosedürü kullanıldığından dolayı bu standartta ait detaylı bilgi aşağıda özetlenmiştir.

ASTM D5528: Bu test yöntemi, sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerin Şekil 1.9'da verilen çift konsol kiriş (DCB) numunesi vasıtasıyla Mod I interlaminer kırılma tokluğunu (G_{IC}) belirlenme prosedürünü açıklamaktadır. Ancak yapıştırma bağlantılarının analizinde de kullanılmaktadır.



Şekil 1.9. DCB numunesi; (a) Menteşeler ile, (b) yükleme blokları ile (ASTM D5528)

DCB testinde çatlak ilerlerken, kırılma tokluğunun önce ciddi bir şekilde arttığı, ilerleyen delaminasyon gelişimine bağlı olarak sonra stabil hale geldiği direnç tipi hasar davranışı gözlemlenmektedir. Bu davranışı karakterize eden direnç eğrisi (R-curve) kırılma tokluğunun delaminasyon uzunluğuna bağlı bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir.

1. GİRİŞ

Bu test yönteminde DCB numunelerinin testi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmektedir. İlk olarak 1-5 mm/dk'lık bir deplasman hızı ile yaklaşık 5 mm delaminasyon uzunluğuna kadar ön yükleme yapılmakta ve yük geri boşaltılmaktadır. Sonrasında ilk yükleme ile elde edilen ön çatlaklı numune 1-5 mm/dk'lık sabit deplasman hızı ile son delaminasyon uzunluğuna kadar deney durdurulmadan devam ettirilmektedir.

Mod I kırılma tokluğunun değerlendirilmesinde; modifiye edilmiş kiriş teorisi (MBT), kompliyans kalibrasyon metodu (CC) ve modifiye edilmiş kompliyans kalibrasyon metodu (MCC) olmak üzere üç farklı data indirgeme metodu kullanılmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda MBT metodunun daha doğru sonuçlar vermesinden dolayı bu metodun kullanımı, ASTM D5528 standartında önerilmektedir.

DCB testi sonucunda elde edilen; yük (cihazın yük hücresinden elde edilen), çatlak ucu açılma deplasmanı ve delaminasyona ait deneysel datalar (DIC yöntemi, gezici mikroskop, cihaz strokundan elde edilen) her bir data indirgeme metodunun hesabında kullanılan temel verilerdir.

Modifiye kiriş teorisi (MBT):

$$G_I = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (1.2)$$

Burada; P : deneysel yük, δ : yük önü açılma deplasmanı, b : numune genişliği ve a : çatlak uzunluğunu ifade etmektedir.

Deneye başlamadan önce kiriş mükemmel bir şekilde konumlandırılmayacağından dolayı çatlak önünde dönmeler meydana gelecek ve bu durumda Denklem 1.2'de verilen ifade kullanılırsa yüksek bir kırılma tokluğu değeri elde edilecektir. Kırılma tokluğu değerine ait sonucun doğruluk hassasiyetini arttırmak amacıyla bu dönme etkisi, deneysel olarak elde edilen bir düzeltme faktörünün (Δ), delaminasyon uzunluğuna eklenmesi ile giderilebilir (Denklem 1.4).

Δ : $C^{1/3}$ - a eğrisinden elde edilen değer (Şekil 1.10a), C : Kompliyans değeri

1. GİRİŞ

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (1.3)$$

$$G_I = \frac{3P\delta}{2b(a + \Delta)} \quad (1.4)$$

Kompliyan kalibrasyon metodu (CC):

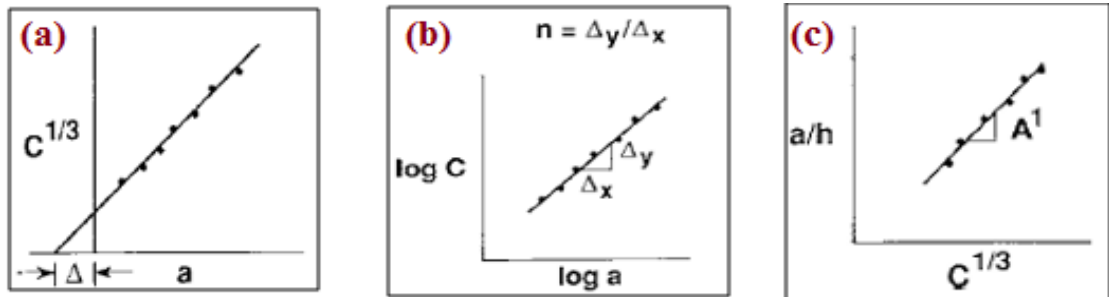
$$G_I = \frac{nP\delta}{2ba} \quad (1.5)$$

Bu data indirgeme metodunda kırılma tokluğu değeri n ile ifade edilen üstel bir katsayının etkisi ile belirlenmektedir. Bu katsayı $\log C - \log a$ eğrisinin eğiminden elde edilmektedir (Şekil 1.10b).

Modifiye edilmiş kompliyan kalibrasyon metodu (MCC):

$$G_I = \frac{3P^2 C^{2/3}}{2A_1 b h} \quad (1.6)$$

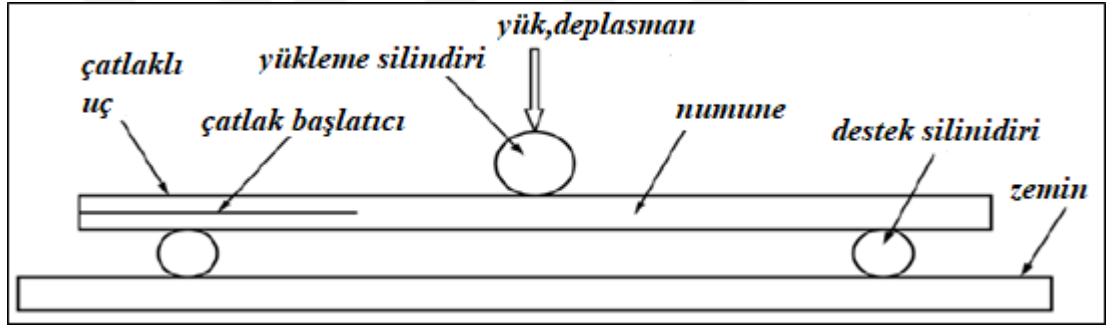
MCC metodunda delaminasyon uzunluğunun numune kalınlığına oranı ve kompoliyan eğrisinden elde edilen (Şekil 1.10c) A_1 katsayısı ile modifikasyon yapılmıştır.



Şekil 1.10. Katsayıların gösterimi; (a) deneysel düzeltme faktörünün (Δ), (b) n katsayısı, (c) A_1 katsayısı (ASTM D5528).

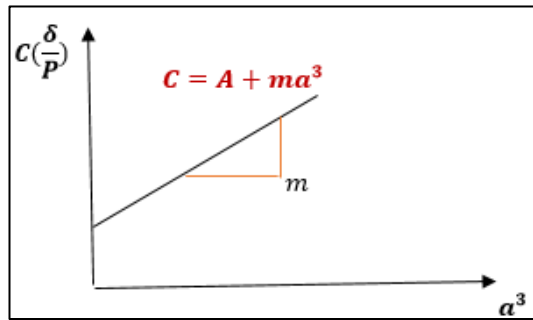
1.2.2. Uç çentikli eğme deneyi (ENF)

ENF deneyi yapıştırma bağlantılarının Mod II kırılma enerjisinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu test yönteminde; lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımıyla veri analizlerini içeren ASTM D7905 standartında belirtilen CCM (kompliyans kalibrasyon metodu) ve non-lineer kırılma mekaniği yaklaşımıyla çatlak uzunluğu ölçümü gerektirmeyen CBBM (kompliyans temelli kiriş metodu) yöntemleri kullanılarak kırılma enerjisi belirlenmektedir. Bu test yöntemi, tek yönlü fiber takviyeli polimer matrisli kompozit laminatların Mod II kayma yüklemesi altında, Mod II interlaminar kırılma tokluğunun Şekil 1.11’de verilen uç çentikli eğme (end-notched flexure-ENF) testi kullanılarak belirlenmesini açıklamakla birlikte yapıştırma bağlantılarının Mod II kırılma enerjisi tespitinde de kullanılmaktadır.



Şekil 1.11. ENF Test Fikstürü (ASTM D7905)

Kompliyans kalibrasyon metodu (CC): Bu metoda göre G_{II} değeri Denklem 1.7’de verilen eşitlik ile belirlenmektedir.



Şekil 1.12. Kompliyans-delaminasyon uzunluğu ilişkisi

$$G_{II} = \frac{3mP^2a^2}{2B} \quad (1.7)$$

$$C = A + ma^3 \quad (1.8)$$

Burada A, m ifadeleri $C - a^3$ eğrisinin en küçük kareler regresyon analizi ile elde edilen değerleridir (Şekil 1.12). B değeri ise numune genişliğidir.

Kompliyans temelli kırılganlık metodu (CBBM): CBBM analiz yöntemi Mod II kırılma tokluğunun tespit edilmesinde çatlak uzunluğu ölçümünü gerektirmeyen bir yöntemdir. Bu yöntemde, eğme testi sonucunda elde edilen P- δ (Yük-deplasman) dataları kullanılarak malzeme uyumluluğunun çatlak önündeki elastik olmayan gerilme alanından etkilendiği olgusunun dahil edildiği bir kırılma enerjisi değeri elde edilmektedir. Dolayısıyla çatlak ilerlemesi esnasında kırılma proses bölgesi (Fracture Process Zone-FPZ) etkisini gerçek çatlak uzunluğuna dahil ederek yeni bir kompliyans ifadesi elde edilmektedir (Denklem 1.9). Ayrıca bu yöntemde yük-deplasman ilişkisi dikkate alınarak ilk uyum C_0 ve ilk çatlak uzunluğu a_0 değerlerinin kullanılmasıyla numunelerin eğilme modülleri (Denklem 1.10) hesaplanabildiğinden dolayı numune değişkenliğinin sonuçlar üzerindeki etkisi azaltılmış olmaktadır.

$$C = \frac{3(a + \Delta a_{FPZ})^3 + 2L^3}{8E_f B h^3} + \frac{3L}{10G_{13} B h} \quad (1.9)$$

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8B h^3} \left(C_0 - \frac{3L}{10G_{13} B h} \right)^{-1} \quad (1.10)$$

$$a_{eq} = a + \Delta a_{FPZ} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3} \quad (1.11)$$

$$C_{corr} = C - \frac{3L}{10G_{13} B h} \quad (1.12)$$

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10G_{13}Bh} \quad (1.13)$$

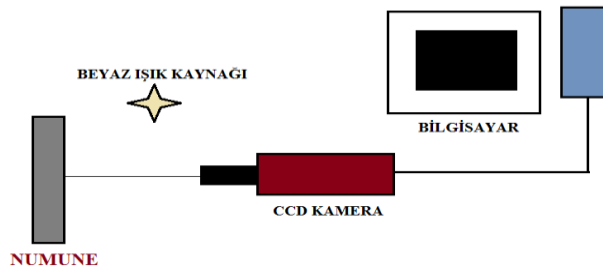
$$G_{II} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3} \quad (1.14)$$

1.3. Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) Tekniği

Malzeme ve yapıların çeşitli statik ve termal yüklemeler altındaki gerinim durumlarının analizi deneysel mekanik alanının temel görevleri arasında yer almaktadır. Geleneksel gerinim ölçerler lokal gerinimlerin tespitinde deneysel mekanik alanında çok yaygın kullanılmasına rağmen yerinde deformasyon ölçümü, tam alan deformasyon gibi çeşitli gerekliliklerden dolayı interferometrik ve korelasyon temelli yaklaşımları içeren optik tabanlı gerinim ölçerlerin geliştirilmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

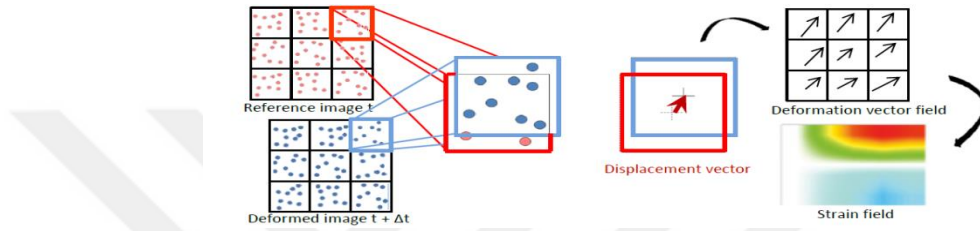
İnterferometrik yaklaşımlarda gerinim analizleri, faz analizi aracılığıyla testten önce ve sonra numune yüzeyinden saçılan ışık dalgasının faz farkının işlenmesiyle gerçekleştirilmektedir. DIC tekniğinde ise çeşitli korelasyonlar yardımıyla deneyden önce ve sonra aynı ışık yoğunluğuna sahip alt bölgelerin eşleştirilmesi ile deformasyon analizleri yapılmaktadır.

Deformasyon ölçümlerinde uzaysal çözünürlük ve dinamik performanslar açısından büyük esneklik sağlayan DIC yöntemi, düşük gerinim düzeylerinin ölçümünde ve yetersiz görüntü, yükleme, yanlış korelasyon gibi çeşitli hata kaynaklarından dolayı istenen sonuçları vermemektedir.



Şekil 1.13. DIC tekniğinin kurulum şeması

DIC yöntemi sadece düzlemsel etkilerin incelendiği 2B-DIC ve düzlem dışı etkilerin de dahil edildiği 3B-DIC tekniği olmak üzere iki analiz tekniği içermektedir. DIC analizinde temeli; deney öncesinde numune üzerine oluşturulan rastgele desenler sayesinde farklı gri seviye yoğunluklu alt bölgeler (subset) içeren numunelerin deney öncesi ve sonrasına ait görüntülerinin; çapraz korelasyon (CC), mutlak farkların toplamı (SAD), kareler toplamı (SSD) ve kareler farkının parametrik toplamı (PSSD) gibi çeşitli korelasyonlar yardımı eşleştirilmesine dayanmaktadır. DIC tekniğine ait deneysel kurulum ve görüntü eşleştirme görselleri Şekil 1.13 ve 1.14’te verilmiştir.



Şekil 1.14. DIC yönteminde görüntü eşleştirme (Crammond 2013)

1.3.1. Alt küme boyutu (subset size)

DIC yönteminde, rastgele patern yapısına sahip yüzeydeki noktaların deformasyon sonrası konumuna dair inceleme yapabilmek amacıyla görüntüler bu noktaları merkez kabul eden alt bölgelere ayrılmaktadır. Uygun büyüklükte alt bölge boyutunun belirlenmesi DIC analizinin doğruluğu açısından önemlidir. Seçilen alt bölge boyutu numunenin yüzeysel benek yapısına önemli ölçüde bağlı olmakla birlikte içerisinde yeterli gri seviye bilgisini içerecek kadar büyük olmalıdır. Lecompte et al. (2006) tarafından yapılan çalışmada sonlu elemanlar modeline dayalı bir benek modelinin deformasyonunu simüle ederek ideal bir alt küme boyutu seçilebilmeye çalışılmıştır. Ayrıca yazarlar tarafından yapılan bir deney ile simüle edilmiş heterojen ve homojen deformasyonların daha büyük alt kümelerde daha doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Pan et al. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada ise bir benek modeli için en uygun alt küme boyutunu belirlemek için bir yöntem geliştirdi. Yazarlar bu yöntemi kullanarak alt küme boyutunun üç referans görüntü üzerindeki etkisini incelediler ve alt küme boyutu arttıkça standart sapma hatalarının azaldığını gözlemlediler. Dolayısıyla, alt küme eşleştirmelerinin doğruluğunu önemli oranda etkileyen alt bölge boyutu; benek modeli,

yükleme şartları, numune geometrisi ve deneysel şartlar (ışıklandırma, kullanılan kamera çözünürlükleri gibi) dikkate alınarak belirlenmelidir.

1.3.2. Adım boyutu (step size)

İlgilenilen bölge üzerindeki alt kümelerin yoğunluğunu belirleyen adım boyutunun optimal seçimi numune üzerindeki benek modeline ve deformasyon derecesine bağlıdır (Lava et al. 2009). Adım boyutu küçüldükçe taranması gereken alt küme sayısının artması işlem yükünü arttırmakla birlikte düzgün gerinim gradyanına sahip olmayan numunelerde büyük adım boyutları önemli hatalara sebep olmaktadır. Tipik olarak adım boyutu, komşu konumlardaki alt kümelerin de kısmen kapsanması için alt küme boyutunun yaklaşık üçte biri veya yarısı kadar olmalıdır (Palanca et al. 2015).

1.3.3. Korelasyon kriterleri

DIC tekniğinde, ilgilenilen herhangi bir alanın deformasyon öncesi ve sonrasına ait gri seviye yoğunluğuna dair benzerliğinin nicel olarak değerlendirilmesi korelasyon fonksiyonları ile yapılmaktadır. Analizde, herhangi bir alt kümenin merkez noktasının deformasyon sonrasındaki konumunu belirlemede iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. İlkinde orijinal görüntüdeki bir noktanın deforme olmuş görüntüdeki konumunu bulmada kullanılan çapraz korelasyon fonksiyonunu (CC- cross correlation) maksimum yapan değer iteratif olarak aranırken, diğerinde ise iki boyutlu bir hata fonksiyonu olan kare farklarının toplamı kriterini (SSD - sum of squared differences criterion) minimum yapan değer iteratif olarak aranmaktadır (Giachetti 2000, Pan et al. 2007). Bu kriterlere ait fonksiyonlar Denklem 1.15 ve 1.16'da verilmiştir.

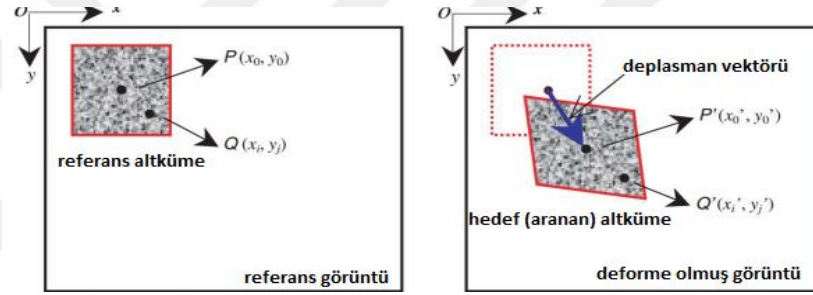
$$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j)g(x_i', y_j')] \quad (1.15)$$

$$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x_i', y_j')]^2 \quad (1.16)$$

Burada; f referans, g deforme olmuş görüntünün gri seviye yoğunluklarını ifade ederken, (x_i, y_j) orijinal yani referans görüntünün koordinatları ve (x_i', y_j') ise deforme olmuş görüntünün koordinatlarını ifade etmektedir.

1.3.4. Şekil fonksiyonları

Numune dönmeleri sonucunda yüksek gerinim alanlarının oluşması durumunda doğru alt küme eşleştirmesinin yapılabilmesi noktasında eşleştirme fonksiyonlarına ek serbestlik dereceleri ilave edilmesi gerekmektedir. Bu ek serbestlik derecelerini ihtiva eden fonksiyonlar şekil fonksiyonu (Schreier and Sutton 2002) veya deplasman haritalama fonksiyonu (Lu and Cary 2000) olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 1.15. Deformasyondan önceki bir referans kare alt kümesinin ve deformasyondan sonraki hedef (veya deforme olmuş) altkümenin şematik gösterimi (Pan et al. 2009).

Deforme olmuş görüntüdeki alt kümelerin koordinatları, referans görüntüdeki koordinatlara şekil fonksiyonları ilave edilerek Denklem 1.17 ve 1.18’de verilen şekilde bulunmaktadır.

$$x_i' = x_i + \xi(x_i, y_j) \quad (1.17)$$

$$y_j' = y_j + \eta(x_i, y_j) \quad (1.18)$$

Burada ξ ve η notasyonları şekil fonksiyonlarının analitik formülasyonlarını belirtmektedir. Yaygın kullanılan ikinci dereceden şekil fonksiyonlarına ait formülasyonlar Denklem 1.19 ve 1.20’de verilmiştir (Lu and Cary 2000).

$$\xi(x_i, y_j) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y \quad (1.19)$$

$$\eta(x_i, y_j) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y \quad (1.20)$$

Burada u ve v referans alt küme merkezinin x ve y yönlerindeki deplasman bileşenleri, u_x , u_y , v_x , v_y birinci dereceden; u_{xx} , u_{yy} , u_{xy} , v_{xx} , v_{yy} , v_{xy} ise ikinci dereceden deplasman gradyanlarıdır.

1.3.5. DIC analizindeki hata kaynakları

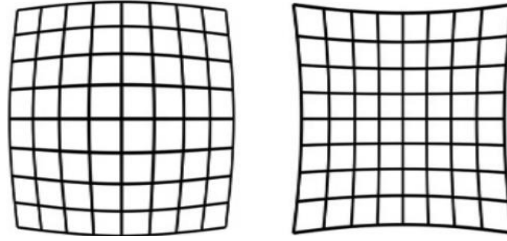
DIC analizinde potansiyel hata kaynaklarının tespiti, hata kaynaklarının en aza indirilmesi ve görüntü işleme prosesinin optimize edilmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Potansiyel hata kaynakları aşağıda özetlenmiştir.

Korelasyon hataları; Genel anlamda istatistiksel hatalar ve interpolasyon hataları olarak iki gruba ayrılan korelasyon hataları görüntü korelasyon doğruluğunu direkt olarak etkilemektedir (Siebert et al. 2007). İstatistiksel hatalar; temel olarak kameranın sensörü veya ölçüm sisteminin mekanik titreşimlerinden kaynaklanan görüntü gürültüsünün yanı sıra alt kümelerin doğru şekilde eşleştirilmesi için gerekli piksellerin ve gri değerlerin bulunmamasından kaynaklanmaktadır. İnterpolasyon hataları ise genellikle deformasyon tanımında yetersiz kalan düşük dereceli interpolasyon fonksiyonlarının kullanımından kaynaklanmaktadır.

Benek modelinden kaynaklanan hatalar; Deney öncesinde numune yüzeyinde oluşturulan noktaların şekli, boyutu ve dağılımı DIC analiz sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Optimum nokta büyüklüğü alt küme boyutu ve görüntü çözünürlüğüne bağlı olarak değişmektedir. Küçük noktaların kullanılması durumunda bir nokta daha az sayıda piksel ile ifade edileceğinden dolayı eşleştirme prosesinde benzer şekiller ve görüntülerin oluşma ihtimali yüksektir ve bundan dolayı DIC analizindeki en önemli unsur olan rastgele desen modelinin bulunması gerekliliği durumunu engelleyeceğinden dolayı hatalara sebep olabilir. Dolayısıyla daha büyük benekler kullanılarak daha fazla

piksel tarafından bu beneklerin temsil edilmesi sağlanarak daha doğru sonuçlara ulaşılmaktadır (Lecompte et al. 2006, Crammond et al. 2013). DIC sonuçlarını etkileyen bir diğer faktör ise noktaların dağılımıdır. Haddadi et al. (2008) tarafından yapılan çalışmada büyük noktaların yanına küçük noktaların ilave edilmesi rastgele desen yapısı ihtimalini arttıracığından dolayı daha başarılı eşleştirmeler yapılabileceği ifade edilmiştir.

Lens distorsiyonu; Geniş açılı ve yakınlaştırmalı lensler, özellikle düşük maliyetli versiyonları, düz çizgilerin içbükey veya dışbükey görünmesine neden olan bozulmalara sebep olmaktadır (Şekil 1.16). Bu bozulmalar, görüntünün görsel görünümünü değiştirerek çizgilerin bükülmüş ve çarpık görülmesi sonucunda ölçülen deformasyonları önemli ölçüde etkilemektedir. Lens distorsiyonunun etkisini azaltmanın en etkili yöntemi, imkanlar dahilinde daha iyi bir kamera ve lens kombinasyonuna geçiş yapmaktır. Ancak donanım değişikliği her zaman mümkün olamayabilir ve bu durumda düzeltme fonksiyonları kullanılarak hatalar en aza indirilebilir (Schreier et al. 2007).



Şekil 1.16. Tipik lens distorsiyonları (Bacher 2014)

Aydınlatma kaynaklı hatalar; Görüntülerin başarılı bir şekilde ilişkilendirilmesi açısından görüntü elde etme sırasında düzgün ve yeterli bir aydınlatma gerekmektedir. Yetersiz aydınlatma görüntü gürültüsünü artırırken aşırı ışık, piksellerin aşırı pozlanmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla deney esnasında ışık kaynağı sabit tutularak yeterli aydınlatma sağlanmalıdır. Ayrıca, nesnenin geometrisi, ışık kaynağına ve kameralara göre yönü veya numunenin yüzey kalitesi değişirse, aydınlatmadaki olası herhangi bir değişikliğe de özel dikkat gösterilmelidir.

1.4. Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Tahmini Yaklaşımları

Yapıştırma bağlantılarının farklı yükleme şatlarına maruz kalması durumunda yapıştırıcı tabakasında oluşan kayma ve soyulma gerilmeleri, bağlantı dayanımı analizlerinde en yaygın kullanılan gerilme bileşenleridir. Yapıştırma bağlantılarının ideal tasarımlarında yapıştırıcı tabakasında kayma gerilmelerinin daha baskın etkisi olacak şekilde bir yaklaşım kullanılmakla birlikte eksantirik yükleme durumlarının bağlantıda soyulma gerilmelerine sebep olacağı bilinmektedir. Dolayısıyla bağlantı dayanımının tahmini noktasında yapıştırma bağlantılarında kullanılan hasar tahmini yaklaşımları önemli rol oynamaktadır. Yapıştırma bağlantılarının hasar tahminlerinde *Sürekli Ortamlar Mekaniği*, *Kırılma Mekaniği* ve *Sürekli Ortamlar Mekaniği* ve hasar mekanik yaklaşımlarının birleşimi ile oluşturulan *Hasar Mekaniği* olmak üzere üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır (Chaves et al. 2014).

1.4.1. Sürekli Ortamlar Mekaniği

Bu yaklaşımda, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler aralarında mükemmel bir bağlantının olduğu varsayımı yapılarak ve ara yüzey özellikleri dikkate alınmadan sürekli sonlu elemanlar ile modelleme yapılmaktadır. Süreklilik mekaniğine dayanan bu kriterde yapıştırma bağlantısının hasar tahmini farklı kırılma kriterleri (Drucker-Prager, Von Mises vb.) aracılığıyla yapılabilmektedir (da Silva et al. 2018). Uygulanan yükler altında yapıştırıcı tabakasının kenarlarında oluşacak gerilme tekilliklerinden dolayı bu yaklaşım çözüm için gerekli problem tanımını yapmakta yetersiz kalması bu yaklaşımın kullanımını kısıtlamaktadır.

1.4.2. Kırılma Mekaniği

Kırılma Mekaniği yaklaşımında, malzeme kusurlarını ihmal edilerek dayanım analizlerinin yapıldığı Süreklilik Mekaniği yaklaşımından farklı olarak malzemelerde üretim sürecinden kaynaklanan veya işleyişi sırasında oluşan kusurları içerebileceğini varsayarak, bu kusurların kararlı bir şekilde yayılmalarına rağmen belirlenen boyutlarda kalıp kalamayacağı veya ani kırılmalara sebep olup olmayacağı değerlendirilmektedir

(Silva et al. 2007, Morais et al. 2009). Kırılma mekaniği; *gerilme yoğunluk faktörü kriteri* ve *enerji kriteri* olmak üzere iki temel yaklaşıma dayanmaktadır (Chaves et al. 2014).

Gerilme yoğunluk faktörü yaklaşımı; Gerilme yoğunluk faktörü, çatlak ucu yakınındaki gerilme değişimini tanımlayan Denklem 1.21’de verilen eşitlik ile belirlenmektedir. Gerilme yoğunluk faktörü (K), kırılma tokluğu (K_C) olarak isimlendirilen ve bir malzeme özelliği olan bu değere eşit olduğunda çatlak yayılımı gerçekleşecektir (Adams 2005, Silva et al. 2007, Morais et al. 2009).

$$K = Y\sigma_R\sqrt{\pi a} \quad (1.21)$$

Burada; Y : geometri ve yük şartlarına bağlı boyutsal faktör, σ_R : uygulanan gerilme ve a : çatlak uzunluğunu tanımlamaktadır.

Irwin (1957) tarafından düzlem gerilme ve gerilme durumlarında sanal çatlak kapama tekniği (VCCT- Virtual Crack Closure Technique) kullanılarak Denklem 1.22 ve 1.23 elde edilmiştir. Bu eşitliklerin K_C kırılma tokluğu değerinin G_C kritik enerji salınım oranı değerine eşit olması durumunda geçerli olacağı ifade edilmiştir (Silva et al. 2007, Morais et al. 2009).

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (1.22)$$

$$G = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{E} \quad (1.23)$$

Enerji salınım hızı yaklaşımı; Kırılma Mekaniğindeki ilk ilerleme, Griffith (1921) tarafından, tüm malzemelerin bir kusur dağılımına sahip olduğu ve en kritik olanlardan potansiyel bir kırılmanın meydana geleceği sonucuna varılmasıyla elde edilmiştir. Daha spesifik olarak, bu araştırmacı, bir yük uygulandığında, bu kusurun kenarındaki mevcut enerji (G – Enerji salınım hızı) çatlak ilerlemesi için gerekli enerjiye (G_C kritik enerji salınım hızı) eşit olduğunda dahili bir kusur yayılımının meydana geleceğini belirlemiştir.

Dolayısıyla, çatlak ilerlemesini önlemek için kritik koşulun Denklem 1.24'te verilen ifade ile sağlandığı ifade edilmiştir (Chaves et al. 2014).

$$G \leq G_c \quad (1.24)$$

Griffith'in teorisi ilk olarak kırılğan malzemeler için geliştirilmiş olmakla birlikte, bu malzemelerde kırılma bölgesinde (FPZ-Fracture Proseses Zone) meydana gelen, çatlak ucundaki elastik olmayan bir deformasyonla ilişkili enerji salınım mekanizmalarını da içeren yaklaşımları mevcuttur. Doğrusal Elastik Kırılma Mekaniği (LEFM-Linear Elastic Fracture Mechanics) ilkelerinin uygulanmasına izin vermek için bu bölgenin çatlak uzunluğundan, a , önemli ölçüde daha küçük olması gerekmektedir. Sabit kalınlığa sahip bir plaka için enerji salınım hızı Denklem 1.25'te verilmiştir (Silva et al. 2007, Morais et al. 2009).

$$G = \frac{1}{B} \left(\frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} \right) \quad (1.25)$$

Burada; W : dış yükler tarafından yapılan iş, U : iç elastik deformasyon enerjisi, B : malzeme kalınlığı, a : çatlak uzunluğudur.

J-İntegral yaklaşımı; LEFM yaklaşımlarının uygulanamadığı durumlarda, malzemelerin kırılma tokluklarının hesaplanması amacıyla alternatif yaklaşımlar geliştirilmiştir. J-integral yaklaşımı da bu yaklaşımlardan biridir ve ilk olarak Cherepanov (1967) ve Rice (1968) tarafından elastik malzemeler için önerilmiştir. Denklem 1.26'da iki boyutlu problemler için kapalı integral fomülasyonu verilmiştir.

$$J = \oint \left(w dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad (1.26)$$

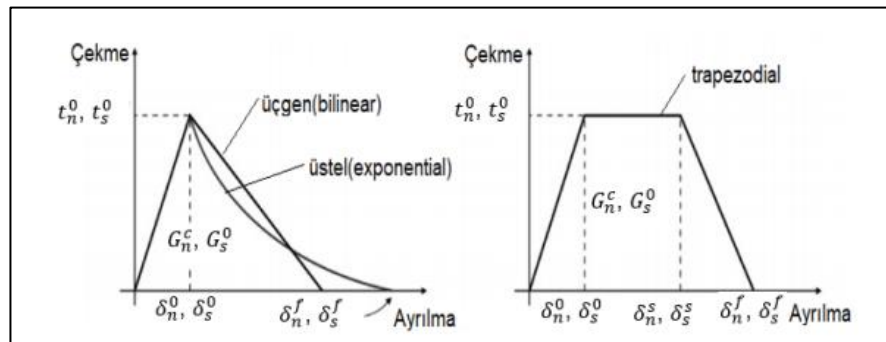
Burada, w ; elastik deformasyon enerjisi, T ; integral alanının dik yönündeki çekişi, u ; deplasman vektörünü tanımlamaktadır. Plastik deformasyonlar kullanıldığı sürece J-integralinin, malzeme özelliklerinden (elastik veya elasto-plastik gibi) bağımsız olduğu ifade edilmiştir (Bucci et al. 1972).

1.4.3. Hasar Mekaniği

Kırılma mekaniğine dayanan yöntemlerde hasarın tek bir düzlemsel çatlaktan yayılması durumu varsayıldığından dolayı hasar başlangıç aşamasının dikkate alınmaması bu yaklaşımın kullanımını kısıtlamaktadır. Hasar mekaniğine dayalı bir yaklaşımda ise hasarın belirlenen bir bölge içerisinde hem başlangıç hem de yayılma aşamaları dikkate alarak ilerlemeli kırılma analizleri yapılmaktadır. Genel olarak, hasar mekaniği yaklaşımlı analizlerde CZM (Cohesive Zone Modelling) yaklaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında da bu model kullanıldığından dolayı CZM ile ilgili temel bilgiler ayrı bir bölüm başlığı altında verilmiştir.

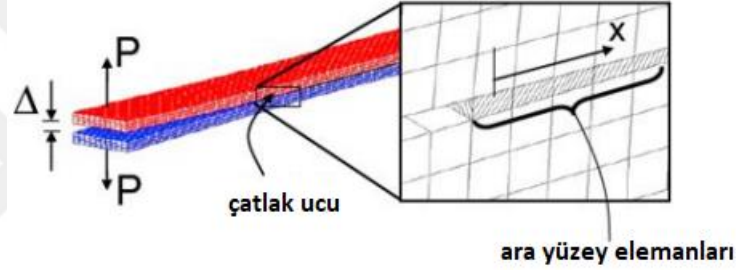
1.5. Kohesif Bölge Modelleme (Cohesive Zone Modelling - CZM)

Farklı malzemelerin kullanımı ile oluşturulan yapıştırma bağlantılarının yapışma yüzeyleri veya tabakalı kompozit malzemelerin tabakalar arasındaki ara yüzey hasarları bu yapısal malzeme gruplarının dayanımını önemli ölçüde sınırlandırmaktadır. Bu kısıtı engelleyebilmek amacıyla ara yüzeylerin hasarları konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar ilk olarak Lineer Elastik Kırılma Mekaniği temelli gerçekleştirilmiş olmakla birlikte çatlak ucundaki gerilme alanını tamamen elastik kabul eden Lineer Elastik Kırılma Mekaniği yaklaşımı özellikle yüksek tokluğa sahip yapıştırıcıların üretilmesi ile birlikte plastisite etkilerinin dahil edilmesi gerekliliğinden dolayı yetersiz kalmış ve Elastik Olmayan Kırılma Mekaniği yaklaşımı üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.



Şekil 1.17. CZM analizlerinde kullanılan malzeme modelleri (Campilho et al. 2013)

Araştırmacılar 1950'lerin sonlarına doğru kohesiv alan kavramını önermişlerdir (Barenblatt 1959, Dugdale 1960). Bu yaklaşıma göre, bir kohesiv bölge boyunca oluşan gerilme değerleri ve çatlak ilerlemeleri referans kabul edilen bir çekme-ayrılma (traction-seperation) yasası ile ilişkilendirilerek inceleme yapılmıştır. Çekme-ayrılma yasaları seçilen malzeme modeli (üçgen(bilinear), üstel (exponential) ve yamuk (trapezoidal) ve ara yüzey elemanına (kontakt elemanı, ara yüz elemanı) bağlı olarak değişmektedir. Yapısal analizlerde yaygın olarak kullanılan malzeme modelleri Şekil 1.17'de verilmiştir. Bu grafikler dikkate alındığında CZM yaklaşımında, maksimum gerilmeye kadar elastik davranışın olduğu maksimum gerilmeden sonra aşamalı olarak hasar başlaması ile plastik davranışa geçiş ve hasar ilerledikçe sıfır gerilme noktasında ise tamamen ayrılma karakterize edilmektedir.



Şekil 1.18. Ara yüzey elemanlarının gösterildiği nümerik model (Harper and Hallet 2008)

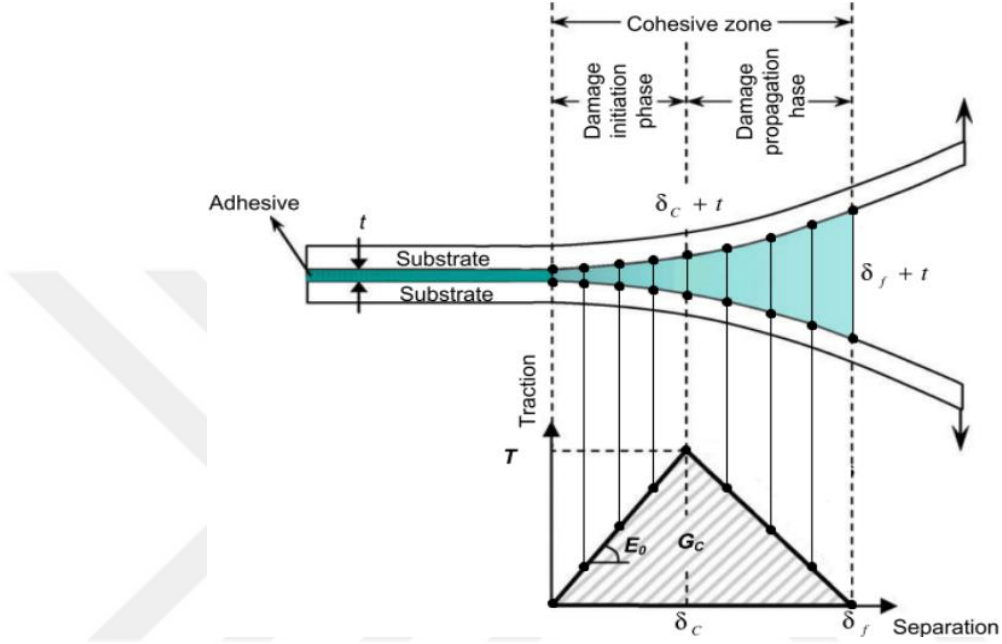
CZM yaklaşımının sonlu elemanlar analizinde kullanılması, malzeme modeline göre tanımlanmış kohesif yasaya uyan aday ara yüzey elemanlarının (Şekil 1.18) yapıştırma bağlantılarında yapışma ara yüzeylerine, kompozitlerde ise tabakalar arasındaki ara yüzeye uygulanması ile gerçekleştirilmektedir.

1.5.1. Çekme yasaları

Çekme-ayrılma yasası olarak da bilinen kohesif bölge yasası, iki nokta arasındaki nispi yer değiştirme (δ) ile çekme (T) arasındaki davranışı karakterize eden bir eğri olarak tanımlanmaktadır. Çekme yasası; sıfır yer değiştirme ile maksimum çekmenin meydana geldiği hasar başlama kriterine kadar olan aralık (elastik davranış bölgesi) ve hasar başlama kriterinden sıfır gerilme noktasına kadar yani tamamen ayrılmanın gerçekleştiği aralık (hasar yayılım bölgesi) olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır (Şekil 1.19). Hasar başlama kriteri, malzeme özelliğine dayanarak maksimum çekme (T_m) ve bu değere

1. GİRİŞ

karşılık gelen deplasman (δ_c) noktası olarak tanımlanmaktadır. Hasar başlama kriterine ulaştıktan sonra artan deplasman ile birlikte yapının elastik davranışı kaybolmaya başlar ve çekme yasaının hasar başlama kriteri ile hasar yayılım kriteri arasındaki ikinci bölgesine geçiş yapılır. Hasar yayılım kriteri, kritik enerji salınım oranı olarak (G_c) tanımlanmaktadır.



Şekil 1.19.Bağlantı yüzeyleri arasındaki nispi deplasmanların ve bilineer çekme yasaının gösterimi (Khoramishad et al. 2010).

Aşağıda kırılma enerjileri ve kohesif çekiş arasındaki ilişkiyi tanımlayan eşitlikler Denklem 1.27 ve 1.28’de verilmiştir.

$$G_i = \int T_i d\delta_i \quad (1.27)$$

$$G_{c,i} = \int_0^{T_i \rightarrow 0} T_i d\delta_i \quad (1.28)$$

Denklem 1.27 ve 1.28’de verilen ifadelerle sınır şartlarının ilave edilmesi ile Denklem 1.29 ve 1.30 ifadeleri elde edilmektedir.

$$\frac{dG_i}{d\delta_i} = 0, \quad (\delta_i = \delta_{c,i}) \quad (1.29)$$

$$T(\delta_{c,i}) = T_{m,i} \quad (1.30)$$

Üçgen (bilinear) CZM yasası; Üçgen CZM yasası basitliği ve uygulama kolaylığı sebebiyle CZM analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yasada lineer bir yumuşama yani hasar ilerleme bölgesi mevcut olmakla birlikte Şekil 1.19’da gösterildiği gibi çekme-ayrılma yasasını temsil eden fonksiyon parçalı lineer ve süreksiz bir fonksiyondur (Camacho and Ortiz 1996, Mi et al. 1998) Aşağıda verilen ilişkiler ile bu fonksiyonlar tanımlanmaktadır.

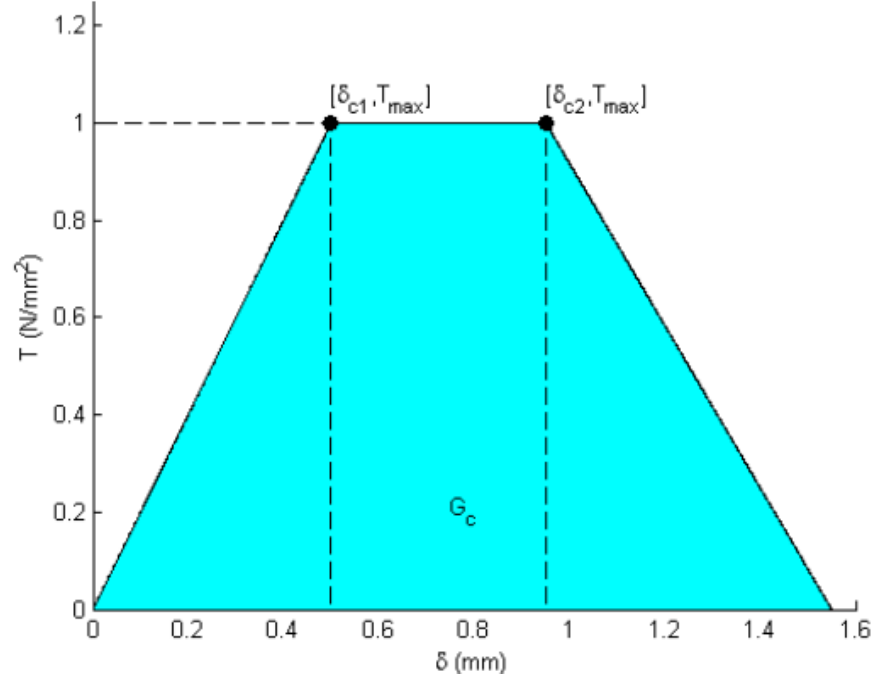
$$T_i = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{T_{m,i}}{\delta_{c,i}} \delta_i, & 0 \leq \delta_i \leq \delta_{c,i} \\ \frac{T_{m,i}}{\delta_{c,i} - \delta_{m,i}} (\delta_i - \delta_{m,i}), & \delta_{c,i} \leq \delta_i \leq \delta_{m,i} \\ 0, & \delta_i > \delta_{m,i} \end{array} \right\} \quad (1.31)$$

$$G_i = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{2} \frac{T_{m,i}}{\delta_{c,i}} \delta_i^2, & 0 \leq \delta_i \leq \delta_{c,i} \\ \frac{1}{2} T_{m,i} (\delta_{c,i} + (\delta_{m,i} - \delta_{c,i})) + \frac{(\delta_i - \delta_{m,i})^2}{(\delta_{c,i} - \delta_{m,i})}, & \delta_{c,i} \leq \delta_i \leq \delta_{m,i} \\ \frac{1}{2} T_{m,i} \delta_{m,i}, & \delta_i > \delta_{m,i} \end{array} \right\} \quad (1.32)$$

$$G_c = \frac{1}{2} T_{m,i} \delta_{m,i} \quad (1.33)$$

Üçgen CZM yasasındaki bilinmeyen parametre sayısının fazla olması sebebiyle, başlangıç sertliği olarak tanımlanan (T_m/δ_c) değeri hasardan önce bir karşıt nokta veya düğüm çifti arasında sağlam bir bağlantı olduğunu varsayacak büyüklükte seçilmektedir. Seçilen bu değere penaltı sertliği (K) denilmekte ve Gonçalves et al. (2000) ve Camanho et al. (2004) tarafından yapılan çalışmalarda 10^6 N/mm^3 olarak önerilmektedir.

Yamuk (trapezoidal) CZM yasası; İlk olarak Tvergaard and Hutchinson (1992) tarafından önerilen trapez kanunu parçalı lineer süreksiz bir fonksiyon olarak karakterize edilmiştir (Şekil 1.20). Bu yasa maksimum çekme (T_m), birinci ve ikinci kırılma modundaki (çekme, $i = I$ ve kayma, $i = II$ modları) maksimum ve kritik deplasmanlar ($\delta_m, \delta_{cl}, \delta_{cII}$) ve nispi deplasman (δ) cinsinden aşağıda verilen eşitlikler yardımı ile tanımlanmaktadır.



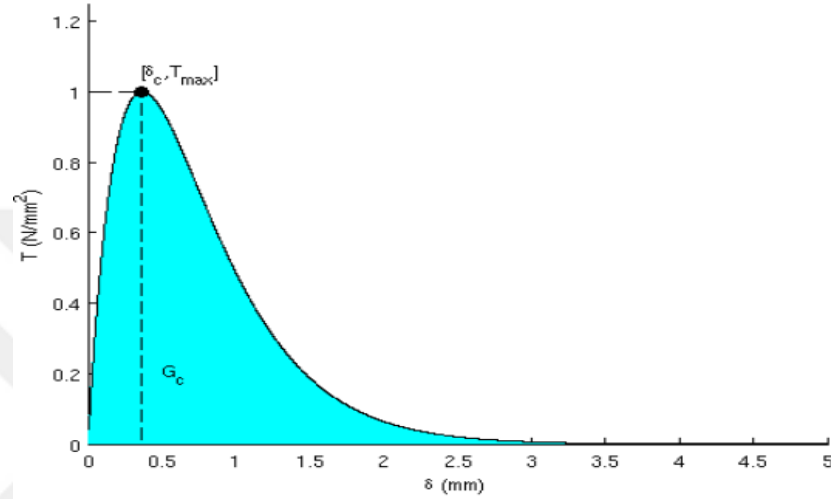
Şekil 1.20. Trapez çekme yasası (Noorman 2014)

$$T_i = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{T_{m,i}}{\delta_{cl,i}} \delta_i & , \quad 0 \leq \delta_i \leq \delta_{cl,i} \\ T_{m,i} & , \quad \delta_{cl,i} \leq \delta_i \leq \delta_{cII,i} \\ \frac{T_{m,i}}{\delta_{cII,i} - \delta_{m,i}} (\delta_i - \delta_{m,i}) & , \quad \delta_{cII,i} \leq \delta_i \leq \delta_{m,i} \\ 0 & , \quad \delta_i > \delta_{m,i} \end{array} \right\} \quad (1.34)$$

$$G_i = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{2} \frac{T_{m,i}}{\delta_{c,i}} \delta_i^2 & , \quad 0 \leq \delta_i \leq \delta_{c,i} \\ T_{m,i} \left(\frac{1}{2} \delta_{cl,i} + (\delta_i - \delta_{cl,i}) \right) & , \quad \delta_{cl,i} \leq \delta_i \leq \delta_{cII,i} \\ \frac{1}{2} T_{m,i} \left(\delta_{cl,i} + 2(\delta_i - \delta_{cl,i}) + (\delta_{m,i} - \delta_{cII,i}) + \frac{(\delta_i - \delta_{m,i})}{(\delta_{cII,i} - \delta_{m,i})} \right) & , \quad \delta_{cII,i} \leq \delta_i \leq \delta_{m,i} \\ \frac{1}{2} T_{m,i} (\delta_{cl,i} + 2(\delta_{cII,i} - \delta_{cl,i}) + (\delta_{m,i} - \delta_{cII,i})) & , \quad \delta_i > \delta_{m,i} \end{array} \right\} \quad (1.35)$$

$$G_c = \frac{1T_{m,i}}{2\delta_{m,i}} \quad (1.36)$$

Üstel (Exponential) CZM yasası; İlk olarak Xu and Needleman (1994) tarafından önerilen bu yasa sürekli bir fonksiyon ile karakterize edilmekte (Şekil 1.21) ve aşağıdaki eşitlikler ile tanımlanmaktadır.



