

**YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ
BAĞLANTILARDA MALZEME GENİŞLİĞİNİN VE
KALINLIĞININ BAĞLANTININ
YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİ**

Kürşat GÜLTEKİN

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekanik Bilim Dalı

Prof. Dr. Adnan ÖZEL

2014

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA
MALZEME GENİŞLİĞİNİN VE KALINLIĞININ BAĞLANTININ
YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİ**

Kürşat GÜLTEKİN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mekanik Bilim Dalı

ERZURUM

2014

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA MALZEME GENİŞLİĞİNİN
VE KALINLIĞININ BAĞLANTININ YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİ

Prof. Dr. Adnan ÖZEL danışmanlığında, Kürşat GÜLTEKİN tarafından hazırlanan bu çalışma 24/07/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı - Mekanik Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Adnan ÖZEL

İmza :

Üye : Prof. Dr. Hamit AKBULUT

İmza :

Üye : Doç. Dr. Habib UYSAL

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 07.08.2014 tarih ve 31/974 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA MALZEME GENİŞLİĞİNİN VE KALINLIĞININ BAĞLANTININ YÜK TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİ

Kürşat GÜLTEKİN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Yapıştırıcı teknolojisinin hızlı gelişmesi sayesinde, yapıştırma bağlantıları; güvenli bağlantının gerekli olduğu otomotiv, uçak ve uzay sanayi gibi sektörlerde vidalama, kaynak, perçin ve lehimleme gibi geleneksel yöntemlerin yerine kullanılmaktadır. Yapıştırma bağlantıları; gerilme dağılımlarının düzgün olması, farklı malzemeleri birleştirmede kullanılması, yüksek yorulma dayanımı ve sızdırmazlık gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir.

Sunulan çalışmada, çeki yüküne maruz farklı genişlik-bindirme uzunluğuna ve kalınlığa sahip malzemeler kullanılarak elde edilen farklı tek tesirli bağlantı konfigürasyonunun mekanik özellikleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

Bindirme bölgesinde yapıştırma alanı sabit tutularak elde edilen tek tesirli bağlantı geometrisinde, genişliğin artırılması ile bindirme uzunluğu artırılması karşılaştırıldığında, genişliğin artırılması bağlantının yük taşıma kapasitesini daha fazla artırdığı görülmüştür. Yapıştırma alanı dikdörtgenden kareye doğru gidildikçe bağlantının hasar yükü arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yapıştırılan malzeme kalınlığının değişmesi ve alt ve üst malzeme kalınlıklarının farklı olması, bindirme bölgesinin uçlarında meydana gelen gerilme dağılımlarını değiştirdiği ve bununla birlikte deneylerden elde edilen bağlantının hasar yükünü etkilediği görülmüştür.

2014, 98 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yapıştırıcı, tek tesirli bağlantı, sonlu elemanlar analizi, çekme, mekanik özellikler

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF THE ADHEREND WIDTH AND THICKNESS ON THE STRENGTH OF ADHESIVELY BONDED JOINT

Kürşat GÜLTEKİN

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Department of Mechanic

Supervisor: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Beacuse of the rapid development of adhesive technology, adhesive joints are increasingly being used in place of traditional mechanical fasteners, such as bolt, rivet, weld, and solder, in sectors where highly reliable joints are necessary such as automotive, aerospace and space. Adhesively bonded joints are preferred due to their advantages such as formation of uniform stress distribution upon loading, ability to join different materials, high fatigue resistance, and impermeability.

In the present study, mechanical properties of different single lap joint configurations with different adherent width-overlap length and different thickness values subjected to tensile loading were investigated experimentally and numerically.

In single lap joint geometries, increasing the adherent width raises the load-carrying capacity of the joints higher when compared to increasing overlap length. The failure load value of the joint increases as the area of bonding varies from rectangle to square. In addition, It was observed that, in single-lap joint geometry, variation in the thickness of the adherend and the use of lower and upper adherends with different thickness values changed the stress concentrations at the edges of the overlap regions affecting the experimental failure load of the joints.

2014, 98 pages

Keywords: Adhesive, single lap joint, finite element analysis, tension, mechanical properties

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında benimle yakından ilgilenen, çalışmam boyunca araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşılayıp ufkumu açan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Adnan ÖZEL'e minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Çalışmalarımın her aşamasında katkıda bulunan, deneyler esnasında tecrübe ve yardımlarından faydalandığım ve tez çalışmamın ön incelemesini yaparak bilgi ve tavsiyelerini paylaşan Sayın Yrd. Doç. Dr. Salih AKPINAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yanımda olan Makine Mühendisliği bölümündeki tüm araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Öğrenim hayatımın her aşamasında, her türlü maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kürşat GÜLTEKİN

Temmuz, 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	13
2.1. Yapışma Olayı.....	13
2.1.1. Adhezyon.....	14
2.1.2. Kohezyon.....	15
2.2. Yapışma Teorileri.....	15
2.2.1. Mekanik teori.....	15
2.2.2. Difüzyon teorisi.....	16
2.2.3. Adsorpsiyon teorisi.....	16
2.2.4. Elektrostatik teorisi.....	17
2.2.5. Kimyasal yapışma teorisi.....	17
2.2.6. Zayıf sınır tabaka teorisi.....	17
2.3. Yapıştırıcıların Sınıflandırılması.....	17
2.3.1 Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar.....	18
2.3.2. Formları açısından yapıştırıcılar.....	19
2.4. Yapıştırma Bağlantıları.....	19
2.4.1 Yapıştırma bağlantılarında gerilmeler.....	21
2.5. Yapıştırma Bağlantılarında Gerilme Analizi.....	23
2.6. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması.....	25
2.6.1. Genel yüzey hazırlama metotları.....	26
2.6.2. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan kimyasal ön işlemler.....	30
2.7. Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Tipleri.....	32
2.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	34

2.9.1. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	36
3.1. Yapıştırılan Malzeme	36
3.2. Çalışmada Kullanılan Yapıştırıcı.....	37
3.3. Yapıştırıcının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	38
3.3.1. Bulk numunelerin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi	38
3.4. Bağlantı Numunelerinin Hazırlanması	42
3.4.1. Farklı genişlik ve bindirme uzunluğundaki bağlantı konfigürasyonları.....	42
3.4.1.a. Farklı genişlik ve bindirme uzunluğundaki bağlantı numunelerinin hazırlanması	45
3.4.2. Farklı kalınlıklara sahip bağlantı konfigürasyonları.....	47
3.4.2.a. Farklı kalınlıklara sahip bağlantı numunelerinin hazırlanması.....	48
3.5. Tek Tesirli Bağlantı Tiplerinde Hasar Yükünün Belirlenmesi.....	49
3.6. Nümerik Analiz	50
3.6.1. Elasto-plastik sonlu eleman analizleri	50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	52
4.1. Çekme Yüküne Maruz Numunelerden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar	52
4.1.1. Farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip numunelerden elde edilen deneysel sonuçlar	52
4.1.1.a. Tip-I ve Tip-II bağlantı konfigürasyonlarından elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	52
4.1.1.b. Tip-III ve Tip-IV bağlantı konfigürasyonlarından elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	56
4.1.1.c. Tip-V ve Tip-VI bağlantı konfigürasyonlarından elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	61
4.1.1.d. Tip-VII ve Tip-VIII bağlantı konfigürasyonlarından elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	65
4.1.1.e. Farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip tüm bağlantılar için deneysel sonuçlar ve karşılaştırılması.....	68
4.1.1.f. Bindirme uzunluğunun bağlantının genişliğine etkisi.....	70
4.1.2. Farklı kalınlıklara sahip numunelerden elde edilen deneysel sonuçlar	71
4.1.2.a. Malzeme kalınlığı aynı olan Tip-I bağlantısı için deneysel sonuçlar	72

4.1.2.b. Malzeme kalınlığı farklı olan Tip-II bağlantısı için deneysel sonuçlar.....	76
4.2. Elasto-Plastik Sonlu Eleman Analizlerinden Elde Edilen Sonuçlar.....	80
4.2.1. Farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip numunelerin 3-boyutlu sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar	81
4.2.2. Farklı kalınlıklara sahip numunelerin 3-boyutlu sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar	90
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	933
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
E	Elastisite modülü
F	Yer değiştirmeye karşılık gelen yük
J_2	Deviyatorik gerilme tensörünün ikinci invaryantı
L	Bindirme uzunluğu
t	Yapıştırıcı tabakası kalınlığı
w	Numune genişliği
q	Von-Mises eşdeğer gerilmesi
ΔL	Yer değiştirme
σ_i	Asal gerilmeler ($i = 1, 2, 3$)
σ_t	Çekmede akma gerilmesi
τ_{xy}	Kayma gerilmesi
σ_x	Normal gerilme
σ_y	Soyulma gerilmesi
$\sigma_{eş}$	Eşdeğer gerilme

Kısaltmalar

A.H.	Adhezyon Hasarı
D.H.	Deleminasyon Hasarı
K.H.	Kohesiv Hasar
K.Y.H.	Kohesiv Yapıştırılan Malzeme Hasarı
Ö.K.H	Özel Kohesiv Hasar
S. E. Y.	Sonlu Elemanlar Yöntemi
Y.H.	Yapıştırılan Malzeme Hasarı
2D	İki Boyutlu Çözüm
3D	Üç Boyutlu Çözüm

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme yığılmaları....	3
Şekil 2.1. Yapıştırma yerindeki kuvvetler	14
Şekil 2.2. Bazı yapıştırma bağlantı tipleri:.....	20
Şekil 2.3. Yapıştırma bağlantılarında gerilme tipleri:.....	21
Şekil 2.4. Yapıştırma bağlantılarında oluşabilecek gerilme durumları:	23
Şekil 2.5. Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanları.....	35
Şekil 3.1. AA2024 Alüminyum alaşımı için standart çekme numunesi	36
Şekil 3.2. AA2024 Alüminyum alaşımının gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı	37
Şekil 3.3. a. Fırın, b. Yapıştırıcının kalıba yerleştirilmesi	39
Şekil 3.4. Standart çekme numunesi	40
Şekil 3.5. DP 460 yapısal yapıştırıcısının gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı ..	42
Şekil 3.6. Farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip bağlantı geometrisi	42
Şekil 3.7. Yüzey hazırlama işlemi tamamlanmış numuneler.....	44
Şekil 3.8. Numunelerin üretilmesinde kullanılan kalıp	45
Şekil 3.9. Deney numunelerine yapıştırıcı uygulanması	46
Şekil 3.10. Numunelerin kalıba yerleştirilmesi.....	46
Şekil 3.11. Kürleşme işlemi sonrası tek tesirli bağlantı numuneleri.....	47
Şekil 3.12. Farklı kalınlıklara sahip tek tesirli bağlantı geometrisi	47
Şekil 3.13. Farklı kalınlıklara sahip tek tesirli bağlantı numuneleri	48
Şekil 3.14. Farklı genişlik-bindirme uzunluğundaki bağlantılarda sınır şartları:	49
Şekil 3.15. Farklı kalınlıktaki bindirme bağlantısında sınır şartları ve kuvvet:.....	50
Şekil 3.16. Üç boyutlu sonlu eleman modeli ve uygulanan sınır şartları:	51
Şekil 4.1. Tip-I ve Tip-II bağlantılarına ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	53
Şekil 4.2. Tip-I ve Tip-II bağlantılarının aynı yapışma alanında karşılaştırılması	55
Şekil 4.3. Tip-I ve Tip-II bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri.....	56
Şekil 4.4. Tip-III ve Tip-IV bağlantılarına ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	58
Şekil 4.5. Tip-III ve Tip-IV bağlantılarının aynı yapışma alanında karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.6. Tip-III ve Tip-IV bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri	60
Şekil 4.7. Tip-V ve Tip-VI bağlantılarına ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	62

Şekil 4.8. Tip-V ve Tip-VI bağlantılarının aynı yapışma alanında karşılaştırılması.....	63
Şekil 4.9. Tip-V ve Tip-VI bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri	64
Şekil 4.10. Tip-VII ve Tip-VIII bağlantılarına ait kuvvet-yer değiştirme grafiği	66
Şekil 4.11. Tip-VII ve Tip-VIII bağlantılarının aynı alanda karşılaştırılması	67
Şekil 4.12. Tip-VII ve Tip-VIII bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri	68
Şekil 4.13. Genişliği sabit numuneler için kuvvet-bindirme uzunluğu eğrisi.....	71
Şekil 4.14. Tip-I bağlantısı için grafikler:.....	73
Şekil 4.15. Sonlu elamanlar yöntemiyle elde edilen y yönündeki deformasyonlar:.....	74
Şekil 4.16. Aynı kalınlıktaki Tip-I bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri.....	76
Şekil 4.17. Tip-II bağlantısı için grafikler:	78
Şekil 4.18. Farklı kalınlıktaki Tip-II bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri.....	79
Şekil 4.19. Farklı genişlik-bindirme uzunluğundaki bağlantılarda kritik hasar yüzeyi..	81
Şekil 4.20. Yapıştırıcı tabakasındaki EF hattı boyunca normal gerilme dağılımları:....	82
Şekil 4.21. Yapıştırıcı tabakasındaki EF hattı boyunca soyulma gerilmesi dağılımları: 83	
Şekil 4.22. Yapıştırıcı tabakasındaki EF hattı boyunca normal gerilme dağılımları:....	84
Şekil 4.23. Yapıştırıcı tabakasındaki EF hattı boyunca kayma gerilme dağılımları:....	85
Şekil 4.24. Yapıştırıcı tabakasındaki BC hattı boyunca normal gerilme dağılımları: ...	86
Şekil 4.25. Yapıştırıcı tabakasındaki BC hattı boyunca normal gerilme dağılımları: ...	87
Şekil 4.26. Yapıştırıcı tabakasındaki BC hattı boyunca normal gerilme dağılımları: ...	88
Şekil 4.27. Yapıştırıcı tabakasındaki BC hattı boyunca kayma gerilme dağılımları:....	89
Şekil 4.28. Farklı kalınlıklara sahip Tip-I numuneleri için gerilme dağılımları:.....	91
Şekil 4.29. Farklı kalınlıklara sahip Tip-II numuneleri için gerilme dağılımları:	91
Şekil 4.30. Deneyden ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen hasar yükleri:	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Temel hasar tipleri	33
Çizelge 3.1. AA2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.....	37
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan yapısal yapıştırıcı	38
Çizelge 3.3. DP 460 yapısal yapıştırıcısının mekanik özellikleri	41
Çizelge 3.4. Genişlik-bindirme uzunluğu farklı bağlantılar için deneysel parametreler	43
Çizelge 3.5. Farklı kalınlıklara sahip bağlantılar için deneysel parametreler.....	48
Çizelge 4.1. Tip-I ve Tip-II bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar	53
Çizelge 4.2. Tip-III ve Tip-IV bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar	57
Çizelge 4.3. Tip-V ve Tip-VI bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar	61
Çizelge 4.4. Tip-VII ve Tip-VIII bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar...	65
Çizelge 4.5. Tüm bağlantı tipleri için deneysel sonuçlar.....	69
Çizelge 4.6. Aynı kalınlığa sahip (Tip-I) numunelere ait deneysel sonuçlar	72
Çizelge 4.7. Farklı kalınlığa sahip (Tip-II) numunelere ait deneysel sonuçlar.....	77
Çizelge 4.8. Deneyden ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen hasar yükü.....	90

1. GİRİŞ

Yapıştırıcı ASTM tarafından “yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen madde” olarak tanımlanmaktadır. Yapıştırıcı teknolojisinin hızlı gelişmesi sayesinde, yapıştırma bağlantıları; güvenli bağlantının gerekli olduğu otomotiv, uçak ve uzay sanayi gibi sektörlerde vidalama, kaynak, perçin ve lehimleme gibi geleneksel yöntemlerin yerine alternatif olarak kullanılmaktadır (Higgins 2000; Grant *et al.* 2009; Costa *et al.* 2012).

Endüstride yapıştırıcıların kullanılması yeni olmakla birlikte, meydana gelen gelişmeler sonucunda gün geçtikçe artmaktadır. Yapıştırma bağlantıları maliyetlerinin düşük olması, kaynak, perçin ve diğer geleneksel bağlantı şekillerinde olduğu gibi ergime sonucu kristal yapıda değişikliğe sebep olmaması, gerilme yığılmaları oluşturmaması, ergime sıcaklıkları altında birleşme işleminin gerçekleşmesi ve ayrıca daha düzgün ve temiz yüzeyler elde edilebilmesi açısından diğer bağlantı türlerine göre avantajlıdır. Fakat bu teknik, bağlantı dayanımının işletme şartlarına bağımlılığı, ayrılma gerilmelerine dayanıksız olması ve bunları önlemek için özel konstrüksiyonlar gerektirmesidir. 200°C üzerindeki dayanım değerlerinde azalmalar göstermesi bu bağlantının seçilmesini olumsuz yönde etkilemektedir. Yine bazı tür yapıştırıcıların birleşmeden önce hazırlanması, özel çevre şartlarını sağlanması ve yapıştırma ekipmanları gerektirmesi ürünün maliyetine olumsuz etkiler yapmaktadır (Gediktaş 1995).

Yapıştırma bağlantıları, kullanılmadan önce bağlantı yapılacak şartlar iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Bağlantının mukavemeti, maruz kalacağı yüke, uygun yapıştırıcı seçilmesine, yapıştırıcıya ait özelliklere, yapışma yüzeylerinin temizliğine ve yapışma işleminin sağlıklı yapılıp yapılmadığına bağlıdır.

