



**YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ MEKANİK  
DAVRANIŞLARININ DİJİTAL GÖRÜNTÜ  
KORELASYON TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ**

**Elanur ÇELEBİ**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Prof. Dr. Murat Demir AYDIN  
2018  
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ MEKANİK DAVRANIŞLARININ**  
**DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYON TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ**

**Elanur ÇELEBİ**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat Demir AYDIN**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Erzurum**

**2018**

**Her hakkı saklıdır**

**T.C.**  
**ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**TEZ ONAY FORMU**

---

**YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ MEKANİK DAVRANIŞLARININ**  
**DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYON TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Murat Demir AYDIN danışmanlığında, Elanur ÇELEBİ tarafından hazırlanan bu çalışma 13/07/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği / Oy çokluğu ile (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

*İmza :*

Üye : Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

*İmza :*

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ÇİÇEK

*İmza :*

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

**Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ**

**Enstitü Müdürü**

Bu tez çalışması Erzurum Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 2017/09 nolu proje ile desteklenmiştir.

## 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..

İmzası

Elanur ÇELEBİ

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ MEKANİK DAVRANIŞLARININ DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYON TEKNİĞİ İLE İNCELENMESİ

Elanur ÇELEBİ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

Yapıştırma bağlantıları sağladığı önemli avantajlardan dolayı geleneksel birleştirme yöntemlerine alternatif olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte yapıştırma bağlantılarını yapısal amaçlara yönelik olarak kullanabilmek, onların mekanik davranışlarının güvenilir ve tekrarlanabilir bir biçimde eldesi ile mümkün olabilmektedir. Sunulan bu çalışmada; yapısal yapıştırıcıların mekanik davranışları Dijital Görüntü Korelasyon tekniğiyle incelenmiştir. Bunun için seçilen yapısal çift bileşenli sıvı yapıştırıcıdan (DP410) bulk ve bağlantı formunda numuneler üretilmiştir. Öncelikle bu bulk (çekme, Iosipescu ve Arcan) ve bağlantı formundaki (TAST) numuneler tek eksenli çeki ve kayma yüklerine maruz bırakılarak DP410'nun mekanik özellikleri iki farklı ölçüm yöntemi ile (DIC ve video ekstensometre) belirlenmiş daha sonra, çeki ve dört noktadan eğme yüklerine maruz tek tesirli bindirme bağlantı numuneleri üzerinde Dijital Görüntü Korelasyon tekniği ve lineer olmayan sonlu eleman yöntemi (SEY) kullanılarak yapıştırma bağlantısının mekanik davranışı araştırılmıştır. Bulk numunelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, DIC tekniğinin yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin tespitinde tekrarlanabilir sonuçlar ürettiği görülmüştür. Diğer taraftan, tek tesirli bindirme bağlantıları üzerinde yapılan sonlu eleman analizleri ve DIC tekniğiyle elde edilen gerinim dağılımları karşılaştırıldığında çok yakın olmamasına rağmen yeterli düzeyde bir uyumun olduğu belirlenmiştir. Çalışmada DIC tekniğiyle iki boyutlu, sonlu eleman yöntemiyle üç boyutlu analizler gerçekleştirildiği dikkate alındığında, DIC tekniğiyle yapılacak üç boyutlu analizlerin daha fazla uyum ve daha doğru sonuçlar üreteceği söylenebilir.

**2018, 114 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Dijital görüntü korelasyonu (DIC), Sonlu elemanlar analizi, Yapıştırıcılar, TAST, Tek tesirli bindirme bağlantıları,

## **ABSTRACT**

MS. Thesis

### **INVESTIGATION of MECHANICAL BEHAVIOUR of ADHESIVELY BONDED JOINTS VIA DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC) TECHNIC**

Elanur ÇELEBİ

Erzurum Technical University  
Graduate School of Natural ve Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

Adhesively bonded joints are widely used as an alternative to traditional bonding methods because of the important advantages of adhesively bonded joints. However, using the bonded joints for structural purposes is possible with reliable and reproducible data of their mechanical behavior. In this study, mechanical behavior of structural adhesives were investigated by Digital Image Correlation technique. So, samples of bulk and joint form were produced from the selected two-part structural adhesive (DP410). First, these bulk (tensile, Iosipescu and Arcan) and joint (TAST) specimens were exposed to uniaxial tension and shear loads and the mechanical properties of the DP410 were determined by two different measurement methods (DIC and video extensometer). Then, the mechanical behaviors of the single lap joints (SLJ) exposed to uniaxial tension and four point bending loads, were investigated using the Digital Image Correlation technique and the nonlinear finite element method (SEY). When the results obtained from bulk specimens were compared, it was found that the DIC technique yielded reproducible results in the determination of the mechanical properties of adhesives. On the other hand, it has been determined that there is a sufficient degree of conformity, even though it is not very close when the strain distributions obtained by DIC technique are compared with the finite element method analyzes for single lap joints. In this study, considering that two dimensional analysis with DIC technique and three dimensional analysis with finite element method is performed, it can be said that three dimensional analysis with DIC technique will yield more compatible and more accurate results.

**2018, 114 pages**

**Keywords:** Digital image correlation (DIC), Finite element method, Adhesives, Thick Adherend Shear Test (TAST), Single lap joints

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarıma bilgi ve tecrübeleriyle ışık tutan ve her türlü desteği sağlayan saygı değer hocam Sayın Prof. Dr. Murat Demir AYDIN'a en samimi duygularımla teőekkürlerimi sunarım.

Öneri ve eleőtirilerinden dolayı tez savuma jürimde bulunan Sayın Prof. Dr. şemsettin TEMİZ ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ÇİÇEK'e teőekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca tüm zorluklarda yanımda bulunan ve maddi, manevi her türlü desteklerini eksik etmeyen değerli aileme ve bu çalışmanın her aşamasında desteğini eksik etmeyen niőanlım İbrahim KAVDIR 'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

**Elanur ÇELEBİ**

**Temmuz, 2018**

# İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Yapışma .....	2
1.1.1. Adhezyon .....	2
1.1.2. Kohezyon .....	4
1.2. Yapıştırıcılar.....	4
1.2.1. Yapıştırıcı çeşitleri .....	6
1.3. Yapıştırma Bağlantıları .....	8
1.3.1. Yapıştırma bağlantılarında karşılaşılan gerilme halleri .....	10
1.3.2. Yapıştırma bağlantılarında gerilme analizi .....	11
1.3.3. Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar tipleri.....	13
1.4. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması .....	14
1.5. Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	17
1.5.1. Bulk numuneler üzerinden mekanik özelliklerin belirlenmesi .....	18
1.5.2. Bağlantı numuneleri üzerinden mekanik özelliklerin belirlenmesi .....	24
1.5.3. DIC metodu için gerekli yüzey hazırlığı.....	29
1.5.4. Korelasyon metodu için deformasyon teorisi .....	32
1.5.5. DIC metodunun yapıştırma bağlantılarının analizine uygulanması:.....	40
1.5.6. DIC yöntemindeki hata kaynakları: .....	40
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>	<b>44</b>
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>68</b>
3.1. Giriş.....	68
3.2. Kullanılan Yapıştırıcılar.....	68
3.3. Yapıştırılan Malzemeler.....	68
3.4. Bulk Numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi .....	69



3.4.1. Bulk numunelerin hazırlanması .....	69
3.4.2. Bulk numune yüzeylerinin Dijital Görüntü Korelasyonu yöntemi için hazırlanması .....	72
3.4.3. Tek eksenli çekme yüküne maruz bulk numunelerden mekanik özelliklerin belirlenmesi .....	73
3.4.4. Kesme yüküne maruz bulk numunelerden mekanik özelliklerin belirlenmesi .....	74
3.5. Bağlantı Formundaki Numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	75
3.5.1. Bağlantı formundaki (TAST) numunelerin hazırlanması .....	75
3.5.2. TAST numune yüzeylerinin Dijital Görüntü Korelasyonu yöntemi için hazırlanması .....	77
3.5.3. Kalın yapıştırılan malzemeler üzerinde kayma testinin (TAST) işlem basamakları .....	78
3.6. Tek Tesirli Bindirme Bağlantısında Hasar Yükünün Belirlenmesi .....	82
3.6.1. Tek Tesirli Bindirme Bağlantı (SLJ) numunelerinin hazırlanması .....	82
3.7. Sonlu Elemanlar Analizi .....	84
3.7.1. Elasto-plastik sonlu eleman analizleri .....	84
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>87</b>
4.1. Standart Bulk Çekme Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar .....	87
4.2. Iosipescu Bulk Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar .....	90
4.3. Arcan Bulk Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar .....	92
4.4. Kalın Yapıştırılan Malzemeler Kullanılarak Oluşturulmuş Bağlantı Numunelerinden (TAST) Elde Edilen Sonuçlar .....	94
4.5. Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarından Elde Edilen Sonuçlar .....	97
5.5.1. Çekme deneyi sonuçları .....	97
4.5.2. Dört noktadan eğme deney sonuçları .....	103
<b>5.SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>106</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>109</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>114</b>

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
°C	Santigrat derece
C	Çapraz korelasyon katsayısı
$d_a$	TAST yönteminde kontak ekstansometreden alınan deplasman değeri
$d_{adhesive}$	TAST yönteminde yapıştırıcıya ait deplasman değeri
$d_{adherend}$	TAST yönteminde yapıştırılan malzemeye ait deplasman değeri
E	Elastisite modülü
F	Yer değiştirmeye karşılık gelen yük
G	Kayma modülü
J	Polar atalet momenti
$J_2$	Deviyatorik gerilme tensörünün ikinci invaryantı
L	Bindirme uzunluğu
$l$	Ölçüm uzunluğu
P	Iosipescu yönteminde uygulanan yük
$r$	Yarıçap
q	Von-Mises eşdeğer gerilmesi
t	Yapıştırıcı tabaka kalınlığı
u	Deplasman vektörü
$(u_{k+1} - u_k)$	DIC analizinde Aranan korelasyon değeri
w	Numune genişliği
$\epsilon_{xy}$	Kayma birim şekil değişimi
$\epsilon_i$	Normal birim şekil değişimi (i=x,y)
$\gamma$	Kayma Şekil değişimi
$\nu$	Poisson oranı
$\sigma_{eş}$	Eşdeğer gerilme
$\sigma_i$	Asal gerilmeler (i=1,2,3)
$\sigma_i$	Normal gerilmeler (i=x,y)
$\sigma_t$	Çekmede akma gerilmesi
$\tau_{xy}$	Kayma gerilmesi

$\nabla\nabla C(u_k)$	Hessian Matrisi
$\nabla C(u_k)$	Jacobian Matrisi

### **Kısaltmalar**

2D	İki Boyutlu Çözüm
3D	Üç Boyutlu Çözüm
A.H.	Adhezyon Hasarı
DIC	Dijital Görüntü Korelasyonu
K.H.	Kohesiv Hasar
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SLJ	Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı
TAST	Kalın Yapıştırılan Malzeme Testi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler.....	2
Şekil 1.2. Difüzyonun aşamaları.....	3
Şekil 1.3. Yaygın olarak kullanılan bağlantı şekilleri: (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.....	9
Şekil 1.4. En yaygın yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları: (a) çekme yükü, (b) kesme yükü, (c) soyulma yükü, (d) yarıлма yükü.....	10
Şekil 1.5. Teorik model konfigürasyonları. ....	12
Şekil 1.6. EN ISO 527-2'ye göre çekme numuneleri (boyutlar mm cinsinden): (a) uzun numune, (b) kısa numune. ....	20
Şekil 1.7. Yapıştırıcıların akma noktasının belirlenmesi.....	21
Şekil 1.8. a) Iosipescu test numunesi, b) Arcan test numunesi.....	22
Şekil 1.9. a-) TAST yönteminde deney kullanılan numuneleri; b-) TAST yönteminde kullanılan extensometre.....	25
Şekil 1.10. TAST yöntemindeki deplasmanlar.....	25
Şekil 1.11. DIC tekniğinin kurulum şeması.....	27
Şekil 1.12. DIC yönteminde işlem aşamaları .....	28
Şekil 1.13. Deformasyon öncesi ve sonrasına ait görüntülerde aranan noktaların gösterimi.....	29
Şekil 1.14. Numune yüzeyinde oluşturulan hatalı desenler.....	30
Şekil 1.15. Uygun patern yoğunluğu ve boyutuna sahip yüzey yapıları. ....	31
Şekil 1.16. Deforme olmuş ve olmamış görüntülerin gri seviye gösterimi. ....	32
Şekil 1.17. Alt bölge deformasyonunun gösterimi. ....	33
Şekil 1.18. Sayısallaştırılmış değerlerin gösterimi. ....	33
Şekil 1.19. Yoğunluk değişimi(10×10 piksel). ....	34
Şekil 1.20. En yakın interpolasyon (zero order). ....	34
Şekil 1.21. Deformasyon öncesi ve sonrasına ait PQ hattının gösterimi.....	38
Şekil 1.22. Statik çekme testi esnasında oluşan düzlem dışı deplasman. ....	41
Şekil 1.23. Lens distorsiyonunun gösterimi.....	42
Şekil 2.1. Tek bindirme bağlantısında oluşan yükleme hattı eksantrikliğinin gösterim. ....	44

<b>Şekil 2.2.</b> Kayma gerilmesi – kayma şekil değişim eğrileri; (a) DP8005, (b) Araldite 2015, (c) Araldite AV138/HV998.....	48
<b>Şekil 2.3.</b> TAST deneyi ile elde edilen kayma gerilmesi(MPa) - kayma birim şekil değişimi (%) diyagramı.....	49
<b>Şekil 2.4.</b> (1) Sikaflex 552 ile oluşturulan SLJ bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki yük-deplasman eğrisi, (2) bu sıcaklıklara ait kırılma yüzey modları (a; -40, b; oda sıcaklığı, c; 80°C).....	50
<b>Şekil 2.5.</b> (1) AS1805 RTV ile oluşturulan SLJ bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki yük-deplasman eğrisi, (2) bu sıcaklıklara ait kırılma yüzey modları(a; 100, b; 200, c; 300°C).....	50
<b>Şekil 2.6.</b> Goland and Reissner (1944) ve deneysel analizin bindirme bölgesi boyunca oluşan kayma gerilmesi açısından karşılaştırılması. ....	51
<b>Şekil 2.7.</b> Bindirme bölgesi boyunca oluşan kayma gerilmesi dağılımının teorik çözümler ve nümerik analiz ile karşılaştırılması.....	51
<b>Şekil 2.8.</b> Modifiye edilmiş TAST örneği. ....	52
<b>Şekil 2.9.</b> Deneysel çalışma sonucu elde edilen farklı yapıştırıcı kalınlıklarındaki yük ve normalleştirilmiş yer değiştirme eğrisi.....	53
<b>Şekil 2.10.</b> Deneysel yük – deplasman eğrisi. ....	54
<b>Şekil 2.11.</b> DIC’den elde edilen gerinim dağılımı. ....	54
<b>Şekil 2.12.</b> DIC tekniğinden elde edilen farklı kesitlerdeki eksenel gerinimler. ....	55
<b>Şekil 2.13.</b> Karma bağlantıdaki deneysel ve nümerik yük-deplasman eğrileri.....	55
<b>Şekil 2.14.</b> Çatlak başlangıcı ve gelişimine ait görüntüler.....	56
<b>Şekil 2.15.</b> Yumuşak çeliğe ait DIC ve ekstansometreden elde edilen gerilme-gerinim ilişkisi. ....	58
<b>Şekil 2.16.</b> Polipropilene ait DIC ve ekstansometreden elde edilen gerilme-gerinim ilişkisi. ....	58
<b>Şekil 2.17.</b> Farklı yük oranlarında oluşan deplasman alanları, çapraz kafa deplasmanı displacement d; (a) d=0,29-0,35 mm, $\Delta P = 80,7$ N, (b) d=0,39-0,46 mm, $\Delta P = 87,5$ N; (c) d = 0,5-0,6 mm, $\Delta P = 98,7$ N, (d) d= 0,9-1,0 mm, $\Delta P = 42,3$ N, (e) d=1,7-1,77 mm $\Delta P = 14,3$ N.....	59
<b>Şekil 2.18.</b> Farklı yük oranlarında oluşan gerinim alanları, çapraz kafa deplasmanı displacement d; (a) d=0,29-0,35 mm, $\Delta P = 80,7$ N, (b) d=0,39-0,46 mm, $\Delta P = 87,5$ N, (c) d=0.5-0.6 mm, $\Delta P = 98,7$ N.....	60
<b>Şekil 2.19.</b> DIC ölçümü için alınan noktalar ve alanın gösterimi.....	62

<b>Şekil 2.20.</b> KGR-1 ve iki farklı DIC prosedüründen elde edilen kayma gerilmesi-kayma birim şekil değiştirme diyagramı.....	63
<b>Şekil 2.21.</b> Tek tesirli bindirme bağlantısı ve DIC için numune yüzeyindeki desen yapısı. ....	64
<b>Şekil 2.22.</b> Bindirme bölgesindeki; a) yatay, b) dikey deplasman alanı.....	64
<b>Şekil 2.23.</b> Yapıştırıcının bindirme bölgesindeki; a) kayma, b) normal şekil değişimleri. ....	64
<b>Şekil 2.24.</b> Karma bağlantıdaki yapıştırıcı oranları. ....	66
<b>Şekil 2.25.</b> DIC‘den elde edilen yapıştırılan malzemelere ait gerinim (strain) dağılımları ....	66
<b>Şekil 3.1.</b> a) Standart çekme numunesi (ISO 527-2), b) Iosipescu test numunesi, c) Arcan test numunesi. ....	70
<b>Şekil 3.2.</b> Bulk numunelerin üretiminde kullanılan kalıplar; a) çekme numunesi (ISO 527-2), b) Iosipescu test numunesi (ASTM D5379), c) Arcan test numunesi. ....	71
<b>Şekil 3.3.</b> Bulk numunelerin üretim prosesi. ....	72
<b>Şekil 3.4.</b> Numune yüzeylerinde oluşturulan noktasal yapılar; a) çekme numunesi, b) Iosipescu, c) Arcan. ....	72
<b>Şekil 3.5.</b> INSTRON çekme cihazı ve AV 2 video extensometre. ....	73
<b>Şekil 3.6.</b> INSTRON çekme cihazı ve AV 2 video extensometre, a) Iosipescu test düzeneği, b) Arcan test düzeneği. ....	74
<b>Şekil 3.7.</b> a) ASTM D5656 ve ISO 11003–2 kullanılarak modifiye edilmiş numune boyutları, b) kontak ekstensometre. ....	75
<b>Şekil 3.8.</b> a) Yüzey hazırlama işlemi sonrası TAST numune parçaları, b) Kalıp.....	76
<b>Şekil 3.9.</b> a) Hidrolik pres, b) Kürleşme sonrası TAST numuneleri.....	77
<b>Şekil 3.10.</b> TAST numune yüzeylerinde oluşturulan desenler. ....	78
<b>Şekil 3.11.</b> a) TAST deney numunesi üzerine tasarlanmış aparat yardımıyla ekstensometrenin bağlanması b) Yüzeyinde desen oluşturulmuş TAST numunesi. ....	79
<b>Şekil 3.12.</b> TAST numunesi üzerindeki A, B, C, D, E ve F noktalarının gösterimi.....	80
<b>Şekil 3.13.</b> DIC tekniğinde analiz için kullanılan hat. ....	81
<b>Şekil 3.14.</b> DIC yönteminde kayma şekil değişimini belirlemede kullanılan çizgisel hat. ....	81
<b>Şekil 3.15.</b> Tek tesirli bindirme bağlantısının geometrisi. ....	82

<b>Şekil 3.16.</b> (a) SLJ numunelerinin hazırlanmasında kullanılan kalıp, (b) Kalıptan çıkarılarak deneyler için hazır hale getirilmiş numuneler. ....	83
<b>Şekil 3.17.</b> Çekme ve dört nokta eğme deneyindeki yük ve sınır şartları.....	84
<b>Şekil 3.18.</b> SLJ modellerinde oluşturulan ağ yapısı.....	85
<b>Şekil 3.19.</b> Tek eksenli çekme durumunda SLJ modelindeki yük ve sınır şartları.....	85
<b>Şekil 3.20.</b> Dört nokta eğme durumunda SLJ modelindeki yük ve sınır şartları. ....	86
<b>Şekil 4.1.</b> Vakum uygulanmadan üretilen numunelerde oluşan şekil değiştirme dağılımları; (a) Eksenel doğrultudaki şekil değiştirmeler dağılımları $-\varepsilon_x$ , (b) Yanal doğrultudaki şekil değiştirme dağılımları- $\varepsilon_y$ ; (c) Hasar yüzeylerindeki kusur (hava boşluğu). ....	87
<b>Şekil 4.2.</b> Vakum uygulanarak üretilen numunelerde oluşan şekil değiştirme dağılımları; (a) Eksenel doğrultudaki şekil değiştirmeler dağılımları $-\varepsilon_x$ , (b) Yanal doğrultudaki şekil değiştirme dağılımları- $\varepsilon_y$ ; (c) Hasar yüzeylerindeki kusur (hava boşluğu). ....	89
<b>Şekil 4.3.</b> Iosipescu numunelerine ait kayma şekil değişimlerinin belirlenmesinde kullanılan sanal ekstansometreler.....	90
<b>Şekil 4.4.</b> Iosipescu numunelerinden DIC tekniği ile elde edilen kayma gerilmesi-kayma şekil değişimi eğrileri. ....	91
<b>Şekil 4.5.</b> Iosipescu numunelerinde aynı yükleme anında kayma şekil değişimi dağılımları; (a) Iosipescu-1 numunesi, (b) Iosipescu-2 numunesi. ....	91
<b>Şekil 4.6.</b> Arcan numunelerine ait kayma şekil değişimlerinin belirlenmesinde kullanılan sanal ekstansometreler.....	92
<b>Şekil 4.7</b> Arcan numunelerinden DIC tekniği ile elde edilen kayma gerilmesi- şekil değişimi eğrileri.....	93
<b>Şekil 4.8.</b> Arcan numunelerinde aynı yükleme anında kayma şekil değişimi dağılımları; (a) Arcan-1 numunesi, (b) Arcan -2 numunesi. ....	93
<b>Şekil 4.9.</b> TAST DP410 numuneleri için; (a) Kuvvet-yer değiştirme eğrileri, (b) Hasar yüzeyleri. ....	94
<b>Şekil 4.10.</b> DP410 için kalın yapıştırılan malzemelerden üretilmiş numunelerden elde edilmiş kayma gerilmesi-kayma şekil değişimi eğrileri; a) Ekstansometre kullanılarak elde edilen eğriler, b) Dijital görüntü korelasyon tekniğinden elde edilen eğriler, c) Dijital görüntü korelasyon tekniği ve ekstansometreden elde edilen eğrilerin karşılaştırılması.....	95

<b>Şekil 4.11.</b> Yapıştırıcı tabakasındaki <i>A-B hattı</i> boyunca DIC ile elde edilen <i>y</i> eksenini doğrultusundaki normal şekil değiştirme ( $\epsilon_{xx}$ ) dağılımları. ....	96
<b>Şekil 4.12.</b> Yapıştırıcı tabakasındaki <i>A-B hattı</i> boyunca DIC ile elde edilen <i>y</i> eksenini doğrultusundaki normal şekil değiştirme ( $\epsilon_{yy}$ ) dağılımları.....	96
<b>Şekil 4.13.</b> SLJ çekme numunelerinde yer değiştirmeyi DIC yöntemi ile hesaplamak amacıyla kullanılan noktanın gösterimi. ....	97
<b>Şekil 4.14.</b> DP410 yapıştırıcısı ile oluşturulan SLJ numunelerinde; (a) Kuvvet-yer değiştirme eğrileri, (b) Hasar yüzeyleri.....	98
<b>Şekil 4.15</b> SLJ-3 numunesine ait kuvvet-yer değiştirme eğrisi üzerinde farklı zaman dilimlerindeki DIC analizinde kullanılan A, B, C ve D noktaları.....	98
<b>Şekil 4.16.</b> SLJ-3 numunesinde <i>x</i> eksenini doğrultusunda oluşan şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_x$ ); <b>a</b> ) 0 ms (A noktası), <b>b</b> ) 20361.2 ms (B noktası), <b>c</b> ) 54547.9 ms (C noktası), <b>d</b> ) 71493.9 ms (D noktası), <b>e</b> ) Yapıştırıcı tabakası içindeki 1-2 hattı boyunca oluşan <i>x</i> yönündeki şekil değiştirme dağılımlarının zamana göre değişimi.....	99
<b>Şekil 4.17.</b> SLJ-3 numunesinde <i>y</i> eksenini doğrultusunda oluşan şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_y$ ); <b>a</b> ) 0 ms (A noktası), <b>b</b> ) 20361.2 ms (B noktası), <b>c</b> ) 54547.9 ms (C noktası), <b>d</b> ) 71493.9 ms (D noktası), <b>e</b> ) Yapıştırıcı tabakası içindeki 1-2 hattı boyunca oluşan <i>y</i> yönündeki şekil değiştirme dağılımlarının zamana göre değişimi.....	100
<b>Şekil 4.18.</b> SLJ-3 numunesinde <i>y</i> eksenini doğrultusunda oluşan şekil değiştirme dağılımları ( $\gamma_{xy}$ ); <b>a</b> ) 0 ms (A noktası), <b>b</b> ) 20361.2 ms (B noktası), <b>c</b> ) 54547.9 ms (C noktası), <b>d</b> ) 71493.9 ms (D noktası). ....	101
<b>Şekil 4.19.</b> Yapıştırıcı tabakasının orta hattında (1-2 hattı) bindirme uzunluğu boyunca DIC ve sonlu elamanlar yöntemiyle elde edilen şekil değiştirme dağılımlarının karşılaştırılması; (a) <i>x</i> yönündeki şekil değişim dağılımları ( $\epsilon_x$ ), (b) <i>y</i> yönündeki şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_y$ ), (c) kayma şekil değişim dağılımları ( $\gamma_{xy}$ ).....	102
<b>Şekil 4.20.</b> DP410 yapıştırıcısı ile oluşturulan SLJ numunelerinde; (a) Kuvvet-yer değiştirme eğrileri, (b) Hasar yüzeyleri.....	103
<b>Şekil 4.21.</b> Eğilmeye zorlanan numunedeki yapıştırıcı ( <i>DP410</i> ) tabakasının orta hattı boyunca ( <i>1-2 hattı</i> ) oluşan normal şekil değişimi dağılımları; (a) <i>x</i>	



yönündeki şekil değişim dağılımı ( $\epsilon_x$ ), (b) y yönündeki şekil değişim dağılımı ( $\epsilon_y$ ), (c) kayma şekil değişim dağılımı ( $\gamma_{xy}$ ). ..... 104

**Şekil 4.22.** Yapıştırıcı tabakasının orta hattında (1-2 hattı) bindirme uzunluğu boyunca DIC ve sonlu elamanlar yöntemiyle elde edilen şekil değiştirme dağılımlarının karşılaştırılması; (a) x yönündeki şekil değişim dağılımları ( $\epsilon_x$ ), (b) y yönündeki şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_y$ ), (c) kayma şekil değişim dağılımları ( $\gamma_{xy}$ ). ..... 105



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 1.1.</b> Temel hasar tipleri (ISO 10365).....	14
<b>Çizelge 3.1.</b> AA2024-T3 alüminyum alaşım ve AISI 1040 çeliğinin mekanik özellikleri. .....	69
<b>Çizelge 4.1.</b> Kalıp içerisine vakum uygulanmadan enjeksiyonla üretilen standart DP410 bulk çekme numunesinden elde edilen deneysel sonuçlar. ....	87
<b>Çizelge 4.2.</b> Kalıp içerisine vakum uygulanarak enjeksiyonla üretilen standart DP410 bulk çekme numunesinden elde edilen deneysel sonuçlar. ....	89
<b>Çizelge 4.3.</b> TAST numunelerinin deneysel sonuçları. ....	94



### 1. GİRİŞ

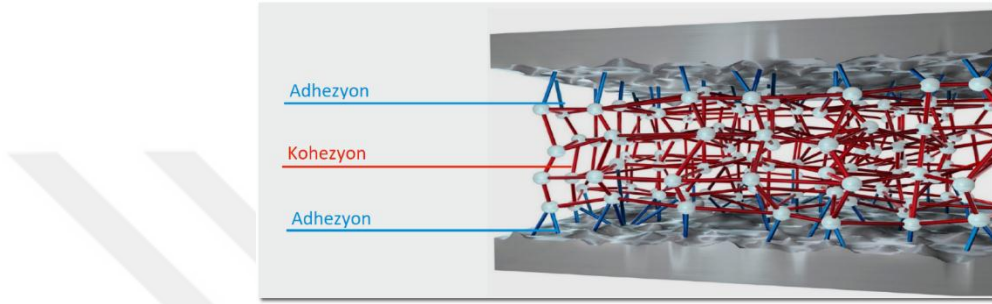
Eski çağlardan günümüze kadar, malzemelerin kullanım amaçlarına uygun gerekliliğin sağlanması açısından malzemeleri birbirine eklemek ve kullanım ömürleri süresince bir arada tutmak amacıyla birçok malzeme ve teknik kullanılmıştır. Kaynak, lehim, perçin, cıvata gibi uzun yıllar kullanılan geleneksel birleştirme yöntemlerinin dışında bu yöntemlerin kullanımlarında oluşabilecek dezavantajları giderebilen daha basit birleştirme teknikleri ve malzemeler bulunmaktadır. Yapıştırıcılar ve yapıştırma tekniği bu malzeme ve tekniklere örnektir.

Yapıştırıcı, malzemeleri yüzey teması ile bir arada tutabilen malzeme olarak tanımlanmıştır (ASTM D907-74 1974). Son yıllardaki teknolojik gelişmeler vasıtasıyla, yapıştırıcıların fiziksel ve mekanik özelliklerindeki iyileşmelerden dolayı geleneksel birleştirme yöntemlerine alternatif olan yapıştırma ile birleştirme tekniği birçok mühendislik alanında başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

Yapıştırma bağlantılarının güvenilir bir şekilde kullanımını sağlamak amacıyla yapıştırıcıların mekanik özelliklerini tespit etmede birçok analitik, deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Sunulan bu çalışmada; yapısal yapıştırıcıların mekanik davranışları Dijital Görüntü Korelasyon tekniğiyle incelenmiştir. Bunun için bulk ve bağlantı formunda numuneler üretilerek deneysel çalışmalar ve sayısal analizler yapılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Dijital Görüntü Korelasyon (DIC) tekniğiyle elde edilen şekil değişim dağılımlarının sayısal çalışmalar ile elde edilen değerlere çok yakın olmamasına rağmen yeterli derecede bir uyumun olduğu ve DIC yönteminin yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarının belirlenmesinde kullanılabileceği belirlenmiştir.

### 1.1. Yapışma

Yapıştırıcı, malzemeleri bir arada tutan madde ve yapışma ise iki yüzeyin moleküller, iyonlar ve atomlar arası etkileşiminden dolayı oluşan çekim kuvvetleriyle bir arada tutturulması olarak tanımlanır ve yapışma, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme yüzeyi arasında gerçekleşen bir olaydır (Kinloch 1987). Yapışma olayı adhezyon ve kohezyon olarak isimlendirilen iki temel mekanizmaya dayanmaktadır.



Şekil 1.1. Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler (Loctite 1988).

#### 1.1.1. Adhezyon

Adhezyon, en temel anlamda iki malzeme arasındaki çekim kuvveti olarak tanımlanmaktadır (Pizzi 1994). Adhezyon olayı; farklı iki yüzeyin temas etmesiyle oluşan ara yüzey kuvvetleri vasıtasıyla yüzeylerin bir arada tutulması durumunu içermektedir. Bu ara yüzey kuvvetleri, valans kuvvetlerinden oluşmaktadır (Carpenter 1999).

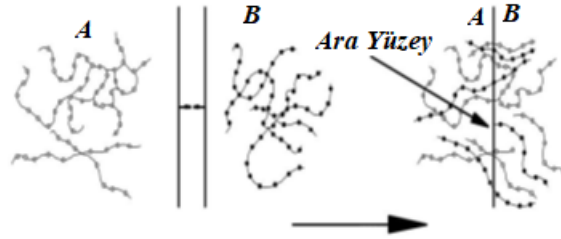
Yapısal açıdan bağlantı dayanımı, yapıştırıcının yüzey pürüzlerine iyi girip giremediğine yani, yapışan yüzeylerin yüzey enerjileri ve yapıştırıcının viskozitesi tarafından belirlenen ıslatma kabiliyetine bağlı olarak değişmektedir. Katı yüzeyin yeterli seviyede ıslatılabilmesi için yapıştırıcının yüzey enerjisinin yapıştırılan malzemenin yüzey enerjisinden küçük olması gerekmekte ve aradaki bu farkın artmasıyla yapışma işlemi daha kolay gerçekleşmektedir (Loctite 1997). Yapışma olayı için bu güne kadar birçok teori ortaya atılmıştır. Bunlarda önemli olanları, Mekanik Tutunma, Adsorpsiyon, Difüzyon ve Elektrostatik teorileridir (Houwink and Salomon 1965; Wake 1986).

## 1. GİRİŞ

*Mekanik Tutunma Teorisi;* Yapıştırıcı moleküllerinin yüzeyinde girinti ve çıkıntıların mevcut bulunduğu katı yüzeylerdeki düzensizliklerden içeri girerek katılaşması ile sağlanan mekanik bağı ifade etmektedir. Mekanik tutunma teorisine göre tam bir yapışmanın sağlanabilmesi için yapıştırıcının yüzeydeki tüm çukurların içine girip yayılması, yüzeydeki sıkışmış havayı tahliye etmesi ve yapışan yüzeyleri mekanik olarak kilitlemesi gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, teması sağlayan yüzey alanını arttırdığından dolayı bu teoride mekanik tutunmanın sağlanabilmesi açısından önemli bir etkiye sahiptir (Petrie 2000).

*Adsorpsiyon Teorisi;* İki yüzeyin angström düzeyindeki teması ile aralarında moleküller arası kuvvetlerin oluşumunu ifade etmektedir (Green et al. 1999). Adhezyon, Van der Waals kuvvetleri vasıtasıyla oluşan moleküller arası çekim kuvvetleri ile meydana gelmektedir. Yapıştırıcının yüzeyi ıslatması ve katılaşması esnasında oluşan bu çekim, kuvvetli bağların oluşumunu sağlamaktadır. Ancak Van der Waals kuvvetlerinin oluşabilmesi için yapıştırıcı ile yapışan yüzey arasında  $5^\circ$  A'dan kısa mesafe olması gerektiği belirtilmektedir (Petrie 2000).

*Difüzyon Teorisi;* Adhezyonun, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler arasındaki moleküllerin difüzyonu ile gerçekleştiği ifade edilmektedir (Voyutskii 1963). Şekil 1.2'de difüzyon olayının aşamaları gösterilmiştir (Fourche 1995). Oluşan difüzyonun derecesi, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasındaki moleküller uygunluğa ve yapıştırılan malzemenin hacmine bağlı olarak değişmektedir. (Carpenter 1999).



**Şekil 1.2.** Difüzyonun aşamaları (Fourche 1995).

*Elektrostatik Teorisi;* Elektronik bant yapıları benzer olmayan iki malzemenin birbiri ile temas etmesi durumunda, ara yüzeyde adhezyonu sağlayan iki katlı bir

## 1. GİRİŞ

---

elektrostatik yük oluşacağını ifade etmektedir. Bu yüklerin toplam adhezyona katkısının %10'dan daha az veya ihmal edilebilir bir düzeyde olduğu bulunmuştur.

### 1.1.2. Kohezyon

Yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir. Bu durum, yapıştırıcıyı meydana getiren kütle bileşenlerinin, yapıştırıcının polimerizasyonu esnasında meydana gelen kimyasal (bağ kuvvetleri) ve fiziksel (Van der Waals kuvvetleri) kuvvetler tarafından bir arada tutulması olayıdır.

*Van der Waals Bağı:* Küçük ya da büyük bir molekül için düşünüldüğünde, molekülün farklı yüklerine tesadüf eden pozitif ve negatif kutuplar bulunabilir. Böylece her molekülden ibaret küçük mıknatıslar ortaya çıkar. Burada aynen mıknatıslarda olduğu gibi, çeşitli dipoller elektromanyetik kuvvetlerle birbirlerine kenetlenmektedir. Bu arada oluşan bağlar Van der Waals bağı olarak adlandırılmaktadır. Oluşan bu Van der Waals bağları diğer bağlar kadar kuvvetli değildir.

*Kovalent Bağ:* Atomlar arasında elektron köprüleri kurularak kenetlenmeleri durumunda oluşur. Buradaki kuvvetler, ortak kullanılan elektronların kendi eksenleri etrafında birbirlerine zıt yönde dönmesinden dolayı ortaya çıkan elektromanyetik kuvvetlerdir. Zıt yönde dönen elektronların oluşturduğu elektromanyetik alanlar, birbirlerini bir mıknatısın artı ve eksi kutupları gibi çekerler.

### 1.2. Yapıştırıcılar

Yapıştırıcılar, uzun zincir şeklinde dallanmış yapısıyla üzerine uygulanan malzemelerin molekülleri arasına girerek bu iki malzemeyi bir arada tutan bağları oluşturan polimerik malzemelerdir. Yapıştırıcı amacıyla kullanılan ilk malzemelerin tarihi milattan öncelere dayanmaktadır. Arkeologların yaptıkları çalışmalarda, kırılan çömleklerin ağaç öz suyundan elde edilen reçine ile birleştirildiği belirtilmiştir. Bu yıllarda buna benzer birçok yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiş ve M.Ö 1700'lü yıllarda yapıştırıcı tarihinde önemli değişiklikler olmuştur.

## 1. GİRİŞ

---

Yapıştırıcı ile birleştirmenin etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için yapıştırılan yüzeylerin düzgünlüğü, yapıştırılan yüzey ve yapıştırıcının yapısı, yapıştırıcının kürleşmesi ve yapışmanın oluşmasını sağlayan kimyasal reaksiyonlar gibi durumlara dikkat edilmelidir.

Uygun yeterliliğe sahip yapıştırma bağlantılarının elde edilebilmesinde kullanılan yapıştırıcıların özellikleri büyük bir önem arz etmektedir. Sağlam bağlantıların oluşturulması için aşağıda belirtilen özelliklerin yapıştırıcılarda mevcut olması gerekmektedir.

- Yapıştırma işleminde iyi bir dayanımın elde edilebilmesi için yapıştırıcının yapışan yüzey üzerinde homojen bir şekilde dağılması ve yüzeyi ıslatması gerekmektedir. Bu gerekliliğin sağlanması açısından yapıştırıcı doğru viskozitede olmalıdır.
- Yapıştırıcının yüzeye tam yayılmasını sağlayacak yüzey gerilimine sahip olması gerekmektedir.
- Yapıştırıcı yapışan yüzey ile kimyasal reaksiyona girmemelidir.

Başarılı yapıştırma işlemlerinin gerçekleştirilmesinde yapıştırıcının uygun şartları sağlamasının yanı sıra yapıştırılan yüzeylerinde temiz olması, birleşmenin sağlanabilmesi için yeterli pürüzlülükte olması ve yüzeyde su ve nem bulunmaması gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir.

Yapıştırıcılar, birleştirme öncesinde sıvı, macun, film gibi çeşitli şekillerde bulunabilirler. Yapıştırıcıların sınıflandırılması çeşitli şartlara göre yapılabilmektedir. Örneğin kullanım yerlerine göre yapıştırıcılar; yapısal, tabakalı ve basınca duyarlı yapıştırıcılar olmak üzere üçe ayrılmaktadır (Apalak vd 2003).

*Yapısal yapıştırıcılar:* Tasarım sınırları içerisinde yapının sürekliliğini kaybetmeden yük taşıyabilen yapıştırıcılardır. Yapıştırma alanı tüm yüzey alanının küçük bir kısmını oluşturan bu tür yapıştırıcılar, yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptir. Sahip oldukları yük taşıma kapasitelerinden dolayı otomotiv endüstrisi, uzay sanayi gibi önemli alanlarda kullanılmaktadır. Siyanoakrilatlar, akrilikler, anaerobikler,

## 1. GİRİŞ

---

poliüretanlar, epoksiler gibi yapıştırıcılar, en yaygın kullanılan yapısal yapıştırıcılar gurubuna girmektedir.

*Tabakalı yapıştırıcılar:* Yapışma bölgesi toplam yüzey alanının büyük bir kısmını kaplayan bu yapıştırıcı türlerinin taşıdıkları yükler düşüktür ve genellikle etiketleme, paketleme gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

*Basınca duyarlı yapıştırıcılar:* Geçici olarak birleşmeyi sağlayan ve düşük yük taşıma kapasitesine sahip olan yapıştırıcılardır.

Mühendislik uygulamalarında, yapısal yapıştırıcılar geniş bir uygulama alanına sahip olduğundan dolayı aşağıdaki bölümde yaygın olarak kullanılan bazı yapısal yapıştırıcılar hakkında bilgiler mevcuttur.

### 1.2.1. Yapıştırıcı çeşitleri

*Poliüretanlar:* Düşük sıcaklıklarda bile esnek özelliklere sahip olan iki bileşenli yapıştırıcılardır. Oda sıcaklığında veya ısıtılarak kürleşirler ve kürleşme esnasında oluşabilecek artık gerilmeler çok azdır. Su ve neme karşı dayanımları iyi olan bu yapıştırıcıların aynı zamanda toksik etkilere sahip olmasından dolayı elle temas halinde zararlı olabilmektedir.

*Epoksiler:* Epoksi reçine ve sertleştiriciden oluşan iki bileşenli bu yapıştırıcılar; yüksek rijitlik, sürtünme direnci, yüksek çekme ve kayma dayanımı gibi mekanik özelliklere sahip olduklarından dolayı mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanılan yapıştırıcılardır. Epoksi yapıştırıcının kürleşme süresi sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Kürleşen yapıştırıcının çevresel etkiler altında uzun süre kalması durumunda mukavemet değerinde azalma görülmektedir.

*Akrilikler:* İki bileşenli bu yapıştırıcılarda yapıştırılacak yüzeylerden birine reçine, diğerine sertleştirici sürülerek yapıştırma işlemi gerçekleştirilir. Neme karşı iyi bir dayanıma sahip olan bu yapıştırıcılar aynı zamanda iyi soyulma mukavemet değerine de sahiptir. Belirli sıcaklık aralığında (-110°C / 120°C) elastik özelliklerini



## 1. GİRİŞ

---

koruyabilmelerine rağmen yanıcı özelliğe sahip olup yüksek sıcaklıklarda bozunmaya uğrarlar.

*Anaerobikler:* Akrilik polyester reçine esaslı ve havada sıvı halde bulunan bu yapıştırıcılarda oksijenden uzaklaştırıldığında küreleşme gerçekleşmektedir. Yapıştırma işleminden hemen sonra hava girişi engellenecek şekilde bir tasarım oluşturulmalıdır. Bu yapıştırıcı türünün uygulandığı yüzeyler için önemli yüzey hazırlığı gerekmez ve anaerobik yapıştırıcı ile oluşturulmuş bağlantıların dayanımı düşük olduğundan dolayı genellikle sızdırmazlık amacıyla kullanılırlar.

*Siyanoakrilatlar:* Yapıştırılacak yüzeyler ve havada bulunan nemin reaksiyonu sonucunda küreleşmesi sağlanan yapıştırıcılardır. Küreleşme hızı yüksek olan ve kolayca uygulanabilen bu yapıştırıcılar gözeneksiz malzemelerin birleştirilmesi için uygundur. Düşük darbe dayanımı ve soyulma mukavemetine sahip olmalarına rağmen diğer yapıştırıcılara nispeten maliyeti daha yüksektir. Ayrıca bu yapıştırıcıların kullanılacağı yüzeylerin iyi bir yüzey hazırlığına sahip olması gerekmektedir.