Şekil 1.21. Üstel CZM yasası (Noorman 2014)

$$T_I = G_{c,I} \frac{\delta_I}{\delta_{c,I}^2} e^{-\frac{\delta_I}{\delta_{c,I}}} \quad (1.37)$$

$$T_{II} = G_{c,II} \frac{\delta_{II}}{\delta_{c,II}^2} e^{-\frac{\delta_{II}}{\delta_{c,II}}} \quad (1.38)$$

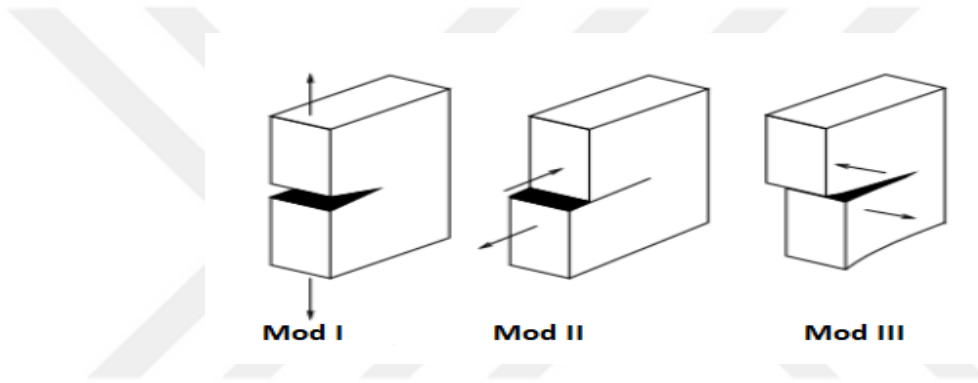
$$G_{c,I} = eT_{m,I}\delta_{c,I} \quad (1.39)$$

$$G_{c,II} = \sqrt{\frac{1}{2}} eT_{m,II}\delta_{c,II} \quad (1.40)$$

1.5.2. Kırılma modları

Normal ve teğetsel yönlerde oluşan ara yüzey gerilmelerinden, çekme gerilmeleri Mod I hasarına, kayma gerilmeleri ise Mod II ve Mod III hasarına sebep olmaktadır. Hasar modları Şekil 1.22’de verilmiştir. Farklı modlar arasındaki ilişki bir çekme yasası ile tanımlanabilmekte ve tüm modlardaki hasar başlangıcı maksimum gerilmeler (T_m) cinsinde ikinci dereceden bir etkileşim formülü (Denklem 1.41) ile tespit edilmektedir.

$$\left(\frac{T_I}{T_{m,I}}\right)^2 + \left(\frac{T_{II}}{T_{m,II}}\right)^2 + \left(\frac{T_{III}}{T_{m,III}}\right)^2 = 1 \quad (1.41)$$



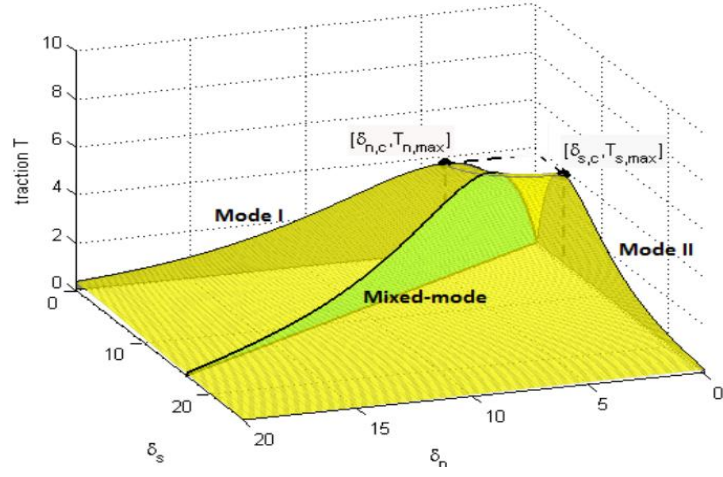
Şekil 1.22. Hasar modları (Noorman 2014)

Karma mod için enerji salınım oranı genellikle saf mod enerji salım oranlarının bir fonksiyonu olarak tanımlanmakta hasar yayılma kriteri olarak kullanılmaktadır. Karma moddaki enerji salınım oranları ve hasar kriterlerinin hesaplanmasında Denklem 1.42’de verilen güç yasası yaygın bir şekilde kullanılmakla birlikte malzeme özelliklerini de dikkate alan Benzeggagh and Kenane kriteri de (Denklem 1.43) kullanılmaktadır.

$$\left(\frac{G_I}{G_{c,I}}\right)^m + \left(\frac{G_{II}}{G_{c,II}}\right)^n + \left(\frac{G_{III}}{G_{c,III}}\right)^p = 1 \quad (1.42)$$

$$\frac{G_I + G_{II} + G_{III}}{G_{c,I} + (G_{c,II} - G_{c,I}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}}\right)^\eta} \quad (1.43)$$

Burada m, n, p, η değerleri deneysel faktör parametreleridir.



Şekil 1.23. Karma mod üstel CZM yasası (Noorman 2014)

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu tezde; farklı malzeme gruplarının yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesi sonucu üretilen kompozit yapıların DIC yöntemi ile mekanik karakterizasyonu ele alınmıştır. Bu yüzden, aşağıda bu konuya yönelik literatür araştırması verilmiştir.

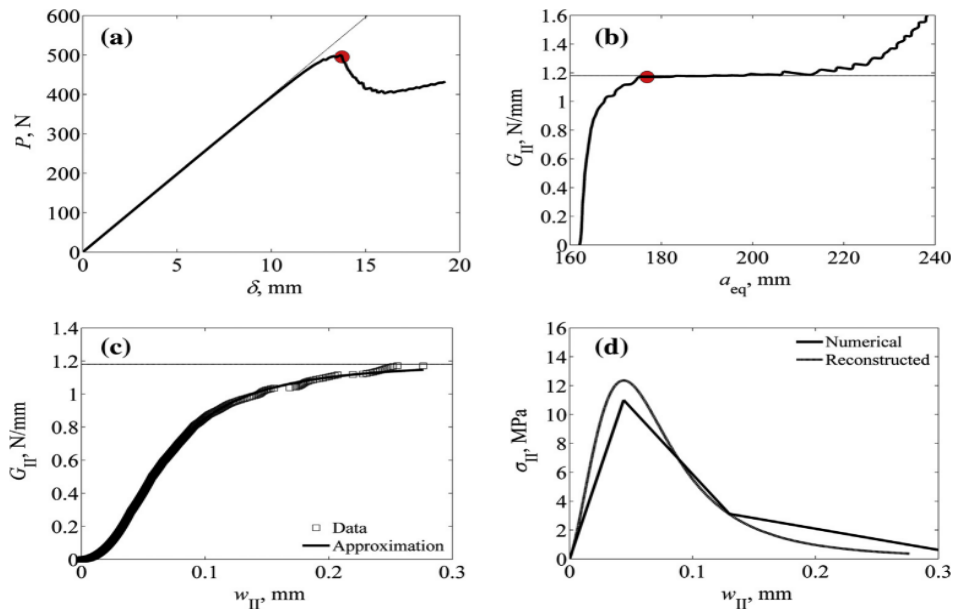
2.1. Kırılma Enerjilerinin Tespitine Yönelik Çalışmalar

Gelişen teknoloji ile birlikte yapıştırma bağlantılarının önemli mühendislik uygulama alanlarındaki kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu bağlantıların özellikle havacılık sektörü gibi ciddi mühendislik uygulamalarındaki kullanımını onların mekanik karakterizasyonlarında kullanılan yöntemlere bağlıdır. Bu yüzden yapıştırma bağlantılarının hasar analizleri konusunda çeşitli deneysel ve nümerik çalışmalar yapılması gerekmektedir. Deneysel çalışma bölümünde; uygun çevresel şartlarda doğru numune hazırlama, uygun test yöntemi seçimi ve etkin bir deformasyon ölçüm sistemi seçimi çalışmanın başarısını önemli ölçüde etkilemekle birlikte nümerik çalışma bölümünde ise deneysel şartlara uygun bir şekilde gerçeğe yakın modeller kurulması gerekmektedir. Bu tez çalışması, yapıştırma bağlantılarının hasar analizlerinde; Mod I, Mod II kırılma deneyleri yapılarak hasar analizlerinde DIC ve CZM tekniklerinin kullanımı içermesinden dolayı yapıştırma bağlantılarının hasar analizleri ve özellikle hasar analizlerinde bu tekniklerin kullanıldığı çalışmalar incelenmiş ve aşağıda özetlenmiştir. Bu çalışmalar: kırılma modu deneyleri (DCB, ENF, MMB); bu deneylerden elde edilen deneysel parametrelerde kırılma enerjilerinin tespitinde çeşitli analitik data indirgeme metotlarının (MBT, CC, MCC, CBBM gibi) kullanımı ve bu metotlar arasındaki farkları; Analitik data indirgeme yöntemlerine alternatif sayısal data indirgeme yöntemlerinin (J-integral) kullanımı; DIC tekniğinin çatlak uzunluğu, açılma deplasmanı, kayma deplasmanı gibi deformasyon parametrelerinin belirlenmesinde kullanımı ve Lineer Olmayan Hasar Mekaniği yaklaşımı olan CZM yaklaşımli nümerik analizleri içermektedir.

Yapıştırma bağlantılarının ara yüzey kırılma davranışlarının tespit edilmesinde Mod I ve Mod II yüklemelerini içeren DCB ve ENF testleri yapılmaktadır. Bu testler sonucunda elde edilen yük-deplasman datalarından çeşitli data indirgeme prosedürleri

kullanılarak ara yüzey kırılma enerjileri elde edilmektedir. Bu data indirgeme prosedürlerinin birkaçı deney esnasında çatlak uzunluğunun ölçülmesi esasına dayanmakta iken birkaçı ise çatlak uzunluğunun ölçümünü gerektirmeyen metotlardır. Xavier et al. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada kırılma testlerinde önemli dikkat ve ekstra deneysel araç veya analiz yöntemi (harici kamera, DIC yöntemi gibi) gerektiren çatlak uzunluğu tespiti gerektirmeyen kompiyans temelli kiriş metodu (CBBM- Compliance Based Beam Method) ve modifiye edilmiş deneysel kompiyans metodu (MECM - Modified Experimental Compliance Method) kullanılarak ahşap malzemelerin yapıştırıcı ile birleştirilmesi sonucu oluşturulan bağlantıların deneysel olarak Mod I ve Mod II kırılma enerjileri tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda iki analiz yöntemi birbiri ile kıyaslanarak aralarında yeterli bir uyumun olduğu ifade edilmiştir.

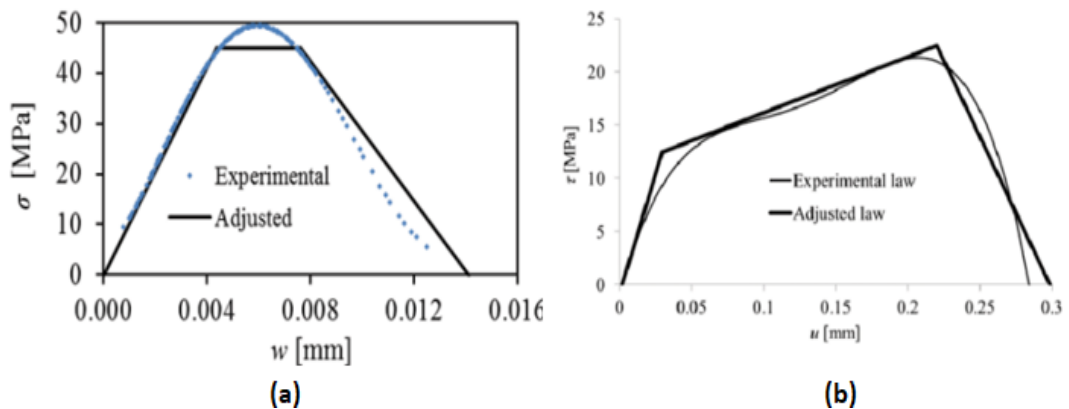
CZM yaklaşımının yapıştırma bağlantılarının hasar çalışmalarında önemli bir yeri bulunmaktadır. Han and Siegmund (2012) tarafından yapılan bir çalışmada metal malzemeler Hysol EA-9394 yapıştırıcısı ile birleştirilerek oluşturulan DCB numunelerinin kırılma deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen datalar sonucunda CZM yasası deneysel olarak belirlenmiş ve nümerik analizler ile doğrulanmıştır. Ayrıca bu çalışmanın deneysel bölümünde çatlak ucu deplasman dataları DIC tekniği kullanılarak tespit edilmiştir.



Şekil 2.1. ENF testi sonucunda elde edilen; (a) yük-deplasman eğrisi, (b) kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrisi (R-curve), (c) kırılma enerjisi-nispi deplasman eğrisi, (d) kohezyon yasası (Xavier et al. 2014).

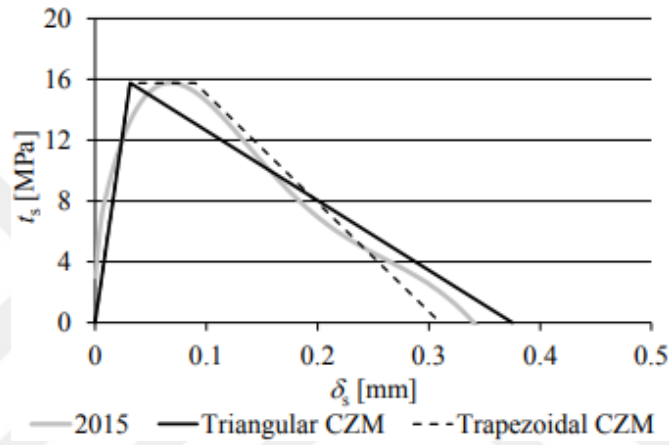
CZM analizlerinde uygun kohezyon yasasının kullanılması yapılan nümerik analizlerin hassasiyetini önemli ölçüde değiştirmektedir. Xavier et al. (2014) tarafından bu yönde bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Mod II kohezyon yasası ENF testi yapılarak deneysel olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Eğme yüklemesi altında bağlantı yüzeyleri arasında oluşan nispi deplasman değerleri DIC tekniği ile belirlenmiş, kırılma enerjisi ise kompliyans temelli kiriş metodu (CBBM) analitik yöntemi kullanılarak deneysel datalar eşliğinde hesaplanmıştır. Ayrıca bu çalışmada ABAQUS programı vasıtasıyla CZM yaklaşımı ile nümerik modelleme yapılmış ve deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu ifade edilmiştir (Şekil 2.1).

CZM yasalarının deneysel olarak belirlenmesi, doğru nümerik modellemeyi betimleme noktasında önemli bir rol üstlenmektedir. De Moura (2015) tarafından yapılan bir çalışma da bu amaç doğrultusunda deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar bölümünde Mod I ve Mod II kırılma enerjilerinin ve doğrudan kohesif yasalarının (traction-separation ilişkisi) tespit edilmesi amacıyla DCB ve ENF deneyleri kompozit malzemelerin yapısal bir yapıştırıcı ile oluşturulmuş numuneleri üzerinden yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen CZM eğrileri (Şekil 2.2) CZM yaklaşımlı sayısal çalışmalarda uygun malzeme modeli olarak temel alınarak nümerik analizler yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, CZM yaklaşımının hasar mekanizmaları ve yapıştırılan malzemelerin dayanım tahminlerinde önemli bir araç olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 2.2. Deneysel CZM eğrileri; (a) normal gerilme-deplasman eğrisi, (b) kayma gerilmesi-deplasman eğrisi (de Moura 2015).

DeneySEL CZM yasaSının belirlenmesi ile daha hassas nümerik modellemenin yapılabileceğini belirtmek amacıyla Fernandes et al. (2015) tarafındanda deneySEL ve nümerik bir çalışma yürütölmüştür. Bu çalışmada Mod II kırılma enerjisinin belirlenmesinde klasik data indirgeme metotlarının (DBT, CBBM, CBT, CCM) yanı sıra deneySEL CZM eğrisindeki kayma gerilmelerinin de tespit edilebilmesi sağlayan J-integral yöntemi kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ENF testi ile Mod II kırılma analizinin yapılabileceği, deneySEL ve nümerik datalar arasında bir uyum olduğı (Şekil 2.3) ve güvenli, sürdürülebilir dataların elde edildiğı ifade edilmiştir.



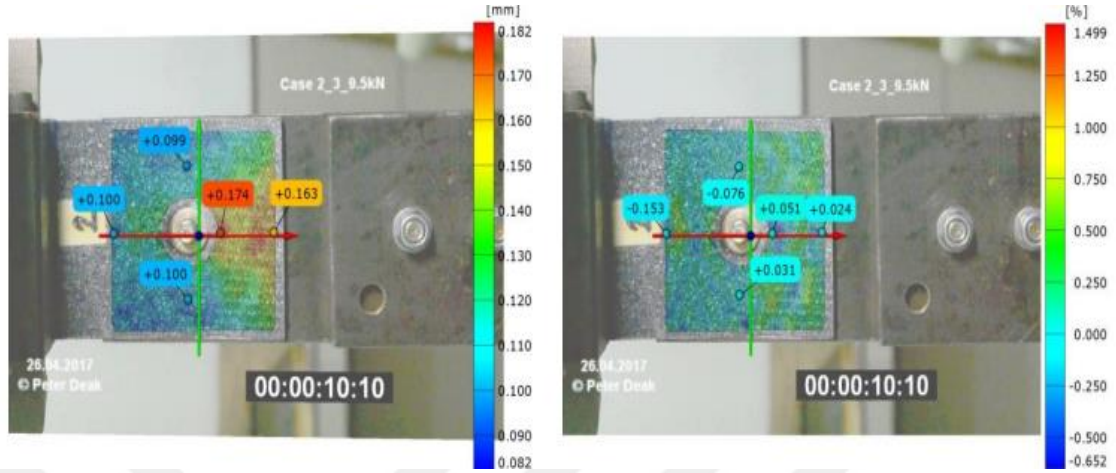
Şekil 2.3. Kayma gerilmesi – çatlak önü kayma deplasmanı eğrisi (Fernandes *et al.* 2015)

Haris et al. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada tek tesirli cıvatalı bindirme bağlantılarının ilerlemeli hasar analizi DIC yöntemi ile deneySEL olarak belirlenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda DIC ile elde edilebilen gerinim konsantrasyonları yani deney süresince tüm zaman dilimlerinde elde edilebilen gerinim haritaları vasıtasıyla hasar başlangıcı ve artan yüke bağılı olarak hasar yayılımının gözlemlenmesi noktasında önemli bir avantaj sağladığı ifade edilmiştir.

DIC yönteminin hasar analizinde kullanımına ilişkin Deák and Kowalik (2019) tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada hafif kategorideki uçak yapılarında ara bağlantı elemanı olarak kullanılan bir karbon epoksi temelli kompozit parçanın çekme yükü etkisi altındaki deformasyon analizleri DIC yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.4'te gösterildiğı gibi yapılan çalışma sonucunda eksenel ve yanal gerinim değerlerinin deney süresince tüm zaman dilimlerinde kolay bir şekilde

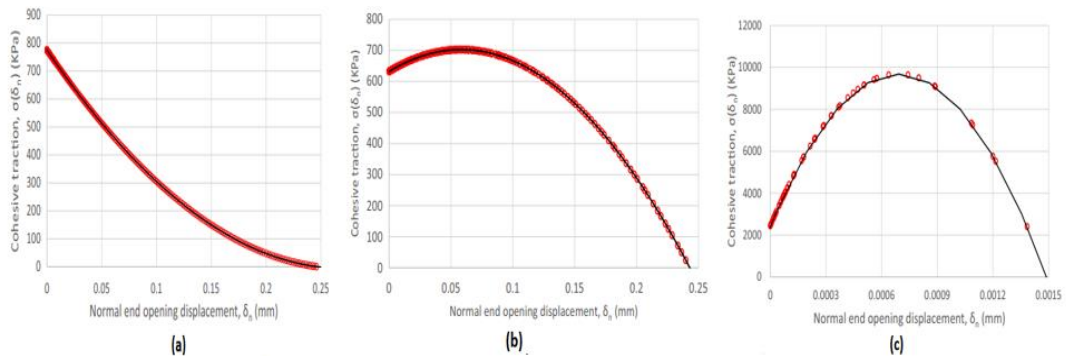
2. KAYNAK ÖZETLERİ

belirlenmesi yine bu yöntemin önemli bir deformasyon analizi yöntemi olduğunu ortaya koymaktadır.

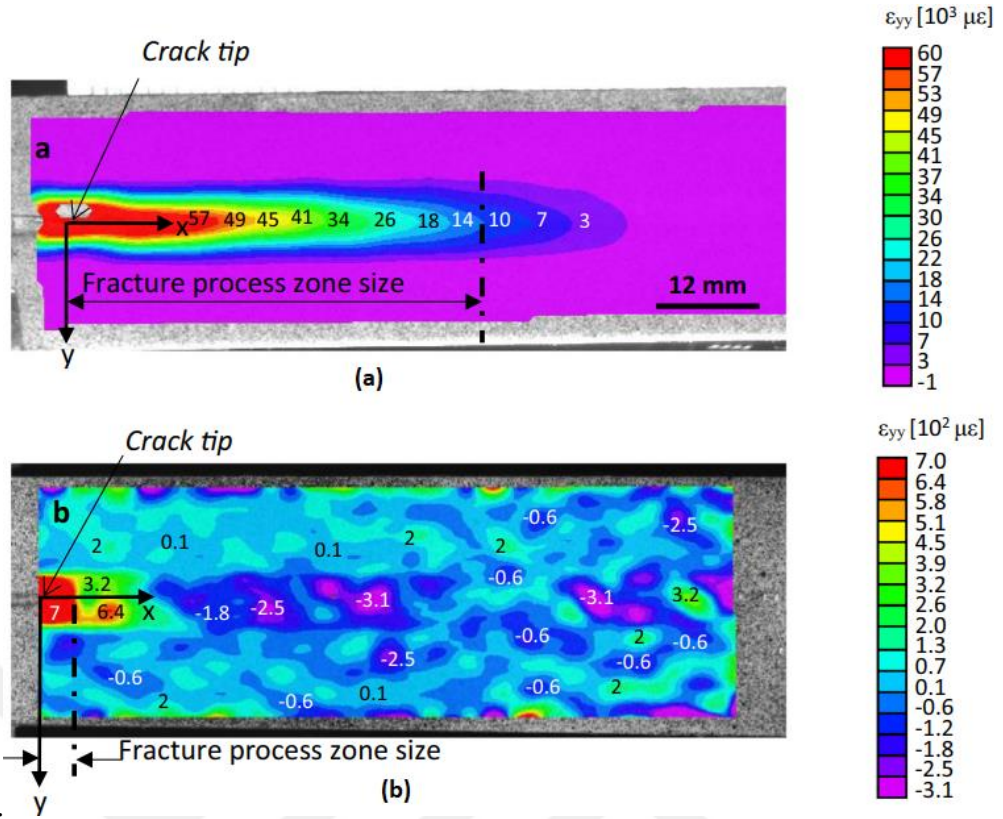


Şekil 2.4. DIC ile elde edilen eksenel ve yanal şekil değişim haritaları (Deák and Kowalik, 2018).

Rajan et al. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada Mod I yüklemesi durumunda kırılma enerjileri ve gerçek ara yüzey çekme-ayrılma (CZM yasası) eğrilerinin, 0.3 mm/dk' dan 3 mm/dk 'ya kadar değişen çekme hızlarında DCB testleri vasıtasıyla belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan bu çalışmada deplasman dataları ve yüzey gerinim haritaları DIC tekniği ile belirlenmiştir. Çalışma sonucunda deney hızındaki artışa bağlı olarak mekanik özelliklerin değiştiği (Şekil 2.5), DIC tekniğinin gerçek CZM eğrilerinin elde edilmesinde önemli bir araç olduğu ve Şekil 2.6'da gösterildiği gibi yüzey gerinim haritaları yardımıyla çatlak ucunun tespitinin kolaylaştığı ifade edilmiştir.

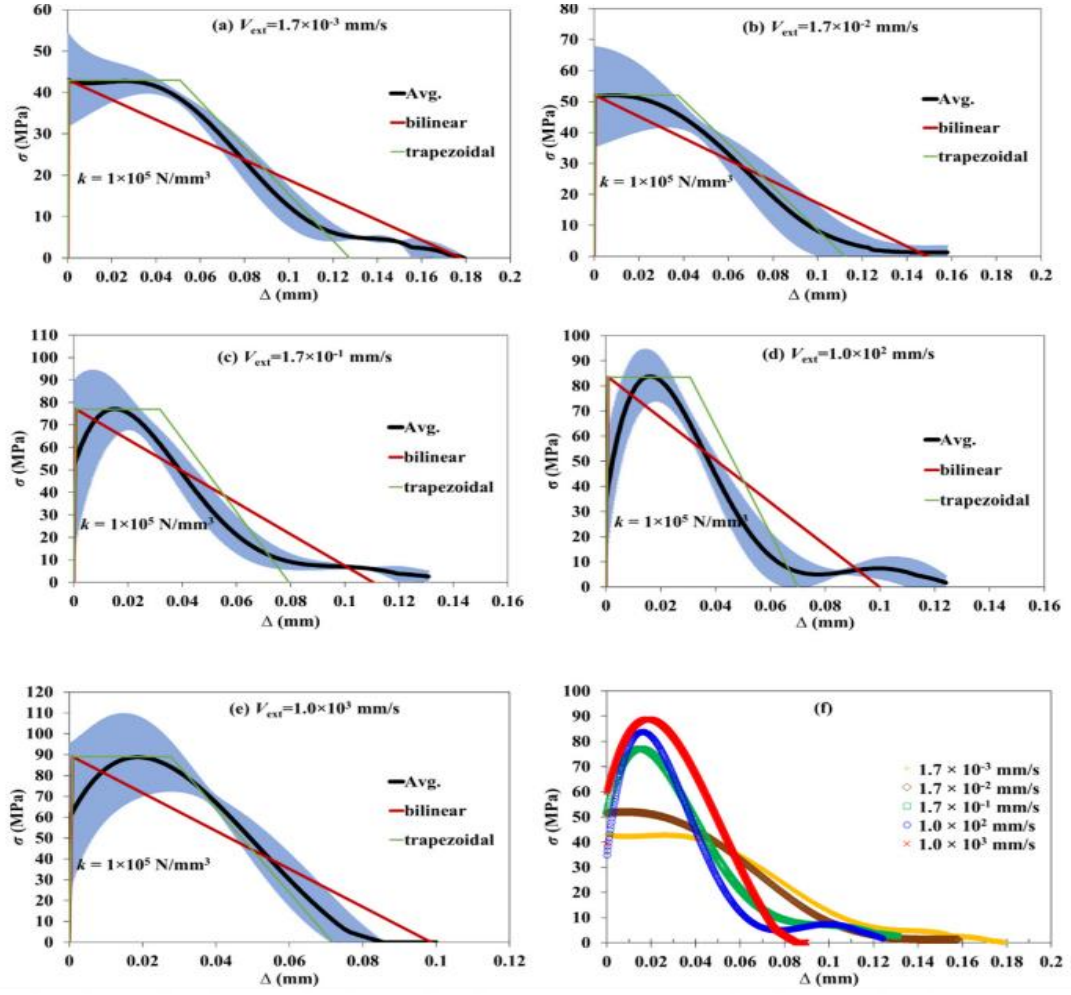


Şekil 2.5. Farklı deney hızlarında elde edilen gerçek CZM eğrileri; (a) 0.03 mm/dk, (b) 0.3 mm/dk, (c) 3 mm/dk (Rajan et al. 2019).



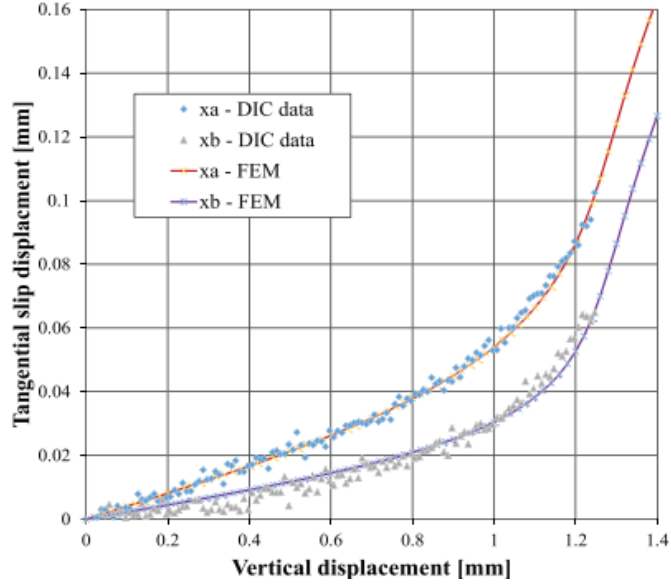
Şekil 2.6. Farklı deney hızlarında elde edilen çekme yönündeki yüzey gerinim haritaları; (a) 0.3 mm/dk, (b) 3 mm/dk (Rajan et al. 2018).

Yapıştırma bağlantılarının CZM yaklaşımıyla dinamik analizlerinde, kırılma davranışlarını karakterize etmek çatlak ucu gerinim hızı ve kohesif bölge uzunluğunun tespitini gerekli kılmaktadır. Sun et al. (2021) tarafından bu yönde bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantıların Mod I yüklemesi altındaki hıza bağlı (0.1 mm/dk – 1 m/s) kırılma davranışı incelenmiştir. Çatlak uzunluğu ve gerinim dağılımları DIC tekniği kullanılarak belirlenen bu çalışmada kohesif özelliklerin hıza bağlı olarak değiştiği (Şekil 2.7) ve DIC tekniğinin CZM parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir araç olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 2.7. Farklı hız oranlarında CZM eğrilerinin dağılımı (Sun et al. 2021)

DeneySEL CZM yasasının belirlenmesi konusunda yapılan çalışmalardan biri de Cricri et al. (2022) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada Mod II yüklemesi durumunda deneySEL CZM eğrisinin (ara yüzey kayma gerilmesi-kayma deplasmanı eğrisi) tespit edilmesi amacıyla yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantı numunelerinin ENF eğme testleri yapılmıştır. Kayma deplasmanlarının deneySEL olarak belirlenmesinde DIC tekniği kullanılarak yapılan bu çalışmada deneySEL ve nümerik analiz sonuçlarının yeterli bir uyum içinde olduğu ifade edilmiştir (Şekil 2.8).



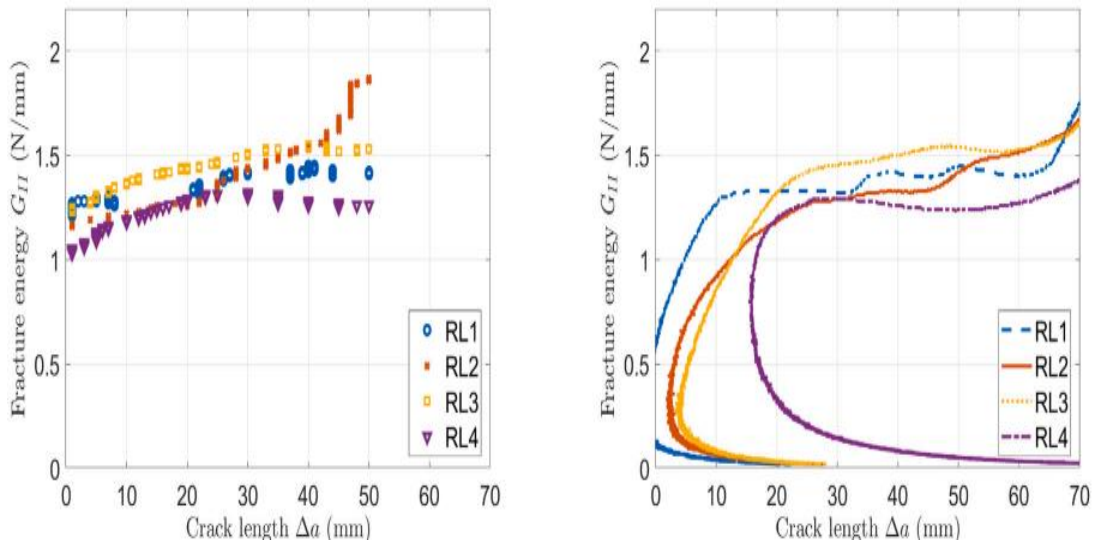
Şekil 2.8. DIC ve nümerik analizler ile elde edilen noktasal deplasman değerlerinin karşılaştırılması (Cricri et al. 2022).

DIC tekniğinin deneysel CZM yasalarının tespitinde başarılı bir yöntem olmasının yanı sıra yeni geliştirilen deformasyon ölçüm tekniklerinin güvenilirliğini kıyaslama noktasında da güçlü bir araçtır. Lima et al. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, yapıştırma bağlantılarının Mod I kırılma enerjisi tespitinde Optik Geri Saçılma Reflektometresi ile deformasyon ölçümünün güvenilirlik derecesi ve uygulanabilirliğinin belirlenmesinde DIC tekniği ile karşılaştırma analizleri bulunmaktadır. Yapılan çalışmada DIC ve görsel çatlak izleme tekniklerinin kullanılması ile çatlak önü deformasyon analizlerinin belirlendiği ayrıca Optik Geri Saçılma yönteminin çatlak gerisindeki dplastik deformasyonu tespit etme yetisine sahip olduğu ifade edilmiştir.

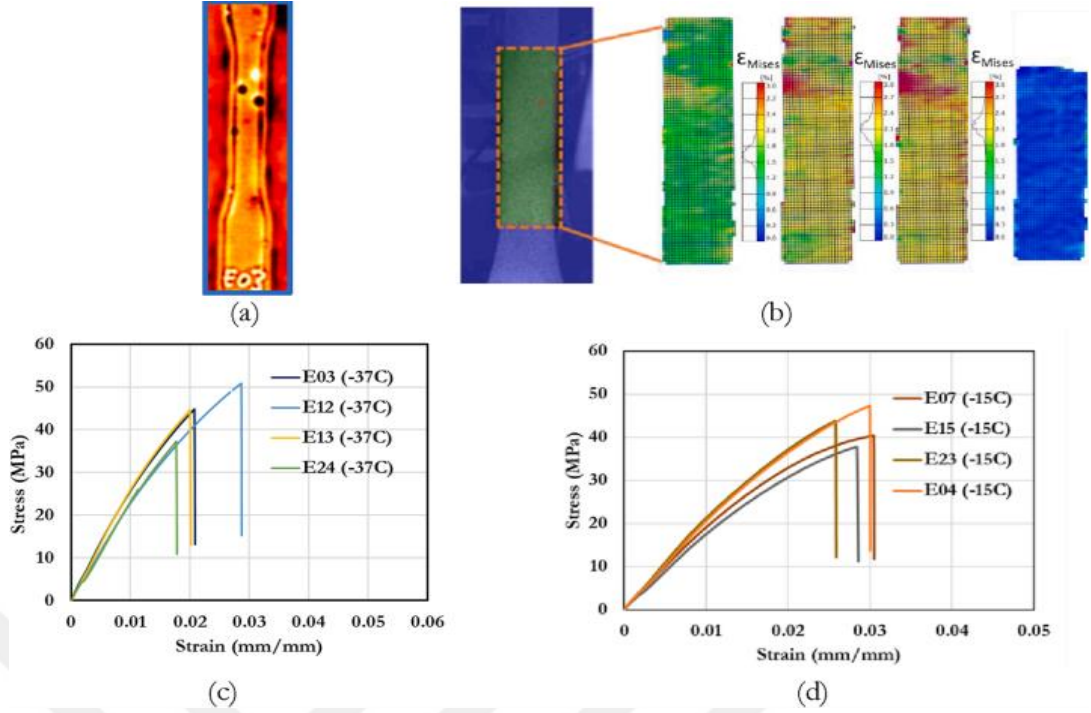
CZM yaklaşımı kompozit malzeme delaminasyonu ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların ara yüzey hasar davranışını sayısal olarak belirlemede önemli bir araçtır. Ancak, CZM parametrelerin doğru ve güvenilir bir şekilde elde edilmesi CZM yaklaşımlı çalışmaların en önemli araştırma konusudur. Huo et al. (2022) tarafından bu yönde bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, DIC tekniği ile deneysel deplasman parametreleri DCB deneylerinden elde edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen dotalar ile gerçek CZM eğrileri elde edilerek gerçek hasar durumunu en iyi betimleyen sayısal model oluşturulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda deneysel ve nümerik çalışmaların birbiri ile uyumlu olduğu ve CZM etkinliğinin araştırılması hususunda geleneksel yaklaşımlar

ile oluşturulan sayısal modelden elde edilen sonuçlarda ise CZM yaklaşımli modelin daha doğru bir yaklaşım olduğu ortaya konulmuştur.

Reiner et al. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada Mod II kırılma enerjisinin deneysel olarak belirlenmesi amacıyla ENF ve Kompakt Kayma (CS-Compact Shear) testleri yapılmıştır. İki farklı test yöntemi ile elde edilen kırılma enerjileri kıyaslanarak bu yöntemlerin kısıtları ve üstünlükleri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda ENF testi ile elde edilen kırılma enerjilerinin daha kararlı ve güvenli olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca ENF testi ile kırılma enerjilerinin tespitinde kullanılan data indirgeme prosedürlerinden olan kompliyans temelli kiriş teorisinin (CBBM) çatlak uzunluğunun ölçme gereksinimi bulunmadığından dolayı önemli bir data indirgeme prosedürü olduğu ifade edilmiştir (Şekil 2.9).

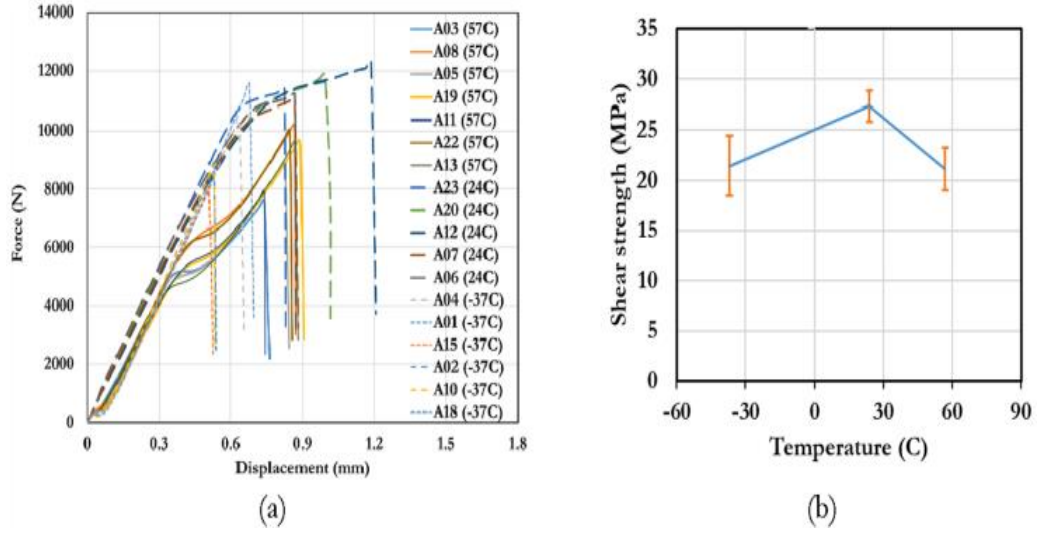


Şekil 2.9. Mod-II kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrileri; (a) Doğrudan kiriş metodu (DBT) ile elde edilen eğriler, (b) kompliyans temelli kiriş teorisinden (CBBM) elde edilen eğriler (Reiner et al. 2022).



Şekil 2.10. (a) Bulk çekme numunesi, (b) farklı zaman dilimlerine ait DIC yüzey gerinim haritaları, (c) – 37 °C ve (d) – 15 °C altındaki gerilme-gerinim tepkileri (Khafagy et al. 2022).

Yapıştırma bağlantılarının termo-mekanik özellikleri ve hasar modları sıcaklık değişimlerinden etkilenmektedir. Khafagy et al. (2022) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada bu etkinin deneysel olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, -37°C ve 57°C sıcaklık aralığında bulk yapıştırıcı numuneleri ve kompozit-yapıştırıcı-alüminyum konfigürasyonuna sahip yapıştırma bağlantılarının çekme testleri yapılmıştır. Yüzey gerinim değerleri ve deplasman parametreleri DIC tekniği ile belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda; bulk yapıştırıcı testlerinde, yüksek sıcaklıklarda önemli süneklik gösteren yapıştırıcının artan sıcaklığa bağlı olarak mekanik özelliklerinin değiştiği ifade edilmiştir (Şekil 2.10). Ayrıca bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde artan sıcaklığa bağlı olarak adhesif hasardan kohesif hasara doğru bir geçiş olduğu ve bulk yapıştırıcı sonuçlarında olduğu gibi yapıştırma bağlantısının deneysel sonuçlarında da sıcaklığa bağlı bir değişimin görüldüğü belirtilmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Bağlantı numunelerinin farklı sıcaklıklardaki; (a) kuvvet-deplasman eğrileri, (b) kayma gerilmesi-sıcaklık eğrisi (Khafagy et al. 2022).

Yapıştırma bağlantılarının analizleri, tek tesirli bağlantı, çift tesirli bağlantı, alın bağlantısı gibi farklı konfigürasyonlar üzerinden yapılmaktadır. Üretim ve uygulama kolaylığından dolayı tek tesirli bağlantılar sıklıkla tercih edilmekle birlikte özellikle havacılık alanı ile ilgili uygulamalarda T-tipi bağlantıların oluşturulması gerçek fiziksel durumu daha iyi tanımlamasından dolayı önemlidir. Lopes et al. (2022) tarafından bu yönde bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, T-yapıştırma bağlantısının CZM yaklaşımıyla nümerik analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde, bağlantının geometrik boyutlarının (bindirme uzunluğu, yapıştırıcı kalınlığı, T bağlantı eğriliği vb.) maksimum yükü ve enerjisi üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla parametrik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda test parametrelerinin bağlantının mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve CZM yaklaşımıyla nümerik analizler ile yeterli doğrulukta dataların elde edilebildiği ifade edilmiştir.

Yapıştırma bağlantılarının hasar analizlerinde saf mod (Mod I veya Mod II) yüklemesine ilişkin birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak bağlantıların gerçek uygulama alanlarında karma yüklere maruz kalması sebebiyle karma mod kırılma testlerinin yapılması gerçek hasar analizine yaklaşım konusunda önemlidir. Neves et al. (2022) tarafından karma mod yüklemesini içeren bir deneysel ve nümerik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yapıştırılan malzeme olarak karbon fiber takviyeli kompozitler ve yapıştırıcı olarak ise farklı mekanik özelliklere sahip 3 farklı yapıştırıcı kullanılarak karma mod deney numunesi üretilmiş ve eğme deneyleri yapılmıştır.

Deneysel sonuçlarda elde edilen veriler kullanılarak kırılma enerjilerinin doğrudan elde edilebildiği J-integral metodu kullanılarak Mod I/Mod II kırılma enerjileri ve gerçek CZM eğrileri elde edilmiştir. Nümerik çalışmalarda ise CZM yaklaşımı analizler yapılarak deneysel ve nümerik çalışmalar arasındaki uyum belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, deneysel ve nümerik çalışmalar arasındaki uyumun bir sonucu olarak, karma mod yükleme durumunda CZM yaklaşımı nümerik analizlerin başarılı bir şekilde kullanılabilir olduğu ifade edilmiştir.

Yapıştırma bağlantılarının parametrik çalışmalarında, yapıştırıcı tabaka kalınlığı, yapıştırılan malzeme kalınlığı, bağlantı genişliği, bindirme uzunluğu gibi parametrelerin değişimi üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Sadeghi et al. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada ise bu parametrelerden farklı olarak tek tesirli yapıştırma bağlantısında kompozit yapıştırılan malzemenin yapıştırıcı ile temasta bulunan tabakasının fiber yöneliminin, bağlantının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, fiber yöneliminin 0° ‘den 90°’ye kadar olan artışın yapıştırıcı tabakasının kayma gerilmesinde azalmaya, soyulma gerilmesinde ise artışa sebep olduğu ifade edilmiştir. Nümerik çalışmalarda ise bilineer CZM yaklaşımı kullanılarak modelleme yapılmış ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda bilineer kohesiv kanunun yarı-esnek yapıştırıcının yük ve deplasman verilerinin tespitinde yetersiz kaldığı ancak, maksimum gerilmeyi tam olarak belirleyebildiği ifade edilmiştir.

Farklı üretim yöntemleri kullanılarak elde edilen kompozit malzemelerin mekanik karakterizasyonu önemli bir yere sahiptir. Literatür incelendiğinde; Fujita et al. (2023) tarafından yakın zamanlarda bu yönde yapılan bir çalışma dikkat çekmektedir. Bu çalışmada enjeksiyonla kalıplanmış kısa lifli kompozitlere ait mekanik özelliklerin mikroyapı ve çevresel şartlara bağlı olarak nasıl değiştiği deneysel ve nümerik çalışmalarla açıklanmaya çalışılmıştır. Yapılan çalışmada, çentikli numunelere ait deneyler yapılarak kırılma tokluğu değerleri elde edilmiştir. Kırılma tokluğu değerlerinin tespitinde kullanılan çatlak uzunluğu ve deplasman verilerinin DIC analizi ile elde edilmesi önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Yapıştırma bağlantıları dinamik yük etkisi altındaki birçok uygulamada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kullanımın güvenliğini sağlamak amacıyla yapıştırma bağlantılarının yorulma analizleri yönünde birçok çalışma yapılmıştır. Orell et al. (2023) tarafından da bu yönde bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada yapıştırma bağlantılarının yorulma yüklemesi altında Mod II hasar analizi DIC yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Mod II hasar analizinde çatlak uzunluğunun tespiti kolay olmadığından dolayı literatürde bulunan birçok çalışmada çatlak uzunluğunun doğrudan ölçümünü gerektirmeyen kompiyans temelli data indirgeme metodu kullanılarak eş değer çatlak uzunluğu hesaplanmaktadır. Bu çalışmada da hem kompiyans temelli yöntem hem de DIC tabanlı çatlak izleme yöntemleri kullanılarak DIC yöntemi ile doğrudan çatlak uzunluğunun belirlenebilirlik kabiliyetinin tespiti yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, geliştirilen DIC tabanlı yöntemim özellikle belirgin açık çatlak ucunun önündeki mikro çatlaklı yapışkan bölgeyi inceleme hususunda önemli bir araç olduğu ifade edilmiştir.