Uçak sanayi, otomotiv sanayi, denizcilik ve makine parçaları gibi endüstriyel farklı uygulamalarda yapıştırma ile birleştirilmiş bağlantılar görmek mümkündür. Uçak gövdelerinde ve kanatlarında büyük miktarlarda yapıştırıcılar kullanılmaktadır.

Otomotiv endüstrisinde de yapıştırıcıların oldukça geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Mil göbek bağlantılarının emniyete alınmasında, rulmanlı yatakların montaj işlemlerinde, motor bloğu-kapak sızdırmazlıklarının sağlanmasında sıvı conta olarak, kapı panellerinin oluşturulmasında ve birçok cam, plastik parçaların birleştirilmesinde yapıştırıcılar kullanılmaktadır (Tek 2011).

Yapıştırma bağlantılarının bir takım avantaj ve dezavantajları vardır. Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları üzerine yoğun bir şekilde çalışılmıştır. Bu çalışmalardan birinde yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajlarını aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Edwards 1998).

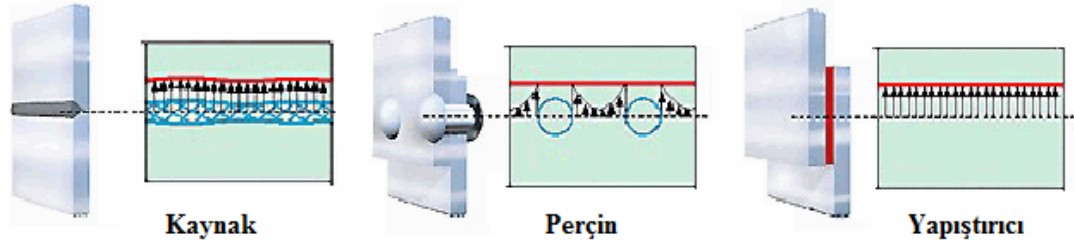
Avantajları:

- Üniform gerilme dağılımı ve daha büyük yük taşıma alanı temin edilmesi (Şekil 1.1)
- Herhangi bir şekilde ince ve kalın malzemelerin birleştirilmesi,
- Benzer veya farklı malzemelerin birleştirilmesi,
- Farklı malzemeler arasında oluşan elektrokimyasal korozyonun önlenmesi
- Yorulma ve tekrarlı yük dayanımı,
- Düzgün yüzeyli birleştirme olanağı,
- Değişik ortamlara karşı bağlantıda yalıtım olanağı sağlaması,
- Isı ve elektrik iletkenliğine karşı yalıtkan olarak kullanılabilmesi,
- Yüksek darbe ve titreşim sönümlene kabiliyetleri,
- Dikkat çekici dayanım/ağırlık oranı,
- Mekanik birleştirme yöntemlerinden daha kolay ve daha ucuz olması,
- Diğer mekanik birleştirme yöntemleriyle birleştirilebilir,
- Talaşlı imalat maliyetleri azalması ve daha kaliteli üretim gerçekleştirilmesi.

Dezavantajları:

- Parçaların birleştirilmesi zordur. Yüzey hazırlığı ve temizliği gerektirir.
- Yapıştırıcının mekanik özellikleri zaman ve sıcaklığa bağımlılık gösterir.

- Düşük soyulma dayanımı ve darbe dayanımı,
- Kürleşme mekanizması pratik olmayabilir,
- Yapıştırma bağlantısının ömrü maruz kaldığı çevresel etkilere bağlıdır ,
- Nemli ve kimyasal ortamlar bazı yapıştırıcıların özelliklerini kötü yönde etkiler ve mukavemetlerinin düşmesini sağlaması,
- Metal yapıştırıcı uygulanan yüzeye tam olarak yayılmayabilir. Eksik yayılma mukavemetin düşmesine neden olması,
- Ortam şartlarını uygun hale getirmek ve uygulama ekipmanlarını sağlamak gerekir. Bu koşulları sağlamanın da maliyeti oldukça yükseltmesi,
- Metal yapıştırıcıların en önemli dezavantajı sıcaklık etkisidir. Metal yapıştırıcılar belirli bir geçiş sıcaklığına sahiptirler. Bu sıcaklık değerleri üzerinde mukavemet değerlerinin oldukça düşmesi.



Şekil 1.1. Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme yığılımları (Loctite 1998)

Yapıştırma bağlantılarının teorik modellerinin gelişimi 70 yılı aşan bir süreçte gerçekleşmiştir. Genellikle yapılan çalışmalarda yapıştırıcı lineer elastik bir malzeme olarak modellenmiştir. Ancak son yapılan çalışmalarda yapıştırıcının elasto-plastik özellikleri de dikkate alınmıştır.

Bir yapıştırma bağlantısının analizinde, analitik ve sayısal (nümerik) olmak üzere iki temel yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda, sınır şartları ve diferansiyel denklemlerden oluşan bir formülasyon söz konusudur. Bu denklemlerin çözümü bağlantının herhangi bir noktasındaki gerilme değerini verir. İkinci yaklaşımda ise diferansiyel denklemlerin

çözümleri sayısal yöntemlerle elde edilir. Her iki yöntemde de yapıştırma bağlantısını oluşturan elemanların elastik ve elastik-plastik davranışı dikkate alarak analiz yapılabilir (Aydın 2003).

Yapıştırıcı birleştirmeli bağlantıların analitik analizinin ilk girişimleri Volkersen (1938) tarafından yapılmıştır. Volkersen yaptığı çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantısında yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi dağılımını, yapıştırılan iki malzemenin çok direngen olduğunu ve çekme yükü altında deforme olduğunu, yükmeden dolayı eğilmediğini kabul ederek analiz etmiştir. Ayrıca, yapıştırıcının lineer elastik bir katı olduğu ve yalnızca kayma gerilmelerinden dolayı deforme olduğunu kabul etmiştir. Volkersen, yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmelerinin bindirme hattının her iki ucunda en yüksek değeri aldığını göstermiştir. Volkersen tarafından yapılan bu analiz eksantrik yükleden dolayı oluşan eğilme momentinin etkisini içermez. Bindirmenin yapıldığı bölgenin serbest uçlarından oluşan eğilme momenti yapıştırma bağlantısının dayanımı üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir ve bağlantıdaki gerilme dağılımları belirlenirken mutlaka dikkate alınmalıdır.

Bindirmenin yapıldığı bölgenin serbest uçlarından oluşan eğilme momentinin etkisi ilk defa Goland and Reissner (1944) tarafından yapılan bir çalışmada dikkate alınmıştır. Goland and Reissner, bağlantının eksantrik yüklenmesinin sonucunda yapıştırıcı tabakasındaki oluşan çekme gerilmelerini dikkate alarak tek tesirli bindirme bağlantısını çalışmışlar ve çalışmalarında yapıştırıcı kalınlığı boyunca kayma ve soyulma gerilmesi sabit kabul edilmiş, boyca deformasyon ve yapıştırıcının poisson oranı ihmal edilmiştir. Goland and Reissner (1944) elde ettikleri diferansiyel denklemleri, düzlem şekil değiştirme kabulü yapıp çözmüş ve uygulanan yükten dolayı bağlantı uçlarındaki yükü ve bağlantıdaki gerilmeleri tespit etmişlerdir.

Sayman (2012) yaptığı bir çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bağlantılarda kayma gerilmelerini hesaplayabilmek için analitik olarak elasto plastik gerilme analizi yapmıştır. Yapılan çalışmada kayma gerilmelerinin yapıştırıcı kalınlığı boyunca sabit olduğunu kabul edip, eğilme momentinin etkisi çözümde ihmal edilmiştir. Sonlu

elemanlar yöntemiyle, sunduğu analitik yöntemi karşılaştırmış ve birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Sayman, sunduğu bu metodun bir boyutlu gerilme analizi için uygun olduğunu ve soyulma gerilmelerinin bu yöntemle elde edilemeyeceğini belirtmiştir. Ayrıca yapıştırılan malzemenin kalınlığının artmasıyla, kayma gerilmelerinin bağlantının serbest uçlarında azaldığını da ifade etmiştir.

Sayman *et al.* (2013) tarafından yapılan başka bir çalışmada; yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bağlantıda analitik olarak non lineer elasto plastik gerilme analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmada eğilme momentinin etkisi ihmal edilmiştir ve sonlu elemanlar yöntemiyle analitik çözüm karşılaştırılmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Yapılan tüm bu çalışmalar kayma ve normal gerilmelerin bindirme bölgesinin orta kısımları boyunca sabit uçlarında ise maksimum değere sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, daha sonraki çalışmalarda yapıştırıcı tabakasının uçlarındaki yüksek gerilmeler büyük önem kazanmış ve bu olay genellikle uç etkileri olarak anılmıştır.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantıları için geliştirilen analitik çözümler üzerine yapılan bu çalışmalar yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarının anlaşmasına yönelik önemli bir bakış açısı sağlamıştır. Ayrıca, tasarım kıstaslarının kurulduğu parametrik çalışmalarda ve deney planlamasında oldukça faydalıdır. Bununla birlikte, gerçek uygulamalarda bu yöntemlerin kısıtlayıcı varsayımları ve teorinin kurulduğu geometrilerden dolayı oldukça sınırlıdır. Bu yöntemlerin çoğu üç boyutlu analizin gerekli olduğu yerlere direkt olarak uygulanmaz

Analitik yöntemler, yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımlarının belirlenmesinde lineer elastik analiz seviyesinde sınır şartlarını sağlamaz ve yetersizdir. Öte yandan sayısal yöntemler gerilme durumu, şekil değiştirme oranı, zaman ve sıcaklığa bağımlı olan gerilme-şekil değiştirme verilerinin kullanımını gerektirir. Bu durum ise yapıştırıcının mekanik özelliklerinin (çekme ve kayma modülleri, Poisson oranı, akma ve çekme dayanımı vb.) tek eksenli çekme ve kayma yükleri altında belirlenmesini

gerektirir. Son zamanlarda yapılan birçok araştırmada, yapısal yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme özelliklerinin tek eksenli çeki ve bası yükleri altında farklı davranış sergilediğini ortaya koymuştur (Işcan 2007).

Ayrıca, yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinin dışında, verilen bir yükleme durumu için yapıştırma bağlantısının tasarımında gerilme dağılımlarını belirleyebilmek ve bağlantı dayanımının tahmini başka faktörlerin anlaşılmasını da zorunlu kılar. Temelde bu faktörler; materyal seçimi, yük ve yükün büyüklüğü, yapısal geometri, seçilen materyaller için uygun hasar kriterlerinin belirlenmesi ve yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleridir (Akpınar 2012). Bu hususlar dikkate alındığında; birçok araştırmacının yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarının belirlenmesi üzerine yoğunlaştıkları görülmüştür.

Gali *et al.* (1981) yapıştırıcının mekanik davranışı üzerine deviatorik ve hacimsel gerilme bileşenlerinin etkilerini lineer, non-lineer, plastik deformasyon seviyelerinde dikkate alan bir gerilme-şekil değiştirme kavramı sunmuşlardır. Ortaya koydukları çözümler basit tek eksenli gerilme durumundan elde edilen ampirik veriler yardımıyla çok eksenli gerilmelere maruz yapıştırıcı tabakasının sayısal analizine olanak sağlar.

Bigwood and Crocombe (1989) yapıştırıcı tabakasındaki kayma ve soyulma gerilmelerini temsil eden diferansiyel denklemleri çözmüş ve elde ettikleri sonuçları, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Daha sonra yaptıkları çalışmalarında ise, sonlu farklar ve sonlu elemanlar çözümlerini kullanarak yapıştırma bağlantıları üzerinde elasto-plastik gerilme analizi yapmışlardır (Bigwood and Crocombe 1990; Crocombe *et al.* 1990).

Sonlu elemanlar yöntemi, mekanik sistemlerin analizinde kullanılan önemli ve lineer bölge içerisinde yapılan analizlerde basit ve oldukça etkilidir. Genel yük ve yer değiştirme şartlarında karmaşık geometrilerin analizine olanak sağlar. Bu yaklaşım eğer bir yapıştırma bağlantısında kullanılacaksa, doğru sonuçlar elde etmek için özellikle

yapıştırıcı tabakasında sonlu elemanlar ağının çok iyi yapılmasını gerektirir (Duncan and Dean 2003).

Yapıştırıcı bağlantıların ilk sonlu elemanlar analizi Wooley and Carver tarafından (1971) gerçekleştirilmiş ve basit bindirme bağlantılarında gerilme analizini konu edinmiştir. Wooley and Carver düzlem gerilme elemanları kullanarak lineer analizler gerçekleştirmişler ve yapıştırıcı tabakayı iki sıralı elemanlar ile modelleyerek yapıştırıcı kalınlığı boyunca gerilme dağılımını elde etmişlerdir. Basit bindirme bağlantılarının ilk modellerinin diğer pek çoğu bu çalışmayı takip etmişlerdir.

Adams and Peppiatt (1974) gerçekleştirdikleri çalışmalarında standart metal malzemelerin yapıştırılarak birleştirildiği tek ve çift bindirme bağlantılarındaki gerilmeleri iki boyutlu sonlu elemanlar metodunu kullanarak analiz etmişlerdir. Yapıştırılan malzemelerin izotropik olduğunu ve problemin düzlem şekil değiştirme problemi olduğunu kabul ederek yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeleri modellemek için sabit şekil değiştirme üçgen elemanlarını kullanmışlardır. Adams ve Peppiatt yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bağlantılar için sonlu elemanlar yönteminden ve analitik çözümlerden elde edilen gerilmeler arasında iyi bir uyuma olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca; yapıştırıcı tabakasının uç kısımlarındaki en yüksek asal gerilmelerin, kopmuş bindirme bağlantısının yapıştırıcı birikintisinde şekillenen çatlakların doğrultusuna dik açılarda olduğunu göstermişlerdir.

Ozel *et al.* (2004) yaptıkları bir çalışmada eğilme momentine maruz yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bağlantı geometrisinde iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bağlantının mekanik özelliklerini analiz etmişlerdir. Çalışmalarında biri sert diğeri yumuşak iki yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme olarakta sertleştirilmiş çelik kullanmışlardır. Bağlantının performansı üzerine geometrik değişkenlerin etkilerini belirlemek için dört farklı yapışan malzeme kalınlığı ve her bir yapıştırıcı için dört farklı bindirme uzunluğu kullanmışlardır. Yapışan malzeme kalınlığının bağlantı mukavemeti üzerine her iki yapıştırıcı bağlantısı içinde önemli etkileri olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca yumuşak yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bağlantısında taşınan yükün artan

bindirme uzunluğu ile arttığını ifade edip, elde ettikleri analiz sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırarak uyum içinde olduklarını ifade etmişlerdir.

He (2011) çeki yüküne maruz tek tesirli bağlantı geometrisi kullanarak yaptığı üç boyutlu sonlu elemanlar analizinde, yapıştırıcı bölgesinin sert uçlarının sağ ve sol tarafının yüksek gerilmelere maruz kaldığını belirtmiş ve ayrıca yüksek gerilmelerin yapıştırıcı ile alt malzeme arasında olduğunu göstermiştir. Yapıştırma bölgesinin orta kısmında ise gerilmelerin çok daha az olduğunu ifade etmiştir.

Akpınar (2013a) tarafından yapılan çalışmada, farklı istifleme açlarına sahip ($[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[0/90]_8$, $[45/45]_8$, $[0/45/45/90]_4$) 16 tabaklı kompozit ve alüminyum yamalara sahip çift yamalı alın bağlantı numunelerinin çekme ve eğme yükü altındaki mekanik davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde; çekme yükü maruz çift yamalı alın bağlantı tipinde farklı istifleme açısına sahip kompozit yamaların kullanımı ($[90]_{16}$ s hariç) bağlantının yük taşıma kapasitesini artırdığı, bu artışın en fazla $[0/45/-45/90]$ oryantasyon açısına sahip yamaların kullanılmasıyla elde edildiği görülmüştür. Ayrıca dört nokta eğme yükü uygulandığında ise, en fazla eğme yükünün $[45/-45]_8$ ve $[0/45/-45/90]_4$ oryantasyon açısına sahip yamaların kullanılmasıyla elde edildiği anlaşılmıştır.

Akpınar *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada, eğilme yüküne maruz farklı fiber oryantasyon açlarına ($[90/\pm 45/0]_{2s}$, $[0/90]_{4s}$, $[45/-45]_{4s}$, $[0]_{16}$ and $[90]_{16}$) sahip tek tesirli kompozit bağlantılarda üç boyutlu non liner sonlu elemanlar yöntemi ile üç boyutlu gerilme analizi yapılmıştır. Yapılan analizde, iki boyutlu gerilme analizinde ihmal edilen (τ_{yz} and τ_{xz}) kayma gerilmeleri, üç boyutlu gerilme analizinde büyük bir etkiye sahip olduğu ve ihmal edilmemesi gerektiği belirtilmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçları kompozitlerin istifleme açısının değiştirilmesi gerilme değerlerini önemli derecede etkilediğini göstermiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar incelendiğinde ve literatür araştırıldığında; yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek veya çift tesirli bağlantı geometrileri basit olduğu ve kolayca üretildiği

için geniş bir şekilde analiz edilmiştir. Yapılan tüm bu analizler göstermiştir ki yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda soyulma gerilmeleri (peel stres) ve büyük gerilme yığılmaları bağlantının serbest uçlarında oluşmaktadır. Bu yüzden yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarında hasarı önlemek için, bindirme yapıldığı bölgenin serbest uçlarında oluşan gerilme yığılmalarını azaltmak oldukça önemlidir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılardaki bu soyulma gerilmelerinin etkisini azaltıp, bağlantının mukavemetini artırmak için birçok yöntem mevcuttur.