*Silikonlar:* Esnek zincir yapısına sahip olan bu yapıştırıcılar metal, cam ve plastik gibi malzemelerin yapıştırılmasında ve mikroelektrik endüstri alanında yaygın bir kullanıma sahiptir. Mükemmel sıcaklık dayanımı, mükemmel boşluk doldurma kabiliyeti ve birçok akışkan için etkili sızdırmazlık sağlayabilme gibi özellikleri mevcuttur.

Bir yapıştırma bağlantısının tasarımında en önemli parametrelerden biri uygun yapıştırıcının seçilmesidir. Seçim yapılırken aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir (MIL- HDBK-691B 1987);

- Çevresel faktörler,
- Yapıştırıcı bağlantısında kullanılması düşünülen malzemenin yapışabilme yeteneği
- Çalışma şartları,
- Küreleşme şartları, uygulama yöntemi gibi üretim prosesleriyle ilgili parametrelerin belirlenmesi,
- Sağlık şartlarına uygunluk,

- Maliyet,

### 1.3. Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırma bağlantıları, hafifliğin, rijitliğin ve güvenilirliğin önem arz ettiği hava taşıtlarında konstrüksiyon rijitliğine katkı sağlaması, araçlarda plastik ve türevlerini içeren parçaların kullanımını kolaylaştırma, güvenilirlik, maliyet, gürültü seviyesinde ve titreşim seviyesinde iyileşmeler sağlaması gibi birçok avantajından dolayı otomotiv endüstrisinde, inşaat, elektrik-elektronik, deniz taşıtları, bio-medikal gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Şekercioğlu vd 2005).

Modern endüstriyel tasarımcılar ve mühendisler, birleştirme teknikleri içerisinde kullanmak istedikleri yöntemin avantaj ve dezavantajlarını dikkate almaları gerekmektedir. Diğer birleştirme tekniklerinde olduğu gibi yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinde de bazı avantaj ve dezavantajlar mevcuttur. Bundan dolayı yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların birinde aşağıda belirtilen avantaj ve dezavantajlar ifade edilmiştir (Edwards 1998).

#### *Avantajları:*

- Üniform bir gerilme dağılımı sağlveığından dolayı yüksek yük taşıma kapasitesi,
- Herhangi bir kısıtlama olmadan ince ya da kalın malzemelerin birleştirilmesi,
- Farklı malzemeler arasında oluşan elektro kimyasal korozyonun önlenmesi,
- Tekrarlı yük ve yorulma dayanımı,
- Pürüzsüz yüzeylerin birleştirilme olanağı,
- Değişik ortamlara karşı yalıtım imkanı ,
- Isı ve elektrik iletkenliğine karşı yalıtkan olarak kullanılabilmesi,
- Yüksek darbe ve titreşim sönümleme olanağı,

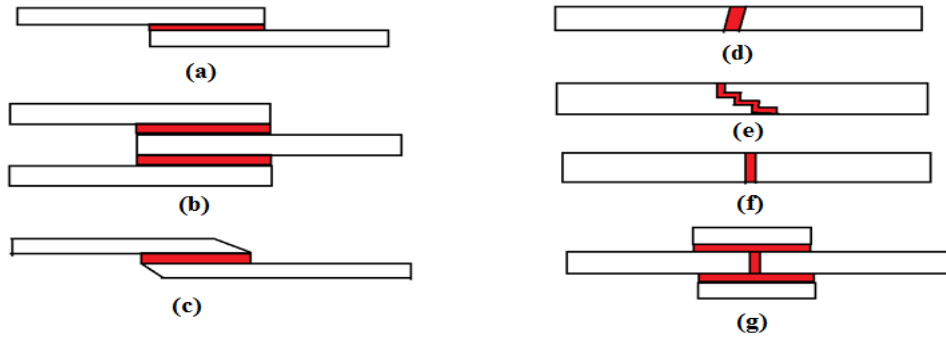
#### *Dezavantajları:*

- Dikkatli yüzey hazırlığı gerektirdiğinden malzemeleri birleştirilmesi zordur.

## 1. GİRİŞ

- Zaman ve sıcaklığa bağlı olarak yapıştırıcının mekanik özellikleri değişmektedir.
- Düşük darbe dayanımına sahiptir.
- Pratik olmayan bir kürleşme mekanizması olabilir.
- Çevresel etkilere bağlı olarak yapıştırıcının dayanımı değişmektedir.

Yapısal mühendisliğin temelinde, herhangi bir konfigürasyona sahip bir yapının yükleme durumundaki yükleri belirleyebilme ve pratik hesaplama yapabilme olgusu mevcuttur. Ancak bu durum, en uygun ve maliyet açısından en etkili çözüme ulaşabilmek için en iyi malzeme ve tasarım tekniğini kullanabilme durumunda önemli avantajlar sağlamaktadır. Yapıştırma bağlantılarında da bu durum dikkate alınarak çeşitli bağlantı tasarımları oluşturulmuştur. Oluşturulan tasarımların her biri; tek tesirli bindirme bağlantılarında üretim ve analizin kolay olması, çift tesirli bindirme bağlantılarında soyulma gerilmesi açısından daha fazla dayanım sağlanması, T bağlantılarının havacılık alanlarında önemli kullanım yerlerinin olması gibi belirli özelliklere sahiptir. Şekil 1.3'te yapıştırma bağlantılarında en yaygın kullanılan birkaç bağlantı tipi mevcuttur.



**Şekil 1.3.** Yaygın olarak kullanılan bağlantı şekilleri: (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).

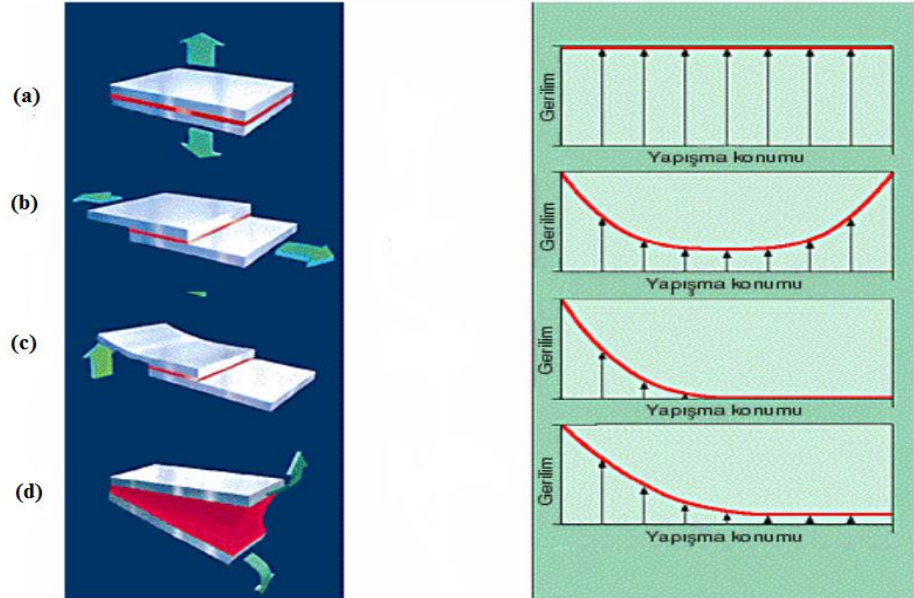
Yapıştırma bağlantılarının tasarımında dikkat edilen en önemli durum yüksek bağlantı dayanımının elde edilebilmesidir. Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme kalınlığı, yapıştırma bağlantılarının dayanımını belirleyen en kritik parametreler olmasına rağmen bunlar dışında da birçok faktör mevcuttur.

## 1. GİRİŞ

Yapıştırılan malzeme kalınlığı, yükleme durumuna bağlı olarak değişebilmektedir. Yapıştırma bağlantılarında yapıştırılan malzemeler içerisinde hasarın oluşup oluşmayacağı bu kalınlık değeri ile kontrol edilebilmektedir (Wang ve Gunnion 2006). Yapıştırıcı kalınlığı için ise deneysel sonuçlar göre 0.1 – 0.2 mm arasında değişen kalınlık değerlerini önerilmektedir (Gleich et al. 2001).

### 1.3.1. Yapıştırma bağlantılarında karşılaşılan gerilme halleri

Yapıştırma bağlantıları, kullanım yerlerine göre çeşitli kuvvetlere dolayısıyla gerilmelere maruz kalmaktadırlar. Yapıştırma bağlantılarında; çekme, basma, kesme, soyulma (peel), yarıлма (cleavage) gibi temel gerilmeler ve bunların birkaçının birlikte bulunduğu birleşik gerilmeler meydana gelmektedir. Şekil 1.4'te yapıştırma bağlantılarındaki gerilme durumları gösterilmiştir.



**Şekil 1.4.** En yaygın yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları: (a) çekme yükü, (b) kesme yükü, (c) soyulma yükü, (d) yarıлма yükü (Loctite 1988).

Yapıştırma bağlantılarından istenen verimin elde edilebilmesi için bağlantıda oluşabilecek gerilme durumları dikkate alınarak bir tasarım gerçekleştirilmeli ve tasarım soyulma yarıma gibi en tehlikeli gerilme durumlarını engellenecek şekilde optimize edilmelidir.

## 1. GİRİŞ

---

Şekil 1.4 (a)'da görüldüğü gibi çekme yükü altındaki kuvvetler yapıştırıcı tabakasına dik olarak etki etmekte ve yapışma alanı boyunca düzgün bir gerilme dağılımı oluşmaktadır. Fakat kuvvetler eksenden kaçık olarak etkirse bindirme uzunluğu boyunca düzgün bir gerilme dağılımı elde edilemez. Ayrıca çekme yüklemesi altında yüksek oranda bir eğilme oluşursa gerilme dağılımı yine bindirme boyunca düzgün olmayacaktır (Temiz 2003).

Şekil 1.4 (b)'de de görüldüğü gibi kayma yükünün yapışma alanının tümüne düzgün bir şekilde etki etmesi durumunda bağlantı dayanımında artış olmaktadır. Bu dayanım artışından dolayı bağlantılar, yükün önemli bir kısmını kesme yükü olarak iletebilecek şekilde tasarlanmalıdır.

Eksenden kaçık çekme yükü ve momentin etkisiyle oluşan yarıma gerilmeleri ve diğer bir gerilme türü olan soyulma gerilmelerinde, yapışma alanı boyunca düzgün olmayan gerilme dağılımı oluşacağından dolayı bağlantı dayanımında azalma meydana gelecektir. Bu yüklerin oluşturacağı negatif etkilerin giderilmesi için çekme ve kesme gerilmelerine göre daha büyük bir alana ihtiyaç vardır ve bu da maliyette artışa sebep olmaktadır (Kayacan 1988).

### 1.3.2. Yapıştırma bağlantılarında gerilme analizi

Yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bir bağlantının güvenlik açısından kullanım uygunluğunun belirlenmesi için gerilme analizlerin yapılması gerekmektedir. Yapıştırma bağlantılarının dayanımının belirlenmesi, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mekanik özellikleri, yük ve yükün şiddeti gibi faktörlerin anlaşılmasına da bağlıdır.

Yapıştırma bağlantılarının gerilme analizinde; sınır şartları ve diferansiyel denklemlerden oluşan bir formülasyonu içeren analitik yaklaşımlar ve diferansiyel denklemlerin sayısal çözümlerine dayanan sayısal yaklaşımlar olmak üzere iki temel yaklaşım kullanılmaktadır.

## 1. GİRİŞ

*Analitik yöntemler:* Yapıştırma bağlantılarının gerilme analizinde, karmaşık geometriler ve ayrıntılı malzeme modelleri için sayısal yöntemler vasıtasıyla çözümün daha kolay gerçekleştirilebilmesine rağmen bazı parametrelerin belirlenmesi açısından teorik çözümler daha etkilidir. Bundan dolayı yapıştırma bağlantılarının analitik analizleri, birçok araştırmacı tarafından farklı konfigürasyonlar için gerçekleştirilmiştir.

Tek tesirli bindirme bağlantıları, üretimlerinin kolay ve analizlerinin diğer modellere göre daha basit olmasından dolayı yapıştırma bağlantılarının gerilme analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu durum için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Tek tesirli bindirme bağlantıları için Kinloch (1987) tarafından yapıştırıcı tabaka içerisinde kayma deformasyonunun olduğunu varsayan basit bir kayma modelinin geliştirilmesi, Volkersen (1938) tarafından yapıştırılan malzemelerin rijit ve yapıştırıcının sadece kayma yönünde deforme olduğunu kabul eden bir analizin gerçekleştirilmesi, Goland and Reissner (1944) tarafından bağlantının uçlarına uygulanan yüklerin aynı ekseninde olmamasından dolayı bindirme bölgesinin serbest uçlarında oluşabilecek eğilme momentlerini dikkate alan bir incelemenin gerçekleştirilmesi ve Hart-Smith (1973) tarafından yapıştırılan malzemelerin elastik, yapıştırıcının ise lineer elastik ve elasto-plastik davranışlarına göre modellenmenin yapılması gibi çalışmalar bu duruma örnek olarak gösterilebilir. Tek tesirli bindirme bağlantıları için oluşturulan teorik modellerdeki deformasyonlar Şekil 1.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 1.5.** Teorik model konfigürasyonları: a) (Volkersen 1938), (b) (Goland and Reissner 1944).

*Sonlu elemanlar yöntemi (SEY):* Yapıştırma bağlantılarında oluşabilecek karmaşık gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin belirlenmesinde analitik modellerin yetersizliğinden dolayı sonlu elemanlar yöntemi yapıştırma bağlantılarının gerilme analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile doğru bir

analizin gerçekleştirilebilmesi açısından yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı için uygun malzeme modellerinin belirlenmesi ve bu modelleri oluşturan dataların doğru ve tekrarlanabilir bir nitelikte olması gerekmektedir. Malzeme modellerinin oluşturulmasında kullanılan datalar; tek eksenli çekme, basma, kayma gibi birden fazla gerilme durumu altında elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden belirlenmektedir.





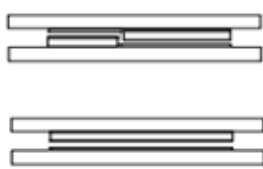

Yapıştırma bağlantılarının lineer olmayan sonlu elemanlar analizinde, elastik ve elastik-plastik malzeme modellerinin oluşturulması için gerekli olan veriler genellikle bu malzemelerden elde edilen bulk numunelerin çekme deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri vasıtasıyla yapılmaktadır.

### **1.3.3. Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar tipleri**

Yapıştırma bağlantılarında genel olarak adhezyon ve kohezyon olmak üzere iki hasar tipi mevcuttur (ISO 10365). Adhezyon hasarı; yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde meydana gelen ve gözle görülebilen ayrılmanın olduğu hasar türüdür. Yapıştırılan malzemelere yeterli yüzey hazırlığı yapılmaması veya uygun yapıştırıcı seçilmemesinden dolayı bu hasar oluşmaktadır. Kohezyon hasarı ise aşırı yükleme, sıcaklık gibi olaylar sonucunda yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede oluşan hasar türüdür.

Yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin tespit edilmesinde hasar tiplerinin belirlenmesi de önem arz etmektedir. Normal şartlar altında yapıştırma bağlantılarının yüklenmesi esnasında kohezyon hasarının oluşması istenmektedir. Yapıştırma bağlantılarının uygun bir şekilde hazırlanmamasından dolayı adhezyon hasarı oluşmakta ve mekanik özelliklerin doğru tespiti engellenmiş olmaktadır (Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1. Temel hasar tipleri (ISO 10365).

	Hasar Tipleri	Tanımlanma şekli
Yapıştırılan malzeme	 <p>Yapıştırılan malzemelerin bir ya da ikisinde de hasarın oluşması</p>	KY
	 <p>Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı</p>	KYH
	 <p>Kalkma (delaminasyon) yoluyla hasar</p>	DH
Yapıştırıcı	 <p>Kohezyon hasarı</p>	KH
	 <p>Özel kohezyon hasarı</p>	ÖKH
	 <p>Adhezyon hasarı</p>	AH

#### 1.4. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması

Yapıştırılacak malzemelerin yüzeylerinin hazırlanması amaca uygun yapıştırma bağlantılarının elde edilebilirliği açısından en önemli basamaklardan biridir. Yapıştırma bağlantılarının yüksek dayanımlar sağlayabilmesi açısından bu yüzeylere yapıştırma öncesinde uygun bir yüzey hazırlığı gerekmektedir.



## 1. GİRİŞ

---

Yapışan malzemelerin yüzeyindeki zayıf sınır tabakalar olarak adlandırılan oksit, boya, krom gibi kirletici tabakaların varlığı nedeniyle yapıştırıcı, malzeme yüzeyi ile yeterli bir temas oluşturamamakta ve dolayısıyla dayanımı düşük yapıştırma bağlantıları oluşmaktadır.

Yapışma mekanizması, yapıştırıcının yüzeye yapışma kuvveti (adhezyon) ve yapıştırıcının iç kuvvetine (kohezyon) bağlıdır. Doğru yüzey hazırlama tekniğinin uygulanması ile elde edilen yüksek dayanımlı yapıştırma bağlantılarında, bağlantının maruz kaldığı yük değerinin yapıştırıcının kohezyon kuvvetini aşması durumunda yapıştırıcı tabaka içerisinde kopmalar meydana gelmekte ve dolayısıyla uygun yüzey hazırlama vasıtasıyla nitelikli yapıştırma bağlantıları elde edilebilmektedir.

Yapışma kuvveti, yapıştırıcı ve yapıştırılacak yüzeyler arasındaki adhezyon kuvveti ile belirlenir. Bundan dolayı yapıştırma dayanımını arttırmak için adhezyon kuvvetini arttırmak gerekmektedir. Yağ alma, aşındırma, kimyasal işlem gibi yüzey hazırlama işlemleri ile yüzey tabakalarının temizlenmesi durumunda adhezyon kuvveti artırılabilir.

Yüzey hazırlama yöntemleri ile en temelde yağ ve gres gibi kalıntıların yüzeyden uzaklaştırılması gerekmektedir. Genellikle birçok metal ve plastik malzeme için zımparalama, çözelti ile temizleme gibi yöntemlerin uygulanmasına rağmen bazı metaller için iyi bağlantıların elde edilmesinde bu basit yüzey hazırlama yöntemleri yeterli olmamaktadır (Aydın 2003).

Yüzey hazırlama yönteminin seçiminde bağlantının dayanımı, sürekliliği, kullanım yeri, malzeme üzerindeki kirletici unsurların türü ve miktarı ve yapıştırılacak malzeme türü gibi faktörler dikkate alınmalıdır.

En yaygın kullanılan yüzey hazırlama metotları;

- Yağ giderme,
- Mekanik aşındırma,
- Çözücü ile silme,

## 1. GİRİŞ

---

- Kimyasal çözelti ile temizleme,
- Ultrasonik temizleme,
- Yüzey kaplama

Bağlantının çok yüksek yüklere maruz kalmadığı yani düşük ve orta dayanımlı yapıştırma bağlantıları istenildiğinde yoğun bir yüzey hazırlama işlemi gerekmemektedir. Çözücü ile silme, yağ giderme gibi basit ön işlemler ile gerçekleştirilen yüzey hazırlığı yeterli olabilmektedir.

*Yağ alma:* Yüksek dayanıma sahip bağlantıların elde edilebilmesi için malzeme yüzeyinde bulunan yağ, gres, toz gibi kalıntıların yüzeyden uzaklaştırılması gerekmektedir. Hidrokarbonlar, ketonlar gibi kalıntı bırakmadan buharlaşabilen çözücüler yağ giderme işleminde kullanılmaktadır. Genel olarak, aseton, trikloretilen ve metiletiketone en iyi yağ çözücülerdir ve bu çözeltiler ile yüzey temizlendikten sonra tam buharlaşmanın sağlanabilmesi açısından bir süre beklenmesi gerekmektedir.

Fazla sayıda parça temizliğinin gerektiği durumlarda özel yağ alma banyoları kullanılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli durum, çok kirli yüzeylerin ön temizlikten sonra banyoya alınmasıdır.

Buharlı yağ alma işlemleri de yüzey temizliğinde sıkça kullanılmaktadır. Bu yöntemde, kaynama noktasına kadar ısıtılan ve buharlaşan çözeltilerin soğuk parçaların yüzeyi ile teması esnasında çözeltinin yüzeyde yoğunlaşması neticesinde yüzeyler yağ ve kirden arındırılmış olmaktadır.

*Mekanik aşındırma:* Yapıştırılacak yüzeylerde oksit tabakasının varlığı durumunda, bu tabaka yağ giderme ile temizlenemez ve zımparalama, kumlama, taşlama gibi mekanik ön işlemler ile malzemedan uzaklaştırılabilir. Mekanik aşındırma işlemi, bağlantı dayanımına katkısı olan yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilemesinden dolayı uygun bir şekilde yapılmalıdır. Genel olarak uygun zımpara kullanmak şartıyla, zımparalama yöntemi ile yüzeyleri temizlemek için kullanılan etkin bir yöntemdir.

## 1. GİRİŞ

---

Uygun zımpara seçimi yüzey işlemi yapılan malzemeye bağlı olarak belirlenmektedir. Zımparalama tekniği el ve makineyle olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. El ile zımparalamada yüzeyler 125-325 µm kalınlığa sahip zımparalar kullanılmaktadır. Makine ile zımparalamada, soğutmayı sağlayan suya korozyon önleyici madde ilave edilmeli ve işlemden sonra yüzeylerde kalan suyun kurutulmalıdır.

Farklı malzemeler için önerilen aşındırıcı boyutları (Aydın 2003);

- Çelik Kuru zımparalama 80-100 mesh
- Alüminyum Islak zımparalama 140-325 mesh
- Paslanmaz çelik Islak zımpara 140-325 mesh
- Pirinç Islak zımpara 140-325 mesh

*Kimyasal işlem:* Yapıştırılacak yüzeylere uygulanan yağ giderme ve aşındırma işlemlerinin ardından yapışma kalitesini arttırmak için yüzeylere kimyasal işlem uygulanmaktadır. Bu işlem, birleştirilecek olan bölgenin kromik asit gibi bir asit çözeltisine daldırılması ardından saf su ile durulanıp kurulanması esasına dayalı olarak gerçekleştirilmektedir. Kimyasal işlem ile malzeme yüzeyinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişim olmaktadır. Yüzeyde meydana gelen kimyasal aşınma sonucunda yapıştırıcının mekanik olarak tutunabileceği gözenekler oluşmaktadır.

### 1.5. Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Yapıştırma bağlantılarının performansını değerlendirme ve mümkün olabilecek en uygun tasarımı geliştirme açısından yapılması gereken en temel çalışmalardan biri yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesidir. Bu amaca yönelik yapılan çalışmalarda birçok test yöntemi kullanılmış olmakla beraber temelde bu yöntemler iki ana başlık altında toplanabilir. Birincisi, yapıştırıcıdan doğrudan üretilerek testlerin gerçekleştirildiği bulk numune testleri, ikincisi ise yapıştırıcının kullanıldığı ortam şartlarını temsil etmesi amacıyla iki levhanın birleştirilmesi suretiyle oluşturulan bağlantı numunelerinden deneylerdir.

Bulk formunda gerçekleştirilen testlerin uygulama kolaylığı vardır. Ancak bu testlerde kullanılan numune kalınlıklarının, yapıştırma bağlantısındaki yapıştırıcı tabakasını temsil etmesi açısından yeterli boyutlarda olmasına dikkat edilmelidir.

Bağlantı formundaki testlerin gerçek bağlantı durumunu daha çok temsil etmesine rağmen yapıştırıcı tabakasında oluşan çok küçük yer değiştirmelerin belirlenmesi oldukça zordur. Ayrıca bu testlerin yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımı düzgün olmamakla beraber hasar modu gerçek durumdaki hasar modundan farklı olabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı, hasar mukavemeti özelliklerinin belirlenmesi için mükemmel bir deneysel yöntem bulunmamakta ve dolayısıyla tasarımcı, belirli bir uygulama için en uygun testi seçmeli ve sonuçların ne anlama geldiğini anlamalıdır.

Yapıştırıcıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla bulk ve bağlantı numunelerinin çekme, basma ve kayma testleri gerçekleştirilmektedir. Basma testlerinin gerçekleştirilmesi diğerlerine göre daha zor olduğundan dolayı kullanımı yaygın değildir.

### **1.5.1. Bulk numuneler üzerinden mekanik özelliklerin belirlenmesi**

*Bulk numunelerin çekme testleri:* Yapıştırıcıya ait bulk numunelerin tek eksenli çekme yükü altında mekanik özelliklerinin belirlenmesi en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir.

Çekme deneyi ile elde edilen yapıştırıcıya ait mekanik özelliklerinin güvenilirliği, uygulanan yükün etkisinde oluşan yer değiştirmelerin doğru bir şekilde belirlenmesine bağlıdır. Genellikle uygulanan kuvvetin doğru tespitinde sorun yaşanmaz iken yer değiştirmelerin ölçülmesinde güçlüklerle karşılaşmaktadır. Bundan dolayı, çekme deneylerinde; yer değiştirmelerin belirlendiği ölçüm tekniği, numunelerin kalınlığı ve deneylerde kullanılan sekil değiştirme oranı ve miktarı dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir (Aydın 2003).

Bulk numunenin üretimi genellikle yapıştırıcının kalıp içerisine dökülmesi veya enjekte edilmesi veya plakalar arasına basınç uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. İlk yöntem tek bileşenli sıvı yapıştırıcılar için uygundur. Yapıştırıcı, iki bileşenli yapıştırıcı veya film formunda olduğunda ise ikinci yöntem genellikle daha iyi sonuç vermektedir. Yapıştırıcı film formunda ise, döküm aşamasının gerçekleştirilmesi zordur. Diğer taraftan iki bileşenli yapıştırıcıların karıştırılması esnasında boşluklar oluşmaktadır. Yapıştırıcının sıvı olması durumunda hava kabarcıkları vakumla çıkarılabilir. Ancak yapıştırıcının viskoz olması durumunda ise vakum altında yüksek hızda karışım sağlayan modern gelişmiş makineler ile yapıştırıcı içerisindeki boşluklar giderilmektedir. Boşluklar düzgün bir şekilde giderilirse, yapıştırıcı döküm veya enjeksiyon yoluyla imal edilebilir. Aksi durumda, boşluklar yüksek basınçlarla giderilebilir (da Silva et al. 2012).

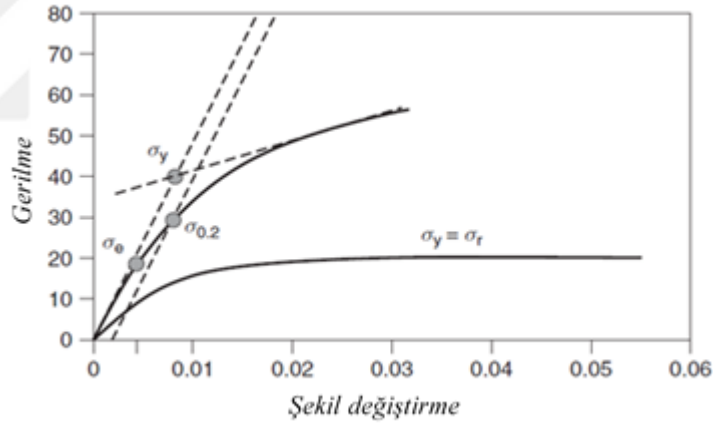
Çekme numuneleri için yaygın olarak kullanılan geometri, Şekil 1.6'da verilmiştir (ISO 527-2). Yapıştırıcıdaki yer değiştirmelerin düşük olduğu epoksiler gibi rijit yapıştırıcılarda uzun numuneler (Şekil 1.6 a), poliüretanlar gibi esnek yapıştırıcılarda ise kısa numunelerin (Şekil 1.6 b) kullanımı daha uygundur. Numune içerisindeki boşluklar bulk numune kalınlığına önemli ölçüde bağlı olduğundan dolayı numune kalınlığının gerçek bağlantıdaki yapıştırıcı tabakasını temsil edecek kadar ince olması en ideal durumdur. Ancak yapıştırıcıların yüksek sünekliğinden dolayı çok ince numunelerin üretimi zordur ve genellikle 2 mm kalınlıktaki numuneler üretilmektedir. Numune kalınlığının fazla olması durumunda kürleşme esnasında ortaya çıkan ekzotermik reaksiyon bazı yapıştırıcıların yanmasına sebep olacağından dolayı numune kalınlığının seçimine dikkat edilmelidir (da Silva et al. 2012).



## 1. GİRİŞ

Bulk numunelerin çekme deneyleri ile elde edilen gerilme – şekil değiştirme eğrileri vasıtasıyla bu numunelere ait elastisite modülü, poisson oranı, çekme gerilmesi, kırılma anındaki gerinim değeri gibi önemli mekanik özelliklere ulaşılmaktadır.

Elastisite modülünün hesaplanmasında birkaç yöntem kullanılmakla birlikte genellikle EN ISO 527-2 standartında yer alan öneri dikkate alınmaktadır. Bu standarta göre elastisite modülü, %0.05-%0.25 şekil değiştirme noktaları arasındaki lineer bölgede belirlenmektedir. Elastisite modülü genellikle epoksi gibi sert yapıştırıcılarda 3-5 GPa, poliüretanlar gibi esnek yapıştırıcılarda ise 0.1 GPa seviyelerinde olmaktadır (da Silva vd 2012). Yapıştırıcıların poisson oranı aksenal ve yanal gerinimlerin ölçülmesi ile ya da elastisite modülü ve kayma modülü vasıtasıyla belirlenmektedir. Yapıştırıcılar genellikle 0.3-0.5 aralığında değişen poisson oranlarına sahiptir ve bu değer, camı geçiş sıcaklığının altında 0.3'e, üzerinde ise 0.5 değerine yaklaşmaktadır (da Silva et al. 2012).



**Şekil 1.7.** Yapıştırıcıların akma noktasının belirlenmesi (da Silva et al. 2012).

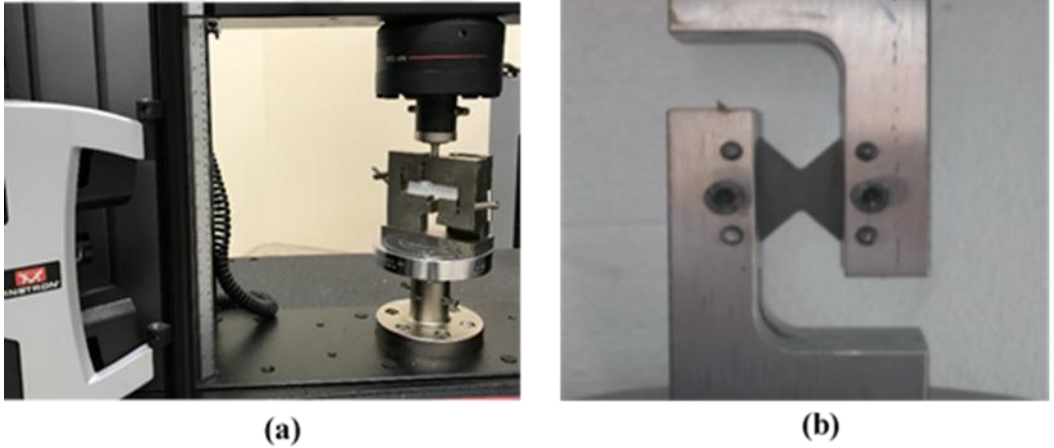
Yapıştırıcılarda lineer elastik bölge bulunmadığından dolayı akma dayanımının belirlenmesi kolay değildir. Birkaç araştırmacı tarafında bu konuda çeşitli fikirler sunulmuştur. Young ve Lovell (1991), tarafından yapıştırıcı davranışının elastoplastik olduğu durumda akma noktasının gerilme şekil değiştirme eğrisindeki maksimum nokta olduğunu ifade edilmiştir. Bir başka yöntemde ise akma noktası, elastik lineer bölgeye ve plastik nonlinear bölgeye çizilen teğetlerin kesim noktası olarak alınmaktadır. Ayrıca çoğu malzemenin akma noktasını tayin etmek amacıyla kullanılan geleneksel %0.2

## 1. GİRİŞ

öteleme metodu da yapıştırıcıların akma noktasını belirlemede kullanılmaktadır (Şekil 1.7).

*Bulk numunelerin kayma testleri (V Çentikli kiriş yöntemi- Iosipescu):* Bulk numunelerin kayma özelliklerinin ölçümünde, V-çentikli kiriş kayma yöntemi (Iosipescu) ve çentikli plaka kayma yöntemi (Arcan) olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler geometri tipi ve yükleme farklılığı dışında benzerdir.

Bu yöntemde Şekil 1.8.a'da gösterilen çentikli bulk numuneler kullanılarak çentikler arasındaki bölgede kayma gerilmesi üretilecek şekilde yük uygulanması ile test gerçekleştirilmektedir. Numune, merkezinde iki V çentik bulunan ve genellikle 75 mm genişliğinde, 20 mm yüksekliğinde ve en az 4 mm kalınlığında dikdörtgen bir kesite sahiptir. Bu test yönteminde, çentik bölgesindeki büyük lokal gerilme yığılmaları en önemli sorundur ve bu gerilme yığılmaları gevrek malzemelerde erken hasara sebep olabilmektedir. Bundan dolayı bu malzemelerin kayma gerilmesi-şekil değiştirme davranışı doğru bir şekilde belirlenemeyebilir (Duncan and Dean 1996).



**Şekil 1.8.** a) Iosipescu test numunesi, b) Arcan test numunesi (Dean et al. 1996).

Numune, dört noktadan yüklenmekte ve her iki taraftan gelen eğilme momentleri birbirini yok ettiğinden dolayı çentikler arasında üniform bir kayma alanı oluşmaktadır. Numunenin uçlardan yüklenmesi, boylamsal eksen boyunca numunenin eğilmesine sebep olabilir ve bu sorunu gidermek amacıyla kalın numunelerin kullanımı önerilmektedir (3-4 mm). Ancak, poliüretanlar gibi çok esnek yapıştırıcılar için, test



## 1. GİRİŞ

---

yöntemi kalın numunelerde bile yeterli olmayabilir. Gevrek yapıştırıcılar için ise çentik dibindeki gerilme yığılmaları erken kırılmayı başlatmasından dolayı gerilme-şekil değiştirme eğrisinin yalnızca bir bölümünü vermek için yeterli olabilmektedir. Bu durum, bu testlerin en büyük dezavantajlarından biridir. Aynı şey Arcan testi için de geçerli olabilmektedir (da Silva et al. 2012).

Kayma şekil değişimi, numune eksenine ile  $+45^\circ$  ve  $-45^\circ$ 'de monte edilmiş gerinim ölçerler ile ölçülebilir.  $P$  uygulanan yük,  $t$  numune kalınlığı ve  $h$  çentikler arasındaki uzaklık olmak üzere kayma gerilmesi  $\tau$ , aşağıdaki denklem ile çıkarılmaktadır.

$$\tau = \frac{P}{th} \quad (1.1)$$

$$G = \frac{P}{th(\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})} \quad (1.2)$$

Burada  $\varepsilon_{45}$  ve  $\varepsilon_{-45}$ , numune eksenine ile  $+45^\circ$  ve  $-45^\circ$  arasında bağlanan gerinim ölçerler tarafından ölçülen gerinim değerleridir.

*Bulk numunelerin kayma testleri (V Çentikli levha yöntemi- Arcan):* Arcan olarak da adlandırılan kelebek şeklinde bir görünüme sahip numuneleri içeren çentikli levha yöntemi, bulk numunelerin kayma özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır (Voloshin and Arcan 1980).

Numune, gerilme yığılmalarını minimize etmek amacıyla eğrilik yarıçapı 1.5 mm olan  $90^\circ$ 'da iki simetrik çentik içermektedir. Numunenin kenarlarındaki delikler, iki çentik arasındaki uniform bir kayma yükünün uygulanmasını sağlamaktadır. Bu yük düzenlemesi ile Iosipescu testinde oluşan kenarlardaki dengesizlik problemi önlenmekte ve daha ince numuneler ile çalışma olanağı sağlanabilmektedir. Ancak, özellikle gevrek yapıştırıcılar için çentiklerin yakınında erken hasara neden olabilecek gerilme yığılmaları bulunmaktadır (Dean et al. 1996).

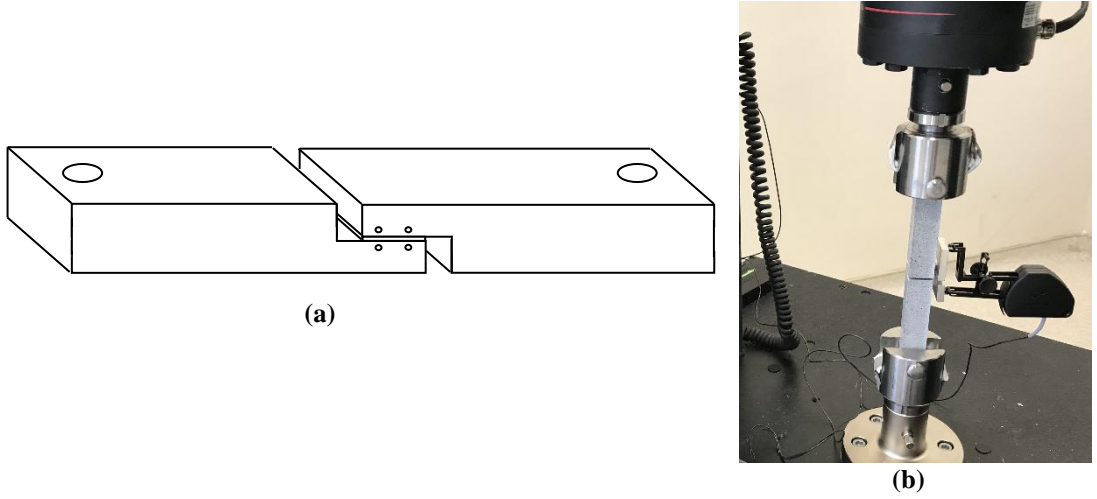
Gerilme, yükün iki çentik arasındaki alana bölünmesi ile elde edilir. İki çentik arasındaki üniform kayma deformasyon bölgesindeki yer değiştirme, yük eksenini ile +45 ve -45°'de bağlanmış gerinim ölçerler veya temassız metotlarla belirlenebilir.

### 1.5.2. Bağlantı numuneleri üzerinden mekanik özelliklerin belirlenmesi

Bağlantı formundaki numuneler ile yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin tespitinde, bu numunelerin gerçek durumu daha iyi temsil etmesi açısından bulk numuneler ile elde edilen sonuçlara göre daha hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak bağlantı formundaki numunelerde yapıştırıcı tabakasında oluşan çok küçük yer değiştirmelerin belirlenmesi özel cihazların kullanımını ya da bulk numunelerde kullanılan gerinim ölçerlerin modifiye edilmesini gerektirmektedir. Ayrıca bu modifikasyonlara bağlı olarak sonucun hassasiyeti önemli ölçüde değişebildiği dikkate alınmalıdır.

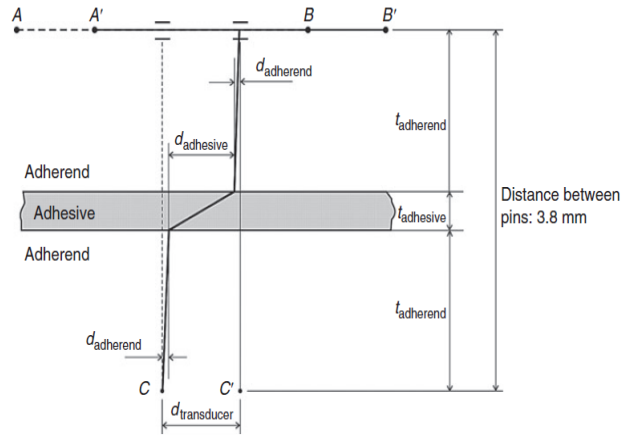
Bağlantı formundaki numuneler ile gerçekleştirilen; Arcan ve Iosipescu bağlantı yöntemleri, burulmada butt-joint yöntemi ve kalın yapıştırılan malzemeler üzerinde kayma testleri (TAST) gibi çeşitli test metotları mevcuttur. Bu tez kapsamında TAST yöntemi inceleneceğinden dolayı burada sadece bu yöntem hakkında bilgiler verilmiştir.

*Kalın yapıştırılan malzemeler üzerinde kayma testleri (TAST):* Yapıştırıcıların kayma gerilmesi- kayma şekil değişiminin elde edilmesinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde erken hasara sebep olabilecek dolayısıyla tespit edilen mekanik özelliklerin doğruluğunu önemli derecede etkileyecek gerilmelerin etkisini ortadan kaldırmak ve tek eksenli üniform bir gerilme dağılımı oluşturmak amacıyla kısa bindirme uzunlukları ve kalın, rijit yapıştırılan malzemeler kullanılmaktadır. Yöntemde üretilen numuneler çekme kuvvetine maruz bırakılarak yapıştırıcının kayma davranışı (kayma gerilmesi-şekil değiştirme eğrisi, kayma modülü vb.) belirlenmektedir.



**Şekil 1.9.** a-) TAST yönteminde deney kullanılan numuneleri (ASTM D5656, ISO11003–2); b-) TAST yönteminde kullanılan extensometre.

Ekstansometreler sadece yapıştırıcının değil yapıştırılan malzemenin de deplasmanını ölçtüğünden dolayı ölçülen deplasmanlar üzerinde bir düzeltme yapılmalıdır. ISO 11003-2'ye göre düzeltme, tek başına yapışan materyalden oluşan bir numunedeki kayma şekil değişimi ölçümünden yapılmalıdır. TAST yöntemi ile gerçekleştirilen test sonucu ekstansometre vasıtasıyla elde edilen deplasman dataları aşağıdaki eşitlikler ile düzeltilmiştir. Fakat, sonlu elemanlar analizi yapıştırılan malzemenin sadece kayma gerilmesine değil aynı zaman da aksel gerilmeye maruz kaldığını gösterdiğinden dolayı deplasman değerlerindeki düzeltmenin sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmasının daha doğru olacağı ifade edilmiştir.



**Şekil 1.10.** TAST yöntemindeki deplasmanlar (da Silva et al. 2012).

$$\begin{aligned}d_{adhesive} &= d_{transducer} - 2 \times d_{adherend} \\2 \times d_{adherend} &= \frac{2 \times t_{adherend} \times P}{G_{adherend} \times l \times w} \\2 \times t_{adherend} &= 3,8mm - t_{adhesive}\end{aligned}\tag{1.3}$$

Yapıştırıcı deplasmanının belirlenmesinde yapıştırıcının deplasmanını doğrudan vermesi ve numuneye temas olmadığından dolayı yapıştırıcının mekanik özelliklerini etkilemesi sebebiyle görüntü korelasyon analizi gibi optik yöntemlerin kullanımı en uygun bulunmaktadır. Ayrıca bu yöntem ile sadece noktasal deplasman değerlerinin alınmasının yanında tüm alan deplasman dağılımı da elde edilmektedir. Bu deplasman dağılımı vasıtasıyla ara yüzeylerdeki hasar gelişimini inceleme imkanı sağlanmaktadır.

Yapıştırıcı içerisinde düzgün stres dağılımı bulunmasına rağmen, özellikle ara yüzeye yakın bindirme kenarlarında gerilme yığılmaları mevcuttur. Cognard et al. (2008) gibi araştırmacılarında içinde bulunduğu birkaç araştırmacı, bu etkileri azaltmak için özel olarak şekillendirilmiş yapıştırılan malzemelerin kullanımını önermektedir.