2.2. Eğrisel ve Açısal Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Karakterizasyonuna Tespitine Yönelik Çalışmalar

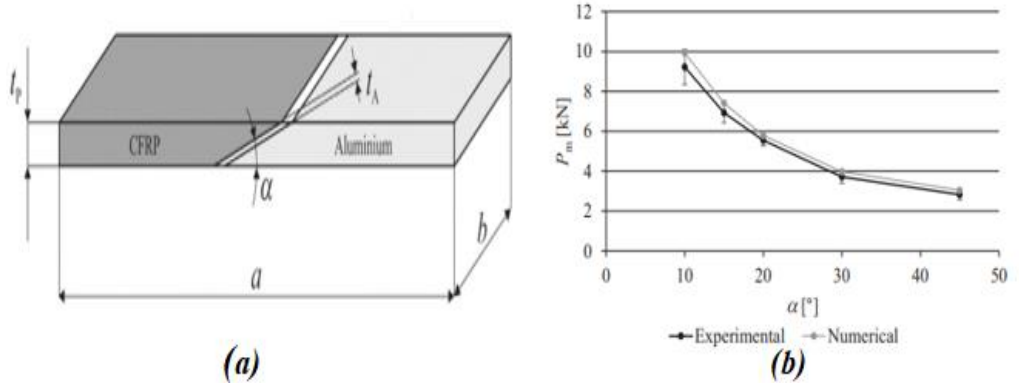
Yapıştırma bağlantıları; otomotiv, endüstri, inşaat, donanma, havacılık gibi birçok önemli uygulama alanında geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bu kullanımın etkinliğini arttırmada bağlantıların mekanik karakterizasyonu önemli bir rol oynamaktadır. Yapıştırma bağlantılarının mekanik karakterizasyonu ise tek tesirli, çift tesirli, T-bağlantı gibi farklı konfigürasyonlarda oluşturulan bağlantıların deneysel ve nümerik analizlerini içermektedir. Alışılmış bağlantı tiplerinin dışında; eğrisel (scarf) ve açısal (curved) bindirmeli yapıştırma bağlantı çeşitleri de üretim zorluklarına rağmen tek ve çift tesirli bağlantılarda gelişmiş gerilme dağılımlarının elde edilmesi sağlaması açısından önemli bir kullanım alanına sahiptir. Bu tez kapsamında da eğrisel (scarf) ve açısal (curved) bindirmeli yapıştırma bağlantılarının deneysel ve nümerik analizleri bulunduğundan dolayı bu bölümde bu tip bağlantılara yönelik literatür özetlerine yer verilmiştir. Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarında; bağlantı dayanımını olumsuz olarak etkileyen yapıştırılan malzeme eğilmesi durumunu içermemesi nedeniyle bağlantı dayanımı artmasına rağmen yapıştırılan malzemelerin uç kısımlarında oluşan aşırı gerilme yoğunluklarında önemli ölçüde etkilenmektedir. Dolayısıyla bu etkiyi en aza indirebilmek amacıyla bu bağlantıların geometrik parametrelerinin optimizasyonuna

yönelik çalışmalar önem arz etmektedir. Bu yönde ilk çalışma Jones and Graves (1984) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada; açısız olarak birleştirilmiş bağlantının en yüksek taşıma yükünün elde edildiği bindirme hattının açısız değeri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda optimum açı değerinin 3° olduğu ifade edilmiştir.

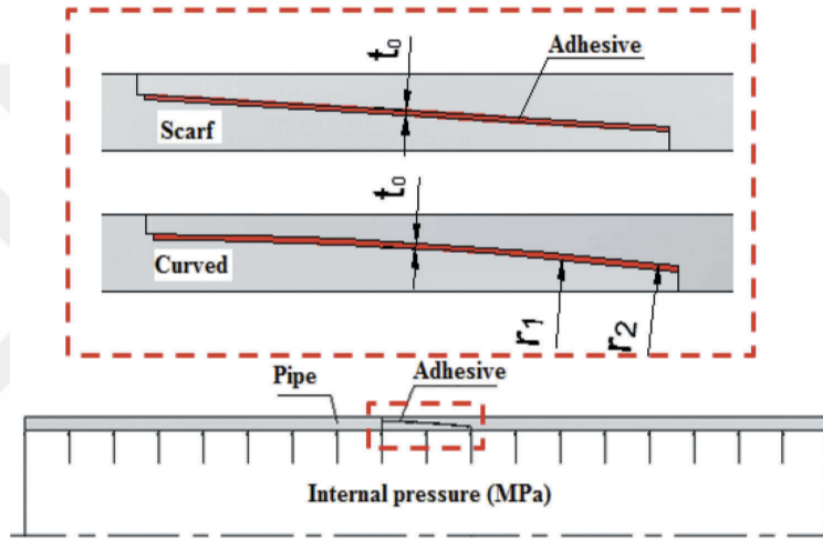
Açısız bindirmeli yapıştırma bağlantılarının geometrik parameterlerinin optimizasyonuna yönelik başka bir çalışma ise Gunnion and Herszberg (2006) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kompozit malzemelerin birleştirilmesi ile oluşturulan bağlantıların; bindirme hattı açısı, yapıştırıcı tabaka kalınlığı, kompozit tabaka kalınlığı, lamina kalınlığı ve kompozit tabakaların dizilimlerine göre dayanımını belirlemek amacıyla nümerik bir çalışma yapılmıştır.

Moreira and Campilho (2015) tarafından yapılan çalışmada ise alüminyum yapıştırılan malzemelerin onarımında açısız bindirme hattının optimum açısını belirlemek amacıyla CZM yaklaşımı bir çalışma yapılmış ve onarım prosesinde eşit yük dağılımının elde edilmesi amacıyla bindirme açısının artırılması gerektiği ifade edilmiştir.

Alves et al. (2018) tarafından yapılan çalışmada ise kompozit ve alüminyumdan oluşan farklı yapıştırılan malzemeler içeren açısız bindirmeli hibrit yapıştırma bağlantılarının deneysel ve CZM yaklaşımı nümerik analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada farklı yapıştırıcılar ve farklı bindirme açılarının (Şekil 2.12a) bağlantıların dayanımları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda; bindirme açısı ve yapıştırıcı çeşidinin bağlantı dayanımı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu ve deneysel / nümerik sonuçlar arasındaki uyumdan dolayı (Şekil 2.12b) CZM yaklaşımının nümerik analizlerde önemli bir araç olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 2.12. (a) Bağlantı numunesinin geometrisi, (b) bağlantı açısı ve bağlantı yükü arasındaki ilişki (Alves et al. 2018).



Şekil 2.13. Bağlantı geometrisine ait yapıştırma bölgesinin gösterimi (Çitil et al. 2019)

Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının bindirme açısı, yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme çeşidi gibi parametrelerin dışında bindirme yüzeylerinin eğrisel olarak tasarlanması durumunun bağlantı dayanımı üzerine etkisini de içeren deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri Çitil et al. (2019) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada; iç basınca maruz kalan kavisli yüzeyli bindirme bağlantılarına (Şekil 2.13) sahip yapıştırılarak birleştirilmiş boruların bağlantı dayanımı üzerinde eğrilik yarıçapının etkisi deneysel ve CZM yaklaşımı nümerik analizler ile değerlendirilmiş ve eğrilik yarıçapının bağlantı dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir.

Çitil (2021) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise eğrisel bindirmeli yapıştırma bağlantılarında; eğrilik yarıçapı, yapıştırılan malzeme kalınlığı ve bindirme

uzunluğu parametrelerine bağı olarak bağlantı dayanımındaki farklılıklar deneysel ve nümerik olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmanın nümerik analizinde Genişletilmiş Drucker-Prager malzeme modeli kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda bahsi geçen bağlantı parametrelerinin bağlantı dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, çekme yükü etkisinde en fazla yükü açısall bindirmeli bağlantının taşıdığı ve deneysel ve nümerik sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu ifade edilmiştir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu çalışmada, farklı malzeme gruplarının yapıştırıcı ile birleştirilmesi ile oluşturulan kompozit yapılarının mekanik davranışları deneysel ve sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda yer değiştirme alanları ve sayısal modelleme için gerekli parametreler dijital görüntü korelasyon tekniği ile elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde kohesiv bölge malzeme modeli kullanılırken elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu tez kapsamında yapılan tüm deneyler ve bu deneyler yardımıyla belirlenecek deneysel parametreler Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1. Deneyler planı

BULK YAPIŞTIRICI DENEYLERİ	KOMPOZİT YAPI DENEYLERİ
1) Çekme deneyleri ➤ Bulk yapıştırıcının çekme deneyi ile belirlenen parametreler • Elastisite modülü • Poisson oranı • Çekme dayanımı • Çekme gerinimi 2) Kayma Deneyleri ➤ Iosipescu kayma deneyi ile belirlenen parametreler • Kayma modülü • Kayma dayanımı • Kayma şekil değişimi	1) Metal ve yapıştırıcı birleşimiyle oluşturulan kompozit yapı deneyleri ➤ DCB deneyi ile belirlenecek parametreler • Mod-I kırılma enerjisi • Deneysel CZM eğrisi ➤ ENF deneyi ile belirlenecek parametreler • Mod-II kırılma enerjisi • Deneysel CZM eğrisi ➤ TAST deneyi ile belirlenecek parametreler • Mod-II kırılma enerjisi • Kayma mekanik özellikleri 2) Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantısı deneyleri • Hasar yükü • Deplasman değerleri

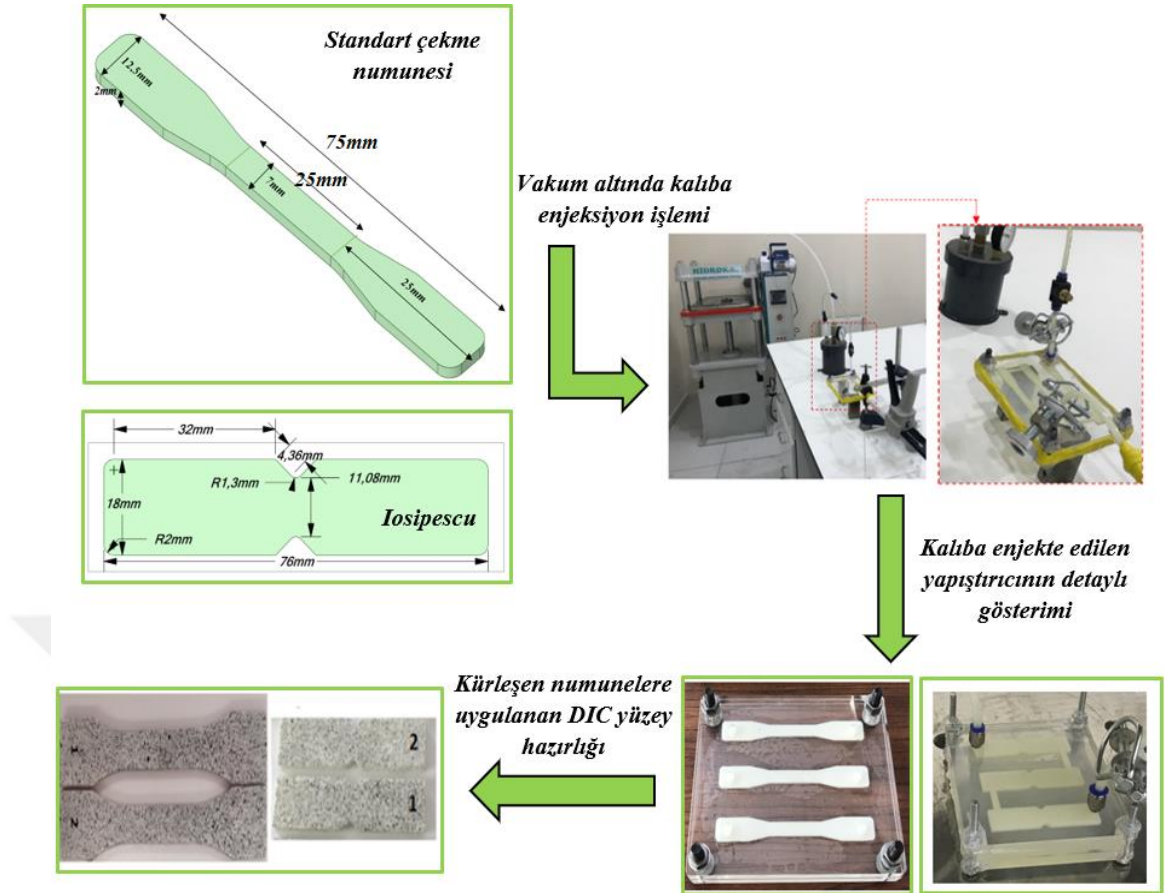
3.2. Yapıştırıcı ve Yapıştırılan Malzemeler

3.2.1. Yapıştırıcı ve bulk numunelerin hazırlanması

Yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin, yapıştırılan malzemelerin özelliklerinden bağımsız olarak tespit edilmesi amacıyla bulk numuneler üretilmekte ve tek eksenli çekme ve kayma yüklerine maruz bırakılarak mekanik özellikleri tespit edilmektedir. Bulk numunelerin üretimi genellikle numune geometrisine uygun olarak üretilen kalıplara yapıştırıcı dökülerek veya enjekte edilerek ya da plakalar arasına basınç uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Üretilen bulk numunelerin kalitesi; hava boşlukları, yabancı maddelerin sebep olacağı inklüzyonların en aza indirilmesi, homojen bir karışımın sağlanması ve kürleşme esnasında oluşan gerekenden fazla sıcaklık artışının engellenmesi ile artmaktadır. Ayrıca sıvı yapısal yapıştırıcının kalıba enjekte edilmesi esnasında hava boşluklarının minimize edilmesi amacıyla vakum altında numune üretimi gerçekleştirilmesi tavsiye edilmektedir.

Bu çalışmada yapıştırıcı malzeme olarak; 3M™ tarafından üretilen, 2:1'lik karışım oranıyla tokluk, yüksek mukavemet ve hızlı kürleşmenin gerekli olduğu yerlerde kullanılmak üzere tasarlanmış çift bileşenli sıvı yapıştırıcı DP810 kullanılmıştır. Şekil 3.1'de DP810 sıvı yapıştırıcısından üretilen 2 mm kalınlıklı standart çekme numunesi (Geometrik ölçülerde ISO-527/2 referans alınmıştır.) ve 5 mm kalınlıklı Iosipescu kayma numunelerine (Geometrik ölçülerde ASTM D5379 referans alınmıştır.) ait üretim aşamaları verilmiş ve aşağıda üretim prosesi basamakları özetlenmiştir.

- İlk olarak yapıştırıcının kalıp parçalarına yapışmasını engellemek amacıyla kalıp parçaları üzerinde ince bir tabaka oluşacak şekilde silikon yağlayıcı kalıba püskürtülmesi,
- Yapıştırıcı kalıba vakum altında enjekte edilmesi,
- Yapıştırıcıların kürleşme işleminin tamamlanması ardından kalıplardan çıkarılarak nem oranı 50 ± 5 ve sıcaklığı 22°C olan laboratuvar koşullarında deneyler yapılncaya kadar muhafaza edilmesi,
- DIC analizleri için numune üzerine mat spreyci boya püskürtülerek rastgele desen yapısının oluşturulması basamaklarını içermektedir.



Şekil 3.1. Bulk numunelerin üretim aşamalarının gösterilmesi

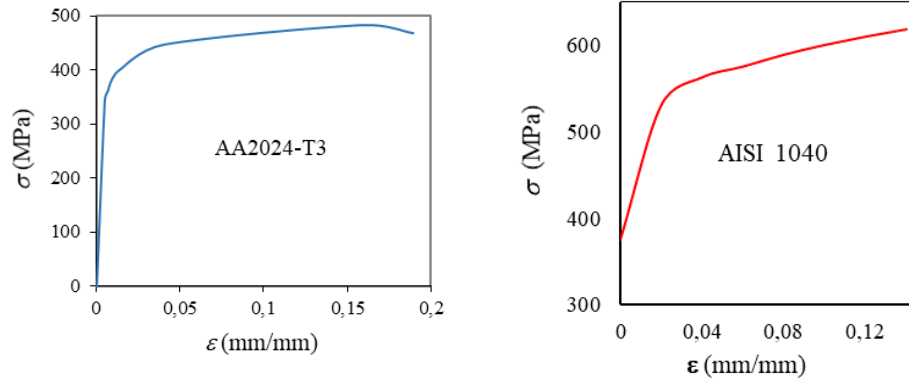
3.2.2. Yapıştırılan malzemeler

Bu çalışmada yapıştırılan malzeme olarak; hafifliği, yüksek korozyon dayanımı, fiziksel ve mekanik özellikleri, işlenebilirliği ve yapıştırıcıların bağlantıdaki performansının değerlendirilmesinde birçok uluslararası standartta (ASTM D1002, ISO 4587) kullanılmasının tavsiye edilmesi nedeniyle AA2024-T3 metal alaşımı ve AISI 1040 çeliği kullanılmıştır. Çizelge 3.2’de yapıştırılan malzemelere ait literatürden alınan mekanik özellikler verilmiştir.

Çizelge 3.2. AA2024-T3 alüminyum alaşım ve AISI 1040 çeliğinin mekanik özellikleri (Aydın et al. 2015).

	AA2024-T3	AISI 1040
E	72,4 GPa	200 GPa
ν	0,33	0,29
σ_a	345 MPa	375 MPa
σ_{ϵ}	485 MPa	618 MPa

Çizelge 3.2. (Devam)



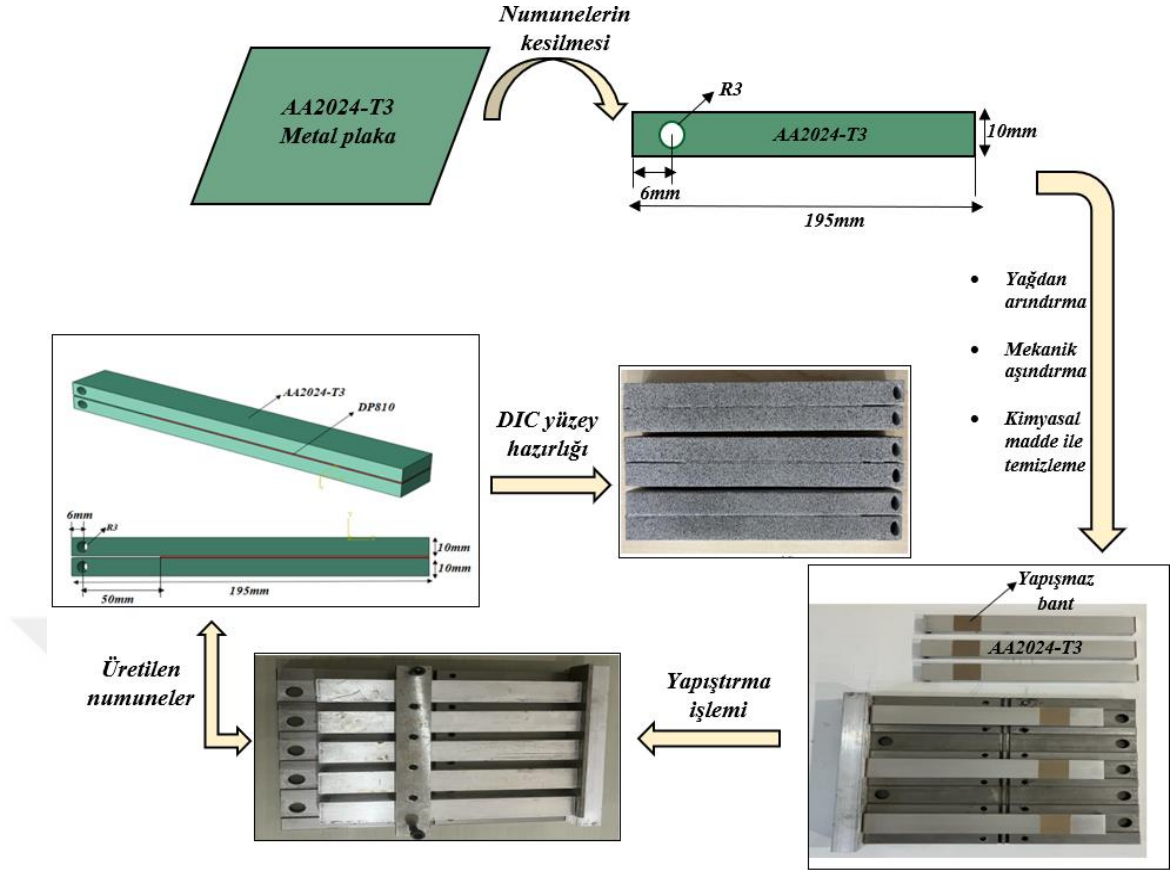
E: Elastisite Modülü; ν : Poisson oranı; σ_a : Akma Dayanımı; σ_c : Kopma Dayanımı.

3.3. Bağlantı Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada, kullanılan yapıştırıcının Mod I ve Mod II kırılma enerjileri ve deneysel CZM parametrelerinin tespit edilebilmesi amacıyla DCB, ENF ve TAST bağlantı numuneleri; deneysel CZM parametreleri ile kurulan nümerik model ve deneysel çalışmanın uyumluluğunu tespit edebilmek amacıyla da düz açılı yapıştırma bağlantıları (scarf joints) üretilmiştir. Üretilen numunelere ait geometrik özellikler ve üretim aşamaları aşağıda özetlenmiştir.

3.3.1. DCB ve ENF numunelerinin üretimi

Bu tez kapsamında; yapıştırıcıların metal – yapıştırıcı- metal ara yüzey Mod-I ve Mod-II kırılma enerjileri, CZM parametreleri ve gerçek CZM eğrilerinin (ara yüzey çekme-ayrılma eğrisi) elde edilebilmesi amacıyla AA2024-T3 metal alaşımlarının DP810 yapıştırıcısı ile birleştirilmesiyle aynı geometrik yapıya sahip metal-yapıştırıcı-metal formunda DCB ve ENF numuneleri üretilmiştir. Şekil 3.2’de numunelerin üretim aşamaları özetlenmiştir.



Şekil 3.2. (a) DCB ve ENF bağlantılarına ait üretim aşamalarının gösterilmesi

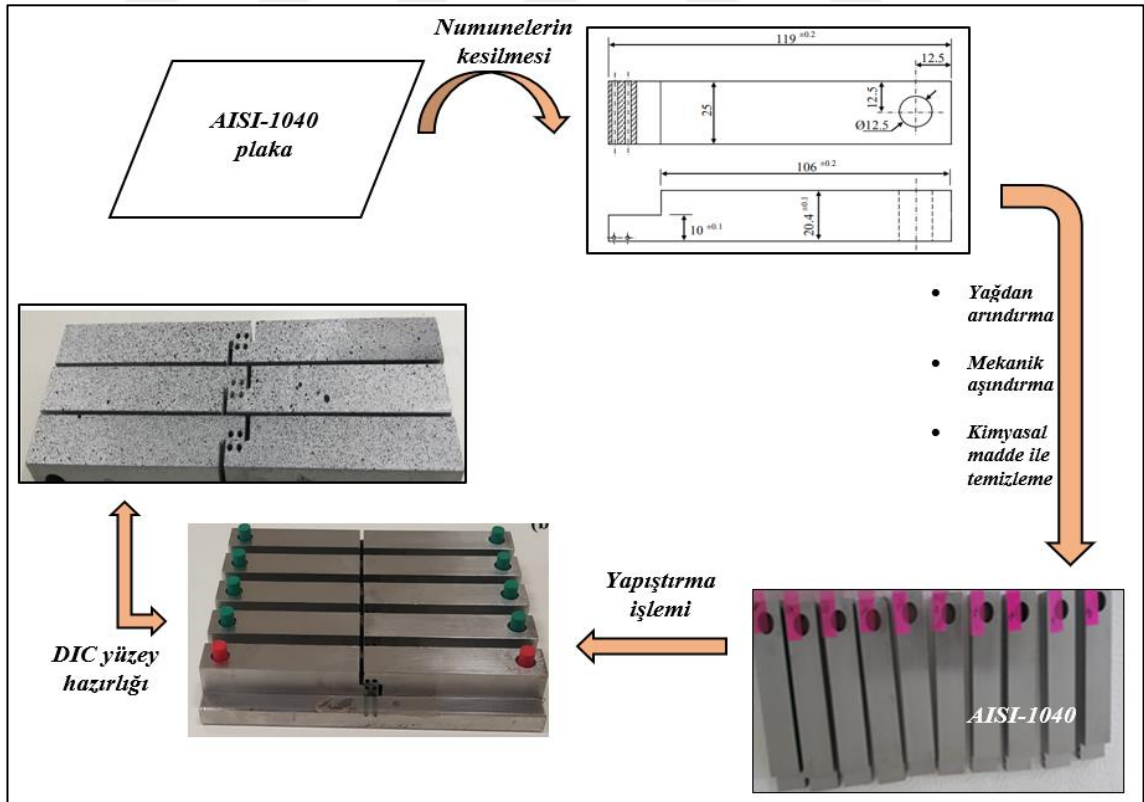
Numunelerin üretim adımları;

- Yapıştırılan malzemelerin yapışma yüzeylerinde bulunan yağ, gres, toz, kir gibi kalıntıların giderilmesi amacıyla AA2024-T3 malzemeleri aseton ile temizlenmiş ve asetonun malzeme yüzeyinde buharlaşmasının ardından numuneler mekanik aşındırma işlemine tabi tutulmuştur.
- Mekanik aşındırma işleminin ardından musluk suyu ile durulanan numuneler tekrar aseton içerisinde 4-5 dakika bekletilmiş ve ardında sıcak hava ile yapışma yüzeyleri kurutulmuştur. Ardından DCB ve ENF numunelerinde ilk çatlak boyunu oluşturabilmek amacıyla yapıştırılan malzemelerin her iki yüzeyine teflon bant yapıştırılmıştır.
- Yüzey hazırlığı tamamlanan numuneler; istenen yapıştırıcı kalınlığını sağlayan ve yapıştırılan malzemelerin birbiri üzerinde kaymasını engelleyen bir kalıba, numunelerin kalıba yapışmasını engelleyen silikon spreyn (3M Scotch™ 1609) ince bir tabaka şeklinde püskürtülmesi işleminin ardından yerleştirilmiştir.

- Yerleştirilen numunelerin kalıp içerisinde kürleşme prosesinin tamamlanması ardından numuneler kalıptan çıkarılarak kürleşme esnasında dışarı taşan istenmeyen yapıştırıcı kalıntıları temizlenerek deneylere hazır yapıştırma bağlantıları elde edilmiş ve son olarak numunelerin DIC analizleri için yüzeylerinde rastgele desenler mat sprej boya kullanılarak oluşturulmuştur.

3.3.2. TAST numunelerinin üretimi

Yapıştırıcıların Mod-II kırılma enerjilerinin tespit edilmesinde kalın yapıştırılan malzemelerin kayma testi (TAST), ENF testine alternatif olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla AISI 1040 yapıştırılan malzeme ve DP810 yapıştırıcısı kullanılması ile DCB ve ENF numunelerinin üretim adımları dikkate alınarak 3 adet TAST numunesi üretilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerin DIC analizleri için yüzeyleri rastgele desen olacak şekilde mat sprej boya ile hazırlanmıştır. Şekil 3.3'te TAST numuneleri ve üretim süreci detaylandırılmıştır.



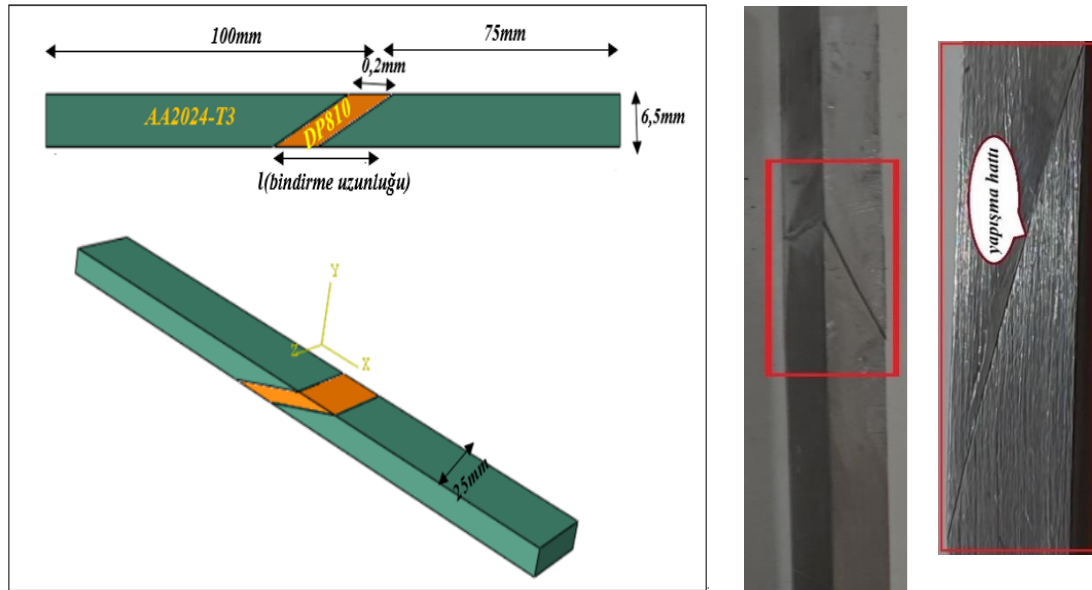
Şekil 3.3. TAST numunelerinin üretim aşamaları

3.3.3. Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının üretimi

Yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı ara yüzeyine ait belirlenen mekanik özellik datalarının (kırılma enerjileri, CZM parametreleri ve gerçek CZM eğrileri) input olarak kabul edilmesi suretiyle oluşturulan nümerik modelin deneysel çalışmalar ile uyumunun belirlenmesi amacıyla yapıştırıcı olarak DP810, yapıştırılan malzeme olarak ise AA2024-T3 metal alaşımı kullanılması ile bindirme uzunluğu(l) 25 mm olan toplam 4 adet açısal bindirmeli yapıştırma bağlantıları; DCB ve ENF numune üretim prosesinde olduğu gibi açılı olarak kesilen yapıştırılan malzemelerin yapışma yüzeylerine uygulanan yüzey işlemlerinin ardından istenen yapıştırıcı kalınlığını sağlayan bir kalıpta kürleştirilerek oluşturulmuştur. Deneylerde kullanılan numunelere ait isimlendirme Çizelge 3.3'te detaylı olarak verilmiştir. Şekil 3.4'te ise üretilen yapıştırma bağlantılarına ait geometrik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının isimlendirilmesi

DENEYLER	NUMUNE ADI
Çekme	SCARF_1 SCARF_2
3 Nokta Eğme	SCARF_3 SCARF_4



Şekil 3.4. Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantısına ait geometrik özellikler

3.4. Bulk Numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Bölüm 3.2.1’de geometrik özellikleri ve üretim adımları özetlenen bulk yapıştırıcı numunelerinin çekme ve kayma mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla tek eksenli çekme ve kayma testleri (Iosipescu testi) yapılmıştır.

Tek eksenli çekme yüküne maruz bulk numunelerden mekanik özelliklerin belirlenmesi;

Bu çalışmada, DP810’dan üretilen standart çekme numuneleri, bilgisayar kontrollü 100 kN kapasiteli 5982 Model Instron universal test cihazında 22°C sıcaklığında ve %50 nem oranında 2 mm/dk’lık sabit deformasyon hızında test edilmiştir. Deney süresince yük verileri 100 kN’luk yük hücresi vasıtasıyla, şekil değiştirme verileri ve dijital görüntü korelasyonu için gerekli fotoğraflar çekme cihazına bağlı AV 2 model video ekstansometreden elde edilmiştir. Bu videodan elde edilen resimler daha sonra GOM Correlate 2019 programında işlenerek gerinim değerleri belirlenmiştir. Kullanılan yazılım algoritması, görüntüleri subset adı verilen alt bölgelere ayırmakta ve çapraz korelasyon katsayısını optimize eden şekil fonksiyonlarını kullanılarak her bir alt bölgenin yer değişimini tespit etmektedir. Bu yazılımda alt pixel interpolasyonu olarak bikübik interpolasyon kullanılmış ve görüntü yüzeyinden seçilen alan, subset merkezleri arasındaki mesafe 16 pixel olan 19 pixel ×19 pixel ‘lik subsetlere ayrılarak çözüm gerçekleştirilmiştir.

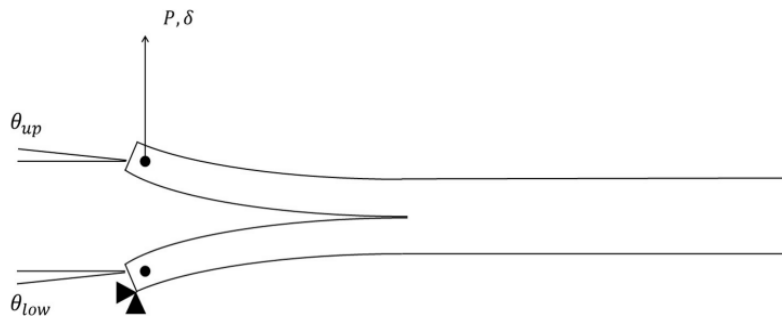
Kesme yüküne maruz bulk numunelerden mekanik özelliklerin belirlenmesi;

Bu çalışmada, DP810 kullanılarak üretilmiş Iosipescu numuneleri, bilgisayar kontrollü 100 kN kapasiteli 5982 Model Instron universal test cihazı kullanılarak 22°C sıcaklığında ve %50 nem oranında 2 mm/dk’lık sabit deformasyon hızında test edilmiştir. Deney süresince yük verileri 100 kN’luk yük hücresi vasıtasıyla, şekil değiştirme verileri ve dijital görüntü korelasyonu için gerekli görüntüler çekme cihazına bağlı AV 2 model video ekstansometreden elde edilmiştir. Bu videodan elde edilen resimler daha sonra GOM Correlate 2019 programında işlenerek DP810 yapıştırıcısına ait kayma mekanik özellikleri belirlenmiştir.

3.5. Bağlantı Formundaki Numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Mod I ve Mod II kırılma enerjilerinin hesaplanmasında; çatlak uzunluğunun doğrudan ölçülmesini gerektiren Komplians Kalibrasyon Metodu (CCM), Direkt Kiriş Metodu (DBT) gibi LEFM temelli yaklaşımlar ve çatlak uzunluğunun tespitini gerektirmeyen Komplians Temelli Kiriş Metodu (CBBM), Konik Çift Konsol Kiriş Testi (TDCM), Konik Uç Çentikli Eğme Testi (TENF) ve J-integral gibi yaklaşımlar kullanılmaktadır. Özellikle Mod II kırılma enerjisinin belirlenmesinde kullanılan ENF testlerinde çatlak uzunluğunun yeterli doğrulukta ölçülmesi önemli bir problemdir. Bundan dolayı çatlak uzunluğunun tespitini gerektirmeyen yaklaşımların kullanılması daha uygun olmaktadır.

Bu çalışmada; Paris and Paris (1988) tarafından geliştirilen, saf Mod I yüklemesini içeren DCB numunesi için uygulanan yüke ve yük uygulama noktasındaki dönme açılarına dayanan kapalı formda J-integral yaklaşımı kullanılmıştır. Şekil 3.5'te verilen dönme açılarını içeren J-integral formülü Denklem 3.1'de verilmiştir. Denklem 3.1'de verilen eşitliğin çatlak önü deplasmanına (δ_n) göre türevi alınarak deneysel çekme-ayrılma ilişkisi (CZM eğrisi) elde edilmektedir (Denklem 3.2). Mod II yükleme durumunda kullanılan J-integral yaklaşım analizi ise elastik olmayan temeller üzerindeki kırımların analitik modellerine dayalı olarak Leffler et al. (2007) tarafından geliştirilen, J-integral formülasyonu (Denklem 3.3) ile de Mod II kırılma enerjisi tespit edilmiştir. Mod I CZM eğrisinin elde edildiği gibi Mod II yükleme durumunda da Denklem 3.3 ile verilen eşitliğin çatlak önü kayma deplasmanına (δ_s) göre türevi alınarak Mod II kohezyon yasası elde edilmektedir (Denklem 3.4).

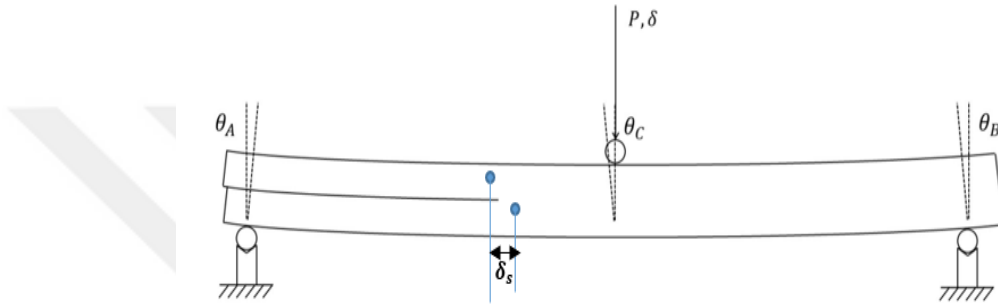


Şekil 3.5. DCB numunesinde yükleme sonucu oluşan dönme açıları (Simões 2022)

$$J_I = \frac{P}{b} (\theta_{üst} - \theta_{alt}) \quad (3.1)$$

$$\sigma(\delta_n) = \frac{\partial J_I}{\partial \delta_n} \quad (3.2)$$

Burada, P : uygulanan yük, b : numune genişliği, $\theta_{üst}, \theta_{alt}$ ise üst ve alt yapıştırılan malzemelerin yük uygulama noktalarındaki dönme açılarıdır.



Şekil 3.6. ENF numunesinde yükleme sonucu oluşan dönme açıları (Simões 2022)

$$J_{ENF} = \frac{9P^2 a_0^2}{16Eb^2h^3} + \frac{3P\delta_s}{8bh} \quad (3.3)$$

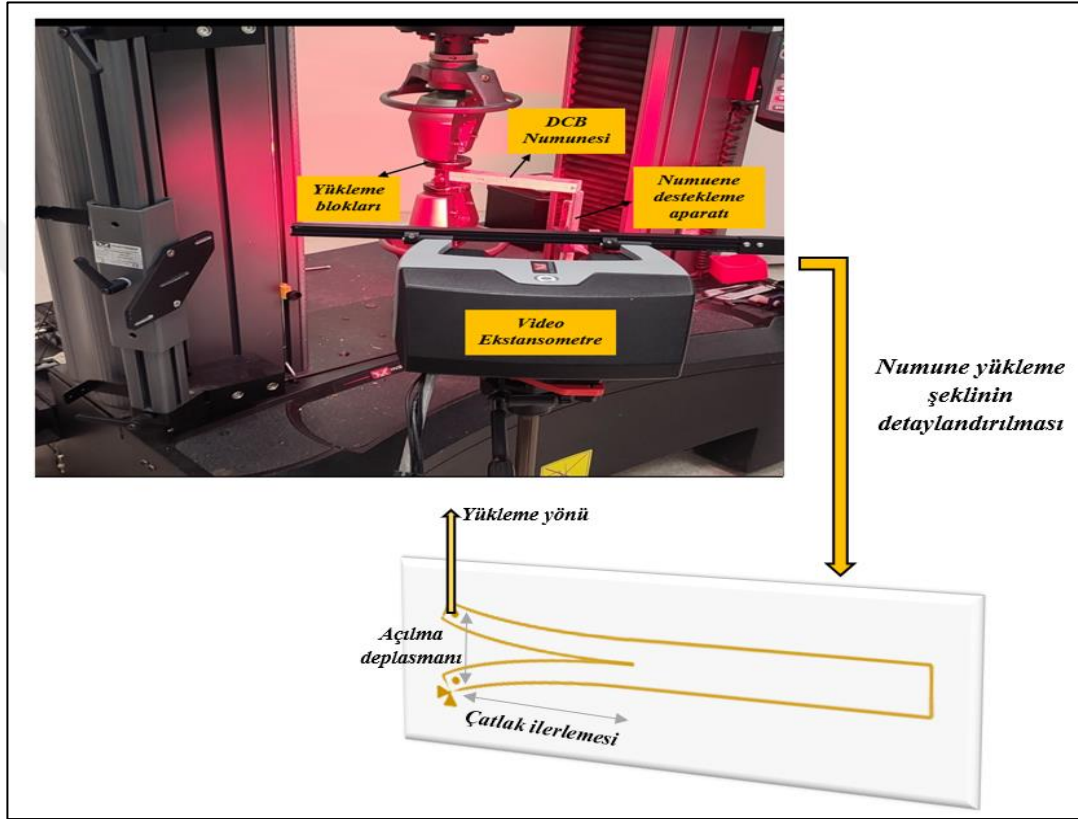
$$\tau(\delta_s) = \frac{\partial J_{II}}{\partial \delta_s} \quad (3.4)$$

Burada, P : uygulanan yük, b : numune genişliği, a_0 : ilk çatlak uzunluğu, E : yapıştırılan malzemenin elastisite modülü, h : yapıştırılan malzeme kalınlığı, δ_s ise çatlak önü kayma deplasmanını ifade etmektedir.

3.5.1. Çift Konsol Kiriş (Double Cantilever Beam – DCB) deneyi

Bu çalışmada; yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve yapıştırıcı olarak DP810 çift bileşenli yapısal yapıştırıcı kullanılarak 3 adet DCB numunesi (DCB-1, DCB-2, DCB-3) üretilmiştir. Deneyler, 100 kN kapasiteli 5982 Model Instron universal test cihazında (Şekil 3.7) 1 mm/dk 'lık şekil değişim hızında

yapılmıştır. Deney analizlerinde; yük hücresinden alınan yük (P) dataları, çekme cihazının çene hareketinden (strok) alınan deplasman dataları ve deney süresince kaydedilen görüntüler kullanılarak DIC analizleri yapılmıştır. Deneyler ve DIC analizleri ile elde edilen çatlak uzunluğu, yük ve deplasman değerleri kullanılarak Mod I ara yüzey kırılma enerjileri ve deneysel CZM çekme-ayrılma (traction-seperation) eğrileri elde edilmiştir.



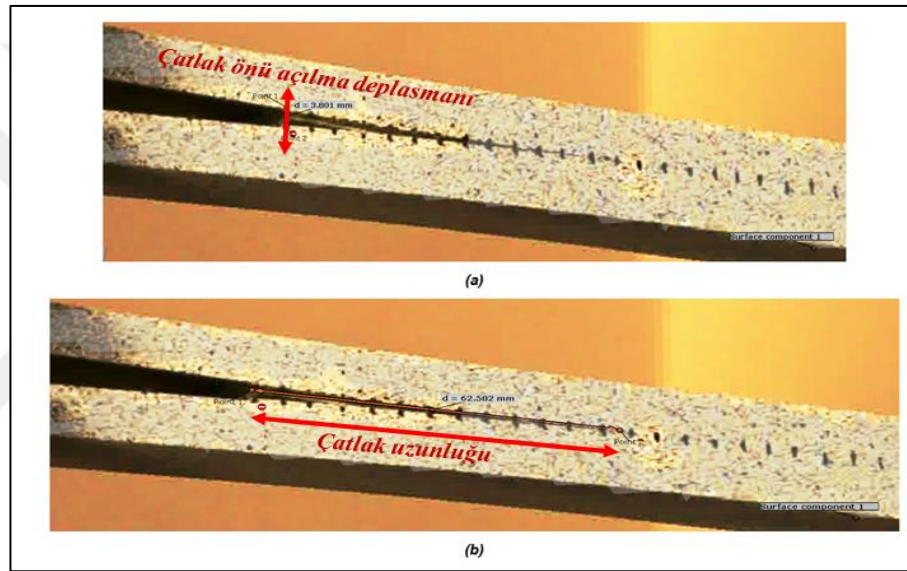
Şekil 3.7. DCB deneyi kurulumu

DIC analiz adımları;

Bu tez kapsamında, Mod I kırılma enerjisinin tespitinde; çatlak uzunluğu ölçümü gerektiren LEFM temelli Modifiye Kiriş Teorisi (MBT) ve Kompliyans Kalibrasyon Metodu (CCM) yaklaşımları kullanılırken çatlak uzunluğunun tespitinden bağımsız ve Elastik Olmayan Kırılma Mekaniği yaklaşımı J-integral metodu kullanılmıştır. Ayrıca J-integral metodu vasıtasıyla Mod I yüklemesi durumunda deneysel CZM eğrisi elde edilerek nümerik modelleme de kullanılan CZM yasası için uygun malzeme modelinin

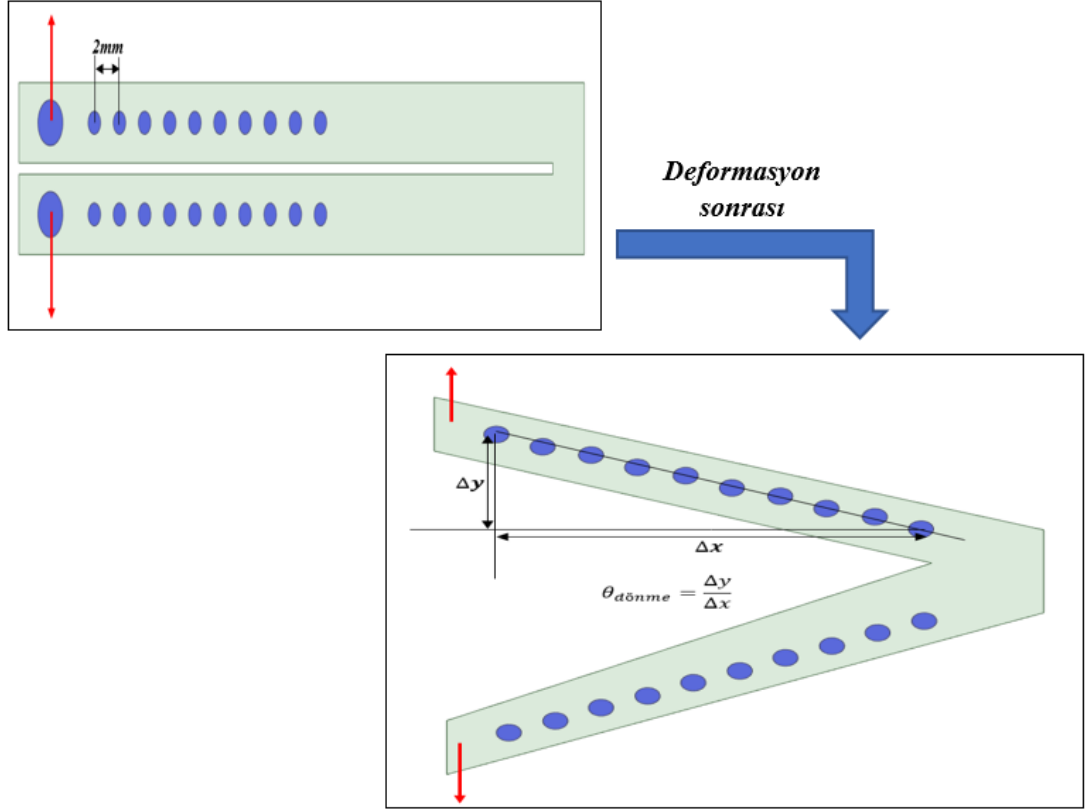
tanımlanması sağlanmış ve deneysel ve nümerik analizlerin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Çatlak uzunluğunun tespitini gerektiren yaklaşımların DIC analizlerinde, çatlak önü deplasmanı ve çatlak uzunluğu değerleri Şekil 3.8’de gösterilen sanal noktaların deplasman farkları alınarak tüm zaman dilimlerine ait deplasman ve çatlak uzunluğu dataları elde edilerek yapıştırıcıya ait kırılma enerjileri tespit edilmiştir. Ayrıca farklı zaman dilimlerine ait DIC yüzey gerinim haritaları yardımıyla hasar analizi yapılarak çatlak önü gerinim değerleri de elde edilmiştir.



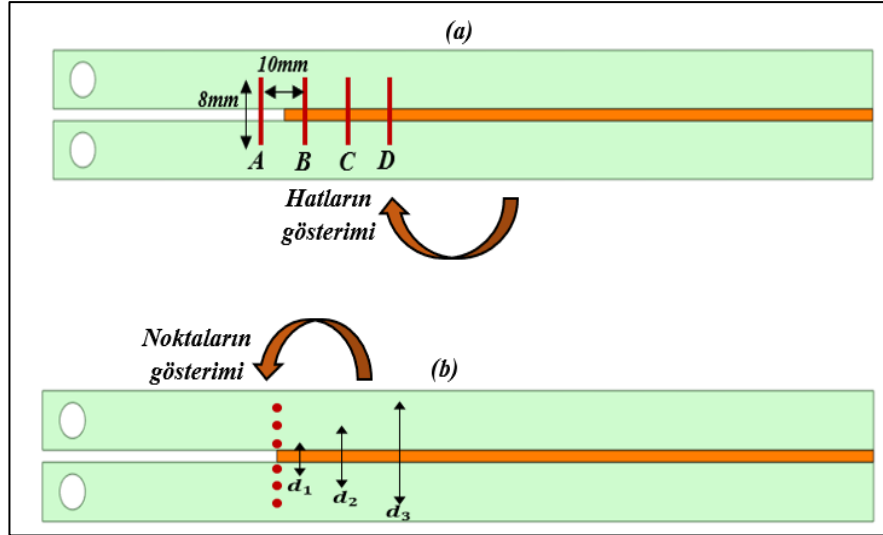
Şekil 3.8. (a)Çatlak önü deplasmanını belirlemek için kullanılan sanal noktalar, (b) çatlak uzunluğunu belirlemek için kullanılan sanal noktalar.