Bu yöntemlerden biri bağlantının serbest uçlarına yapıştırıcı ile dolgu (pervaz ve ya spew filet) yöntemidir. Bir yapıştırma bağlantısında gerilme dağılımı incelenirken genellikle bindirmenin yapıldığı serbest uçlarda oluşan pervazın etkisi dikkate alınmaz. Bilindiği gibi, pervazın varlığı bindirmenin yapıldığı serbest uçlarda gerilme yığılmalarını azalttığından pik gerilme değerlerini düşürür ve bağlantı dayanımını artırır. Bununla birlikte pik gerilmelerdeki bu azalma, sadece pervazın varlığına değil aynı zamanda geometrisi ve boyutlarına da bağlıdır. Yapılan çalışmalarda; dolgu yöntemi ile soyulma gerilmelerinin etkisinin azaldığı, bağlantının mukavemetinin arttığı görülmüştür (Crocombe *et al.* 1981; Dorn *et al.* 1993; da Silva *et al.* 2007; Marques 2008; He 2011; Zhao *et al.* 2011; Akpınar *et al.* 2013b; Doru *et al.* 2014).

Doru *et al.* (2014) tarafından yapılan bir çalışmada; yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bağlantılarda alt malzeme genişliği sabit, üst malzeme genişliği ise farklı genişliklerde olan bağlantıda spew fillet yöntemini deneysel ve nümerik olarak analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada, dört farklı (dolgusuz, serbest uçları dolgulu, bindirme uzunluğu boyunca dolgulu ve bindirme bölgesinin tüm kenarları dolgulu) bağlantı tipinde bu yöntem incelenmiş ve bu yöntem ile bağlantıda gerilme dağılımlarının azaldığı ve yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmüştür.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mukavemetini artırmak için yapılan diğer bir yöntem ise ikili yapıştırıcı (bi-adhesive) kullanmaktır (Piresa *et al.* 2003; Temiz 2006; Kong *et al.* 2008; da Silva *et al.* 2009; Kumar *et al.* 2010). Temiz (2006) tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantısında bindirmenin yapıldığı bölgenin

serbest uçlarında esnek, orta kısmında ise sert özellikli yapıştırıcı kullanarak oluşturduğu sonlu elemanlar modelinde gerilme analizi yapmıştır. Bu gerilme analiz sonuçları, bindirmenin yapıldığı bölgenin serbest uçlarında esnek karakterli yapıştırıcının kullanılması gerilme yığılmalarını azalttığını ve bağlantının mukavemetini artırdığını göstermiştir.

Yapıştırma bağlantılarında bindirme uzunluğu bağlantının mukavemetini etkileyen diğer bir parametredir (Ozel *et al.* 2004; Ozel *et al.* 2005; Kim *et al.* 2008). Ozel *et al.* (2005), bindirme uzunluğu üzerine yaptıkları bir çalışma sonucunda; bindirme uzunluğunun artırılması bağlantının hasar yükünü artırdığını, ancak hasar yükündeki bu artış belirli bir bindirme uzunluğuna kadar geçerli olup, bu uzunluktan sonraki bindirme uzunluğundaki artışın hasar yüküne etki etmediği ifade etmişlerdir.

Temiz *et al.* (2013) tarafından yapılan bir çalışmada ise; bası artık gerilmeleri kullanılıp, bağlantının serbest uçlarında oluşan soyulma gerilmelerini azaltmak için tek tesirli bindirme bağlantısını incelenmiştir. Çalışmada biri düz, diğeri ise bindirme bölgesinin olduğu kısım kavislendirilmiş numuneler üretilerek yapıştırılmış ve deneysel olarak incelenmiştir. Kavislendirilmiş numunelerin bindirme bölgesine kürleşme işlemi esnasında basınç uygulanarak düzleşmesi sağlanmıştır. Kürleşme işleminden sonra, yapıştırılan malzeme kavislendirilmiş konumuna geri gelmek için bindirme bölgesinde bası artık gerilmesi oluşturmuş ve oluşan bu artık bası gerilmeleri sayesinde soyulma gerilmeleri azalarak bağlantının yük taşıma kapasitesinde önemli artış olduğu belirtilmiştir.

Akpınar (2013c) tarafından yapılan bir çalışmada ise; çeki yüküne maruz yapıştırıcı ile birleştirilmiş çift yamalı alın bağlantı ile yamaları kavislendirilmiş çift yamalı alın bağlantı modellerinde, bindirme uzunluğunun, yama kalınlığının ve farklı elastisite modülüne sahip yamaların bağlantı mukavemetine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, kavislendirilmiş çift yamalı alın bağlantı tipi diğer bağlantı tipine göre daha fazla yük taşımış olduğu ve bindirme uzunluğu, yama kalınlığı ve elastisite modülü bu artış oranını önemli derece etkilediği görülmüştür.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda; malzeme rijitliği ve malzeme kalınlığı da bağlantının mukavemetine etki etmektedir (Sayman 2012; Sayman *et al.* 2013; Reis *et al.* 2011; Ozel *et al.* 2014; Pinto *et al.* 2014).

Reis *et al.* (2011) üç farklı malzeme kullanarak (alüminyum, sertleştirilmiş çelik ve karbon/epoksi kompozit) birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısı üzerine çalışma yapmışlar ve bağlantıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar ve nümerik analiz sonuçları göstermiştir ki; kayma gerilmesi malzemenin rijitliğine bağlıdır ve en yüksek kayma gerilmesi en yüksek rijitlikteki malzemelerin birleştirildiği bağlantıda elde edilmiştir. Rijitliğin artması bağlantının mukavemetini artırmış, bağlantının serbest uçlarında meydana gelen dönmeyi azaltmış ve yapıştırıcıda daha düzgün bir gerilme dağılımı oluşmasını sağlamıştır.

Ozel *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada da, farklı istifleme açısına sahip kompozitler ile farklı kalınlıklara sahip alüminyumların yapıştırıcıyla birleştirilerek elde edilen tek tesirli bağlantı konfigürasyonlarının çekme yükü altındaki mekanik davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel ve üç boyutlu sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlar; dört farklı oryantasyon açısına, farklı kalınlık ve farklı bindirme uzunluğu bağlantının yük taşıma kapasitesini ve gerilme dağılımını etkilemiştir.

Pinto *et al.* (2014) yaptıkları bir çalışmada farklı kalınlıklara sahip tek tesirli bindirme bağlantısında iki farklı (esnek ve sert) yapıştırıcı kullanarak bağlantının çekme yükü altındaki mekanik davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca sonlu elemanlar metodu kullanılarak deneysel sonuçlar doğrulanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda; esnek yapıştırıcı kullanılarak her iki malzeme kalınlığının artırılmasıyla elde edilen bağlantı tipinde bağlantının mukavemetinde çok az bir düşüş olduğunu, ancak sert yapıştırıcı kullanarak elde edilen diğer bağlantı tipinde ise bağlantının mukavemetinde artış olduğu görülmüştür. Ayrıca, farklı kalınlıklardaki malzemeler kullanılarak elde edilen tek tesirli yapıştırma bağlantılarında bağlantının mukavemetinin azaldığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasının bir kısmında yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında malzemenin genişliğinin bağlantı mukavemetine etkisi incelenmiştir. Literatür araştırıldığında malzeme genişliğinin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda etkisinin incelenmesi sınırlı olduğu görülmektedir.

Adin *et al.* (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, çeki yükü altındaki Z tipi bağlantıda malzeme genişliğinin etkisini iki farklı özellikte yapıştırıcı kullanılarak deneysel ve nümerik olarak analiz etmişlerdir. Ancak bu çalışmada yapıştırıcı alanı sabit olmayıp, genişlik arttıkça yapıştırma alanı da artmaktadır. Analiz sonuçları bağlantının genişliğinin artmasıyla bağlantının mukavemetinin arttığı görülmüştür.

Bu tezin amacı, çekme yüküne maruz farklı genişlik ve farklı kalınlıklardaki malzemeler kullanılarak elde edilen tek tesirli bindirme bağlantı konfigürasyonlarının mekanik davranışlarını deneysel ve nümerik olarak incelemektir. Malzeme genişliğinin bağlantının hasar yüküne etkisini deneysel olarak incelemek için sekiz farklı tip (malzeme genişliği olarak 5,10,15,20,25 mm, bindirme uzunluğu olarak 5,10,15,20,25 mm) ve her bir bağlantı tipinden üçer adet olmak üzere toplamda kırk sekiz adet bağlantı numunesi tasarlanmış ve üretilmiştir. Malzeme kalınlığının bağlantının hasar yüküne etkisini incelemek içinse; alt ve üst malzeme aynı kalınlığa sahip olup beş farklı kalınlık (8-8, 6.4-6.4, 4.8-4.8, 3.2-3.2 ve 1.6-1.6) ve alt malzeme kalınlığı sabit olmak üzere üst malzeme kalınlığı beş farklı kalınlığa (8, 6.4, 4,8, 3.2, 1.6) sahip iki farklı tipte tek tesirli bağlantı numune konfigürasyonları hazırlanmış ve üretilmiştir.

Daha sonra, bulk numunelerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme özellikleri kullanılarak lineer olmayan sonlu eleman yöntemiyle üç boyutlu gerilme analizleri yapılmıştır. Daha sonra, deneysel ve nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yapışma Olayı

Yapıştırıcı, malzemeleri bir arada tutan madde olarak tanımlanırken, yapışma, iki yüzeyin; moleküller, iyonlar ve atomlar arası etkileşimden dolayı oluşan çekim kuvvetleriyle bir arada tutturulması olarak tanımlanır (Kinloch 1987). Diğer bir ifade ile; yapışma olayı, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında meydana gelen adhezyon ve yapıştırıcının kendi içinde meydana gelen kohezyon kuvvetleri neticesinde oluşan fiziksel ve kimyasal bir olaydır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte yapıştırma alanında önemli gelişmeler sağlanmıştır. Yüksek teknolojiyle üretilen yapıştırıcılar çok dayanıklı olup; yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcının uygulandığı birleşme yerine bir şey olamamakla beraber bazen yapıştırılan malzemenin kendisi kırılmaktadır. Örneğin; vidaların, perçinlerin başarısız olduğu, kaynakların kırıldığı yerlerde yapıştırıcı çok başarılı olmaktadır. Yapıştırılarak tutturulan karoser taşıyıcıları, 90 MPa gibi büyük bir kuvvetle test edildiğinde, birleşme yerlerinin zarar görmediği ancak çeliğin parçalandığı gözlenmiştir. Ancak adhezyon kuvveti, iyi bir yapışmanın tek şartı değildir. Aksi takdirde su çok iyi yapıştırıcı olurdu. Çünkü suyun yüzeyi oldukça yüksek tutma kapasitesine sahiptir. Fakat akıcı olduğu için yapıştırma etkisi bulunmamaktadır. Burada ikinci bir kuvvet olan yapıştırıcı maddedeki moleküllerin tek tek sahip oldukları iç tutunma kuvveti “kohezyon” devreye girmektedir. Bu kuvvet sadece katı ortamlarda etki gösterdiği için, yapıştırıcılar basta akıcı (adhezyon kuvveti devrede) olmakla birlikte sonradan katılaşmaktadır (İşcan 2007).

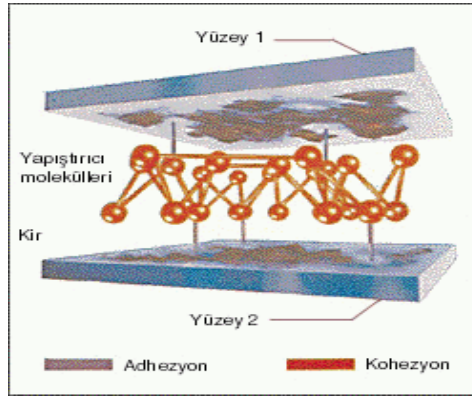
Yapıştırıcılarda sıvıdan katıya doğru geçme olayı, yapışkanın türüne bağlı olarak, hava, sıcaklık, morötesi ısınlar aracılığıyla veya yapışkanın içine ikinci bir bileşen olarak özel karıştırıcılar eklenerek sağlanmaktadır. Sıvıdan katıya geçiş özelliği sayesinde, su bile, buza dönüştüğünde iyi bir yapıştırıcı olarak kullanılabilir.

Yapışmanın doğasını daha iyi anlayabilmek için adhezyon ve kohezyon kuvvetlerini daha iyi anlamak gerekir.

2.1.1. Adhezyon

Adhezyon iki maddenin temas yüzeylerindeki yapışma kuvvetidir. Van der Waals kuvvetleri olarak adlandırılan çekim ve yüzeye tutunma kuvvetleri yapışma işleminde en önemli faktördür.

Eğer yapıştırıcı, mekanik olarak işlenmiş yüzeylerdeki pürüzlere tam olarak temas etmezse, bu moleküller arası kuvvetler oldukça zayıflar. Bu nedenle yapıştırıcının yüzey pürüzlerine tam olarak nüfuz etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gerekir. Dolayısıyla, yapıştırmanın kuvveti hem yüzeyin ıslatılmasına hem de yüzeyin yapışma özelliklerine bağlıdır. Belirli bir yapıştırıcı yüzey gerilimi için ıslatma, yapıştırıcı sürülen yüzeyin yüzey gerilimine ve yapıştırıcının viskozitesine bağlıdır. Yüzeyde kirlerin bulunması da ıslatmayı olumsuz etkiler. Şekil 2.1’de yapıştırma bölgesinde meydana gelen kuvvetler gösterilmektedir (Loctite 1998).



Şekil 2.1. Yapıştırma yerindeki kuvvetler (Loctite 1998)

2.1.2. Kohezyon

Kohezyon, yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir. Şu kuvvetler kohezyona etki eder:

- Van der Waals kuvvetleri (Moleküller arası çekim kuvvetleri),
- Kovalent bağ kuvvetleri (Polimer moleküllerinin kendi aralarında kenetlenmesi).

2.2. Yapışma Teorileri

Bugüne kadar yapışma mekanizmasını açıklamak için bilim adamları tarafından onlarca teori ortaya atılmıştır. Bu teoriler, moleküler, mikroskobik ve makroskobik seviyelerdeki kavramları esas almışlardır. Bu teorilerin hiç birisi tek başına yapışma mekanizmasının bütün yönlerini açıklayamaz. Bu bölümde, bu teorilerden en önemli olanlarından bahsedilecektir.

2.2.1. Mekanik teori

Mekanik yapışma teorisi; yapıştırılan malzemeler ile yapıştırıcı fazının mekanik olarak birbirine geçirilmesi ile yapışarak birleşmenin oluşacağını ifade eder. McBain and Hopkins (1925), bir yüzey üzerine sıvı yapıştırıcı sürüldüğü zaman, yapıştırıcının gözeneklere gireceğini, mekanik tutunma olacağını ve dolayısıyla iyi bir yapışma meydana geleceğini ifade etmiştir. Bazı yüzey işlemleri yüzeydeki gözenekleri artırır. Jennings (1972), yapıştırılacak malzeme yüzeyini pürüzlendirmek ve yüzeydeki kirleri temizlemenin yapışma alanını artırarak yapıştırıcının yüzeye daha iyi yayıldığını ve ıslatma sağladığını ifade etmiştir.

2.2.2. Difüzyon teorisi

Difüzyon teorisi, biraz mekanik tutunma teorisine benzemektedir. Fakat, difüzyon teorisi moleküler seviyededir. Voyutski (1963) tarafından geliştirilen bu teori; iki komşu faz arasında molekül alışverişini kabul eder. Bu olay benzer polimerler arasında gerçekleşmesine rağmen, polimer ve metal ara yüzeylerinde nadiren olabilecek bir durumdur.

2.2.3. Adsorpsiyon teorisi

Adsorpsiyon teorisi; komşu yüzeylerin molekülleri arasındaki Van der Waals kuvvetlerinin çekimiyle oluştuğunu ifade eder. Bu teori, yapıştırıcı biliminde halen en fazla kabul edilen uygulanabilir teoridir ve esas malzeme ile yapıştırıcı arasında iyi bir temas sağlanması şartıyla ara yüzeyde atomlar arası ve moleküller arası kuvvetlerin oluşması sonucu yapışmanın meydana geldiğini ileri sürer. Bu teori, yapıştırıcı-malzeme ara yüzeyindeki kuvvetleri; iyonik, kovalent ve metalik bağlar olan birincil kuvvetler ve Van der Waals kuvvetleri, dipol-dipol, indirgenmiş dipol-dipol, hidrojen bağları ve asit-baz iç etkileşimini kapsayan ikincil kuvvetler olmak üzere iki kategoride gruplandırılabilirliğini ifade etmiştir. Birincil kuvvetlerin bağ enerjileri 60–1050 KJ/mol arasında değişirken ikincil kuvvetlerin bağ enerjileri 0.08–40 KJ/mol arasında değişir. Birbirinden bir nanometre kadar ayrılan iki yüzey arasında oluşan çekim kuvveti yaklaşık 100 MPa olarak hesaplanmış ve bu değer yapıştırma bağlantısı mukavemetinden daha fazladır. Bu fark bağlantı esnasında oluşan boşluk ve diğer kusurlardan kaynaklanmaktadır. Bağlantı mukavemetinin teorik ve deneysel değerleri arasındaki bu büyük farka rağmen yine de bağlantı mukavemetinin bu kadar yüksek mukavemete sahip olmasının sebebi ikincil bağ kuvvetleridir.