Bağlantı formundaki TAST numuneleri genellikle ISO 11003-2 standartına göre 0.5 mm/dk 'lık çekme hızı ile yüklenmektedir. Test sonucunda elde edilen yük ve deplasman dataları vasıtasıyla yapıştırıcının kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi aşağıdaki eşitlikler ile belirlenmektedir.

$$\tau = \frac{F}{lw} \quad \gamma = \frac{d_{yapıştırı}}{t_{yapıştırı}}\tag{1.4}$$

### **Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC)**

Birim şekil değişimi (gerinim) ve yer değiştirme parametrelerinin uygun ve doğru bir şekilde belirlenmesi katı mekaniği deneylerinde büyük bir öneme sahiptir. Mekanik testlerinden elde edilen yer değiştirme alanlarının analizleri, deneyler ve simülasyonlar arasındaki uygunluğu kıyaslama ve hataları tespit etme açısından da kritiktir. Mühendislikte büyük bir önem arz eden bu deplasman ve gerinim ölçümleri;

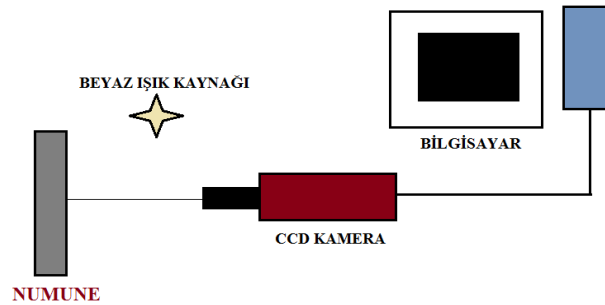
## 1. GİRİŞ

uygun maliyette, yeterli doğrulukta ve kolay bir şekilde gerçekleştirilmelidir (Cormick and Lord 2010). Bu şartların geleneksel ölçüm yöntemleri ile sağlanması zordur ve bundan dolayı yeni ölçüm metotları geliştirilmiştir.

Dijital görüntü korelasyon tekniği (DIC) yukarıda bahsi geçen gerekleri yerine getirebilme niteliğine sahip yeni bir optik ölçüm yöntemidir. Bu yöntem, deney süresince deformasyonun farklı aşamalarında kaydedilen dijital görüntülerin kıyaslanarak ölçülmesi esasına dayanmaktadır.

DIC tekniği ilk olarak 1982 yılında Güney Carolina Üniversitesi'ndeki bir grup araştırmacı tarafından önerilmiş ve birçok araştırmacı tarafından geliştirilerek katı mekaniğinde etkili bir deformasyon ölçüm yöntemi haline gelmiştir (Peters and Ranson 1982).

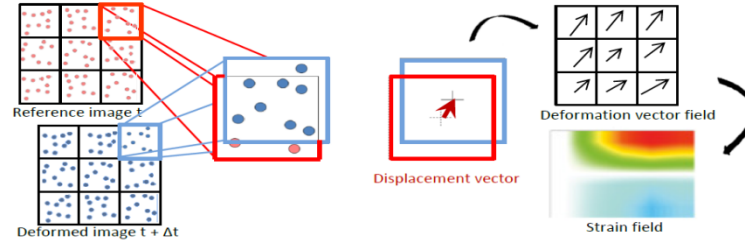
DIC tekniğinin, 2D-DIC ve 3D-DIC olmak üzere iki temel analiz tipi mevcuttur. Düzlem dışı etkilerin incelenmesi durumunda 3D-DIC tekniğinin kullanılması daha doğrudur. Fakat, 3D-DIC tekniğinin kullanılması durumunda, analiz zamanı ve analiz için gerekli olan yazılıma ait maliyetin artmasından dolayı düzlem dışı etkilerin ihmal edilebilir düzeyde olduğu veya sadece düzlemsel etkilerin incelenmesi istenildiği çalışmalarda genellikle 2D-DIC kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında da düzlemsel etkilerin incelenmesi amaçlandığından dolayı 2D-DIC tekniği kullanılmıştır. DIC tekniğine ait deneysel kurulumun şeması Şekil 1.11'de gösterilmiştir.



Şekil 1.11. DIC tekniğinin kurulum şeması.

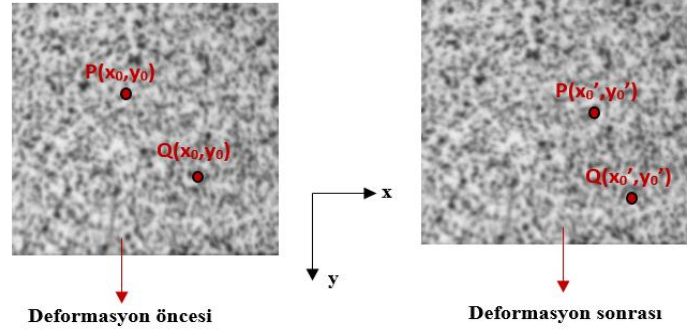
## 1. GİRİŞ

DIC tekniğinde, deney esnasında kaydedilen görüntüler vasıtasıyla numune deplasmanının belirlenmesinde; basit normleştirilmiş korelasyon, normleştirilmiş çapraz korelasyon ve sıfır ortalamalı normalize çapraz korelasyon gibi çeşitli korelasyon kriterleri kullanılmaktadır (Bell et al. 2011). Analizde, kaydedilen görüntüler küçük bölgelere (subset) ayrılarak deformasyon öncesi ve sonrasına ait görüntülerde aynı gri seviye dağılımına sahip alt bölgeler bahsi geçen korelasyon algoritmalarından biri kullanılarak eşleştirilmektedir (Şekil 1.12). Çözüm için seçilen alt bölge boyutunun belirlenmesi, alt bölgenin çok küçük olması durumunda daha güvenilir yer değiştirme ölçümü sağlanırken daha büyük olması durumunda her alt bölge daha belirgin gri seviye yoğunluğuna sahip olması nedeniyle daha güvenilir bir korelasyon sağlanmasından dolayı önemli bir parametredir (Pan et al. 2009). Dikkat edilmesi gereken diğer bir parametre ise adım boyutudur. Adım boyutu, alt kümenin bir sonraki resimde kaydırılmasını beklediği varsayılan piksel sayısı olarak düşünülebilir. Makul adım büyüklüğünün belirlenmesi ile hesaplama zamanı optimum olabilir (Robert et al. 2007).



**Şekil 1.12.** DIC yönteminde işlem aşamaları (Crammond 2013).

Referans görüntüdeki (deformasyon öncesi görüntü) farklı gri seviye yoğunluğuna sahip bölge belirlendikten sonra deformasyon sonrasındaki görüntüde aynı bölgeyi bulmak için bir korelasyon kriteri kullanılarak korelasyon katsayısı belirlenir. Şekil 1.13'te deformasyon öncesi görüntüdeki  $P(x_0, y_0)$  ve  $Q(x_i, y_i)$  noktalarının deformasyon sonrası görüntüdeki karşılığı olan  $P'(x'_0, y'_0)$  ve  $Q'(x'_i, y'_i)$  noktalar gösterilmiştir.



**Şekil 1.13.** Deformasyon öncesi ve sonrasına ait görüntülerde aranan noktaların gösterimi.

### 1.5.3. DIC metodu için gerekli yüzey hazırlığı

DIC yönteminde deformasyon analizi, deney süresince kaydedilen görüntülerin alt bölgelere ayrılarak eşleştirilmesi esasına dayanmaktadır ve dolayısıyla eşleştirmenin yapılabilmesi amacıyla numune yüzeyinde farklı gri seviye yoğunluğuna sahip bölgeleri ihtiva eden rastgele bir desenin bulunması gerekmektedir. Bundan dolayı yüzeyinde rastgele desen bulandırmayan numunelere yapay bir desen oluşturulmaktadır. Bu desen oluşturulurken; numune boyutu, kamera çözünürlüğü, kullanılan algoritma gerekleri, kullanılan alt bölge boyutu gibi faktörler dikkate alınarak uygun bir yüzey yapısı oluşturulmalıdır.

Genel olarak kullanılan yüzey deseni oluşturma teknikleri aşağıda mevcuttur (CSI Application Note AN-525)

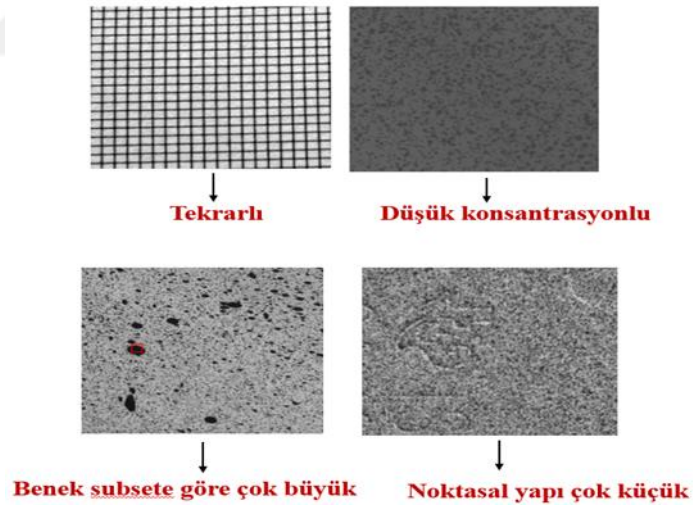
- *Sprey boya:* Numune zemini sprej boya ile boyanır ve noktasal yapılar zemini boyanmış numune yüzeyine sprej boya püskürtülerek oluşturulur.
- *Toner:* Boyutu küçük numuneler (12 mm'den küçük) için kullanılmaktadır. Beyaza boyanmış yüzey üzerine toner püskürtülerek işlem gerçekleştirilmektedir.
- *Litografi:* Boyutu çok küçük numuneler için kullanılmaktadır.
- *Şablonlar:* Çok büyük numuneler için kullanılmaktadır.

## 1. GİRİŞ

- *Izgara:* DIC için uygun bir teknik olmamasına rağmen, ızgaralar her bir alt kümede tam olarak bir ızgara kesişiminin bulunması için ilk tahminlerde ve alt kümelerin boyutlarının seçiminde kullanılabilir.
- *Mürekkep*

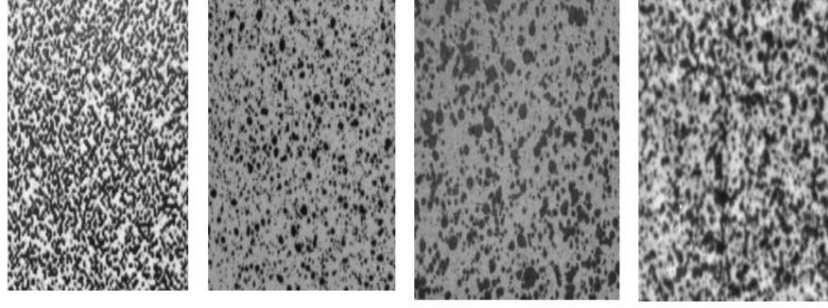
DIC tekniği kullanılarak elde edilen sonuçların hassasiyetini arttırmak için yüzeyde desen oluşturulurken dikkat edilmesi gereken durumlar aşağıda özetlenmiştir;

- Tekrarlı bir yapı olmamalı,
- Yüksek yoğunluğa sahip olmalı,
- Benekler çok büyük ya da çok küçük olmamalı, (Alt bölge (subset) büyüklüğüne göre en uygun değer sağlanmalıdır.)
- Oluşturulan noktasal yapının çok küçük olması durumunda kullanılan kamera çözünürlüğünü yetersiz kalabilir ve dolayısı ile doğru eşleşme sağlama imkânı sağlanamaz.



**Şekil 1.14.** Numune yüzeyinde oluşturulan hatalı desenler (CSI Application Note AN-525).



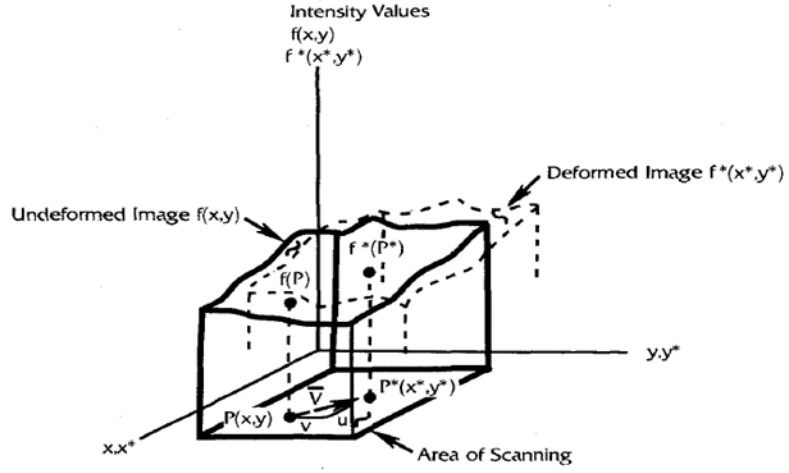


**Şekil 1.15.** Uygun patern yoğunluğu ve boyutuna sahip yüzey yapıları (CSI Application Note AN-525).

Ayrıca, yapıştırıcı tabakası gibi dar alanların deformasyon özelliklerinin belirlenmesi isteniliyorsa yüzeyde hassas bir şekilde desenler oluşturulmalıdır. Bu gibi hassas bölgelerin incelenmesinde hava fırçası (airbrush) kullanımı tavsiye edilmektedir. İkinci olarak, desen oluşturmada sprej boyalar kullanılacaksa yüzeylerden ışık yansımaları ihtimaline karşı mat boyaların kullanılması gerektiğine ve oluşturulan desenli yapının yoğunluğunun(boyutu) sprej boya yoğunluğu ile kontrol edilebilir olduğuna dikkat edilmelidir (Kim 2016).

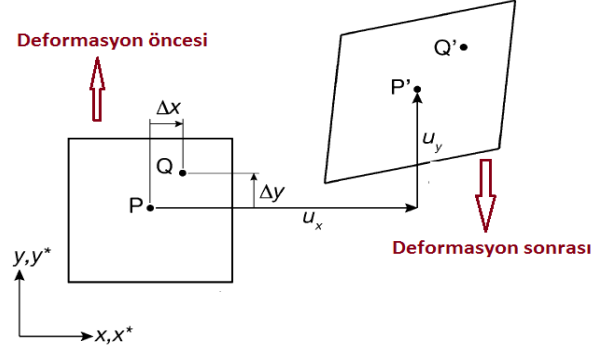
DIC tekniğinde, alt bölge hareketinin takibi, yüzeydeki gri seviye yoğunluğu kullanılarak gerçekleştirildiğinden dolayı yüzeye etki eden herhangi bir düzensiz ışık veya gölge, sonuç üzerindeki hatalara sebep olmakta ve dolayısıyla yüzeyde oluşabilecek gölgeyi en aza indirebilmek için deney esnasında ayrı bir beyaz ışık kaynağı kullanılmaktadır (Kim 2016).

## 1.5.4. Korelasyon metodu için deformasyon teorisi



**Şekil 1.16.** Deforme olmuş ve olmamış görüntülerin gri seviye gösterimi (Chu et al. 1985).

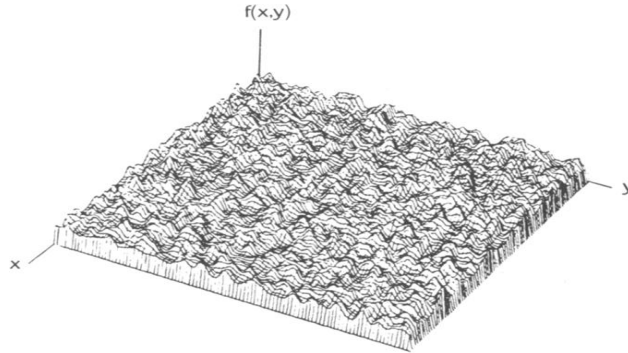
Bu bölümde, Chu et al. (1985) tarafından yapılan çalışmadaki eşitlikler ve yorumlar kullanılarak konu açıklanmaya çalışılmıştır. Bu yöntem, beyaz bir ışık kaynağı ile aydınlatılan bir nesne yüzeyinden elde edilen deformasyon öncesi ve sonrasına ait görüntülerin belirli bir konumundaki ışık yoğunluk yapılarının (patern) kendi görüntüleri içerisinde tek olduğu ve deformasyon aşamalarına ait görüntülerde ise bire bir eşleştiği varsayımına dayanmaktadır. Şekil 1.16'da deformasyon öncesi ve sonrasına ait yüzeylerden yansıyan ışık yoğunluk yapıları gösterilmiştir. Burada,  $f(x, y)$  deformasyon öncesi görüntünün  $(x, y)$  koordinatındaki ışık yoğunluğu,  $f^*(x^*, y^*)$  ise deformasyon sonrası görüntünün  $(x^*, y^*)$  koordinatındaki ışık yoğunluğudur.



**Şekil 1.17.** Alt bölge deformasyonunun gösterimi.

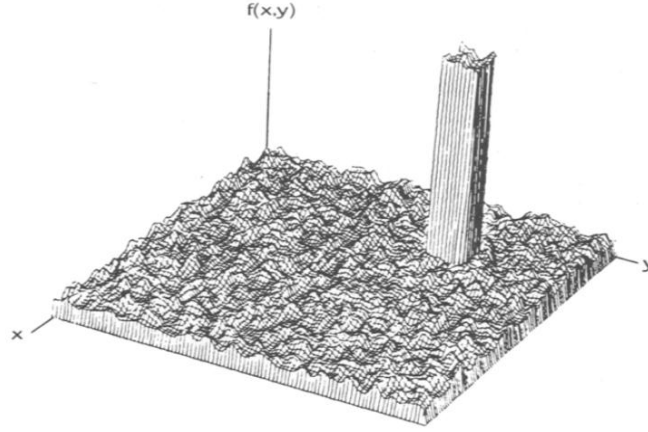
Şekil 1.17'de  $P$  merkezli küçük bir alt bölge ve bu bölgenin  $P^*$  merkezli deforme olmuş şekli gösterilmiştir. Burada, düz çizgilerin deformasyondan sonra düz kalması için alt bölgenin yeterince küçük olduğu varsayılmaktadır.

*Sayısal olarak kaydedilen yoğunluk modellerinin yapısı:* Nesne deformasyonunun analizinde ilk adım olarak yoğunluk yapıları (patern) bir sayısallaştırma kamerası tarafından kaydedilir. Herhangi bir algılama elemanındaki yoğunluk değeri bir piksel (picture element) olarak bilinmekte ve bu değerler 0-255 arasında değişmektedir. Şekil 1.18 'de sayısallaştırılmış değerlerin gösterimi mevcuttur.

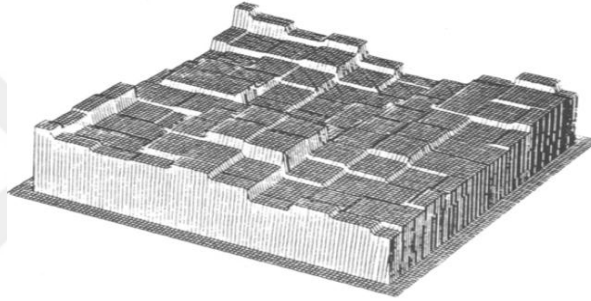


**Şekil 1.18.** Sayısallaştırılmış değerlerin gösterimi (Chu vd 1985).

Şekil 1.19'da, Şekil 1.18'de belirtilen  $10 \times 10$ 'lük bir alt bölgenin yoğunluk değişimi gösterilmiştir.



Şekil 1.19. Yoğunluk değişimi(10×10 piksel) (Chu et al. 1985).



Şekil 1.20. En yakın interpolasyon (zero order) (Chu et al. 1985).

*Çapraz Korelasyon ile Subset Deformasyonun Belirlenmesi:* Deplasmanlar korelasyon katsayısını maximize eden deplasman ve deplasman gradyanları aranarak belirlenir, dolayısıyla korelasyon katsayısının deplasman ve gradyanlarına göre türevi sıfır olmalıdır.

$$C(x, y, z) = \frac{\sum F(x, y)G(x, y, u)}{\sqrt{\sum F(x, y)^2 \sum G(x, y, u)^2}} \quad (1.5)$$

$$u = \left\{ u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y} \right\} : \text{Deplasman vektörü} \quad (1.6)$$

$$\nabla C(u) = \frac{\partial C(u)}{\partial u_{i(1-6)}} = 0 \quad (1.7)$$

## 1. GİRİŞ

---

Çapraz korelasyon fonksiyonunun deplasman ve gradyanlarına göre birinci dereceden türevi Jacobian Matrisi'ni vermektedir.

*Jacobian Matrisi;*

$$\nabla C(u_k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial C}{\partial u_1} \\ \frac{\partial C}{\partial u_2} \\ \frac{\partial C}{\partial u_3} \\ \frac{\partial C}{\partial u_4} \\ \frac{\partial C}{\partial u_5} \\ \frac{\partial C}{\partial u_6} \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Çapraz korelasyon fonksiyonunun deplasman ve gradyanlarına göre ikinci dereceden türevi ise Hessian Matrisi'ni vermektedir.

*Hessian Matrisi;*

$$\nabla \nabla C(u_k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 C}{\partial u_1 \partial u_1} & \frac{\partial^2 C}{\partial u_1 \partial u_2} & \dots & \frac{\partial^2 C}{\partial u_1 \partial u_6} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial u_2 \partial u_1} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 C}{\partial u_2 \partial u_6} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial u_3 \partial u_1} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 C}{\partial u_3 \partial u_6} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial u_4 \partial u_1} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 C}{\partial u_4 \partial u_6} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial u_5 \partial u_1} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 C}{\partial u_5 \partial u_6} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial u_6 \partial u_1} & \dots & \dots & \frac{\partial^2 C}{\partial u_6 \partial u_6} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

$$\nabla \nabla C(u_k) \times (u_{k+1} - u_k) = -\nabla C(u_k) \quad (1.10)$$

Bu iteratif prosedür, deplasman ve gradyanları güncellenerek, korelasyon değeri  $((u_{k+1} - u_k))$  yeterince küçük olana kadar devam eder.

*İteratif metod;* Herhangi bir alt bölge için altı değişkenin doğru değerlerini elde edebilmek için yoğunluk modellerinin (patern) alt bölgeleri karşılaştırılmalıdır. Bu bölümde karşılaştırma yöntemi özetlenmektedir.

Analizde, P merkezli deforme olmamış nesne yüzeyinin sayısallaştırılmış yoğunluk modelinden bir alt bölge (subset) seçilmekte ve daha önce belirtilmiş yöntemlerden biriyle interpolasyon yapılmaktadır. Subset merkezinin deplasman değerleri  $(u, v)$  üzerindeki aralıklar kalan değişkenler sıfır olarak seçilir. Deforme olmamış alt bölge içerisinden seçilmiş noktaların yoğunluk değerleri,  $f(x, y)$ , alt bölgenin distorsiyona uğramadan sadece döndüğü kabulü ile deformasyon sonrası  $x^* = x + u$  ve  $y^* = y + v$  noktalarındaki alt bölge yoğunluk değerleri,  $f^*(x^*, y^*)$ , ile karşılaştırılır. İki alt bölgeyi karşılaştırmak için aşağıdaki eşitlikte verilen çapraz korelasyon katsayısı (C) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

$$C(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}) = \frac{\int_{\Delta M^*} f(x, y) f^*(x + \xi, y + \eta) dA}{\left[ \int_{\Delta M} [f(x, y)]^2 dA \int_{\Delta M^*} [f(x + \xi, y + \eta)]^2 dA \right]^{1/2}} \quad (1.11)$$

$\Delta M$  deformasyon öncesi görüntüdeki alt bölge,  $\Delta M^*$  ise deformasyon sonrası görüntüye ait alt bölgedir.

$$\begin{aligned} \xi &= u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ \eta &= v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{aligned} \quad (1.12)$$

## 1. GİRİŞ

---

$u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$  değerleri bir alt bölge için korelasyon katsayısını (C)

maksimize eden lokal deformasyon değerleridir. Her durumda, sadece  $(u, v)$ 'nin değiştiği kabul edilir ve sonrasında ilk yaklaşım değerleri olan  $(u_1, v_1)$ , yukarıdaki

eşitlik maksimize edilerek hesaplanır.  $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$  değişkenleri için aralıklar,  $u, v$  değerleri

$u_1, v_1$  olarak sabit ve  $\frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}$  ise sıfır kabul edilerek seçilir. Aynı iteratif prosedür  $(u, v$

'yi hesaplamak için kullanılan) görüntü dilatasyon terimlerinin  $(\frac{\partial u}{\partial x})_1, (\frac{\partial v}{\partial y})_1$  tahminini

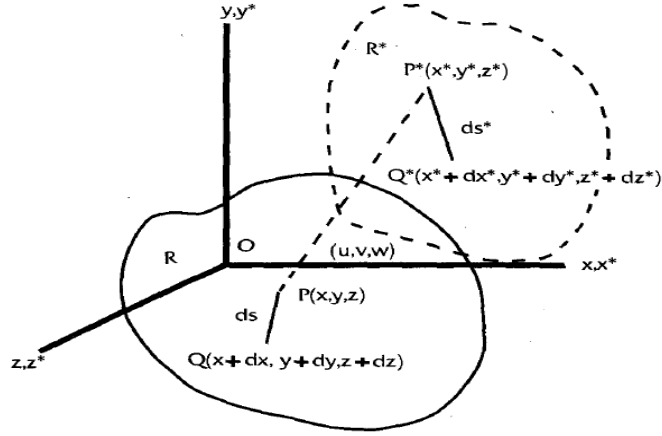
vermek için tekrar edilir. Son olarak ise eşitlik (12) vasıtasıyla  $u_1, v_1, (\frac{\partial u}{\partial x})_1, (\frac{\partial v}{\partial y})_1$

terimleri sabit tutularak  $\frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}$  değerleri için aralıklar seçilir ve alt bölgeler

$(\frac{\partial u}{\partial y})_1, (\frac{\partial v}{\partial x})_1$  ilk tahminler için kıyaslanır.

Tüm prosedür  $u_1, v_1$  etrafında seçilen  $u, v$  değerlerinin daha küçük aralıkları ve sabit tutulan diğer değişkenler ile tekrar edilir. Bu iki parametrelili sistem, her değişkenin fark değeri belirlenen bir hatadan daha düşük olana kadar devam eder. Altı değişkenin tümünün yakınsak değerleri yazdırılır ve ardından yeni bir alt bölge seçilerek yukarıdaki prosedür ilgili tüm alt gruplar analiz edilinceye kadar tekrarlanır.

*Nesne deformasyonları;* Bu kısımda bir çok kitapta tartışılan teori (Novozhilov 1861; Fung 1965) hakkında ve deney mekaniğinde kullanılmak üzere dijital korelasyon yönteminin geliştirilmesinin anlaşılabilmesi için açıklamalar yapılmıştır.



**Şekil 1.21.** Deformasyon öncesi ve sonrasına ait PQ hattının gösterimi (Chu et al. 1985).

Şekil 1.21 'de gösterildiği gibi deformasyon öncesi görüntüdeki diferansiyel olarak küçük bir hat olan  $PQ$ , deformasyon sonrası görüntüde  $P^*Q^*$  hattı olarak kalmaktadır. Ayrıca  $u, v, w$  ise sırasıyla  $x, y, z$  yönlerindeki herhangi bir noktaya ait deplasman bileşenlerini ifade etmektedir.

$$P^* = (x^*, y^*, z^*) = [x + u(P), y + v(P), z + w(P)]$$

$$Q^* = (x^* + dx^*, y^* + dy^*, z^* + dz^*) \quad (1.13)$$

$PQ$  ve  $P^*Q^*$  vektörlerinin uzunlukları aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned} |PQ|^2 &= (ds)^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ |P^*Q^*|^2 &= (ds^*)^2 = dx^{*2} + dy^{*2} + dz^{*2} \end{aligned} \quad (1.14)$$

$dx^* = u(Q) - u(P) + dx$ ,  $dy^* = v(Q) - v(P) + dy$  ve  $dz^* = w(Q) - w(P) + dz$  olmak üzere Denklem 2.13'de yerine yazılırsa;

$$|P^*Q^*|^2 = (ds^*)^2 = [u(Q) - u(P) + dx]^2 + [v(Q) - v(P) + dy]^2 + [w(Q) - w(P) + dz]^2 \quad (2.15)$$



Deplasman fonksiyonlarının lineer Taylor açılımı;

$$\begin{aligned}
 u(Q) - u(P) &\cong \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + \frac{\partial u}{\partial z} dz \\
 v(Q) - v(P) &\cong \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy + \frac{\partial v}{\partial z} dz \\
 w(Q) - w(P) &\cong \frac{\partial w}{\partial x} dx + \frac{\partial w}{\partial y} dy + \frac{\partial w}{\partial z} dz
 \end{aligned} \tag{1.16}$$

Denklem 2.15 vasıtasıyla deformasyon uzunlukları aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
 dx^* &\cong \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + \frac{\partial u}{\partial z} dz \\
 dy^* &\cong \frac{\partial u}{\partial x} dx + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial y}\right) dy + \frac{\partial u}{\partial z} dz \\
 dz^* &\cong \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + \left(1 + \frac{\partial u}{\partial z}\right) dz
 \end{aligned} \tag{1.17}$$

İki boyutlu dijital korelasyon çalışmasında gerinim hesaplamak için kullanılan sonlu gerinim denklemi aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &\cong \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 \right] \\
 \varepsilon_{yy} &\cong \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right] \\
 \varepsilon_{xy} &\cong \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right]
 \end{aligned} \tag{1.18}$$

Yukarıda verilen eşitlik genel niteliğe sahip olsa da dijital görüntü işleme alanındaki kullanımına özgü varsayımlara dikkat edilmelidir. İlk olarak düzlem dışı deplasmanın karakteristik yoğunluk yüzeylerinin düzlem içi deformasyonunu veya deplasmanını etkilemediği ve ikinci olarak ise düzlem dışı deplasman türevlerinin düzlem içi deplasman türevlerinden çok daha küçük olduğu varsayımları yapılarak denklem 1.18 oluşturulmuştur.

### **1.5.5. DIC metodunun yapıştırma bağlantılarının analizine uygulanması:**

DIC tekniği; otomotiv, havacılık, elektronik endüstri, rüzgar ve güneş enerjisi, malzeme bilimi, inşaat ve biyomekanik gibi birçok araştırma alanında kullanılmaktadır. Bu tekniğin farklı kullanım alanlarındaki etkinliğinden dolayı yapıştırma bağlantılarının analizinde de kullanılabilirliği birçok araştırmacı tarafından incelenmiş ve başarılı sonuçların elde edildiği birçok çalışma literatüre kazandırılmıştır.

Nunes (2010) tarafından tek tesirli bindirme bağlantısının yapıştırıcı tabakasındaki kayma modülü DIC yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Guo et al. (2011) tek tesirli bindirme bağlantısında yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler arasındaki ara yüzey davranışını yine bu yöntem ile incelemişlerdir. Goutianos and Drew (2007) yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme ara yüzeyindeki ayrılmayı gözlemlemek için DIC vasıtasıyla ara yüzey davranışını incelemişlerdir. Wang et al. (2009) tek tesirli bindirme bağlantısında ilgilenilen alana ait eksenel ve kayma gerinim dağılımlarını DIC tekniği ile elde etmişler ve sonlu elemanlar yöntemi vasıtasıyla DIC ile elde ettikleri sonuçların karşılaştırmasını yaparak iki yöntem arasında iyi bir uyum olduğunu belirtmişlerdir. Haghani et al. (2009) tarafından yapıştırma bağlantılarındaki geometrik modifikasyonların bağlantının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

DIC yönteminin yapıştırma bağlantılarının analizinde kullanımına dair yukarıda birkaç örnek verilmiştir. Bu yöntem ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında detaylı bilgiler tezin 2. bölümündeki literatür araştırması kısmında yer almaktadır.

### **1.5.6. DIC yöntemindeki hata kaynakları:**

DIC tekniğinin birçok uygulamada başarılı bir şekilde kullanılmasına rağmen bu yöntemin deformasyon ölçümlerinde sapmalara sebep olabilecek hata kaynakları mevcuttur. Bu hata kaynakları genel olarak ikiye ayrılmaktadır (Kim 2016).

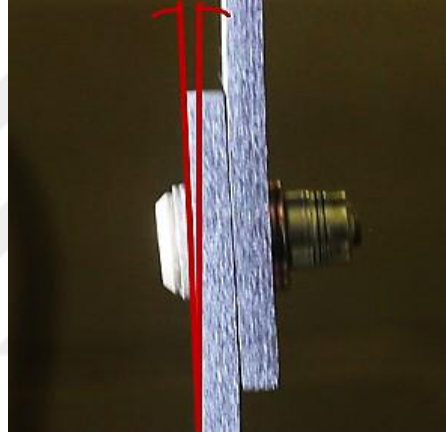
- Numune, yükleme ve görüntü kaynaklı hatalar,
- Analizde kullanılan fonksiyonlardan veya algoritmalarından kaynaklanan hatalar.

## 1. GİRİŞ

---

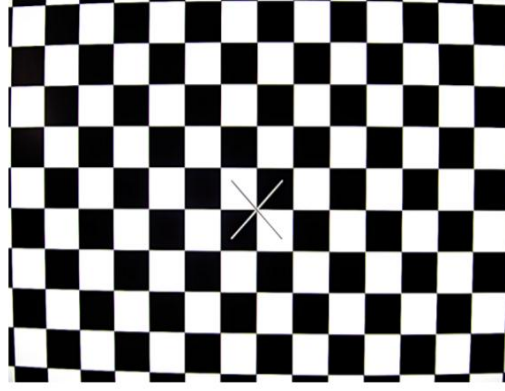
Analiz için gerekli olan desen modelinin boyutu ilgilenilen alana bağlı olarak belirlenmelidir. Lecompte et al. (2006) tarafında yapılan bir çalışmada, ilgilenilen alanın boyutu küçüldükçe daha küçük bir desen boyutunun kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. Ayrıca düşük yoğunluklu desen modelinin büyük standart sapmalara sebep olacağı Pan et al. (2008) tarafından belirtilmiştir.

Şekil 1.22’de gösterildiği gibi tek tesirli bağlantının çekme yüküne maruz kalması durumunda eğilmeden dolayı düzlem dışı deplasman oluşmakta ve bu düzlem dışı deplasman özellikle 2D-DIC tekniğinde düzlemsel deplasman ve gerinim alanlarının ölçümünü etkilemektedir (Sutton et al. 2008).



**Şekil 1.22.** Statik çekme testi esnasında oluşan düzlem dışı deplasman (Kim 2016).

Objektiften kaynaklanan görüntü bozulması da bir hata kaynağıdır. Şekil 1.23’te görüntüdeki distorsiyon (bozulma) etkisi gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi görüntü merkezinde önemli bir bozulma olmazken kenarlarda ciddi bozulmalar oluşmaktadır. Objektif, daha geniş bir görüş alanını küçük bir kamera algılayıcı alanına odaklamak amacıyla konveks ve iç bükey merceklerden oluştuğundan, objektifin bozulması kaçınılmazdır. Bu hataları en aza indirmenin iki yolu vardır. Birincisi telesentrik mercekleri kullanmak, diğeri ise DIC yazılımı ile bozulma etkisini telafi etmektir. Telesentrik lensler, paralaks efekti adı verilen perspektif çarpıklığının etkisini ortadan kaldırır, böylece aynı nesne, çalışma mesafesine bakılmaksızın aynı boyutta görülebilir (Edmund Optics 2016). Diğeri bir yol ise objektif karakterizasyonunu yazılıma girişidir. Bu durumda yazılım, basit bir testle objektif karakterizasyonunu elde etmeyi sağlayan bir fonksiyonu içermektedir (Kim 2016).



**Şekil 1.23.** Lens distorsiyonunun gösterimi (Kim 2016).

Görüntü kirliliği (noise) başka bir hata kaynağıdır. Görüntü kirliliği, atış kirliliği (shot noise) ve termal kirlilik gibi farklı kaynaklardan kaynaklanan rasgele renk veya kontrastlı bir bilgidir. Atış kirliliği, kamera sensöründeki foton duyarlılığı değişiminden kaynaklanmaktayken termal kirlilik ise kamera sensörünün sıcak olması nedeniyle ortaya çıkmaktadır (Kim 2016).

Analiz esnasında ise sayısal hatalar oluşmaktadır. Bu hataların oluşmasındaki en önemli faktör alt bölge boyutudur. Daha önce de belirtildiği gibi, her alt kümenin benzersiz bir gri yoğunluk modeline sahip olması için daha büyük bir alt küme boyutu önerilir. Bununla birlikte, yer değiştirme alanındaki ayrıntılı bilgileri yakalamak için daha küçük bir alt küme boyutu daha iyidir. Bundan dolayı optimum bir boyut belirlenmelidir (Kim 2016).

Bir başka hata kaynağı ise uygun olmayan korelasyon tipinin seçimidir. Hangi kriterin farklı durumlar için en iyi olduğunu doğrulamak için yapılan herhangi bir çalışma yoktur. Ancak ZNSSD (zero-mean normalized sum of squared differences) kriteri, normleştirilmiş toplam kare fark kriteri (NSSD) veya çapraz korelasyon kriteri (CC) gibi diğer ölçütlerle karşılaştırıldığında test ortamları tarafından daha az etkilendiği belirtilmiştir (Tong 2005). Alt piksel interpolasyonu bir hata kaynağıdır ve analiz için yüksek dereceden terimleri kullanılması durumunda daha yüksek doğruluk sağlanır. Fakat, hesaplama esnasındaki sayısal hatalar kaçınılmazdır. Yine bir başka hata kaynağı ise şekil fonksiyonunun seçimidir. Fonksiyon seçimi için mutlak bir kural yoktur ve genellikle kullanıcının deneyimlerine veya yazılım kılavuzlarının önerisine bağlıdır (Kim 2016).

## 1. GİRİŞ

---

DIC tekniğiyle elde edilen sonuçların doğruluğu; alt-piksel optimizasyon algoritması, alt bölge Şekil fonksiyonu, alt bölge boyutu, alt-piksel yoğunluk interpolasyon Şeması, görüntü paraziti ve kamera objektif bozulması (lens distorsiyonu) gibi birçok faktörden etkilenebilmektedir (Pan et al. 2008). Schreier and Sutton (2002), DIC'deki eksik Şekil fonksiyonlarının sebep olduğu sistematik hataları, Pan et al. (2006), alt piksel kayıt algoritmalarının yer değiştirme tahminleri üzerindeki performansını, Zhang et al. (2006) ve Yoneyama et al. (2006), ise lens distorsiyonunun DIC deplasman ölçümlerine etkisini incelemişlerdir.

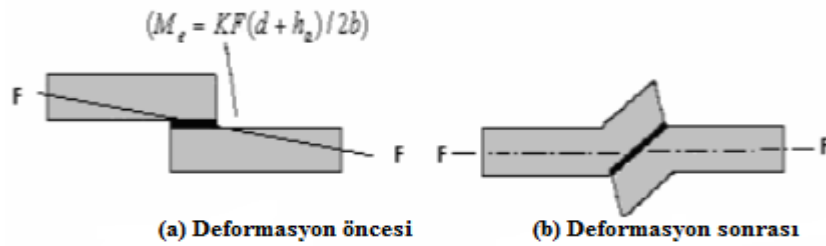


### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapıştırma bağlantılarının karmaşık bir gerilme analizi vardır ve 60 yılı aşkın bir süredir bu konuda nümerik, analitik ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bu bölüm mevcut çalışmaların genel bir incelemesini içermektedir.

Yapıştırma bağlantılarının analitik analizinin ilk girişimleri Volkersen (1938) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Volkersen, dayanımı yüksek iki malzemeyi, lineer elastik bir katı modeline sahip ve sadece kayma gerilmelerinden dolayı deforme olduğunu kabul ettiği bir yapıştırıcı ile tek tesirli bağlantı konfigürasyonunda birleştirerek bir analiz gerçekleştirmiştir. Analiz sonucunda yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmelerinin bindirme hattının her iki ucunda en yüksek değeri aldığı belirtilmiştir.

Goland and Reissner (1944) tarafından gerçekleştirilen klasik yapıştırma modelinde yapıştırıcının gerilme analizi yapılmıştır. Goland and Reissner (1944) yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin elastik bir malzeme gibi davrandığını kabul ederek Şekil 2.1'de gösterildiği gibi bağlantının eksantrik yüklenmesi sonucunda yapıştırıcı tabakasındaki oluşan çekme gerilmelerini dikkate alarak tek tesirli bindirme bağlantısının analitik analizi üzerine çalışmışlardır.



**Şekil 2.1.** Tek bindirme bağlantısında oluşan yüklem hattı eksantrikliğinin gösterimi (Goland and Reissner 1944).

Kinloch (1987) tarafından hazırlanan 'Adezyon ve Yapıştırıcılar' adlı yayında, yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışları, kırılma mekaniği, yapıştırma yüzeylerinin hazırlanması, yapıştırıcıların sertleşme mekanizmaları ve adezyon olayının açıklanmasında kullanılan teoriler hakkında bilgiler verilmiştir.

Krenk et al. (1996), alüminyum alaşımlı plakaları epoksi yapıştırıcı ile birleştirerek oluşturulan bağlantıların statik ve yorulma mukavemet değerlerini sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel çalışmalarla incelemişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığı değiştirilerek gerçekleştirilen analizler sonucunda statik deneyler, yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla kopma mukavemetinin arttığını gösterirken yorulma deneyleri, kalınlığın değişmesiyle sürekli mukavemet değerinin değişmediğini göstermiştir.

Kinloch (1997), tarafından hazırlanan ‘Mühendislikte Yapıştırıcılar’ adlı yayında yapıştırıcıların kullanımlarındaki gelişmeler üzerinde durulmuştur. Adezyon, kohezyon ve kürleşme olayları açıklanmaya çalışılmıştır. Yapıştırıcıların kullanım nedenleri ve kullanımlarını kısıtlayan faktörler vurgulanarak konstrüktif olarak dikkat edilmesi gereken kurallar belirtilmiştir. Bunların dışında çevresel faktörlerin yapıştırma bağlantıları üzerindeki etkisi de açıklanmıştır.

Yapıştırıcıların mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik yapılan çalışmalardan biri de Kadioğlu vd (2002) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada farklı rijitliklere sahip beş farklı ticari yapısal yapıştırıcı TAST deney yöntemi ile test edilmiştir. TAST deney yöntemi, seçilen malzeme ve bu malzemeye ait ölçülerin uygunluğu vasıtasıyla (arzu edilen durum, rijit malzeme ve kısa bindirme uzunluğudur) yapışma alanında üniform bir kayma gerilmesi dağılımı oluşumundan dolayı hem sünek hem de rijit yapıştırıcıların mekanik karakterizasyon deneylerinde kullanılabilir. Bundan dolayı bu çalışmada çelik malzemeleri ile bindirme bağlantıları oluşturulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda TAST deney yönteminin yapıştırıcı özelliklerini içeren geniş bir yelpazede sürdürülebilir ve tekrarlanabilir bir metot olduğu belirtilmiştir.

Aydın (2003) tarafından hazırlanan doktora tezinde, alüminyum alaşımlı malzemeler ile FM73 ve SBT 9244 yapıştırıcılar kullanılarak tek tesirli bindirme bağlantısı oluşturulmuştur. Yapıştırılan malzeme kalınlığı ve bindirme uzunluğunun bağlantı dayanımı üzerine etkisi çekme ve dört nokta eğme deneyleriyle incelenmiştir. Her iki yapıştırıcı türü ile oluşturulan bağlantılar için çekme deneylerinden elde edilen kayma dayanımı ve hasar yükünün malzeme kalınlığı ve bindirme uzunluğuna bağlı olduğu ve her iki faktörün de artışı ile bu değerlerde de artış sağlığı görülmüştür. Ayrıca Aydın (2003) bu tezinde, non-linear sonlu elemanlar yöntemini kullanarak

gerçekleştirdiği analizler sonucunda, tahmin edilen hasar yüklerinin, deneysel çalışmalardan (çekme ve dört nokta eğme) elde edilenler ile iyi bir uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

Malzeme yüzey deformasyonlarının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri olan DIC ile deformasyonları belirlemede çözüm için uygun algoritmanın kullanılması oldukça önemlidir. Doğru deplasman ölçümlerinin elde edilebilmesi amacıyla birçok araştırmacı tarafından farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Bu yönde yapılan çalışmalardan biri de Hung and Voloshin (2003) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada DIC ile yüzey deplasmanlarının belirlenmesi için hızlı ve basit bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritmanın uygunluğunu araştırmak için iki farklı numune kullanılarak tek eksenli çekme ve basma testleri yapılmıştır. Bu algoritmanın kullanılması ile elde edilen sonuçlar Newton-Raphson ve Enhanced Sequential Similarity Detection Algorithm (ESSDA) algoritmalarıyla kıyaslanmış ve deneysel datalar ile teorik çözümler arasında iyi bir uyum olduğu belirtilmiştir.