Çatlak uzunluğunun tespitini gerektirmeyen J-integral yaklaşımına ait DIC analizlerinde ise Şekil 3.9 ‘da verildiği gibi alt ve üst yüzeylere aynı hizada ve 2 mm’lik eşit aralıklarla yerleştirilen 10 adet sanal noktanın deformasyon boyunca x ve y yönlerindeki deplasman değerleri belirlenmiş ve $(\theta = \frac{dy}{dx})$ ilişkisi kullanılarak alt ve üst yapıştırılan malzemelere ait dönme açıları tespit edilmiştir.



Şekil 3.9. DIC analizlerinde alt ve üst yapıştırılan malzemelerin dönme açılarının tespit edilmesinde kullanılan sanal noktaların gösterimi.

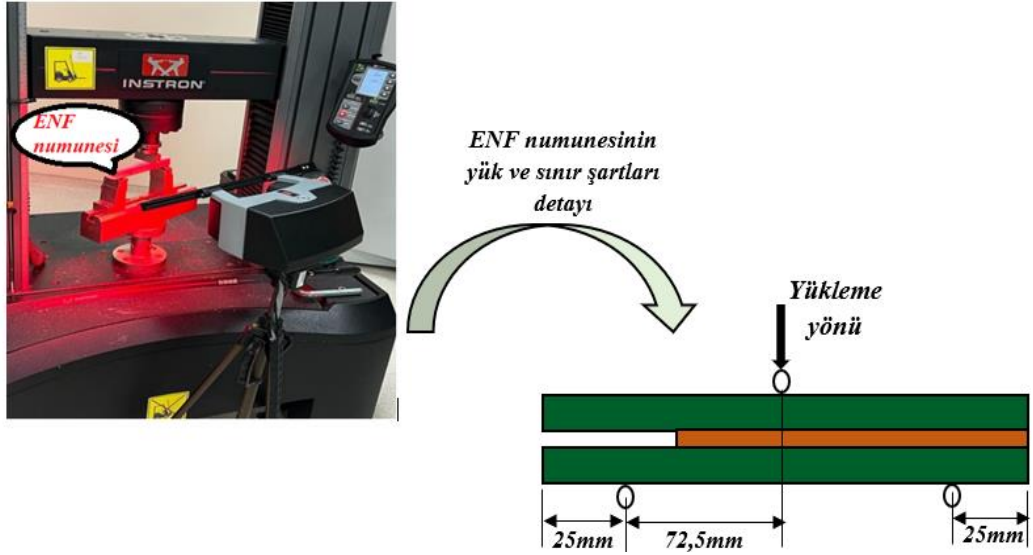
Bu çalışmada DCB test yönteminin yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcının kırılma enerjisini belirleme noktasındaki etkinliğinin belirlenebilmesi amacıyla 10 mm aralıklarla yerleştirilen 4 hattın (A,B,C,D) çekme yönündeki eksenel gerinim değerlerinin hat uzunluğu ile değişimi tespit edilmiştir (Şekil 3.10a). Ayrıca, DCB deneyi ile deneysel CZM eğrilerinin elde edilmesinde önemli bir parametre olan çatlak önü açılma deplasmanı (δ_n) değerinin belirlenmesinde kullanılan noktalar arasındaki uzaklık değerindeki değişimin, çatlak önü deplasman datalarında oluşturabileceği farklılığı incelemek amacıyla Şekil 3.10b’de verildiği gibi farklı uzaklıklardaki noktaların deplasman analizleri yapılmıştır.



Şekil 3.10. DIC analizinde kullanılan; (a) A,B,C,D hatlarının gösterimi, (b) çatlak önü deplasmanı değerinin belirlenmesinde kullanılan farklı uzaklıklardaki noktaların gösterimi.

3.5.2. Uç çentikli eğme deneyi (End Notched Flexure – ENF)

Mod II yüklemesi durumunda çatlak ilerlemesi sonucunda ortaya çıkan kırılma enerjisi ENF testi ile elde edilen yük ve yük uygulama noktasındaki deplasman dataları kullanılarak tespit edilmektedir. Bu çalışmada; ENF numunelerinin 100 kN kapasiteli 5982 Model Instron universal test cihazında (Şekil 3.11) 1 mm/dk'lık deformasyon hızında deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen deneysel datalar yardımıyla çatlak uzunluğunun ölçülmesini gerektiren LEFM temelli Kompliyans Kalibrasyon Metodu (CCM), Direkt Kiriş Teoremi (DBT); çatlak uzunluğu ölçümü gerektirmeyen ASTM D-7905 standartında belirtilen Deneysel Kalibrasyon Metodu (ECCM), Elastik Olmayan Kırılma Mekanikliği yaklaşımıyla Kompliyans Temelli Kiriş Metodu (CBBM) ve J-integral metodları kullanılarak Mod II kırılma enerjisi belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.11. ENF deney kurulumu

DIC analiz adımları;

Bu çalışmada, Leffler et al. (2007) tarafından önerilen J-integral metodunun analizi için Şekil 3.12’de gösterilen sanal noktaların yatay eksen (x) boyunca birbirlerine göre deplasman farklarının alınmasıyla tüm zaman dilimlerine ait çatlak önü kayma deplasman değerleri (δ_s) belirlenerek yapıştırıcıya ait kırılma enerjisi tespit edilmeye çalışılmıştır.



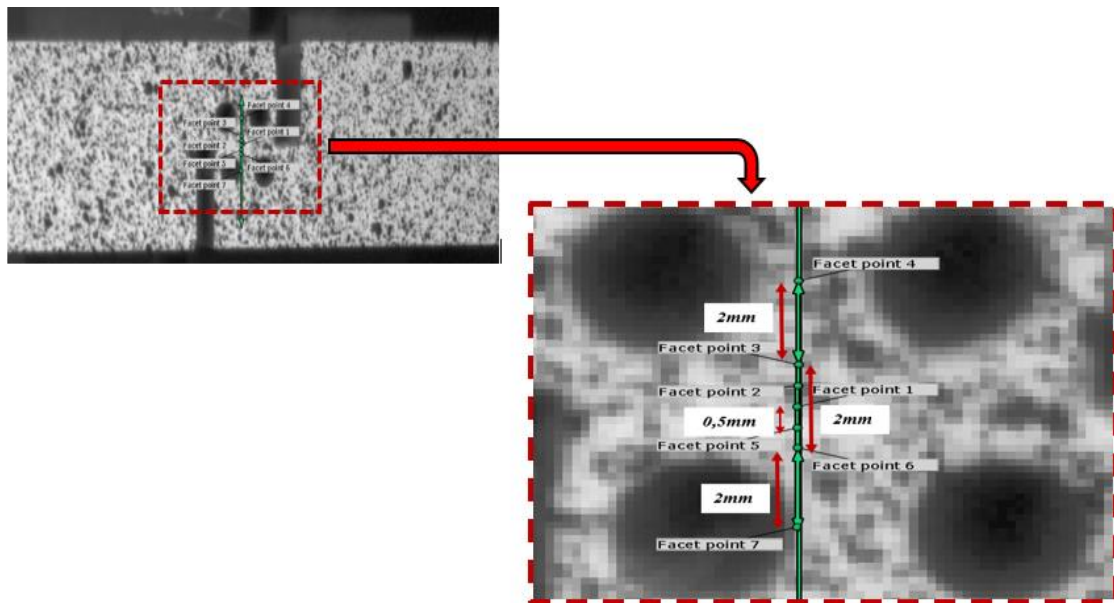
Şekil 3.12. Çatlak önü kayma deplasmanını belirlemek için kullanılan sanal noktalar

3.5.3. TAST Deneyi

Bu deneysel yöntemde kalın AISI-1040 çeliğinden üretilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının aksel yönde çekme yüküne maruz kalması durumunda, yapıştırılan çelik malzemeler kalın ve rijit olması sebebiyle soyulma (peel) kuvvetleri minimize edilmekte ve sonuç olarak yapıştırıcı tabakasında kayma şekil değişimi oluşmaktadır. Bu tez kapsamında; hem Iosipescu kayma numunelerinden elde edilen kayma mekanik

özellikleri hem de ENF testi ile elde edilen Mod II kırılma enerjisi değerlerinin kıyaslanması açısından 3 adet TAST numunesinin deneyleri bilgisayar kontrollü 100 kN kapasiteli 5982 Model Instron üniversal test cihazında 22°C sıcaklıkta ve %30 nem oranında, 2450 N/dak 'lık şekil değişim hızında yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen yük datalarının kayma alanına bölünmesi ile kayma gerilmesi değerleri, deneyler süresince kaydedilen görüntülerin DIC analizi ile incelenmesi sonucunda ise kayma deplasmanları ve kayma şekil değişim değerleri belirlenmiştir.

TAST deneylerinde yapıştırıcı tabakasında yapıştırılan malzemelere nispeten çekme yükü etkisi ile büyük oranda kayma şekil değişimi oluşmakla birlikte bu şekil değişim değerleri yapıştırılan malzemelere ait şekil değişim değerlerini de içermektedir. Kontak ekstansometre yardımı ile yapıştırıcı tabakasındaki kayma şekil değişiminin belirlenmesinde yapıştırılan malzemelere ait şekil değişimlerinin çıkarılmasına yönelik ASTM D5656 standartında uygulanan yöntem detaylı olarak anlatılmıştır. Ancak bu standartta yer alan talimatların uygulanması durumunda bile bir miktar hata yapılmakta ve bundan dolayı optik ölçüm yöntemleri önemli bir alternatif olmaktadır. Bu çalışma kapsamında TAST numunelerinden yapıştırıcı kayma özelliklerinin belirlenmesinde Kosmann et al. (2019) tarafından yapılan çalışmadaki noktasal analiz yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.13'te kayma özelliklerinin belirlendiği yöntem detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3.13. DIC analizi ile kayma özelliklerinin belirlendiği noktaların gösterilmesi

$$\gamma_{adh1} = \frac{P_{3x} - P_{2x}}{|P_3 P_2|} \quad (3.5)$$

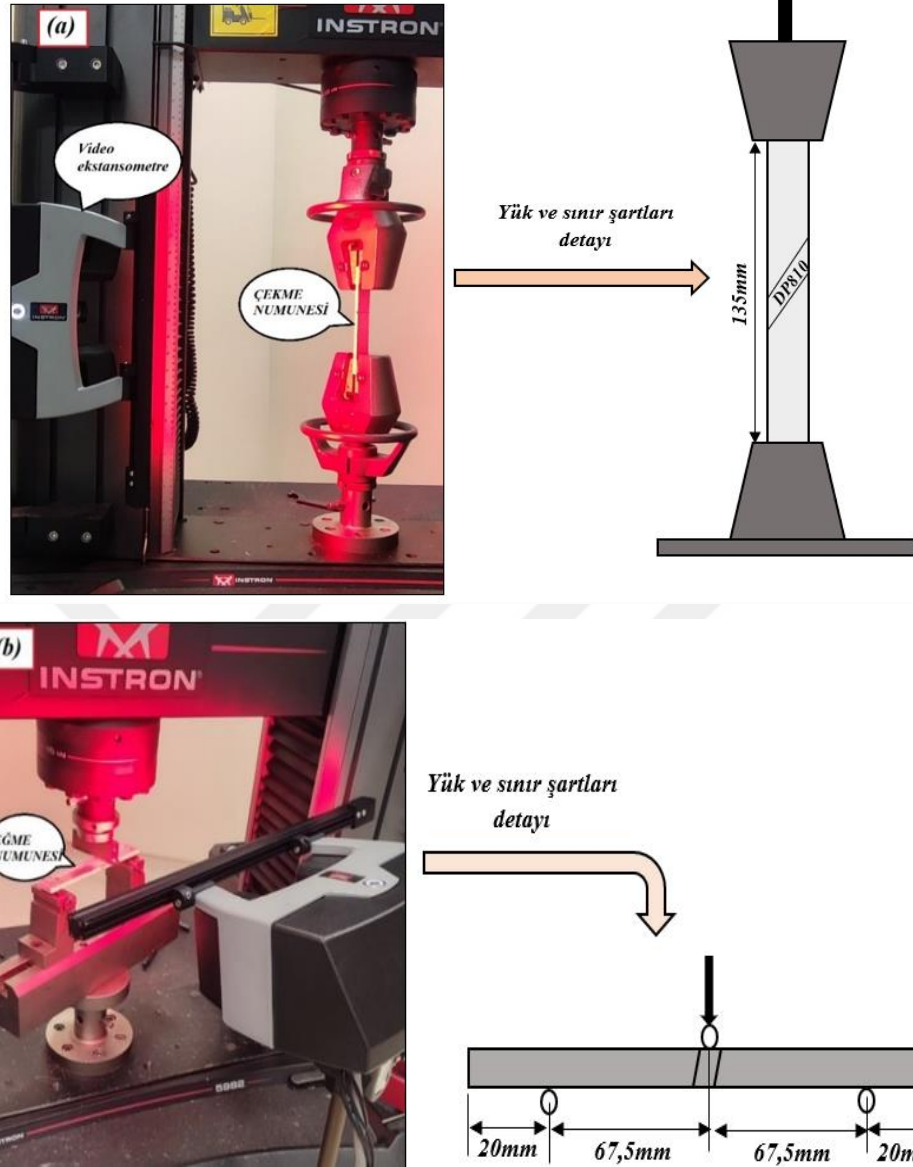
$$\gamma_{adh2} = \frac{P_{5x} - P_{6x}}{|P_5 P_6|} \quad (3.6)$$

$$\gamma_{adhesive} = \frac{(P_{2x} - P_{5x}) - \gamma_{adh1} * 0,5 * (P_3 P_2 - t_{adhsv}) - \gamma_{adh2} * 0,5 * (P_5 P_6 - t_{adhsv})}{t_{adhsv}} \quad (3.7)$$

Burada; γ_{adh1} :üst yapıştırılan malzemeye ait kayma şekil değişimi, γ_{adh2} :alt yapıştırılan malzemeye ait kayma şekil değişimi, γ_{adhsv} :yapıştırıcı tabakasına ait kayma şekil değişimini ifade etmektedir.

3.5.4.Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının testi

Bu çalışmada deneysel ve nümerik çalışmaların karşılaştırılmasında kullanılan açısallı bindirmeli yapıştırma bağlantılarının 100 kN kapasiteli 5982 Model Instron üniversal test cihazında 5 mm/dk'lık deformasyon hızında çekme ve üç nokta eğme deneyleri (Şekil 3.14) yapılarak deneysel hasar yükleri ve deplasman değerleri belirlenmiştir. Deney süresince kaydedilen görüntülerin DIC analizleri yapılarak hem deplasman dataları hem de yüzey gerinim haritaları elde edilerek nümerik modelden elde edilen yüzey gerinim haritaları ve belirli hatlardaki gerinim dağılımlarının karşılaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 3.14. Yapıştırma bağlantılarının; (a) çekme deneyi yük ve sınır şartları, (b) üç nokta eğme deneyi yük ve sınır şartları.

3.6. Sonlu Elemanlar Analizi

Bu çalışma kapsamında; farklı malzeme gruplarının birleştirilmesi ile oluşturulan kompozit yapıların mekanik karakterizasyonuna yönelik deneysel çalışmalardan elde edilen deneysel parametrelerin güvenilirliğinin saptanması amacıyla nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, birbiri ile bağımlı iki kısımda yürütülmüştür. İlk kısımda; CZM yaklaşımı nümerik analizler için gerekli olan parametrelerin belirlendiği deneysel yöntemlerin (bulk çekme, Iosipescu, DCB, ENF, TAST) bu parametreleri belirlemedeki

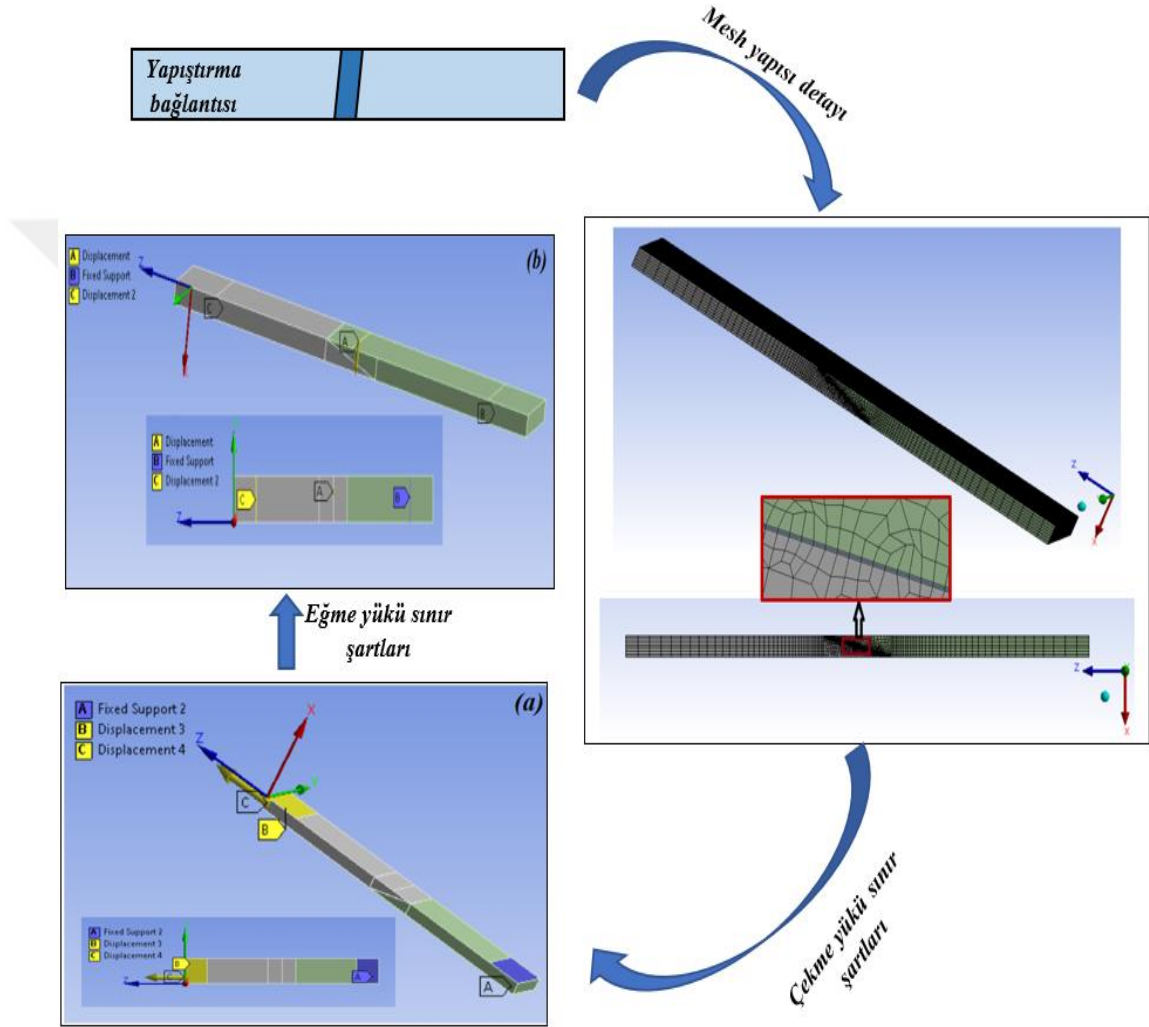
başarısını açısallı bindirmeli yapııştırma bağlantısının deneysel ve nümerik analizleri ile belirlemek, ikinci kısımda ise ilk kısımdaki deneysel ve nümerik analizlerin yeterli seviyede yakınsaması durumunda; bulk çekme, Iosipescu, DCB, ENF ve TAST deneyleri ile belirlenen CZM parametrelerinin güvenilir ve tekrarlanabilir olduğu kanısı ile özellikle havacılık gibi birçok alanda yaygın kullanılan T-tipi yapııştırma bağlantısının nümerik analizlerini yapmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada; yürütölen CZM yaklaşımlı nümerik çalışmalarda, ANSYS Worbench R 22.1 paket program kullanılmıştır. Modelleme yapılırken; CZM yaklaşımı kullanılarak yapııştırıcı ile yapııştırılan malzeme ara yüzey modellemesine kontak eleman seti ve CZM yasası olarak üçgen malzeme modeli (deneysel CZM eğrisinin üçgen yasaya uyumu sebebiyle) seçilerek kırılma enerjisi temelli kohezif bölge malzeme modeli (Fracture-Energies based Debonding, CZM) kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Ayrıca açısallı bindirmeli yapııştırma bağlantısı ve T-bağlantı uygulanan yük etkisinde karma mod hasarına (Mod I/Mod II) maruz kalacağından dolayı hasar gelişiminin değerlendirilmesinde Power Law (Power=2) güç yasası kullanılmıştır. Hem açısallı bindirmeli yapııştırma bağlantısında hem de T-bağlantıda geometrik olarak non-lineer etkilerin aktif olması ve elastik olmayan kırılma mekaniğı yaklaşımının (CZM) kullanılması sebebiyle 3B non-lineer nümerik analiz gerçekleştirilmiştir. Modellerde, gerilme yoğunluğu açısından önemli olan bölgeler daha küçük elemanlara bölünerek 3 serbestlik derecesi ve 8 düğüm noktasına sahip SOLID185 elemanları kullanılarak modelleme yapılmıştır. Tüm modellerde; (açısallı bindirmeli ve T- bağlantı) Çizelge 3.1 'de mekanik özellikleri verilen AA2024-T3 yapııştırılan malzemesi ve bu çalışma kapsamında deneysel olarak mekanik özellikleri belirlenen DP810 yapııştırıcısı kullanılmıştır. DP810 yapııştırıcısına ait mekanik özellikler Çizelge 3.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.4. DP810 yapııştırıcısının mekanik özellikleri

<i>Elastisite Modölü , E (MPa)</i>	608,45
<i>Poisson oranı, ν</i>	0,48
<i>Maksimum çekme gerilmesi (Mpa)</i>	25
<i>Maksimum kayma gerilmesi (Mpa)</i>	23
<i>Mod-I kırılma tokluğu (N/mm)</i>	2
<i>Mod-II kırılma tokluğu (N/mm)</i>	3,78

Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantıları; mesh yapısı, 99144 tane düğüm noktası, 79150 katı eleman, 157500 tane kontak elemanı kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında açısallı bindirmeli yapıştırma bağlantısının çekme ve üç nokta eğme deneyleri yapılarak deneysel ve nümerik analizlerin karşılaştırılması yapıldığından dolayı deneysel yük ve sınır şartları dikkate alınarak oluşturulan modele ait mesh yapısı, yük ve sınır şartları Şekil 3.15’te verilmiştir.



Şekil 3.15. Açısallı bindirmeli yapıştırma bağlantısının mesh yapısı ve yük ve sınır şartları; (a) çekme, (b) üç nokta eğme.

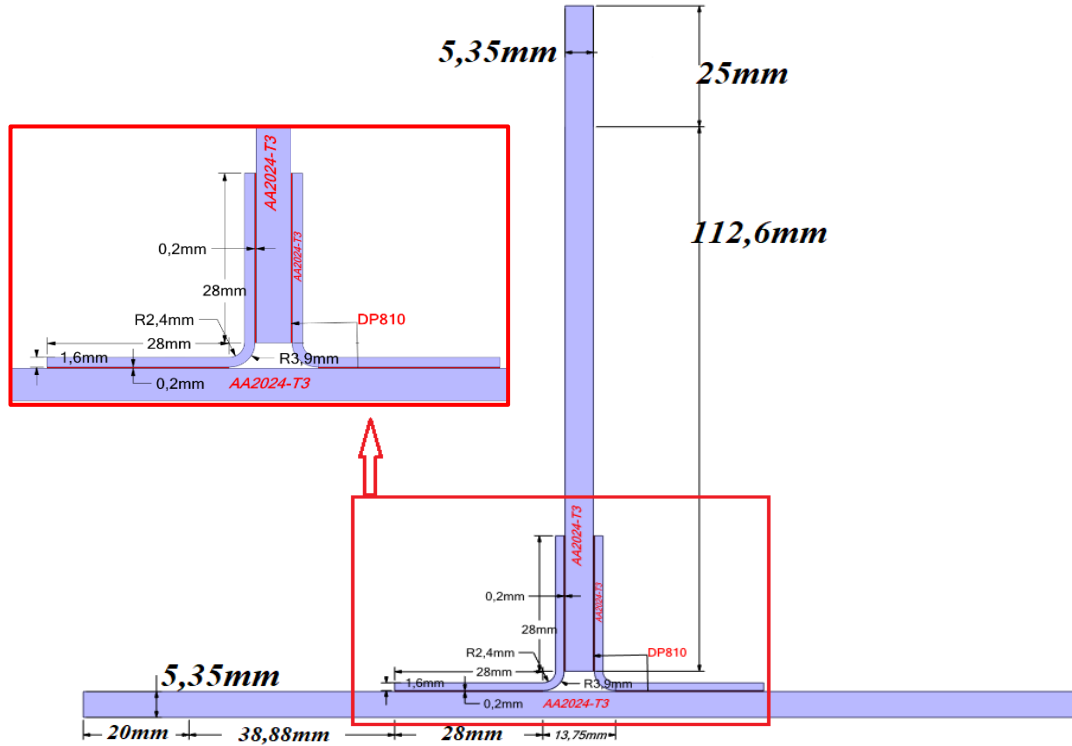
T- yapıştırma bağlantısının nümerik analizlerinde yapıştırıcı tabaka kalınlığının bağlantı dayanımı üzerindeki etkisi ve CZM yaklaşımı model ile CZM yaklaşımı olmayan model arasındaki parametre değişimine bağlı farklılıkların incelenmesi amacıyla 4 tip T-bağlantı oluşturulmuştur. CZM yaklaşımı kullanılmayan modellerde malzemeler

Multilinear İzotropik Hardening (MISO) olarak tanımlanmıştır. Çizelge 3.5'te T-bağlantılarına ait isimlendirme verilmiştir.

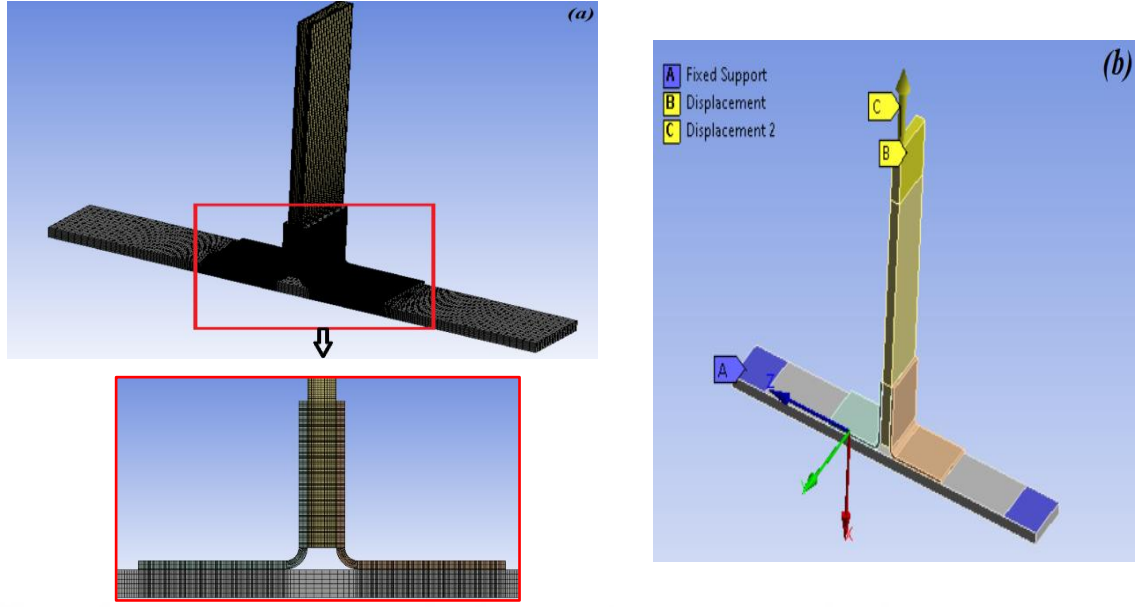
Çizelge 3.5. T-bağlantılarının isimlendirilmesi

Model	Yapıştırıcı kalınlığı	CZM kullanımı
<i>TİP-I</i>	0,1 mm	+
<i>TİP-II</i>	0,1 mm	-
<i>TİP-III</i>	0,2 mm	+
<i>TİP-IV</i>	0,2 mm	-

Açılı yapıştırma bağlantılarında olduğu gibi T-bağlantılarında da gerilme yoğunluğu açısından kritik olan bölgelerde daha yoğun bir mesh yapısı kullanılmak şartıyla 3 serbestlik derecesi 8 düğüm noktasına sahip SOLID185 elemanları kullanılmıştır. CZM yaklaşımı kullanılmayan modellerde bağlantı yüzeyleri bonded kontak modunda TARGE170 ve CONTA174 elemanları kullanılarak modellenmiştir. Şekil 3.16'da geometrik özellikler, Şekil 3.17'de ise mesh yapısı ve yük-sınır koşulları verilmiştir.



Şekil 3.16. T-bağlatısının geometrik özellikleri

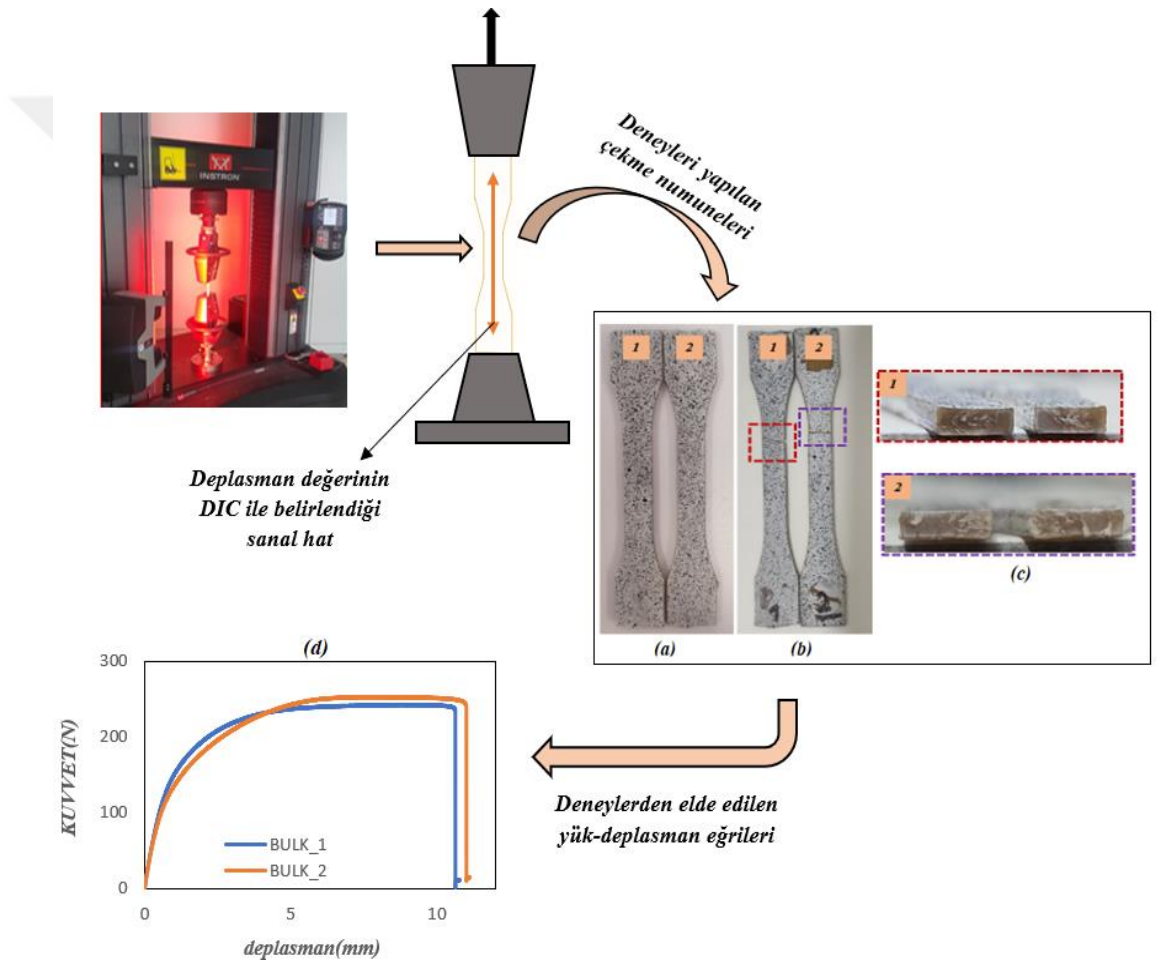


Şekil 3.17. T-bağlatısının; (a) mesh yapısı, (b) yük ve sınır şartları

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Standart Bulk Çekme Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışmada Şekil 3.1’de boyutları verilen bulk yapıştırıcı numunelerinden elde edilen; gerçek gerilme, şekil değişimi, poisson oranı ve elastisite modülünü içeren sonuçlar Çizelge 4.1’de özetlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.1’de deneyleri yapılan numunelere ait sonuçlar detaylandırılmıştır.



Şekil 4.1. Standart bulk çekme numunesi deneyi; (a) Çekme numuneleri, (b) deformasyon sonrası numuneler, (c) kırılma yüzeyleri, (d) yük-deplasman eğrileri.

Çizelge 4.1. Standart bulk çekme numunesinden elde edilen sonuçlar

NUMUNE	σ_{akma} (Mpa)	σ_f (Mpa)	$\epsilon_{f,e}$ (%)	$\epsilon_{f,y}$ (%)	E (MPa)	ν
BULK-1	11,42	22,65	22,63	-11,49	601,16/6	0,472
BULK-2	10,77	22,87	21,59	-10,9	615,73/6	0,49

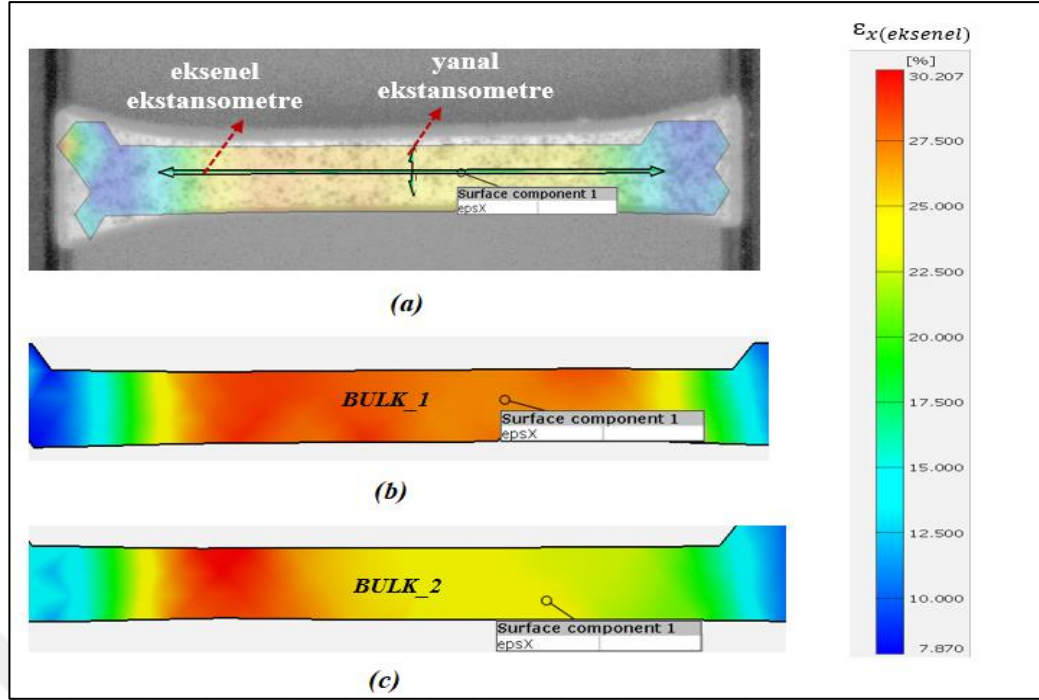
Çizelge 4.1. (Devam)

ortalama	11,095	22,76	22,11	-11,195	608,445	0,481
SD	0,459	0,155	0,735	0,417	10,30	0,012

E: Elastisite Modülü; **ν :** Poisson oranı; **σ_{akma} :** Akma Dayanımı; **σ_f :** Kopma Dayanımı, **ϵ_{f_e} :** maksimum eksenel şekil değişimi, **ϵ_{f_y} :** maksimum yanal şekil değişimi.

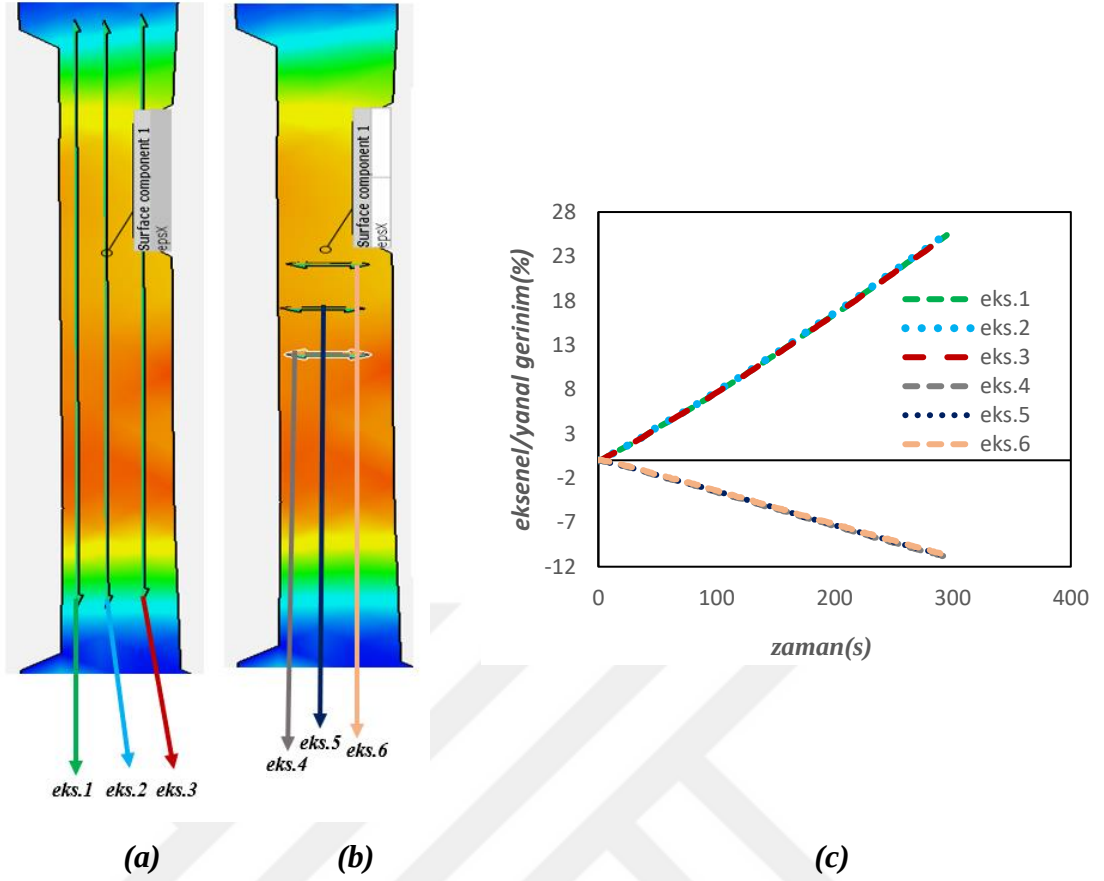
Çizelge 4.1 verilen sonuçlar incelendiğinde vakum altında üretilen bulk çekme numunelerinin gerilme dağılımlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Bu uyumun temel sebebinin; Şekil 4.1c’de verilen kırılma yüzeyleri dikkate alındığında üretim esnasında oluşabilecek yüzey ve iç kusurların minimize edilmesine bağlı olduğu açık bir şekilde ifade edilebilir.

Şekil 4.2a’da DIC analizi ile çekme numunelerindeki eksenel ve yanal şekil değişimlerinin belirlendiği sanal ekstansometreler, Şekil 4.2b’de ise çekme numunelerin hasar anına yakın bir zamandaki eksenel gerinim haritaları verilmiştir. Şekil 4.2b’de verilen eksenel gerinimler incelendiğinde Bulk_1 numunesinde daha homojen bir gerinim dağılımı mevcut iken Bulk_2 numunesinde kopma bölgesine yakın alanlarda gerilme yoğunlaşmasından dolayı daha yoğun bir gerinim dağılımı bulunduğu görülmektedir.



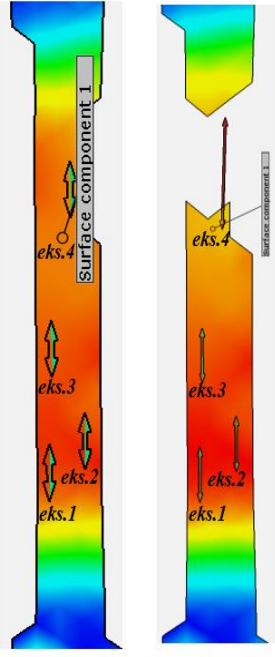
Şekil 4.2. (a) DIC analizinde kullanılan eksenel ve yanıl ekstansometrelerin gösterimi, (b) çekme numunelerinin eksenel gerinim haritaları.

Bu çalışmada; mekanik ekstansometreler ya da video ekstansometre gibi bir optik ölçüm yöntemlerinin sadece belirli alan veya noktalar üzerinden analiz yapabilmek kısıtının DIC analizinin tam yüzey deformasyon ölçüm yeteneği ile giderilebilir olduğunu belirtmek amacıyla farklı bölgelerde çizilen sanal ekstansometreler arasındaki uyum incelenmiştir (Şekil 4.3). Bu inceleme sonucunda; DIC ölçüm yönteminin yüzey alanı boyunca etkin olarak kullanılabileceği ve üretilen numunelerin küçük boyutlara sahip olmasının iç kusurları minimize ettiği sonucuna varılmaktadır. Bu sonuç; ISO-527/2’de verilen ve bu çalışmada da kullanılan küçük bulk numune geometrisinin literatürdeki birçok çalışmada deformasyon ölçüm yöntemlerinin temaslı gerinim ölçerler aracılığıyla belirlenmesi sebebiyle, gerinim ölçerlerin kısa ölçüm uzunluğuna sahip numunelerde konumlandırılmasının problem olması ve gerinim ölçerlerin bağlantı noktalarında da gerilme yığılmalarına sebep olması nedeniyle tercih edilmemesi kısıtını ortadan kaldırmaktadır.

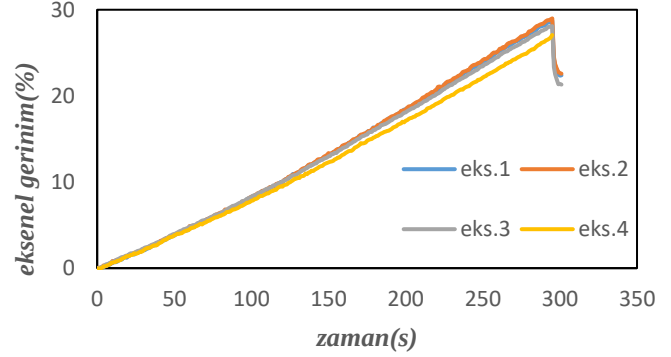


Şekil 4.3. BULK_1 numunesinin DIC analizinde kullanılan; (a) eksenel ekstansometrelerin gösterimi, (b) yanal ekstansometrelerin gösterimi, (c) verilen ekstansometrelere ait gerinim-zaman grafiği.

Şekil 4.4'te gösterildiği gibi çekme numunesinin farklı bölgelerine yerleştirilen kısa sanal ekstansometrelerin eksenel gerinim değerleri karşılaştırıldığında ise bu hatlara ait dağılımların hasar anına yakın zamanlara kadar birbiri ile benzer dağılımlar sergiledikleri fakat kopma bölgesi üzerindeki ekstansometrenin (eks.4) hasara yakın zamanlarda diğer ekstansometrelerdeki değerlerden bir miktar uzaklaştığı görülmektedir. Bu durum kopma bölgesindeki gerinim azalmasını doğrulamaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.4. BULK_1 numunesinin DIC analizinde kullanılan; (a) eksenel ekstansometrelerin gösterimi, (b) verilen ekstansometrelere ait gerinim-zaman grafiği.

4.2. Iosipescu Bulk Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışmada, DP810 sıvı yapısal yapıştırıcısının vakum altında kalıba enjeksiyonu yöntemi ile üretilen 2 adet Iosipescu numunesinin 2mm/dk'lık deformasyon hızında yapılan deneyleri sonucunda; gerilme değerleri statik test cihazının yük hücresinden alınan yük datalarının kayma alanına bölünmesi ile; kayma gerinimleri ise deney süresince kaydedilen görüntülerin DIC analizi kullanılarak çentik köklerini birleştiren hat üzerine iki adet $\pm 45^\circ$ açılar ile konumlandırılmış sanal ekstansometreler yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 4.5b). Çizelge 4.2'de kayma numunelerine ait sonuçlar özetlenmiştir.