2.2.4. Elektrostatik teorisi

Elektrostatik teorisi; adsorpsiyon teorisine benzerdir ve Deryagin ve Krotova tarafından ortaya atılmıştır. Bu teori, çekim kuvveti farklı iki malzeme temas ettiği zaman oluşan elektriksel kuvvetten dolayı oluşur.

2.2.5. Kimyasal yapışma teorisi

Moleküller arasında iyonik ve kovalent bağ kuvvetlerinin meydana getirdiği adhezyon olayıdır. Bazı şartlar altında esas bağların yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler arasında daha yüksek bağ dayanımlarına neden olabileceğini ifade eder.

2.2.6. Zayıf sınır tabaka teorisi

Bu teori, temiz yüzeylerin daha kuvvetli yapışma işlemi sağlayabileceğini ifade eder. Yüzeyler arasında kirletici tabakalar olduğunda bağlantı zayıflar. Yağ, pas, gres vb. zayıf sınır tabakalar oluşmasına imkan sağlar. Düşük yüzey enerjisine sahip polimerler haricinde kuru ve temiz malzeme yüzeyi genellikle kuvvetli yapışma işleminin oluşmasına katkıda bulunur.

Yukarıda bahsedilen teoriler yapışma olayının nasıl meydana geldiği hakkında bazı düşünceleri göstermektedir. Bu teorilerin hepsini kapsayan herhangi bir teori ortaya atılmamıştır.

2.3. Yapıştırıcıların Sınıflandırılması

Yapıştırıcıların temel özelliği yüzey teması sağlayarak malzemeleri bir arada tutmaktır. Eski yapıştırıcıların çoğu tek bir elemandan meydana gelirken, günümüzde kullanılan yapıştırıcılar organik, inorganik veya karma olan farklı bileşenlerin karışımı şeklindedir. Bununla birlikte, günümüzde bazı uygulamalarda eski yapıştırıcılar da kullanılmaktadır.

Günümüzde yapıştırıcılar kimyasal tipleri açısından ve formları açısından iki ana grup olarak ayrılmaktadır.

2.3.1 Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar

Yapısal yapıştırıcılar olarak adlandırılan bu yapıştırıcılar kimyasal reaksiyon ile sertleşir ve çok güçlü bir yapıştırma sağlar. Günümüzde kullanılan kimyasal reaksiyon ile sertleşen kimyasal yapıştırıcı tipleri aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

- Aneorobikler
- Akriklikler
- Siyanoakrilatlar
- Epoksiler
- Silikonlar
- Poliüretanlar
- Fenolikler

Bu yapıştırıcı türlerinin dışında; yapısal olmayan yapıştırıcılar olarakta adlandırılan ve kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcı türlerine göre daha düşük yapışma mukavemetine sahip olan fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılarda vardır. Bu yapıştırıcı türleri aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir:

- Sıcak eriyikler,
- Ultraviyole yapıştırıcılar,
- Kauçuk yapıştırıcılar,
- PVA'lar (Polivinil Acetates),
- Basınç gerektirmeyen yapıştırıcılar.

2.3.2. Formları açısından yapıştırıcılar

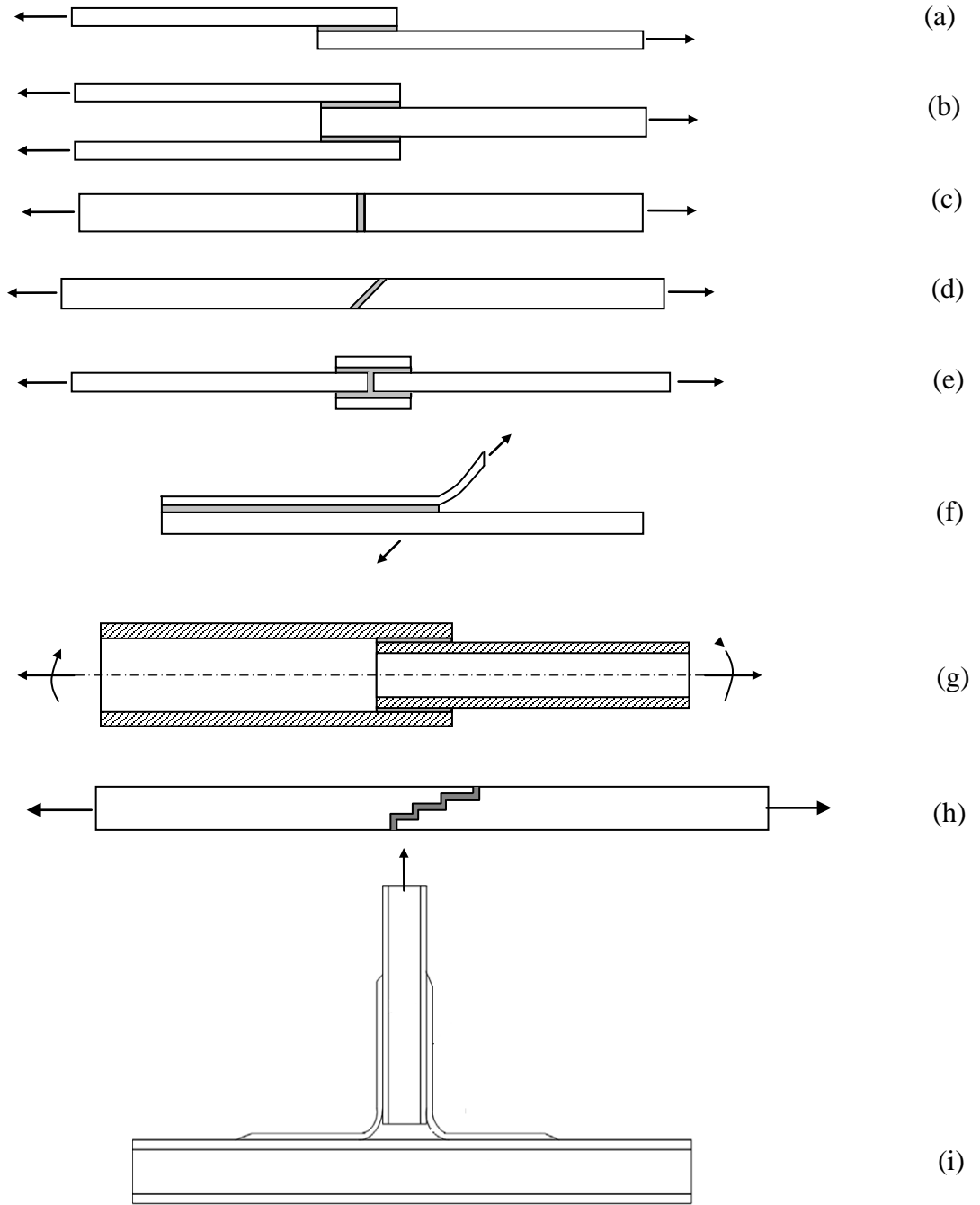
Modern yapıştırıcılar, macun, sıvı ve toz gibi çeşitli formlarda olabilirler. Kullanım yeri olarak çeşitli gruplarda değerlendirilebilir. Form olarak yapıştırıcılar aşağıdaki gibi gruplandırılır:

- Macun tip yapıştırıcılar
- Film tipi yapıştırıcılar
- Düşük viskoziteli yapıştırıcılar
- Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar
- Reçineler
- Köpükler

2.4. Yapıştırma Bağlantıları

Bütün katı malzemeleri bir yapıştırıcı ile birleştirmek mümkündür. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların yüksek mukavemete sahip olmasını sağlamak için genellikle özel bağlantı çeşitleri kullanılmaktadır. Uygun bir yapıştırma bağlantısı tasarımı, yapıştırma bağlantılarındaki gerilme dağılımı ve bağlantının mukavemeti hakkında yeterli bilgiye sahip olmakla mümkündür. Yapıştırma bağlantısının davranışı; geometri, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme davranışı gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu bağıllık bağlantının mekanik davranışını tahmin etmeyi zorlaştırır (Taib *et al.* 2006).

Yapışma ile birleşme tasarımında temel prensip, birleşenler arasında yükün emniyetli bir şekilde transferini gerçekleştirilerek emniyetli, ekonomik ve yüksek performansa sahip yapıştırıcı ile birleşmenin tasarlanmasıdır. Mühendislikte kullanılan yapıştırma bağlantı tiplerinden en önemli ve en yaygın kullanılanlar Şekil 2.2'de gösterildiği gibidir.

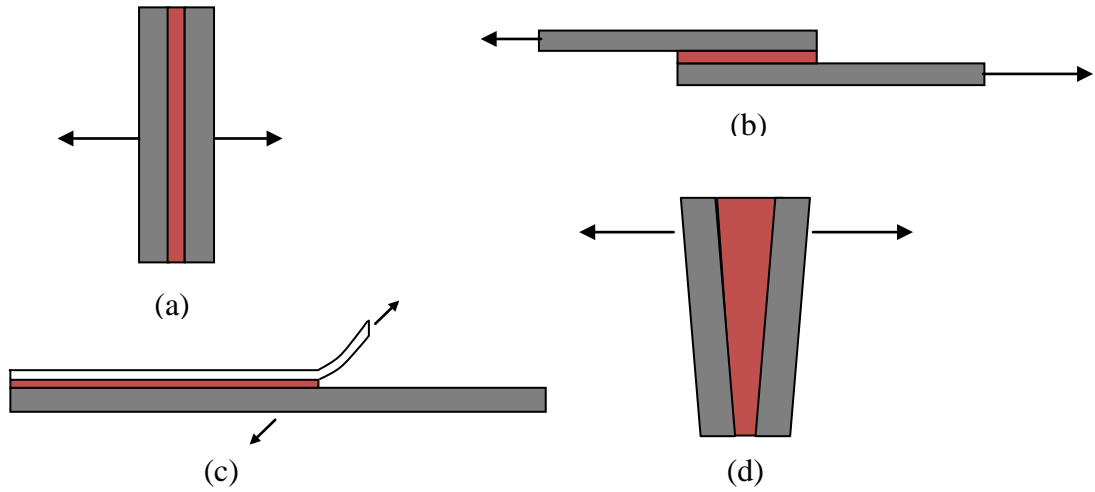


Şekil 2.2. Bazı yapıştırma bağlantı tipleri:

*a. Tek tesirli bağlantı, b. Çift tesirli bağlantı, c. Alın bağlantı, d. Pah bağlantı, e. Çift takviyeli alın şerit bağlantı, f. Soyulma bağlantısı, g. Tüp şeklinde bağlantı, h. Kademeli bağlantı (Adams and Wake 1984), i. T bağlantı (Akpınar 2012)

2.4.1 Yapıştırma bağlantılarında gerilmeler

Bir yapıştırma bağlantısı çekme, basma, kayma, soyulma, ayrılma (cleavage veya yarıлма) veya tüm bu yükleme durumlarının kombinasyonu Şekil 2.3’de gösterildiği gibi yüklenir. Bağlantı mukavemetinden en yüksek oranda verim elde etmek için bu gerilme çeşitleri göz önünde bulundurulmalı ve yapıştırıcı hangi yükleme durumu için maksimum performans sergiliyorsa o yükleme durumuna uygun bağlantı tipi seçilmelidir. Yapıştırıcıların soyulma etkisinin oluşturduğu gerilme dağılımlarına karşı dayanımları zayıf iken çekme, basma ve kayma yüklerinin oluşturduğu gerilme dağılımlarına karşı mukavemetleri oldukça iyidir (Akpınar 2012).



Şekil 2.3. Yapıştırma bağlantılarında gerilme tipleri:

*a. Çekme, b. Kayma, c. Soyulma, d. Ayrılma (Cleavage)

Çekme kuvvetinin uygulandığı yüklemde kuvvetler yapıştırıcı tabakasına dik olarak etki etmektedir (Şekil 2.3 a). Uygulanan bu kuvvetlerden dolayı oluşan gerilme, yapışma alanına eşit olarak dağılmaktadır. Fakat bağlantıya sadece bu tür gerilmenin etkidiğinden emin olmak her zaman mümkün değildir. Eğer kuvvetler eksenden kaçık olarak etkiyorsa o zaman yapışma alanına gerilmenin eşit yayılma avantajı kaybolacak ve bağlantının bozulma ihtimali artacaktır. Diğer bir hususta yapıştırılan malzemenin kalın olmasıdır. Bağlantı maruz kaldığı yük etkisi ile fark edilir oranda bir eğilme

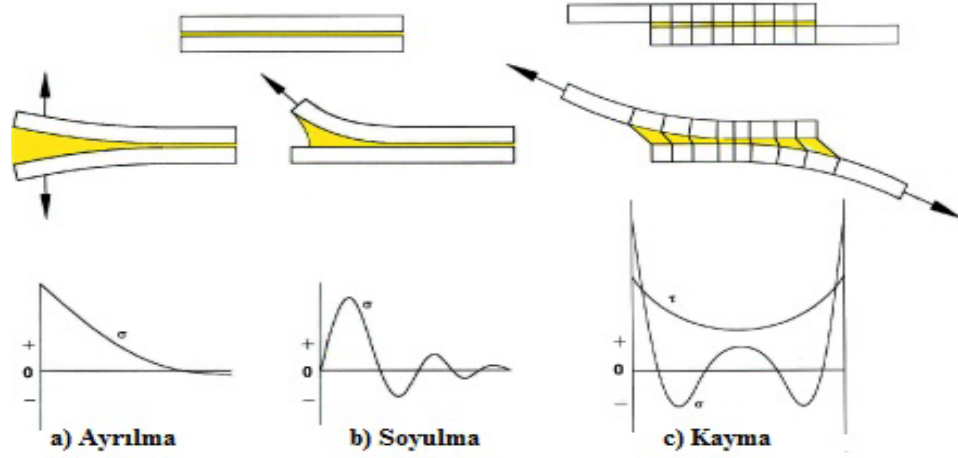
oluşmamalıdır. Eğer bağlantıda bir eğilme oluşuyorsa, gerilmeler düzgün bir şekilde dağılmayacaktır.

Soyulma kuvvetinin etkisiyle gerilmenin oluşması için yapıştırılan malzemelerden biri veya her ikisi de esnek yapıda olmalıdır (Şekil 2.3 c). Bu tür yüklemelerde bağlantı sınırında oluşan gerilme çok yüksektir. Bağlantı çok geniş veya yük çok düşük olmadıkça yapıştırma bağlantısı çabuk hasara uğrayacaktır. Yapıştırma bağlantılarında mümkün oldukça bu tür yüklemelerden uzak durulmalıdır.

Kesme yükleri yapıştırılan alanın tümüne düzgün bir şekilde (üniform) etki eder (Şekil 2.3 b). Bu tür yüklemelerde yapışma alanının tamamının etki altında olması bağlantı ömrünü arttırarak ekonomiklik sağlar. Mümkün olduğu yerlerde bağlantılar yükün büyük bir kısmı kesme yükü olarak iletilebilecek şekilde oluşturulmalıdır (Temiz 2003).

Şekil 2.3 d’de gösterilen ayrılma (cleavage) tipi yüklemelerde, genellikle eksenden kaçık çekme kuvvetinin veya momentinin sonucu oluşmaktadır. Diğer gerilmelerin aksine bu gerilme yapışma alanına eşit olmayan bir şekilde etki etmekte ve bağlantının bir tarafında yoğunlaşmaktadır (Kayacan 1988).

Yapıştırma bağlantısının çekme ve basma gerilmelerine zorlanması halinde, gerilme dağılımı yapıştırma uzunluğu boyunca düzgün olmaktadır. Bağlantı kaymaya zorlandığında, gerilmeler uç kısımlarda yoğunlaşmaktadır. Soyulma ve ayrılma yüklemeleri uygulandığında ise gerilme dağılımı iki uç arasında çok büyük farklılıklar göstermektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Yapıştırma bağlantılarında oluşabilecek gerilme durumları:

*a. Ayrılma, b. Soyulma, c. Kayma (Akpınar 2012)

Uygulamalarda, yalnızca çekme ve basma yükleri çok nadir uygulanır. Daha çok kayma (kesme), ayrılma ve soyulma yükleriyle karşılaşılır. Bağlantının birleşme yeri gerilme dağılımı, yani gerilmelerin yapışma hattındaki konumu, değişkendir ve hesaplaması daha zordur. Kayma gerilmeleri, bazı yerlerde yoğunlaşmalar olacak şekilde yapışma yüzeyine dağılır. Yapışma alanının kenarları, orta noktaya göre daha yüksek gerilmeye dayanmak zorundadır. Birleştirme yerine ayrılma veya soyulma kuvveti uygulandığında, gerilmenin çoğu bir kenarda yoğunlaşır.

2.5. Yapıştırma Bağlantılarında Gerilme Analizi

Verilen bir yükleme durumu için bağlantı mukavemetinin tahmini; yük ve yükün büyüklüğü, yapısal geometri, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleri gibi bazı faktörlere bağlıdır. Bununla birlikte, bir yapıştırma bağlantısının dayanımının tahmini o kadar kolay bir iş değildir ve gerilme, şekil değiştirme dağılımları ve kırılma parametrelerinin belirlenmesi için yapılacak analizlerde etkin ve güvenilir yöntemlerin kullanımını zorunlu kılar.