Temiz (2006) yaptığı bir çalışmada, bindirmenin yapıldığı bölgenin serbest uçlarında esnek, orta kısmında ise sert karaktere sahip olan iki çeşit yapıştırıcı kullanarak oluşturduğu tek tesirli bindirme bağlantısının sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme analizini gerçekleştirmiştir. Analiz sonucunda serbest uçlarda kullanılan esnek yapıştırıcının gerilme yığılmalarını azalttığı ve bağlantı dayanımını arttırdığını gösterilmiştir.

Malzeme yüzeyindeki deplasmanların belirlenmesinde kullanılan DIC optik ölçüm tekniğinin doğruluk hassasiyeti; alt bölge boyutu, alt bölge şekil fonksiyonu gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Pan et al. (2008) tarafından, bu faktörler içerisinde önemli bir yeri olan alt bölge boyut seçiminin deplasman ölçümleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada kare farklarının toplamı (Sum of Squared Differences (SSD)) kriterine dayanan iki boyutlu teorik bir model kurulmuştur. Bu teorik model, DIC'nin deplasman ölçüm hassasiyetinin alt bölge yoğunluk gradyanlarının karesi toplamına (Sum of Square of Subset Intensity Gradients (SSSIG)) dayalı olarak belirtilebileceğini ifade etmektedir. Ayrıca bu çalışmada, SSSIG algoritmasının



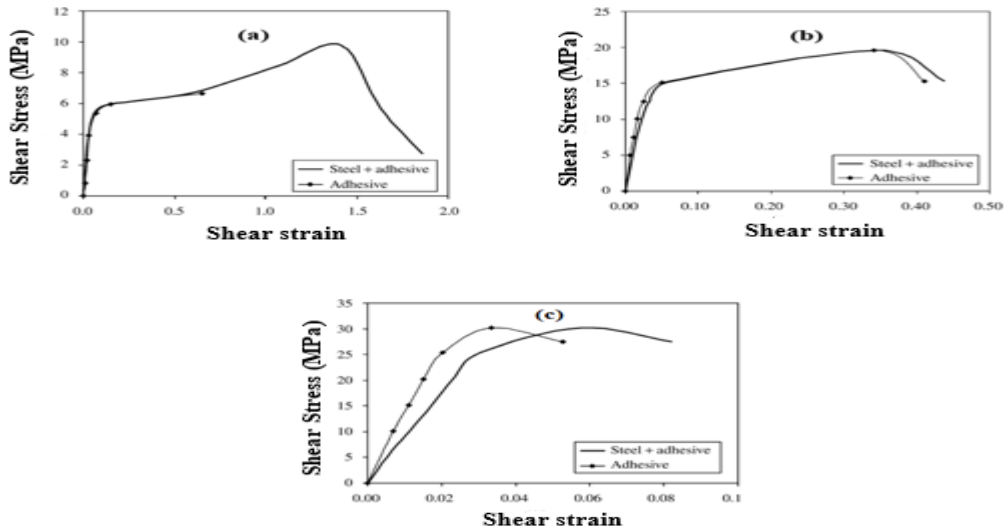
doğruluğunu tayin etmek için sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçların kurulan teorik model ile uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir.

Yapıştırıcıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan biri Cognard et al. (2008) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, bağlantı formundaki deney numuneleri kullanılarak yapıştırıcıların kayma mekanik özelliklerini tespit etmede kullanılan standart deneysel yöntemlerden TAST ve modifiye edilmiş Arcan metodu kullanılarak inceleme yapılmıştır. Her iki yöntem için de yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar doğrultusunda şu sonuçlara ulaşılmıştır: TAST numunelerinde yapıştırıcının non-lineer davranışı dikkate alınarak gerçekleştirilen nümerik çalışmalar, yapıştırıcının serbest kenarı yakınındaki yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeyine yakın lokasyonlarda plastik bölgelerin konum ve dağılımı göstermiştir. Bu kenar etkilerinden dolayı yapıştırıcının kayma mekanik özelliklerinin doğru tespit edilemeyeceği ve ayrıca aynı numunelere ait deneysel çalışmalarda bu bölgelerde hasar başlangıcının olduğunu belirtilmiştir. Modifiye edilmiş Arcan metodu ile yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda ise yapıştırma bölgesinde daha homojen bir gerilme dağılımı elde edilebildiğinden dolayı diğer metoda göre daha güvenilir bir ölçüm metodu olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca Arcan ve TAST metodlarına ait ölçümlerdeki farklılığın TAST metodundaki kenar etkileri olduğu belirtilmiştir.

da Silva et al. (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada yapıştırıcıların mekanik özelliklerini için kullanılan TAST deney yöntemi deneysel ve nümerik olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada; çok esnek akrilik yapıştırıcı (DP-8005), çok rijit epoksi yapıştırıcı (Araldite AV138/HV998) ve orta rijitlikte bir epoksi yapıştırıcı (Araldite 2015) olmak üzere üç farklı yapıştırıcıdan üretilen bulk numunelerin çekme testi ile bu yapıştırıcıların elastik özellikleri belirlenmiştir. Sonrasında bu yapıştırıcılar ve çelik malzemelerin kullanılmasıyla oluşturulmuş standartlara uygun boyutlardaki TAST bağlantı numuneleri çekme yüküne maruz bırakılarak test edilmiştir. Çalışmada bağlantı formundaki numunelerden yapıştırıcıların deplasmanını belirlemek için klasik ekstansometre (clip gauge) ve video mikroskobu kullanılmıştır. Klasik ekstansometre kullanılması durumunda elde edilen deplasman dataları hem yapıştırıcı hem de yapıştırılan malzemeye ait deplasmanların toplamını içerdiğinden dolayı sadece

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

yapıştırıcı deplasmanının belirlenmesi için deneysel düzenlemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada video mikroskobu ve sonlu elemanlar analizlerinin kullanılması ile gerekli düzenleme sağlanmıştır. Video mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilen optik yöntemde deney süresince elde edilen görüntülerin uzaysal korelasyon ile yapıştırıcı deplasmanı tespit edilmiştir. Şekil 2.2’te video mikroskobundan elde edilen eğri ‘adhesive’ ve ekstansometreden elde edilen eğri ‘steel+adhesive’ üç farklı yapıştırıcı için gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde çok esnek yapıştırıcı ve orta süneklikte yapıştırıcı için iki eğrinin hemen hemen örtüştüğü, rijit yapıştırıcıda ise iki eğri arasında önemli bir fark olduğu gösterilerek esnek yapıştırıcılarda yapıştırılan malzeme deformasyonunun ihmal edilebilir düzeyde olduğu sonucuna varılmıştır. Optik yöntem kullanılarak gerçekleştirilen düzeltme ile yeterli doğruluk sağlanacağı ifade edilmesine rağmen bu yöntemin maliyet ve temin açısından sorun teşkil etmesinden dolayı nümerik analiz ile sadece yapıştırıcıya ait deplasmanın belirlenmesinin daha uygun olduğu belirtilerek nümerik analiz gerçekleştirilmiş ve yeterli doğruluğa sahip gerekli deplasman dataları elde edilmiştir.

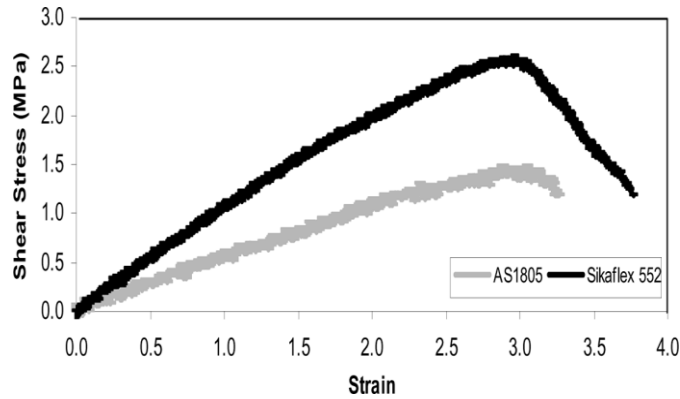


**Şekil 2.2.** Kayma gerilmesi – kayma şekil değişim eğrileri; (a) DP8005, (b) Araldite 2015, (c) Araldite AV138/HV998 (da Silva et al. 2008).

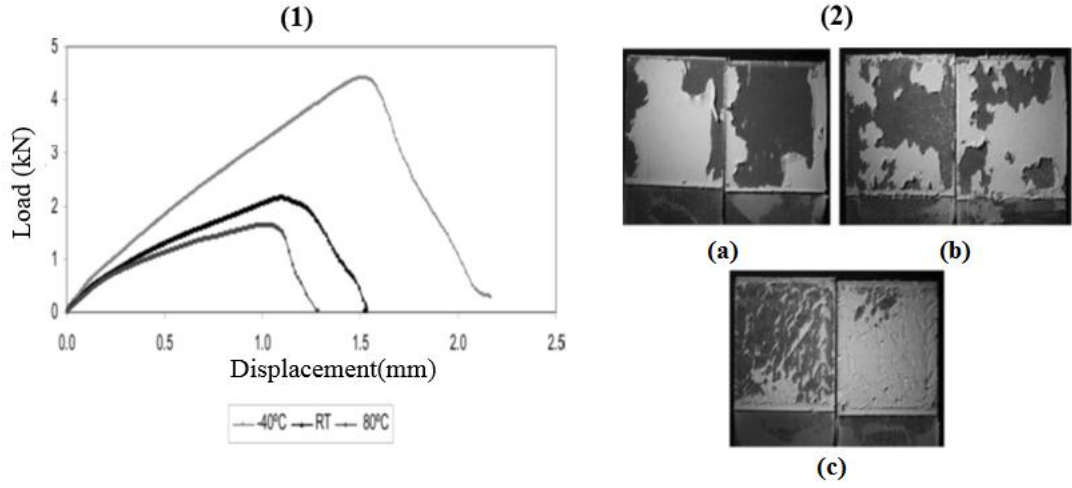
Banea ve da Silva (2009), tarafından yapılan çalışmada farklı özelliklere sahip iki esnek yapıştırıcının (Sikaflex 552 ve AS1805 RTV) performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada yapıştırıcıların kayma mekanik özelliklerini belirlemek için TAST numuneleri, yapıştırıcıların bağlantılardaki performanslarını değerlendirmek için

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

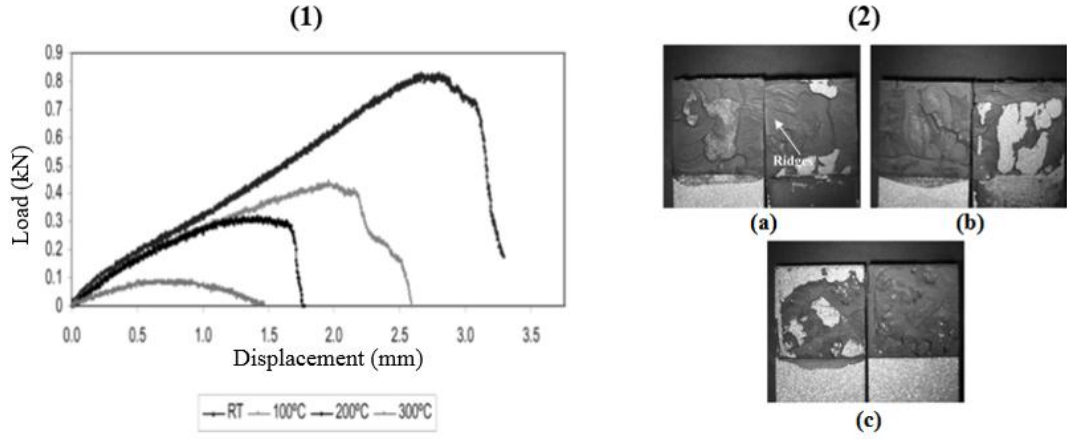
ise tek tesirli bindirme bağlantıları (SLJ) üretilerek test edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yapıştırıcılar esnek karaktere sahip olduklarından dolayı TAST deneyinde kullanılan MTS ekstansometresinin ölçtüğü deplasman değerlerinde yer alan yapıştırılan malzemelerinin deplasman değeri ihmal edilebilecek düzeyde olduğundan dolayı yapıştırıcılara ait deplasman değerlerini belirlerken herhangi bir düzeltme yapılmamıştır. İki yapıştırıcıya ait kayma gerilmesi – kayma şekil değişim eğrileri Şekil 3.3'te gösterildiği gibi bulunmuştur. Oluşturulan SLJ bağlantılarındaki yapıştırıcıların kayma dayanımı; farklı sıcaklıklar, farklı bindirme uzunlukları ve yapıştırıcı kalınlıklarında test edilmiş ve kayma dayanımlarının bu faktörlere bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi Sikaflex 552 yapıştırıcısı ile oluşturulmuş SLJ bağlantıları oda sıcaklığı, -40 ve 80°C'de test edilmiş ve artan sıcaklığa bağlı olarak bağlantının kayma dayanımında bir düşüş olduğu ve yüzeylere ait kırılma modlarında farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Diğer yapıştırıcı ise oda sıcaklığı, 100, 200 ve 300°C'de test edilmiş ve sıcaklığa bağlı olarak bağlantı dayanımı ve kırılma modlarında değişim olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.5) Ayrıca her iki yapıştırıcı için de SLJ numunelerindeki bindirme uzunluğunun artmasıyla kırılma yükünde artış olduğu ve yapıştırıcı kalınlığı arttıkça düşük dayanıma sahip esnek Sikaflex 552 yapıştırıcısı ile oluşturulan SLJ bağlantısının dayanımının azaldığı diğer yapıştırıcıyla oluşturulmuş bağlantıya ait dayanımın ise arttığı ifade edilmiştir.



**Şekil 2.3.** TAST deneyi ile elde edilen kayma gerilmesi(MPa) - kayma birim şekil değişimi (%) diyagramı (Banea and da Silva 2009).



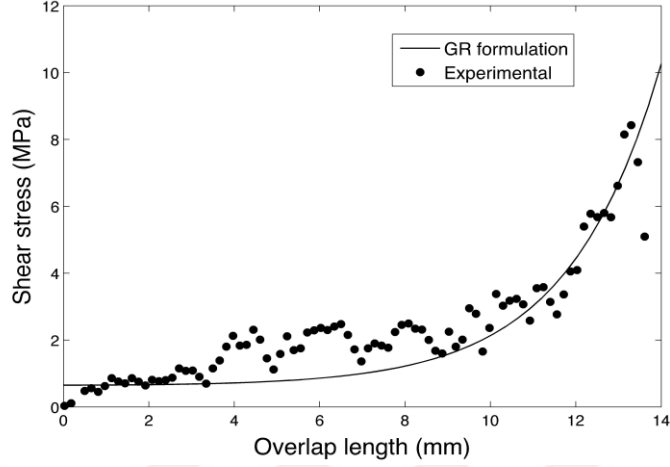
**Şekil 2.4.** (1) Sikaflex 552 ile oluşturulan SLJ bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki yük-deplasman eğrisi, (2) bu sıcaklıklara ait kırılma yüzey modları (a; -40, b; oda sıcaklığı, c; 80°C) (Banea ve da Silva (2009)).



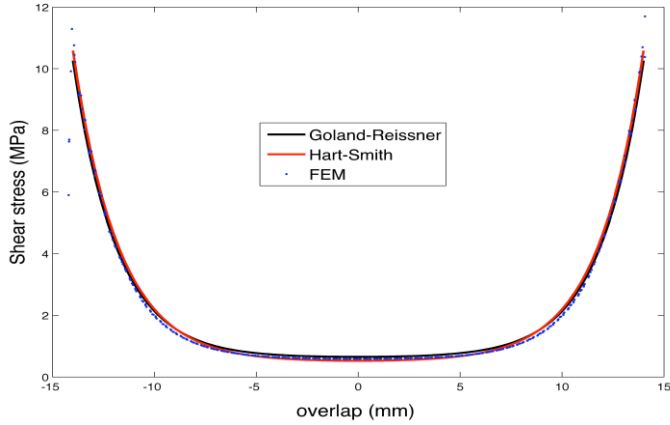
**Şekil 2.5.** (1) AS1805 RTV ile oluşturulan SLJ bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki yük-deplasman eğrisi, (2) bu sıcaklıklara ait kırılma yüzey modları (a; 100, b; 200, c; 300°C) (Banea ve da Silva (2009)).

Yapıştırma bağlantılarının deplasman, gerinim ve gerilme dağılımlarını deneysel olarak incelemek amacıyla Cunha et al. (2009), tarafından bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, deneysel analiz DIC tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Goland and Reissner (1944), ve Hart – Smith (1973) tarafından geliştirilen teorik çözümler ile kıyaslanmıştır. Şekil 2.6 teorik çözümler ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Ayrıca Cunha et al. (2009) tarafından yapılan bu çalışmada yukarıda bahsi geçen teorik çözümleri sayısal analiz ile kıyaslamak amacıyla sonlu elemanlar analizi vasıtasıyla nümerik analiz de gerçekleştirilmiş ve Şekil 2.7’de gösterildiği gibi teorik çözümler ile nümerik analiz arasında da iyi bir uyum olduğunu belirtilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda,

yapıştırma bağlantılarının mekaniğini anlamada deneysel çalışmaların da kullanılabilceği kanısına varılmıştır.



**Şekil 2.6.** Goland ve Reissner (1944) ve deneysel analizin bindirme bölgesi boyunca oluşan kayma gerilmesi açısından karşılaştırılması (Cunha et al. 2009).



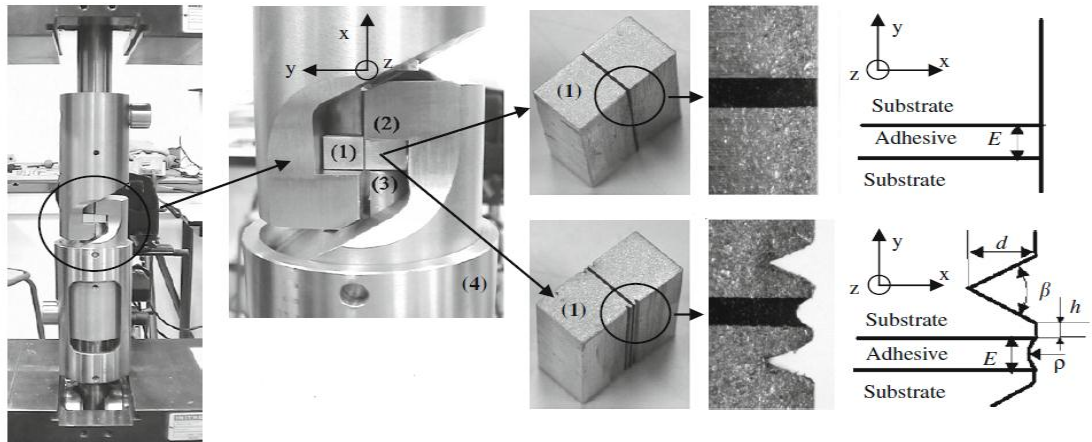
**Şekil 2.7.** Bindirme bölgesi boyunca oluşan kayma gerilmesi dağılımının teorik çözümler ve nümerik analiz ile karşılaştırılması (Cunha et al. 2009).

Çevresel faktörlerin yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri üzerine etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Şen ve Aldaş (2010) bu yönde bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, yapıştırıcı ve pim bağlantısı kullanılarak oluşturulmuş karma bağlantıların farklı üniform sıcaklıklardaki mekanik özellikleri üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Analiz sonucunda 40 °C, 50 °C, 60°C, 70 °C üniform sıcaklıklar ve çekme yüküne maruz bağlantılarda sıcaklıktaki artış miktarına bağlı olarak şekil değişimleri ve gerilmelerin arttığı belirtilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Geometrik parametrelerin yapıştırma bağlantıları üzerindeki etkileri hususunda Turan ve Kaman (2010) bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada kompozit levhaların yapıştırıcı ile birleştirilmesi ile oluşturulan tek tesirli bindirme bağlantısının sayısal ve deneysel analizi gerçekleştirilmiştir. Sayısal çözümde bağlantının ilerlemeli hasar analizi için kompozitlerde Hashi Hasar Kriteri, yapıştırıcıda ise Maksimum Asal Gerilme Kriteri kullanılarak ANSYS sonlu elemanlar paket programı vasıtasıyla sayısal hasar yükleri tespit edilmiştir. Ayrıca sayısal analizin doğruluğunun kontrolü açısından deneysel çalışmalarda yapılmıştır. Gerçekleştirilen analizler sonucunda bağlantı geometrisi faktörlerinin bağlantı mukavemetini etkilediği gösterilmiştir. Bu etki; bindirme mesafesi, yapıştırıcı tabaka kalınlığı ve levha genişliğindeki artışa bağlı olarak bağlantının hasar yükünde artış ile ifade edilmiştir.

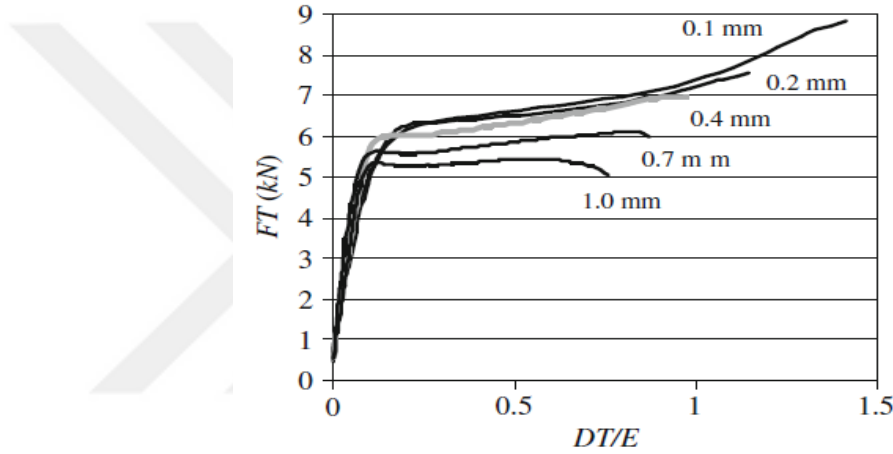
Literatür incelendiğinde, yapıştırıcıların kayma mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla bağlantı formundaki numunelerin yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmüştür. Bu numunelerin farklı geometrik konfigürasyonlarında kullanılması sonucunda ölçülen mekanik özelliklerde değişim olmaktadır. Bu geometrik konfigürasyonların etkilerini incelemek amacıyla Cognard et al. (2010) tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yapıştırıcı kalınlığının kayma yüküne maruz numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Alüminyum malzemeler ve epoksi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan bağlantı, deneysel ve nümerik olarak analiz edilmiştir. Deneysel çalışmada, yapışma bölgesindeki uç efektlerin etkisini sınırlamak için modifiye edilmiş TAST deney yöntemi kullanılmıştır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Modifiye edilmiş TAST örneği (Cognard et al. 2010).

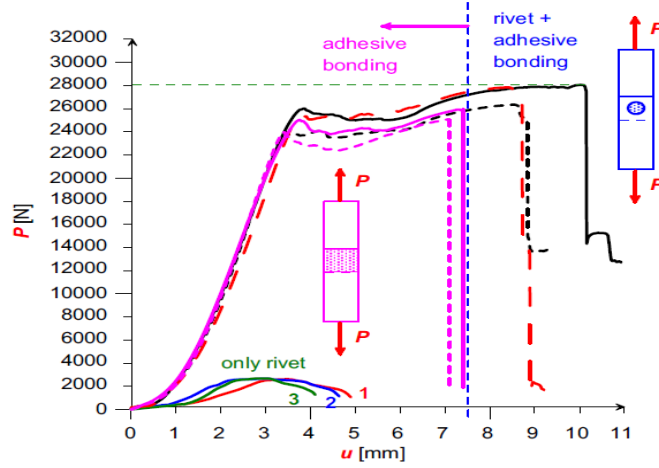
## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapıştırıcı kalınlığı 0.1, 0.2, 0.4, 0.7 ve 1 mm olarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda, artan yapıştırıcı kalınlığının bağlantının maksimum deformasyonunu azalttığı gösterilmiştir (Şekil 2.9) Ayrıca yapıştırıcı kalınlığındaki artışa bağlı olarak uç efektlerin etkisi ve dolayısıyla yapıştırıcının serbest uçlarına yakın konumlarda çatlak başlangıcı riskinin arttığı ifade edilmiştir. Nümerik çalışmada ise, yapıştırıcının non-linear davranışı dikkate alınarak gerçekleştirilen analizde bağlantı kalınlığı boyunca oluşan gerilme dağılımları elde edilmiştir. Bu analiz sonucunda, serbest uçlara yakın kısımlarda plastik deformasyon yığılmasının artması ve buna bağlı olarak bu bölgelerde çatlak oluşumunun daha düşük yük oranlarında görüldüğü belirtilmiştir.



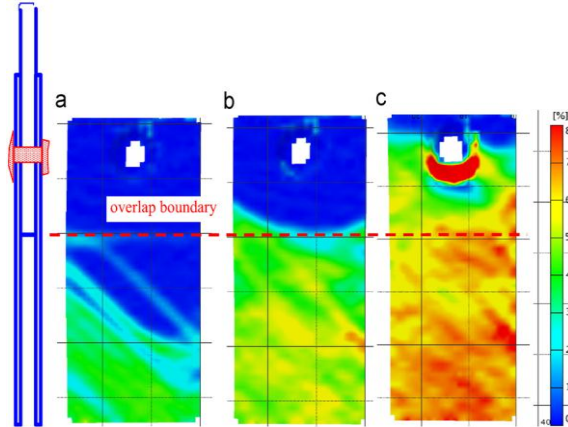
**Şekil 2.9.** Deneysel çalışma sonucu elde edilen farklı yapıştırıcı kalınlıklarındaki yük ve normalleştirilmiş yer değiştirme eğrisi (Cognard et al. 2010).

Yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli düzenlemeler yapılmaktadır. Bu düzenlemelerden biri de yapıştırıcı ve perçin bir arada kullanılarak karma bağlantıların oluşturulmasıdır. Bu yönde Sadowski et al. (2010) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada perçinlerle güçlendirilmiş çift tesirli yapıştırma bağlantısının deneysel ve nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın deneysel kısmında, deplasman dağılımların elde edilebilmesi amacıyla 3D - DIC tekniği kullanılırken nümerik kısmında ise sonlu elemanlar analizini gerçekleştirebilmek için ABAQUS 6.6 yazılımı kullanılmıştır.



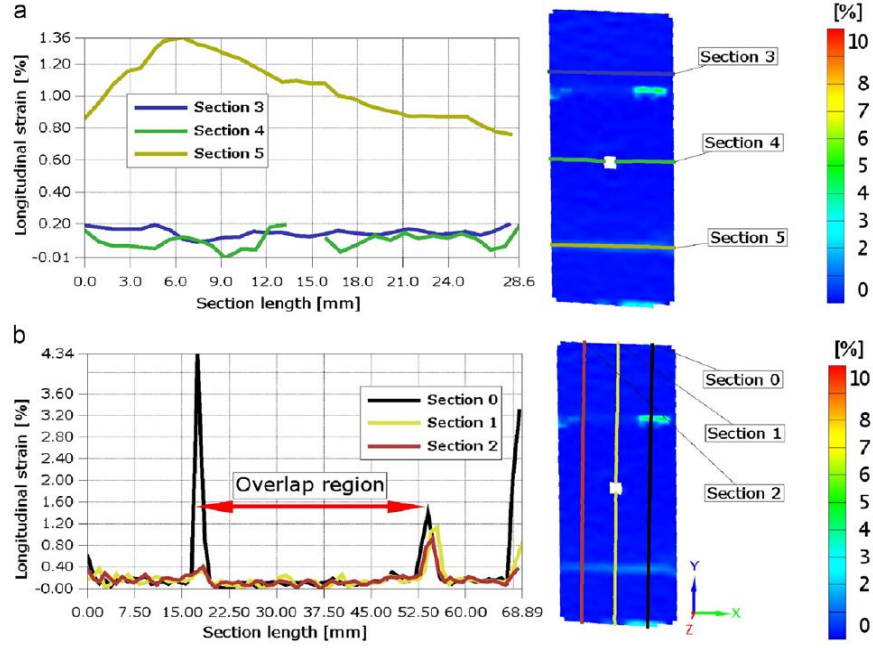
Şekil 2.10. Deneysel yük – deplasman eğrisi (Sadowski et al. 2010).

Şekil 2.10'da farklı konfigürasyonlardan elde edilen bağlantının deneysel yük-deplasman dağılımı gösterilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi yapıştırma bağlantısının, sadece perçin bağlantısına göre çok daha fazla dayanıma sahip olmasına rağmen perçinlerle güçleştirilmiş karma bağlantının sadece yapıştırıcıdan oluşturulan bağlantıya göre enerji absorbesi yaklaşık %35 artmıştır.



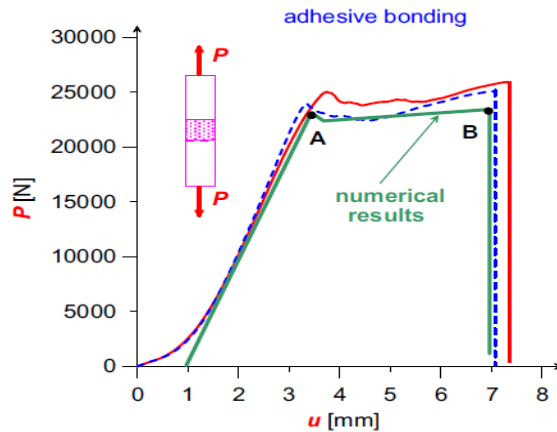
Şekil 2.11. DIC'den elde edilen gerinim dağılımı (Sadowski et al. 2010).





**Şekil 2.12.** DIC tekniğinden elde edilen farklı kesitlerdeki eksenel gerinimler (Sadowski et al. 2010).

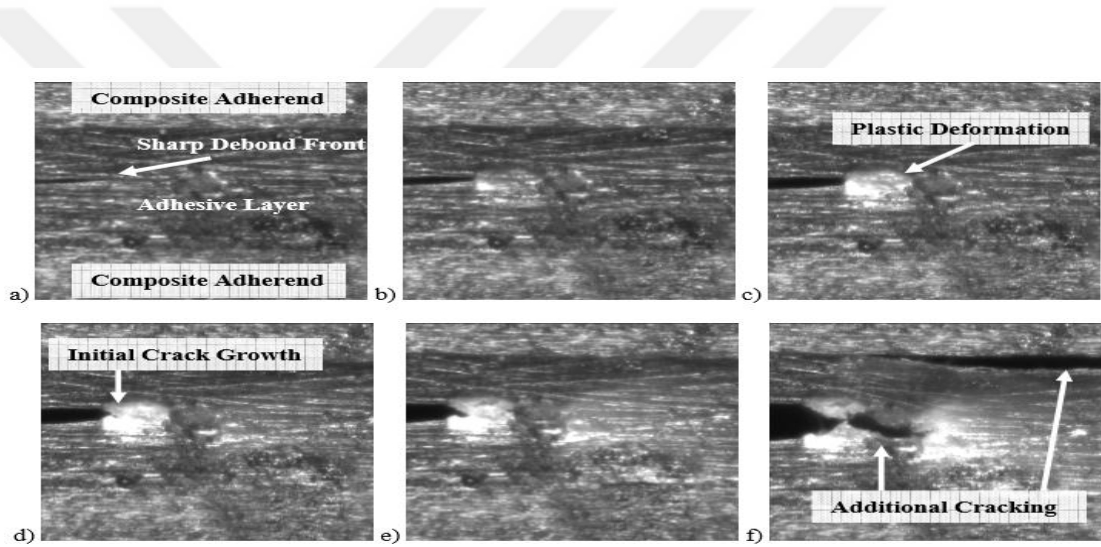
Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 ise DIC’den elde edilen gerinim dağılımı ve değerlerini göstermektedir. Altı farklı kesitten alınan bu gerinim dağılımları incelendiğinde, eksenel gerinimin, bindirme bölgesinin uçlarında kesit alan kalınlığının ani değişiminden dolayı yoğunlaştığı sonucuna varılmıştır. Son olarak ise Şekil 2.13’de gösterildiği gibi deneysel çalışma ve nümerik çalışma arasında iyi bir uyum olduğu belirtilmiştir.



**Şekil 2.13.** Karma bağlantıdaki deneysel ve nümerik yük-deplasman eğrileri (Sadowski et al. 2010).

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Dijital görüntü korelasyon tekniği ile birçok mühendislik alanında belirli değerlerin ölçüm ve değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Bu alanlardan biri de yapıştırma bağlantılarıdır. Yapıştırma bağlantılarının kırılma mekaniğinde DIC'nin kullanımına dair Colavito and Madenci (2010) bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş DCB numunelerinin Mod-I kırılma analizi DIC tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.14'te de gösterildiği gibi kompozit malzemelerin birleştirilmesiyle oluşturulan yapıştırma bağlantılarının çatlak başlangıcı ve gelişimi, DIC tekniğinin kullanımına imkan sağlayabilen deneysel bir sistem kurularak incelenmiştir. Ayrıca numunelere ilave yüzey işlemleri yapılarak (DIC ile yüzeyin incelenebilmesi için gerekli yüzey işlemleri) çatlak ucu etrafındaki deplasman alanlarının elde edilmesinde de bu yöntemin kullanılabilmesi ifade edilmiştir.

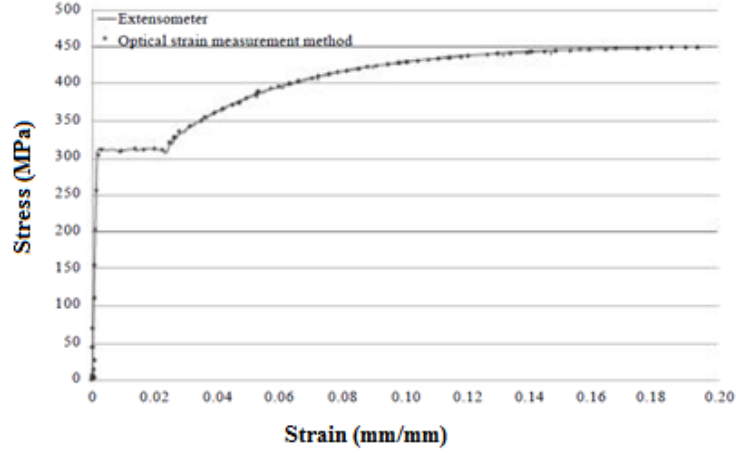


**Şekil 2.14.** Çatlak başlangıcı ve gelişimine ait görüntüler (Colavito and Madenci 2010).

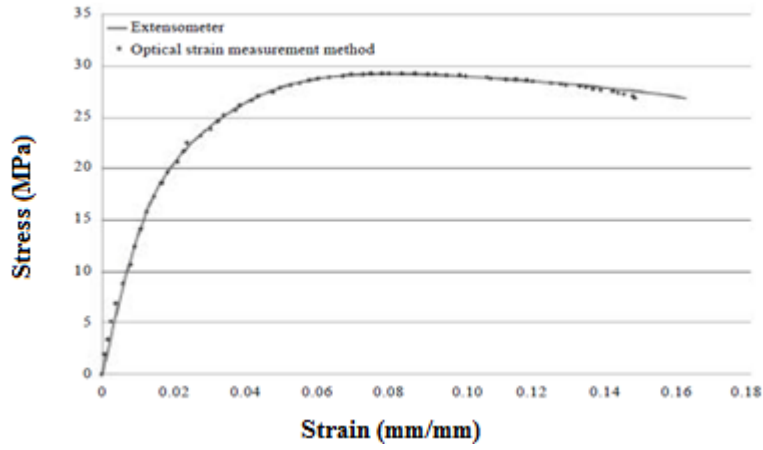
Comer et al. (2013) tarafından DIC tekniğini kullanarak tek tesirli bindirme bağlantısı ile birleştirilen kompozitlerin davranışını belirlemek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada 3D-DIC ve yüksek çözünürlüklü 2D-DIC teknikleri kullanılarak yarı statik çekme yüklemesine maruz tek tesirli kompozit bağlantıların deformasyon ve şekil değişimleri değerlendirilmiştir. 3D-DIC tekniği ile düzlem içi yüzey şekil değişimleri (gerinim) ve düzlem dışı yüzey deformasyon dataları elde edilmiştir. Elde edilen bu datalar, nümerik modellerle elde edilen dataların doğrulanması ve geliştirilmesine imkan sağlamaktadır. Ayrıca 3D-DIC ölçümleri ile hasar tespiti de yapılmıştır. 2D-DIC ölçümleri ise belirli lokasyon ve maksimum asal gerininin büyüklüğünü tespit etmede kullanılmıştır.

DIC ile ilgili çalışmalardan biri de Kashfuddoja and Ramji (2013) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, çekme yüküne maruz tek taraflı düzeltilmiş CFRP ( karbon fiber takviyeli polimer) paneldeki ince yapıştırıcı tabakasındaki gerinim alanı ve kalınlık yönündeki deplasman boyunca deneysel inceleme yapılmıştır. Şekil değiştirme (boyuna, kabuk ve kesme) alanı ve deplasmanın elde edilebilmesi için DIC tekniği kullanılmıştır. Bunun dışında DIC tekniği, hasar başlangıcına yol ačan kritik bölgelerin kompleks gerilme alanı hakkında bilgi edinebilmeyi ve hasar mekanizması, hasar başlangıcı ve gelişimi, deplasman davranışı gibi durumları yakından izleme imkanı da sağlamaktadır. Gerçekleřtirilen analiz sonucunda gerinimlerin (şekil değiştirme) bindirme kenarında maksimum büyüklüğe sahip olduğu ve yapıştırıcı tabakasında kayma gerinim seviyesinin soyulma (kabuk) geriniminden daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca deneysel çalışmalar sonlu elemanlar analizi ile kıyaslanarak iyi bir uyum sağlveiği belirtilmiştir.

Mekanik testlerde gerinim ölçümleri büyük bir öneme sahiptir. Bu ölçümlerin gerçekleştirilmesinde gerinim ölçerler (strain gauge), geometrik Moire tekniği, ekstansometre ve optik gerinim ölçüm metotları gibi farklı teknikler kullanılmaktadır. Optik ölçüm yöntemlerinden biri olan DIC tekniği sağladığı avantajlardan dolayı son zamanlarda gerinim ölçümlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Wei et al. (2013), bu yönde bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma, gerinimleri hesaplayan iki boyutlu deformasyon ölçüm algoritmasını geliştirme amacını içermektedir. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen deneysel çalışmada, iki farklı malzeme çekme testine tabi tutularak deney esnasında yüksek çözünürlüklü bir kamera ile kaydedilen görüntüler vasıtasıyla inceleme yapılmıştır. DIC tekniği için gerinim ölçüm algoritması MATLAB programında kodlanarak, kaydedilen görüntülerin analizi gerçekleştirilmiş ve optik ölçüm tekniği olan DIC ve diğer gerinim ölçüm tekniği olan ekstansometreden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da gösterildiği gibi iki yöntem arasında iyi bir uyum olduğu belirtilmiştir.



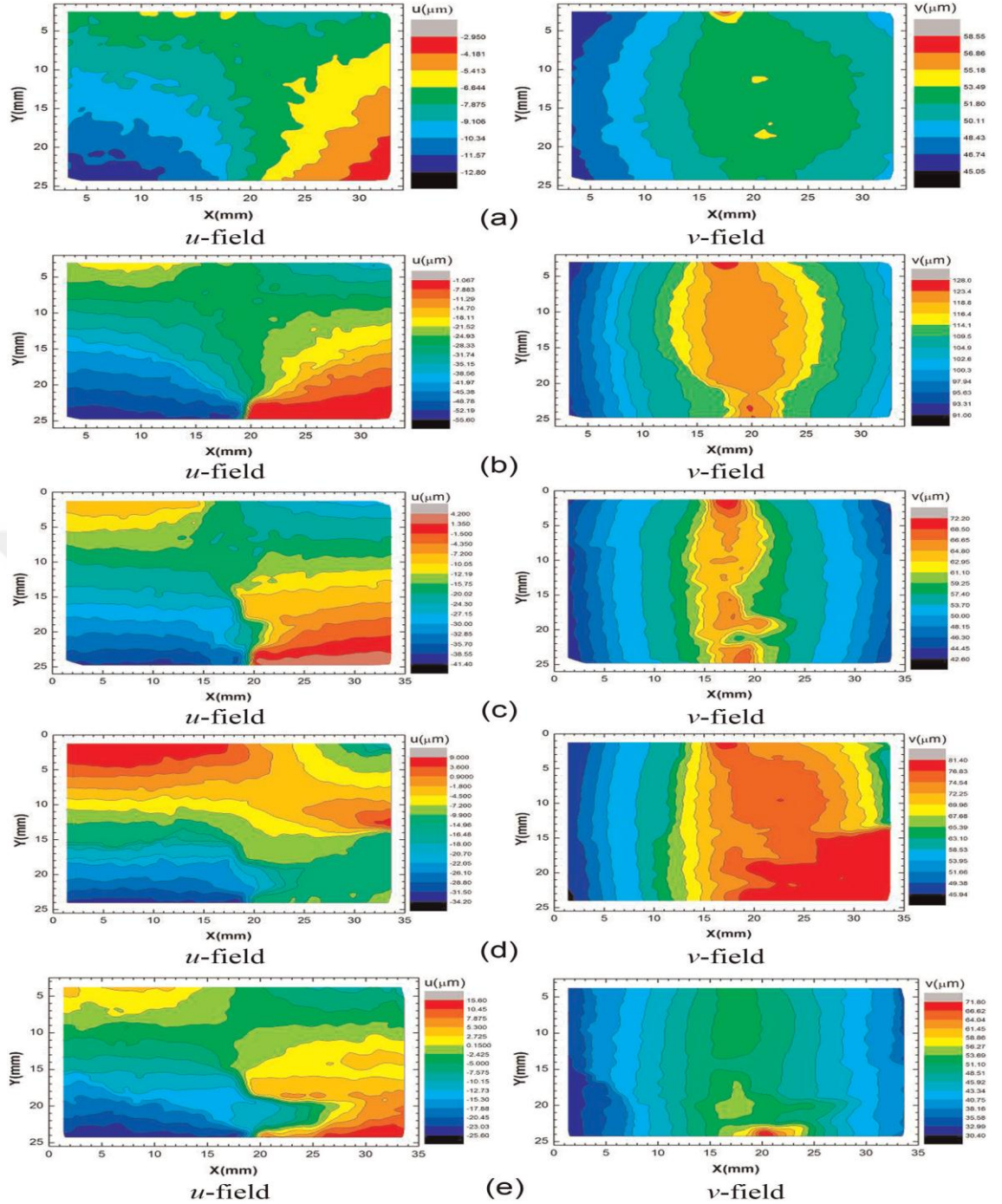
**Şekil 2.15.** Yumuşak çeliğe ait DIC ve ekstansometreden elde edilen gerilme-gerinim ilişkisi (Wei et al. 2013).