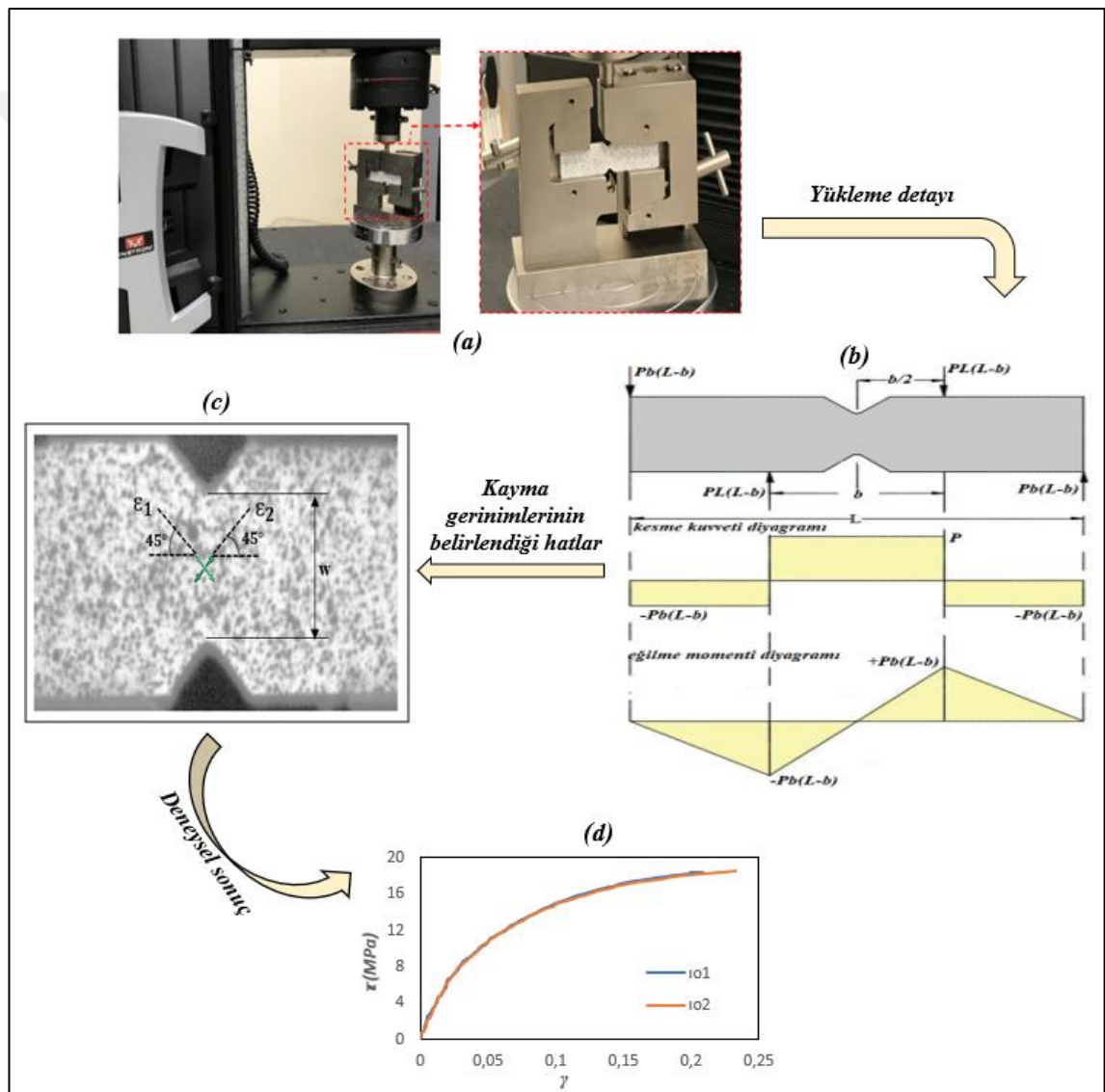
$$\gamma = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| \quad (4.1)$$

$$\tau = \frac{F}{tw} \quad (4.2)$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (4.3)$$

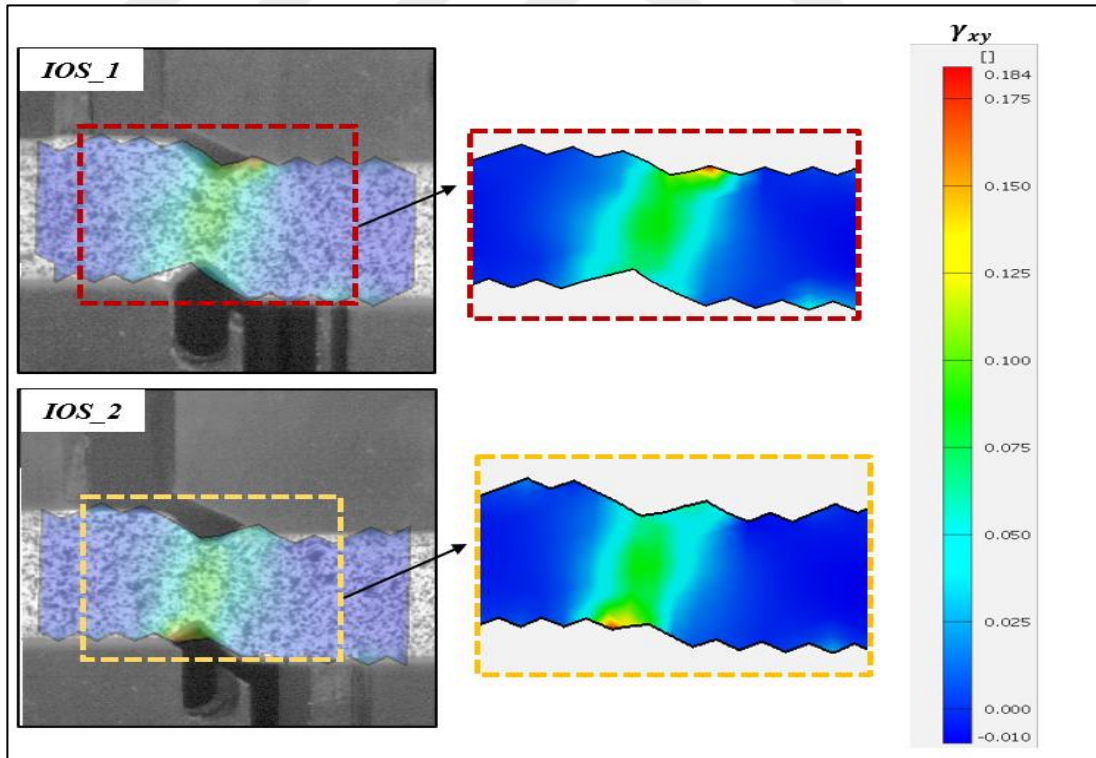
Çizelge 4.2. Iosipescu bulk numunesinden elde edilen sonuçlar

NUMUNE	τ_f (MPa)	γ_f	G (MPa)
IOS_1	18,46	0,199	249,68
IOS_2	18,48	0,232	263,59
ortalama	18,47	0,215	256,63
SD	0,014	0,023	9,83



Şekil 4.5. (a) Deney kurulumu, (b) numune yükleme durumu, (c) DIC analizi ile kayma gerinimlerinin belirlenmesinde kullanılan sanal ekstansometrelerin gösterimi, (d) Iosipescu kayma numunelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Çizelge 4.2’de verilen gerilme-şekil değıştirme değeri ve Şekil 4.5d’de verilen gerilme-şekil değıştirme eğrileri ve Şekil 4.6’da verilen yüzeysel kayma gerinimi haritalarına ait sonuçlar dikkate alındığında; farklı kayma numunelerinden elde edilen sonuçların birbiri ile son derece uyumlu olduğu görölmektedir. Bu uyumun; vakum altında üretilen numunelerin üretim kaynaklı iç kusurlarının minimize edilmesi ve DIC tekniğinin kayma gerinimlerini belirlemedeki üstünlüğü sayesinde sağlandığı söylenebilir. Ayrıca Duncan and Dean (1996) tarafından yapılan bir çalışmada; Iosipescu test yönteminde, çentik bölgesinde oluşabilecek büyük lokal gerilmelerin erken hasara sebep olması Iosipescu numuneleri tarafından kayma gerilmesi-şekil değışimi davranışının belirlenmesinin yetersiz kalacağının ifade edilmesi yapıştırıcıların kayma mekanik özelliklerinin belirlenmesinde sadece Iosipescu test yönteminin kullanılmasının güvenilir dataların eldesi noktasında yeterliliğinin belirlenmesi açısından ikinci bir kayma test yönteminin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada TAST yöntemi de kullanılarak Iosipescu yönteminden elde edilen kayma mekanik özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 4.6. Iosipescu kayma numunelerinin hasara yakın bir andaki kayma gerinimi haritaları.

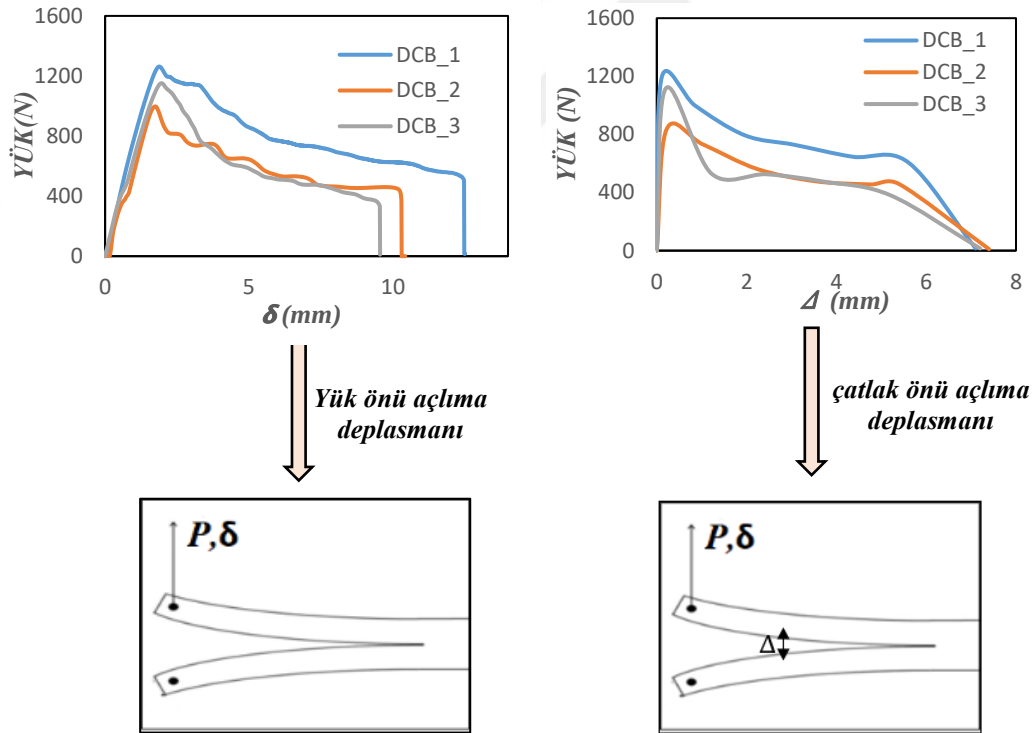
4.3. DCB Testinden Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında; Mod I kırılma enerjisi ve Mod I deneysel CZM eğrisinin elde edilebilmesi amacıyla AA2024-T3 ve DP810 kompozisyonundan oluşan 3 adet DCB numunesinin deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.3. DCB numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar

NUMUNE	$F_{max}(N)$	$\delta(mm)$	$\Delta(mm)$	$MBT-G_{IC} (N/mm)$	$CCM-G_{IC} (N/mm)$
DCB_1	1.263,01	12,5	7,1	2,05	2,26
DCB_2	997,23	10,43	7,4	2,1	2,35
DCB_3	1.151,88	9,55	7,2	1,32	1,5
ortalama	1.137,37	10,82	7,23	1,82	2,03
SD	133,482	1,514	0,152	0,436	0,467

δ :yük önü açılma deplasmanı, Δ : çatlak önü açılma deplasmanı



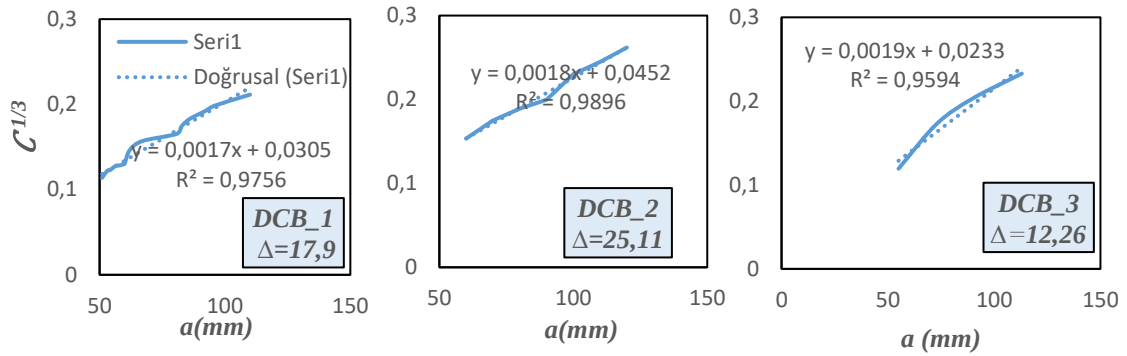
Çizelge 4.3'te DCB deneylerinden elde edilen yük deplasman eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerin yatay ekseninde bulunan değerler çekme cihazının çene hareketinden elde edilen yük önü deplasman dataları (δ) ve DIC analizi ile elde edilen çatlak önü deplasman datalarına (Δ) aittir. Bu eğriler incelendiğinde; numuneler arasındaki uyumun yeterli derecede olduğu görülmektedir. Ayrıca çatlak önü deplasman datalarının DIC analizi ile

elde edilebilmesinin mümkün olduğu ve bu dataların güvenilir sonuçlar verdiği söylenebilir.

Bu çalışmada Mod I kırılma enerjisinin elde edilmesinde; Bölüm 1.2.1’de detaylı olarak anlatılan ASTM D5528 standartında bulunan MBT ve CCM lineer kırılma mekaniği yaklaşımlı yöntemleri ile Bölüm 3.4.2’de verilen elastik olmayan kırılma mekaniği yaklaşımlı J-integral yöntemi kullanılmıştır.

4.3.1. MBT yönteminden elde edilen kırılma enerjisi sonuçları

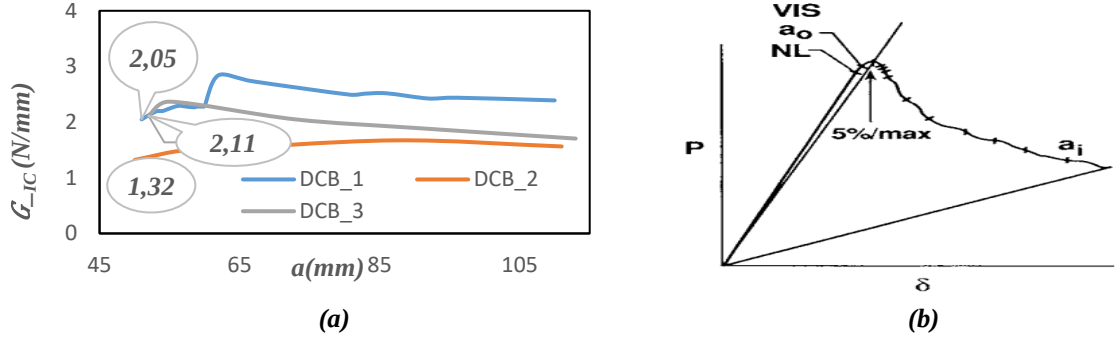
Modifiye kiriş teorisinde numunenin mükemmel olarak inşa edilememesi dolayısıyla kirişte oluşacak dönmelerin etkisi sonucunda kırılma enerjisindeki azalmanın tanımlanmasında bir düzeltme faktörü (Δ) (eğrinin x eksenini kestiği değer) kullanılmaktadır. Bu değerin tüm numunelerdeki karşılığı Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. MBT teorisinde kullanılan düzeltme faktörü

MBT yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi (G_I) çatlak uzunluğu (a) eğrisi (R-curve) Şekil 4.8a’da verilmiştir. Başlangıç kırılma enerjisinin tespit edilmesinde ASTM D5528 standartında yer alan talimatlara göre; DCB deneyi ile elde edilen yük-yük önü açılma deplasmanı grafiğinin lineerlikten saptığı yük ve deplasman değerleri (NL), görsel olarak ilk çatlağın oluştuğu andaki yük ve deplasman değerleri (VIS) veya maksimum yüke karşılık gelen yük-deplasman değerleri ($5\%_{max}$) kullanılmaktadır (Şekil 4.8b). Bu çalışma kapsamında maksimum yüke karşılık gelen yük-deplasman dataları; kırılma enerjisinin belirlenmesinde uygulanan ilgili denklemlerde (Denklem 1.4, 1.5) kullanılması ile başlangıç kırılma enerjisi tespit edilmiş ve bu değer nümerik analizlerde kullanılmıştır. DCB_1, DCB_2 ve DCB_3 numunelerinin başlangıç kırılma enerjileri

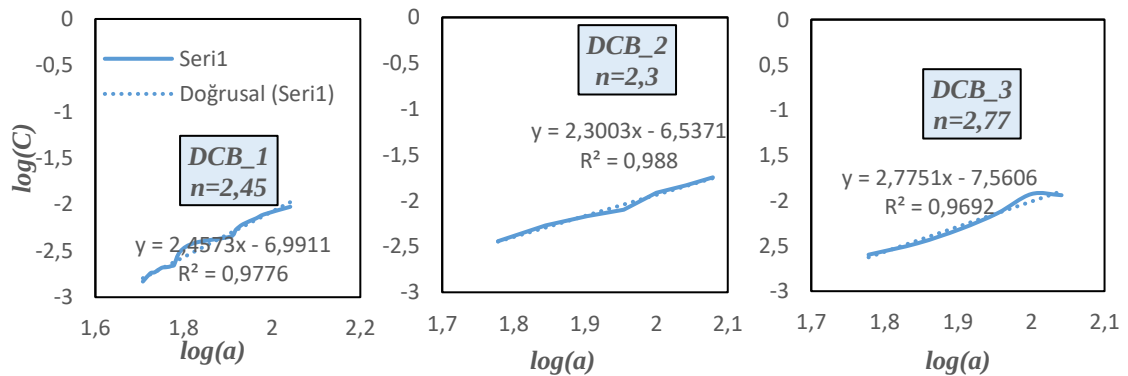
sırasıyla 1,32 N/mm, 2,11 N/mm ve 2,05 N/mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca DCB_3 numunesinin düzeltme faktörü en düşük olduğundan dolayı bu numunede deney esnasında oluşan dönmelerin daha az olduğu ifade edilebilir.



Şekil 4.8. (a) MBT yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrisi (R-curve), (b) ASTM D5228 standartında verilen başlangıç kırılma enerjisinin tespit edildiği noktaların gösterimi.

4.3.2. CCM yönteminden elde edilen kırılma enerjisi sonuçları

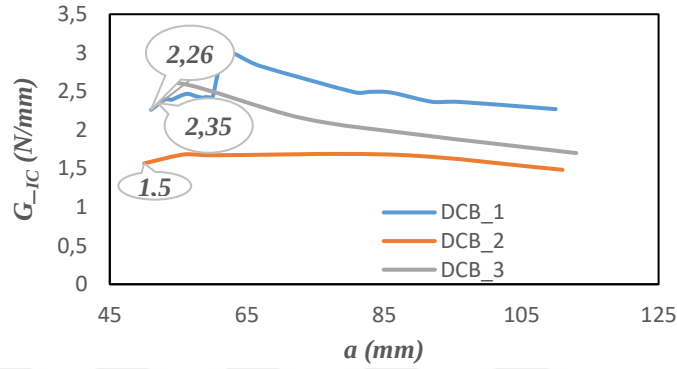
ASTM D5228 standartında yer alan bir diğer lineer elastik kırılma mekaniği temelli yaklaşım ise Kompliyans Kalibrasyon Metodudur (CCM). Bu yöntemde deneysel parametrelerin düzeltilmesinde kullanılan katsayı (n), $\log C$ - $\log a$ eğrisinin eğiminden elde edilmektedir. DCB numunelerine ait n katsayısı Şekil 4.9’da, kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrisi (R-curve) ise Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.9. CCM yönteminde kullanılan düzeltme katsayısı.

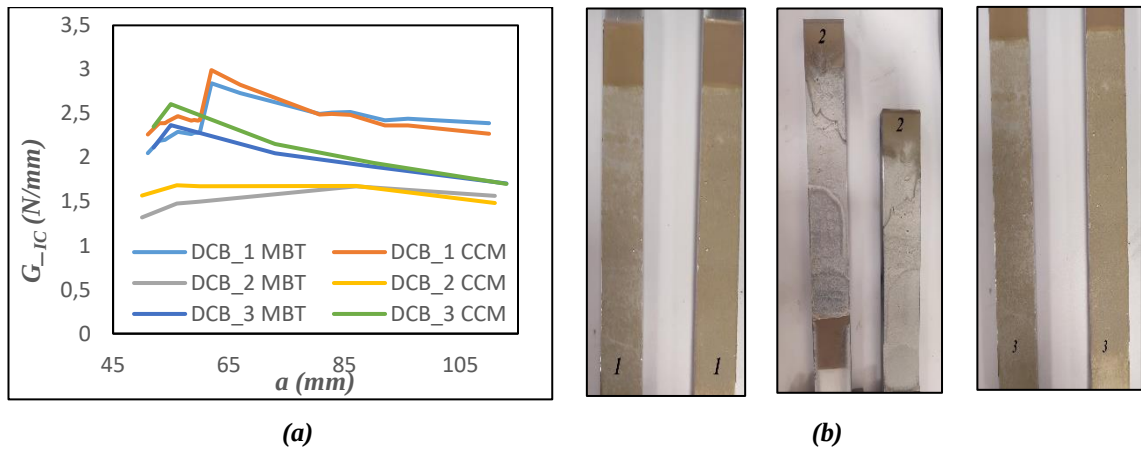
Şekil 4.10’da CCM yöntemi ile elde edilen verilen R-curve eğrileri verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde; DCB_2 numunesinin deneysel hasar yükünün diğerlerine göre

daha düşük olması sebebiyle bu numuneye ait kırılma enerjisi değerinin MBT yönteminde de olduğu gibi daha düşük çıkması olası bir durumdur. Diğer iki numune ise deneysel hasar yüklerindeki yakınlık dolayısıyla kırılma enerjileri de birbirine yakın çıkmıştır. DCB_1, DCB_2 ve DCB_3 numunelerine ait CCM ile hesaplanan başlangıç kırılma enerjileri; 1,5 N/mm, 2,35 N/mm ve 2,26 N/mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.10. CCM yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrisi

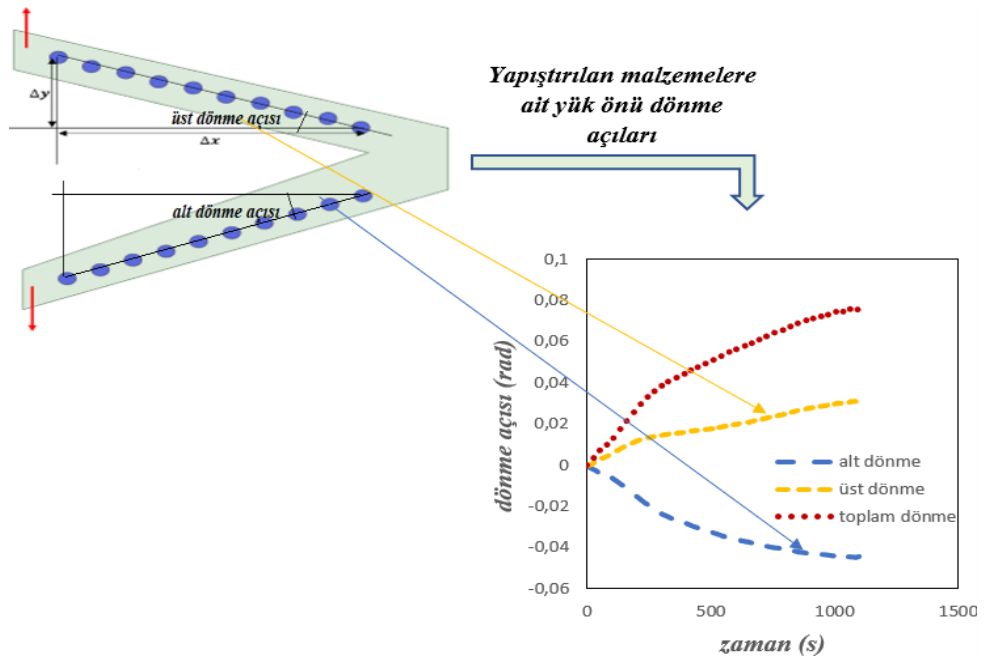
Şekil 4.11a'da tüm DCB numunelerine ait MBT ve CCM yöntemlerinden elde edilen R-curve eğrilerinin karşılaştırılması, Şekil 4.11b'de ise DCB numunelerinin hasar yüzeyleri verilmiştir. Şekil 4.11a incelendiğinde; her numunenin farklı analiz yöntemleri ile elde edilen sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu uyumun numunelerde oluşan kohesif hasar yüzeylerinin (Şekil 4.11b) etkisi ile de sağlandığı ifade edilebilir.



Şekil 4.11. (a) MBT ve CCM yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu eğrilerinin karşılaştırılması, (b) DCB numunelerinin hasar yüzeyleri.

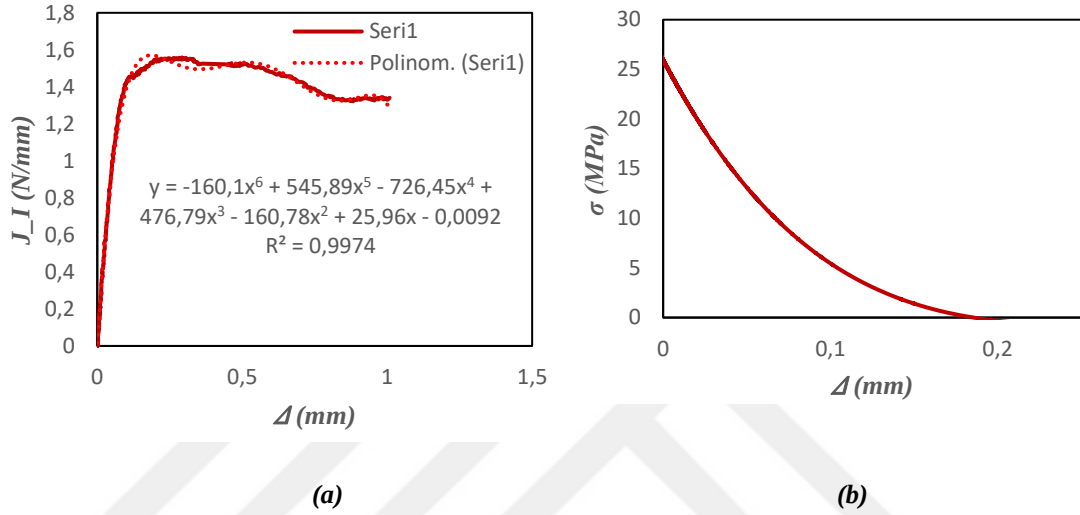
4.3.3. J-integral yönteminden elde edilen sonuçlar

J-integral yöntemi; kapalı bir alan boyunca etkin bir ifade sunması yani yoldan bağımsız olması ve çatlak ucundaki elastik olmayan etkilerin kırılma enerjisi hesabına dahil edilmesi dolayısıyla son zamanlarda yaygın olarak kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu yöntem ile elde edilen kırılma enerjisi, elastik olmayan etkileri içerdiğinden dolayı deneysel CZM eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. J-integral ile kırılma enerjisi tespitinde, çatlak uzunluğunun ölçümü gerekli olmamakla birlikte yapıştırılan malzemelerin yük önü veya çatlak önü dönme miktarlarının belirlenmesi esasına dayalı bir formülasyon ile analiz yapılmaktadır. Çatlak uzunluğunu ölçme gerekliliğinin olmaması analiz kolaylığı açısından bir avantaj olarak görülsede, yapıştırılan malzemelerdeki dönme miktarlarının tespiti bir optik deformasyon ölçüm yönteminin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada ise DIC tekniği ile bu gereklilik sağlanmaya çalışılmıştır. Bu tez kapsamında Denklem 3.1’de verilen J-integral temelli kırılma enerjisi, yapıştırılan malzemelerin yük önü dönme miktarlarının tespitini içermektedir ve bu değerler ise DIC analizi ile belirlenmiştir. DCB numunelerinin deneysel yük-deplasman dataları ve MBT ve CCM yöntemlerine göre belirlenen kırılma enerjileri değerleri dikkate alınarak DCB_3 numunesinden elde edilen verilerin daha güvenilir olması sebebiyle bu numuneye ait DIC analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.12. J-integral yönteminde kırılma enerjisinin belirlenmesinde kullanılan yük önü dönme açıları.

Şekil 4.12’de Denklem 3.1’de yer alan yapıştırılan malzemelere ait dönme açılarının DIC analizi ile elde edilen sonuçları verilmiştir. Bu grafikteki eğrilerin dağılımı göz önüne alındığında Simões (2022) tarafından literatüre sunulan bir çalışmadaki dağılımlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Bu değerler kullanılarak elde edilen J-integral Mod I kırılma enerjisi ve çatlak önü açılma deplasmanı grafiği ve deneysel CZM eğrisi Şekil 4.13’te verilmiştir.



Şekil 4.13. (a) J-integral yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi-çatlak önü açılma deplasmanı eğrisi, (b) deneysel CZM eğrisi.

Şekil 4.13a’da verilen kırılma enerjisi eğrisi incelendiğinde; J-integral yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi değerinin aynı numuneye ait MBT ve CCM yöntemleri ile elde edilen kırılma enerjisi değerlerinden düşük olduğu görülmektedir. Bu durum; J-integral yaklaşımında elastik olmayan etkilerin dahil edilmesi ve DIC analizinin temelinde olan görüntü işleme tekniğinde deney süresince kaydedilen görüntülerin çözünürlük seviyesinin etkisi olmak üzere iki sebeple açıklanabilir. Şekil 4.13b’de ise Şekil 4.13a’da yer alan eğrinin yaklaşık fonksiyonunun çatlak önü açılma deplasmanına göre türevi (Denklem 3.2) alınarak elde edilen deneysel CZM eğrisi bulunmaktadır. Bu eğri, Carlberger and Stigh (2010) tarafından yapılan bir çalışmada da belirtildiği gibi sünek epoksi yapıştırıcıların tipik yasalarıyla karşılaştırıldığında plastikleşmenin başlangıcında ortaya çıkan kararlı durum davranışı ve ardından hızlı bir hasar gelişimi sergileyen davranış, bu yapıştırıcıda hemen hemen yok olmakla birlikte maksimum kohesif gerilme değerinin bir aralık boyunca sabit kalmadığı görülmektedir. Dolayısıyla bu yapıştırıcıya ait deneysel CZM eğrisinin tanımlanmasında üçüncü bir bölgeyi

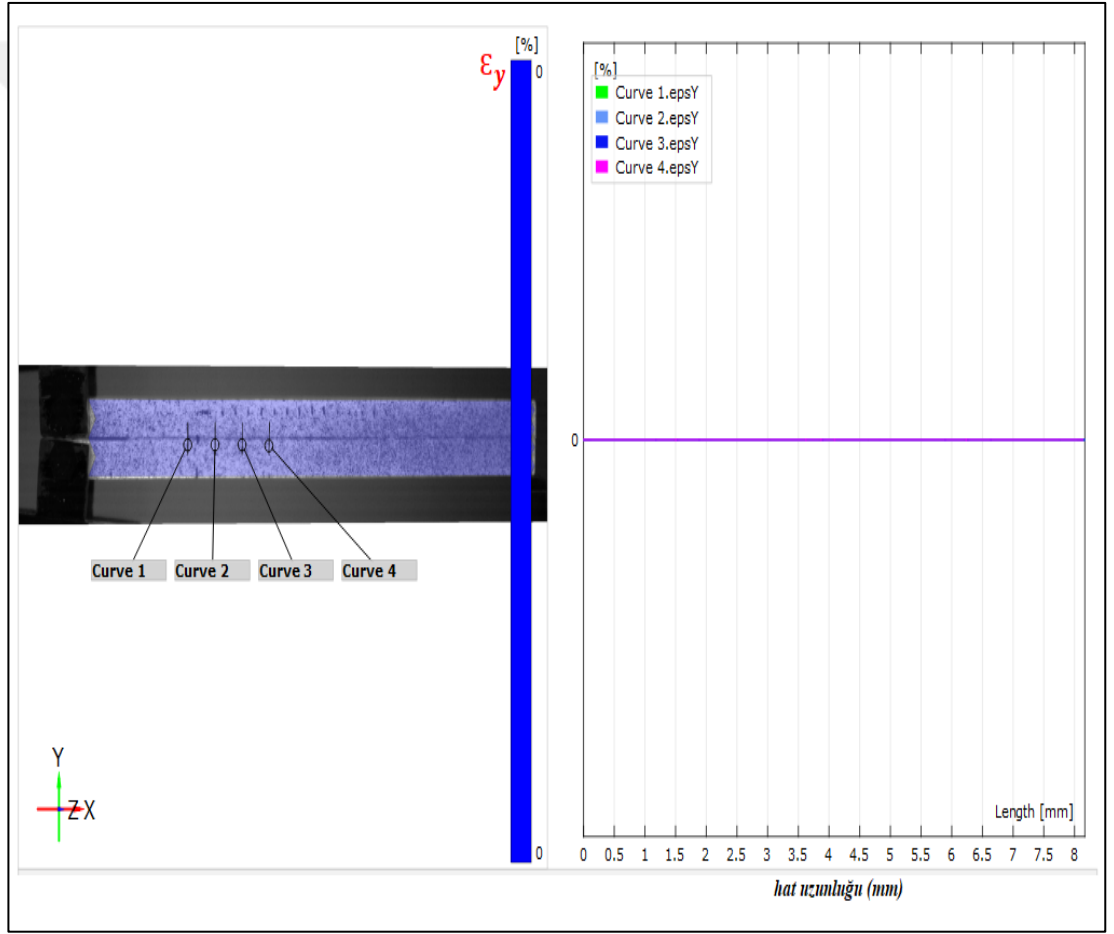
içermeyen triangular law (üçgen yasa) kullanılması doğru olacaktır. Ayrıca, deneysel CZM eğrisinin Hillerborg et al. (1976) tarafından geliştirilen kohesif çatlak modeli ile son derece uyumlu olduğu görülmektedir. Bu egrideki maksimum normal gerilme değerinin (kohesif çatlak başlangıcı-25 MPa) aynı yapıştırıcıya ait bulk çekme deneyi ile elde edilen maksimum normal gerilme değerine (22,76 MPa) (Çizelge 4.1) yakın olması yapılan J-integral analizinin yeterli seviyede güvenilir olduğunu göstermektedir. Deneysel CZM eğrisinden elde edilen maksimum normal gerilme ile yapıştırıcının bulk çekme deneyinden elde edilen maksimum gerilme değerlerinin birbirine eşit olması; CZM'deki gerilme değerinin bir yapıştırma bağlantısı (DCB) deneyi ile elde edilmesi yapıştırılan malzemelerin yapıştırıcıyı tutma etkisini doğuracağından dolayı yapıştırıcıya bir miktar rijitlik sağlaması sebebiyle beklenmeyen bir durumdur. Ayrıca J-integral kırılma enerjisi CZM'deki normal gerilme değerinin sıfır olduğu ya da maksimum kırılma enerjisi değerinden sonra çatlak önü açılma deplasmanına göre değişim göstermeyeceğinden dolayı DCB_3 numunesine ait DIC analizi ile elde edilen çatlak önü açılma deplasmanı değeri 7,2 mm olmasına rağmen 1,2 mm'ye kadar olan değerler dikkate alınmıştır.

4.3.4. DCB deneyinde DIC analizi ile elde edilen deformasyon ölçüm sonuçları

Yapıştırma bağlantıları vasıtasıyla yapıştırıcıların Mod I kırılma enerjileri tespitinde DCB deneyinin yeterlilik derecesi ve DIC analizinin etkinliğinin belirlenmesi amacıyla farklı zaman dilimlerinde ($P=0$ N, 1.076,89 N, 1.017,12 N, 748,23 N) çekme yönündeki aksenal gerinim değerlerinin hat uzunluğu ile değişimi belirlenmiştir. Şekil 4.14'te verilen aksenal gerinim dağılımları incelendiğinde; önünde çatlak oluşan curve 1 (A hattı), curve 2 (B hattı), curve 3 (C hattı) ve curve 4 (D hattı) hatların simetrik bir dağılıma sahip olduğu, yapıştırıcı tabakasının ortasında maksimum değere ulaşmakla birlikte yapıştırılan malzemelere ait gerinim değerlerini ifade eden uç noktalarda ise minimum değerler aldığı görülmektedir. Analiz için seçilen zaman dilimleri; çatlak ucunun yaklaştığı hatlarda yapıştırıcı tabakasındaki gerinimin maksimum olacağını gösterebilmek amacıyla her bir hattın önüne yaklaşan çatlak ucu dikkate alınarak belirlenmiştir. Seçilen hatlardaki gerinimlerin yapıştırıcı tabakasında maksimum değere, uç noktalarda ise minimum değere sahip olarak simetrik dağılım göstermesi DCB deneyleri ile yapıştırıcı tabakasına yeterli derecede Mod I yüklemesi sağlandığını ve bu

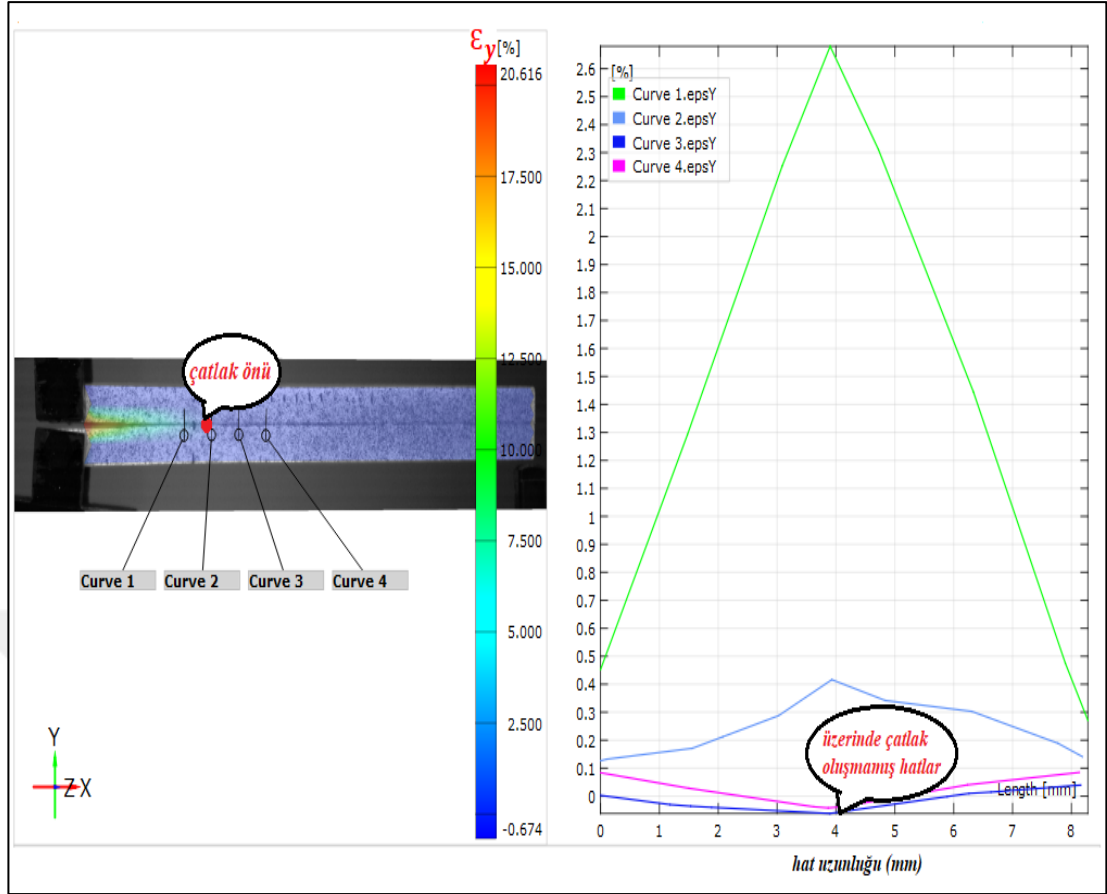
test yönteminin yapıştırıcıların Mod I kırılma enerjileri tespitinde güvenilir bir şekilde kullanılabileceğinin önemli bir kanıtıdır.

Şekil 4.14'te verilen farklı zaman dilimlerine ait eksenel gerinim haritaları incelendiğinde çatlak ucunun yaklaştığı hatların önünde gerinim yığılmalarının bulunduğu ve yapıştırılan malzemelerde simetrik bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu sonuçlar neticesinde DIC yönteminin, DCB deneylerinde çatak uzunluğunun tespiti ve gerinim haritalarının elde edilmesi noktasında gerekli yeterliliğe sahip olduğu söylenebilir.

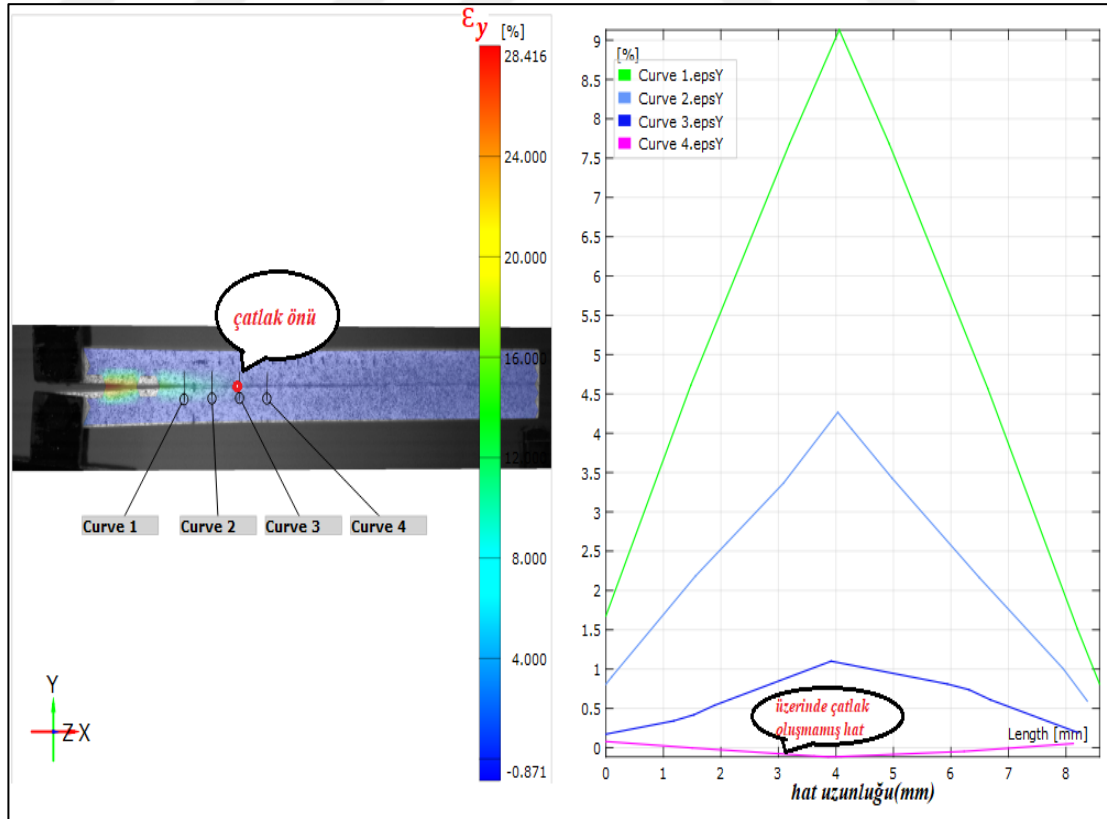


(a)

Şekil 4.14. DCB numunesinde farklı zaman dilimlerinde oluşan eksenel gerinim haritaları ve eksenel gerinim-hat uzunluğu eğrileri; (a) $P=0$ N, (b) $P=1.076,89$ N, (c) $P=1.017,12$ N, (d) $P=748,23$ N.

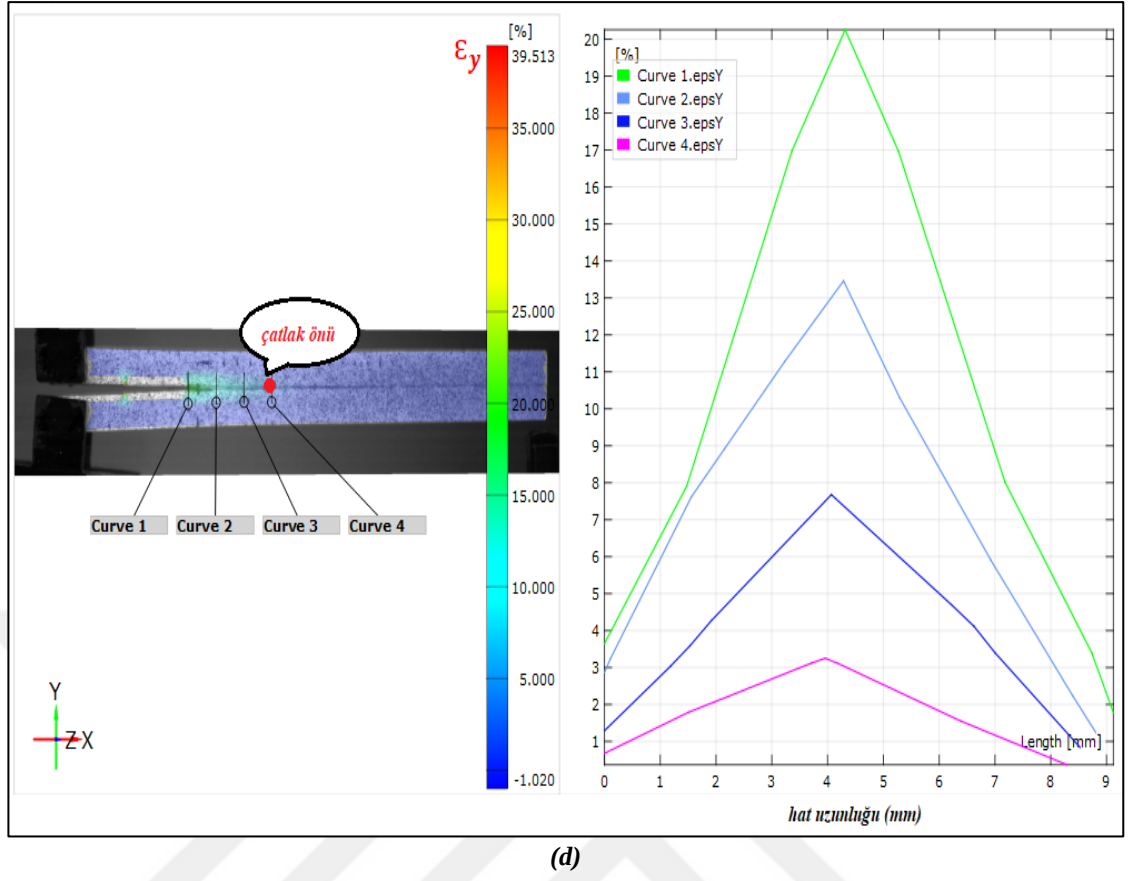


(b)



(c)

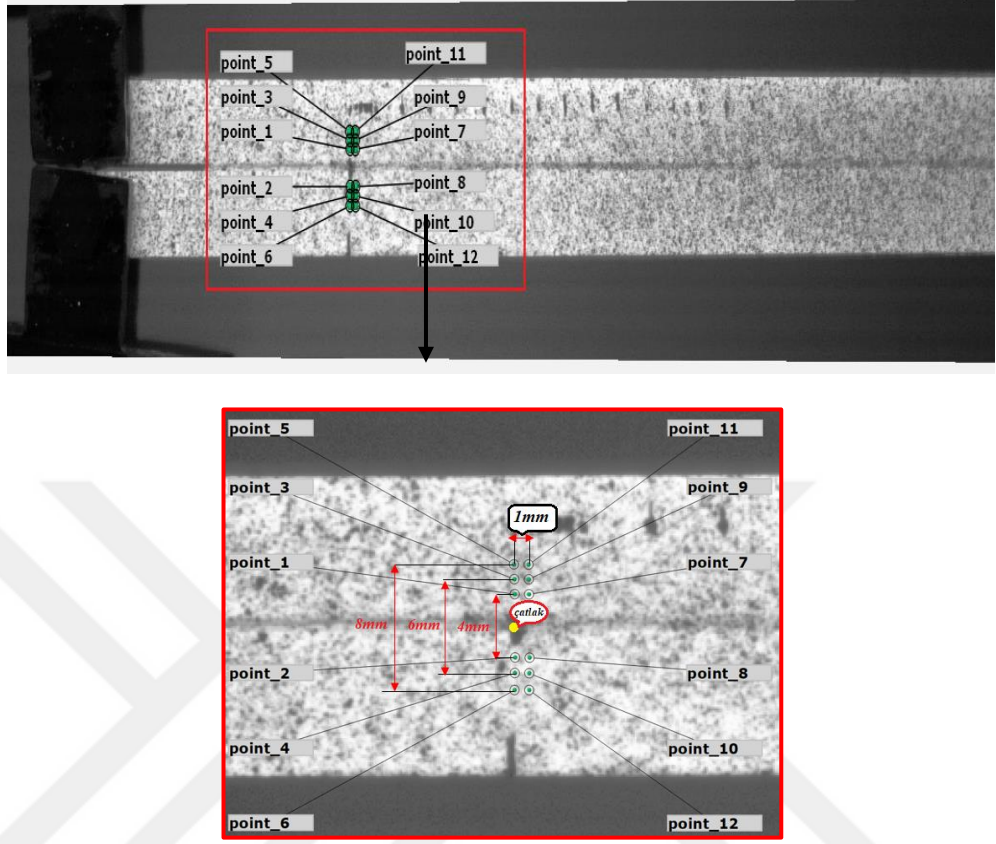
Şekil 4.14. (Devam)



Şekil 4.14. (Devam)

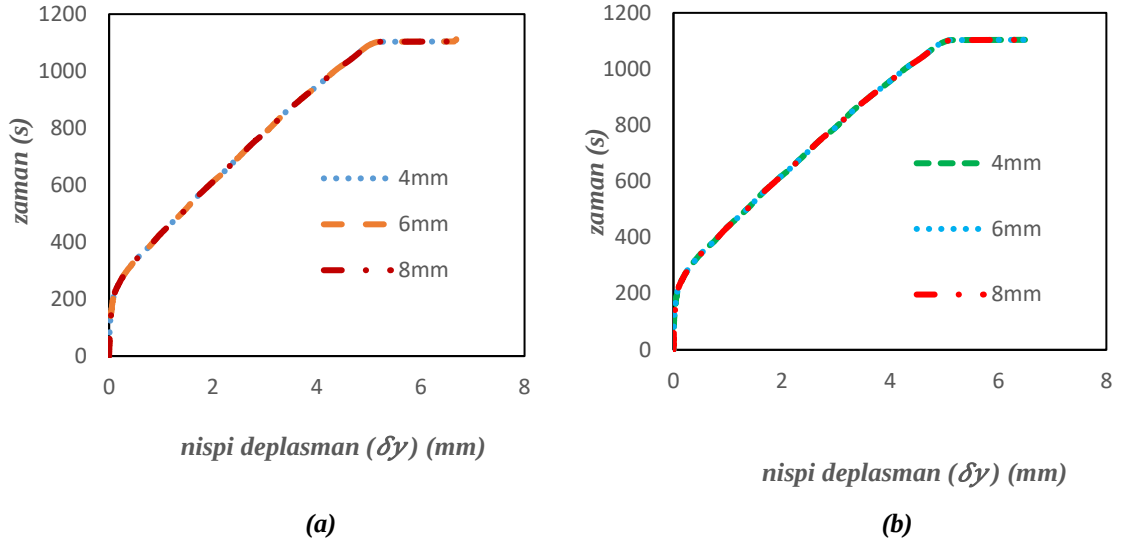
J-integral yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi-çatlak önü açılma deplasmanı eğrisinin çatlak önü açılma deplasmanına göre türevi alınarak deneysel CZM eğrileri elde edildiğinden dolayı çatlak önü deplasman değerlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Bundan dolayı bu çalışmada, çatlak önü açılma deplasmanı (Δ) değerinin belirlenmesinde kullanılan noktalar arasındaki uzaklık değerindeki değişimin, çatlak önü deplasman datalarında oluşturabileceği farklılığı incelemek amacıyla farklı uzaklıklardaki noktaların DIC deplasman analizleri yapılmıştır. Şekil 4.15'te çatlak ucunda 4,6 ve 8 mm uzaklıklarda bulunan noktaların ve çatlak ucunun 1 mm ötesindeki yine aynı uzaklıklarda bulunan noktalar verilmiştir. 1-2 (δ_{y1}), 3-4 (δ_{y2}) ve 5-6 (δ_{y3}) noktaları arasındaki nispi dikey (δ_y) deplasman değerleri belirlenerek çatlak önü açılma deplasmanı değerleri elde edilmiştir (Denklem 4.4). Aynı analiz çatlak ucunun 1 mm ilerisindeki noktalar içinde yapılmıştır. Elde edilen değerler sonucunda Şekil 4.15'te verilen noktaların nispi deplasman değerlerinin değişim grafikleri elde edilmiştir (Şekil 4.16).

$$\delta_y = point_{iy} - point_{jy} \quad , \quad (i = 1:2:11) , (j = 2:2:12) \quad (4.4)$$



Şekil 4.15. Çatlak önü açılma deplasman değerlerinin değerlendirilmesinde kullanılan noktalar.