Yapıştırma bağlantılarının gerilme analizlerinde, analitik ve sayısal olmak üzere iki temel yöntem vardır ve her iki yaklaşımda da yapıştırma bağlantısını oluşturan elemanların elastik ve elastik-plastik davranışı dikkate alarak analiz yapılabilir. Elastik-plastik modeller metallerin gerilme-şekil değiştirme davranışını tanımlamak için geliştirilmiştir. Ancak bu model plastikler, yapıştırıcılar ve diğer malzemelere uygulanabilir.

Sonlu elemanlar yöntemi yapıştırma bağlantılarının gerilme analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem ile yapılacak tasarımın doğruluğu yapıştırıcı için uygulanacak malzeme modeline ve bu malzeme modeli için gerekli verilerin doğru ve tekrarlanabilir bir biçimde belirlenmesiyle mümkün olacaktır.

Yapıştırma bağlantılarının lineer olmayan sonlu elemanlar analizinde son yıllara kadar kullanılan bu yaklaşım içinde en çok; bulk numunelerin çekme deneyinden elde edilmiş gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alarak, malzemelerin elastik ve plastik gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin kullanılmasıyla yapılmaktadır. Maksimum gerilme ve şekil değiştirmeye dayalı olan bu kriterde; yapıştırıcı tabakası ve yapıştırılan malzemelerde oluşan eş değer gerilmelerin hesaplanmasında von Mises akma kriteri kullanılır.

von-Mises akma kriterine göre metallerde akma, yalnız deviyatorik gerilme tansörünün ikinci invariantına bağlı olduğu varsayılır. Bu durumda;

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sqrt{3J_2} = q \quad (2.1)$$

Plastik deformasyonun sabit hacim altında olduğu varsayılır, yani plastik Poisson Oranı 0.5'e eşittir. Ayrıca, akmanın hidrostatik gerilmelerden bağımsız oluşu çekme ve basıdaki akma gerilmelerinin aynı olduğu anlamına gelir. Bu çalışmada von-Mises akma kriteri kullanılmıştır.

2.6. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda, iyi bir bağlantı elde etmek için yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzeyler arasında tam temas sağlanması gereklidir. Mükemmel bir yapıştırma için, ilk olarak uygun bir yüzey hazırlama metodu ve uygun bir yapıştırıcı türü belirlenmelidir.

Yapıştırma bağlantılarında, parçaları birleştirme aşamasından önce yapılan yüzey hazırlığı en kritik aşamadır. Yüzey hazırlamanın amacı; sürekli ve yüksek mukavemete sahip bir yapıştırma bağlantısı sağlayacak yapıştırılan malzeme yüzeylerinin oluşturulabilmektir. Pratik olmamasına rağmen, yapıştırılacak malzemelerin yüzeyinde; oksit, boya, krom ve fosfor gibi tabakaların araya girmeden yapıştırıcıyla direkt temas etmesi istenir. Bu tabakalar “Zayıf Sınır Tabakalar” olarak adlandırılır. Böyle tabakaları içeren malzemeleri yapıştırma yöntemiyle bir araya getirme uygun değildir. Bu şartlar altında yapıştırıcı, yapıştırılacak yüzeyler ile asla temas halinde olmayacaktır. Yüzeyler üzerinde istenmeyen bu malzemeler yapışmanın kalitesini düşürür.

Yapışma işleminin gerçekleştirileceği yüzeylerin son derece temiz olması gerekir. Yapışma yüzeylerinin yapışma işlemi öncesi yüzey temizlikleri, bu işlemin en can alıcı ve nihai ürünün kalitesini etkileyen en önemli noktadır. Bu amaç ile özellikle havacılık ve uzay sanayinde kimyasal temizleme ve aşındırma işlemleri geliştirilmiştir.

Yüzey hazırlama, yalnızca yapıştırma bağlantısının başlangıçtaki dayanımı için değil, aynı zamanda uzun süreli dayanımı için de oldukça önemlidir. Yapışma kuvveti büyük ölçüde yapıştırılacak yüzeyler ile yapıştırıcı arasındaki adhezyon kuvveti tarafından belirlenir. Yapıştırıcılar, aynı veya farklı malzemeden yapılmış yüzeyler arasında bir çeşit köprü görevini yapar.

Yapışma mekanizması şunlara bağlıdır:

- Yapıştırıcının yüzeye yapışma kuvveti- adhezyon

- Yapıştırıcının iç kuvveti- kohezyon

Yüzeyler iyi temizlendiği ve ön işlem yapıldığı oranda yapışma kuvvetinin artacağı iyi anlaşılmalıdır. Yüzey hazırlama yöntemleri en azından, yağı, gresi ve yüzeye tutunma kuvveti yapıştırıcınınkinden az olabilecek kaplamaları temizlemelidir. Birçok plastik ve metal malzemede, basit zımparalama veya çözeltiyle temizleme yöntemi kullanılır. Ancak bazı metallerde, iyi bir yapışma veya uzun vadeli ortam şartlarına dayanım elde etmek için bu basit yüzey hazırlama yöntemleri yeterli olmayabilir (Aydın 2003).

2.6.1. Genel yüzey hazırlama metotları

Yapıştırılacak malzemelerin yüzeylerinin hazırlanması yapıştırma işleminin en önemli basamakların başında gelmektedir. Bağlantının dayanımı ve sürekliliği yapıştırıcı ile temas halinde olacak yüzeyin şekline çok fazla bağlıdır. Yüzey hazırlama, basit bir çözelti içerisinde daldırma yanında, mekanik aşındırma, kimyasal temizleme ve asitle dağlamaya kadar bir kaç yöntemin bir arada uygulanmasıyla da yapılabilir. Düşük ve orta derecede bağlantı dayanımının istendiği yerlerde yoğun bir şekilde yüzey hazırlığının yapılmasına gerek yoktur. Ancak, yüksek bağlantı dayanımı, sürekliliğin ve verimliliğinin istendiği yerlerde, dikkatli ve kontrollü bir yüzey hazırlama işlemi gereklidir. Yüzey hazırlama yöntemlerinin seçiminde aşağıda verilenler dikkate alınmalıdır:

- Bağlantı dayanımı,
- Süreklilik ve hizmet edilen çevre,
- Yapıştırılacak malzeme üzerindeki kirletici unsurların türü ve miktarı,
- Yapıştırılacak malzeme

Yapıştırılacak malzemelerin yüzeylerindeki, oksit tabakası, yağ, boya tabakası gibi kirletici unsurların ortadan kaldırılması yani uygun bir yüzey temizliği bağlantı dayanımını önemli derecede artırır. İyi bir yapıştırma işlemi için plastik ve elastomerler yüzey hazırlama işlemine metallere göre daha çok bağlıdır.

Değişik tür malzemeler için, işlemlerin ve kullanılan kimyasalların değişebileceği göz önünde bulundurulmak kaydıyla yüzeyler; aşağıda verilen ön hazırlama prosedürlerinin biri veya bir kaçının beraber uygulanmasıyla yapışmaya hazırlar:

- Yağ alma ve pislikten arındırma
- Mekanik aşındırma
- Kimyasal ön işlem

a) Yapıştırılacak yüzeylerin yağdan ve pisliklerden arındırılması

İyi bir yapıştırma bağlantısı elde etmek için yapıştırılacak yüzeylerin yağ, gres, toz ve diğer kalıntılardan tamamen temizlenmesi gerekir. Kalıntı bırakmadan buharlaşan çözeltiler bu işlem için uygundur.

Trikloretilen, metiletilketon ve aseton en iyi yağ çözücülerdir. Bu çözeltiler kullanılarak ıslatılan yüzeyler kurulandıktan sonra bir kaç dakika buharlaşmanın tamamlanması için bekletilir.

Eğer fazla sayıda imalat için özel yağ alma banyosu kullanılıyorsa, çok kirli yüzeyler ön temizlik yapıldıktan sonra temizlik banyosunda kullanılmalıdır. Aksi takdirde temizlik banyosu kirlenerek yüzey temizliği başarılı bir şekilde yapılmayacaktır. Buharlı yağ alma sistemleri yüzey temizliğinde çok sık kullanılır. Bu yöntemde çözeltiler kaynama noktasına kadar ısıtılır ve buharlaştırılır. Soğuk parçalar buharlaşmış temizleyici ile temas ettiğinde, temizleyici yüzeyler üzerinde yoğunlaşır. Oluşan sıvı yüzeylerde kalmış kir ve gres parçacıklarını temizler.

Yağ alma, genellikle tamamen kapalı makinelerde, yağ alma çözeltileri ile yapılır. Birçok uygulamada yüzeylere hızlı etkili bir temizleyici ile ön işlem yapılması yeterlidir. Bu şekilde yüzeyler yağ, gres, kir ve diğer kalıntılardan temizlenir ve yapıştırma için hazır hale gelmiş olur. Çözeltiler ile temizlik yapılırken daha iyi netice

almak için, yüzeylerden kiri ayıran kimyasal işlem mekanik olarak ta desteklenebilir (bir temizlik bezi ile ovalamak, fırçalamak gibi).

Yapıştırılacak yüzeydeki yağ, gres gibi kirletici unsurlar deterjan kullanılarak da temizlenebilir. Parçalar 66-99°C'de suya daldırılır. Sonra hemen saf suda iyice çalkalandıktan sonra, kurutulur. Genellikle, kullanılan deterjanın alkalın esaslı olması tavsiye edilir. Alkalın veya asit bazlı sulu temizleyiciler her zaman korozyon önleyici içerirler. Bunlar eğer temizleme sonrası yüzeyde kalırsa, yapışma kuvvetini azaltabilir veya yapıştırıcının kürleşmesini engelleyebilir. Eğer bu tür temizlik sistemleri kullanılacaksa, mutlaka önceden testler yapılmalıdır. Her durumda tüm yüzeyler iyice durulanmalı veya silinmelidir. Alkalın esaslı deterjanlarla temizleme, tek başına pas gibi kalıntıları temizleyemez ve diğer yüzey hazırlama yöntemleri ile birlikte kullanılır.

b) Mekanik aşındırma

Kirli metal yüzeyler genellikle bir oksit tabakasıyla kaplıdır ve bu tabaka yağ alma ile temizlenemez. Böyle bir durumda; kumlama, zımparalama, taşlama veya tel fırça ile fırçalama gibi mekanik ön işlem gereklidir.

Yapıştırma bağlantılarının dayanımı üzerine yüzey pürüzlülüğünün önemli derecede etkisi vardır. Bu etki malzemenin yüzey alanını artırarak (dolayısıyla malzeme ve yapıştırıcı arasındaki kimyasal bağlar artar) sağlanır. Zımparalama geniş yüzeyleri temizlemek için etkili bir yöntemdir. Çok kalın zımpara kullanmamak şartıyla, bu yöntemle elde edilen yüzey pürüzlüğü çok iyi yapıştırma sağlar. Taşlama ile de aynı şekilde iyi bir yüzey pürüzlüğü elde edilir. Bu yöntemde yüzey pürüzlüğünü iyi seçmek önemlidir. Bağlantı dayanımı genellikle yüzey pürüzlülüğünün derecesine bağlıdır. Aşırı pürüzlü yüzeyler bağlantıda boşluklar oluşturacağından dayanımı olumsuz yönde etkiler.

Aşındırma işleminde zımpara kullanımı, aşındırılacak malzemelere bağlıdır. Örneğin alüminyum zımpara, galvanik korozyondan dolayı düşük mukavemetli çelikler için kullanılmaz. Bu yüzden, demir ya da çelik tipi zımpara kullanılır.

Zımpara tipinin ve büyüklüğünün seçimi, çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörler; ön işlem yapılacak metal, kullanılacak ekipmanın tipi, basınç, zımparanın açısı ve süresidir. Zımparalama el ve makine ile olmak üzere iki şekilde yapılır. Makine ile zımparalamanın su ve hava ile kullanılan iki türü vardır. Su ile beraber kullanılan tipi, demir malzemelerin aşındırılması için kullanılırsa, aşındırma işleminden hemen sonra parçalar kurutulmalı veya suya korozyon önleyici madde ilave edilmelidir. Plastik malzemelerin zımparalanmasında makine kullanılırsa, zımparalama süresinin çok kısa olması gerekir. Aksi takdirde plastik malzemeler oluşan ısıdan dolayı erir. Eğer zımpara makinesi mevcut değilse, yüzeyler 125 ile 325 µm arasındaki zımparalar kullanılarak el ile aşındırılması gerekir. Farklı metaller için tavsiye edilen aşındırıcı boyutları aşağıda verildiği gibidir,

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

Taşlama, zımparalama veya fırçalama işlemi sonrası, parçalar üzerinde kalan tüm kalıntıların temizlenmesi için parçalara yağ alma işlemi uygulanmalıdır. Ayrıca, çok kirli parçalar mekanik işlem öncesi de yağdan arındırılmalıdır ki, kullanılan zımpara veya taş yüzeydeki kirleri bulaştırmasın. Pratikte mekanik ön işlem yöntemlerinin kullanılması çok kolaydır ve genellikle yeterli yapışma kuvveti sağlarlar.

c) Kimyasal ön işlem

Yağdan arındırma ve aşındırma ön işlemleri yapışma için yeterli olmasına rağmen yapışmanın kalitesini daha da artırmak için, yapışma yüzeylerinin kimyasal ön işleme

tabi tutulması, yüzey hazırlama yöntemlerinin içinde en etkili olanıdır. Bu yöntem, yüzeyin kimyasal ve fiziksel özelliklerinde değişimler oluşturur. Birleştirilecek bölge genellikle kromik asit gibi asit çözeltisi içerisine daldırılır. Daha sonra; parçalar hemen saf suya daldırılır, iyice çalkalanır ve kurutulur. Kimyasal aşınma sonucunda, malzeme yüzeyine reaktif gruplar eklenmesi ve yapıştırıcının mekanik olarak kenetlenebileceği gözenekler açılması nedeniyle yüzeyde değişim meydana gelir. Bu işlemin sonucu malzemeden malzemeye değişebilir. Aşındırıcı çözeltilerin uygulanması ve atık yönünden giderek pahalı olması nedeniyle bu yöntemin sanayide kullanımı sınırlıdır. Ancak, maksimum dayanımın elde edilebilmesi için, kimyasal veya elektrolitik ön işlem gereklidir.

Bu bölümde anlatılan yapıştırma işlemi öncesinde uygulanacak ön işlemler, tüm mekanik malzemeler için ortak olarak uygulanmaktadır. Bu mekanik işlemlerin devamında, bağlantı mukavemetini ve sürekliliğini artırmak amacıyla metal türüne bağlı olarak kimyasal işlemler de uygulanmaktadır. Bu kimyasal işlemler, yapıştırma yöntemiyle birleştirilen malzemelerin sanayide kullanım yoğunlukları dikkate alınarak ASTM D 2651-01 ve TSEN 13887 standartlarında verilmiştir.

2.6.2. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan kimyasal ön işlemler

Alüminyum ve alaşımları uzun süreli çevre şartlarına maruz kalacaksa özellikle yüzeylerin hazırlanmasında kimyasal ön işlemlerin kullanılmasının oldukça etkili bir yöntem olduğu bulunmuştur. Alüminyum levhaların kimyasal ön işlemleri aşağıda verildiği gibi dört değişik yöntem ile yapılır (ASTM D2651-01,2008):

- Kromik /Sülfürik asit dağlama yöntemi
- Kromik asit anotlama yöntemi
- Fosforik asit anotlama yöntemi
- Sülfürik asit anotlama yöntemi

Elektrolitik olarak yüzeyde koruyucu bir oksit tabakasının oluşturulduğu anotlama işlemi yalnız alüminyum alaşımlarına uygulanır. Diğer metal yüzeylerine uygulanmaz. Fosforik asitle anotlamada, yüzeyin yapışma kabiliyeti ve korozyon dayanımını artırmak için fosforik asit kullanılarak, yapışma yüzeyinde kristal bir film tabaka oluşturulur. Parçalar fosforik asit çözeltisine daldırıldığında, yüzeyde çinko fosfat veya demir fosfat kristalleri şekillenir.

Sülfürik asit-dikromat işlemi alüminyum ve alaşımlarının yüzey hazırlanmasında kullanılan etkili, kontrol edilebilir ve güvenilir bir yöntemdir. Bu işlem uzay ve havacılık endüstrilerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kromik asitle anotlama, bir metal yüzeyinde kromik asit çözeltisi kullanılarak non-kristal film tabakasının oluşturulduğu bir işlemdir. Bu yöntem uygulandığı yüzeyin yapışma ve korozyon dayanımını artırır.

Alüminyum özellikle yüksek nem ortamı gibi zor çevresel şartlara maruz kalacaksa, korozyondan korunma alüminyum yüzeylerinin hazırlığında düşünülmesi gereken en önemli parametredir. Çözeltiyle temizleme ve mekanik aşındırma işlemleri, çevresel dayanımın gerekli olduğu yerlerde korozyon dayanımı oluşturmadıklarından kullanılması tavsiye edilmez. Alüminyum yüzeyleri hazırlanırken aşağıdaki adımlar uygulanır:

- a) Yağ ve gres atıklarının yüzeyden temizlenebilmesi için asetonla yıkama,
- b) Perkloretilen buharıyla yağ giderme işlemi,
- c) Sülfürik asit/sodyum dikromat çözeltisi veya sülfürik asit/ferrik sülfat çözeltisine belirli bir sıcaklık ve sürede daldırma,
- d) 40⁰C'deki suya 1-2 dakika daldırma,
- e) Oda sıcaklığındaki saf suya daldırma,
- f) 60⁰C'deki fırında kurutma

Yüzey hazırlığı yapılan parçalar toz ve kirden korunmalı ve 48 saat içinde yapıştırma işlemi gerçekleştirilmelidir. Yaklaşık 4,5 litre çözelti 20 m²'lik bir alüminyum yüzeyinin hazırlanması için yeterlidir.