**Şekil 2.16.** Polipropilene ait DIC ve ekstansometreden elde edilen gerilme-gerinim ilişkisi (Wei et al. 2013).

Çok tabakalı kademeli malzemeler termal ve korozyon bariyeri ve yüksek balistik etkinliğe sahip hafif zırh malzemesi gibi birçok mühendislik uygulamalarında kullanılan ısıya dayanıklı kompozitler olarak kabul edilmektedir. Bu malzemelerin fiziksel özelliklerindeki homojensizlikten dolayı hasar ve kırılma mekanizmaları karmaşıktır. Bu mekanizmaları incelemek için birçok yöntem kullanılmıştır. Liu et al.3 (2013) bu yönde yaptıkları bir çalışmada yukarıda bahsi geçen malzemelerin mekanik özelliklerini optik ölçüm yöntemlerinden biri olan DIC tekniği ile incelemiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

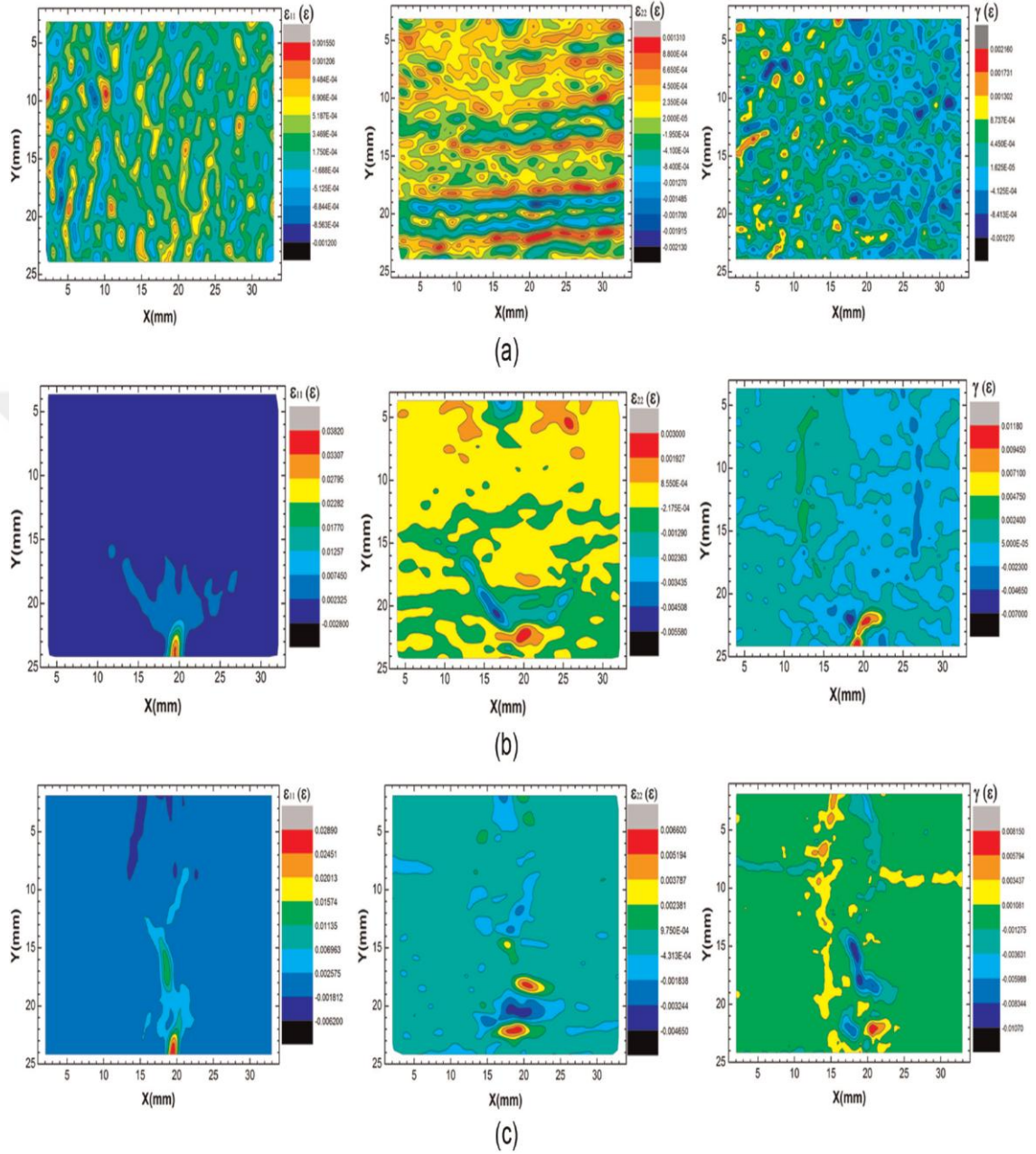


**Şekil 2.17.** Farklı yük oranlarında oluşan deplasman alanları, çapraz kafa deplasmanı displacement  $d$ ; (a)  $d=0,29-0,35$  mm,  $\Delta P = 80,7$  N, (b)  $d=0,39-0,46$  mm,  $\Delta P = 87,5$  N; (c)  $d = 0,5-0,6$  mm,  $\Delta P = 98,7$  N, (d)  $d = 0,9-1,0$  mm,  $\Delta P = 42,3$  N, (e)  $d=1,7-1,77$  mm  $\Delta P = 14,3$  N. (Liu et al. 2013).

Bu çalışmada çok tabakalı kademeli Al/SiC malzemesinin deformasyon ve kırılma özellikleri 3 nokta eğme testi ile deneysel olarak araştırılmıştır. DIC kullanılarak, malzemede farklı yük oranlarında oluşan deplasman ve gerinim (strain) alanları aşağıdaki resimlerde gösterildiği gibi elde edilmiştir. Ayrıca malzemede oluşan

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

hasar aşamalarına ait görsellere (çatlak oluşumu, ilerlemesi) deney esnasında kullanılan kameradan alınan görüntüler vasıtasıyla ulaşılmıştır.



**Şekil 2.18.** Farklı yük oranlarında oluşan gerinim alanları, çapraz kafa deplasmanı displacement  $d$ ; (a)  $d=0,29-0,35$  mm,  $\Delta P = 80,7$  N, (b)  $d=0,39-0,46$  mm,  $\Delta P = 87,5$  N, (c)  $d=0.5-0.6$  mm,  $\Delta P = 98,7$  N (Liu et al. 2013).

Yapıştırma bağlantılarının güvenilir bir şekilde kullanılmasındaki en önemli faktör bağlantı dayanımıdır. Yüksek dayanımlı bağlantıların elde edilebilmesi ise yapıştırma bağlantısındaki gerilme durumunun iyi bir şekilde anlaşılmasına bağlıdır.

Silva and Nunes (2014) tarafından bu yönde deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, gerilme durumunu belirleyen eğilme moment faktörünün (tek tesirli bindirme bağlantılarındaki yük eksantirikliğinden kaynaklanan) DIC tekniği kullanılarak tayin edilmesi amaçlanmıştır. Yürütülen bu çalışmada, alüminyum ve epoksi malzemelerin tek tesirli bindirme konfigürasyonunda birleştirilmesi ile oluşturulan bağlantılar çekme yüküne tabi tutulmuştur. DIC deplasmanlarını ihtiva eden deneysel sonuçlar Hard-Smith (1974), Goland and Reissner (1944) ve Goland and Reissner (1944)'ten geliştirilen Tsai ve Mortan (1994), gibi teorik analizler ile karşılaştırılmış ve Tsai ve Mortan (1994), modeli ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu belirtilmiştir.

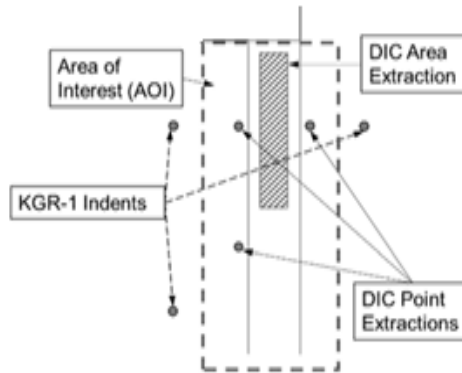
Yapıştırma bağlantılarında DIC tekniği kullanılarak yapılan analizlerden biri de Shrestha et al. (2015) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, karbon fiber takviyeli kompozit (CFRP) ve alüminyum malzemeler kullanılarak oluşturulan yapıştırma bağlantısının birleşme hattına farklı oranlarda uygulanan silikon kirleticinin etkisi DIC tekniği kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir.

DIC metodunun algoritması ve temel prensibi konusunda Yoneyama (2016) bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada deformasyon sonrası dijital görüntünün tamsayı pikselleri arasındaki gri seviyeler, alt piksel çözümü ile deplasmanları elde etmek için interpolate edilmiştir. Daha sonra deplasmanlar, alt bölge deformasyonunu dikkate alan non-lineer eşitlikler çözülerek belirlenmiştir. Belirlenen deplasmanların türevi alınarak gerinimler elde edilmiştir. Bu çalışmada, DIC temelinin açıklanmasının yanında gerçekleştirilen bir ölçüm örneği ve sonuçları da gösterilmiştir.

T tipi ile oluşturulan yapıştırma bağlantılarının hasar analizi konusunda Zhan et al. (2016), tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, alüminyum-lityum alaşımı(2026-T8) malzemeler, epoksi yapıştırıcı (EA9394-HYSOL) ile 5 farklı T bağlantı konfigürasyonunda birleştirilmiş ve oluşturulan bağlantıların mekanik özellikleri çekme yükü etkisiyle deneysel ve nümerik olarak belirlenmiştir. Gerilme ve deformasyonların nümerik analizlerinde MSC.Marc sonlu elemanlar paket programı kullanılmış ve elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içerisinde olduğu ifade edilmiştir. Analizler sonucunda, birleştirme hattındaki geometrik değişikliklerin

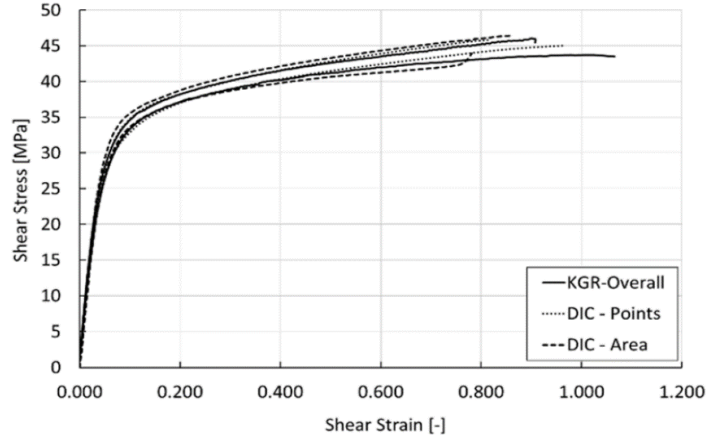
bağlantının yük taşıma kapasitesinde ve gerilme dağılımlarında önemli bir etkiye sahip olduğu ayrıca ortalama kırılma yükünün, bağlantının birleşme bölgesinin artmasıyla arttığı görülmüştür.

Blitterswyk et al. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, yapıştırıcıların mekanik özelliklerini tespit etmede kullanılan ASTM D5656 standartlarına uygun TAST deney yöntemi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada TAST deney yönteminde yapıştırıcının kayma deformasyonunu belirlemek için kullanılan KGR-1 ekstansometreye alternatif olabilecek ölçüm metotları geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaca yönelik yapılan çalışmada, optik ölçüm yöntemlerinden biri olan 2D DIC tekniği, iki farklı ölçüm prosedürü uygulanarak kullanılmıştır. 2D DIC temelli ilk ölçüm prosedüründe KGR-1 noktaları ile aynı hizada 3 nokta alınarak, ikinci prosedürde ise birleşme hattı içerisinde bir alan çıkarılarak kayma dataları belirlenmiştir (Şekil 2.19). Çalışmanın sonucunda, KGR-1 ekstansometre kullanımının; kalibrasyon ve çalıştırılmasının zaman alması, pahalı olması ve bazı deneylerde şüpheli sonuçlar vermesinden dolayı sınırlı olması nedeniyle kullanılan 2D DIC tekniği ile elde edilen sonuçların KGR-1 ile elde edilen datalarla son derece uyumlu olduğu (Şekil 2.20) ve bu yöntemin başarılı bir ölçüm metodu olduğu ifade edilmiştir.



**Şekil 2.19.** DIC ölçümü için alınan noktalar ve alanın gösterimi (Blitterswyk et al. 2016).

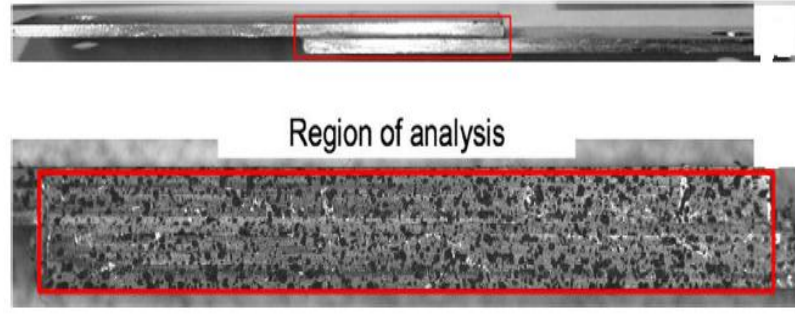




**Şekil 2.20.** KGR-1 ve iki farklı DIC prosedüründen elde edilen kayma gerilmesi-kayma birim şekil değiştirme diyagramı (Blitterswyk et al. 2016).

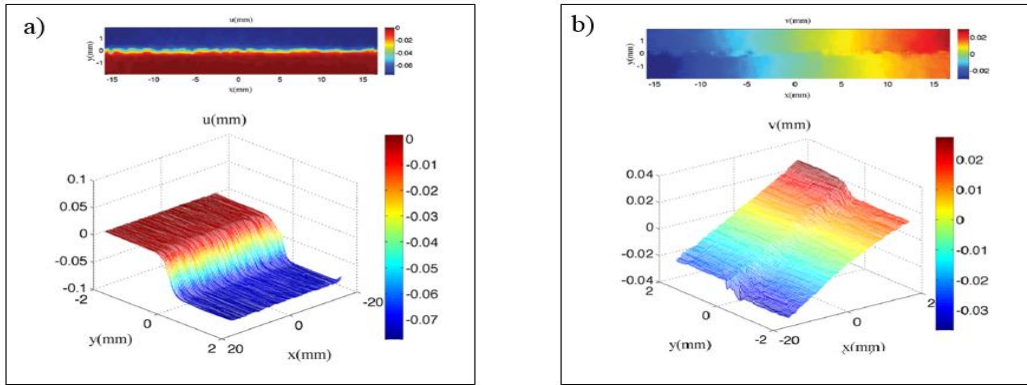
Cıvata ve yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan hibrit bağlantıların daha fazla yük taşıyabilme kapasitelerinden kaynaklanan emniyetli bir tasarıma sahip olmalarından dolayı geleneksel birleştirme yöntemlerine göre üstünlükleri bulunmaktadır. Bu bağlantıların mekanik davranışını belirlemek için birçok çalışma yapılmıştır. Kim (2016) tezinde, hibrit bağlantıların mekanik davranışını deneysel olarak araştırmak amacıyla bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada DIC ölçüm tekniğinin geçerliliği araştırılmıştır. Farklı konfigürasyona sahip numuneler kullanılarak gerçekleştirilen deneyler ve sonlu elemanlar analizleri ile DIC yönteminin doğruluğu kıyaslanmıştır. Hibrit bağlantının yüzey gerinimini ölçmek için kullanılan DIC yönteminden elde edilen sonuçlarda, yük doğrultusunun değişiminden (tek tesirli bindirme bağlantısındaki yük eksantrikliği) kaynaklanan sapmalar görülmüş ve bağlantıdaki eksantrikliği giderecek düzenlemeler yapılmıştır. DIC yöntemi ile elde edilen kayma gerinim değerleri ise çalışmada oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile kıyaslanmış ve iki yöntem arasında; düzlem dışı deplasman etkisi, sayısal veya sistematik hatalar gibi nedenlerinden kaynaklanabileceği düşünülen farklar olduğu belirtilmiştir.

Esnek yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Moreira and Nunes (2014), tarafından deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, alüminyum malzemelerin birleştirilmesi ile elde edilen tek tesirli bindirme bağlantıları çekme yüküne maruz bırakılmıştır.

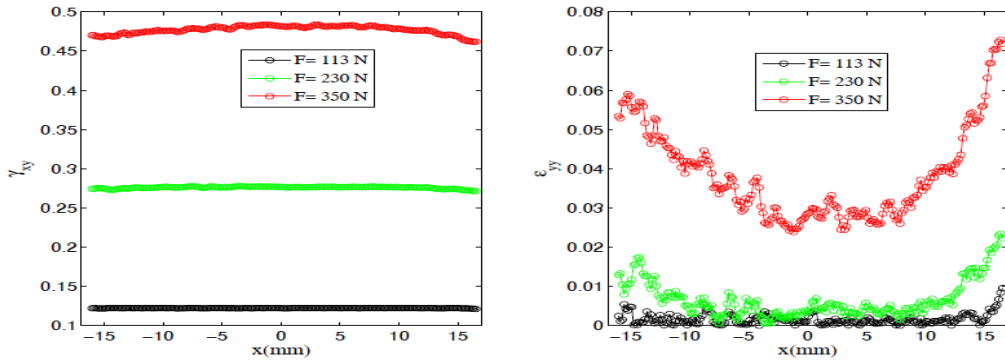


**Şekil 2.21.** Tek tesirli bindirme bağlantısı ve DIC için numune yüzeyindeki desen yapısı (Moreira and Nunes 2014).

Şekil 2.21’de gösterilen alana ait yatay ve dikey yer değiştirmeler (deplasmanlar) DIC yöntemiyle belirlenmiş (Şekil 2.22) ve bu deplasman değerleri kullanılarak normal ve kayma şekil değişimleri uygulanan 3 farklı yüke bağlı olarak belirlenmiştir (Şekil 2.23). Ayrıca bu çalışmada, yapıştırıcı tabakasındaki kayma şekil değişim dağılımının bindirme bölgesinin uçlarında azaldığı ifade edilmiştir.



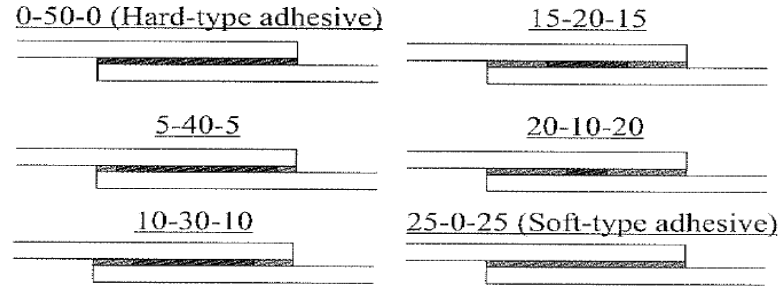
**Şekil 2.22.** Bindirme bölgesindeki; a) yatay, b) dikey deplasman alanı (Moreira and Nunes 2014).



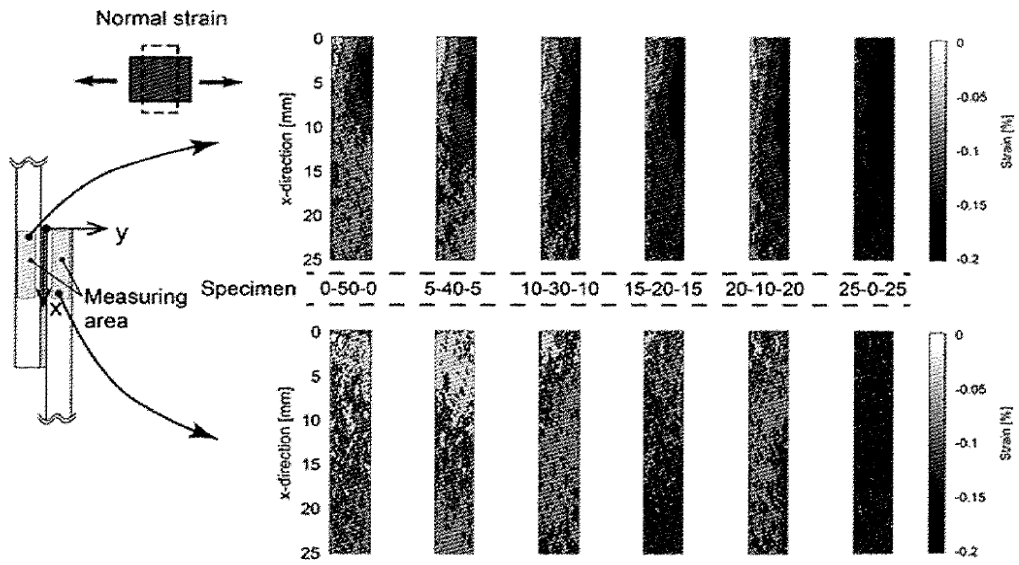
**Şekil 2.23.** Yapıştırıcının bindirme bölgesindeki; a) kayma, b) normal şekil değişimleri (Moreira and Nunes 2014).

Yapıştırıcıların kayma gerilme-şekil değiştirme davranışını belirlemek yapısal yapıştırıcı bağlantılarının dizaynında önemli bir etkiye sahiptir. Bu konudaki çalışmalardan birisi Morais (2017) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, üç nokta eğme testi için geliştirilen bir kiriş modeli ile yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcının kayma davranışı değerlendirilmiştir. Metal malzemeler, elastik-mükemmel plastik gerilme-şekil değiştirme davranışına sahip bir yapıştırıcıyla birleştirilerek model oluşturulmuştur. Analiz sonucunda model tahminlerinin ince birleştirme hattına sahip numuneler için sonlu elemanlar analizleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, ölçülebilir özellik aralığı üzerinde sınırlamalar olduğu ve veri analizinin bu çalışmada geliştirilen modeller gibi modellerin geliştirilmesiyle gerçekleştirilebileceği ifade edilmiştir.

Yapıştırma bağlantılarının güvenilirliği, yapıştırıcı tabakası içerisinde oluşan gerilmelere ve gerilme dağılımlarına büyük ölçüde bağlıdır. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme dağılımını azaltmak için çeşitli yöntemler denenmiştir. Kawasaki et al. (2017), bu yönde bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, şekil 2.24'te gösterildiği gibi, bindirme bölgesinin ortasında sert, uç kısımlarında ise esnek karakterli yapıştırıcı kullanarak oluşturulan karma yapıştırma bağlantılarının gerilme dağılımları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantılarının yapıştırıcı tabakası ve yapıştırılan malzemesindeki gerinim dağılımları, DIC tekniği ile çekme testine tabi tutularak belirlenmiştir. Belirlenen gerinimler vasıtasıyla bağlantıdaki gerilme dağılımları Secant modülü kullanılarak hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, karma yapıştırma bağlantısının kullanılması durumunda yapıştırıcı tabaka içerisindeki gerilme yoğunluğunda azalma olduğu ve Şekil 2.25'te görüldüğü gibi yapıştırılan malzemenin gerinim dağılımı incelendiğinde, esnek karakterli yapıştırıcının uzunluğu ne kadar fazla olursa gerilmelerin yoğunlaştığı alanın o kadar fazla genişlediği dolayısıyla yapıştırıcı tabaka merkezinin daha fazla yük taşıyabildiği sonuçlarına ulaşılmıştır.



Şekil 2.24. Karma bağlantıdaki yapıştırıcı oranları (Kawasaki and 2017).



Şekil 2.25. DIC'den elde edilen yapıştırılan malzemelere ait gerinim (strain) dağılımları (Kawasaki et al. 2017).

Stuparu et al. (2017) yapıştırma bağlantılarındaki yapıştırılan malzemelerin birbirinden farklı olması durumunun bağlantı dayanımına etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada, alüminyum-karbon fiber malzemeleri kullanılarak oluşturulan tek tesirli bindirme bağlantıları deneysel olarak test edilmiş ve Abaqus vasıtasıyla CZM ile nümerik analizi yapılmıştır. Deneysel çalışmada lokal deformasyon alanlarını belirlemek için DIC yöntemi kullanılarak bindirme uzunluğundaki soyma ve kayma şekil değişimlerinin tespiti yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, deneysel sonuçlara dayanarak farklı malzemelerin kullanımında bağlantı bütünlüğünün bozulması ve bağlantı rijitliğinin azalması nedeniyle bağlantı dayanımının azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca nümerik çalışma ile bağlantıdaki gerilme analizleri yapılmış ve daha doğru

sonuçlar elde edebilmek amacıyla nümerik modelin geliştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Khosravani and Weinberg (2018) tarafından kompozit T-yapıştırma bağlantılarının nümerik ve deneysel analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada deneysel olarak yaşlandırılmış numunler vasıtasıyla yaşlanıma işleminin ve numunelere uygulanan yükteki çeşitliliğin etkileri araştırılmış ve elde edilen deneysel sonuçlarla sonlu elemanlar yöntemi ile ulaşılan nümerik sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu belirtilmiştir.

Angelidi et al. (2018) tarafından yürütülen çalışmada, yapıştırma bağlantılarındaki bağlantı rijitliğini arttırma ve dolayısıyla bağlantının yük taşıma kapasitesini geliştirme de esnek bir yapıştırıcının kullanımının bağlantı dayanımına katkısının olup olmadığını araştırmak amacıyla esnek ve sert yapıştırıcılar ile oluşturulan aynı boyutlu çift tesirli bindirme bağlantılarının tek eksenli çekme ve basma yükü altındaki mekanik özellikleri incelenmiştir ve karşılaştırılmıştır. Yapıştırma bağlantılarındaki şekil değişim alanları DIC tekniğiyle belirlenmiş ve yapıştırıcı rijitliğinin yapıştırma bağlantılarının dayanımı üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

## 3. MATERYAL ve YÖNTEM

### 3.1. Giriş

Bu çalışmada yapıştırıcıların mekanik özellikleri ve davranışlarını belirlemek amacıyla deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak çift bileşenli yapıştırıcıdan farklı formlarda bulk numuneler üretilerek bu yapıştırıcının tek eksenli çeki ve kayma yükleri altındaki mekanik özellikleri Dijital Resim Korelasyonu tekniğiyle belirlenmiştir. Daha sonra çalışmada kullanılan yapıştırıcı ve AISI 1040 çelikleri kullanılarak TAST bağlantıları, AA2024 alüminyum alaşımları kullanılarak ise Tek Tesirli Bindirme Bağlantıları (SLJ) üretilmiştir. Bu numunelerin çeki ve dört noktadan eğme yükleri altında mekanik davranışları yine Dijital Resim Korelasyonu tekniğiyle deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar lineer olmayan sonlu eleman yönteminden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

### 3.2. Kullanılan Yapıştırıcılar

Bu çalışmada, çift bileşenli sıvı yapıştırıcı DP410 kullanılmıştır. 3M™ tarafından üretilen DP410; 2: 1'lik karışım oranıyla tokluk, yüksek mukavemet ve hızlı kürleşmenin gerekli olduğu yerlerde kullanılmak üzere tasarlanmış ve -55°C ile 85°C arasında yüksek performansa sahip yapısal bir yapıştırıcıdır.

### 3.3. Yapıştırılan Malzemeler

Bu çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak iki farklı metal alaşımı (AA2024-T3 ve AISI 1040) kullanılmıştır.

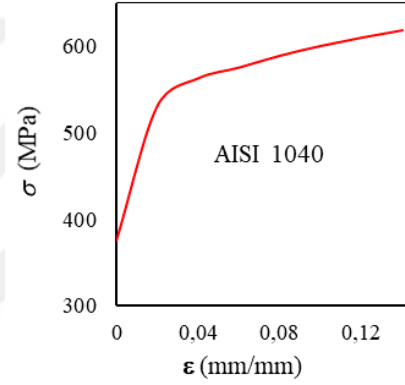
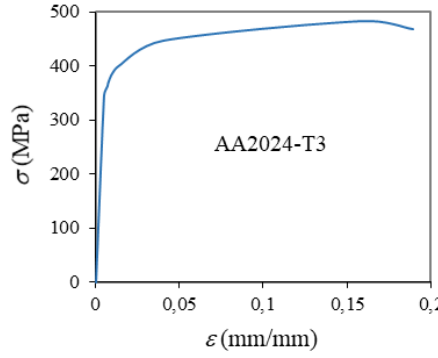
Genel mühendislik uygulamaları, havacılık ve otomotiv endüstrisi gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı hafifliği, yüksek korozyon dayanımı, fiziksel ve mekanik özellikleri ve işlenebilirliğinden dolayı yapıştırılan malzeme olarak seçilmiştir. Birçok uluslararası standart yapıştırıcıların bağlantıdaki performansının değerlendirilmesinde bu alüminyum alaşımının kullanılması tavsiye edilmektedir (ASTM D1002, ISO 4587). Yapıştırıcıların kayma yükü altındaki mekanik

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

özelliklerini belirlemek için AISI 1040 çeliği diğer yapıştırılan malzeme olarak kullanılmıştır. Her iki metal alaşımının da mekanik özellikleri ASTM E8 standartına uygun üretilen numunelerin çekme deneyleri ile belirlenen çalışmalardan alınarak Çizelge 3.1’de verilmiştir (Aydın vd 2015).

**Çizelge 3.1.** AA2024-T3 alüminyum alaşım ve AISI 1040 çeliğinin mekanik özellikleri (Aydın vd 2015).

	AA2024-T3	AISI 1040
$E$	72,4 GPa	200 GPa
$\nu$	0,33	0,29
$\sigma_a$	345 MPa	375 MPa
$\sigma_c$	485 MPa	618 MPa



$E$ : Elastisite Modülü;  $\nu$ : Elastisite Modülü;  $\sigma_a$ : Akma Dayanımı;  $\sigma_c$ : Kopma Dayanımı.

#### 3.4. Bulk Numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Yapıştırıcıların mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik en yaygın kullanılan deneysel yöntemler uniform ve tek eksenli gerilmeler altında bulk numuneler üzerinde yapılan çekme ve kayma testleridir. Numuneler ve deneysel yöntemler, plastik malzemeler için kullanılanlara büyük benzerlik gösterir. Belirlenen özellikler materyalin kendine özgüdür ve yapıştırılan malzemelerin hiçbir etkisi olmadan elde edilirler.

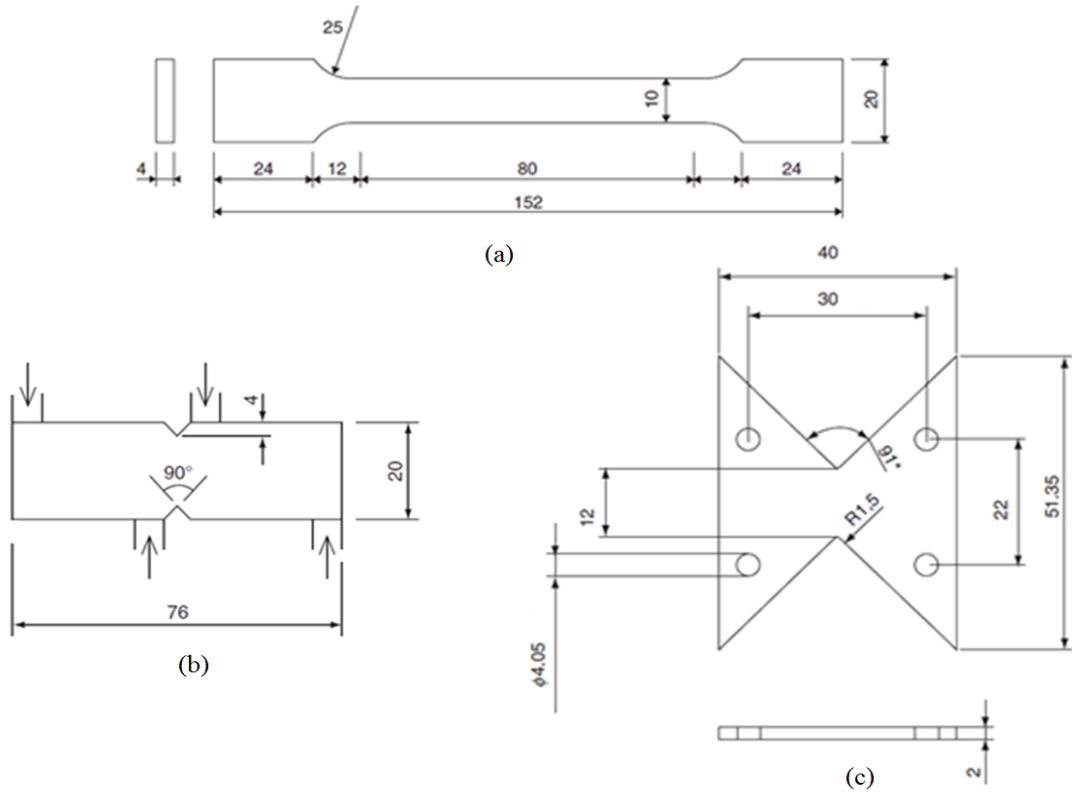
##### 3.4.1. Bulk numunelerin hazırlanması

Bulk numunelerin hazırlanması esnasında üniform bir karışımın temin edilmesi, hava boşlukları ve yabancı maddelerin oluşturduğu inkülzyonların minimize edilmesi ve yapıştırıcının normalde kurlaşması için gerekenden fazla sıcaklık artışı engellenmesi

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

oldukça önemlidir. Ayrıca bulk numuneler kullanılarak belirlenen yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin (çekme ve kayma modülleri, Poisson oranı, akma ve çekme dayanımı vb.) güvenilirliği, uygulanan kuvvudda oluşan yer değiştirmelerin doğru ölçülmesini gerektirmektedir. Bu durum sadece seçilen ölçüm sistemine değil yapıştırıcının doğasına da (numune kalınlığı, şekil değiştirme hızı vb.) bağlıdır (Duncan et al. 1994).

Bulk numunenin üretimi genellikle yapıştırıcının kalıp içerisine dökülmesi veya enjekte edilmesi ya da plakalar arasında basınç uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Birinci yöntem nispeten tek bileşenli sıvı olan yapıştırıcılar için uygundur. Kalıp açık olabilir, ancak kapalı bir boşluk da olabilir ve bu durumda yapıştırıcı enjekte edilmelidir. Yapıştırıcı, iki bileşenli veya film formunda yapıştırıcı ise, ikinci yöntem genellikle daha iyi sonuç verir. Diğer taraftan iki bileşenli yapıştırıcıların karıştırılması boşluklara neden olmaktadır. Bu boşluklar vakum altında giderilebilirse bulk numuneler döküm veya enjeksiyon yoluyla imal edilebilir. Değilse, boşluklar yüksek basınçlarla giderilebilir.

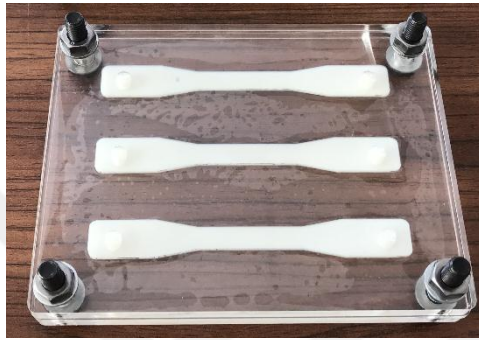


**Şekil 3.1.** a) Standart çekme numunesi (ISO 527-2), b) Iosipescu test numunesi (ASTM D5379), c) Arcan test numunesi.

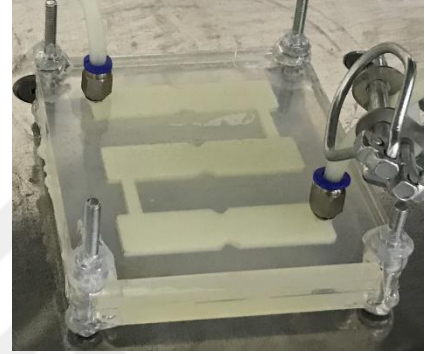


### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

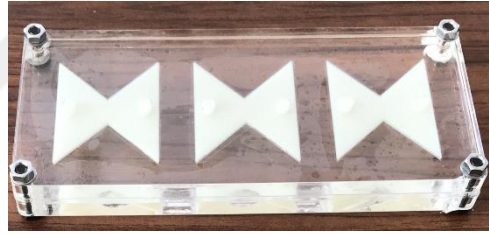
Bulk numunelerin üretiminde karşılaşılan bu hatalar elde edilecek mekanik özellikleri de kötü yönde etkilediğinden, sunulan çalışmada iki farklı yöntemle numuneler üretilerek yapıştırıcıların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Her iki yöntemde de Şekil 3.1’de tek eksenli çeki ve kayma yükleri altında kullanılan standart numune boyutları dikkate alınarak üretilmiş kalıplar (Şekil 3.2) kullanılmıştır. Bu çalışmada DP410, bu kalıplar içerisine vakum altında ve vakum olmadan enjekte edilerek Şekil 3.2’de verilen üç farklı formda bulk numuneler üretilmiştir.



(a)



(b)



(c)

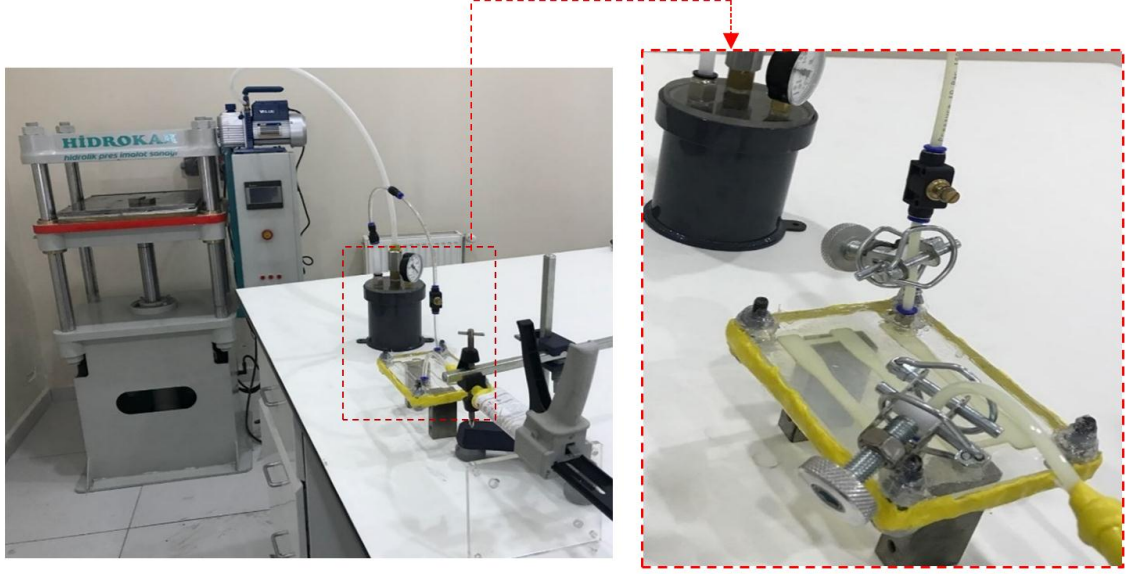
**Şekil 3.2.** Bulk numunelerin üretiminde kullanılan kalıplar; a) çekme numunesi (ISO 527-2), b) Iosipescu test numunesi (ASTM D5379), c) Arcan test numunesi.

Bulk numunelerin üretilirken aşağıda verilen işlem basamakları uygulanmıştır;

- 1- Numune üretiminde kullanılan kalıplar üç parçadan oluşmaktadır. Ortadaki levhaya istenilen standart numune geometrisi oyulmuştur. Üst ve alt levhalar bu parça üzerine kapatılarak kalıp oluşturulmaktadır. Numuneler bu kalıpta vakum uygulanarak ve uygulanmadan iki farklı üretim yöntemi ile imal edilmiştir (şekil 3.3).
- 2- Öncelikle çalışmada kullanılan yapıştırıcıların kalıbı oluşturan parçalara yapışmasını engellemek için silikon yağlayıcı kalıbın her bir parçası üzerine püskürtülerek çok ince bir film tabaka oluşturulmuştur.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

- 3- Daha sonra yapıştırıcı kalıp içine vakum altında ve vakum olmadan enjekte edilmiştir (şekil 3.3).
- 4- Yapıştırıcı tabakalarının kürleşme işleminden sonra toplam 18 adet bulk numune (6 adet çekme, 6 adet Iosipescu ve 6 adet Arcan) kalıplardan çıkarılarak nispi nem oranı  $\%50 \pm 5$  ve sıcaklığı  $22^\circ\text{C}$  olan laboratuvar koşullarında deney yapılmaya kadar muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.3. Bulk numunelerin üretim prosesi.

#### 3.4.2. Bulk numune yüzeylerinin Dijital Görüntü Korelasyonu yöntemi için hazırlanması



Şekil 3.4. Numune yüzeylerinde oluşturulan noktasal yapılar; a) çekme numunesi, b) Iosipescu, c) Arcan.

Dijital Görüntü Korelasyonu yönteminde gerekli işlemlerin yapılabilmesi için gerekli olan temel şart numune yüzeyinde rastgele bir desen veya noktasal yapının bulunmasıdır. Bu tez kapsamında oluşturulan bulk ve bağlantı formundaki numune yüzeylerinde beyaz zemin üzerinde siyah noktalardan oluşan desenler oluşturulmuştur (şekil 3.4). Yüzey üzerinde oluşturulan bu desenler içindeki noktaların yoğunluğu ve boyutları yer değiştirme alanı içinde yapılacak korelasyon sonuçlarını önemli ölçüde etkilediğinden dolayı yaklaşık olarak aynı yoğunlukta oluşturulmaya çalışılmıştır.

#### **3.4.3. Tek eksenli çekme yüküne maruz bulk numunelerden mekanik özelliklerin belirlenmesi**

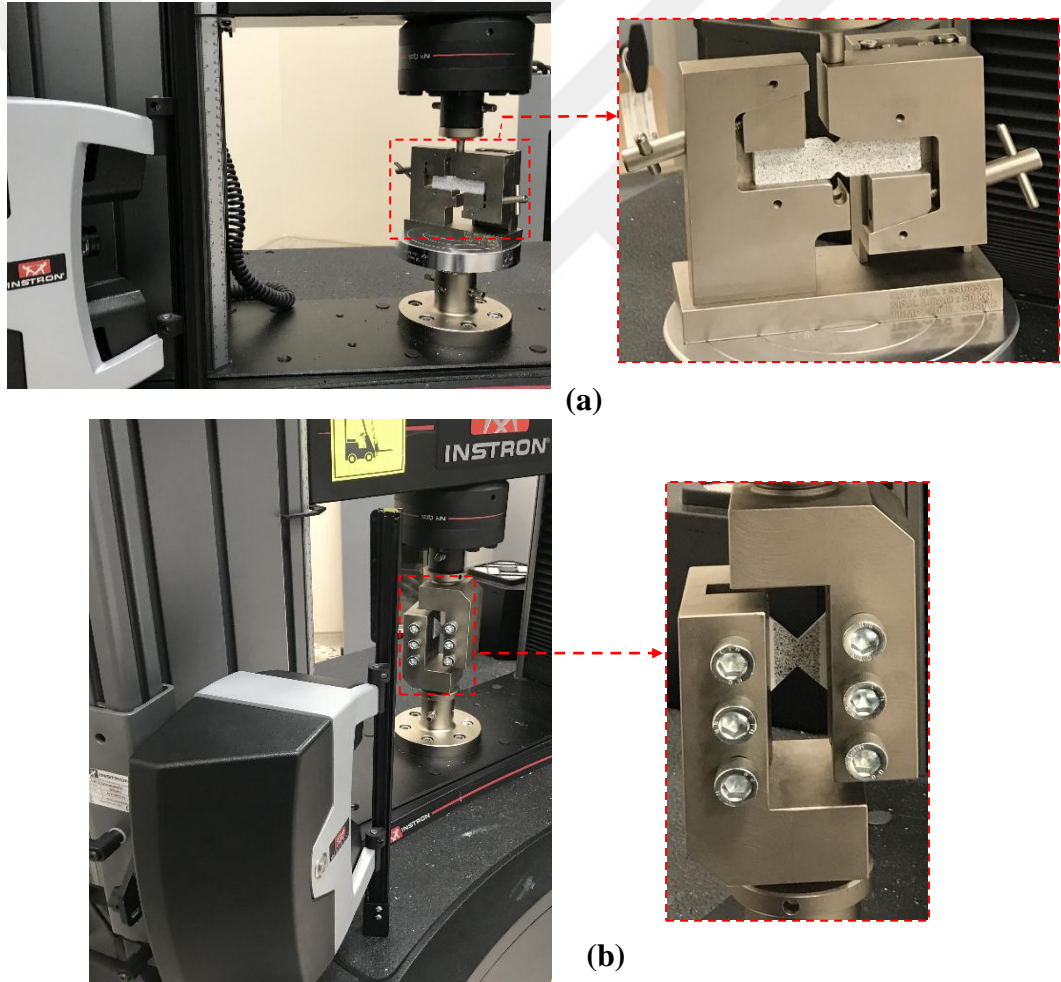
Bu çalışmada Şekil 3.4a’da verilen DP410 den üretilmiş ve yüzeyi Dijital Resim Korelasyonu yöntemi için hazır hale getirilmiş standart çekme numuneleri, bilgisayar kontrollü 100 kN kapasiteli 5982 Model Instron üniversal test cihazında 22°C ve %50 nem oranında 1 ve 5 mm/dak’lık şekil değişim hızlarında 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 2017 programında işlenerek ve çekme cihazının kendi video ekstansometresinden elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.