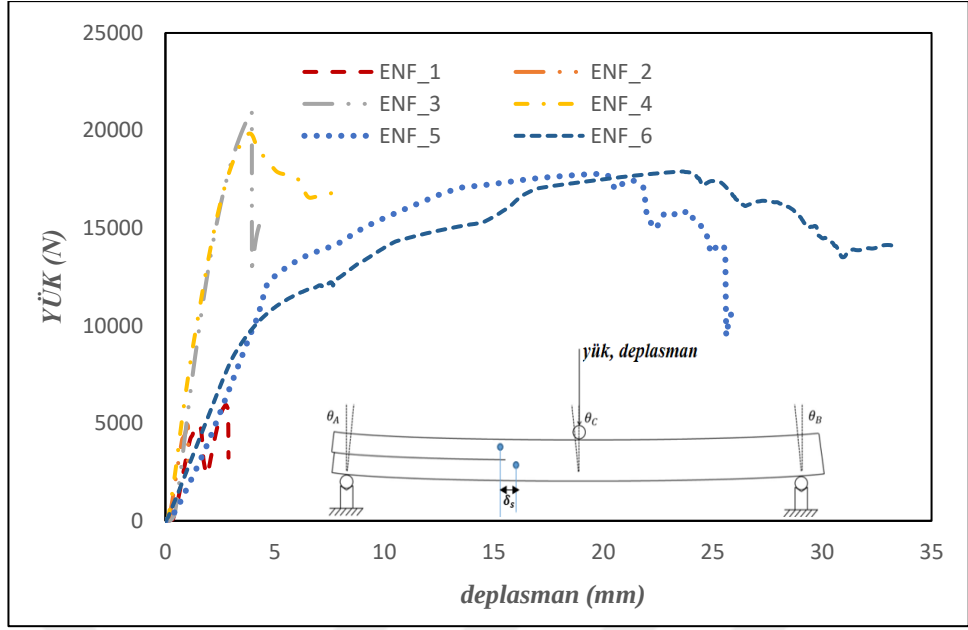
Şekil 4.16'da verilen çatlak önü açılma deplasmanı değerleri incelendiğinde; çatlak ucu ve çatlak ucuna yakın mesafelerde (1mm) nispi deplasman değerlerinin noktalar arasındaki y yönündeki uzaklığa bağlı olmadığı görülmektedir. Bu bağımsızlığın çatlak ucundan x yönünde uzaklaştıkça bozulabileceği söylenebilir. Dolayısıyla çatlak önü deplasman datalarının analizi yapılırken mümkün oldukça çatlak ucu ve etrafında dikey yönde yerleştirilen noktalar arasındaki nispi deplasmanların değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.16. Farklı uzaklıktaki noktalar arasından elde edilen nispi deplasman değerleri; (a) Çatlak ucundaki noktalardan alınan değerler (point_1,6), (b) çatlak ucunun 1 mm ilerisindeki noktalardan alınan deplasman değerleri (point_7,12).

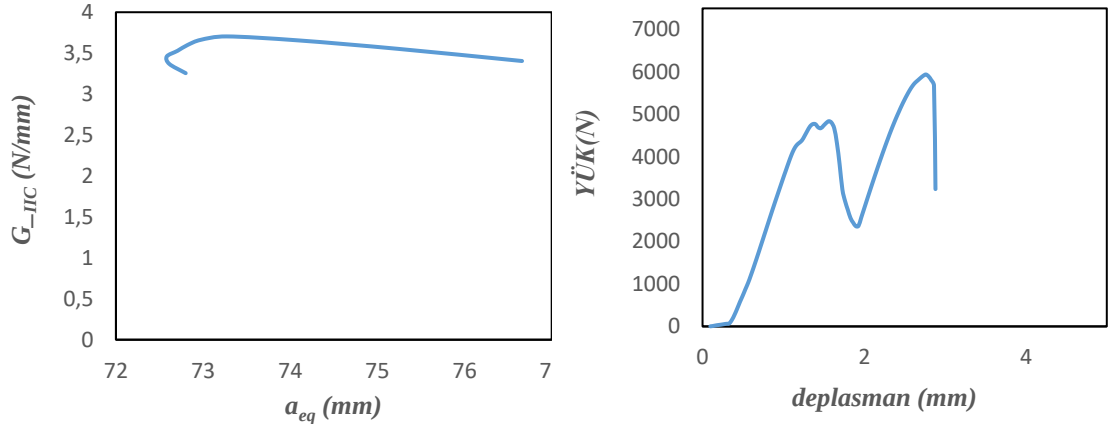
4.4. ENF Testinden Elde Edilen Sonuçlar

ENF deneyleri, yapıştırıcıların Mod II kırılma enerjisinin tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Bu deneyler sonucunda elde edilen yük, yük önu çökme deplasmanı ve çatlak uzunluğu değerleri kullanılarak lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımlı CCM ve DBT(direct beam theory), lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımlı CBBM ve J-integral yöntemleri ile Mod II kırılma enerjisi elde edilmektedir. Yapılan bu çalışma kapsamında; çatlak uzunluğunun ölçümünü gerektirmeyen CBBM, J-integral ve ASTM D7905'te yer alan ECCM metodu ile çatlak uzunluğunun ölçümünü gerektiren CCM yöntemleri kullanılarak Mod II kırılma enerjisi belirlenmeye çalışılmıştır. İlk etapta 3 adet ENF numunesi üretilerek deneyler yapılmış elde edilen yük-deplasman dataları arasındaki uyumsuzluktan dolayı tekrar 3 adet ENF numunesi üretilerek deneyler yapılmıştır. Ancak ilk etapta olduğu gibi kararlı çatlak ilerlemesi sağlanamadığından dolayı yine uyumsuz deney dataları elde edilmiştir. Şekil 4.17'te tüm ENF numunelerine ait yük-deplasman değerleri verilmiştir.



Şekil 4.17. ENF deneylerinden elde edilen yük-deplasman eğrileri

Yapılan çalışmada, ENF numunelerinde kararlı bir çatlak ilerlemesi elde edilemediğinden dolayı ASTM D7905/D7905-14 standartında yer alan talimatlar doğrultusunda bir kırılma enerjisi tespiti yapılamamıştır. Numunelerde oluşan kararsız çatlak ilerlemesinin aynı standartta yer alan $a_0/L > 0,7$ ifadesine uygun olmayan numunelerin kullanılması nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. ASTM D7905 standartının analizlerinden sonra çatlak uzunluğunun tespitini gerektirmeyen CBBM yöntemi ile kırılma enerjisi belirlenmeye çalışılmıştır. Fakat numunelere ait deneysel datalar arasındaki farklılık dolayısıyla bu yöntem analizleri ile elde edilen sonuçlarda farklılık göstermiştir. Ancak, Bölüm 4.5'te verilen TAST deneyine ait kırılma enerjisi sonuçları dikkate alındığında ENF_1 numunesinden elde edilen deneysel yük, deplasman dataları ile belirlenen CBBM analiz sonuçlarının uyumlu olduğu sonucuna varıldığından dolayı sadece bu numuneye ait R-curve eğrisi Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu eğri incelendiğinde Mod II kırılma enerjisinin 3,75 N/mm olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18. (a) ENF-1 numunesinden elde edilen R-curve, (b) ENF_1 numunesine ait yük-deplasman eğrisi.

4.5. Kalın Yapıştırılan Malzemeler Kullanılarak Oluşturulmuş Bağlantı Numunelerinden (TAST) Elde Edilen Sonuçlar

Mod II kırılma enerjisinin belirlenmesinde ENF test yönteminin özellikle gevrek karakterli yapıştırıcılarda kararsız çatlak ilerlemesine sebep olması ve sadece ilk çatlak oluşumuna dair bir kırılma enerjisi değeri vermesi ilerleyen çatlaklara ait değerler sunmaması kırılma enerjisinde farklı yöntemlerin kullanılmasını gerekli kılmıştır (Safaei et al. 2023). Literatür incelendiğinde Sina et al. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada olduğu gibi ENF testine alternatif olarak TAST test yönteminin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada da ENF numunesinde kullanılan mevcut yapıştırılan malzeme geometrisine bağlı olarak kararlı çatlak ilerlemesi dağılımının elde edilemeyeceği kararı verilmiş ve yapıştırıcıların yapıştırma bağlantıları vasıtasıyla kırılma enerjisinin tespit edilebileceği ikinci bir yöntem olan TAST deneyleri yapılarak Mod II kırılma enerjisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda, AISI 1040 çelikleri ve DP810 yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulmuş 3 adet TAST numunelerinin deneyleri 2.450 N/dk'lık deformasyon hızında yapılmıştır. Bu numunelere ait deneysel sonuçlar Çizelge 4.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.4. DCB numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar.

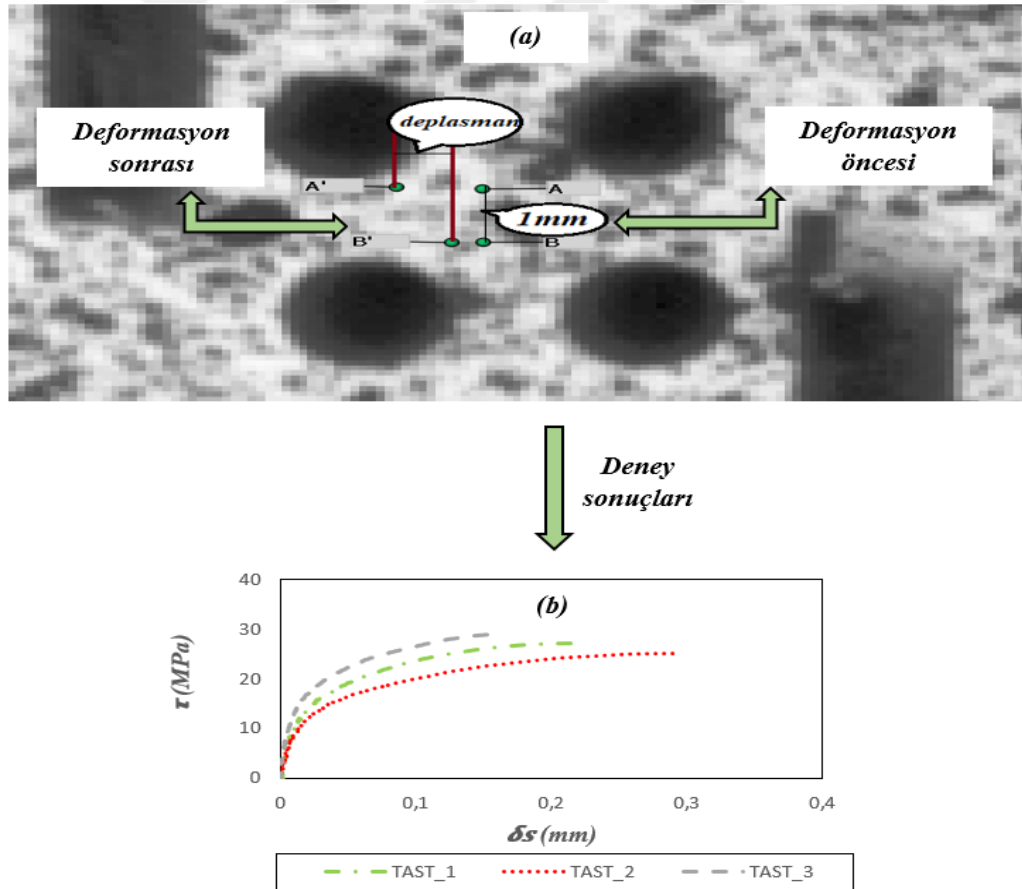
NUMUNE	F_{max} (N)	ΔL (mm)	δ_s (mm)	τ (MPa)	G_{IIC} (N/mm)
TAST - 1	6.833,89	0,647	0,224	27,33	5,2
TAST - 2	6.261,52	1,059	0,296	25,04	5,8
TAST - 3	7.345,57	0,984	0,158	29,38	3,78

Çizelge 4.4. (Devam)

<i>ortalama</i>	6.813,66	0,89	0,22	27,25	4,92
<i>SD</i>	542,3	0,22	0,06	2,17	1,03

ΔL : Hasar yükündeki yer değiştirme; δ_s : yapıştırıcı tabakasının hasar yükündeki kayma deplasmanı; τ : Maksimum kayma gerilmesi; G_{IIc} : Mod-II kırılma enerjisi.

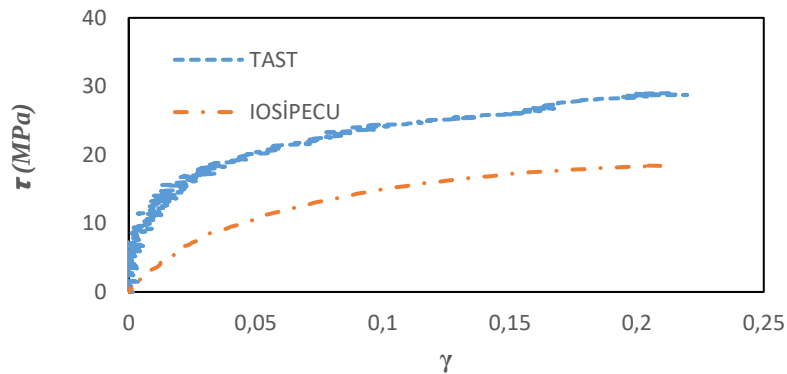
Şekil 4.19’da TAST numunelerine ait kayma gerilmesi-kayma deplasmanı eğrileri bulunmaktadır. Bu eğrilerin altında kalan alanlar kırılma enerjisine eşit olduğundan dolayı eğriler için oluşturulan yaklaşık fonksiyonlarının belirlenen sınırlar arasındaki integrasyonu ile Mod II kırılma enerjileri belirlenmiştir. Numunelere ait bu değerler incelendiğinde numunelerin hasar yükleri ve deplasman değerleri arasındaki farklılıktan dolayı standart sapması 1,03 olan değerler elde edilmiştir. Numuneler arasındaki farklılığın sebebi, numunelerin yüzey hazırlama ve yapıştırma işlemleri esnasında oluşan hatalardan dolayı oluşan numunelerin hasar yüzeylerindeki mevcut adhesif hasar karakteri ile anlaşılmaktadır.



Şekil 4.19. (a) kayma deplasmanının belirlenmesinde kullanılan noktaların gösterimi, (b) TAST deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi-kayma deplasmanı eğrileri.

TAST yöntemi ile yapıştırıcıların kayma gerilmesi-kayma gerinimi davranışı belirlenmektedir. Ancak yapıştırıcı tabakasındaki kaymayı herhangi bir optik ölçüm yöntemi olmadan tam olarak belirleyebilmek oldukça zordur. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, deney cihazının çene hareket miktarından elde edilecek kayma deplasman datalarının yapıştırılan malzemelere ait deplasmanları ve çene boşluklarını içermesinden dolayı güvenilir sonuçlar sunmayacaktır (Lees and Hutchinson 1992). Bundan dolayı Krieger (1975), Althof (1974) gibi birçok araştırmacı yapıştırma bölgesinde farklı konfigürasyonlarda ekstansometreler kullanarak yapıştırıcıya ait kayma deplasmanını belirlemeye çalışmıştır. Ancak araştırmacıların elde ettikleri sonuçlar arasında önemli farklılıkların olduğu belirtilmiştir (Kadioglu et al. 2002). Bu sebeplerden dolayı TAST yönteminde kayma deplasmanlarının belirlenmesinde temaslı ekstansometrelerin kullanımından doğacak hassas olmayan sonuçların temassız gerinim ölçerler ile giderilebileceği söylenebilir.

Iosipescu ve TAST numunelerinden elde edilen kayma mekanik özelliklerinin karşılaştırılması Şekil 4.20’de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde; kayma gerinimi değerleri arasında önemli bir uyum olduğu görülmektedir. Kayma gerilmesi değerlerindeki farklılığın ise TAST yöntemi ile elde edilen kayma gerilmelerinde yapıştırılan malzemelerin yapıştırıcıya bir miktar rijitlik kazandırması ve Iosipescu numunesinin çentik bölgelerinde oluşan lokal gerilmelerin erken hasara sebep vermesi dolayısıyla olağan bir durum olduğu söylenebilir.



Şekil 4.20. TAST ve Iosipescu deneylerinden elde edilen kayma gerilmesi-kayma gerinimi eğrilerinin karşılaştırılması.

ENF deneyleri ile elde edilen CBBM temelli Mod II kırılma enerjisi hesaplamaları sonucunda ENF_1 numunesine ait Mod II kırılma enerjisi-eşdeğer çatlak uzunluğu eğrisi

(R-curve) incelendiğinde; kırılma enerjisinin yaklaşık olarak 3,75 N/mm ve TAST_3 numunesine ait kayma gerilmesi – kayma deplasmanı eğrisi vasıtasıyla elde edilen Mod II kırılma enerjisi değerinin 3,78 N/mm olması sebebiyle ENF 1 numunesinde elde edilen kırılma enerjisi sonucunun güvenilir olduğu söylenebilir.

4.6. Açısal Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarından Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında; bulk çekme, bulk kayma (Iosipescu), DCB, ENF ve TAST deneylerinden elde edilen mekanik özelliklerin doğruluğunun nümerik analizler ile kıyaslanarak belirlenmesi amacıyla üretimi gerçekleştirilen 4 adet yapıştırma bağlantısının (scarf joints) çekme ve üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır.

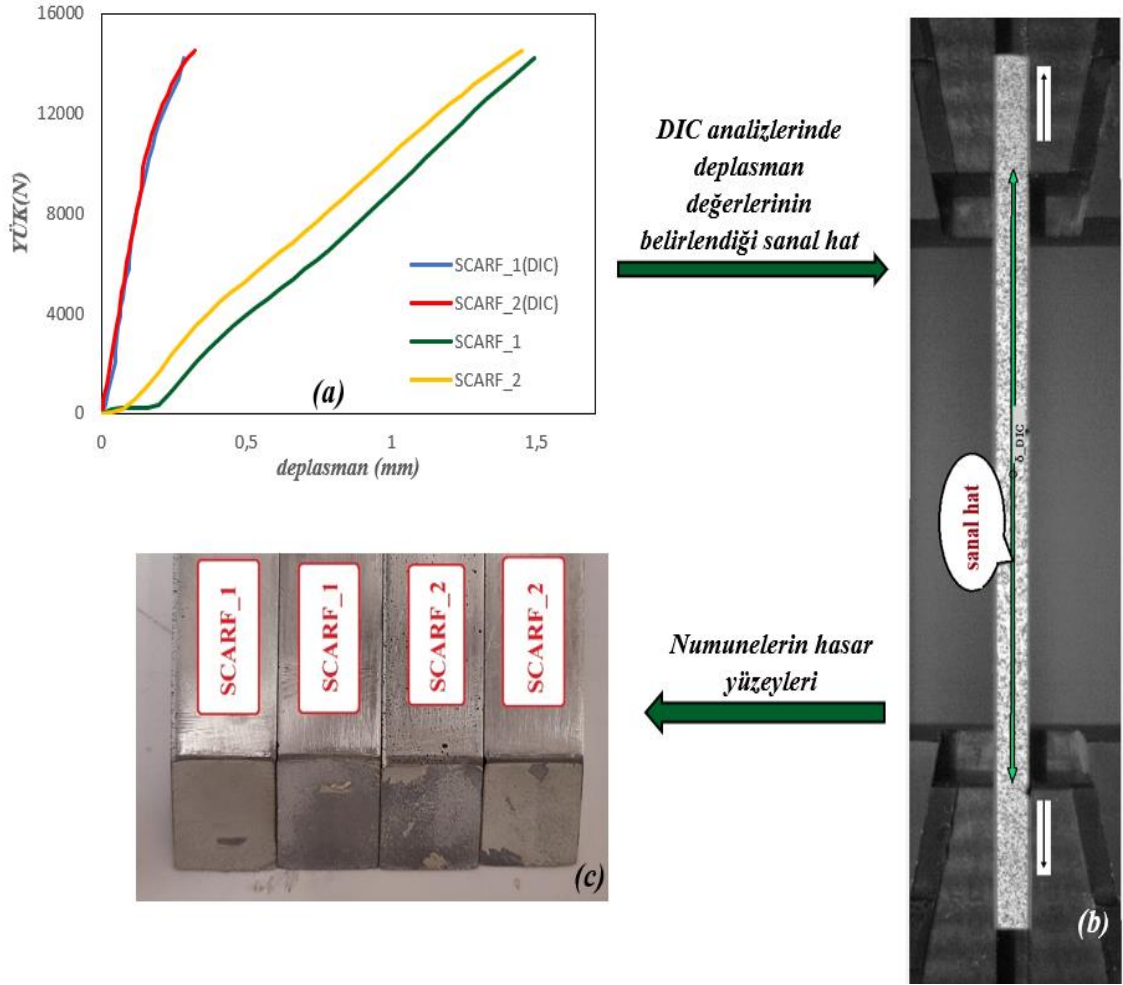
4.6.1. Çekme deneyi sonuçları

Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının 5 mm/dk'lık deformasyon hızında yapılan çekme deneylerinin sonuçları Çizelge 4.5'te özetlenmiştir. Şekil 4.21'de ise numunelerin kuvvet-deplasman eğrileri ve kırılma yüzeylerine ait bilgiler detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.5. Yapıştırma bağlantılarının çekme testlerinden elde edilen sonuçlar

NUMUNE	F (kN)	ΔL (mm)	δ_{DIC} (mm)	$F_{sayisal}$ (kN)	$\delta_{sayisal}$ (mm)
SCARF_1	14,19	1,53	0,28	14,86	0,236
SCARF_2	14,52	1,45	0,32		
ortalama	14,35	1,49	0,3		
SD	0,23	0,05	0,02		

F : Deneysel hasar yükü, ΔL : Çekme cihazının çene hareketinden elde edilen hasar anındaki yer değiştirme; δ_{DIC} : DIC ile elde edilen hasar anı yer değiştirme, $F_{sayisal}$: CZM ile elde edilen nümerik hasar yükü, $\delta_{sayisal}$: CZM ile elde edilen hasar anındaki nümerik yer değiştirme.

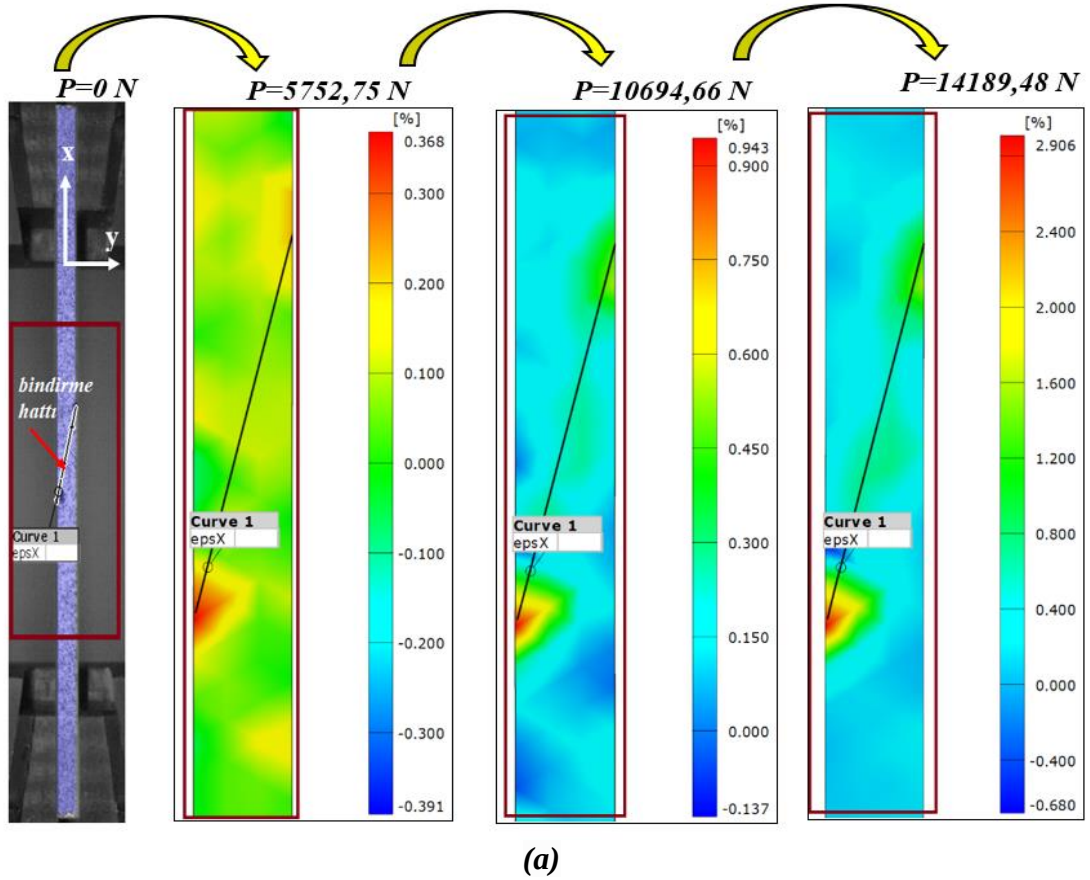


Şekil 4.21. (a) Yapıştırma bağlantılarının çekme yükü - yer değiştirme grafiği, (b) DIC yöntemi ile yer değiştirme datalarının belirlendiği sanal ekstansometrenin gösterimi, (c) yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri.

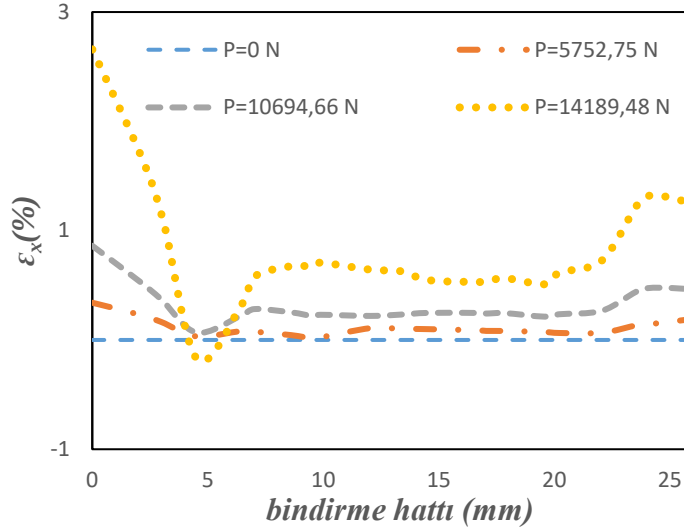
Şekil 4.21a’da açılmalı yapıştırma bağlantılarının çekme deneyleri ile elde edilen yük-deplasman eğrileri bulunmaktadır. SCARF_1 ve SCARF_2 olarak belirtilen eğrilerin deplasman değerleri çekme cihazının çene hareketi dataları ile, SCARF_1(DIC) ve SCARF_2(DIC) olarak belirtilen eğrilerin deplasman değerleri ise Şekil 4.21b’de verilen DIC sanal hattı ile belirlenmiştir. Bu eğriler incelendiğinde; herhangi bir deformasyon ölçüm yöntemi kullanmadan sadece çekme çenesinin hareket miktarı ile belirlenen yer değiştirme değerlerinin, DIC ile belirlenen yer değiştirme değerlerinden önemli oranda farklı olduğu görülmektedir. DIC ve çekme cihazından alınan yer değiştirme değerlerinin, Çizelge 4.5’te yer alan nümerik analizler sonucunda bulunan yer değiştirme değeri dikkate alınarak değerlendirilmesinde DIC ile bulunan değerlerin sayısal yer değiştirme değerine yakın olduğu görülmektedir. Dolayısıyla DIC değerlerinin daha güvenilir olduğu ve sadece çekme cihazının hareketi ile yer değiştirme

datalarının belirlenmesine yönelik araştırmacılar tarafından yapılacak çalışmaların süreklilik ve güvenilirlik sunamayacağı ifade edilebilir. Ayrıca her iki çekme numunesinin deneylerinden elde edilen sonuçlar arasındaki uyumun, numunelerin hasar yüzeyleri incelendiğinde bu yüzeylerde oluşan kohesif hasardan dolayı olduğu söylenebilir.

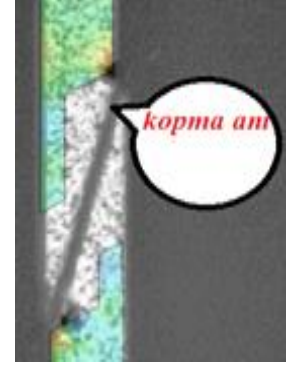
Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarında bindirme hattı boyunca oluşan gerilme dağılımı bağlantı dayanımını analiz etme noktasında öneme sahiptir. Deneysel yöntemler ile gerilme dağılımı hakkında fikir sahibi olabilmek amacıyla bu hat boyunca oluşan şekil değiştirme dağılımlarının incelenmesi gerekmektedir. DIC analizleri ile bu hatta oluşan gerinim dağılımları elde edilebilir. Şekil 4.22’de SCAFR_1 numunesinin farklı zaman dilimlerine ($P=0$ N; 5.752,75 N; 10.694,66 N; 14.189,48 N) ait bindirme hattı boyunca çekme yönünde oluşan gerinim dağılımları ve numunenin şekil değişim haritaları verilmiştir.



Şekil 4.22. (a) Farklı zaman dilimlerinde oluşan eksenel gerinim haritaları, (b) bindirme hattının zamana bağlı eksenel gerinim dağılımı, (c) numunenin hasar anına ait görüntüsü.



(b)

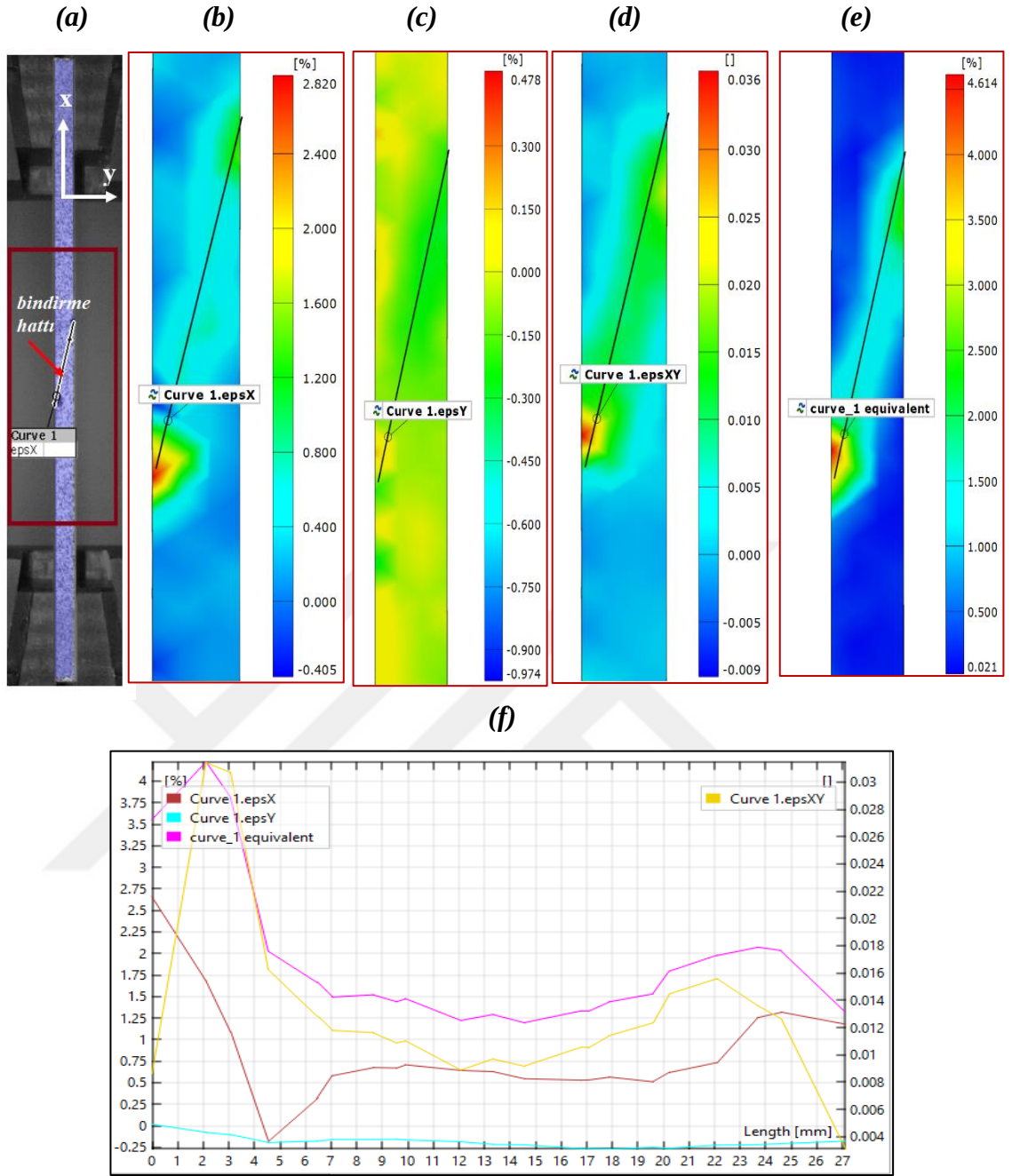


(c)

Şekil 4.22. (Devam)

Şekil 4.22’de verilen eksenel (çekme yönündeki) gerinim haritaları ve bindirme hattında oluşan gerinim dağılımları incelendiğinde; artan zamana bağlı olarak gerinim değerlerinde bir artış olmakla birlikte ilk ayrılmaların oluşacağı bindirme hattının uç kısımlarında maksimum değerde olduğu görülmektedir.

Bindirme hattında oluşan düzlemsel gerinimlerin ($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}, \epsilon_{equivalent}$) değerlendirilmesi amacıyla kopma anından bir önceki görüntüye ait ($P=14189,48$ N) gerinim haritaları ve bindirme hattı boyunca oluşan gerinim dağılımları incelenmiştir (Şekil 4.23). Bu inceleme sonucunda; eksenel çekme yüküne maruz yapıştırma bağlantısının bindirme hattının açılmal olması sebebiyle tek tesirli bindirme bağlantılarında yapıştırıcı tabakasının baskın kayma gerilmelerine maruz kalmasından (Kinloch 1987, Hart–Smith 1973, vb.) farklı olarak özellikle çekme yönündeki gerinimlerin bağlantı hasarında önemli bir rolü olmakla birlikte diğer gerinim bileşenlerinin de etkin olduğu görülmektedir. Ayrıca, x,y ve kayma yönündeki gerinimler ve bunların ortak etkisini içeren eş değer (equivalent) gerinim dağılımı hasar analizi açısından önemli olduğundan dolayı bu dağılım dikkate alındığında bindirme hattının uç kısımlarında maksimum, ortada ise minimum değerler aldığı görülmekte ve bu durum çekme yüklemesi altında ayrılmaların uç kısımlarda başlayacağını doğrulamaktadır (Şekil 4.23f).



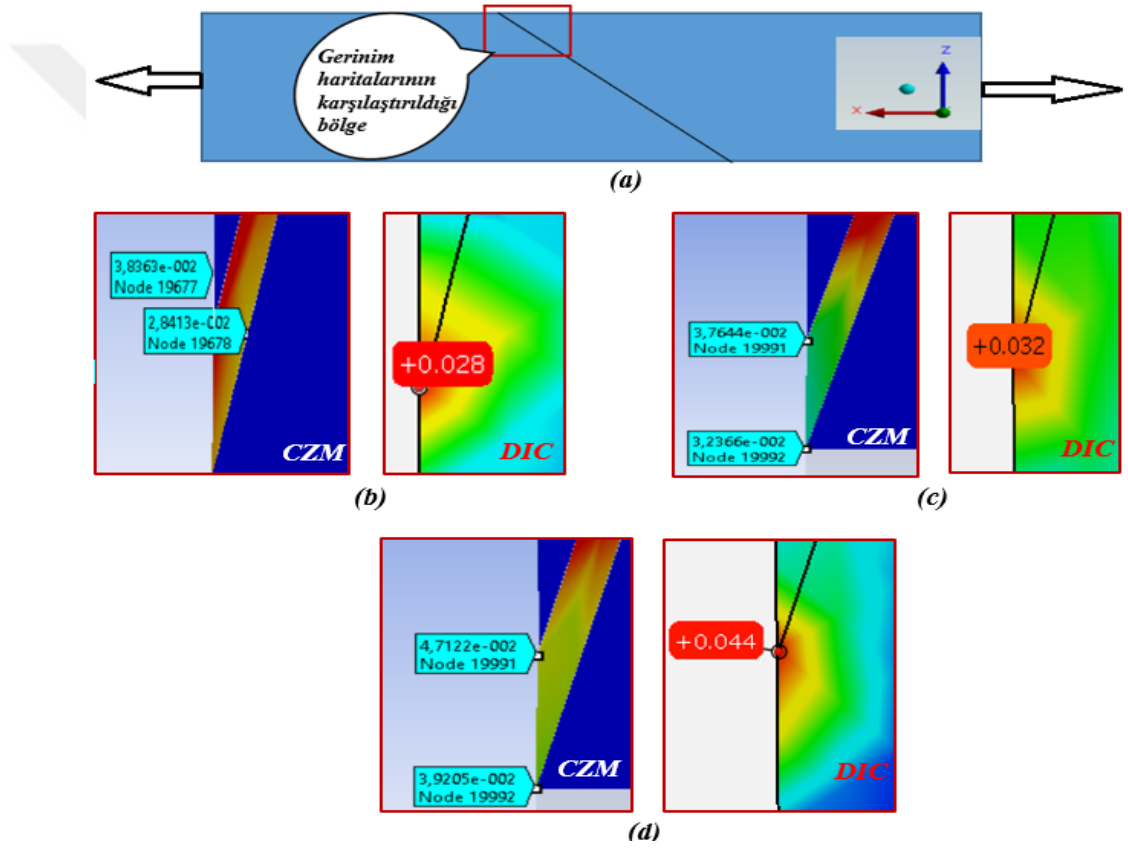
Şekil 4.23. (a) Referans görüntüdeki bindirme hattının (curve 1) gösterimi, (b) $P=14.189,48$ N'daki eksenel gerinim haritası (ϵ_x), (c) $P=14.189,48$ N'daki yanal gerinim haritası (ϵ_y), (d) $P=14.189,48$ N'daki kayma gerinim haritası (γ_{xy}), (e) $P=14.189,48$ N'daki eşdeğer gerinim haritası ($\epsilon_{equivalent}$), (f) bindirme hattı boyunca oluşan düzlemsel gerinim eğrileri ($P=14.189,48$ N).

DIC ve CZM yaklaşımli sonlu elemanlar sonuçlarının karşılaştırılması;

Bu çalışma kapsamında, yapıştırıcıların mekanik özelliklerine yönelik belirlenen deneysel parametrelerin güvenilirliğinin belirlenebilmesi amacıyla bu parametreler

kullanılarak modellenen açılal bindirmeli yapıştırma bağılantılarının CZM yaklaşımı nümerik analizleri yapılmıştır.

Yapıştırıcı tabakasında oluşan düzlemsel gerinim değerlerinin DIC yöntemi ile belirlenebilmesi ve nümerik analizler ile karşılaştırılabilir sonuçlar sunması, DIC analizlerinin geleneksel deformasyon ölçüm yöntemlerine göre üstünlüğünü göstermektedir. Bu çalışma kapsamında da yapıştırıcı tabakasında oluşan düzlemsel gerinim haritalarının deneysel (DIC analizleri) ve nümerik karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 4.24'te gerinim haritalarının karşılaştırılması verilmiştir.

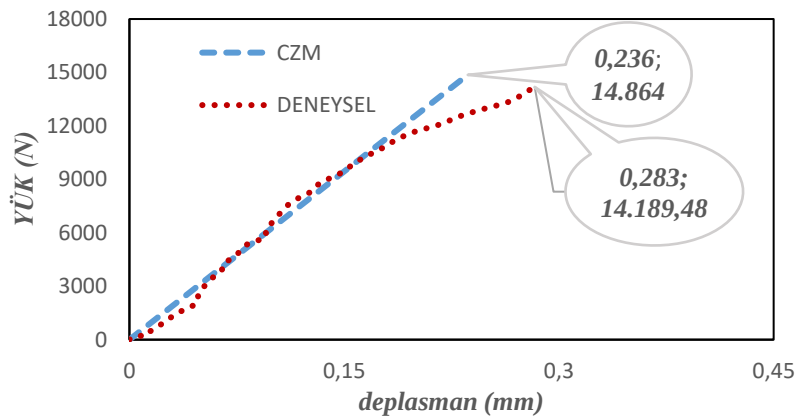


Şekil 4.24. Çekme yüküne maruz açılal bindirmeli yapıştırma bağılantısının deneysel ve nümerik yüzey gerinim haritalarının karşılaştırılması; (a) karşılaştırmada kullanılan bölgenin gösterilmesi, (b) çekme yönündeki (ϵ_x) gerinim haritalarının karşılaştırılması, (c) kayma (γ_{xz}) gerinim haritalarının karşılaştırılması, (d) eşdeğer (ϵ_{eq}) gerinim haritalarının karşılaştırılması.

Şekil 4.24'te verilen yüzey gerinim haritaları incelendiğinde; her iki yöntemde de gerinim değerlerinin maksimum olduğu noktaların bağlantının uç noktaları olduğu görülmektedir. Eksenel gerinim değerleri her iki yöntem için aynı noktalar dikkate

alındığında CZM de 0,0284 iken DIC de 0,0280 olarak ölçülmüş ve her iki değer arasında %0,04'lük bir fark olduğu görülmektedir (Şekil 4.24b). Sırasıyla Şekil 4.24b ve 4.24c'de verilen kayma ve eşdeğer gerinim değerleri incelendiğinde; CZM ve DIC yöntemlerinin kayma gerinimi değerleri arasında %0,036; eş değer gerinim değerleri arasında ise %0,03'lük bir fark olduğu görülmektedir. Dolayısıyla her iki yöntem arasında önemli derecede iyi bir uyum olduğu söylenebilir. Ayrıca, bu durum, yapıştırma bağlantılarında bağlantı dayanımı açısından önemli olan bindirme bölgesindeki yüzey gerinim haritalarının DIC analizleri ile güvenilir bir şekilde elde edilebileceği ve CZM yaklaşımlı nümerik analizlerin gerçek şartlara daha yakın sonuçlar verebileceğini doğrulamaktadır.

Şekil 4.25'te çekme yüklemesi durumunda açılmalı bindirmeli yapıştırma bağlantısında oluşan deneysel ve nümerik yük deplasman eğrileri verilmiştir. Deneysel ve nümerik yükler arasında deneysel yük referansına göre 0,04'lük bir bağıl hata; deplasmanlar arasında ise deneysel deplasman referansına göre 0,16'lık bir bağıl hata bulunmaktadır. Dolayısıyla deneysel ve nümerik analizlerin yüzey gerinim haritaları arasındaki uyumluluk gibi yük-deplasman eğrilerinde de bir uyum olduğu görülmektedir. Bu uyum; bu çalışma kapsamında nümerik modellemede kullanılan parametrelerin belirlenmesinde kullanılan test yöntemleri (Bulk çekme, Iosipescu, DCB, ENF, TAST) aracılığıyla elde edilen dataların güvenilir ve sürdürülebilir olduğu sonucuna ulaştırmaktadır.

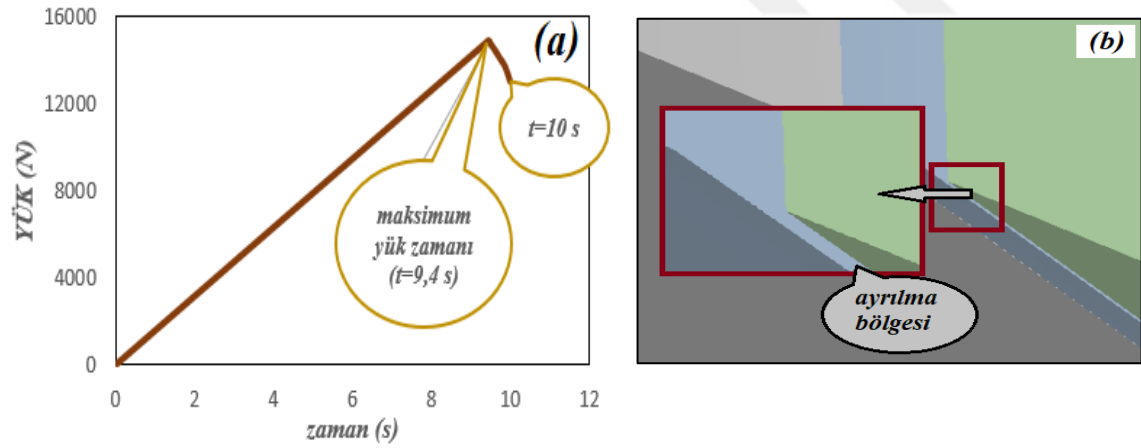


Şekil 4.25. Deneysel ve nümerik yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması

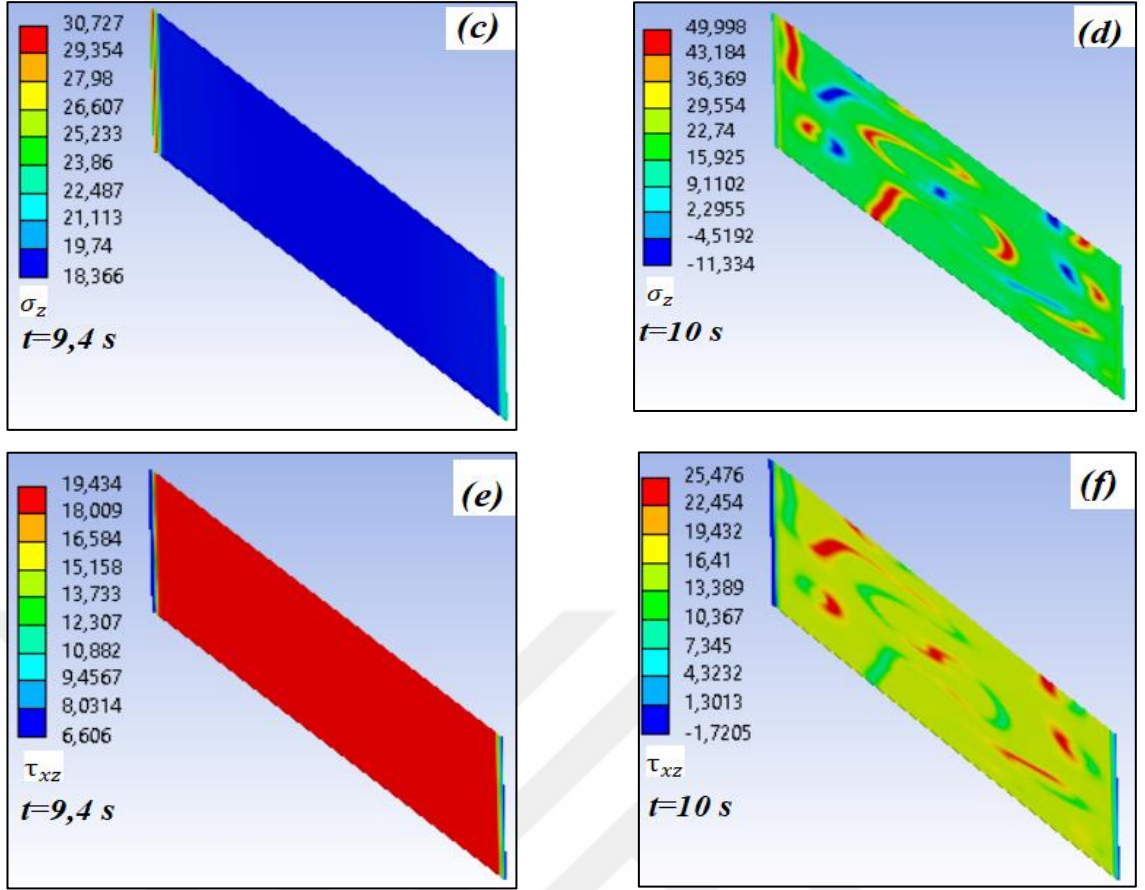
CZM ile elde edilen gerilme dağılımları;

Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarında bağlantı dayanımı açısından önemli olan yapıştırıcı tabakasındaki gerilme durumlarının; güvenilir deneysel datalar ile kurulan nümerik model aracılığı ile belirlenmesi, bağlantıların hasar analizlerinde önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada, yapıştırma bağlantısının maruz kaldığı çekme yükü sebebiyle çekme yönünde oluşacak gerilme ve çekme düzlemindeki kayma gerilmesine (σ_z, τ_{xz}) (diğer gerilme bileşenlerine nispeten bağlantı hasarında daha etkin olacaklarından dolayı) ait gerilme dağılımları verilmiştir.