2.7. Yapıştırma Bağlantılarında Meydana Gelen Hasar Tipleri



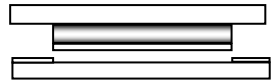

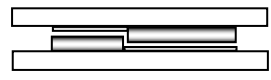

Yapıştırma bağlantılarının ya da yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tam anlamıyla anlaşılması için, hasar tiplerinin belirlenmesi gerekir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda genel olarak adhezyon ve kohezyon olmak üzere iki farklı tip hasar modeliyle karşılaşılır (ISO 10365). Bu hasar modellerinin belirlenmesi bir yapıştırma bağlantısına uygulanan herhangi bir mekanik testin sonuçlarının daha iyi anlaşılmasını sağlar. Temel hasar tipleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Birden fazla hasar modeli oluşmuşsa her bir hasar modelinin yaklaşık yüzde oranı her bir tanımlama sonunda verilmelidir.

Adhezyon hasarı; yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gözle görülen ayrılmanın olduğu kopma olayıdır. Yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasında zayıf noktalar her zaman bulunabildiğinden veya malzemeye uygun yapıştırıcı seçilmediğinden adhezyon kopması meydana gelebilir.

Kohezyon hasarı ise; bir yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede gözle görülebilir hasarın olduğu kopma şeklidir. Aşırı yüklenme, sıcaklık ve yaşlanma olayları sonucunda meydana gelen kohezyon hasarında yapıştırıcı malzemenin her iki yüzeyinde de bulunur. Uygun yüklenme, yapıştırıcı ve geometri seçimi yapılarak kohezyon hasarı önlenir.

Normal şartlar altındaki yüklemelerde kohezyon hasarının meydana gelmesi istenir. Eğer adhezyon hasarı meydana geliyorsa yapıştırma işleminde bir yanlışlık yapılmış sonucuna varılabilir.

Çizelge 2.1. Temel hasar tipleri (ISO 10365)

	Hasar Tipleri	Tanımlanma Şekli
Yapıştırılan Malzeme	 <p>Yapıştırılan malzemelerin biri ya da ikisinde de hasarın oluşması</p>	YH
	 <p>Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı</p>	KYH
	 <p>Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar</p>	DH
Yapıştırıcı	 <p>Kohezyon hasarı</p>	KH
	 <p>Özel kohezyon hasarı</p>	ÖKH
	 <p>Adhezyon hasarı</p>	AH

2.8. Sonlu Elemanlar Yöntemi

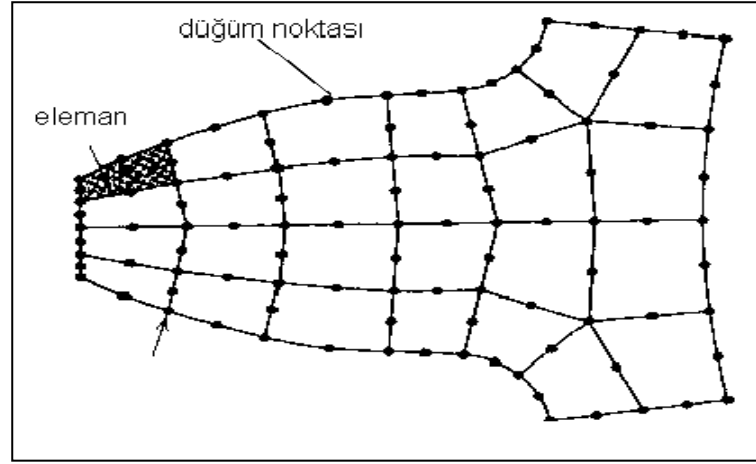
Karmaşık mühendislik problemleri beraberinde aynı karmaşıklıkta çözümler içerir. Bu karmaşa çözüm aşamasını da hassasiyetten uzaklaştırır. Karmaşık problemlerin en kısa yoldan çözüme götürülmesi sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılabilir. Çözumsuz gibi görünen problemler bile bu metot ile çözülebilmektedir.

Sonlu elemanlar metodu ilk kez 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiş olup, daha sonraki on yıl içerisinde uygulamalı bilimler ve mühendislik problemlerinin çözümünde de kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonraki yıllarda da bu metod ve çözüm teknikleri hızlı geliştirilmiş ve günümüzde pek çok problemin çözümü için kullanılan en iyi metodlardan birisi halini almıştır.

Sonlu elemanlar metodunun üç temel niteliği vardır:

- 1) İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır,
- 2) İkincisi her elemandaki, sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir,
- 3) Üçüncü kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problem çözümünde yeterli olmasıdır (Tın 2006).

Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan birçok elemana bölünür. Elemanlar nod adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler (Şekil 2.5). Bu şekilde cebrik bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler nodlardaki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.



Şekil 2.5. Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanları (Akpınar 2008).

2.9.1. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları

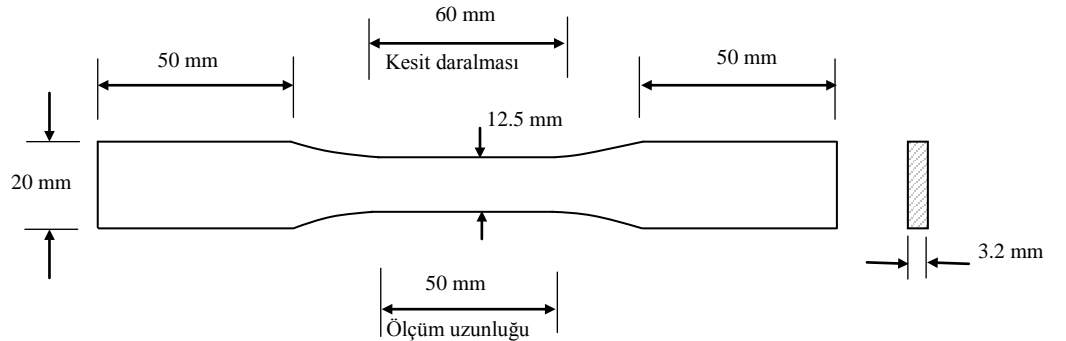
- Sonlu elemanlar yöntemi geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesine olanak sağlar. Çözüm bölgesi alt bölgelere ayrılabilir ve değişik sonlu elemanlar kullanılabilir. Gerekliğinde bazı alt bölgelerde daha hassas hesaplamalar yapılabilir,
- Değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlerde kolaylıkla uygulanabilir. Örneğin, anizotropi, nonlineer, zamana bağlı malzeme özellikleri gibi malzeme özellikleri dikkate alınabilir,
- Sınır koşulları, sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra, oldukça basit satır sütun işlemleriyle denklem sistemine dahil edilebilir,
- Matematiksel olarak geliştirilebilir ve çok sayıda problemi çözmek için aynı model kullanılabilir,
- Yöntemin hem fiziksel anlamı hem de matematiksel temeli mevcuttur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Yapıştırılan Malzeme

Bu çalışmada; havacılık ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemesi hafifliği, işlenebilirliği, fiziksel ve mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dayanımlarından dolayı yapıştırılan malzeme olarak kullanılmıştır. Bu alüminyum alaşımı, yüksek dayanıma sahip olmasından dolayı özellikle hava araçlarının gövdesini oluşturan birçok yapıştırma bağlantısında, gemilerin birçok bölgesinde, dişli ve millerde, cıvata ve somunlarda, saat ve bilgisayar parçaları gibi birçok yapısal alanda kullanılmaktadır. Ayrıca, birçok uluslararası standart yapıştırıcıların bağlantıdaki performansının değerlendirilmesinde bu alüminyum alaşımının kullanılmasını tavsiye etmektedir (ASTM D1002, ISO 4587).

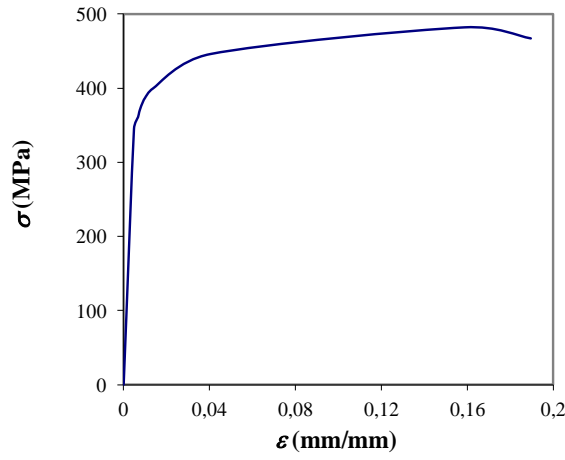
Yapıştırma bağlantılarının gerilme analizinde kullanılması için, AA2024-T3 alaşımından ASTM E8 standardına uygun Şekil 3.1’de verilen boyutlardaki numuneler hazırlanarak, çekme deneyi uygulanmasıyla gerilme çekme davranışları tespit edilir. Çalışmada kullanılan AA2024-T3 alaşımının mekanik özellikleri Akpınar (2013c) tarafından yapılan bir çalışmadan alınmıştır ve Çizelge 3.1’de mekanik özellikleri, Şekil 3.2’de de gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.1. AA2024 Alüminyum alaşımı için standart çekme numunesi (ASTM E8)

Çizelge 3.1. AA2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri (Akpınar 2013c)

Elastisite Modülü	72.4 GPa
Kayma Modülü	27.2 GPa
Poisson Oranı	0.33
Akma Dayanımı	345 MPa
Çekme Dayanımı	485 MPa

**Şekil 3.2.** AA2024 Alüminyum alaşımının gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Akpınar 2013c)

3.2. Çalışmada Kullanılan Yapıştırıcı

Yapılan çalışmada yapıştırıcı olarak çift bileşenli sıvı epoksi (DP460) kullanılmıştır. 3M™ DP460; epoksi (B) ve hızlandırıcı (A) nın hacimce B:A=2:1 oranında karışımıyla oluşan sıvı yapıştırıcıdır. Sıvı yapıştırıcılar, yapısal yapıştırma bağlantılarında oldukça sık kullanılırlar ve yüksek bağlantı dayanımı, düzgün gerilme dağılımı ve iyi boşluk doldurma gibi avantajlar sağlarlar. Metal, seramik, cam ve birçok kompozit malzemenin birleştirilmesinde kullanılır. DP460 farklı şartlarda kürleşebilmektedir. Bu yüzden yapıştırıcının 60°C sıcaklıkta 120 dakika bekletilerek elde edilen kürleşme şartı kullanılmıştır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan yapısal yapıştırıcı

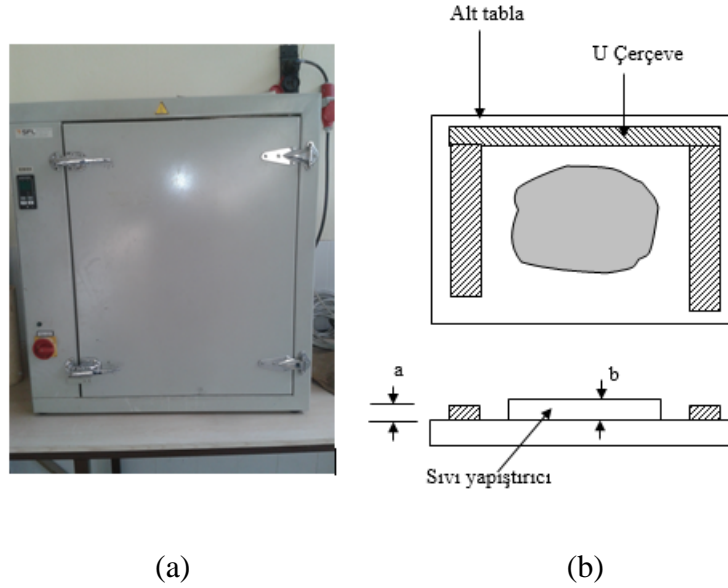
Yapıştırıcı	Bileşen	Kürleşme sıcaklığı/zaman
3M™ DP-460	Epoksi/Hızlandırıcı	60°C/120 dakika

3.3. Yapıştırıcının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Farklı yapıştırma bağlantılarında yapısal yapıştırıcıların akma ve kırılma kriterlerini dikkate alarak gerilme analizi yapabilmek için, yapıştırıcıların tek eksenli çekme ve kayma yükleri altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışını tespit etmek gerekir. Bu amaçla; yapıştırıcılardan bulk numuneler hazırlanarak çekme ve kayma yükü altındaki bağlantıların mekanik özellikleri tespit edilir.

3.3.1. Bulk numunelerin hazırlanması ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi

ISO 15166-1 standardında bulk numunelerin hazırlanmasıyla ilgili hususlar yer almaktadır. Bu standartta tek bileşenli ve iki bileşenli yapıştırıcılardan bulk numune hazırlanmasında uyulması gereken kurallar belirtilmiştir. Bu standart doğrultusunda iki bileşenli sıvı yapıştırıcı 3M™ DP 460'tan bulk numuneler hazırlanır. Bu amaçla belirli kalınlığa sahip iki levha ve bunlar arasına yapıştırıcı tabakasının kalınlığını ayarlamak amacıyla yerleştirilmiş çerçeveden oluşan kalıp kullanılır. 3M™ DP 460 sıvı yapıştırıcısı bu kalıp içerisine dökülerek ve kalıp üzerindeki bir levha yardımıyla basınç uygulanarak yapıştırıcı istenilen kalınlığa getirilir. Bu işlemden sonra bu kalıp, 60 °C deki bir fırında 120 dakika bekletilerek gerekli kürleşme şartları uygulanır. Böylece, 3M™ DP 460 bulk numunelerinin üretimi gerçekleştirilmiş olur (Şekil 3.3).

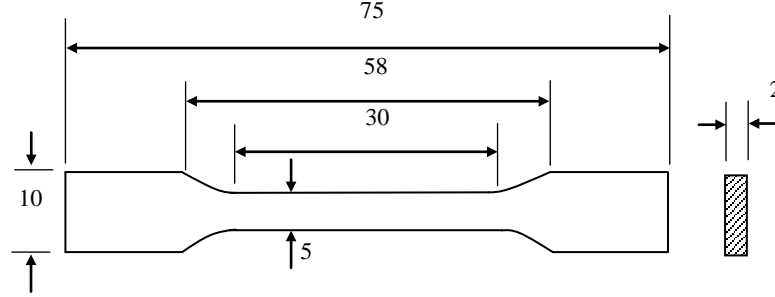


Şekil 3.3. a. Fırın, b. Yapıştırıcının kalıba yerleştirilmesi

Bulk numuneler aşağıda detayı verilen üretim prosedürü uygulanarak hazırlanır;

- Numune kalınlıklarını ayarlamak amacıyla kalınlığı 2 mm olan metal U çerçeve hazırlanarak, presin alt tablası üzerine yerleştirilir.
- Silikon yağlayıcı, presin alt ve üst tablaları ile U çerçeve üzerine püskürtülerek çok ince bir film tabaka oluşturulur. Böylece, bulk yapıştırıcı tabakalarının tablalar üzerine yapışması engellenir.
- Presin üst tablası, U çerçeve üzerine tam oturuncaya kadar basınç uygulanarak numunelerin istenilen kalınlığa gelmesi sağlanır. Böylece hem yapıştırıcının kürleşebilmesi için gereken basınç uygulanmış hem de hava kabarcıklarının oluşumu engellenir.
- Yapıştırıcıların kürleşmesi için gereken kürleşme şartı fırının kontrol paneli kullanılarak programlanır ve bulk numunelerin kürleşmesi sağlanır.

- Presten çıkarılan bulk yapıştırıcı tabakaları ISO 2818’de tanımlanan şartlara uygun olarak Şekil 3.4’te verilen plastikler için geliştirilmiş standart çekme numunesi boyutlarında kesilir.



Şekil 3.4. Standart çekme numunesi (ISO 527-2)

Yapıştırıcılardan elde edilen bulk tabakalar Şekil 3.4’de verilen numune boyutlarında kesilerek ve daha sonra 3 adet bulk numune nispi nem oranı $50\pm\%5$ ve sıcaklığı 22°C olan desikatör içinde deneyler yapılincaya kadar saklanır.

Yapıştırıcıların mekanik özellikleri, plastikler için geliştirilmiş standartlara uygun olarak hazırlanan numunelerin çekme cihazına bağlanıp tek eksenli çekme deneyi ile belirlenebilir.

Bulk numuneler üzerinde yapılacak deneylerde çalışılacak kuvvet aralığı düşüktür. Bu yüzden, çekme deneyleri bilgisayar kontrollü Shimadzu AG-I üniversal test cihazında 5 kN’luk bir yük hücresi kullanılarak yapılır. Hata oluşumunu engellemek için, numunelerin serbest uçları çekme cihazının çenelerine tutturulurken mümkün olduğunca eşit basınç uygulanmalıdır.