**Şekil 3.5.** INSTRON çekme cihazı ve AV 2 video extensometre.

#### 3.4.4. Kesme yüküne maruz bulk numunelerden mekanik özelliklerin belirlenmesi

Bu çalışmada Şekil 3.1 b ve c’de boyutları verilen DP410 kullanılarak üretilmiş Iosipescu ve Arcan test numuneleri, bilgisayar kontrollü 100 kN kapasiteli 5982 Model Instron universal test cihazı kullanılarak 22°C ve %50 nem oranında 5 mm/dak’lık şekil değişim 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 2017 programında işlenerek DP 410’un kayma gerilmesi-kayma şekil değişimi diyagramları çizilmiştir.

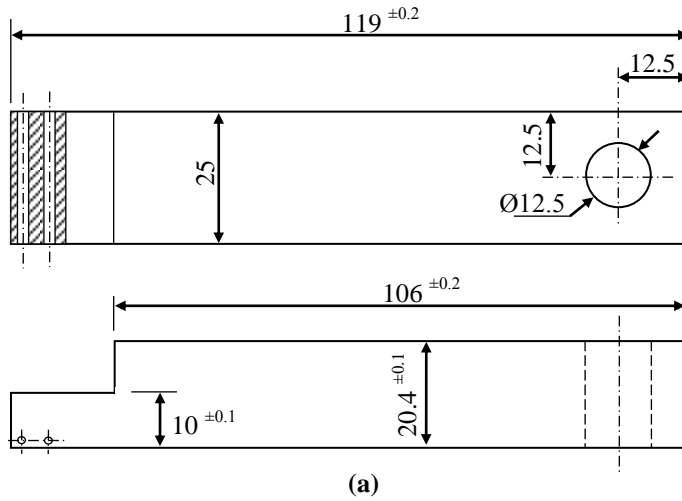


Şekil 3.6. INSTRON çekme cihazı ve AV 2 video extensometre, a) Iosipescu test düzeneği, b) Arcan test düzeneği.

#### 3.5. Bağlantı Formundaki Numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

##### 3.5.1. Bağlantı formundaki (TAST) numunelerin hazırlanması

Kalın ve rijit yapıştırılan malzeme kullanılarak üretilen numuneler üzerinde kayma testi (TAST) ile yapıştırıcıların mekanik özellikleri belirlenebilir. Bu yöntemin amacı, çekme yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantısından yapıştırıcının kayma özelliklerini belirlemektir. Bu deneysel yöntemde, hasarın başlangıcına neden olan diğer gerilmelerin etkisini ortadan kaldırabilmek ve daha düzgün bir kayma gerilmesi dağılımı elde edebilmek için kısa bindirme uzunluklu kalın ve rijit yapıştırılan malzemeler ibaret tek tesirli bindirme bağlantı numunesi kullanılır (Şekil 3.7a). Numunede yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölgeye yerleştirilen özel amaçla tasarlanmış ekstensiyometre kullanılarak yapıştırılan malzeme üzerinde bu bölgede oluşan nispi yer değiştirmeler ölçülür. Ölçüm işlemi numunenin yüklemeye başveığı vean hasar oluşuncaya kadar devam eder. Elde edilen kuvvet-yer değiştirme verilerinden kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme eğrisi ve diğer kayma özellikleri belirlenir (Şekil 3.7b).

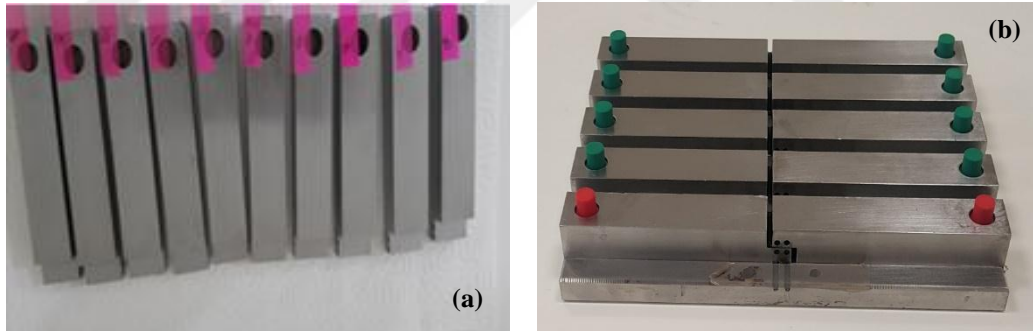


Şekil 3.7. a) ASTM D5656 ve ISO 11003–2 kullanılarak modifiye edilmiş numune boyutları, b) kontak ekstensometre.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

TAST deney numuneleri Şekil 3.7a’da boyutları verilen AISI 1040 çeliği ve DP 410 iki bileşenli sıvı yapıştırıcı kullanılarak aşağıda verilen işlem basamakları uygulanarak üretilmiştir.

- Numune üzerinde mevcut olan yağ, gres, toz, kir gibi kalıntıların giderilmesi amacıyla ilk olarak AISI 1040 çelik malzemeleri aseton ile temizlenmiş ve aseton malzeme üzerinden buharlaşınca kadar bekletilmiştir.
- Asetonla temizleme işleminden sonra numuneler toz deterjan kullanılarak yıkanmış ve musluk suyu ile durulanmıştır.
- Numuneler tekrar 3 – 4 dakika asetonla bekletilerek özellikle yapıştırma yüzeyleri sıcak hava uygulanarak kurutulmuştur.
- Yüzey hazırlığı tamamlanan numunelerin (şekil 3.8a) düzgün bir şekilde yapıştırılabilmesi, yapıştırıcı tabaka kalınlığının ayarlanabilmesi ve yapıştırılan malzemelerin birbiri üzerinde kaymasını engellemek amacıyla şekil 3.8b’de gösterilen kalıp kullanılmıştır.

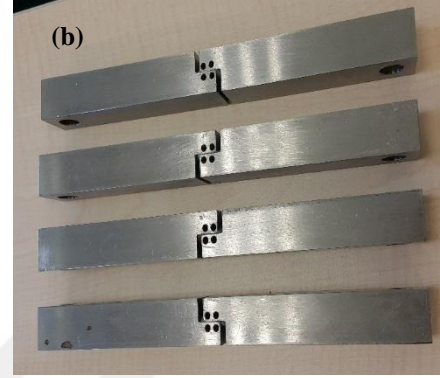


**Şekil 3.8.** a) Yüzey hazırlama işlemi sonrası TAST numune parçaları, b) Kalıp.

- Numuneler kalıba yerleştirilmeden önce, silikon yağlayıcı spreyn (3M Scotch™ 1609) kalıp üzerine püskürtülmesi ile oluşan çok ince film tabaka sayesinde numunelerin kalıba yapışması önlenmiş ve kurluşma sonrası numunelerin kalıptan kolayca çıkarılması sağlanmıştır.
- Numunelerin bindirme bölgelerine yapıştırıcılar uygulanarak bindirme yüzeyine homojen bir şekilde yayılmaya çalışılmıştır.
- Yapıştırıcıların kurluşması ve yapıştırıcı kalınlığının ayarlanması amacıyla numune üzerine ağırlıklar yerleştirilerek gerekli basınç sağlanmıştır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

- Son olarak kalıpların şekil 3.9a’da gösterilen hidrolik prese yerleştirilerek 60°C ‘de 120 dakika bekletilmesi ile yapıştırıcıların kürleşmesi sağlanmıştır.
- Kürleşme işlemi sonrası numuneler kalıp içerisinden çıkarılarak kürleşme esnasında dışarı taşan yapıştırıcı kısımları temizlenerek yapıştırma işlemi tamamlanmıştır. Şekil 3.9b’de kalıp içerisinden çıkarılan hazır TAST numuneleri gösterilmiştir.



**Şekil 3.9.** a) Hidrolik pres, b) Kürleşme sonrası TAST numuneleri.

Ayrıca, yapıştırılmış TAST numuneleri çekme cihazına Şekil 3.7 b’de verilen aparat ile bağlanmıştır.

#### **3.5.2. TAST numune yüzeylerinin Dijital Görüntü Korelasyonu yöntemi için hazırlanması**

Dijital Görüntü Korelasyonu yönteminde gerekli işlemlerin yapılabilmesi için gerekli olan temel şart numune yüzeyinde rastgele bir desen veya noktasal yapının bulunmasıdır. Bu tez kapsamında oluşturulan bulk ve bağlantı formundaki numune yüzeylerinde beyaz zemin üzerinde siyah noktalardan oluşan desenler oluşturulmuştur (şekil 3.10). Yüzey üzerinde oluşturulan bu desenler içindeki noktaların yoğunluğu ve boyutları yer değiştirme alanı içinde yapılacak korelasyon sonuçlarını önemli ölçüde etkilediğinden dolayı yaklaşık olarak aynı yoğunlukta oluşturulmaya çalışılmıştır.



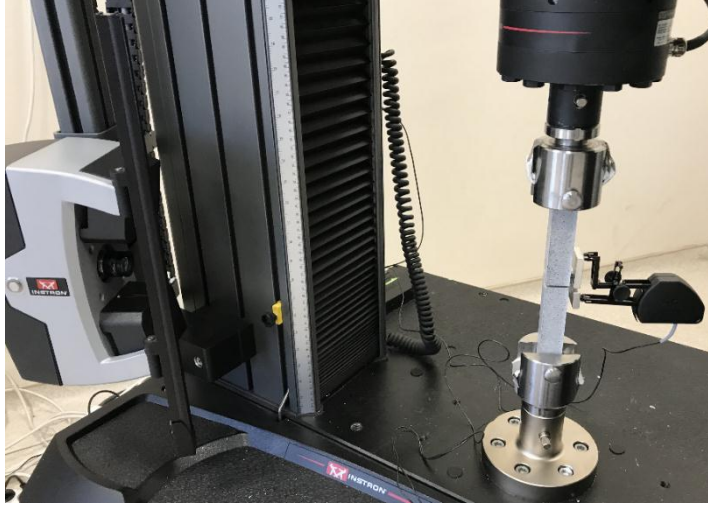
**Şekil 3.10.** TAST numune yüzeylerinde oluşturulan desenler.

Dijital görüntü korelasyonu yönteminde, uygun algoritmaları ihtiva eden farklı yazılımlar kullanılarak deplasman ve deplasman gradyanları belirlenebilmektedir. Bu çalışmada ise Gom Correlate 2017 programı kullanılarak deney süresince Instron AV 2 model video ekstansometre vasıtasıyla kaydedilen görüntüler işlenmiş ve gerekli sonuçlar elde edilmiştir. 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 biküvik interpolasyon kullanılmış ve görüntü yüzeyinden seçilen alan, subset merkezleri arasındaki mesafe 16 pixel olan 19 pixel  $\times$  19 pixel 'lik subsetlere ayrılarak çözüm gerçekleştirilmiştir.

#### **3.5.3. Kalın yapıştırılan malzemeler üzerinde kayma testinin (TAST) işlem basamakları**

Bu deneysel yöntemde kalın AISI 1040 çeliğinden üretilmiş tek tesirli bindirme bağlantı numunelerine (Şekil 3.10) aksenal yönde çekme kuvveti uygulanır. Numunelere uygulanan çekme kuvvetinin etkisiyle yapıştırıcı tabakasında kayma şekil değişimi oluşmaktadır. Yapıştırılan çelik malzemeler kalın ve rijit seçildiği için soyulma (peel) kuvvetleri minimize edilmekte ve böylece kayma gerilmesi-kayma şekil değişimi özellikleri elde edilmektedir.





(a)



(b)

**Şekil 3.11.** a) TAST deney numunesi üzerine tasarlanmış aparat yardımıyla ekstansometrenin bağlanması b) Yüzeyinde desen oluşturulmuş TAST numunesi.

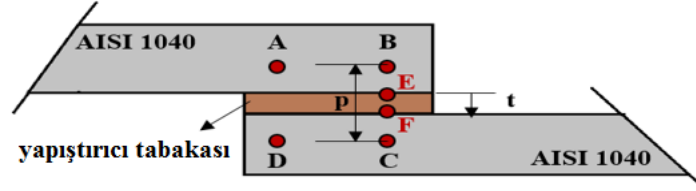
Deneysel bilgisayar kontrollü 100 kN kapasiteli 5982 Model Instron universal test cihazında 22°C ve %30 nem oranında, 2450 N/dak 'lık şekil değişim hızında yapılmıştır. Bu çalışmada, TAST yöntemi ile yapıştırıcıların mekanik özellikleri belirlemede kullanılan kayma şekil değişimleri belirlenirken iki farklı yöntem kullanılmıştır. İlk yöntemde özel tasarlanmış aparatlar kullanılarak kontak ekstansometre TAST numunesi üzerine bağlanmış (Şekil 3.11) ve bu ekstansometre kullanılarak kayma şekil değişimleri belirlenmiştir. Diğer yöntemde ise TAST numunesi üzerine oluşturulan desenlerin yer değiştirmeleri Gom Correlate 2017 programı vasıtasıyla dijital görüntü korelasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Her iki yöntem içinde yapıştırıcıların kayma özelliklerinin tespitine yönelik gerekli işlem adımları aşağıda verilmiştir.

*Kontak ekstansometre'den kayma şekil değişimlerinin tespiti;*

TAST yönteminde mekanik ekstansometre kullanılarak gerçekleştirilen testlerde ölçülen şekil değişim değerleri hem yapıştırılan malzeme hem de yapıştırıcıya ait değerleri ihtiva etmektedir. Dolayısıyla, sadece yapıştırıcıya ait şekil değişim değerlerinin elde edilebilmesi amacıyla ölçülen bu şekil değişim değerleri üzerinde gerekli düzeltmeler yapılmalıdır. Bu düzeltmelere dair bilgiler ASTM D5656

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

standartında geniş bir şekilde bulunmakta ve bu tez kapsamında bu standart 'a uygun işlemler ile elde edilen sonuçlar bulunmaktadır. Daha fazla bilgiye bu standarttan ulaşılabilir.



**Şekil 3.12.** TAST numunesi üzerindeki A, B, C, D, E ve F noktalarının gösterimi.

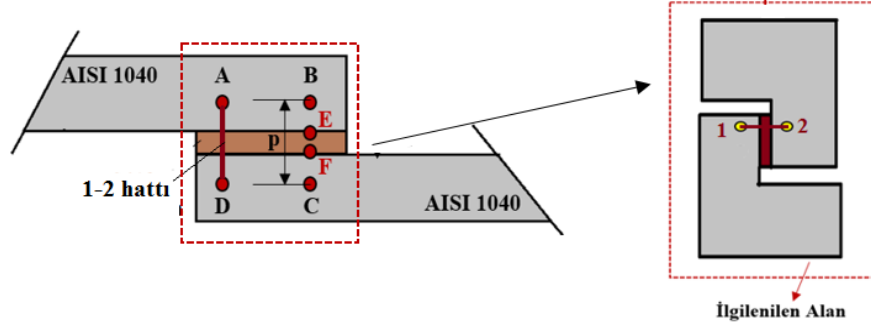
Numune üzerine yerleştirilen ekstansometreden alınan yer değiştirme değerleri  $d_a$  olmak üzere yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi aşağıdaki formüllerle elde edilebilir.

$$\gamma = \frac{d_a}{t} \quad (3.1)$$

$$\tau = \frac{F}{lw} \quad (3.2)$$

*Dijital görüntü korelasyonu tekniğiyle kayma şekil değişimlerinin tespiti;*

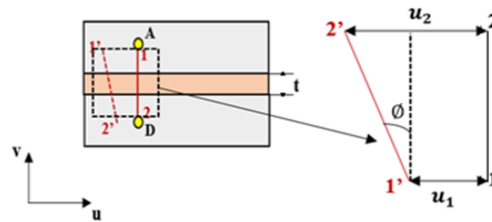
Bu çalışmada yapıştırıcı tabakasında oluşan yer değiştirme değerlerinin belirlenmesinde klasik ölçüm yöntemlerine alternatif olabilecek yeni bir optik ölçüm yöntemi (Dijital Görüntü Korelasyonu-DIC) kullanılmıştır. TAST numunelerindeki yapıştırıcıya ait kayma şekil değişimleri, Şekil 3.12'de gösterilen ve kontak ekstansometrenin TAST numunesine bağlanmasını sağlayan A, B, C, D deliklerinin alt noktalarını birleştiren hattaki şekil değişiminin belirlenmesi ile tespit edilmiştir. Bu hattın seçilmesinin, sebebi kontak ekstansometrenin ile elde edilen sonuçlarla DIC nin karşılaştırılması ve yapıştırma bağlantılarının analizlerinde DIC 'nin yeterli doğruluk sağlayan bir yöntem olup olmadığını incelemektir. Bu yöntemle ait analiz hattı Şekil 3.13'de gösterilmektedir.



**Şekil 3.13.** DIC tekniğinde analiz için kullanılan hat.

TAST numunelerine uygulanan tek eksenli çekme deneyiyle elde edilen görüntülerin işlenmesi sonucunda 1-2 hattındaki yer değiştirme değerlerinin yapıştırıcı tabakasına bölünmesiyle yapıştırıcıların kayma şekil değişimleri belirlenmiştir. Şekil 3.13'te gösterilen E, F noktalarını birleştiren hatta ait deplasmanının yapıştırıcı tabaka kalınlığına bölünmesi ile yapıştırıcı tabakasının kayma şekil değişimi doğrudan elde edilmiştir. Ancak TAST numunelerindeki yapıştırıcı tabaka kalınlığının 0.1-0.2 mm arasında değişmesinden dolayı bu değer çok düşük olması sebebiyle deney süresince kaydedilen görüntülerde bu hattın tam olarak görüntü üzerinden tespiti mümkün değildir ve bundan dolayı 1-2 hattı seçilmiştir. 1-2 hattı yapıştırılan malzeme deformasyonlarını da içermektedir fakat bu değerler çok küçük olduğundan dolayı bu çalışmada ihmal edilmiştir.

TAST numunelerinin çekme deneyi sonucunda Şekil 3.14'de gösterilen 1-2 hattı deformasyon sonrasında 1'-2' hattına dönüşmektedir. Bu yatay yer değiştirme miktarının  $(u_2 - u_1)$ , yapıştırıcı tabaka kalınlığına bölünmesi ile yapıştırıcı tabakasında meydana gelen kayma şekil değişimi belirlenirken, bu kayma şekil değişimlerine karşılık gelen yük verilerinin bindirme alanına bölünmesi ile de yapıştırıcıya ait kayma gerilmeleri belirlenmiştir.



**Şekil 3.14.** DIC yönteminde kayma şekil değişimini belirlemede kullanılan çizgisel hat.

$$\gamma_{DIC} = \frac{u_2 - u_1}{t} \quad (3.3)$$

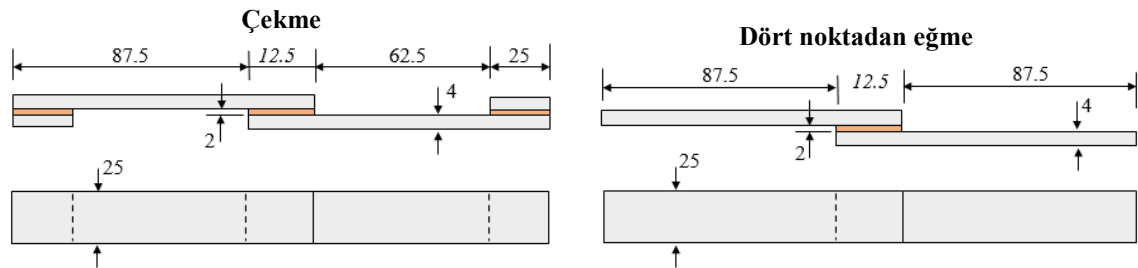
$$\tau = \frac{F}{lw} \quad (3.4)$$

### 3.6. Tek Tesirli Bindirme Bağlantısında Hasar Yükünün Belirlenmesi

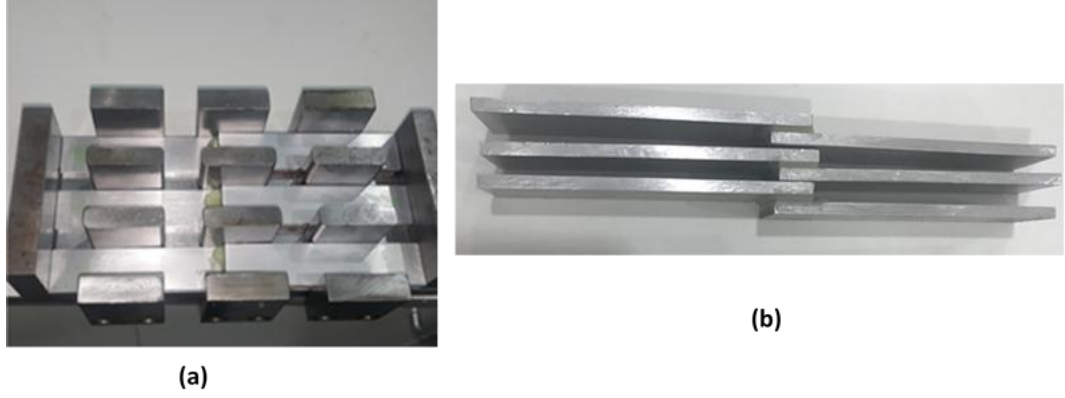
#### 3.6.1. Tek Tesirli Bindirme Bağlantı (SLJ) numunelerinin hazırlanması

Bir yapıştırma bağlantısındaki yapıştırıcının dayanımının tespit edildiği farklı deneysel yöntemler olmasına rağmen, basit geometrileri ve üretilmesinin kolay oluşundan dolayı, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının deneysel yöntemlerde kullanımı daha yaygındır (ASTM D1002, ISO 4587, ASTM D3165). Aslında; bu yöntemlerle kayma modülü, akma dayanımı gibi yapıştırıcının mekanik özellikleri belirlenemez, sadece farklı yapıştırıcı sistemlerinin karşılaştırılması, kalite kontrol ve bağlantının dayanımı hakkında oldukça faydalı bilgiler sağlanır.

Bu çalışmada, AA2024-T3 alüminyum alaşımları DP410 sıvı yapıştırıcısı ile birleştirilerek toplam 6 adet tek tesirli bindirme bağlantı numunesi üretilmiştir. Bunların 3 tanesi çekme, 3 tanesi ise dört noktadan eğme deneylerinde kullanılmıştır. Çekme ve dört noktadan eğme deneylerinde kullanılan tek tesirli bindirme bağlantısına ait geometrik parametreler Şekil 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.15. Tek tesirli bindirme bağlantısının geometrisi.



**Şekil 3.16.** (a) SLJ numunelerinin hazırlanmasında kullanılan kalıp, (b) Kalıptan çıkarılarak deneyler için hazır hale getirilmiş numuneler.

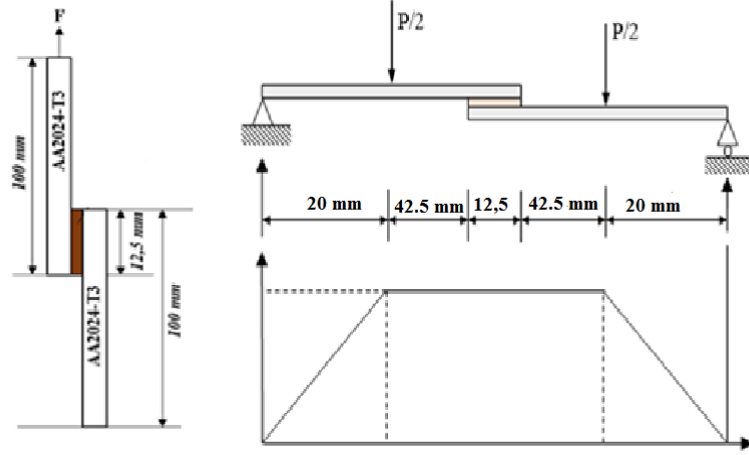
Bu çalışmada bütün halindeki AA2024-T3 levha, nümerik kontrollü tezgâhlarda Şekil 3.15’de verilen boyutlarda kesilerek yapıştırma işlemi öncesi TAST numunelerindeki gibi yüzey hazırlama işlemleri tabi tutulmuştur. Daha sonra aşağıda detayları verilen işlem basamakları uygulanarak tek tesirli bindirme bağlantıları üretilmiştir.

- Numuneler Şekil 3.16a’da gösterilen kalıba yerleştirilmeden önce, silikon yağlayıcı spreyin (3M Scotch™ 1609) kalıp üzerine püskürtülmesi ile oluşan çok ince film tabaka sayesinde numunelerin kalıba yapışması önlenmiş ve kürleşme sonrası numunelerin kalıptan kolayca çıkarılması sağlanmıştır.
- Numunelerin bindirme bölgelerine yapıştırıcılar uygulanarak bindirme yüzeyine homojen bir şekilde yayılması sağlanmıştır.
- Yapıştırıcıların kürleşmesi ve yapıştırıcı kalınlığının ayarlanması amacıyla numune üzerine ağırlıklar yerleştirilerek gerekli basınç sağlanmıştır.
- Son olarak kalıplar Şekil 3.9a’da gösterilen hidrolik prese yerleştirilip 60°C ‘de 120 dakika bekletilerek yapıştırıcıların kürleşmesi sağlanmıştır.
- Kürleşme işlemi sonrası numuneler kalıp içerisinden çıkarılmış ve kürleşme esnasında dışarı taşan yapıştırıcı kısımları temizlenerek yapıştırma işlemi tamamlanmıştır.

Bu çalışmada, Şekil 3.15 boyutları verilen ve Şekil 3.16’da gösterilen SLJ bağlantılarının çekme ve dört nokta eğme deneyleri, bilgisayar kontrollü 100 kN kapasiteli 5982 Model Instron universal test cihazı kullanılarak 22°C ve %30 nem

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

oranında 1 mm/dak'lık deformasyon hızında yapılmıştır. Çekme ve dört nokta eğme deneylerine ait yük ve sınır şartları sırasıyla Şekil 3.17 gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Çekme ve dört nokta eğme deneyindeki yük ve sınır şartları.

### 3.7. Sonlu Elemanlar Analizi

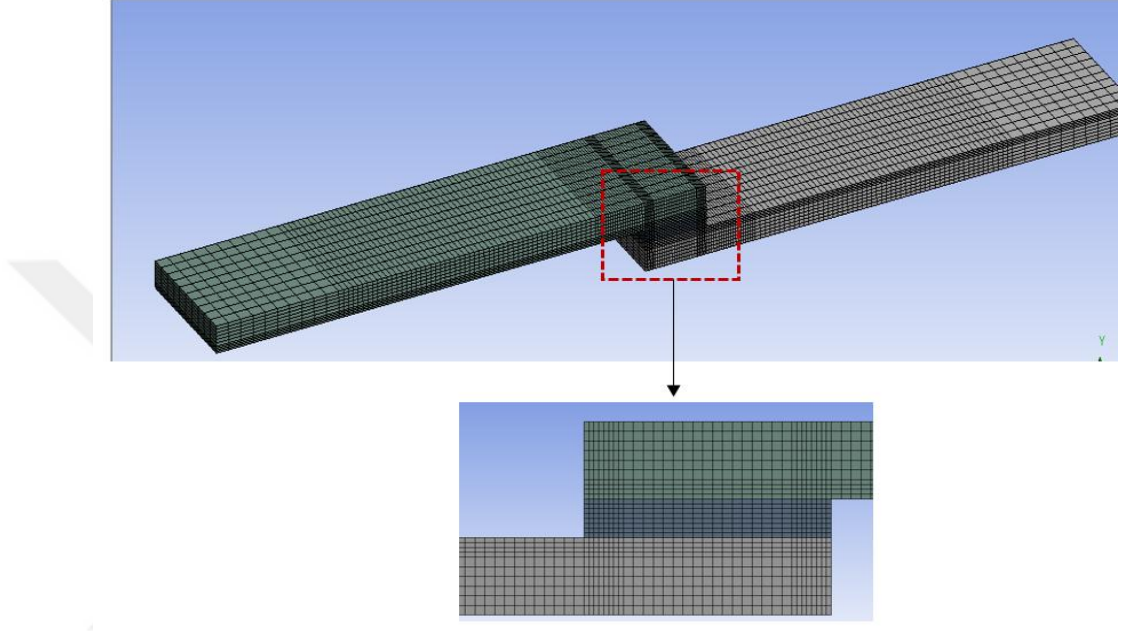
#### 3.7.1. Elasto-plastik sonlu eleman analizleri

Bu çalışmada, ANSYS Workbench 18.2 paket programı kullanılarak Multilinear Isotropic Hardening-von Mises plasticity malzeme modeline göre 3 boyutlu elasto-plastik sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir.

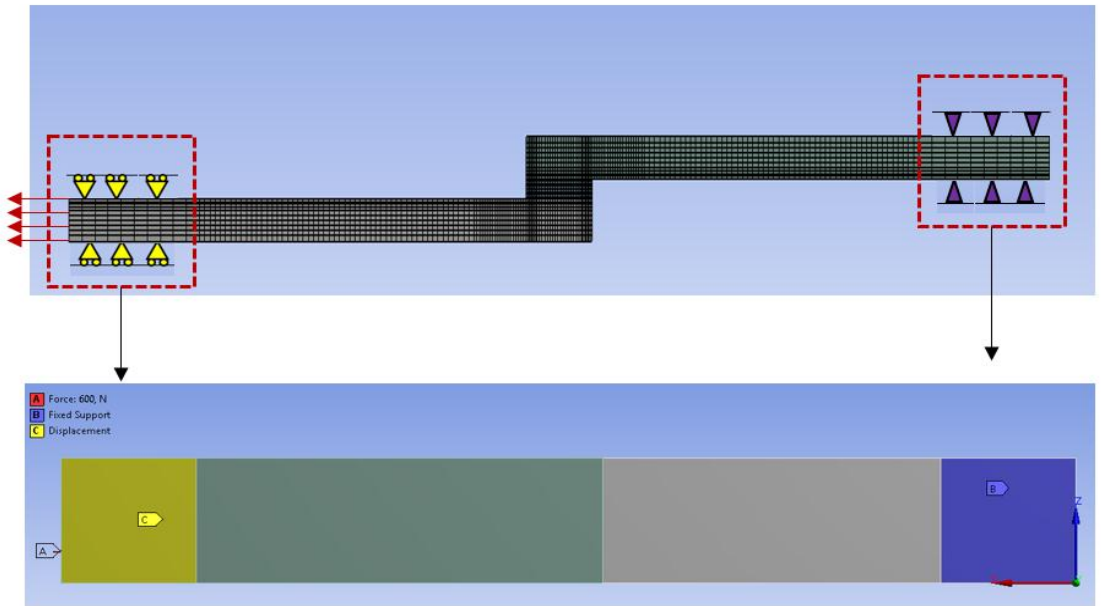
Sonlu elemanlar analizlerinde Şekil 3.15'de boyutları verilen SLJ numunesi deneylerde kullanılan yük ve sınır şartlarında 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Modelleme yapılırken gerilme yoğunluğu açısından önemli olan bölgeler daha küçük elemanlara bölünmüş ve üç serbestlik derecesi ve 8 düğüm noktasına sahip SOLID185 elemanlar kullanılarak modelleme yapılmıştır. Modellerdeki yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeyleri CONTA174 ve TARGE170 elemanları ile 'bonded contact' modunda modellenmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

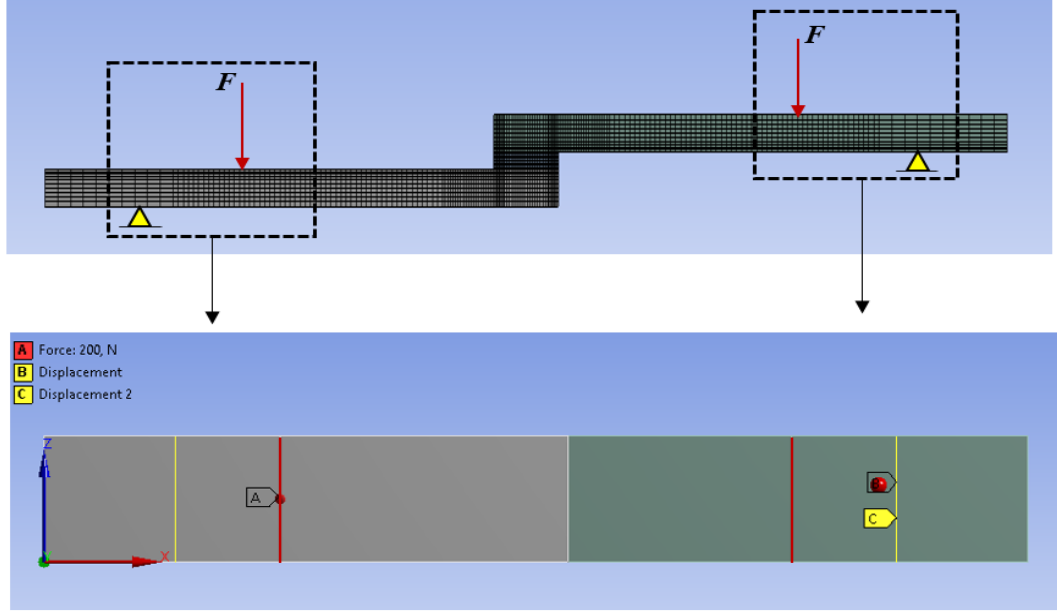
Çalışmada SLJ bağlantılarının 3 boyutlu elasto plastik sonlu elemanlar analizinde bağlantıların tek eksenli çekme ve dört nokta eğme yükleri altında modelleme yapılmış ve sonuçlar deneysel verilerle elde edilen DIC sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.18’de SLJ modeline ait ağ yapısı, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20’de ise yük-sınır şartları gösterilmiştir.



Şekil 3.18. SLJ modellerinde oluşturulan ağ yapısı.



Şekil 3.19. Tek eksenli çekme durumunda SLJ modelindeki yük ve sınır şartları



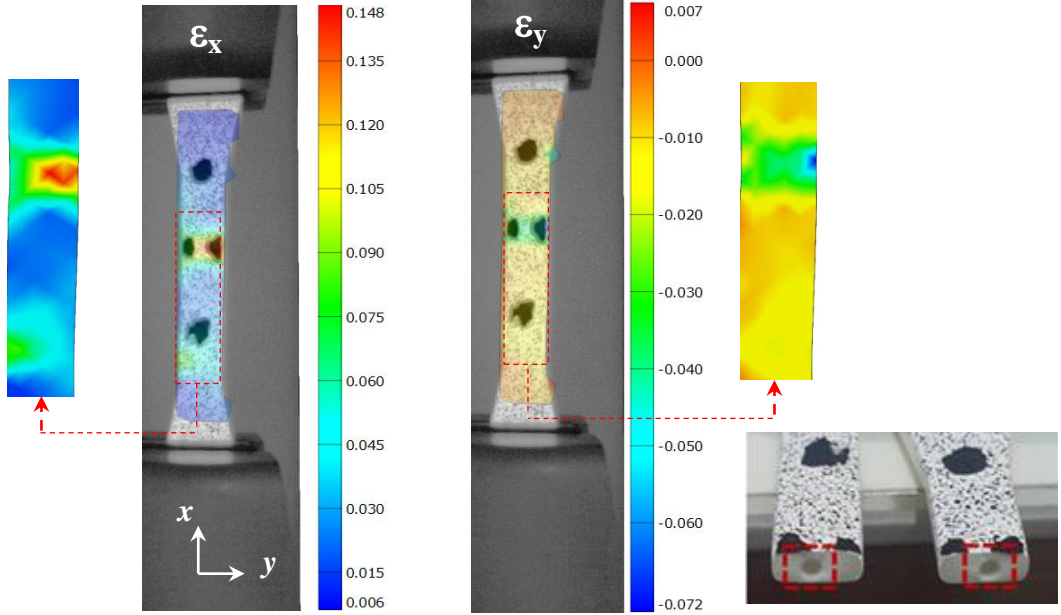
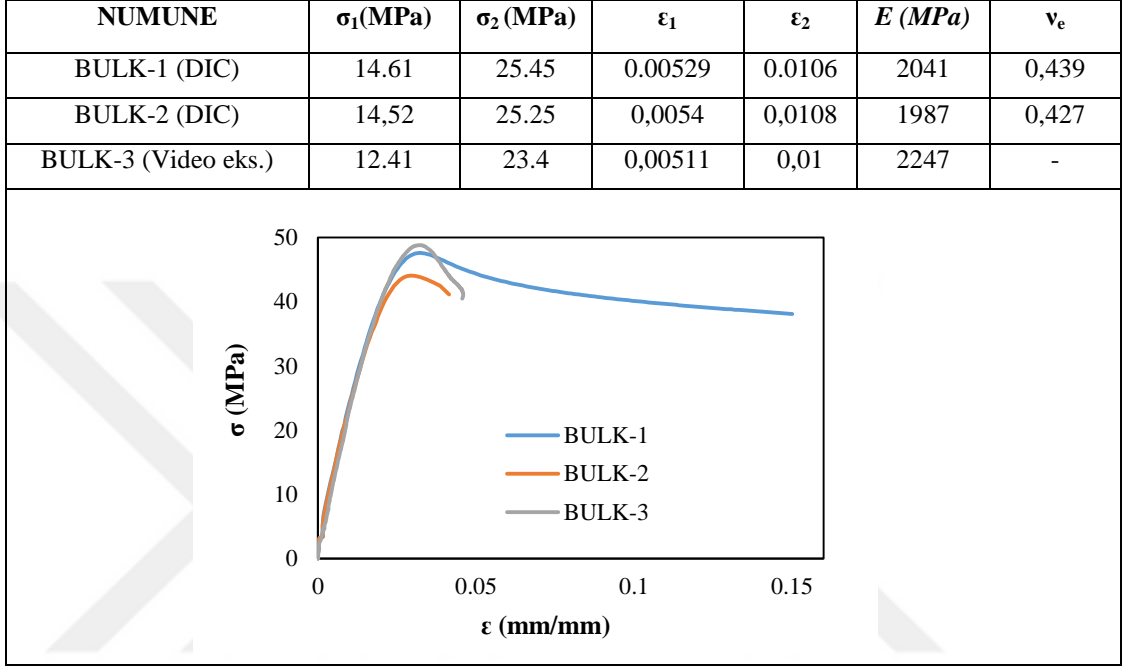
Şekil 3.20. Dört nokta eğme durumunda SLJ modelindeki yük ve sınır şartları.



## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

## 4.1. Standart Bulk Çekme Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar

**Çizelge 4.1.** Kalıp içerisine vakum uygulanmadan enjeksiyonla üretilen standart DP410 bulk çekme numunesinden elde edilen deneysel sonuçlar.



**Şekil 4.1.** Vakum uygulanmadan üretilen numunelerde oluşan şekil değiştirme dağılımları; (a) Eksenel doğrultudaki şekil değiştirmeler dağılımları  $-\epsilon_x$ , (b) Yanal doğrultudaki şekil değiştirme dağılımları  $-\epsilon_y$ ; (c) Hasar yüzeylerindeki kusur (hava boşluğu).

Bu çalışmada vakum altında ve vakum olmadan DP410 ‘dan bulk formda üretilen toplam altı adet standart çekme numuneleri tek eksenli çeki yüküne maruz bırakılmış ve meydana gelen yanal ve eksenel şekil değişimleri DIC tekniği ve video ekstensometre ile belirlenerek yapıştırıcıya ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir. Her iki optik ölçüm yönteminden elde edilen grafikler karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.1).

Çalışmada kullanılan yapıştırıcıların elastisite modülü 0.001–0.01 aralığındaki şekil değişimleri ve bu değerlere karşılık gelen gerilmeler kullanılarak denklem 4.1 vasıtasıyla hesaplanmıştır (Çizelge 4.1).

$$\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4.1)$$

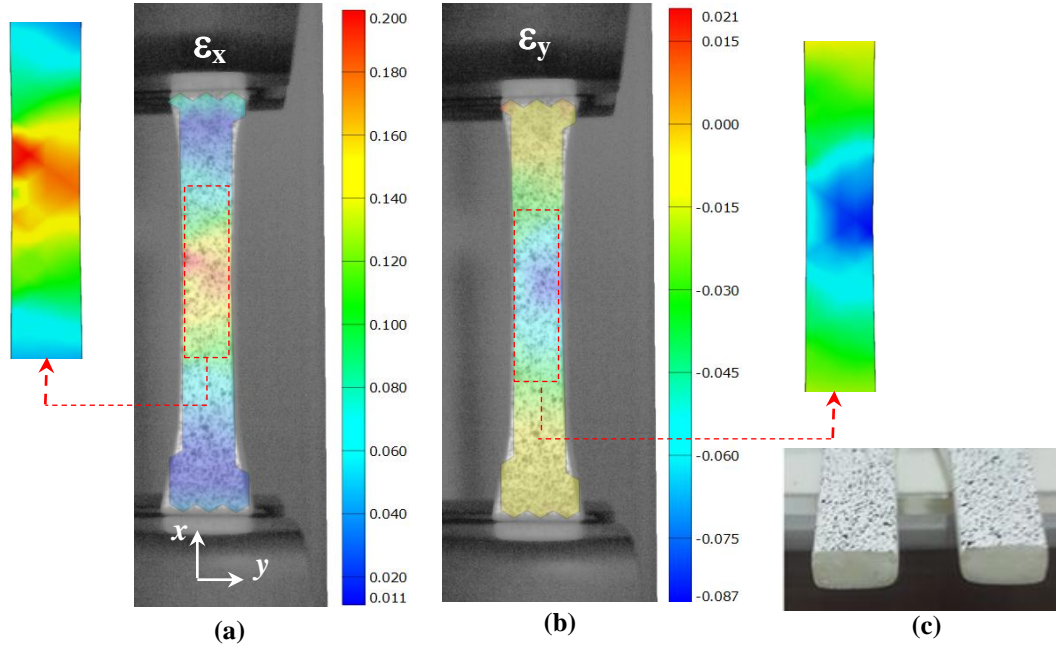
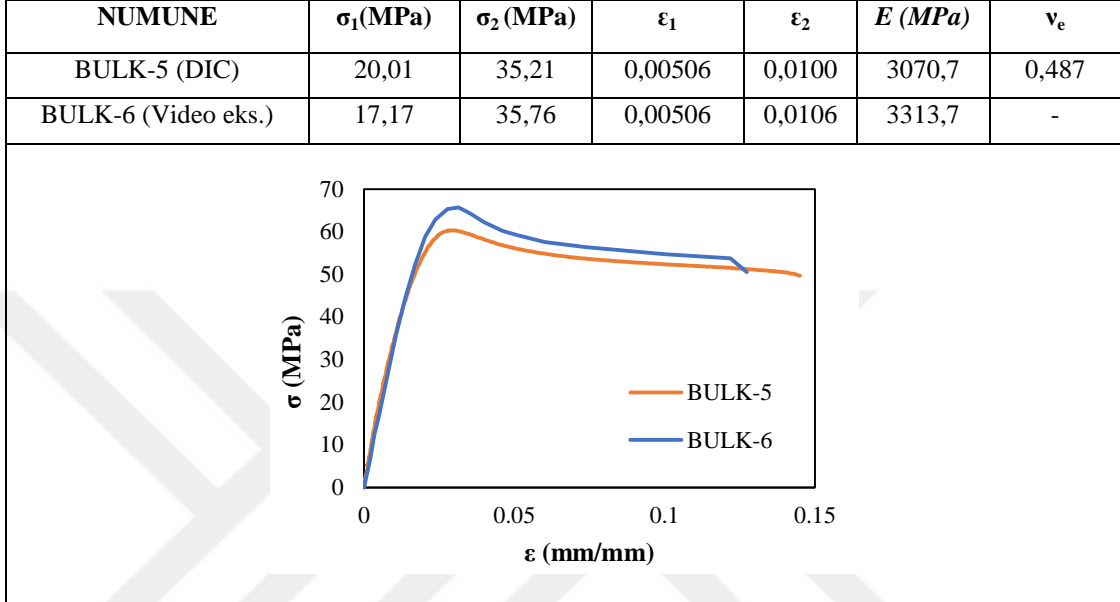
Vakum olmadan üretilmiş ve 5 mm/dak’lık deformasyon hızında test edilmiş numunelerden 1. ve 2. numunelerde DIC yöntemi, 3. numunede ise video ekstensometre kullanılmıştır (Şekil 4.1, Çizelge 4.1). Sonuçlar incelendiğinde BULK-1 numunesinin diğerlerine nispeten daha fazla uzama gösterdiği ve BULK-2 numunesine ait maksimum yük değerinin diğerlerinden düşük olduğu görülmektedir. Sonuçlarda oluşan sapmalara, bulk numunelerin üretiminden kaynaklanan hava boşlukları gibi iç kusurların sebep olduğu söylenebilir. Bu durum Şekil 4.1a ve b de verilen eksenel ve yanal şekil değiştirme dağılımlarının özellikle kusurların olduğu bölgede yoğunlaşmasından ve kopma sonrası hasar yüzeylerinin (Şekil 4.1c) incelenmesinden açıkça görülmektedir.