Şekil 4.26’da yapıştırıcı tabakasında maksimum yük anında (9,4 s) ve analizin son anında (10 s) oluşan normal gerilme (z) ve kayma gerilmesine (xz) ait gerilme haritaları verilmiştir. Bu haritalar incelendiğinde; maksimum yük anında bindirme bölgesinin uç noktalarında maksimum gerilmelerin oluşması lokal ayrılmaların uçlarda başlamasına sebep olmakta ve analizin son anında ise local ayrılma gerçekleşmemiş bölgelerde gerilme yoğunlaşmalarının olduğu görülmektedir.

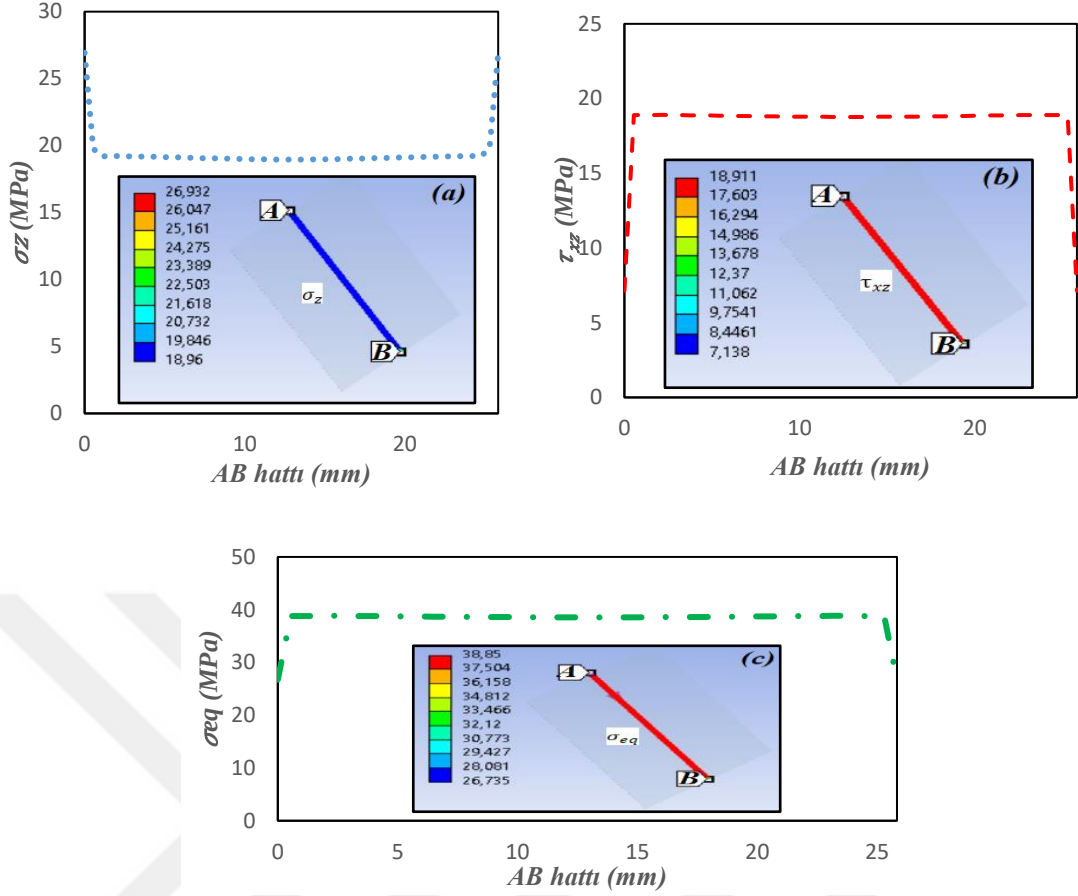


Şekil 4.26. (a) Nümerik yük-zaman eğrisi, (b) t=10.s’deki ayrılma bölgesinin detaylı gösterilmesi, (c) yapıştırıcı tabakasına ait maksimum yük değerindeki normal gerilme haritası, (d) yapıştırıcı tabakasına ait analiz sonundaki normal gerilme haritası, (e) yapıştırıcı tabakasına ait maksimum yük değerindeki kayma gerilmesi haritası, (f) yapıştırıcı tabakasına ait analiz sonundaki kayma gerilmesi haritası.



Şekil 4.26. (Devam)

Yapıştırıcı tabakasının bindirme boyunca orta hattında (AB hattı) oluşan normal ve kayma gerilmesi dağılımları maksimum yük anı dikkate alınarak belirlenmiştir (Şekil 4.27). Yapılan inceleme sonucunda; yapıştırıcı tabakasının orta hattında (AB) oluşan gerilme dağılımının uç noktalarında maksimum olmakla birlikte simetrik bir davranışa sahip olduğu görülmektedir. Bu durum hasar oluşumunda ayrılmaların bağlantının her iki ucundan başlayarak ortalara doğru ilerlemesinin bir kanıtıdır. Ayrıca elde edilen bu gerilme dağılımlarının açısallı bindirmeli yapıştırma bağlantılarının çekme yüklemesi durumuna ait nümerik gerilme analizi yapan birçok çalışma ile uyumlu olduğu görülmektedir (Alves et al. 2018; Silva et al. 2023).



Şekil 4.27. (a) AB hattında oluşan normal gerilme dağılımı, (b) AB hattında oluşan kayma gerilmesi dağılımı (c) AB hattında oluşan eşdeğer gerilme dağılımı.

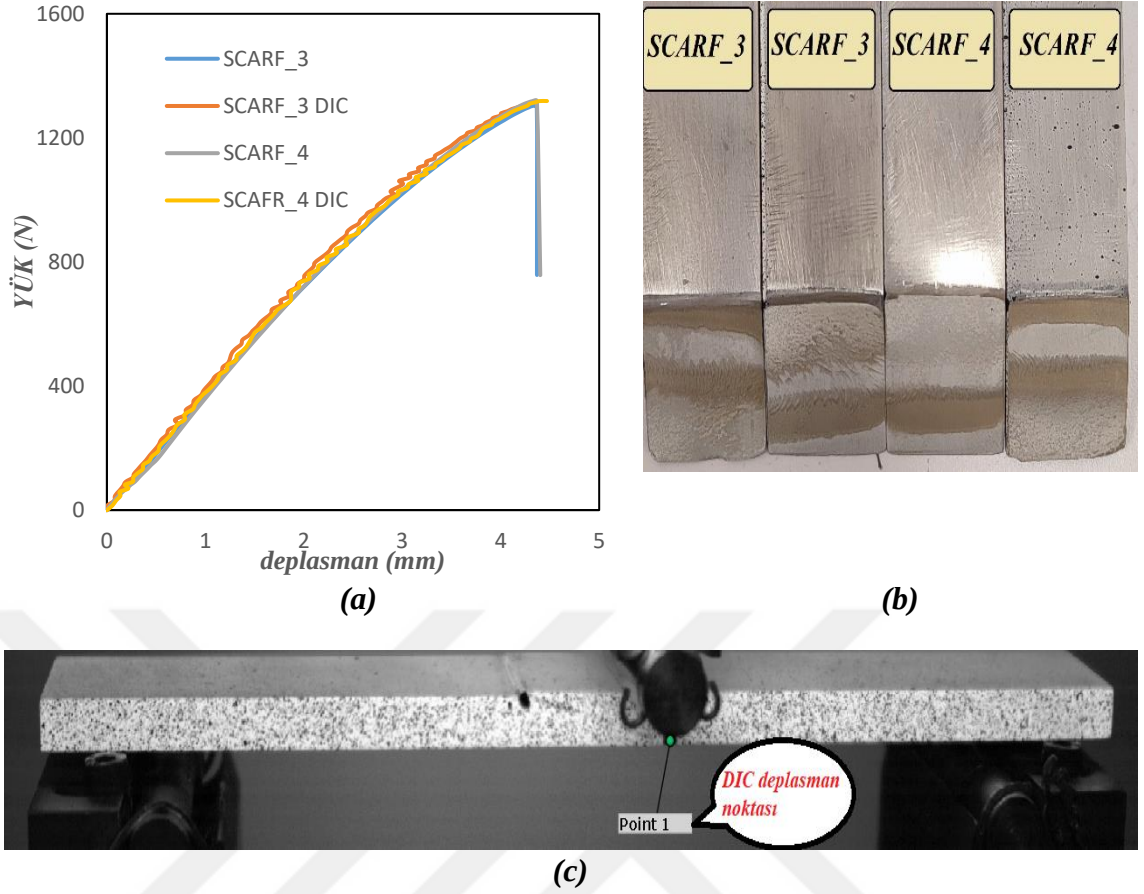
4.6.2. Üç nokta eğme deneyi sonuçları

Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının 5 mm/dk'lık deformasyon hızında yapılan üç nokta eğme deneylerinin sonuçları Çizelge 4.6'da özetlenmiştir. Şekil 4.28'de ise eğme deneyleri yapılan numuneler ait yük-deplasman eğrileri ve hasar yüzeyleri detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.6. Yapıştırma bağlantılarının üç nokta eğme testlerinden elde edilen sonuçlar

NUMUNE	F (N)	ΔL (mm)	δ_{DIC} (mm)	$F_{sayisal}$ (N)	$\delta_{sayisal}$ (mm)
SCARF_3	1.302,98	4,32	4,21	1.414,6	1,92
SCARF_4	1.318,74	4,36	4,47		
ortalama	1.310,86	4,34	4,34		
SD	11,14	0,02	0,18		

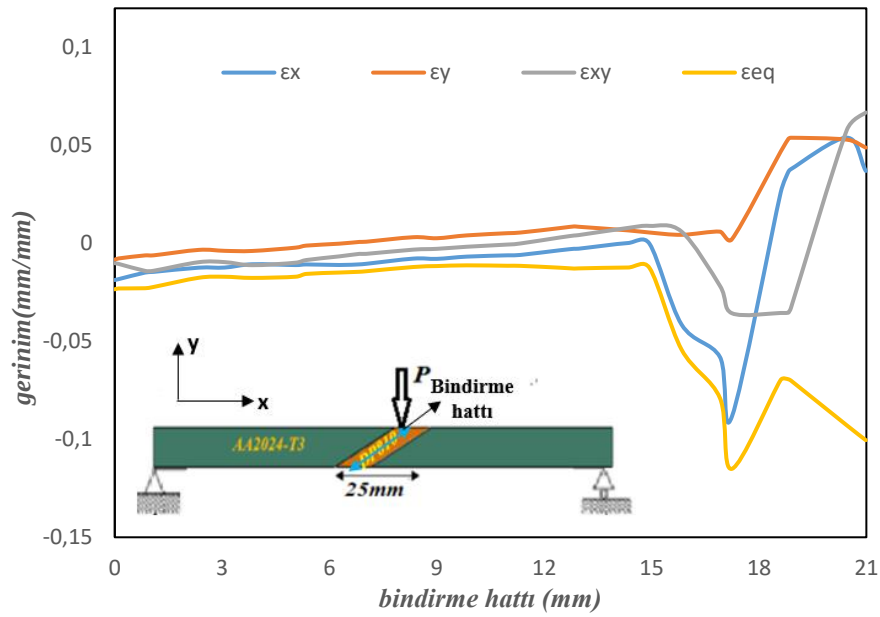
F : Deneysel hasar yükü, ΔL : Çekme cihazının çene hareketinden elde edilen hasar anındaki yer değiştirme; δ_{DIC} : DIC ile elde edilen hasar anı yer değiştirme, $F_{sayisal}$: CZM ile elde edilen nümerik hasar yükü, $\delta_{sayisal}$: CZM ile elde edilen hasar anındaki nümerik yer değiştirme.



Şekil 4.28. (a) Yapıştırma bağlantılarının eğme yükü - yer değiştirme grafiği, (b) yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri, (c) DIC yöntemi ile yer değiştirme datalarının belirlendiği sanal noktanın gösterimi.

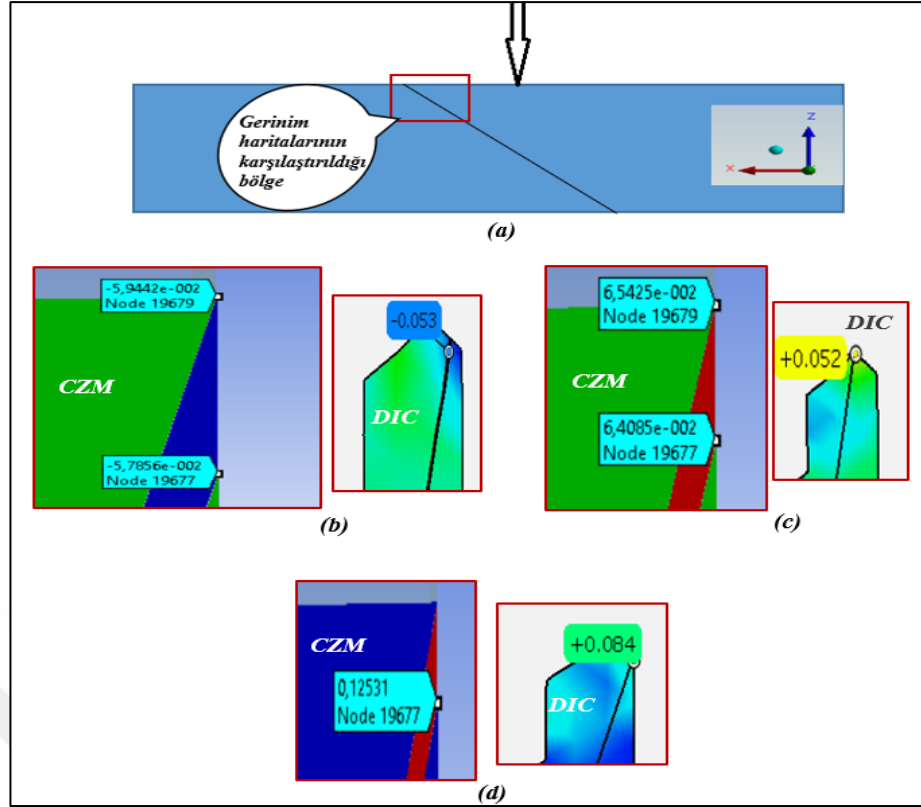
Şekil 4.28a’da açılmalı yapıştırma bağlantılarının üç nokta eğme deneyi sonucunda elde edilen deneysel yük-deplasman eğrileri bulunmaktadır. Bu eğrilerde SCARF_3 DIC ve SCARF_4 DIC ile belirtilen eğrilerin deplasman dataları DIC analizleri vasıtasıyla Şekil 4.28c’de gösterilen sanal nokta yardımı ile SCARF_3 ve SCARF_4 olarak verilen eğrilerdeki deplasman dataları ise deney cihazının çene hareketinin aşağı doğru inme değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Verilen tüm eğriler ve Çizelge 4.6’da yer alan değerleri dikkate alındığında; numuneler arasında çok iyi bir uyum olduğu (hasar yüzeylerinin kohesif olması bu durumu doğrulamaktadır (Şekil 4.28b).) ve DIC ve deney cihazı strokundan elde edilen deplasman dataları arasında bir farklılığın olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla, çekme deneylerinin aksine, eğme deneylerinde deney cihazının hareketine bağlı olarak belirlenen deplasman datalarının güvenilir olduğu söylenebilir.

Açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının çekme deneylerinde yapılan bindirme hattı gerinim analizi üç nokta eğme yüklemesi durumunda da yapılmıştır. Bu analizde bindirme hattındaki düzlemsel gerinimler ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy}, \epsilon_{equivalent}$) numunenin hasar anından ($P=757,34$ N) bir önceki görüntü ($P=1.318,74$ N) dikkate alınarak belirlenmiştir. Şekil 4.29’da $P=1.318,74$ N anındaki bindirme hattı boyunca oluşan gerinim dağılım eğrileri verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde bindirme hattının uç kısımlarına yakın bölgelerde maksimum şekil değişimlerinin oluştuğu görülmektedir.



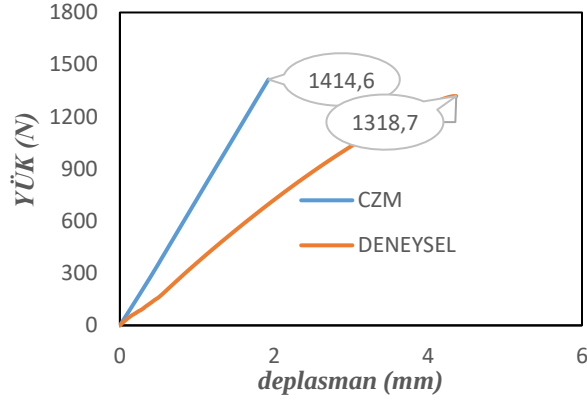
Şekil 4.29. $P=1.318,74$ N’da (maksimum yük) bindirme hattı boyunca oluşan şekil değişim dağılımları.

Şekil 4.30’da açısal bindirmeli yapıştırma bağlantılarının üç nokta eğme yüklemesi durumunda oluşan deneysel ve nümerik yüzey gerinim haritaları verilmiştir. Bu haritalar dikkate alındığında; CZM ve DIC yöntemlerinden aynı noktaya ait gerinim değerleri arasında ϵ_x için %0,4; ϵ_z için %1,2; eşdeğer gerinim için ise %3,6’lık bir fark olduğu görülmektedir. Bu durum deneysel ve nümerik yöntemler arasında çekme deneyine nispeten daha az bir uyum olduğunu göstermektedir. Bu uyumsuzluk; eğme deneylerinden elde edilen görüntü çözünürlüklerinin daha düşük olması ve nümerik analizlerin deneysel deplasman datalarına oranla daha küçük bir değerden sonra yakınsama yapmamasından kaynaklandığı söylenebilir (Şekil 4.31).



Şekil 4.30. Eğme yüküne maruz açısallı yapıştırma bağlantısının deneysel ve nümerik yüzey gerinin haritalarının karşılaştırılması; (a) karşılaştırmada kullanılan bölgenin gösterilmesi, (b) basma yönündeki (ϵ_z) gerinin haritalarının karşılaştırılması, (c) yanal yöndeki (ϵ_x) gerinin haritalarının karşılaştırılması, (d) eşdeğer (ϵ_{eq}) gerinin haritalarının karşılaştırılması.

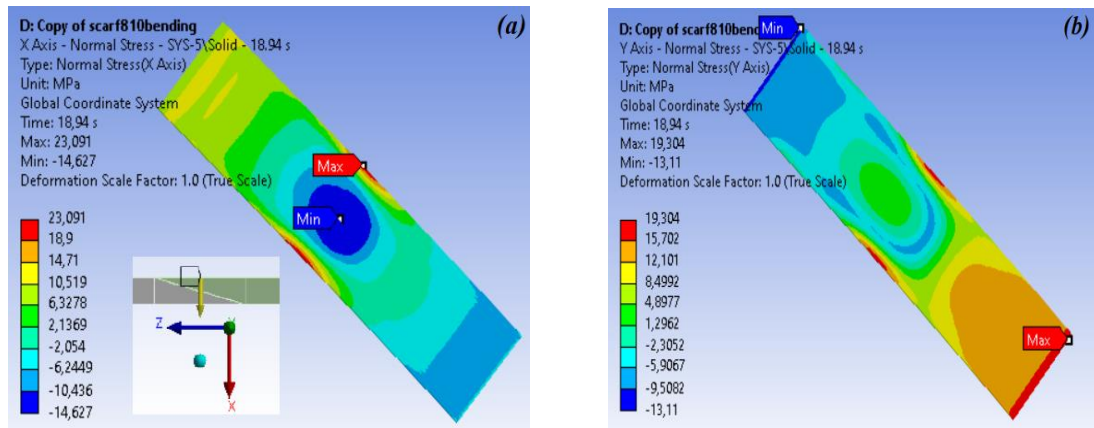
Şekil 4.31’de yapıştırma bağlantısının üç nokta eğme yükleme durumu ait yük-deplasman eğrilerinin deneysel ve nümerik karşılaştırılması verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde her iki yöntemle ait hasar yüklerinin birbirine çok yakın olduğu görülmekle birlikte deplasman dataları arasında çekme yükleme durumuna kıyasla bir farklılık olduğu görülmektedir. Deneysel ve nümerik yükler arasında deneysel yük referansına göre 0,06’lık bir bağıl hata; deplasmanlar arasında ise deneysel deplasman referansına göre 0,56’lık bir bağıl hata bulunmaktadır. Çekme yükleme durumunda nümerik analizlerin deneysel değerlere çok yakın değerler sunması sebebiyle eğme yükleme durumunda oluşan deformasyon farklılığının deneysel şartlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



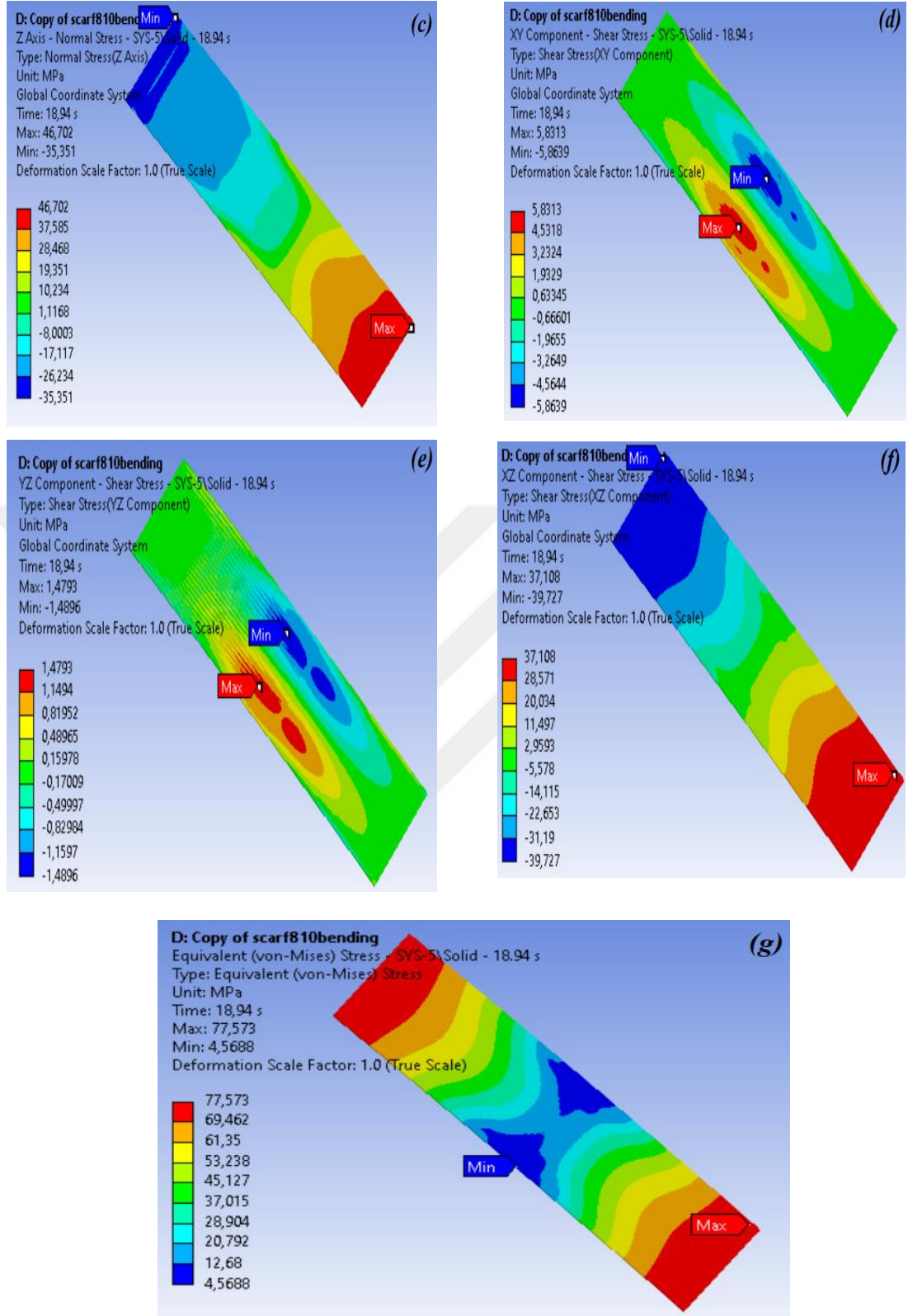
Şekil 4.31. Yapıştırma bağlantısının üç nokta eğme yüklemesi durumuna ait deneysel ve nümerik yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması.

CZM ile elde edilen gerilme dağılımları;

Çalışmada, açısız bindirmeli yapıştırma bağlantılarının üç nokta eğme durumunda yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımları ve yapıştırıcı tabakasının orta hattından alınan gerilim dağılımlarını dikkate alan bir inceleme gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.32, 4.33). Bu inceleme sonucunda Şekil 4.32’de verilen gerilme haritaları, çekme yüklemesi durumunun aksine tüm yönlerdeki gerilme değerlerinin önemli seviyelerde olması sebebiyle 2 boyutlu nümerik analizler ile güvenilir sonuçlar elde edilemeyeceği göstermektedir. Bu sonuç literatürde incelendiğinde He et al. (2009) tarafından benzer yönde yapılan bir çalışmada da vurgulanmıştır. Ayrıca eğme yüklemesinden dolayı beklenildiği üzere yapıştırıcı tabakasının uçlarında farklı karakterde normal gerilmeler (çekme, bası) oluştuğu da görülmektedir.



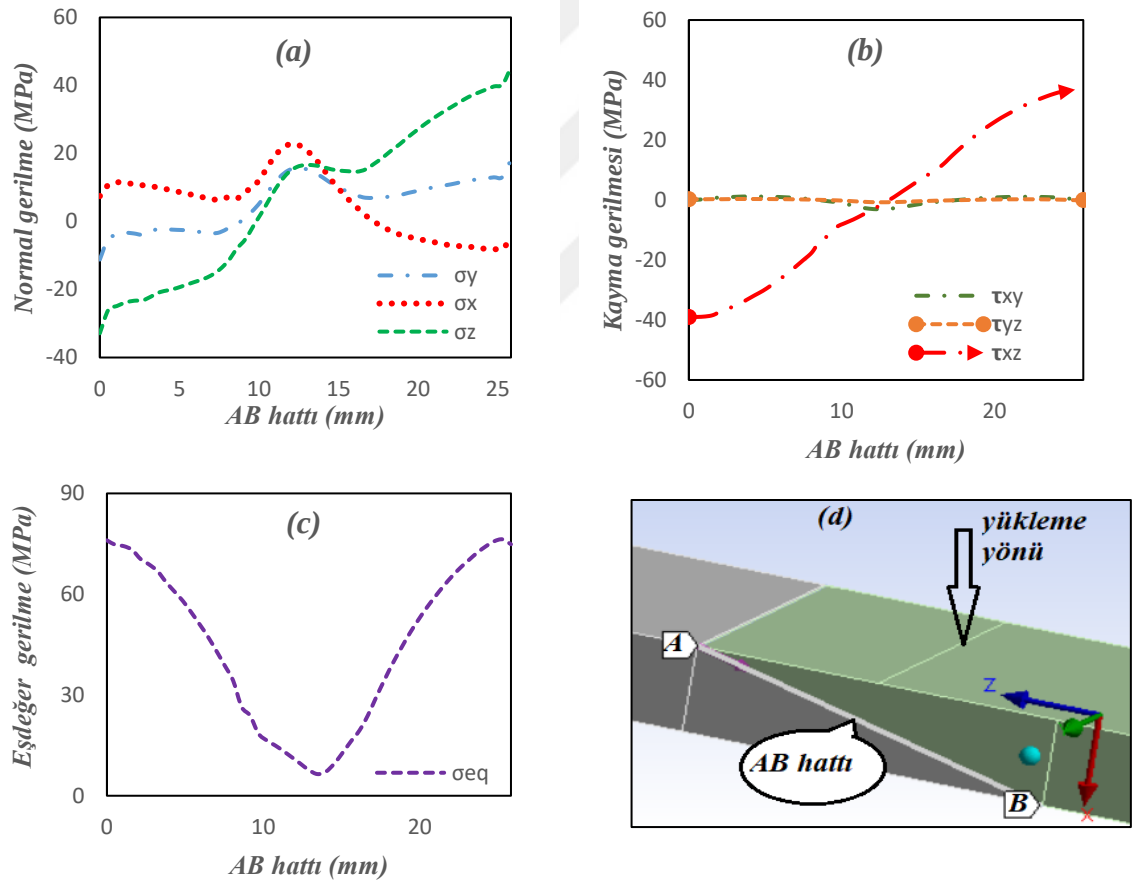
Şekil 4.32. Yapıştırıcı tabakasında oluşan normal, kayma ve eşdeğer gerilme haritaları; (a) Basma yönündeki (σ_x), (b) σ_y , (c) σ_z , (d) τ_{xy} , (e) τ_{yz} , (f) τ_{xz} , (g) σ_{eq} .



Şekil 4.32. (Devam)

Yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımlarının yapıştırıcı tabakasının orta hattından (AB) alınan değerler doğrultusunda değerlendirmek amacıyla bindirme hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarına ait Şekil 4.33'te verilen grafikler incelendiğinde;

bindirme hattı boyunca oluşan normal gerilme dağılımlarının bağlantı uçlarında farklı karakterde (çeki, bası) oldukları ve tüm normal gerilme bileşenlerinin büyüklük olarak ihmal edilemeyecek (düzlem gerilme varsayımı yapılmamalı) düzeyde olduğu görülmektedir. Şekil 4.33b’de verilen kayma gerilmelerine ait dağılımlar dikkate alındığında ise; xz düzleminde yani yükleme düzleminde oluşan kayma gerilmelerinin diğer yönler nispeten oldukça yüksek seviyede olduğu görülmektedir. Normal ve kayma gerilmelerinin toplam etkilerini içeren eş değer gerilme açısından bindirme hattında oluşan gerilme dağılımı (Şekil 4.33c) dikkate alındığında; AB hattının uç noktalarında maksimum gerilmelerin oluşması durumunun bağlantının bu hattın uç noktalarından başlayarak hasara uğrayacağını bir göstergesidir.

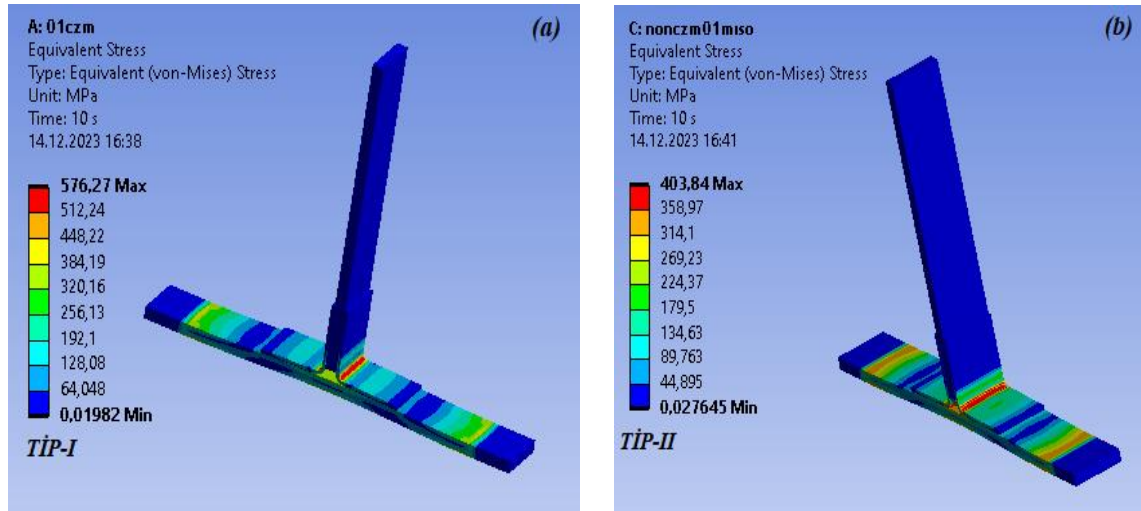


Şekil 4.33. Yapıştırıcı tabaksının bindirme hattında oluşan normal, kayma ve eşdeğer gerilme dağılımları (a) normal gerilmelerin kıyaslanması, (b) kayma gerilmelerinin kıyaslanması, (c) eşdeğer gerilme dağılımı, (d) AB hattı ve referans alınan eksen takımının detaylı gösterimi.

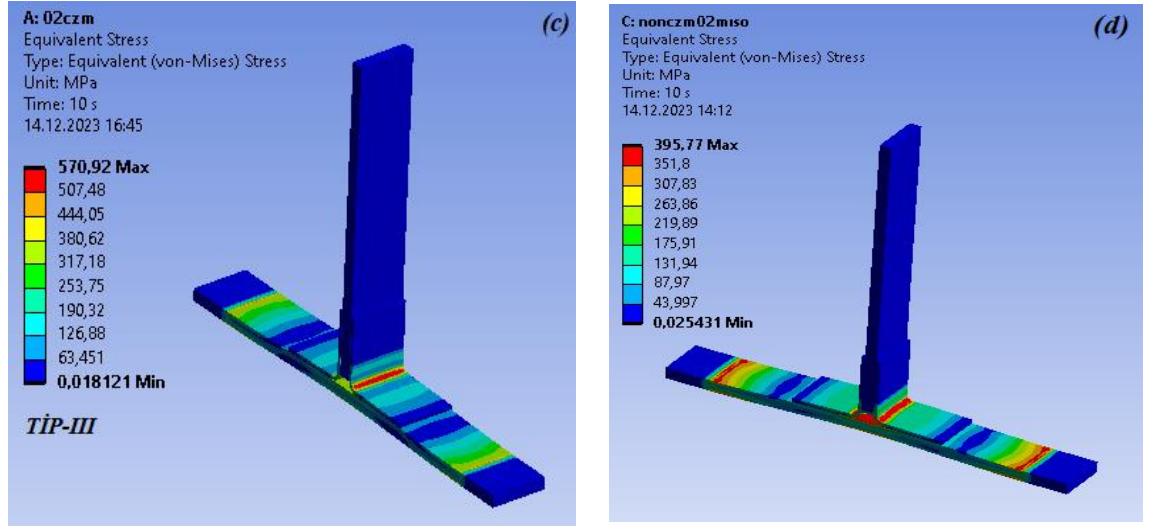
4.7. T-Yapıştırma Bağlantısının Nümerik Analiz Sonuçları

T-bağlantı; yapıştırma bağlantıları arasında özellikle havacılık uygulamalarında sıkça kullanılan bir bağlantı tipidir. Bu bağlantı tipinin dayanımı; yapıştırıcı tabaka kalınlığı, bindirme uzunluğu gibi geometrik parametreler ile değişmektedir. Dolayısıyla bu parametrelerin etkileri incelenerek optimum bağlantı tasarımı yapmak büyük önem arz etmektedir. Bağlantıya ait geometrik parametrelerin etkileri nümerik çalışmalar ile incelenirken; bu analiz yöntemlerinde kullanılan yaklaşımların gerçek durumu yansıtmaya düzeyine bağlı olarak parametrik değişikliklerin bağlantı dayanımına etkisi daha net bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu çalışmada; T-bağlantıya ait yapıştırıcı tabaka kalınlığının bağlantı dayanımına etkisi iki farklı nümerik analiz yaklaşımı (CZM, non CZM) ile aynı yük ve sınır şartlarında belirlenmiştir.

Şekil 4.34'te T modellerde oluşan eş değer gerilim haritaları verilmiştir. Verilen şekil incelendiğinde aynı geometrik özellikler, yük-sınır şartları ve mesh yapısına sahip T-bağlantılarda CZM yaklaşımı etkisiyle farklı eşdeğer gerilme değerleri (Tip-I'de 576,27 MPa, Tip-II'de 403,84 MPa) olduğu görülmektedir. Aynı yaklaşımlı (Tip-I/Tip-III veya Tip-II/Tip-IV) çözümlerde ise yapıştırıcı tabaka kalınlığındaki artışın eş değer gerilmeyi bir miktar azalttığı görülmektedir.

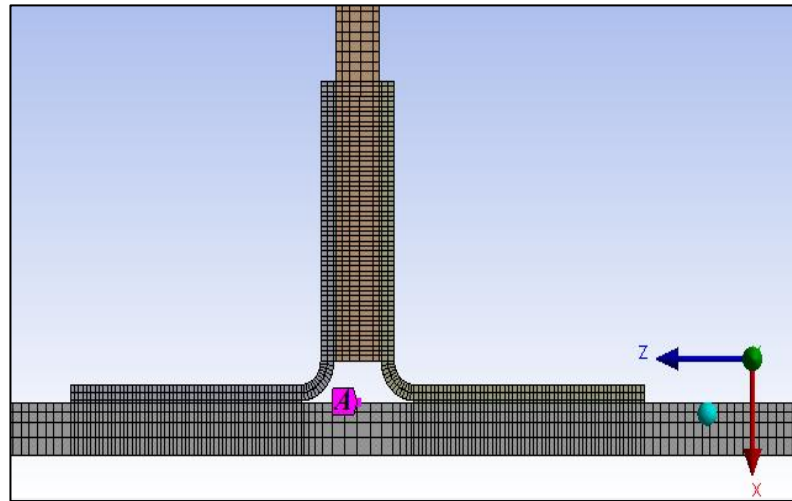


Şekil 4.34. T-bağlantıda oluşan von-Mises gerilme dağılımı; (a) Tip-I, (b) Tip-II, (c) Tip-III, (d) Tip-IV.

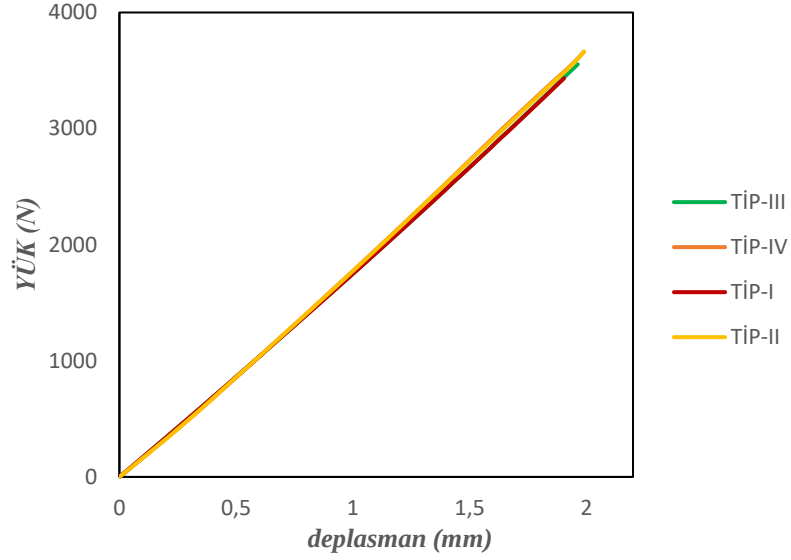


Şekil 4.34. (Devam)

T-yapıştırma bağlantısının Şekil 4.35'te verilen A noktasına ait deplasman değerleri ve hasar yükleri açısından karşılaştırılması Şekil 4.36'da verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde; artan yapıştırıcı tabaka kalınlığına bağlı olarak CZM yaklaşımının bağlantı yüküne olan etkisinin arttığı görülmektedir. Yapıştırıcı tabaka kalınlığının bağlantının hasar yükü üzerindeki etkisi dikkate alındığında; CZM yaklaşımı içermeyen bağlantılarda hasar yüklerinin hemen hemen aynı olduğu, CZM yaklaşımli bağlantılarda ise yapıştırıcı tabaka kalınlığındaki artışın hasar yükünü bir miktar arttırdığı görülmektedir. Dolayısıyla CZM yaklaşımli nümerik analizlerde bağlantı yükünün yapıştırıcı tabaka kalınlığına bağımlılığının daha fazla olduğu söylenebilir (TİP-I hasar yükü; 3.537,8 N, TİP-II hasar yükü; 3.663,5 N, TİP-III hasar yükü; 3.553,9 N, TİP-IV hasar yükü; 3.662,3 N).