Yapıştırıcıların yüksek şekil değiştirme kabiliyetlerinden dolayı, mekanik özellikleri ve gerilme-şekil değiştirme diyagramının elde edilmesinde en uygun teknik, numuneyle temas halinde olmayan cihazların kullanıldığı tekniklerdir. Bu amaçla yapıştırıcılardan elde edilecek bulk numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde video extensometre kullanılır.

DP 460 için elde edilen numuneler 5 mm/dakika'lık şekil değiştirme hızında kopma gerçekleşinceye kadar, nispi nem oranı $50\pm\%5$ ve sıcaklığı 17°C olan bir ortamda test edilir. ISO 527-2 de elastisite modülünün 0.005-0.0025 arasındaki şekil değiştirme değerlerinde gerilme-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki noktaların birleştirilmesi ile oluşan hattan denklem (3.1) kullanılarak türetilbileceği belirtilir.

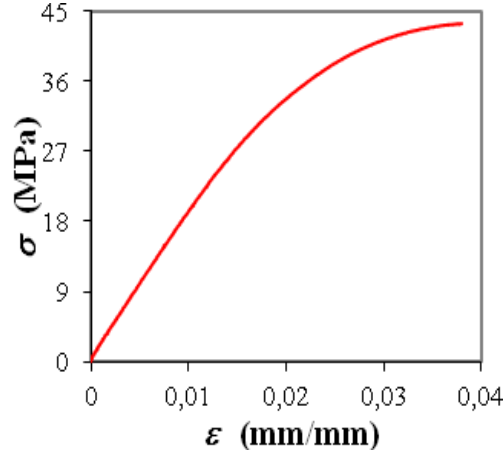
$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.1)$$

Diğer taraftan, bulk numuneler kullanılarak elde edilmesi gereken diğer mekanik özellik ise Poisson oranıdır. Bunun için hazırlanmış bulk numunelerde aynı yükleme şartlarında boyuna ve yanal şekil değişimlerinin belirlenmesi gerekir. Boyuna şekil değişimleri için çekme cihazının hareketli üst çenesinde meydana gelen yer değiştirme kullanılırken, yanal şekil değişimlerinin belirlenmesi için gerekli yanal daralmalar video ekstensometre kullanılarak ölçülür.

Çalışmada kullanılan DP 460 yapısal yapıştırıcısının mekanik özellikleri ve gerilme-şekil değiştirme diyagramı Akpınar (2013c) tarafından yapılan bir çalışmadan alınmıştır ve Çizelge 3.3 ve Şekil 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. DP 460 yapısal yapıştırıcısının mekanik özellikleri (Akpınar 2013c)

Elastisite Modülü	2077 (MPa)
Poisson Oranı	0.38
Çekme Dayanımı	44.6 (MPa)

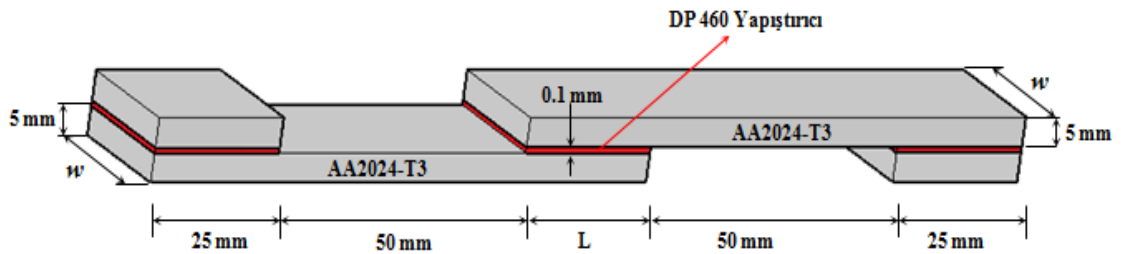


Şekil 3.5. DP 460 yapısal yapıştırıcısının gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Akpınar 2013c)

3.4. Bağlantı Numunelerinin Hazırlanması

3.4.1. Farklı genişlik ve bindirme uzunluğundaki bağlantı konfigürasyonları

Yapılan çalışmanın birinci kısmında; çekme yüküne maruz farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip AA2024-T3 alüminyum alaşımlarının, çift bileşenli DP460 yapısal yapıştırıcısıyla birleştirilmiş tek tesirli bağlantı konfigürasyonlarının mekanik davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Bu amaçla 8 ana grupta tek tesirli bağlantı numuneleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışmada kullanılan tek tesirli bağlantı geometrisi Şekil 3.6’da, deneysel parametreler ise Çizelge 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.6. Farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip bağlantı geometrisi

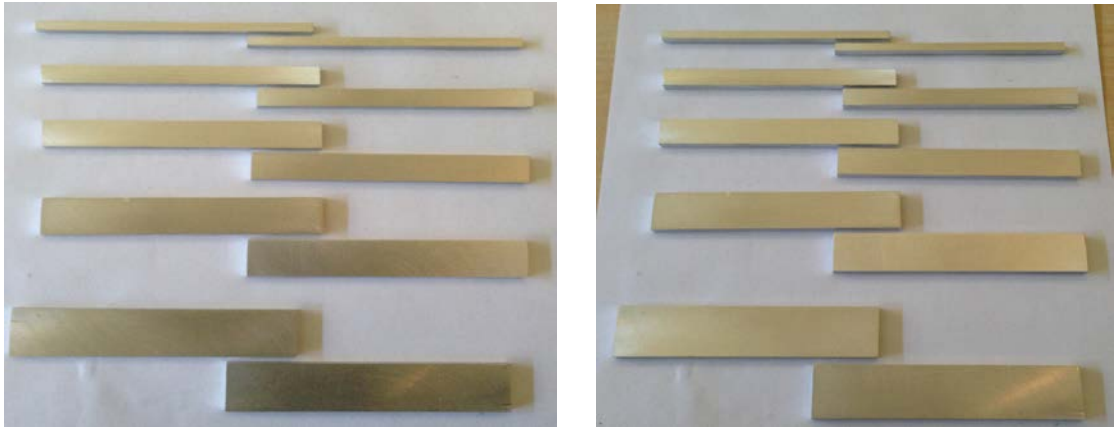
Çizelge 3.4. Genişlik-bindirme uzunluğu farklı bağlantılar için deneysel parametreler

Numune Tipi	W-L (Genişlik-Bindirme Uzunluğu)	Yapıştırma Alanı (mm ²)	Numune Tipi	W-L (Genişlik-Bindirme Uzunluğu)	Yapıştırma Alanı (mm ²)
Tip I a	25-25	625	Tip V a	25-15	375
Tip I b	20-25	500	Tip V b	20-15	300
Tip I c	15-25	375	Tip V c	15-15	225
Tip I d	10-25	250	Tip V d	10-15	150
Tip I e	5-25	125	Tip V e	5-15	75
Tip II a	25-25	625	Tip VI a	15-25	375
Tip II b	25-20	500	Tip VI b	15-20	300
Tip II c	25-15	375	Tip VI c	15-15	225
Tip II d	25-10	250	Tip VI d	15-10	150
Tip II e	25-5	125	Tip VI e	15-5	75
Tip III a	25-20	500	Tip VII a	25-10	250
Tip III b	20-20	400	Tip VII b	20-10	200
Tip III c	15-20	300	Tip VII c	15-10	150
Tip III d	10-20	200	Tip VII d	10-10	100
Tip III e	5-20	100	Tip VII e	5-10	50
Tip IV a	20-25	500	Tip VIII a	10-25	250
Tip IV b	20-20	400	Tip VIII b	10-20	200
Tip IV c	20-15	300	Tip VIII c	10-15	150
Tip IV d	20-10	200	Tip VIII d	10-10	100
Tip IV e	20-5	100	Tip VIII e	10-5	50

Yapıştırma bağlantıları için deney numuneleri hazırlanırken, numuneler tek tek yapıştırılarak yada bir bütün olarak alüminyum levhaların yapıştırıldıktan sonra kesilmesiyle hazırlanabilir. Ancak, mekanik kesme işlemleri sırasında oluşan aşırı ısı, yapıştırmanın yapıldığı bölgede bağlantı mukavemetini etkileyebilecek sorunlar oluşturur. Bu yüzden numunelerin tek tek hazırlanmasına karar verilmiş ve yapıştırma işleminde kullanılmak üzere AA2024-T3 levhalardan nümerik kontrollü tezgahlar kullanılarak Şekil 3.6 ve Çizelge 3.4'te verilen boyutlarda, her bir numuneden 3 adet olmak üzere toplamda 48 adet numune tasarlanmış ve üretilmiştir. Böylece yüzey hazırlama ve yapıştırma prosedürü öncesi işlemler tamamlanmıştır.

Yapıştırma bağlantılarının dayanımı, kullanılacak yüzey hazırlama metotlarına bağlıdır. Bu amaçla istenilen boyutlara getirilmiş alüminyum alaşımlarına yapıştırma işleminden önce aşağıda anlatılan yüzey hazırlama yöntemi uygulanmıştır.

- Deney numunelerinin üzerindeki yağ, gres, kir ve toz gibi atıkların temizlenmesi için, numuneler asetonla yıkanmış ve parçalardan aseton tamamıyla buharlaşınca kadar bekletilmiştir.
- Dağlama işlemlerinde kullanılan kromik asit solüsyonu hazırlanırken, önce 5 litrelik bir kaba 1-1,5 litre saf su konulur. Su karıştırılarak üzerine yavaşça 750 mililitre sülfürik asit eklenir. Karıştırma işlemine devam edilerek 375 gram sodyum dikromat ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) konur ve daha sonra kapta 5 litre çözelti oluncaya kadar üzerine saf su eklenmiştir.
- AA2024-T3 parçaları sıcaklığı 65°C olan çözelti içerisine daldırılıp 20 dakika bekletilmiştir.
- Çözeltiden çıkarılan parçalar, üzerinde asit kalıntılarının oluşumunu engellemek amacıyla, sırasıyla şebeke suyu ve saf su içerisinde çalkalanmıştır.
- Tüm numune parçaları 60°C sıcaklıktaki bir fırın içerisinde 30 dakika kurutulularak yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Yüzey hazırlama işlemi tamamlanmış numuneler

3.4.1.a. Farklı genişlik ve bindirme uzunluğundaki bağlantı numunelerinin hazırlanması

Yapıştırılan malzemenin konumunu koruyabilmesi, bağlantıda istenilen yapıştırıcı kalınlığının ayarlanabilmesi ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirme bölgesine düzgün bir basınç uygulanabilmesi için özel olarak tasarlanmış kalıpların kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla, yapılan çalışmada Şekil 3.8’de gösterilen kalıp kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Numunelerin üretilmesinde kullanılan kalıp

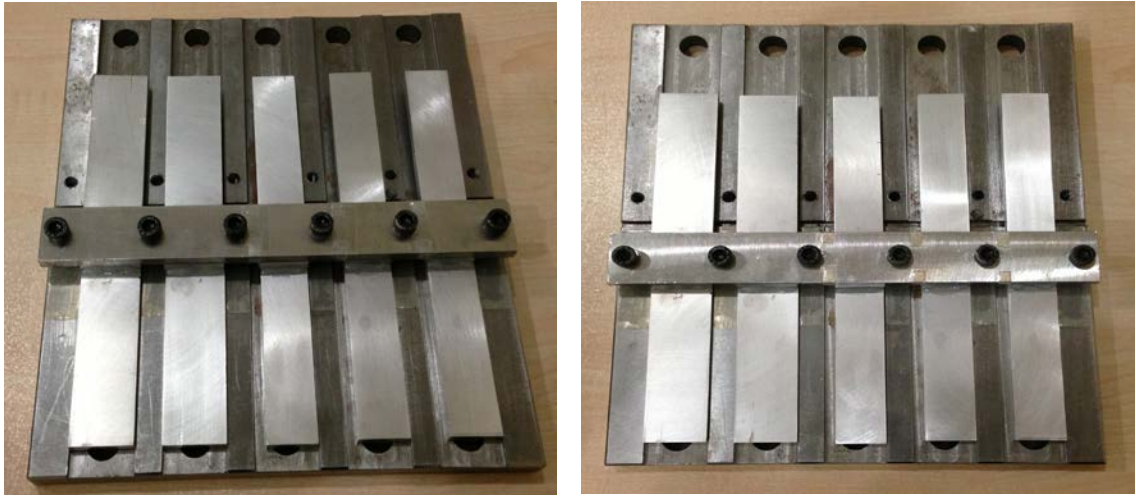
Şekil 3.8’de gösterilen kalıp kullanılarak çekme deneylerinde kullanılacak numuneler aşağıda anlatıldığı gibi hazırlanmıştır:

- Deney numunelerin kalıba yapışması engellemek ve kürleşme sonrası numunelerin kalıptan kolayca ayrılması sağlamak için silikon yağlayıcı sprej (3M Scotch™ 1600) kalıp üzerine püskürtülerek çok ince bir film tabaka oluşturulmuştur.
- Numunelerin bindirme bölgelerine DP460 sıvı yapıştırıcısı uygulanmış, bir master yardımıyla yapıştırılacak yüzeylere yayılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Deney numunelerine yapıştırıcı uygulanması

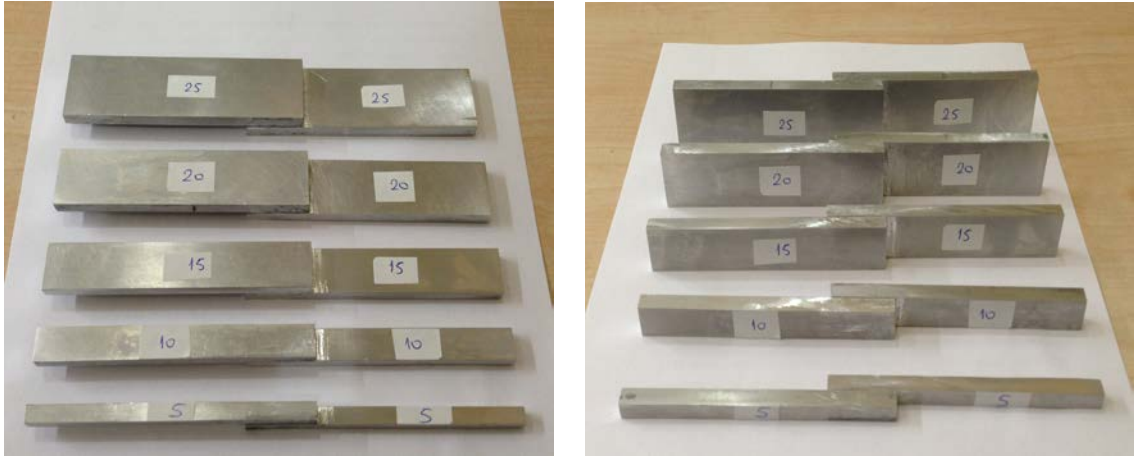
- Yapıştırıcıların k rleşmesi ve yapıştırıcı kalınlığının 0.10 mm olması için gerekli basınç mastar numuneler (metal shim) aracılığı ile sağlanmıştır.



Şekil 3.10. Numunelerin kalıba yerleştirilmesi

- Daha sonra numunelerin bulunduğu kalıp ısıl işlem fırınına yerleştirilmiştir.
- Yapıştırıcı için verilen kürleşme şartları, ısıl işlem fırınının kontrol paneli kullanılarak programlanmış ve numunelerin k rleşmesi sağlanmıştır.