Çizel 4.2 ‘de vakum altında üretilen numunelerden elde edilen elastik özellikler ve gerilme-şekil değiştirme grafiği verilirken, Şekil 4.2’de bu numunelerden elde edilmiş eksenel ve yanal şekil değiştirme dağılımları gösterilmiştir. BULK-6 olarak isimlendirilen numunede video ekstansometre, BULK-5 olarak isimlendirilen numunede ise DIC tekniği kullanılarak şekil değiştirmeler belirlenmiştir. BULK-5 ve BULK-6 numunelerinden elde edilen şekil değiştirme dağılımları ve kırılma yüzeyleri incelendiğinde (Çizelge 4.2), bu numunelerde oluşan yüzey ve iç kusurların minimize edildiği için her iki yöntemle elde edilen çekme diyagramlarının bir birine oldukça yakın ve uyum içinde olduğu görülmüştür. Hasar öncesi eksenel (Şekil 4.2a) ve yanal

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

(Şekil 4.2b) şekil değiştirme dağılımları incelendiğinde, kırılma bölgesi dışında şekil değişimlerinin yoğunlaştığı herhangi bir alanın olmadığı açıkça görülmektedir. Bu durum numune üretiminde oluşan kusur ve hataların azaldığı tezini desteklemektedir.

**Çizelge 4.2.** Kalıp içerisine vakum uygulanarak enjeksiyonla üretilen standart DP410 bulk çekme numunesinden elde edilen deneysel sonuçlar.



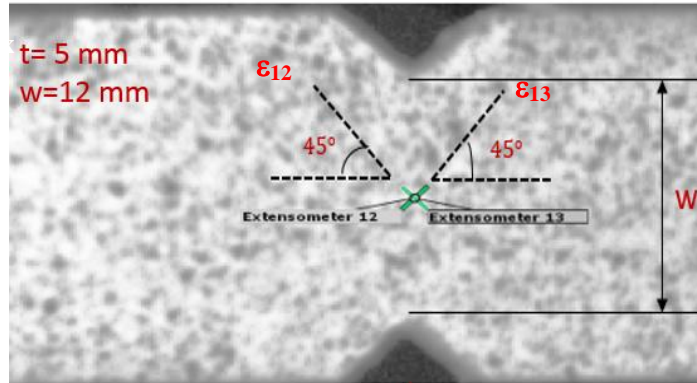
**Şekil 4.2.** Vakum uygulanarak üretilen numunelerde oluşan şekil değiştirme dağılımları; (a) Eksenel doğrultudaki şekil değiştirmeler dağılımları  $-\epsilon_x$ , (b) Yanal doğrultudaki şekil değiştirme dağılımları  $-\epsilon_y$ ; (c) Hasar yüzeylerindeki kusur (hava boşluğu).

#### 4.2. Iosipescu Bulk Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar

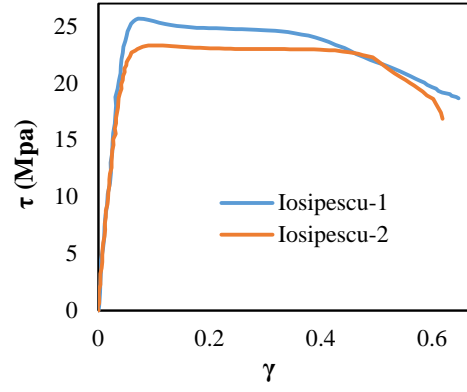
Vakum altında enjeksiyonla üretilen Iosipescu bulk numuneleri üzerinde yapılan deneyler 5 mm/dak 'lık deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Iosipescu numuneleri üzerinde DIC tekniğiyle gerçekleştirilen deneylerde kayma şekil değişimlerini belirlemek üzere numune üzerindeki çentik köklerini birleştiren hat üzerine (Şekil 4.3) iki adet  $\pm 45^\circ$  açılarında sanal ekstansometreler yerleştirilmiştir. Sanal ekstansometrelerden alınan kayma şekil değişimleri denklem 4.2'de yerine yazılarak, kayma gerilmeleri ise deney süresince kaydedilen yük verilerinin kaymaya zorlanan kesit alanına bölünerek (denklem 4.3) Şekil 4.4'te gösterilen kayma gerilmesi-şekil değişimi grafikleri çizilmiştir. Bu eğrilerle birlikte Şekil 4.5'te aynı yük değerinde iki farklı numune üzerinden alınmış kayma şekil değişimi dağılımları incelendiğinde DIC tekniğiyle elde edilen verilerin birbiri ile uyum içinde olduğu ve bu tekniğin şekil değiştirme dağılımları için tekrarlanabilir sonuçlar türettiği söylenebilir.

$$\gamma = \varepsilon_{12} + \varepsilon_{13} \quad (4.2)$$

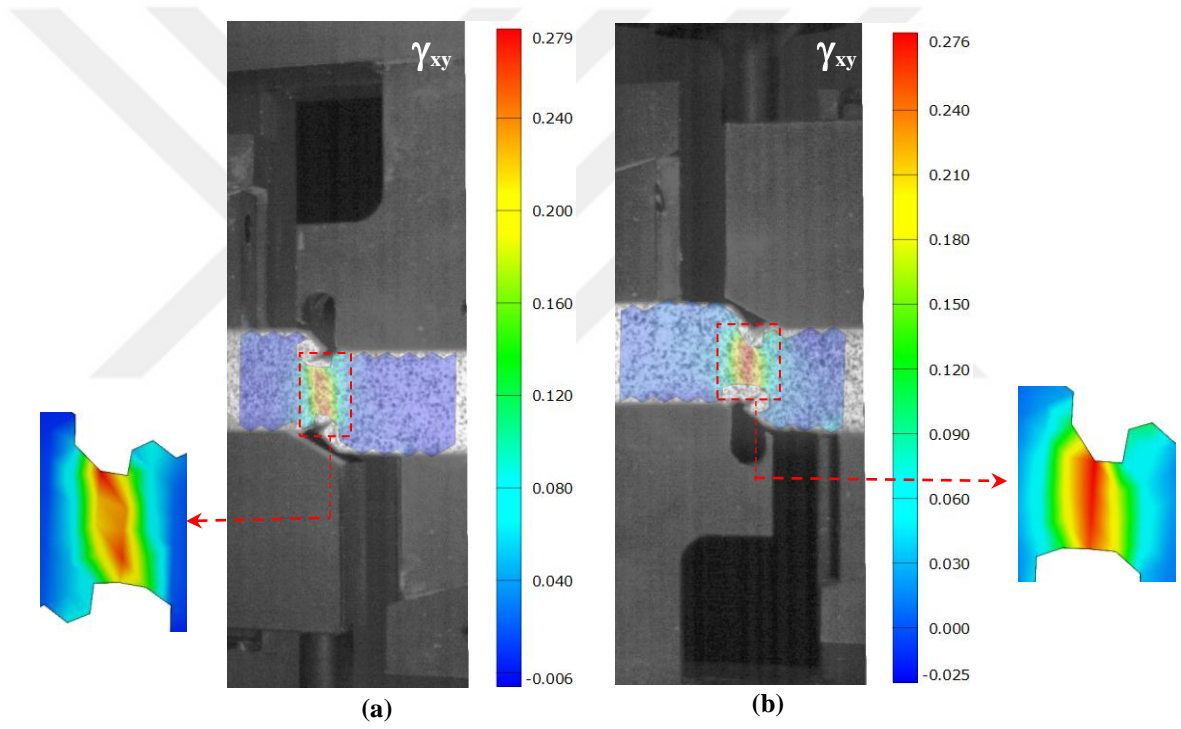
$$\tau = \frac{F}{tw} \quad (4.3)$$



**Şekil 4.3.** Iosipescu numunelerine ait kayma şekil değişimlerinin belirlenmesinde kullanılan sanal ekstansometreler.

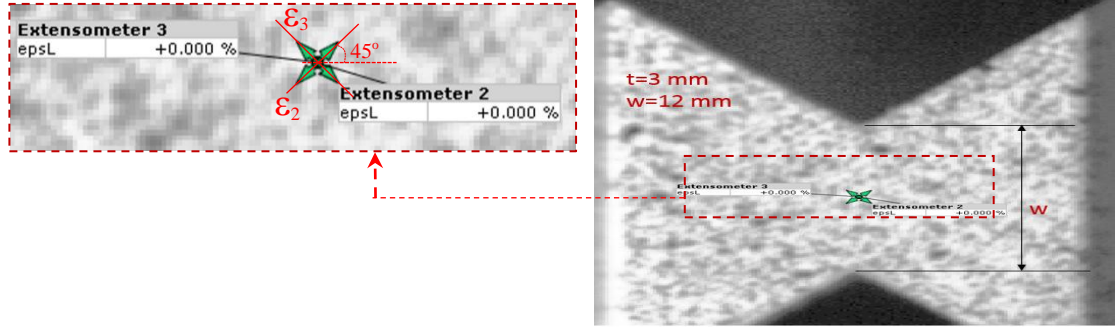


Şekil 4.4. Iosipescu numunelerinden DIC tekniği ile elde edilen kayma gerilmesi-kayma şekil değişimi eğrileri.



Şekil 4.5. Iosipescu numunelerinde aynı yükleme anında kayma şekil değişimi dağılımları; (a) Iosipescu-1 numunesi, (b) Iosipescu-2 numunesi.

## 4.3. Arcan Bulk Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar

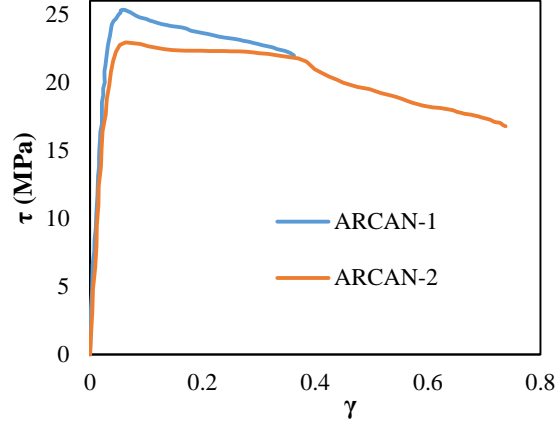


**Şekil 4.6.** Arcan numunelerine ait kayma şekil değişimlerinin belirlenmesinde kullanılan sanal ekstansometreler.

Vakum olmadan üretilen arcan bulk numuneleri üzerinde yapılan deneyler 5 mm/dak 'lık deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Arcan numuneleri üzerinde DIC tekniğiyle gerçekleştirilen deneylerde kayma şekil değişimlerini belirlemek üzere numune üzerindeki çentik köklerini birleştiren hat üzerine (şekil 4.6) iki adet  $\pm 45^\circ$  açılarında sanal ekstansometreler yerleştirilmiştir. Sanal ekstansometrelerden alınan kayma şekil değişimleri denklem 4.4 de yerine yazılarak, kayma gerilmeleri ise deney süresince kaydedilen yük verilerinin kaymaya zorlanan kesit alanına bölünerek (denklem 4.6) Şekil 4.7'de gösterilen kayma gerilmesi-şekil değişimi grafikleri çizilmiştir.

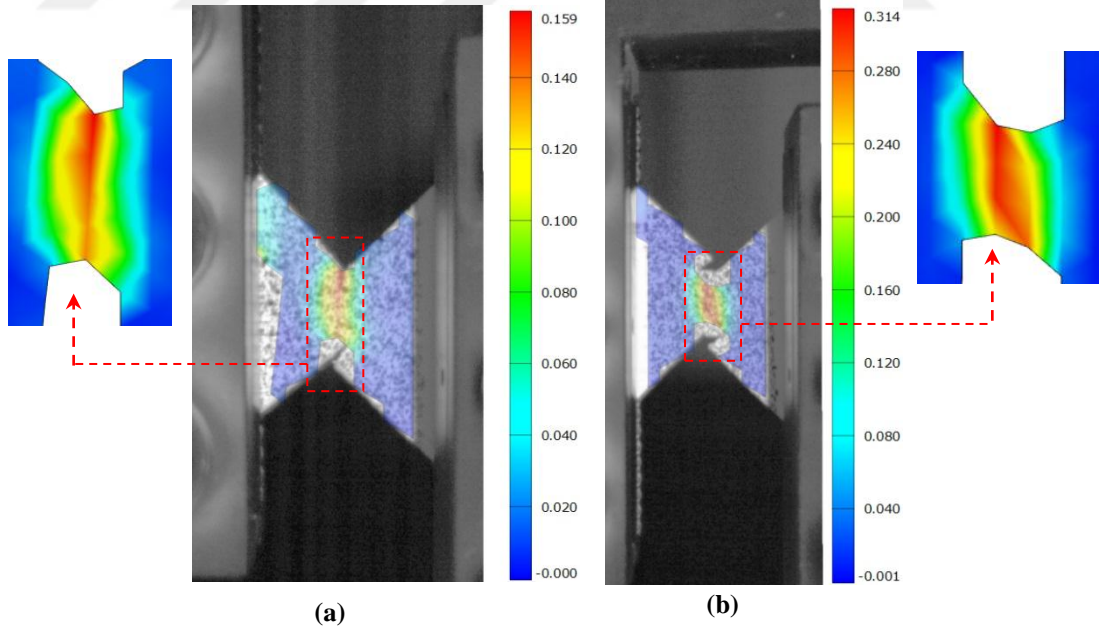
$$\gamma = \varepsilon_{12} + \varepsilon_{13} \quad (4.4)$$

$$\tau = \frac{F}{tw} \quad (4.5)$$



**Şekil 4.7** Arcan numunelerinden DIC tekniği ile elde edilen kayma gerilmesi- şekil değişimi eğrileri.

Şekil 4.7'de arcan numunelerinin DIC yöntemi ile elde edilen kayma gerilmesi- kayma şekil değişim eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerle birlikte şekil 4.8 incelendiğinde numunelerden elde edilen sonuçlar arasında farklılıkların olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar, Arcan numunelerinin üretimi esnasında oluşan iç kusurlardan kaynaklandığı söylenebilir.



**Şekil 4.8.** Arcan numunelerinde aynı yükleme anında kayma şekil değişimi dağılımları; (a) Arcan-1 numunesi, (b) Arcan-2 numunesi.

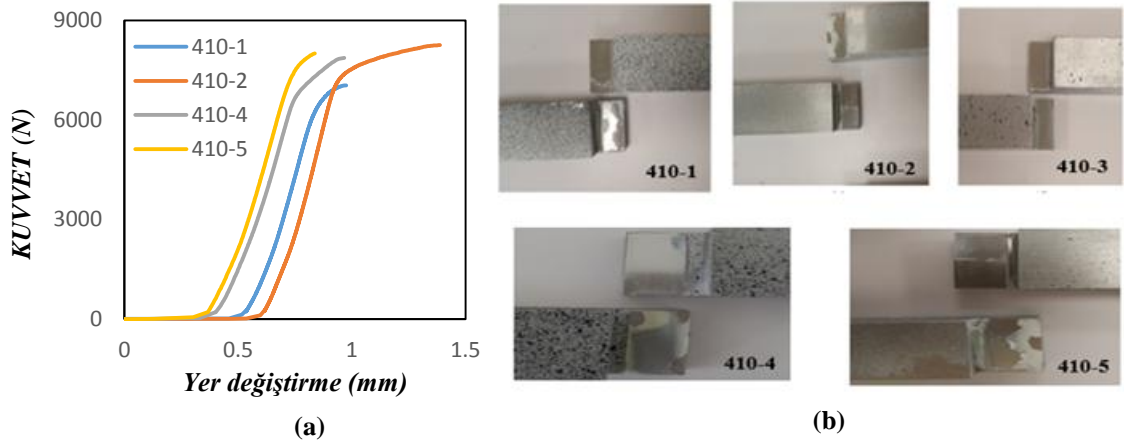
#### 4.4. Kalın Yapıştırılan Malzemeler Kullanılarak Oluşturulmuş Bağlantı Numunelerinden (TAST) Elde Edilen Sonuçlar

Çizelge 4.3. TAST numunelerinin deneysel sonuçları.

NUMUNE	F (N)	$\Delta L$ (mm)	Hasar Tipi	Ekstansometre kullanımı	DIC kullanımı
TAST 410-1	7039	0,975	A.H.	+	+
TAST 410-2	8251	1,387	A.H.	+	+
TAST 410-3	7240	0,588	A.H.	+	+
TAST 410-4	7864	0,967	A.H.	-	+
TAST 410-5	8000	0,837	A.H.	-	+

A.H: Adhezyon hasarı; K.H: Kohesif hasar; F: Hasar yükü;  $\Delta L$ : Hasar yükündeki yer değiştirme.

Çalışmada AISI 1040 çelikleri ve DP410 yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan 5 adet TAST numunelerinin deneyleri 2450 N/dk'lık deformasyon hızında yapılmıştır. Bu numunelere ait deneysel sonuçlar Çizelge 4.3'te özetlenmiş ve Şekil 4.9'da ise numunelerin deneylerinden çekme çenelerin hareketine göre belirlenmiş kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve hasar yüzeyleri gösterilmiştir. ISO 10365'te tanımlanan hasar tipleri dikkate alındığında, numunelerde adhesif hasarın olduğu söylenebilir. Ayrıca hasar bindirme hattının uçlarında başlayıp bağlantının bindirme bölgesinde hasar oluşana kadar ilerlemiştir.

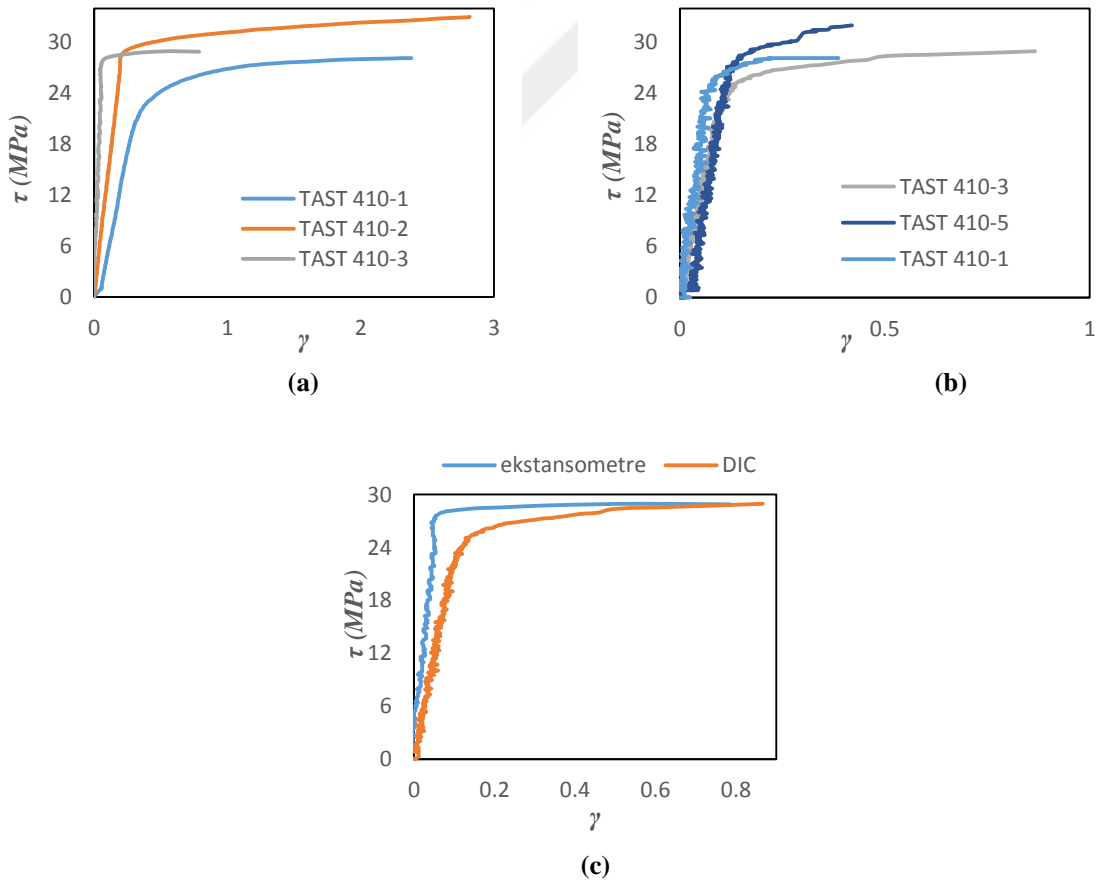


Şekil 4.9. TAST DP410 numuneleri için; (a) Kuvvet-yer değiştirme eğrileri, (b) Hasar yüzeyleri.



#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

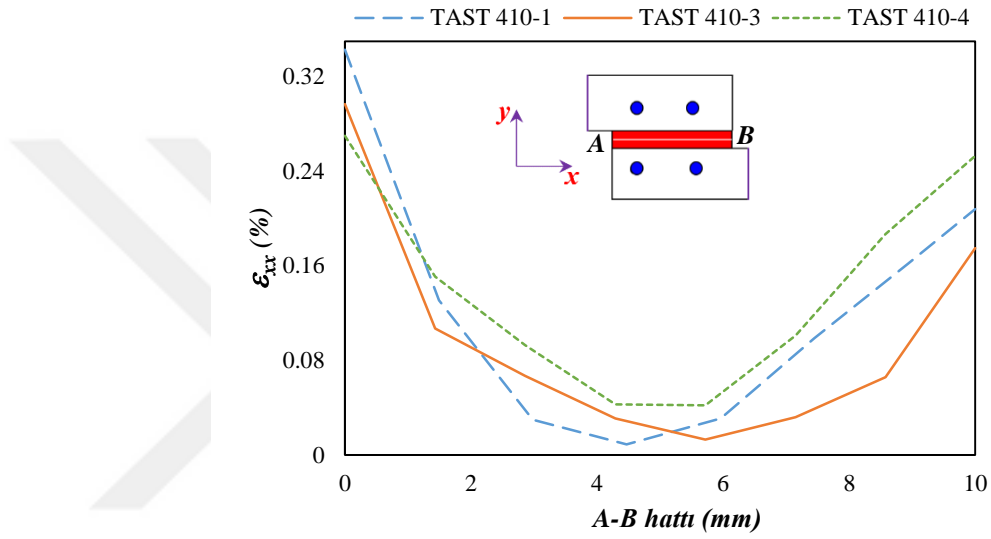
Bu kısımda numuneler üzerine hem ekstansometre bağlanarak hemde dijital görüntü korelasyon tekniğiyle üç adet numune test edilerek yapıştırıcıya (DP410) ait kayma gerilmesi-kayma şekil değişimi eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4.10(a)'da ekstansometre bağlanmış numunelerden elde edilen kayma gerilmesi-kayma şekil değişimi eğrileri gösterilirken, Şekil 4.10(b) 'de dijital görüntü korelasyon tekniğinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar incelendiğinde her iki yöntemden elde edilen ayrı ayrı incelendiğinde sonuçlarda büyük farklılıkların olduğu görülmektedir. Şekil 4.9b'de verilen hasar yüzeyleri dikkate alındığında bu durumun, DP410 numunelerine uygulanan yüzey hazırlama işlemlerinin yeterli olmamasından kaynaklandığı söylenebilir. Diğer taraftan aynı numune üzerinde ekstansometre bağlanarak ve dijital görüntü korelasyon tekniğiyle belirlenmiş eğriler karşılaştırıldığında (Şekil 4.9c) büyük bir uyumun olduğu ve elde edilen eğrilerin bir birine yakın olduğu görülmektedir.



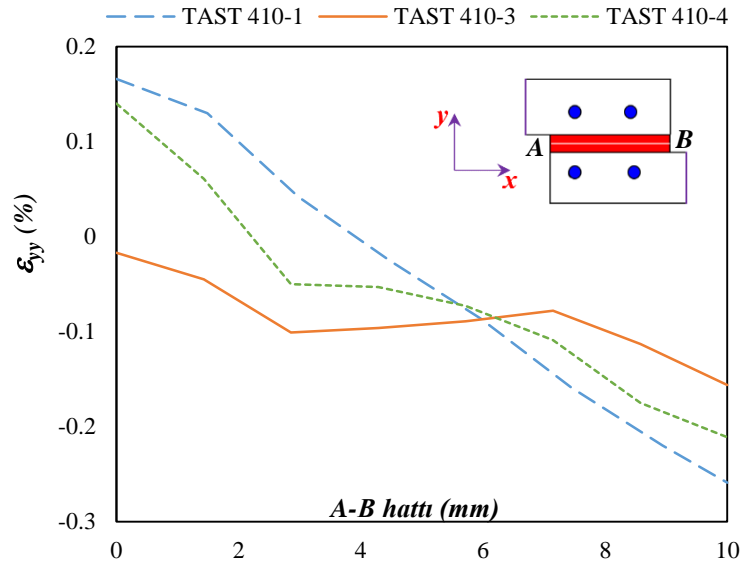
**Şekil 4.10.** DP410 için kalın yapıştırılan malzemelerden üretilmiş numunelerden elde edilmiş kayma gerilmesi-kayma şekil değişimi eğrileri; a) Ekstansometre kullanılarak elde edilen eğriler, b) Dijital görüntü korelasyon tekniğinden elde edilen eğriler, c) Dijital görüntü korelasyon tekniği ve ekstansometreden elde edilen eğrilerin karşılaştırılması.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Şekil 4.11 ve 4.12’de TAST numunelerinde yapıştırıcı tabakası içindeki *A-B hattı* boyunca DIC ile elde edilen normal şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_{xx}$  ve  $\epsilon_{yy}$ ) gösterilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde bindirme hattı boyunca uçlarda şekil değiştirmelerin maksimum ve minimum olduğu görülmektedir. Hasar oluşumunun bindirme uçlarında başlamasının sebebi olan bu dağılımların DIC yöntemi ile doğrulandığı söylenebilir. Ayrıca numunelerin özellikle çekme yönü yani *x* yönündeki şekil değişim dağılımlarının birbirine benzer ve uyumlu olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.11.** Yapıştırıcı tabakasındaki *A-B hattı* boyunca DIC ile elde edilen *y* eksenine doğrultusundaki normal şekil değiştirme ( $\epsilon_{xx}$ ) dağılımları.



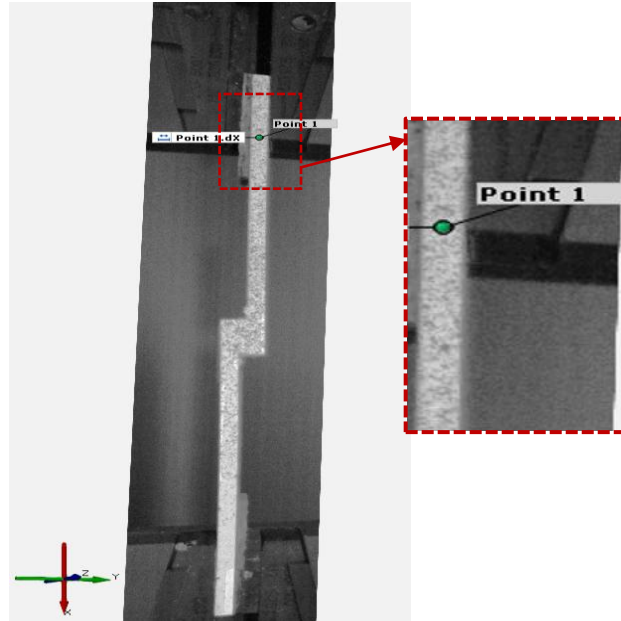
**Şekil 4.12.** Yapıştırıcı tabakasındaki *A-B hattı* boyunca DIC ile elde edilen *y* eksenine doğrultusundaki normal şekil değiştirme ( $\epsilon_{yy}$ ) dağılımları.

### 4.5. Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarından Elde Edilen Sonuçlar

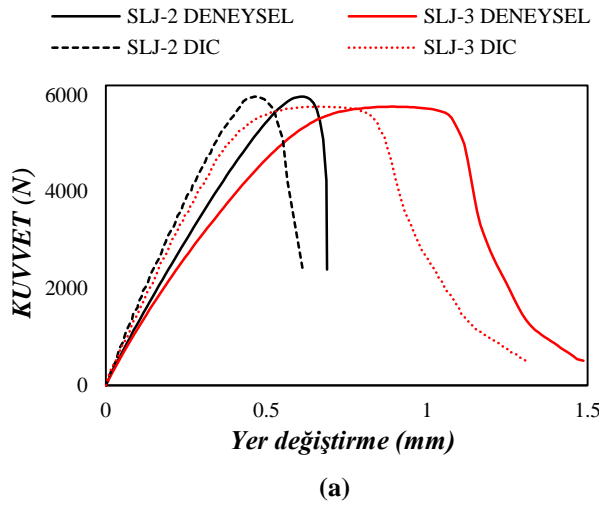
Şekil 4.15’de boyutları verilen tek tesirli bindirme bağlantıları 1 mm/dk ‘lık deformasyon hızında çekme ve dört noktadan eğme yüklerine maruz bırakılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar sonlu eleman yönteminden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

#### 4.5.1. Çekme deneyi sonuçları

Çekme deneylerinde üç adet numune test edilmiştir. Bu deneylerde numunelerde meydana gelen yer değiştirmeler iki farklı yöntemle tespit edilmiştir. İlk yöntemde yer değiştirmeler, çekme cihazının çenelerinin bir birlerine göre hareketinden, ikinci yöntemde ise Şekil 4.13’de gösterilen noktadan DIC tekniğiyle belirlenmiştir. Elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafikleri Şekil 4.14a’da gösterilirken, oluşan hasar yüzeyleri Şekil 4.14b’de gösterilmiştir. Bu hasar yüzeyleri incelendiğinde DP410 yapıştırıcısı kullanılarak oluşturulan numunelerde adhesif hasarın oluştuğu görülmektedir. Bu durumun yapıştırılan malzemelere yeterli yüzey hazırlığının yapılamamasından kaynaklandığı söylenebilir.



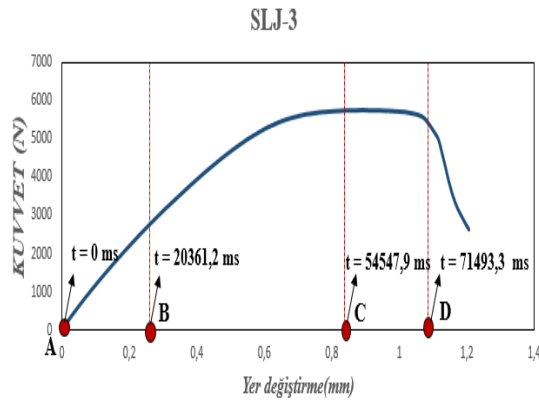
Şekil 4.13. SLJ çekme numunelerinde yer değiştirmeyi DIC yöntemi ile hesaplamak amacıyla kullanılan noktanın gösterimi.



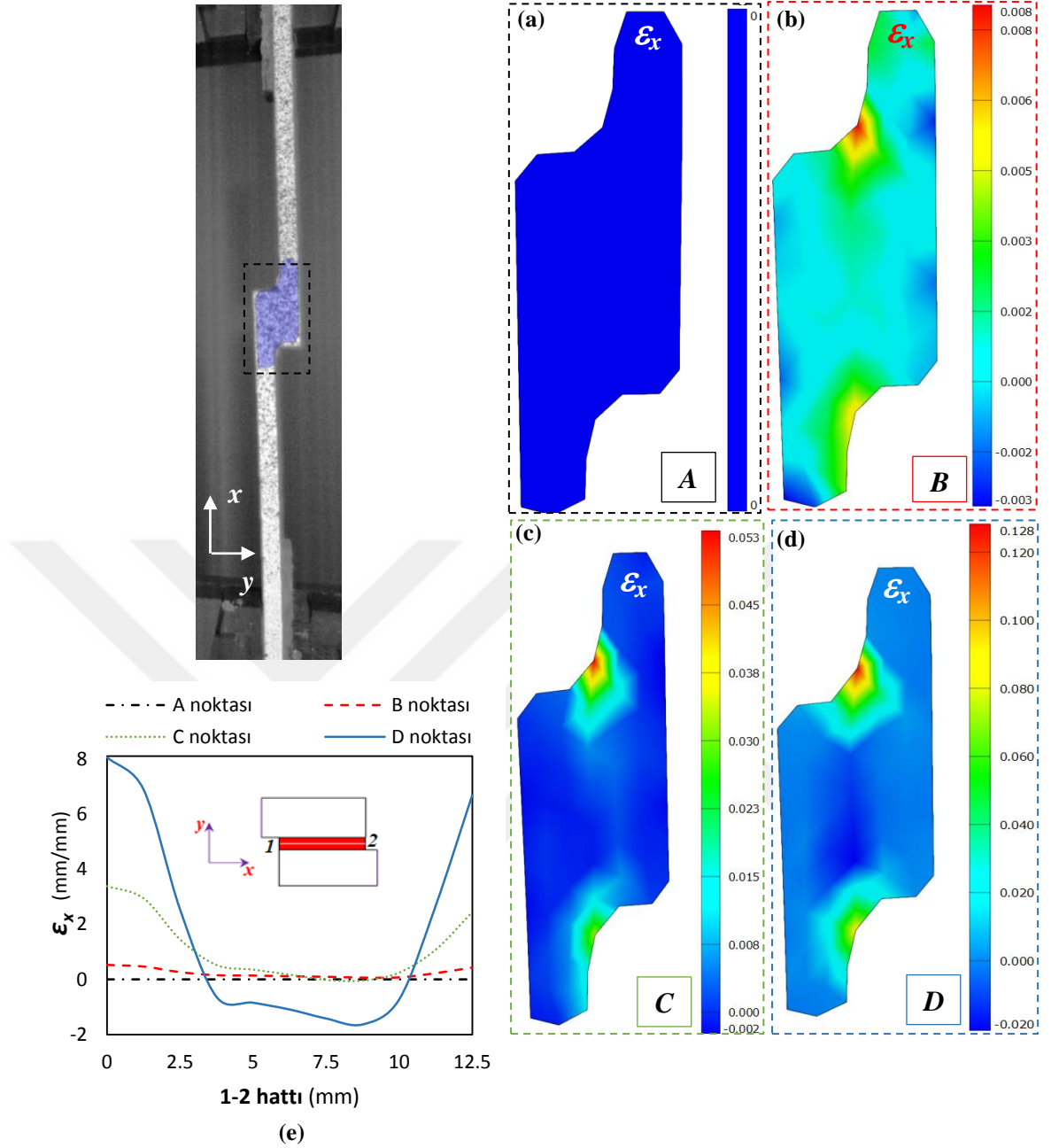
**Şekil 4.14.** DP410 yapıştırıcısı ile oluşturulan SLJ numunelerinde; (a) Kuvvet-yer değiştirme eğrileri, (b) Hasar yüzeyleri.

Kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde her iki yöntem arasında uyum olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte tüm numunelerde DIC ile elde edilen yer değiştirme değerlerinin çene hareketinden elde edilenlere göre daha düşük olduğu görülmektedir.

SLJ-3 numunesinin yüzeyindeki görüntü çözünürlüğünün (70,04pix/10mm) diğerlerine göre nispeten daha yüksek olmasından dolayı DIC analizi için yapılacak daha detaylı incelemeler için bu numune seçilmiştir. Bu numuneden elde edilen ve Şekil 4.15’de kuvvet-yer değiştirme grafiğinden farklı zaman aralıklarındaki (A, B, C ve D noktaları) Şekil değiştirme dağılımları aşığıda verilmiştir (Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18).



**Şekil 4.15** SLJ-3 numunesine ait kuvvet-yer değiştirme eğrisi üzerinde farklı zaman dilimlerindeki DIC analizinde kullanılan A, B, C ve D noktaları.

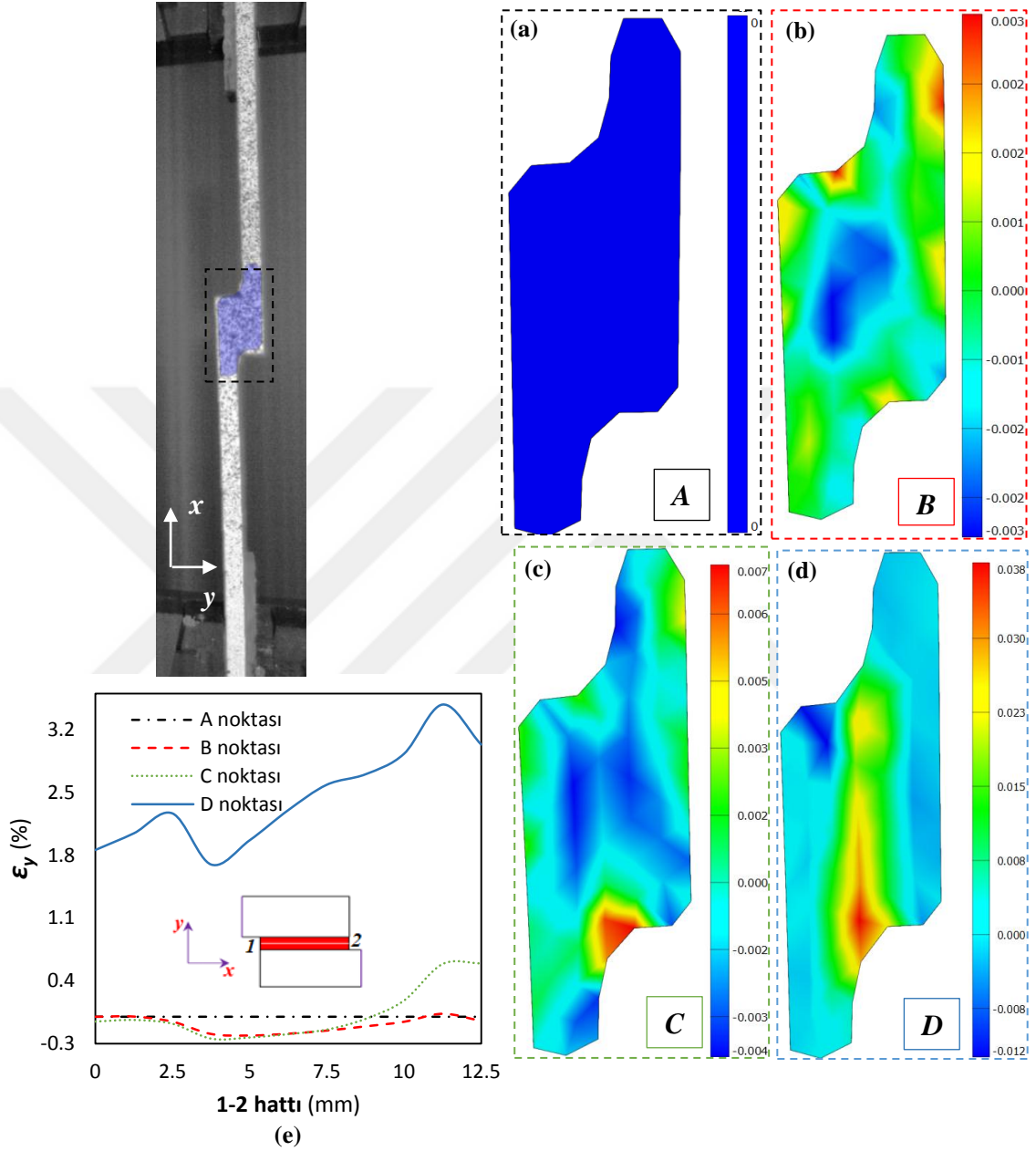


**Şekil 4.16.** SLJ-3 numunesinde  $x$  eksenine doğrultusunda oluşan şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_x$ ); **a)** 0 ms (A noktası), **b)** 20361.2 ms (B noktası), **c)** 54547.9 ms (C noktası), **d)** 71493.9 ms (D noktası), **e)** Yapıştırıcı tabakası içindeki 1-2 hattı boyunca oluşan  $x$  yönündeki şekil değiştirme dağılımlarının zamana göre değişimi.

Şekil 4.16'da verilen  $x$  yönündeki şekil değişim haritaları incelendiğinde en büyük şekil değiştirme değerinin bindirmenin yapıldığı bölgenin uçlarında olduğu içeriye doğru azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.16e 'de SLJ-3 numunesinde yapıştırıcı tabakasının tam ortasından çizilmiş 1-2 hattı üzerinde farklı zaman dilimlerinde (A, B, C ve D) artan kuvvetle birlikte oluşan  $x$  eksenine doğrultusundaki şekil değiştirme ( $\epsilon_x$ ) dağılımları verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde bindirme uçlarındaki şekil değişim

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

değerlerinin maksimum, ortalarda ise minimum olduğu görülmektedir. Ayrıca hasar anına yakın yük değerlerinde bindirme hattının ortasında bası karakterli şekil değişimlerinin olduğu görülmektedir.