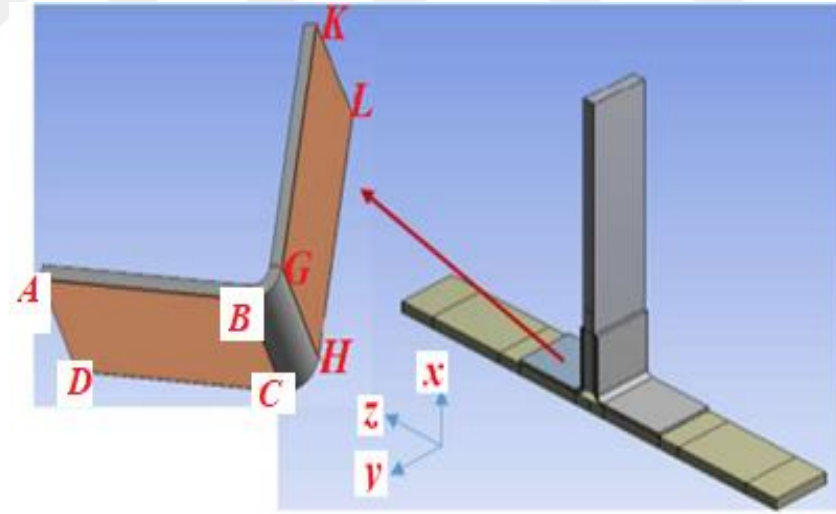


Şekil 4.35. T-bağlantısında deplasman değerlerinin belirlendiği A noktasının gösterimi

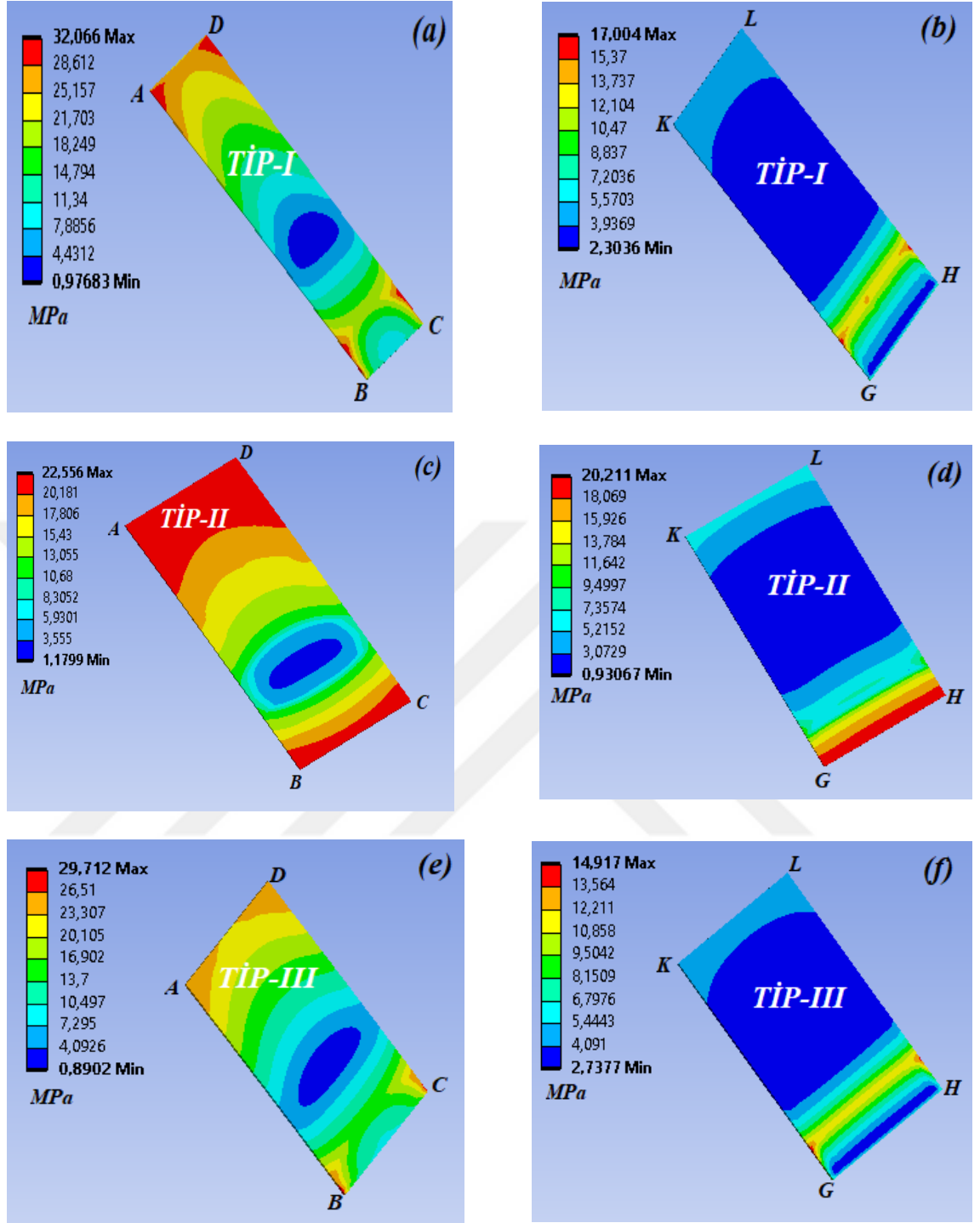


Şekil 4.36. T-bağlantılarına ait nümerik yük-deplasman eğrileri

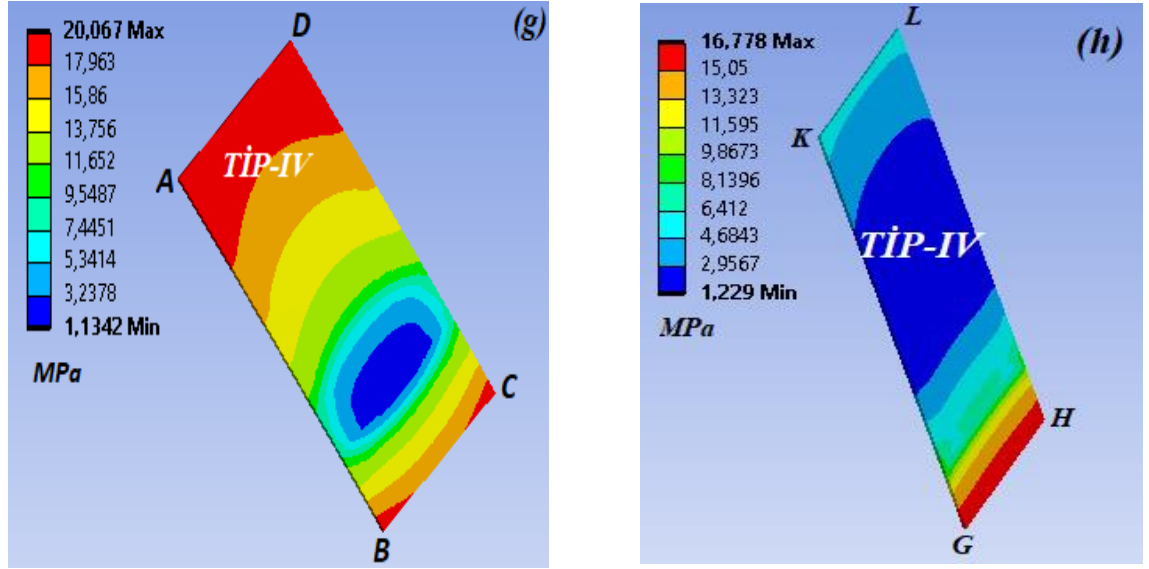
T-bağlantılarında; yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme ara yüzeyi yapının hasarı açısından önemli olduğundan dolayı bu çalışmada Şekil 4.37’de belirtilen kritik hasar yüzeylerinin (*ABCD* ve *GHLK*) eşdeğer gerilme haritaları Şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.37. T-bağlantısında kritik hasar yüzeylerinin gösterilmesi



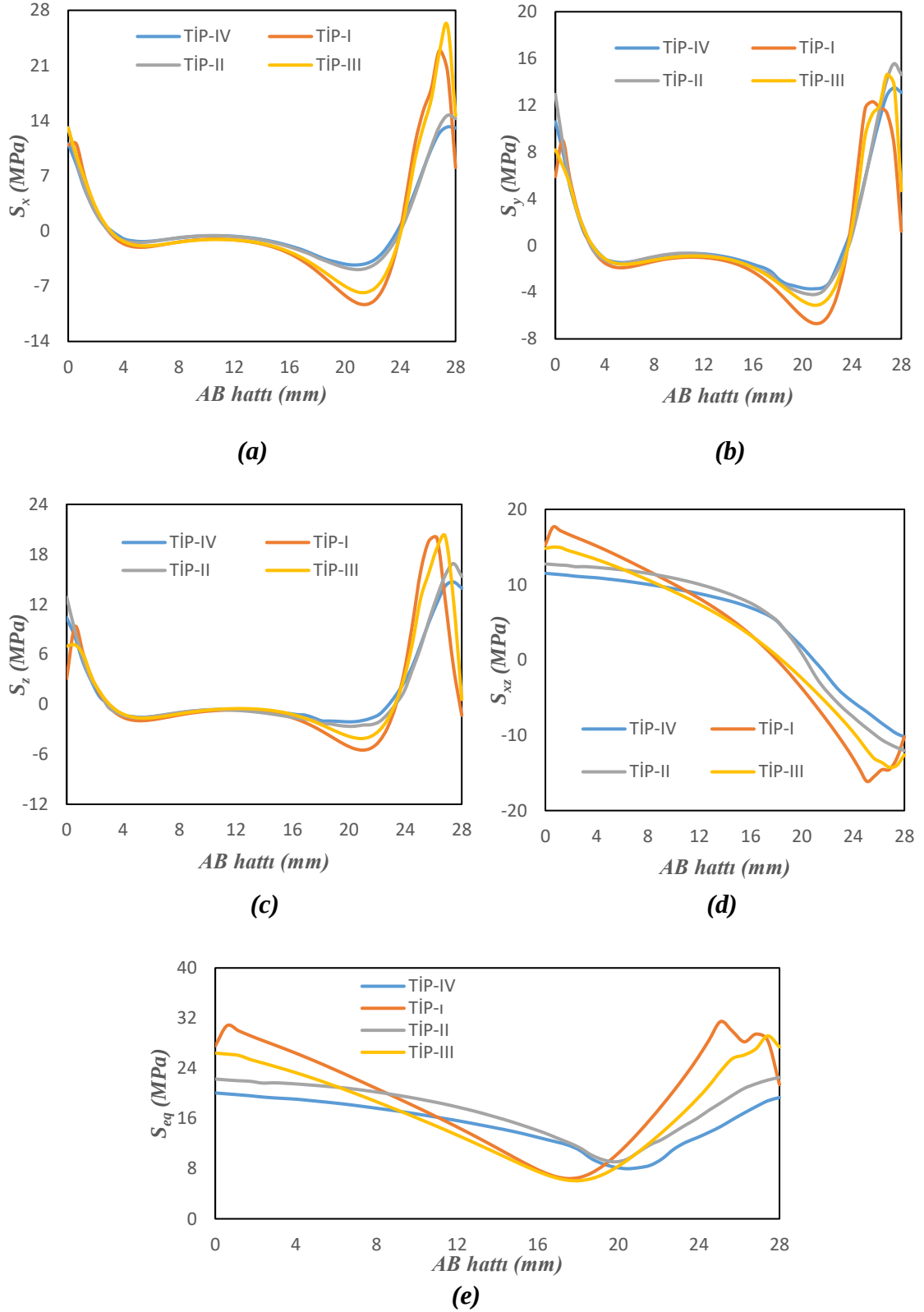
Şekil 4.38. T-bağlantılarının kritik hasar yüzeylerinde oluşan eşdeğer gerilme haritaları; (a) TİP-I bağlantısının ABCD yüzeyi, (b) TİP-I bağlantısının GHKL yüzeyi, (c) TİP-II bağlantısının ABCD yüzeyi, (d) TİP-II bağlantısının GHKL yüzeyi, (e) TİP-III bağlantısının ABCD yüzeyi, (f) TİP-III bağlantısının GHKL yüzeyi, (g) TİP-IV bağlantısının ABCD yüzeyi, (h) TİP-IV bağlantısının GHKL yüzeyi.



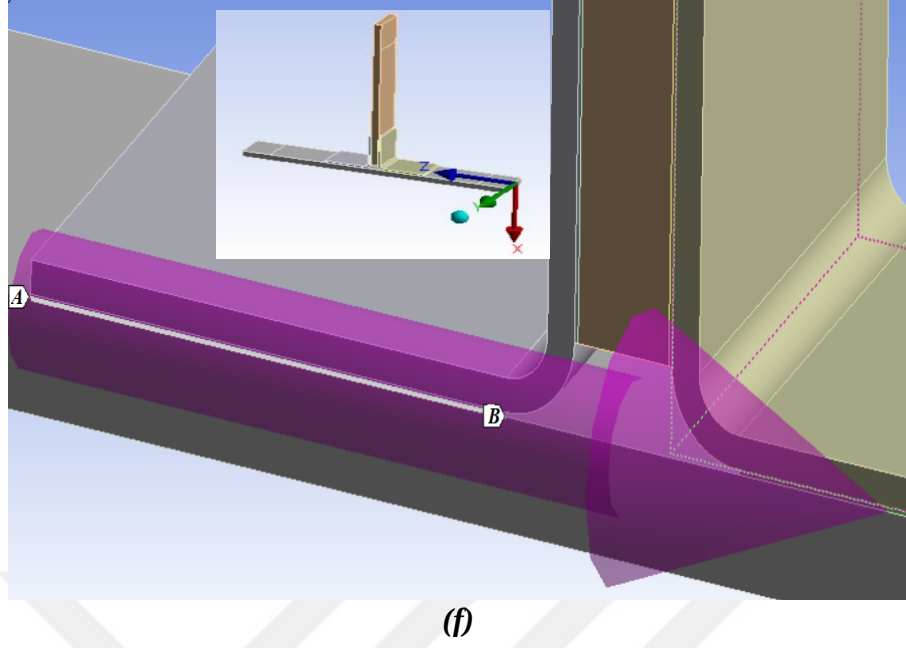
Şekil 4.38. (Devam)

Şekil 4.38’de verilen eşdeğer gerilme haritaları incelendiğinde; artan yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak kritik yüzeylerdeki gerilme değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Tüm bağlantı çeşitlerinde ABCD yüzeylerinde oluşan gerilmeler GHKL yüzeyinde oluşan gerilmelerden daha fazladır. Bu durum yükleme yönü dikkate alındığında yatay yapıştırıcı tabakalarının (ABCD) daha fazla gerilmeye maruz kalacağını kanıtlar. CZM yaklaşımıyla nümerik analizlerde gerilme yoğunluğunun fazla olduğu BC ve GH hatlarında belli bir gerilme değerinden sonra (maksimum kohesif gerilme aşıldığında) lokal ayrılmalar oluştuğundan dolayı bu hatlarda gerilme değerleri düşmekte ve hasarsız bölgelere doğru gerilme yoğunlaşmaları oluşmaktadır.

T-bağlantıda ABCD yüzeyindeki gerilme değerlerinin GHKL yüzeyine göre daha fazla olması sebebiyle daha detaylı inceleme gerektiren AB hattı boyunca oluşan gerilme dağılımlarına ait grafikler Şekil 4.38’de verilmiştir



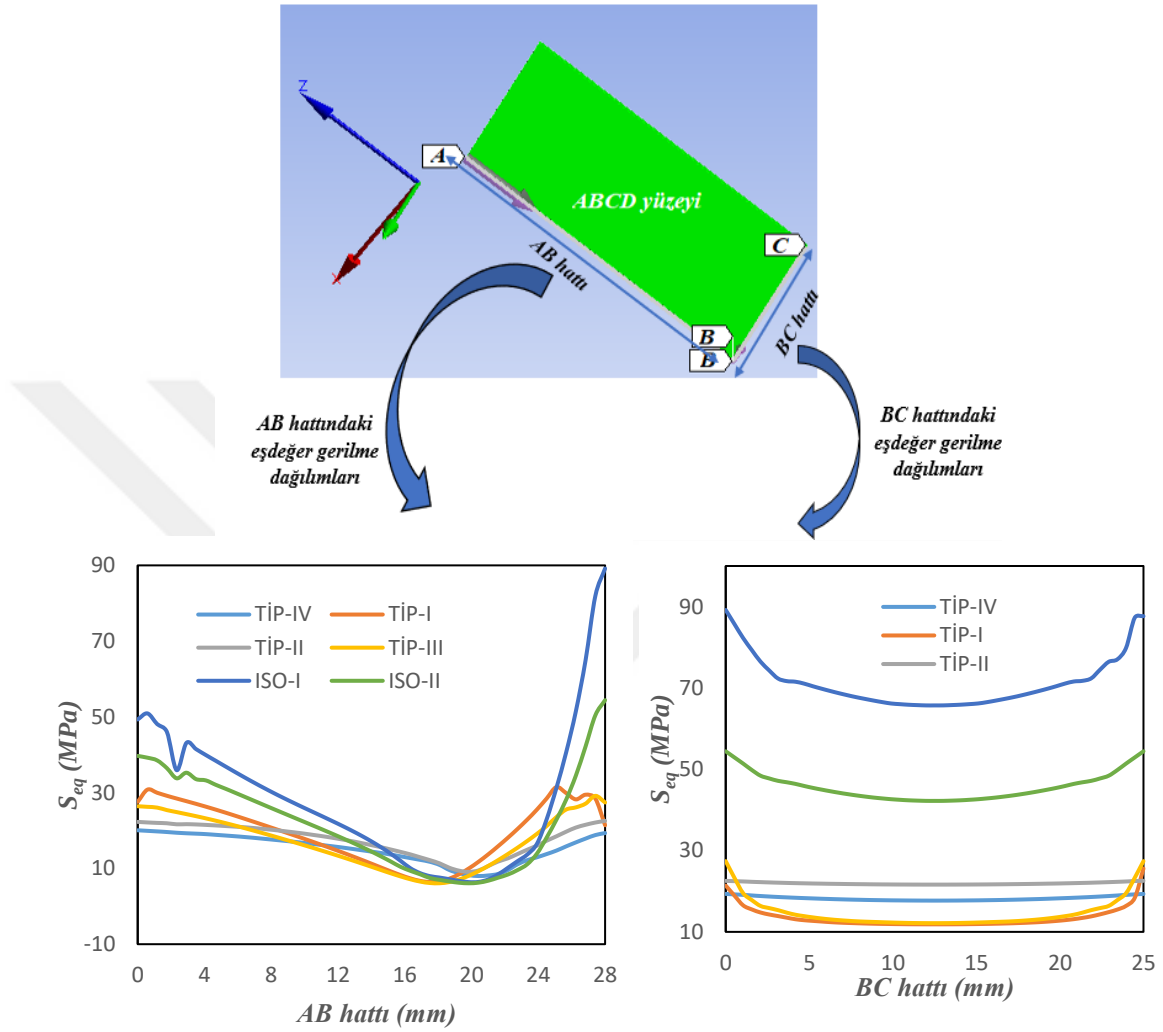
Şekil 4.39. T-bağlantılarının kritik AB hattında oluşan gerilme dağılımları; (a) S_x (çekme yönü), (b) S_y , (c) S_z , (d) S_{xz} , (e) S_{eq} (von-Mises gerilmesi), (f) AB hattı ve referans eksen takımının gösterilmesi.



Şekil 4.39. (Devam)

Şekil 4.39’da verilen gerilme dağılımları dikkate alındığında; CZM yaklaşımı modeller ile CZM yaklaşımı kullanılmayan modeller (MISO) arasında gerilme farklılıklarının olduğu, yapıştırıcı tabaka kalınlığının artması gerilme değerlerini bir miktar düşürmekle birlikte yapıştırıcı tabaka kalınlığının CZM yaklaşımı modellerde bağlantı dayanımı üzerinde daha etkin olduğu görülmektedir. Bu durum CZM yaklaşımı çözümlerin modelde oluşan geometrik farklılıkları daha iyi tanımlayabildiğini dolayısıyla gerçeğe daha yakın simülasyonlar yapma yetisinin olduğunu göstermektedir. Tüm bu sonuçlara ilave olarak; MISO yaklaşımı nümerik analiz sonuçları ile CZM yaklaşımı analiz sonuçları arasında önemli farklılıkların bulunmaması sebebiyle yapıştırma bağlantılarında CZM yaklaşımının kullanılmadığı durumlarda MISO malzeme tanımlaması ile yapılan nümerik analizlerinde güvenilir olabileceği söylenebilir. Ayrıca yapıştırma bağlantılarının nümerik analizlerinde yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelere ait özelliklerin tanımlanmasında izotropik malzeme tanımlamasının yapılması analizde büyük hatalara sebep olmaktadır. Bu durumu daha iyi belirtebilmek amacıyla izotropik malzeme tanımlaması ile kurulan modellerinde dahil edilerek AB ve BD hatlarında oluşan eş değer gerilim dağılımları incelenmiştir. Şekil 4.40’da ilgili dağılımlar verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde; izotropik malzeme tanımlamasını içeren modelere (ISO-I (0,1 mm yapıştırıcı tabaka kalınlıklı), ISO-II (0,2 mm yapıştırıcı tabaka kalınlıklı) ait gerilme değerlerinin CZM ve MISO yaklaşımı modellerden önemli oranda farklı olduğu

görülmektedir. Dolayısıyla yapıştırma bağlantılarının tasarımları yapılırken nümerik çalışmalarda izotropik malzeme tanımlamasının kullanılmaması gerektiği tavsiye edilebilir.



Şekil 4.40. T-bağlantılarının AB ve BC hattında oluşan eş değer gerilme dağılımları

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

İki farklı malzeme grubunun bir araya gelmesi ile oluşturulan dolayısıyla kompozit bir yapı ihtiva eden yapıştırma teknolojisinden tam anlamıyla yararlanabilme düzeyi mekanik özelliklerin yeterli doğrulukta tespit edilmesine büyük ölçüde bağlıdır. Mekanik özelliklerin tespiti; bulk veya bağlantı formundaki numunelerin farklı yükleme durumlarına ait deneysel ve nümerik çalışmalarını içermektedir. Bu çalışmalar ile tespit edilen özelliklerin doğruluğu; deneysel çalışmalarda büyük ölçüm aralığına sahip yüksek hassasiyetli ölçüm cihazlarının kullanımını, uygun şartlarda bulk veya bağlantı formundaki numunelerin hazırlanmasını; nümerik çalışmalarda ise güvenilir deneysel dataolar ile fiziksel durumu en iyi betimleyen modelin kurulmasını gerekli kılmaktadır.

Bu çalışmada, DP810 sıvı yapısal yapıştırıcısı kullanılarak standart çekme numuneleri ve Iosipescu numuneleri olmak üzere iki farklı formda bulk numuneler üretilmiştir. Aynı yapıştırıcı kullanılarak AISI 1040 çelik malzemelerin birleştirilmesi ile TAST numuneleri, AA2024-T3 alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi ile DCB, ENF ve açısall bindirmeli yapıştırma bağlantıları (Scarf joint) oluşturulmuştur. Bu numunelerden elde edilen deneysel ve sayısal analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

- İlk olarak DP810 yapıştırıcısının vakum altında kalıba enjekte edilmesi ile üretilen bulk çekme numunelerinin çekme deneyleri yapılarak yapıştırıcıya ait çekme mekanik özellikleri belirlenmiştir. Bulk numunelerin deformasyon ölçümleri DIC tekniğı kullanarak sağlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda; numunelere ait çekme mekanik özelliklerinin büyük oranda uyumlu olması nedeniyle güvenilir ve sürdürülebilir dataolar elde edilmiştir. Numunelere ait mekanik özellikler arasındaki uyum; vakum altında üretimin numunelerde oluşacak iç kusurları minimize ettiği sonucuna ulaştırmaktadır. Ayrıca vakum altında üretimin etkisi ile birlikte ISO-527/2 standartında yer alan küçük boyuttaki çekme numunesinin kullanılması; boyuta bağlı malzeme kusurlarını azaltma etkisi sağlayacağından dolayı uyumlu ve güvenilir dataoların elde edilmesine imkan sağlayacaktır. Küçük boyutlu numunelerde deformasyon ölçümlerinin temaslı gerinim ölçerler ile yapılması gerinim ölçerlerin hem konumlandırılmasını zorlayacak hem de numunenin temas noktalarında fazladan lokal gerilmelere sebep olacağından

dolayı doğru deformasyon ölçümleri yapılamayacaktır. Ancak bu çalışmada temassız deformasyon ölçüm yöntemlerinden biri olan DIC tekniği ile deformasyon analizi yapıldığından dolayı küçük boyutlu numune kullanımının sağlayacağı faydalardan doğru deformasyon ölçümleri ile faydalanılmıştır. DIC tekniğinin geleneksel deformasyon ölçüm yöntemlerine göre en önemli üstünlüğü yüzey alanı boyunca tüm noktalardan deformasyon ölçümü yapma imkanı (tüm alan deformasyon ölçümü) sağlamasıdır. Bu nedenle bu çalışmada da eksenel ve yanal gerinim değerleri belirlenirken farklı bölgelerde konumlandırılan sanal ekstansometreler kullanılarak bu ekstansometrelerden elde edilen değerler incelenmiştir. İnceleme sonucunda; farklı ekstansometrelerden alınan değerler arasında önemli bir uyum tespit edilerek; üretilen bulk numunelerde üretim kusurlarının minimize edilmiş olması sebebiyle homojen gerilme dağılımının olduğu çıkarımına DIC tekniği yardımıyla varılmıştır.

- DP810 yapıştırıcısının kayma mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla sıvı yapısal yapıştırıcının vakum altında kalıba enjekte edilmesiyle üretilen Iosipescu numunelerinin kayma deneyleri yapılarak yapıştırıcıya ait kayma mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kayma gerinim değerleri, DIC tekniği ile sanal ekstansometreler kullanılarak belirlenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen kayma gerilmesi-gerinim eğrileri vasıtasıyla numuneler arasında önemli derecede bir uyum olduğu tespit edilmiştir. Bu uyumun; çekme numunelerinde olduğu gibi vakum altında üretimin, üretim hatalarını en aza indirmesinden kaynaklandığı sonucuna varılmaktadır. Ayrıca numunelere ait kayma deformasyon ölçümlerindeki uyum DIC tekniği ile güvenilir dataların elde edilebileceğini doğrulamaktadır.
- DP810 yapıştırıcısının Mod I kırılma enerjisi; AA2024-T3 metal malzemelerin DP810 yapıştırıcısı ile birleştirilerek üretilen DCB numunelerinin deneyleri ile belirlenmiştir. DCB deneylerinde yük önü deplasman dataları, çatlak önü deplasman dataları, çatlak uzunlukları, yapıştırılan malzemelerin dönme açıları ve yüzeysel gerinim haritaları DIC tekniği ile belirlenmiştir. DCB deneyleri ile elde edilen yük dataları ve DIC tekniği ile belirlenen deplasmanlar, çatlak uzunlukları ve dönme açıları kullanılarak Mod I kırılma enerjisi; ASTM D5528 standartında

yer alan Lineer Elastik Kırılma Mekaniği yaklaşımlı MBT ve CCM metotları ile ve Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği yaklaşımlı J-integral metodu ile belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda; hem aynı numunelerin farklı yöntemler ile elde edilen kırılma enerjileri hem de farklı numunelerin aynı yöntemleri ile elde edilen kırılma enerjileri arasında yeterli düzeyde bir uyumun olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, J-integral yöntemi ile belirlenen kırılma enerjisi-çatlak önü açılma deplasmanı eğrisine ait yaklaşık fonksiyonun türevi alınarak deneysel CZM yasası belirlenmeye çalışılmıştır. Deneysel CZM eğrisinden elde edilen maksimum kohesif gerilme değerinin (kohesif çatlak ucundaki gerilme) aynı yapıştırıcıya ait bulk çekme deneyi ile elde edilen maksimum çekme gerilmesi değerine anlamlı ölçüde yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçtan dolayı hem J-integral kırılma enerjisinin tespiti için gerekli olan çatlak önü dönme açılarının hem de deneysel CZM eğrisinin elde edilmesinde kullanılan çatlak önü açılma deplasmanı datalarının DIC tekniği ile güvenilir bir şekilde elde edileceği sonucuna varılmaktadır. Ayrıca deneysel CZM eğrisinin nümerik analizlerde malzeme modelini tanımlama noktasında önemli bir parametre olması; hem DIC tekniği ile deformasyon ölçümünün hem de J-integral analiz yönteminin önemini göstermektedir. İlave olarak; DIC tekniği ile yüzey gerinim haritaları elde edilebildiğinden dolayı çatlak bölgesindeki çekme yönündeki gerinim dağılımlarının değerlendirilmesi açısından eşit uzaklıklarda yerleştirilen 4 farklı hat üzerinde oluşan aksel gerinim değerleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda ilerleyen çatlağın üzerine geldiği hatlarda hattın ortasında maksimum uçlarda ise minimum olmak üzere simetrik bir gerinim dağılımı oluşturduğu görülmüştür. Bu durum; DCB deneyleri ile yapıştırıcı tabakasında büyük oranda Mod I normal gerilmelerinin oluşacağını ve DIC tekniğinin DCB deneylerinin deformasyon ölçümlerinde kullanılabilecek önemli bir deformasyon ölçüm aracı olduğunun kanıtıdır.

- DP810 yapıştırıcısının Mod II kırılma enerjisi; AA2024-T3 metal malzemelerin DP810 yapıştırıcısı ile birleştirilerek üretilen ENF numuneleri ve AISI-1040 malzemesinin DP810 ile birleştirilmesi ile üretilen TAST numuneleri ile belirlenmiştir. ENF deneylerinde kararlı çatlak ilerlemesi sağlanamadığından dolayı bu deneylerden elde edilen yük-yük önü deplasman eğrileri arasında

uyumsuzluk oluşmuştur. Kararlı çatlak ilerlemesi sağlanamadığından dolayı ASTM D7905'te yer alan CCM metodu ve Lineer Olmayan Kırılma Mekanikliği yaklaşımı J-integral yöntemi ile kırılma enerjisi tespiti yapılamamıştır. Ancak Morais (2009) tarafından geliştirilen bir başka Lineer Olmayan Kırılma Mekanikliği yaklaşımı CBBM metodu ile kırılma enerjisi ve kırılma enerjisi-çatlak uzunluğu (R-curve) belirlenmiştir. ENF numunelerinin deneysel değerleri arasındaki uyumsuzluk CBBM metodu ile belirlenen kırılma enerjisi değerinin başka bir deneysel yöntem ile doğrulanmasını gerekli kılmıştır. Bundan dolayı literatürde de Mod II kırılma enerjisinin belirlenmesinde ENF deneylerine alternatif olarak kullanılan TAST deneyleri Mod II kırılma enerjisinin tespiti için kullanılmıştır. TAST yönteminde kayma gerilmesi-kayma deplasmanı eğrilerinin yaklaşık fonksiyonlarının integrasyonu ile Mod II kırılma enerjisi belirleneceğinden dolayı kayma deplasmanlarının belirlenmesinde DIC tekniği kullanılmıştır. TAST yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisinin ENF numunelerinin CBBM yöntemi ile elde edilen kırılma enerjisi değerine yakın olması sebebiyle CBBM ile elde edilen kırılma enerjisi değerinin güvenilirliği kanıtlanmıştır.

- TAST deneyleri yapıştırıcıların kayma mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bir deney yöntemidir. Bundan dolayı bu çalışmada, TAST ve Iosipescu kayma numunelerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda; yapıştırıcıya ait Iosipescu kayma numunelerinden elde edilen kayma deplasmanları ile TAST yönteminden elde edilen kayma deplasmanları arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Özellikle TAST deneylerinde yapıştırıcı tabakasında oluşan kayma gerinimlerinin geleneksel deformasyon ölçüm teknikleriyle belirlenmesinde yapıştırılan malzemelere ait kayma gerinimlerini de ihtiva etmesi literatürde sıkça karşılaşılan deformasyon ölçüm problemleri arasında yer almaktadır. Ancak bu çalışma ile yapıştırıcı tabakasındaki kayma deplasmanlarının DIC tekniği ile belirlenmesi bu problemlerin üstesinden gelme noktasında bir çözüm olmuştur.
- DP810 yapıştırıcısına ait; bulk çekme, Iosipescu, DCB, ENF ve TAST deneyleri ile elde edilen deneysel parametrelerin güvenilirliğinin belirlenmesi amacıyla AA2024-T3 malzemelerinin DP810 yapıştırıcısı ile birleştirilerek üretilen açılmalı bindirmeli yapıştırma bağlantılarının tek eksenli çekme ve üç nokta eğme

deneyleri yapılmıştır. Deneyleri yapılan açısall bindirmeli bağlantıların numune geometrileri, deneysel yük ve sınır şartları dikkate alınarak; belirlenen deneysel parametreler ile 3B-CZM yaklaşımllı nümerik modelleri oluşturulmuştur. Açısall bindirmeli yapıştırma bağlantılarının çekme ve üç nokta eğme deneyleri ile elde edilen yük-deplasman dataları ve yüzey gerinim haritaları ile nümerik modellerin (çekme ve üç nokta eğme yüklemesi durumu) yük-deplasman dataları ve yüzey gerinim haritaları karşılaştırılmıştır. Deneysel deplasman dataları ve yüzey gerinim haritalarının elde edilmesinde DIC tekniğı kullanılmıştır. *Çekme deneylerine ait deneysel ve nümerik dataların karşılaştırılmasında*; hem yük-deplasman eğrileri hem de yüzey gerinim haritaları açısından her iki yöntem arasında önemli ölçüde bir uyum olduğu belirlenmiştir. Bu uyum; CZM yaklaşımının özellikle tokluğu yüksek yapıştırıcılar ile oluşturulan yapıştırma bağlantılarında Lineer Elastik Kırılma Mekaniğini içeren yaklaşımların yetersiz kalması sebebiyle elastik olmayan etkilerin kırılma mekaniğine dahil edilmesinde Barebblatt (1959) ve Dugdale (1960) tarafından geliştirilen CZM yaklaşımının kullanılmasının önemli bir etkisi olduğu ve DIC tekniğinin önemli bir deformasyon ölçüm aracı olduğu sonucuna ulaştırmaktadır. *Eğme deneylerine ait deneysel ve nümerik dataların karşılaştırılmasında* ise; deneysel ve nümerik yük değerleri arasında iyi bir uyumun olduğu ancak deplasman değerleri arasında bir farklılık olduğu görülmüştür. Bu farklılığın eğme deneylerinin DIC analizlerinde kullanılan görüntü çözünürlüklerinin yeterli düzeyde olmamasından dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Deneysel ve nümerik çalışmalara ait karşılaştırma sonucunda iyi bir uyum elde edildiğinden dolayı DP810 yapıştırıcısına ait deneysel malzeme parametrelerinin nümerik modellerde güvenilir bir şekilde kullanılabileceğı kanıtlanmıştır. Bundan dolayı havacılık gibi önemli uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılan T- bağlantı tipinin nümerik çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada yapıştırıcı tabaka kalınlığının değıştirilmesi ve CZM yaklaşımının kullanılma durumuna göre 4 farklı T-bağlatı tipi oluşturulmuştur. 3B nonlinear nümerik analizler sonucunda; yapıştırıcı tabakasına ait kalınlık değışimi etkisinin CZM yaklaşımllı nümerik analizlerde daha fazla olduğu, dolayısıyla CZM yaklaşımllı nümerik analiz sonuçlarının, bağlantıya ait geometrik parametre değışimlerini

daha iyi yansıtabildiği söylenebilir. Ayrıca aynı yapıştırıcı kalınlığına sahip CZM yaklaşımı kullanımı açısından farklı olan modeller karşılaştırıldığında bu modellerin deneysel yükleri ve kritik hasar yüzeyleindeki (ABCD ve GHKL) gerilme dağılımları arasında farklılıkların olduğu görülmüştür. Bu durum; CZM yaklaşımında ilerlemeli bir hasar analiz mekanizması etkin olması sebebiyle lokal olarak gerilmelerin sınırı aştığı noktalarda lokal ayrılmaların oluşmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca, CZM ve MISO yaklaşımlı nümerik analizler arasındaki uyumdan dolayı yapıştırma bağlantılarının CZM yaklaşımı kullanılmayan nümerik modellerinde malzeme tanımlanmasında MISO kullanılması izotropik malzeme tanımlamanın aksine fiziki duruma daha yakın simülasyonların yapılmasına imkan sağlayacağı söylenebilir. İlave olarak; CZM ve MISO yaklaşımları ile kurulan modeller arasındaki farklılığın yapıştırıcı malzeme türüne bağlı olarak değişebileceği (örneğin daha sünek karakterli yapıştırıcılarda MISO tanımlaması yetersiz kalabilecek, CZM tanımlaması ise plastik etkileri içinde barındırdığından dolayı daha gerçekçi sonuçlar sunacaktır) söylenebilir.

Bu tez kapsamında yürütülen deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda; mekanik özelliklerin belirlendiği deneysel yöntemler ve bu yöntemlerin data indirgeme prosedürlerinin güvenilir olduğu, deformasyon ölçümlerinde DIC tekniğinin önemli bir deformasyon ölçüm aracı olduğu ve güvenilir deneysel datalar ile kurulan CZM yaklaşımlı nümerik analizlerin gerçek durumu daha etkin bir şekilde tanımlama kabiliyetinin olduğu sonucuna varılmaktadır. Ayrıca deneysel ve nümerik sonuçlar arasında daha yüksek bir uyumun elde edilmesinde yüksek çözünürlüklü kameralar kullanılarak 3B-DIC analizlerinin yapılması ve numunelerin titizlikle hazırlanmasının büyük bir öneme sahip olduğu ifade edilebilir.

KAYNAKLAR

- Adams, R. D. ve Wake, W. C. 1984. Structural adhesive joint in engineering. Elsevier Science Publisher, 309, London.
- Adams, R. 2005. Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications. Woodhead Publishing, 1-543, Cambridge.
- Althof, W. ve Neumann, G. 1974. Verfahren zur ermittlung von schubspannungs-gleitungs-diagrammen von konstruktionsklebstoffen in dünnen klebschichten. Materials Testing, 16(12), 387-388.
- Alves, D. L., Campilho, R. D. S. G., Moreira, R. D. F., Silva, F. J. G. ve Da Silva, L. F. M. 2018. Experimental and numerical analysis of hybrid adhesively-bonded scarf joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, 83, 87-95.
- Anonymous, 2005. Web Sitesi: http://www.killorglincc.ie/pages/subjects/adhesive_bonding, Erişim Tarihi: 15.08.2023.
- Apalak, M. K., Güneş, R. ve Fidanci, L. 2003. Geometrically non-linear thermal stress analysis of an adhesively bonded tubular single lap joint. Finite Elements in Analysis and Design, 39, 155-174.
- ASTM D1002. 1983. Standard test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading (metal-to-metal).
- ASTM D5379 / D5379M-05. 2005. Standart test method for shear properties of composite materials by the v-notched beam method. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5656. 2001. Standard test method for thick-adherend metal lap-shear joints for determination of the stress-strain behavior of adhesives in shear by tension loading. Annual Book of ASTM Standards, 15, 473-478.
- ASTM D5528-13. 2013. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, West Conshohocken, PA.
- ASTM D7905/D7905M-14. 2014. Standard test method for determination of the Mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. West Conshohocken, PA.
- Aydın, M. D. 2003. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 196, Erzurum.
- Bacher, J. 2014. Lens Distortions: What Every Photographer Should Know. Web Sitesi: <https://clickitupanotch.com/lens-distortion>, Erişim Tarihi: 10.08.2023.

- Barenblatt, G. I. 1959. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 23, 622-636.
- Bauer, R. S. 1979. *Epoxy Resin Chemistry*. American Chemical Society Publications, 221, Washington.
- Bucci, R. J., Paris, P. C., Landes, J. D. ve Rice, J. 1972. J-integral estimation procedures. *Special Technical Publication*, 40-69.
- Camacho, G. T. ve Ortiz, M. 1996. Computational modelling of impact damage in brittle materials. *International Journal of Solids and Structures*, 33(20-22), 2899-2938.
- Camanho, P. P., Davila, C. G. ve Pinho, S. 2004. Fracture analysis of composite co-cured structural joints using decohesion elements. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 27(9), 745-757.
- Campilho, R. D., Banea, M. D., Neto, J. A. B. P. ve da Silva, L. F. 2013. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 44, 48-56.
- Carlberger, T. ve Stigh, U. 2010. Influence of layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based adhesive-an experimental study. *The Journal of Adhesion*, 86(8), 816-835.
- Chaves, F. J., Da Silva, L. F. M., De Moura, M. F. S. F., Dillard, D. A. ve Esteves, V. H. C. 2014. Fracture mechanics tests in adhesively bonded joints: a literature review. *The Journal of Adhesion*, 90(12), 955-992.
- Cherepanov, G.P. 1967. Crack propagation in continuous media *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 31(3), 476-488.
- Christensen, S. F., ve McKinley, G. H. 1998. Rheological modelling of the peeling of pressure-sensitive adhesives and other elastomers. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 18(5), 333-343.
- Crammond, G., Boyd, S. W. ve Dulieu-Barton, J. M. 2013. Speckle pattern quality assessment for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(12), 1368-1378.
- Cricri, G., Perrella, M. ve Berardi, V. P. 2022. Identification of cohesive zone model parameters based on interface layer displacement field of bonded joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 45(3), 821-833.
- Çitil, Ş., Bozkurt, İ. ve Aydın, M. D. 2019. Experimental and 3D non-linear stress analysis of adhesively bonded pipes with curved-surface lap joints. *The Journal of Adhesion*, 95(5-7), 515-528.
- Çitil, Ş. 2021. Experimental and 3D non-linear stress analysis of adhesively bonded curved and scarf lap joints. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 59.

- da Silva, L. F. M., de Magalhaes, A. G. ve de Moura, M. F. S. 2007. Juntas Adesivas Estruturais. 170, Portugal, Publindústria.
- da Silva, L. F., das Neves, P. J., Adams, R. D., Wang, A. ve Spelt, J. K. 2009. Analytical models of adhesively bonded joints-Part II: comparative study. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(3), 331-341.
- da Silva, L. F. M., Dillard, D. A., Blackman, B. ve Adams, R.D. 2012. *Testing Adhesive Joints: Best Practices*. 468, Weinheim, Germany.
- da Silva, L. F., Öchsner, A. ve Adams, R. D. 2018. *Handbook of Adhesion Technology*. Springer Science & Business Media, 1535.
- De Moura, M. F. S. F. 2015. Application of cohesive zone modeling to composite bonded repairs. *The Journal of Adhesion*, 91(1-2), 71-94.
- Deák, P. ve Kowalik, M. 2019. Composite Aircraft Joint Experimental Testing with Digital Image Correlation, 13th Research and Education in Aircraft Design Conference, 7- 9 November, Conference proceedings, 150-160, Brno, Czech Republic.
- Dugdale, D. S. 1960. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8, 100-104.
- Duncan, B.C ve Dean, G.D. 1996. Notched-Beam Shear (Iosipescu) and Notched-Plate Shear (Arcan) Methods for Bulk and Joint Test Specimens. NPL Report CMMT(B) 56, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK.
- Edwards, K. L. 1998. A brief insight into the selection and use of engineering adhesives for preliminary joint design. *Materials and Design*, 19, 121-123.
- Fernandes, R. L., Campilho, R. D. S. G., Leitão, A. C. C. ve Azevedo, J. C. S. 2015. Numerical evaluation of the direct method for cohesive law extraction in shear by the End-Notched Flexure test. *Procedia Engineering*, 114, 94-101.
- Fujita, Y., Noda, S., Takahashi, J., Greenhalgh, E. S. ve Pimenta, S. 2023. Initiation and propagation fracture toughness of injection-moulded short fibre composites under different environmental conditions. *Composites Science and Technology*, 233, 109891.
- Giachetti, A. 2000. Matching techniques to compute image motion. *Image and Vision Computing*, 18(3), 247-260.
- Goland, M. ve Reissner, E. 1994. The stresses in cemented joints. *Journal Application Mechanical*, 17-66.
- Gonçalves, J. P. M., de Moura, M. F. S. F., de Castro, P. T. ve Marques, A. T. 2000. Interface element including point-to-surface constraints for three-dimensional problems with damage propagation. *Engineering Computations*, 17, 28.

- Griffith, A. A. 1921. VI. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, Containing Papers of Mathematical or Physical Character, 221(582-593), 163-198.
- Gunnion, A. J. ve Herszberg, I. 2006. Parametric study of scarf joints in composite structures. Composite Structures, 75(1-4), 364-376.
- Haddadi, H. ve Belhabib, S. 2008. Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique. Optics and Lasers in Engineering, 46(2), 185-196.
- Han, J. ve Siegmund, T. 2012. Cohesive zone model characterization of the adhesive hysol EA-9394. Journal of Adhesion Science and Technology, 26(8-9), 1033-1052.
- Haris, A., Tay, T. E. ve Tan, V. B. C. 2017. Experimental analysis of composite bolted joints using digital image correlation. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 11(1), 2443-2455.
- Harper, P. W. ve Hallett, S. R. 2008. Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination. Engineering Fracture Mechanics, 75(16), 4774-4792.
- Hart-Smith, L. J. 1985. Designing to minimize peel stresses in adhesive-bonded joints. In Delamination and Debonding of Materials, 238-266.
- He, D., Sawa, T. ve Karami, A. 2009. Stress analysis and strength evaluation of scarf adhesive joints with dissimilar adherends subjected to static tensile loadings. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 3(8), 1033-1044.
- Hillerborg, A., Modéer, M. ve Petersson, P. E. 1976. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. Cement and Concrete Research, 6(6), 773-781.
- Huo, X., Luo, Q., Li, Q., Zheng, G. ve Sun, G. 2022. On characterization of cohesive zone model (CZM) based upon digital image correlation (DIC) method. International Journal of Mechanical Sciences, 215, 106921.
- Irwin, G. R. 1957. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. Journal of Applied Mechanics, 24, 361-364.
- ISO 11003-2. 1993. Adhesives-determination of shear behaviour of structural bonds-part 2: thick-adherend tensile-test method.
- ISO 527-2. 1993. Plastics-Determination of Tensile Properties, Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics.
- ISO 4587. 1995. Adhesives-Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies.
- Jones, J. S. ve Graves, S. R. 1984. Repair techniques for Celion/LARC-160 graphite/polyimide composite structures. National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Branch, 3794.

- Kadioglu, F., Vaughn, L. F., Guild, F. J. ve Adams, R. D. 2002. Use of the thick adherend shear test for shear stress-strain measurements of stiff and flexible adhesives. *The Journal of Adhesion*, 78(5), 355-381.
- Khoramishad, H., Crocombe, A. D., Katnam, K. B. ve Ashcroft, I. A. 2010. Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. *International Journal of Fatigue*, 32(7), 1146-1158.
- Kinloch, A. J. 1987. Mechanisms of adhesion. *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*, 56-100, Chapman and Hill, London.
- Kosmann, J., Völkerink, O., Schollerer, M. J., Holzhüter, D. ve Hühne, C. 2019. Digital image correlation strain measurement of thick adherend shear test specimen joined with an epoxy film adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 90, 32-37.
- Krieger, R. B. 1975. Stiffness Characteristics of Structural Adhesives for Stress Analysis in Hostile Environment, 7th In Society for the Advancement of Material and Process Engineering, National Technical Conference, Albuquerque, 1975, New Mexico.
- Lava, P., Cooreman, S., Coppieters, S., De Strycker, M. ve Debruyne, D. 2009. Assessment of measuring errors in DIC using deformation fields generated by plastic FEA. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(7-8), 747-753.
- Lecompte, D., Smits, A. S. H. J. D., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D. ve Habraken, A. M. 2006. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 44(11), 1132-1145.
- Lees, D. E. ve Hutchinson, A. R. 1992. Mechanical characteristics of some cold-cured structural adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 12(3), 197-205.
- Leffler, K., Alfredsson, K. S. ve Stigh, U. 2007. Shear behaviour of adhesive layers. *International Journal of Solids and Structures*, 44(2), 530-545.
- Li, J. ve Dasgupta, A., 1993. Failure-mechanism models for creep and creep rupture. *IEEE Transactions on Reliability*, 42(3), 339-353.
- Lima, R. A. A., Perrone, R., Carboni, M. ve Bernasconi, A. 2021. Experimental analysis of mode I crack propagation in adhesively bonded joints by optical backscatter reflectometry and comparison with digital image correlation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 116, 103117.
- Loctite, 1988. *Worldwide Design Handbook*. Loctite European Group, Second Edition 454.
- Lopes, J. P. M., Campilho, R. G. S. G., Rocha, R. J. B. ve Silva, F. J. 2022. Geometrical parameter study of adhesively-bonded T-joints by cohesive models. *Procedia Structural Integrity*, 37, 714-721.

- Lu, H. ve Cary, P. D. 2000. Deformation measurements by digital image correlation: Implementation of a second-order displacement gradient. *Experimental Mechanics*, 40, 393-400.
- Mi, Y., Crisfield, M. A., Davies, G. A. O. ve Hellweg, H. B. 1998. Progressive delamination using interface elements. *Journal of Composite Materials*, 32(14), 1246-1272.
- Morais, A. B., Magalhães, A. G. ve Moura, M. F. S. F. 2009. *Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. *Materiais Compóstios*, 369, Porto, Publindústria.
- Moreira, R. D. F. ve Campilho, R. D. S. G. 2015. Strength improvement of adhesively-bonded scarf repairs in aluminium structures with external reinforcements. *Engineering Structures*, 101, 99-110.
- Neves, L. F., Campilho, R. D., Sánchez-Arce, I. J., Madani, K. ve Prakash, C. 2022. Numerical modelling and validation of mixed-mode fracture tests to adhesive joints using J-integral concepts. *Processes*, 10(12), 2730.
- Noorman, D. C. 2014. Cohesive zone modelling in adhesively bonded joints: analysis on crack propagation in adhesives and adherends. Master's Thesis, Delft University of Technology, 156, Delft.
- Oplinger, D. W. 1994. Effects of adherend deflections in single lap joints. *International Journal of Solids and Structures*, 31(18), 2565-2587.
- Orell, O., Jokinen, J. ve Kanerva, M. 2023. Use of DIC in the characterisation of mode II crack propagation in adhesive fatigue testing. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 122, 103332.
- Özenç, M., 2007. Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 59, Denizli.
- Palanca, M., Brugo, T. M. ve Cristofolini, L. 2015. Use of digital image correlation to investigate the biomechanics of the vertebra. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 15(02), 1540004.
- Pan, B., Xie, H., Guo, Z. ve Hua, T. 2007. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation. *Optical Engineering*, 46(3), 033601.
- Pan, B., Xie, H., Wang, Z., Qian, K. ve Wang, Z. 2008. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Optics Express*, 16(10), 7037-7048.
- Pan, B., Qian, K., Xie, H. ve Asundi, A. 2009. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, 20(6), 062001.
- Paris, A. J. ve Paris, P. C. 1988. Instantaneous evaluation of J and C. *International Journal of Fracture*, 38(1), 19-21.

- Petrie, E. M. 1975. Plastics and adhesives as adhesives, In: Handbook of plastics and elastomers. Happer, C. ve McGraw-Hill (eds), 82, New York.
- Reiner, J., Wood, J. ve Subhani, M. 2022. Mode II fracture of wood: comparison between end-notched flexure and compact shear testing. *Engineering Fracture Mechanics*, 270, 108561.
- Rice, J. 1968. A path integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, 35, 379-386.
- Sadeghi, A., Mahshid, R., Heidari-Rarani, M. ve Lessard, L. 2022. Effect of lamina fiber orientation interfaced with semi-flexible adhesive layer on strength and failure mode of composite single-lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 118, 103232.
- Safaei, S., Akhavan-Safar, A., Jalalvand, M. ve Da Silva, L. F. M. 2023. A new technique to measure shear fracture toughness of adhesives using tensile load. *International Journal of Solids and Structures*, 262, 112091.
- Schreier, H. W. ve Sutton, M. A. 2002. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Experimental Mechanics*, 42, 303-310.
- Schreier, H. W., Garcia, D. ve Sutton, M. A. 2004. Advances in light microscope stereo vision. *Experimental Mechanics*, 44, 278-288.
- Siebert, T., Becker, T., Spilthof, K., Neumann, I. ve Krupka, R. 2007. Error estimations in digital image correlation technique. *Applied Mechanics and Materials*, 7, 265-270.
- Silva, J. E. S. M., Campilho, R. D. S. G., Sánchez-Arce, I. J. ve Moreira, R. D. F. 2023. Effect of adhesive type on the tensile behavior of tubular scarf adhesive joints. *Procedia Structural Integrity*, 47, 70-79.
- Simões, B. D. 2022. Determination of cohesive law of structural adhesives using the direct method. Master's Thesis, Faculdade De Engenharia Universidade Do Porto, 156, Portugal.
- Stigh, U., Alfredsson, K. S. ve Biel, A. 2009. Measurement Of Cohesive Laws And Related Problems, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 13-19 November, Proceedings of Book, Vol 11, 293-298, USA.
- Tsai, M. Y., Morton, J. ve Matthews, F. L. 1995. Experimental and numerical studies of a laminated composite single-lap adhesive joint. *Journal of Composite Materials*, 29(9), 1254-1275.
- Tvergaard, V. ve Hutchinson, J. W. 1992. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 40(6), 1377-1397.
- Volkersen O., 1938. Die nietkraftverteilung in zugbeanspruchten nietverbindungen mit konstanten laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, 15, 41-47.

- Xavier, J., Morais, J., Dourado, N. ve Moura, D. M. 2011. Measurement of mode I and mode II fracture properties of wood-bonded joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(20), 2881-2895.
- Xavier, J., Oliveira, M., Morais, J. J. L. ve De Moura, M. F. S. F. 2014. Determining mode II cohesive law of pinus pinaster by combining the end-notched flexure test with digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 71, 109-115.
- Xu, X. P. ve Needleman, A. 1994. Numerical simulations of fast crack growth in brittle solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 42(9), 1397-1434.
- Zhang, Z., Yang, J. L. ve Friedrich, K. 2004. Creep resistant polymeric nanocomposites. *Polymer*, 45(10), 3481-3485.