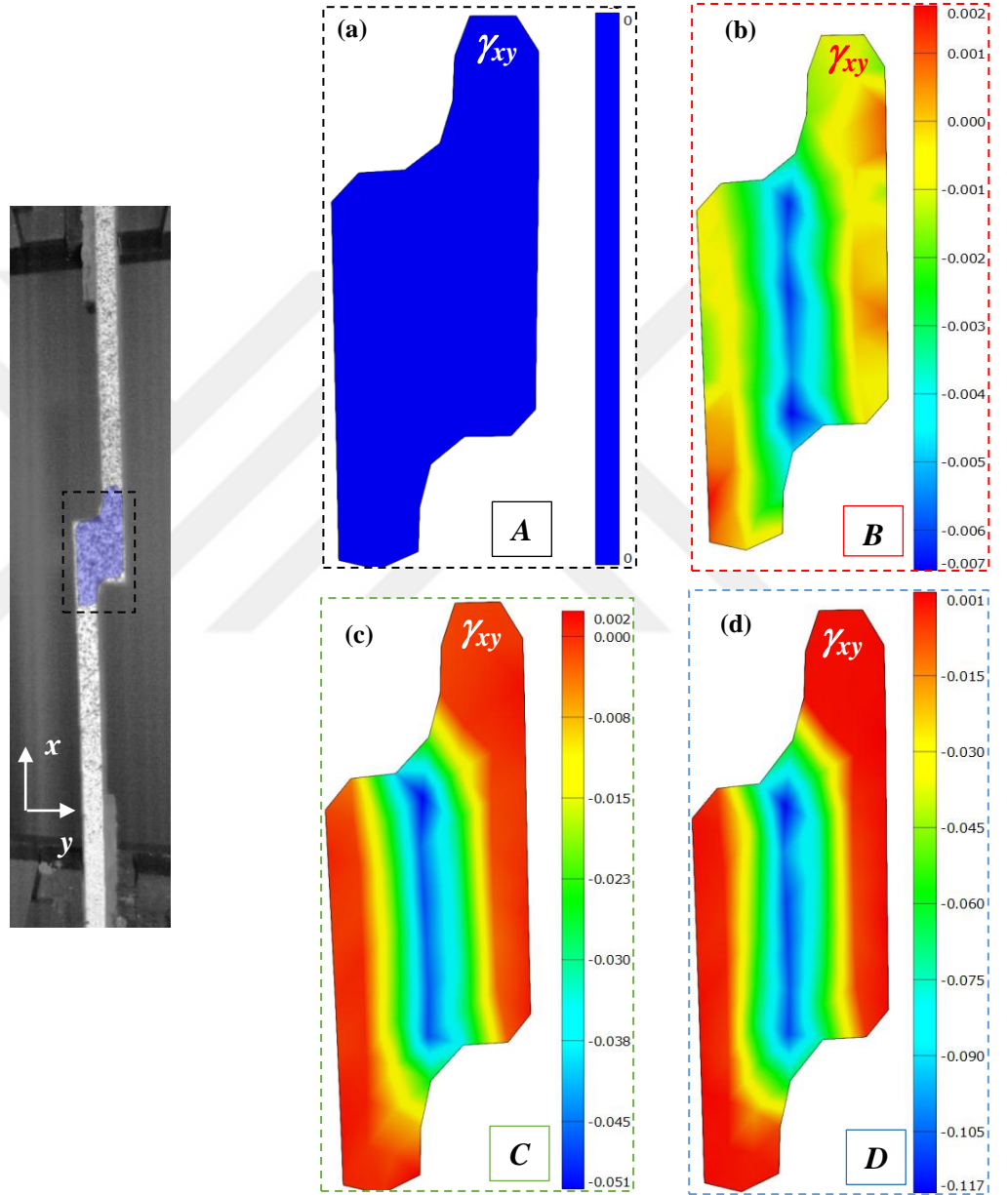


**Şekil 4.17.** SLJ-3 numunesinde y eksenine doğrultusunda oluşan şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_y$ ); **a)** 0 ms (A noktası), **b)** 20361.2 ms (B noktası), **c)** 54547.9 ms (C noktası), **d)** 71493.9 ms (D noktası), **e)** Yapıştırıcı tabakası içindeki 1-2 hattı boyunca oluşan y yönündeki şekil değiştirme dağılımlarının zamana göre değişimi.

Şekil 4.17'de verilen y yönündeki şekil değişim haritaları incelendiğinde en büyük şekil değiştirme değerinin bindirmenin yapıldığı bölgenin uç kısmında olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.17e 'de SLJ-3 numunesinde yapıştırıcı tabakasının tam ortasından çizilmiş 1-2 hattı üzerinde farklı zaman dilimlerinde (A, B, C ve D) artan

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

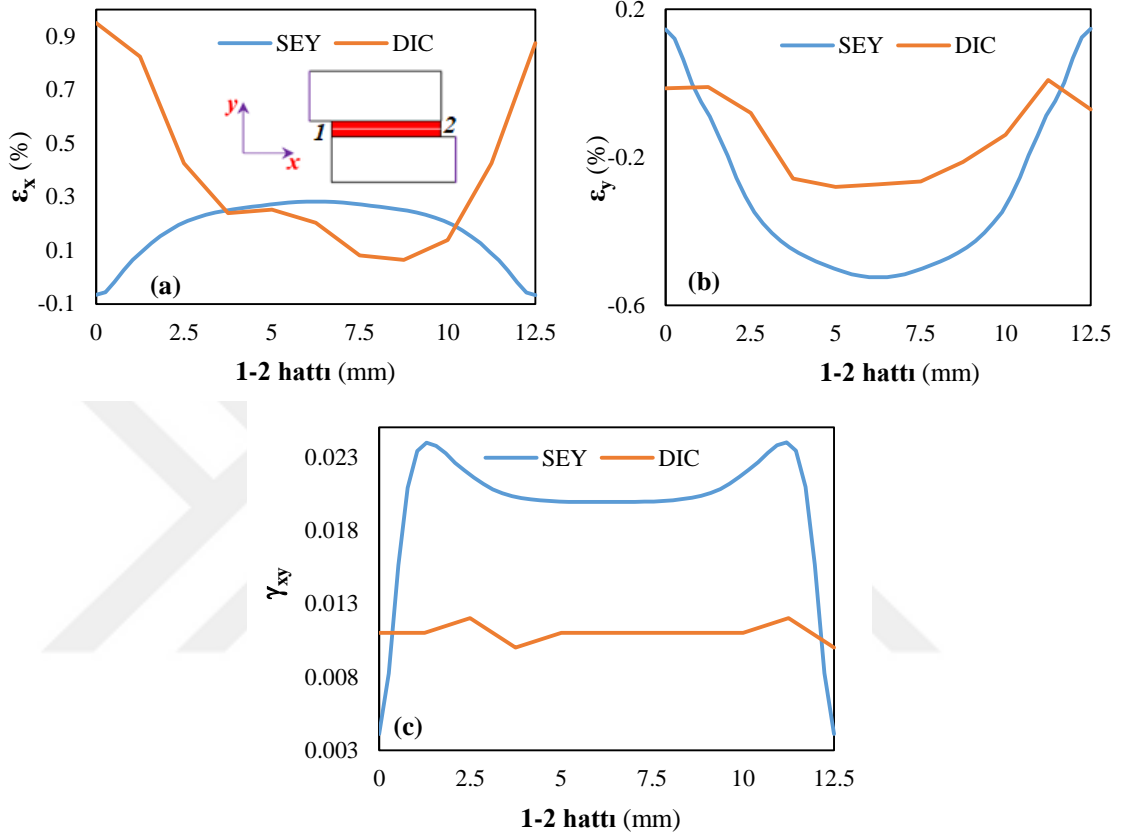
kuvvetle birlikte oluşan  $y$  eksenine doğrultusundaki şekil değişimi ( $\epsilon_y$ ) dağılımları verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde bindirme uçlarındaki şekil değişim değerlerinin maksimum, ortalarında ise minimum olduğu görülmektedir. Aratan yük miktarı ile birlikte bindirmenin yapıldığı bölgenin orta kısmında önce bası karakterde olan bu şekil değişimleri hasar anına yakın yük değerlerinde çekiye dönüştüğü görülmektedir.



**Şekil 4.18.** SLJ-3 numunesinde  $y$  eksenine doğrultusunda oluşan şekil değişimi dağılımları ( $\gamma_{xy}$ ); **a)** 0 ms (A noktası), **b)** 20361.2 ms (B noktası), **c)** 54547.9 ms (C noktası), **d)** 71493.9 ms (D noktası).

Şekil 4.18’de verilen kayma şekil değişim dağılımları ( $\gamma_{xy}$ ) incelendiğinde en büyük şekil değiştirme değerinin yapıştırıcı tabakasının orta bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir.

#### DIC ve sonlu eleman sonuçlarının karşılaştırılması:



**Şekil 4.19.** Yapıştırıcı tabakasının orta hattında (1-2 hattı) bindirme uzunluğu boyunca DIC ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen şekil değiştirme dağılımlarının karşılaştırılması; (a) x yönündeki şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_x$ ), (b) y yönündeki şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_y$ ), (c) kayma şekil değiştirme dağılımları ( $\gamma_{xy}$ ).

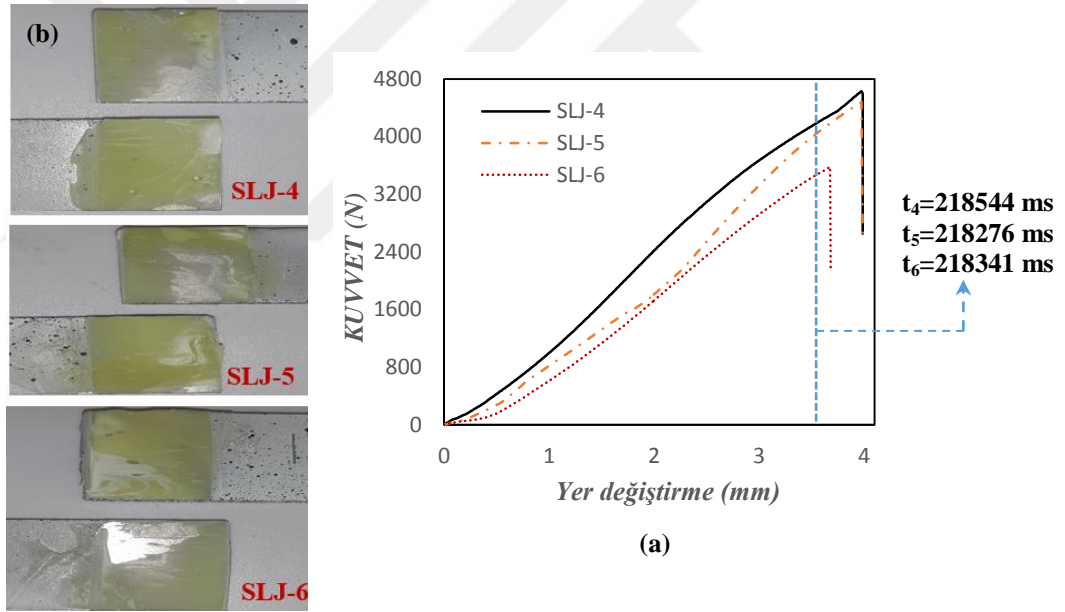
Şekil 4.19’da yapıştırıcı tabakasının orta düzlemini temsil eden 1-2 hattı boyunca 5000 N’luk bir yük değerinde DIC tekniği ve üç boyutlu sonlu eleman yönteminden elde edilen şekil değiştirme dağılımları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.19a’da verilen aksenal şekil değiştirme dağılımları incelendiğinde, DIC ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen şekil değişim değerlerinin bindirme uçlarında farklı, hattın orta kısımlarında ise birbirlerine yakın değerler aldığı görülmektedir. Şekil 3.42b’de verilen kalınlık yönündeki şekil değişim dağılımları incelendiğinde, DIC ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen şekil değişim dağılımlarının birbiri ile uyumlu olduğu söylenebilir. Şekil 4.19c’de verilen kayma şekil değiştirme dağılımlarında ise bir



uyumun oluşmadığı görülmektedir. DIC ve sonlu elemanlar ile elde edilen şekil değişim değerlerindeki oluşan farklılıkların (özellikle x yönündeki normal şekil değişim değerleri) iki sebebi olduğu söylenebilir. Birincisi DIC analizlerinin 2 boyutlu olması sebebiyle düzlem dışı etkilerin ihmal edilmiş olması, ikincisi ise deneyler süresince kaydedilen görüntü çözünürlüğünün yeterli olmamasıdır.

#### 4.5.2. Dört noktadan eğme deney sonuçları

Dört noktadan eğme deneylerinde üç adet numune test edilmiştir. Bu deneylerde numunelere kuvvet uygulanan noktanın yer değiştirmesi ve hasar yüzeyleri Şekil 4.20 'de verilen grafiklerde gösterilmiştir. Bu hasar yüzeyleri incelendiğinde kohesif hasarın oluştuğu görülmektedir (4.20b).

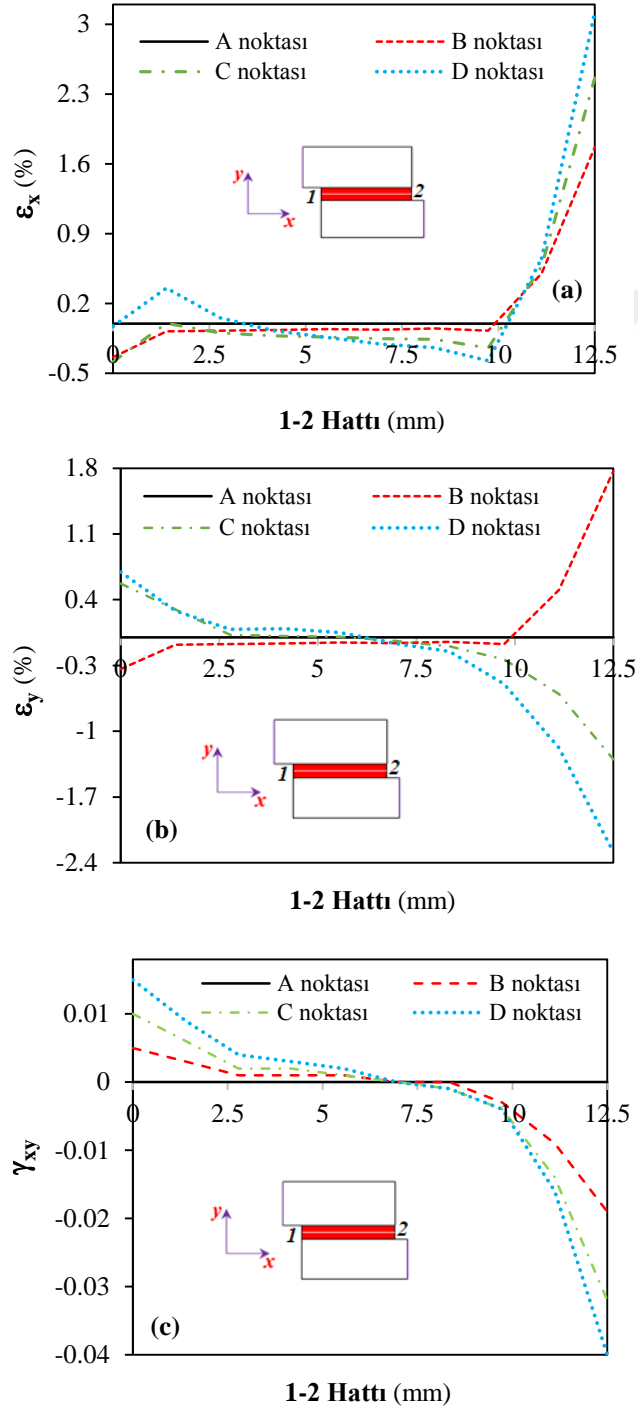


**Şekil 4.20.** DP410 yapıştırıcısı ile oluşturulan SLJ numunelerinde; (a) Kuvvet-yer değiştirme eğrileri, (b) Hasar yüzeyleri.

SLJ-4 numunesinin yüzeyindeki görüntü çözünürlüğünün diğerlerine göre nispeten daha yüksek olmasından dolayı DIC analizi için yapılacak daha detaylı incelemeler için bu numune seçilmiştir. Farklı zaman aralıklarında ( $A = 0$ ,  $B = 50264$  ms,  $C=159683$  ms ve  $D=238562$  ms noktaları) bu numune içindeki yapıştırıcı tabakasının orta hattında (1-2 hattı) oluşan şekil değişim dağılımları ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  ve  $\gamma_{xy}$ ) aşağıda verilmiştir (Şekil 4.21a, 4.22b ve 4.23c).

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

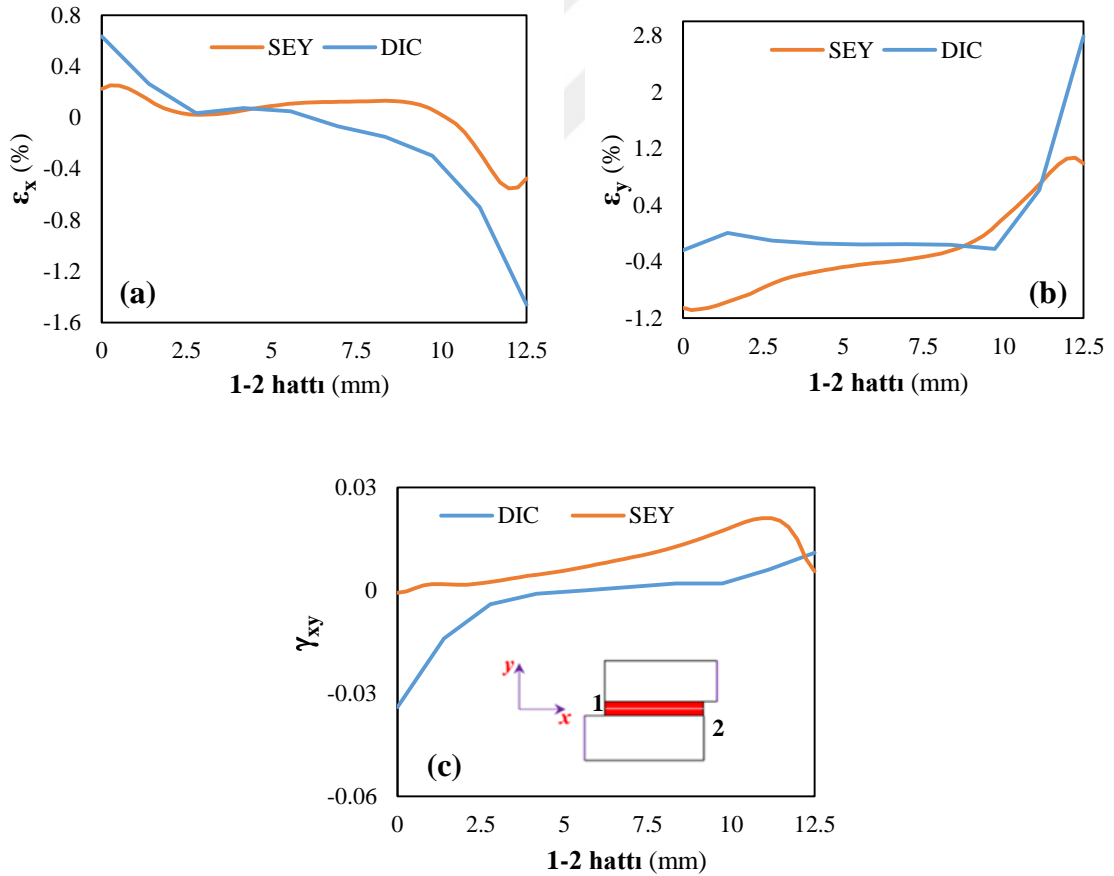
Şekil 4.21a ve 4.21b’de verilen SLJ eğme numunelerine ait aksel ve kalınlık doğrultudaki normal şekil değiştirme dağılımlarının ( $\epsilon_x$  ve  $\epsilon_y$ ) yapıştırıcı tabakasının orta hattı üzerindeki 2 numara ile gösterilen noktada en büyük değerini, orta bölgede ise minimum değerler aldığı görülmektedir. Kayma şekil değiştirme dağılımlarında da benzer bir durumun olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 4.21c).



**Şekil 4.21.** Eğilmeye zorlanan numunedeki yapıştırıcı (*DP410*) tabakasının orta hattı boyunca (*1-2 hattı*) oluşan normal şekil değişimi dağılımları; (a) x yönündeki şekil değişim dağılımı ( $\epsilon_x$ ), (b) y yönündeki şekil değişim dağılımı ( $\epsilon_y$ ), (c) kayma şekil değişim dağılımı ( $\gamma_{xy}$ ).

### Dört nokta eğme durumunda DIC ve sonlu elemanlar sonuçlarının karşılaştırılması:

SLJ-4 numunesinden deneyler süresince elde edilen görüntülerin çözünürlüğü diğer numuneler göre daha iyi olmasından dolayı, bu numune içindeki yapıştırıcı tabakasının orta hattında bindirme uzunluğu boyunca 3500 N'luk bir yük değerinde DIC tekniğiyle elde edilen şekil değişimlerine ait dağılımlar, aynı yük değerinde aynı hat üzerinde sonlu eleman yönteminden elde edilemlerle karşılaştırılmıştır (Şekil 4.22). Bu eğriler karşılaştırıldığında DIC ve sonlu elemanlar ile elde edilen şekil değişimi dağılımlarının benzer olduğu fakat değerler arasında farklılıkların olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların DIC analizinde kullanılan görüntü çözünürlüklerinin yeterli olmaması ve DIC analizlerinin 2 boyutlu olmasından kaynaklandığı söylenebilir.



**Şekil 4.22.** Yapıştırıcı tabakasının orta hattında (1-2 hattı) bindirme uzunluğu boyunca DIC ve sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen şekil değiştirme dağılımlarının karşılaştırılması; (a) x yönündeki şekil değişim dağılımları ( $\epsilon_x$ ), (b) y yönündeki şekil değiştirme dağılımları ( $\epsilon_y$ ), (c) kayma şekil değişim dağılımları ( $\gamma_{xy}$ )

### 5.SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapıştırma teknolojisinden tam anlamıyla yararlanabilmek için yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin yeterli doğrulukta tespit edilmesi gerekmektedir. Yapısal yapıştırıcıların mekanik özellikleri, bulk veya bağlantı formundaki numuneler kullanılarak farklı yükleme durumlarında tespit edilmektedir. Tespit edilen özelliklerin doğruluğu, büyük ölçüm aralığına sahip yüksek hassasiyetli ölçüm cihazlarının kullanımını ve uygun şartlarda bulk veya bağlantı formundaki numunelerin hazırlanmasını gerektirmektedir.

Bu çalışmada, DP410 sıvı yapısal yapıştırıcısı kullanılarak standart çekme numuneleri, Arcan ve Iosipescu numuneleri olmak üzere 3 farklı formda bulk numuneler üretilmiştir. Aynı yapıştırıcı kullanılarak AISI 1040 çelik malzemelerin birleştirilmesi ile TAST numuneleri, AA2024-T3 alüminyum alaşımlarının birleştirilmesi ile tek tesirli bindirme bağlantıları (SLJ) oluşturulmuştur. Bu numunelerden elde edilen deneysel ve sayısal analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Sıvı yapıştırıcının vakum olmadan kalıba enjekte edilmesi ile üretilen bulk numunelerde hava boşluklarından kaynaklanan iç kusurlar ve yüzeysel kusurlar oluşmuştur. Dolayısıyla bu numunelerden elde edilen mekanik özelliklerde sapmalar oluşmuş ve tekrarlanabilir veriler elde edilememiştir.
- Sıvı yapıştırıcının vakum altında kalıba enjekte edilmesi ile üretilen bulk numunelerde hava boşluklarından kaynaklanan iç kusurlar ve yüzeysel kusurlar oluşmamıştır. Bu numunelerden tekrarlanabilir nitelikte veriler ve mekanik özellikler belirlenmiştir.
- Bulk çekme numunelerinde aksel ve yanal şekil değişimlerinin belirlenmesinde video ekstansometre ve DIC'den elde edilen sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir.
- Tek tesirli bindirme bağlantıları ve TAST numunelerinin çekme deneylerinden elde edilen hasar yüzeylerinde adhesiv hasar tipi, tek tesirli bindirme bağlantılarının dört nokta eğme deneylerinde ise kohesiv hasar tipi meydana gelmiştir. Bağlantı

- numunlerinin çekme deneylerinde oluşan adhezyon hasarına, malzemelere uygulanan yüzey temizleme işlemlerinin yetersizliğinden kaynaklandığı söylenebilir.
- TAST numunelerinin çekme deneylerinde yapıştırıcıya ait kayma şekil değişiminin belirlenmesinde kullanılan kontak ekstansometreden elde edilen değerlerin numunelerde oluşan adhezyon hasarından dolayı farklılık gösterdiği görülmüştür. Diğer taraftan aynı numune için kontak ekstansometre ve DIC tekniği ile ayrı ayrı elde edilen kayma gerilmesi-şekil değişim grafiklerinin son derece uyumlu olduğu belirlenmiştir.
- TAST numunelerinde kontak ekstansometre ve DIC yöntemi ile elde edilen yer değiştirme değerleri sadece yapıştırıcı tabakasında oluşanları değil, aynı zamanda yapıştırılan malzemede oluşanları da içermektedir. Bununla birlikte yapıştırılan malzemelerde oluşan yer değiştirme miktarı, yapıştırıcı tabakasında oluşana göre çok düşük olması ve çalışmada DIC ve kontak ekstansometreden elde edilen verilerin birbirleri ile uyumunun incelenmesi hedeflendiği için ihmal edilmiştir.
- Çeki yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantıların DIC tekniği ile analizinde edilmiş ve yapıştırıcı tabakasının orta hattı (1-2 hattı) dikkate alınarak bu hatta bindirme uzunluğu boyunca farklı zaman dilimlerinde (A,B,C ve D noktası) oluşan normal şekil değişim dağılımları ve şekil değişim haritaları elde edilmiştir. Artan zaman ve yüke bağlı olarak normal şekil değişim değerlerinin arttığı ve DIC ile elde edilen sonuçların tutarlı olduğu söylenebilir.
- Tek tesirli bindirme bağlantılarının çekme yüklemesi durumunda aynı yük değerinde DIC ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen normal ve kayma şekil değişim dağılımları yapıştırıcı tabakasının orta hattı dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. DIC ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen eksenel doğrultudaki şekil değişim değerlerinin bindirme uçlarında farklı, hattın orta kısımlarında ise birbirlerine yakın değerler aldığı, kalınlık yönündeki şekil değiştirme dağılımları ise birbiri ile uyumlu olduğu ancak, kayma şekil değiştirme dağılımlarında ise bir uyumun oluşmadığı görülmektedir. DIC ve sonlu elemanlar ile elde edilen şekil değişim değerlerindeki oluşan farklılıkların (özellikle x yönündeki normal şekil değişim değerleri) iki sebebi olduğu söylenebilir. Birincisi DIC analizlerinin 2 boyutlu olması sebebiyle düzlem dışı etkilerin ihmal edilmiş

- olması, ikincisi ise deneyler süresince kaydedilen görüntü çözünürlüğünün yeterli olmamasıdır.
- Tek tesirli bindirme bağlantılarının dört nokta eğme deneyleri yapılmış ve deneyler süresince kaydedilen görüntülerin DIC analizleri gerçekleştirilmiştir. 3 adet eğme numunelerinde yaklaşık aynı zamanlarda oluşan normal ve kayma şekil değişim dağılımları yapıştırıcı tabakasının orta hattı (AB hattı) dikkate alınarak belirlenmiş ve DIC analizleri ile elde edilen şekil değişim dağılımlarının birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.
- Dört noktadan eğme yükü altında yapılan analizler incelendiğinde, DIC ve sonlu elemanlar ile elde edilen şekil değişimi dağılımlarının benzer olduğu fakat değerler arasında farklılıkların olduğu görülmektedir.
- Tek tesirli bindirme bağlantılarının çekme ve dört nokta eğme yüklemesi durumunda sonlu elemanlar ve DIC yöntemiyle elde edilen şekil değişim değerlerinin karşılaştırılması esnasında görülen farklılıkların sebebi, DIC analizinde kullanılan görüntü çözünürlüklerinin yeterli olmaması ve DIC analizlerinin 2 boyutlu olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Bu çalışma sonucunda, yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin DIC tekniği ile daha hassas bir şekilde tespit edilebilmesi için deneyler süresince yüksek çözünürlüklü 2 kamera kullanılarak 3 boyutlu DIC analizlerinin gerçekleştirilmesi ve numune üretimlerinin titizlikle yapılması gerektiği görülmüştür. Ayrıca bu yöntemle yapıştırıcıların şekil değiştirme davranışları daha kalın yapıştırıcı tabakalarında daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Adams, R.D. and Wake, W.C. 1984. Structural adhesive joint in engineering. Elsevier Science Publisher, London.
- Angelidi, M., Vassilopoulos, A.P. and Keller, T. 2018. Ductile adhesively-bonded timber joints – Part 1: Experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 179, 692-703
- Apalak, M.K., Güneş, R. and 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 D 907-74. 1974. Definition of terms relating to adhesives.
- ASTM D1002. 1983. Standard test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading (metal-to-metal).
- ASTM D3165. 1991. Standard test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading of single-lap-joint laminated assemblies.
- ASTM D5379 / D5379M-05. 2005. Standard test method for shear properties of composite materials by the v-notched beam method, ASTM International, West Conshohocken, PA,
- ASTM D5656. 2004. Standard Test Method for Thick-Adherend Metal Lap-Shear Joints for Determination of the Stress-Strain Behavior of Adhesives in Shear by Tension Loading
- ASTM E8. 1999. Standard test methods of tension testing of metallic materials.
- Aydın, M.D. 2003. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Aydın, M. D., Akpınar, S., Özel, A., & Erdoğan, S. 2015. Kayma yüküne maruz yapıştırma bağlantılarından yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi. *engineer & the machinery magazine*, 56(668).
- Banea, M.D. and da Silva, L.F.M. 2009. Mechanical Characterization of Flexible Adhesives. *The Journal of Adhesion*, 85:4-5, 261-285.
- Bell, E.S., Brogan, P., Lefebvre, J., Peddle, B., Brenner, and Sanayei, M. 2011. Digital imaging for bridge deflection measurement of a steel girder composite bridge. *Transportation Research Board 90th Annual Meeting*, Paper 11-1633.
- Blitterswyk, J.V., Cole, R., Laliberte, J. and Backman, D. 2016. Digital image correlation as an improved technique for adhesive shear strain measurement in the ASTM D5656 test. In *Proceedings of the American Society for Composites: Thirty-First Technical Conference*.
- Carpenter, M.W. 1999. Characterizing the chemistry of yellow-poplar surfaces exposed to different surface energy environments using DCA, DSC and XPS. Master Thesis, West Virginia University, College of Agriculture, Forestry and Consumer Sciences, Department of Wood Science, Morgantown, West Virginia.
- Chu, T.C., Ranson, W.F., Sutton, M.A. and Peters, W.H. 1985. Applications of Digital Image Correlation Techniques to Experimental Mechanics. 232-244.
- Cognard, J.Y. 2008 Numerical analysis of edge effects in adhesively-bonded assemblies application to the determination of the adhesive behaviour. *Computers & Structures*, Vol 86, 1704-1717.
- Cognard, J.Y., Créac'Hcadec, R., Sohier, L. and Leguillon, D. 2010. Influence of adhesive thickness on the behaviour of bonded assemblies under shear loadings

- using a modified TAST fixture. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, ISSN: 0143-7496, Vol: 30, Page: 257-266.
- Colavito, K.W. and Madenci, E. 2010. Adhesive failure in hybrid double cantilever beams by digital image correlation. The University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA.
- Comer, A.J., Katnam, K.B., Stanley, W.F. and Young, T.M. 2013. Characterising the behaviour of composite single lap bonded joints using digital image correlation. *Int.J.Adhes.*, 40:215–23.
- Crammond, G. 2013. Development of optical techniques for the experimental analysis of local stress and strain distributions in adhesively bonded composite joints. Doctoral dissertation, University of Southampton.
- CSI Application Note AN-525 Speckle Pattern Fundamentals, VIC 3D Manual
- Cunha, M.H.F., Garcia Jr, L.F. and Nunes, L.C.S. 2009. Stress Distribution Analysis on Adhesively Bonded Single Lap Joint Using Experimental Optical Method. 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brazil.
- da Silva, L.F.M., Dillard, D.A., Blackman, B. and Adams, R.D. 2012. Testing Adhesive Joints: Best Practices. 468, Weinheim, Germany.
- Duncan, B. C., Girardi, M. A. and Read, B. E. 1994. The Preparation of Bulk Adhesive Samples for Mechanical Testing. NPL Report DMM(B) 339, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK.
- Duncan, B.C and 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 1996.
- Edmund Optics. 2016. The Advantages of Telecentricity. Retrieved from <http://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/advantages-of-telecentricity/>.
- 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.
- Fourche, G. 1995. An Overview of the Basic Aspects of Polymer Adhesion. Part I: Fundamentals. *Polymeric Engng. & Sci.*, 35, 957–67.
- Fung, Y.C. 1965. *Foundations of Solid Mechanics*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ
- Gleich, D.M., Van Tooren, M. J. L. and Beukers, A. 2001. Analysis and Evaluation of Bondline Thickness Effects on Failure Load in Adhesively Bonded Structures. *J. Adhesive Science ve Technology*. 15, 1091.
- Goland, M. and Reissner, E. 1944. The stresses in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics*, 11, A17-A27.
- Goutianos, S. and Drews, J. 2007. Estimation of Interface Cohesive Laws by Digital Image Correlation. In *Proceedings of The 28th Riso International Symposium on Material Science, Interface Design of Polymer Matrix Composites Mechanics, Chemistry Modelling and Manufacturing*.
- Green, D.W., Winvey, J.E. and Kretschmann, D.E. 1999. Mechanical Properties of Wood. in *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material*, Forest Products Society, pp 41-45.
- Guo, B., Xie, J., Zhu, H., Wang, P., Chen and Zhang, Q. 2011. Study on the Mechanical Behavior of Adhesive Interface by Digital Image Correlation. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, vol 54, no 4, 574-580.
- Haghani, R., Al-Emrani, M. and Kligler, R. 2009. Effects of Geometrical Modifications on Behavior of The Adhesive Joints Used to Bond CFRP Laminates to Steel



- Members Experimental Investigation. In Proceedings of the Nordic Steel Construction Conference.
- Hart-Smith L. J. 1973. Adhesive-Bonded Single-Lap Joints. NASA Technical Report CR- 112236. NASA, Houston, TX.
- Houwink, R. and Salomon, G. 1965. Adhesion and Adhesives, 2nd edition, Elsevier Publishing Co.
- [http://www.yildiz.edu.tr/~cdemir/sonlu\\_elemanlar.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~cdemir/sonlu_elemanlar.pdf) 17.05.2017
- Hung, P. C., and Voloshin, A. S. 2003. In-plane strain measurement by digital image correlation. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 25(3), 215-221.
- ISO 10365, 1992. Adhesives- Designation of main failure patterns.
- ISO 11003-2, 1993. Adhesives—determination of shear behaviour of structural bonds-part 2: thick-adherend tensile-test method.
- ISO 4587, 1995. Adhesives- Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies.
- ISO 527-2, 1993. Plastics- Determination of Tensile Properties, Part 2: Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics.
- Kashfuddoja, M. and Ramji, M. 2013. Whole-field strain analysis and damage assessment of adhesively bonded patch repair of CFRP laminates using 3D-DIC and FEA. Compos Part B, 53, 46–61.
- Kawasaki, S., Sekiguchi, Y., Nakajima, G., Haraga, K. and Sato, C. 2017. Digital Image Correlation Measuring of Strain and Stress Distribution on Mixed Adhesive Joints Bonded by Honeymoon Adhesion Using Two Types of Second-Generation Acrylic Adhesives of Two Components. vol, 53, no, 6, 192-200.
- Kayacan, R. 1988. Yapıştırma ve Metal Bağlantılar İçin Yapıştırıcı Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul.
- Khosravani, M.R. and Weinberg, K. 2018. Characterization of sandwich composite T-joints under different ageing conditions, Composite Structures, Volume 197, Pages 80-88,
- Kim, J. 2016. Experimental Investigation of Mechanical Behaviour of Hybrid Bolted/Bonded Joints for Aircraft. Doctoral dissertation, Carleton University Ottawa.
- Kinloch, A. J. 1987. Adhesion and Adhesives: Science and Technology, Chapman and Hill, London
- Kinloch, A.J. 1997. Adhesives in Engineering. Proc. Instn. Mech. Engrs., s307-335.
- Krenk, S., Jönsson, J. and Hansen, L.P. 1996. Fatigue Analysis and Testing of Adhesive Joints. Engineering Fracture Mechanics, 53, 859-872.
- Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S. and Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D. and Habraken, A. M. 2006. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. Optics and Lasers in Engineering, 44(11), 1132-1145.
- Liu, X., Ma, Y. and Yao, X. 2013. Experimental investigation of deformation and fracture in multilayered graded material. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 48(8), 474–481.
- Loctite Corporation, 1997. Loctite Worldwide Design Handbook, Loctite Corporation, Hartford.
- Loctite Worldwide Design Handbook, 1988.
- MIL-HDBK-691B, 1987. Military Standardization Handbook-Adhesive Bonding. Department of Defense, Washington, DC.

- Morais, A.B. 2017. Analysis of the adhesively bonded three-point bending specimen for evaluation of adhesive shear behaviour. *International journal of adhesion and adhesives*, 74, 40-48.
- Moreira, D. C., and Nunes, L. C. 2014. Experimental analysis of bonded single lap joint with flexible adhesive. *Applied Adhesion Science*, 2(1), 1.
- Novozhilov, V. V. 1861. *Theory of Elasticity*, U.S. Dept. of Commerce Translation
- Nunes, L.C.S. 2010. Shear Modulus Estimation of the Polymer Polydimethylsiloxane (PDMS) Using Digital Image Correlation. *Materials & Design*, vol 31, no 1, 583-588.
- Pan, B., Qian, K., Xie, H. and Asundi, A. 2009. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, 20(6), 062001. doi:10.1088/0957-0233/20/6/062001.
- Pan, B., Xie, H. M., Xu, B. Q. and Dai, F. L. 2006. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation. *Meas. Sci. Technol.* 17, 1615-1621.
- Pan, B., Xie, H., Wang, Z., Qian, K. and Wang, Z. 2008. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Optical Society of America*, Vol. 16, No. 10 / *OPTICS EXPRESS*, 7037-7048.
- Peters, W.H. and Ranson, W.F. 1982. Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Opt. Eng.* 21(3), 427-431.
- Petrie, E.M. 2000. *Handbook of Adhesives and Sealants*, McGraw Hill, New York.
- Pizzi, A. 1994. Brief Nonmathematical Review of Adhesion Theories as Applicable to Wood. *Advanced Wood Adhesive Technology*, Chapter 1, Mareel Dekker, Inc.
- Robert, L., Nazaret, F., Cutard, T. and Orteu, J.J. 2007. Use of 3-D Digital Image Correlation to characterize the mechanical behavior of a Fiber Reinforced Refractory Castable. *Experimental Mechanics*, 47, 761-773.
- Sadowski, T., Kneć, M. and Golewski, P. 2010. Experimental investigations and numerical modelling of steel adhesive joints reinforced by rivets. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 30, 338-346.
- Schreier, H. W. and Sutton, M. A. 2002. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. *Exp. Mech.* 42, 303-310 .
- Shrestha, S. S., Poudel, A., & Chu, T. P. 2015. Evaluation of composite adhesive bonds using digital image correlation. *Southern Illinois University Carbondale. Research*.
- Silva, T.C. and Nunes, L.C.S. 2014. A new experimental approach for the estimation of bending moments in adhesively bonded single lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 54, 13-20.
- Stuparu, F.A., Apostol, D.A., Constantinescu, D.M., Picu, C.R., Sveu, M. and Sorohan, S. 2017. Local evaluation of adhesive failure in similar and dissimilar single-lap joints. *Engineering Fracture Mechanics* Volume 183, Pages 39-52.
- Sutton, M. A., Yan, J. H., Tiwari, V., Schreier, H. W. and Orteu, J. J. 2008. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 46(10), 746-757. doi:10.1016/j.optlaseng.2008.05.005.
- Şekerciöğlü, T., Kovan, V., Ülker, Ç. 2005. Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Yapıştırıcılar. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, MakinaTek, Sayı 4, 132-136.

- Şen, F. ve Aldaş, K. 2010. Sıcaklık Değişiminin Yapıştırılmalı ve Pimli Alüminyum Plakalardaki Gerilmeler Üzerine Etkisi. *Tübav Bilim Dergisi*, Cilt 3, Sayı 4, 323-329.
- Temiz, S. 2003. Study of the Effect of Environmental Factors on Mechanical Properties of Adhesively Bonded Joints. Ph. D. Thesis, Ataturk University, Erzurum, Turkey.
- Temiz, S. 2006. Application of bi-adhesive in double-strap joints subjected to bending moment. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 20, 1547-1560.
- Tong, W. 2005. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications. *Strain*. 41, 167-175.
- Tsai, M.Y. and Morton, J. 1994. An evaluation of analytical and numerical solutions to the single lap joints. *Int J Solids Struct*, 31, 2537-63.
- Turan, K. ve Kaman, M.O. 2010. Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında İlerlemeli Hasar Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* Cilt 16, Sayı 3, Sayfa 315-323.
- Volkersen, O. 1938. Die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten Nietverbindungen mit Konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, vol 15, 41-47.
- Voloshin, A. and Arcan, M. 1980. Failure of uni directional fiber-reinforced materials- New methodology and results. *Experimental Mechanics*, Vol20(8) 280-284.
- Voyutskii, S.S. 1963. Autohesion and Adhesion of High Polymers. Vol. 4 of the Interscience Polymer Reviews Series, First American edition, Interscience Publishers, Inc.
- Wake, W.C. 1986. Adhesion and the Formulation of Adhesives. *Structural Adhesives in Engineering*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, IMechE, C151/86, pp 161-168.
- Wang, C. H., Gunnion, A. 2006. Design Methodology for Scarf Repairs to Composite Structures. Technical report dsto-rr-0317 (Australian Government, Department of Defence).
- Wang, Z.Y., Wang, L., Guo, W., Deng, H., Tong, J.W. and Aymerich, F. 2009. An Investigation on Strain/Stress Distribution Around the Overlap End of Laminated Composite Single Lap Joint. *Composite Structures*, vol 89, no 4 589-595.
- Wei, K.S., Karuppanan, S. and Muhammad Ridzuan Bin Abdul Latif. 2013. Development of an Optical Strain Measurement Method Using Digital Image Correlation. *Asian Journal of Scientific Research*, 6(3), 411-422.
- Yoneyama, S. 2016. Basic principle of digital image correlation for inplane displacement and strain measurement. *Advanced Composite Materials*, 25:2, 105-123.
- Yoneyama, S., Kikuta, H., Kitagawa, A. and Kitamura, K. 2006. Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement. *Opt. Eng.* 45, 023602.
- Young, R.J. and Lovell, P.A. 1991. *Introduction to Polymer*. Chapman & Hall, London. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4899-3176-4>
- Zhan, X., Gu, C., Wu, H., Liu, H., Chen, J., Chen, Jie. and Wei, Y. 2016. Experimental and numerical analysis on the strength of 2060 Al-Li alloy adhesively bonded T joints. *International Journal of Adhesion&Adhesives*, 65, 79-87.
- Zhang, D. S., Luo, M. and Arola, D. D. 2006. Displacement/strain measurements using an optical microscope and digital image correlation. *Opt. Eng.* 45, 033605.

## ÖZGEÇMİŞ

### **Kişisel Bilgiler**

Adı-Soyadı : Elanur ÇELEBİ  
Uyruğu : Türk Vatandaşı  
Doğum Tarihi ve Yeri : 25.06.1991/Erzurum  
Medeni Hali : Bekar  
Telefon : +90 537 300 15 23  
e-mail : elanur.celebi@erzurum.edu.tr

### **Eğitim**

<b>Derece</b>	<b>Üniversite</b>	<b>Mezuniyet Yılı</b>
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	2018
Lisans	Atatürk Üniversitesi	2014
Lise	Mehmet Akif Ersoy Anadolu Lisesi	2009

### **Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl**

Erzurum Teknik Üniversitesi / 2016-

### **Uluslararası Kongre Sunum**

3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering Istanbul 2017 (ICAME 2017) 20/12/2017

- A study on the prediction of failure in adhesively bonded joints
- The stress analysis on two different adhesively bonded T-joints via 3D nonlinear finite element method
- The stress analysis on two different adhesively bonded T-joints with embedded supports via 3D nonlinear finite element method