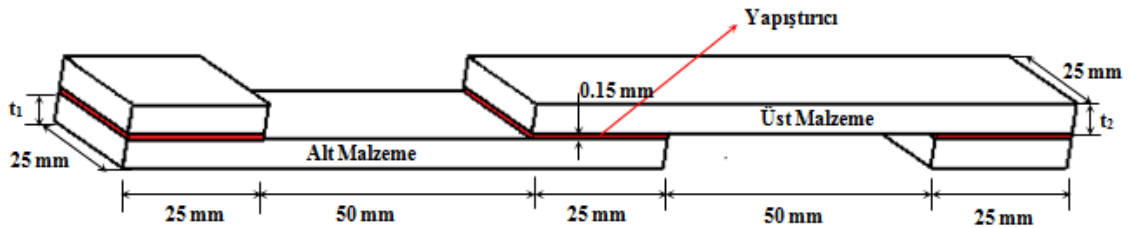
- Kürleşme işlemi sonrası ısıtıl işlem fırınından çıkarılan numunelerin soğuması beklenmiş ve soğuyan numuneler kalıp içerisinden çıkarılarak kürleşme esnasında dışarı taşan yapıştırıcı kısımları temizlenerek yapıştırma işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Kürleşme işlemi sonrası tek tesirli bağlantı numuneleri

3.4.2. Farklı kalınlıklara sahip bağlantı konfigürasyonları

Yapılan çalışmanın ikinci kısmında; çekme yüküne maruz alt ve üst malzeme aynı kalınlığa sahip olup beş farklı kalınlık (8-8, 6.4-6.4, 4.8-4.8, 3.2-3.2 ve 1.6-1.6) ve alt malzeme kalınlığı sabit olmak üzere üst malzeme kalınlığı beş farklı kalınlığa (8, 6.4, 4.8, 3.2, 1.6) sahip iki farklı tipte tek tesirli bağlantı konfigürasyonları tasarlanıp üretilerek, bağlantıların mekanik davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan tek tesirli bağlantı geometrisi Şekil 3.12’de, deneysel parametreler ise Çizelge 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.12. Farklı kalınlıklara sahip tek tesirli bağlantı geometrisi

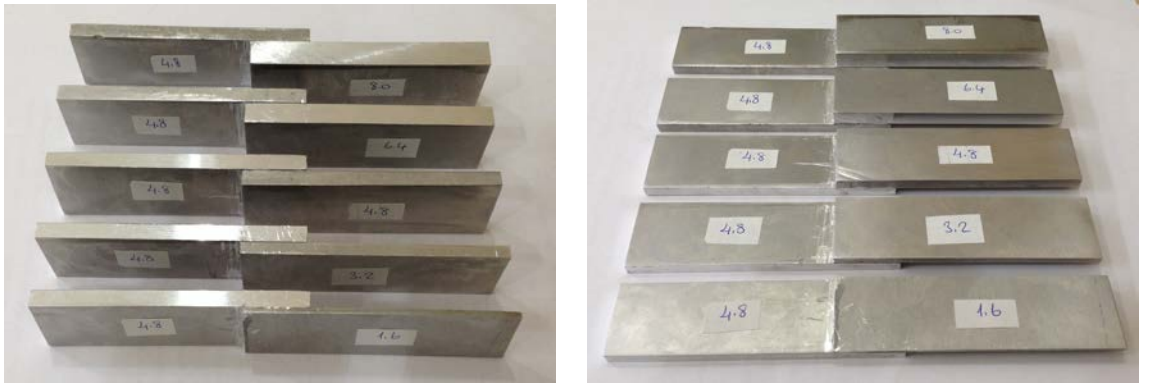
Çizelge 3.5 Farklı kalınlıklara sahip bağlantılar için deneysel parametreler

Numune Tipi	t_1-t_2 (Kalınlık)
Tip I a	8.0-8.0
Tip I b	6.4-6.4
Tip I c	4.8-4.8
Tip I d	3.2-3.2
Tip I e	1.6-1.6
Tip II a	4.8-8.0
Tip II b	4.8-6.4
Tip II c	4.8-4.8
Tip II d	4.8-3.2
Tip II e	4.8-1.6

3.4.2.a. Farklı kalınlıklara sahip bağlantı numunelerinin hazırlanması

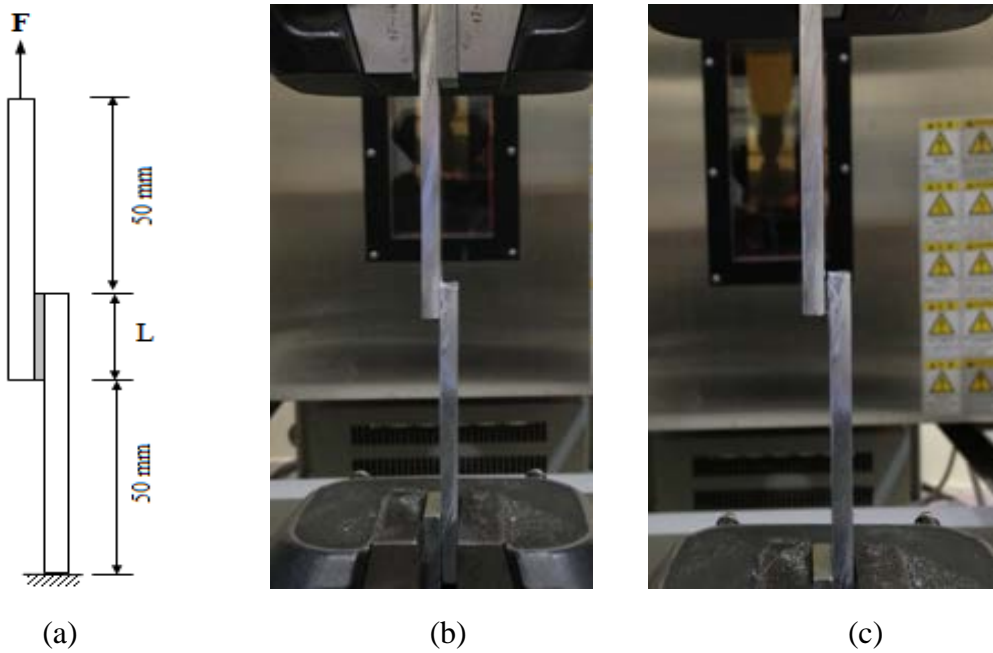
Çalışmada yapıştırılan malzeme olarak kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemesi nümerik kontrollü tezgahlar kullanılarak Şekil 3.12’de ve Çizelge 3.5’te verilen boyutlarda işlenerek, her birinden 3 adet olmak üzere üretilmiştir (Şekil 3.13).

İstenilen boyutlara getirilmiş alüminyum alaşımlarına yapıştırma işleminden önce uygulanan yüzey işlemleri ve yapıştırma işlemi prosedürü Bölüm 3.4.1.a’da anlatılan prosedürle aynıdır.

**Şekil 3.13.** Farklı kalınlıklara sahip tek tesirli bağlantı numuneleri

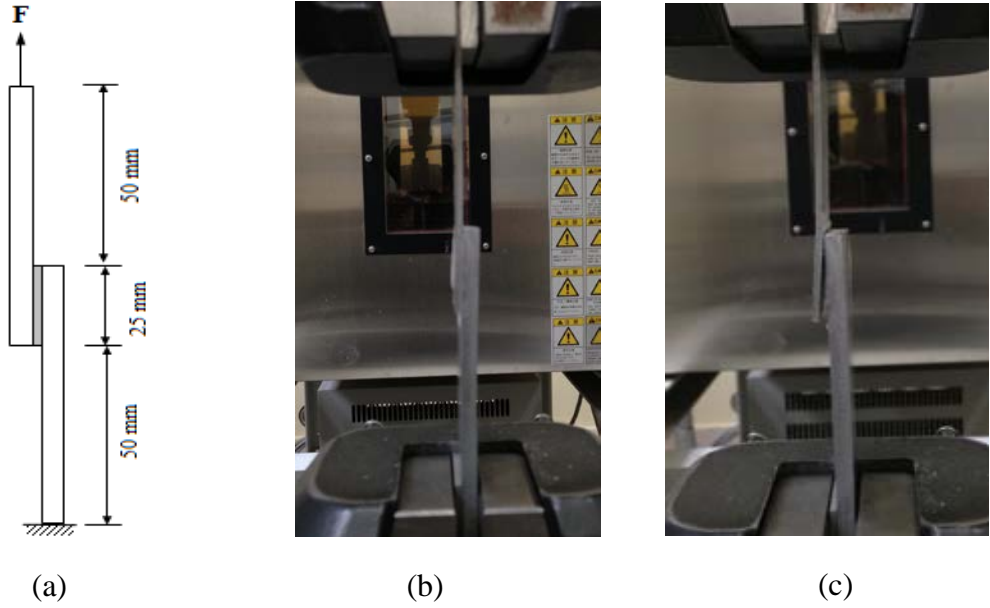
3.5. Tek Tesirli Bağlantı Tiplerinde Hasar Yükünün Belirlenmesi

Tek tesirli bağlantı numunelerinin çekme testi bilgisayar kontrollü Shimadzu AG-I üniversal çekme cihazında 17°C ve %30 nem oranında 1 mm/dak'lık çekme hızında yapılmıştır. Sınır şartları ve numunelere uygulanan kuvvetler Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.14. Farklı genişlik-bindirme uzunluğundaki bağlantılarda sınır şartları ve kuvvet:

*a. Çekme deneyinde kullanılan sınır şartları ve yükler, b. Yükleme durumu, c. Bağlantının kopması



Şekil 3.15. Farklı kalınlıktaki tek tesirli bindirme bağlantısında sınır şartları ve kuvvet:
*a. Çekme deneyinde kullanılan sınır şartları ve yükler, b. Yükleme durumu, c. Bağlantının kopması

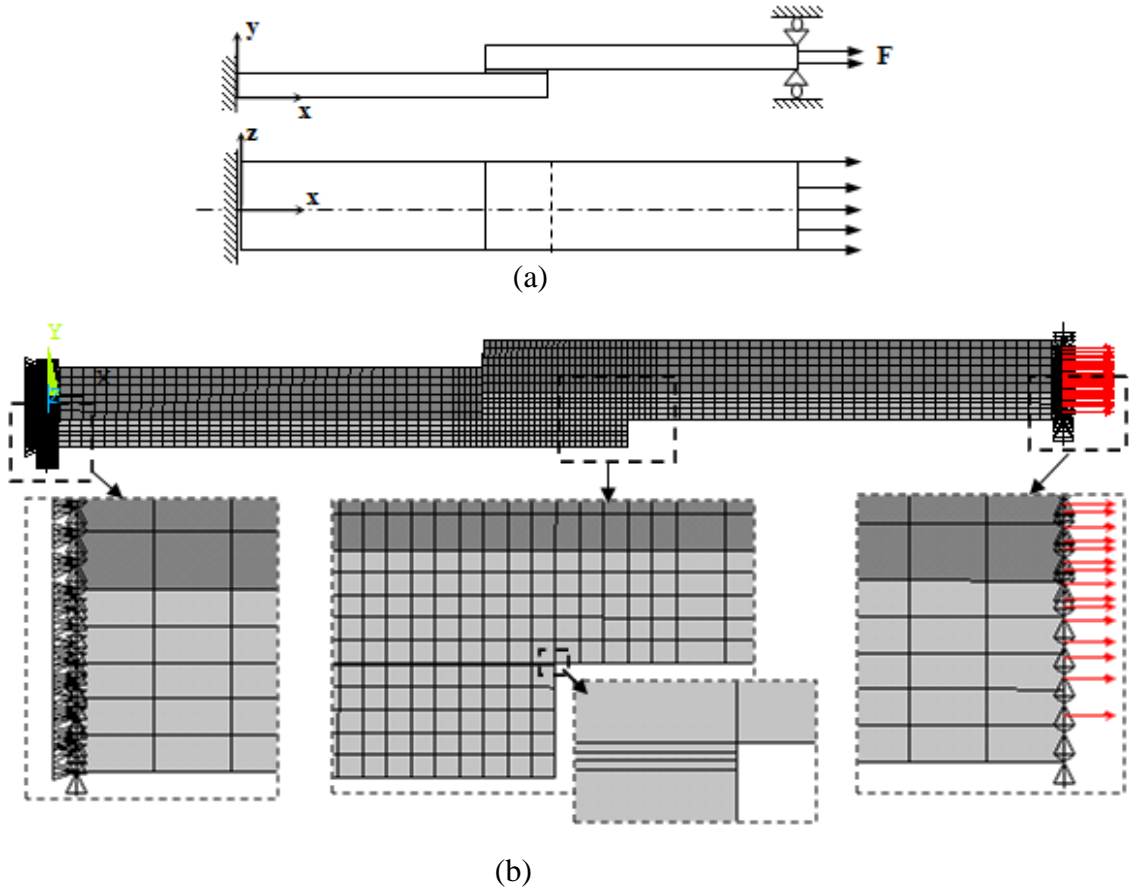
Deneyle yapıılırken her numune yakından gözlemlenmiş ve hasar sonrası hasar bölgesi incelenmiştir. Aynı zamanda, numunelerin taşıyabildikleri maksimum yük ve hasar tipi kaydedilmiştir. Ayrıca her bağlantı konfigürasyonu için kuvvet-yer değiştirme ($F-\Delta L$) eğrileri elde edilmiştir.

3.6. Nümerik Analiz

3.6.1. Elasto-plastik sonlu eleman analizleri

Elasto-plastik sonlu eleman analizlerinde, deneysel çalışmalarda kullanılan yapıştırıcı (3M™ DP460) ile birleştirilmiş, 8 farklı tipte genişlik-uzunluğa sahip (Tip-I, II, III, IV, V, VI, VII, VII) bağlantı numuneleri ile farklı kalınlıklardaki 2 farklı tip (Tip-I,II) bağlantı numune konfigürasyonları çekme yükü altında, Multilinear Isotropic Hardening-von Mises plasticity (MISO) malzeme modeline göre ANSYS 12 paket programı kullanılarak, düzlem şekil değiştirme kabulüne göre 3 boyutlu modellenmiştir.

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan numune boyutları, yükleme ve sınır şartları deneysel çalışmalarda kullanılanlarla aynıdır. Üç boyutlu analizlerde, yapıştırma bağlantısı üç serbestlik derecesi ve 20 düğüm noktasına sahip elemanlar (Solid 186) kullanılarak modellenmiştir. Gerilme dağılımları açısından kritik olan yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bindirme bölgesi daha küçük elemanlara bölünmüştür (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Üç boyutlu sonlu eleman modeli ve uygulanan sınır şartları:

*a. Sınır şartları, b. Mesh detayı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Çekme Yüküne Maruz Numunelerden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

Yapılan çalışmada yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bağlantı geometrisinde, malzeme genişliği-bindirme uzunluğu ve kalınlığının etkisi incelenmiştir. Bu bölümde ilk olarak farklı genişlik ve bindirme uzunluğuna sahip numunelerden elde edilen deneysel sonuçlar, daha sonra farklı kalınlıklara sahip numunelerden elde edilen deneysel sonuçlar iki farklı başlık altında toplanarak verilmiştir.

4.1.1. Farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip numunelerden elde edilen deneysel sonuçlar

Farklı genişlik ve bindirme uzunluğuna sahip numunelerden üçer adet test edilmiş ve kuvvet-yer değiştirme, elde edilen maksimum hasar yükü ile her numunede oluşan hasar tipleri verilmiştir. Farklı genişlik ve bindirme uzunluğuna sahip 8 farklı tek tesirli bağlantı tipi için deneysel sonuçlar, aynı yapıştırma alanına sahip bağlantıları aynı başlıklar altında toplanıp ve karşılaştırılarak verilmiştir.

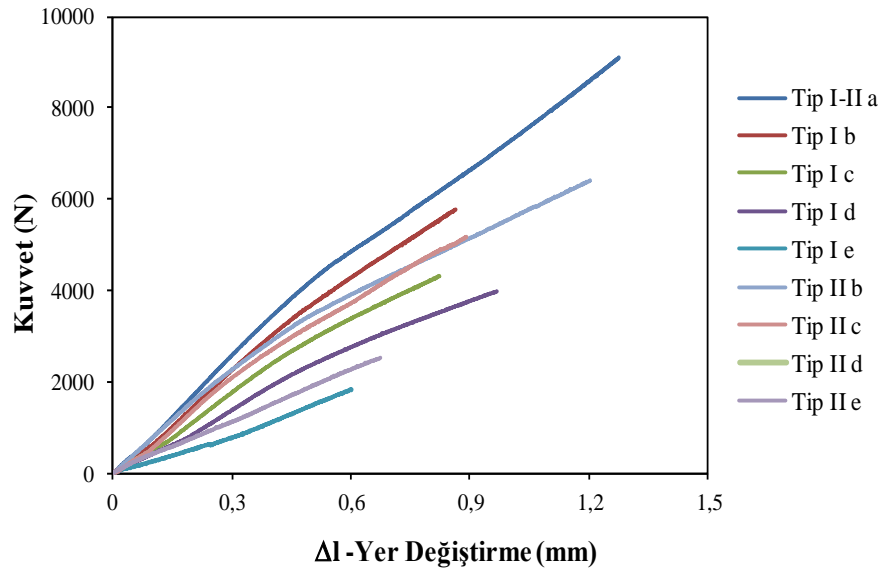
4.1.1.a. Tip-I ve Tip-II bağlantı konfigürasyonlarından elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

Aynı yapışma alanına ve farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip Tip-I ve Tip-II tek tesirli bağlantı numune konfigürasyonlarından üçer adet test edilmiş ve hasar yükleri, yer değiştirmeleri ve hasar tipleri Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.1'de grafiksel olarak verilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi, karmaşıklığa yol açmamak için sadece bir adet numunenin (ortalama hasar yüküne en yakın deney numunesinin) çekme deneyi sonrasında elde edilen verileriyle oluşturulmuştur.

Çizelge 4.1. Tip-I ve Tip-II bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar

Numune No	F (N)	ΔL (mm)	Hasar Tipi	Numune No	F (N)	ΔL (mm)	Hasar Tipi
Tip-I a (1)	9106	1,236	Ö.K.H	Tip-II a (1)	9106	1,236	Ö.K.H
Tip-I a (2)	9010	1,245	Ö.K.H	Tip-II a (2)	9010	1,245	Ö.K.H
Tip-I a (3)	9166	1,230	K.H	Tip-II a (3)	9166	1,230	K.H.
Tip I a Ortalama	9094	1,237		Tip II a Ortalama	9094	1,237	
Tip-I b (1)	4909	0,685	K.H	Tip-II b (1)	6258	1,136	Ö.K.H
Tip-I b (2)	5440	0,796	K.H	Tip-II b (2)	6315	1,248	Ö.K.H
Tip-I b (3)	5796	0,892	K.H	Tip-II b (3)	6522	1,222	Ö.K.H
Tip I b Ortalama	5381	0,791		Tip II b Ortalama	6390	1,202	
Tip-I c (1)	4125	0,698	K.H	Tip-II c (1)	5028	1,108	Ö.K.H
Tip-I c (2)	4271	0,728	K.H	Tip-II c (2)	5303	1,073	Ö.K.H
Tip-I c (3)	4537	0,776	K.H	Tip-II c (3)	5200	1,113	Ö.K.H
Tip I c Ortalama	4311	0,734		Tip II c Ortalama	5177	1,098	
Tip-I d (1)	4662	0,965	Ö.K.H	Tip-II d (1)	5187	1,103	Ö.K.H
Tip-I d (2)	3900	0,970	Ö.K.H	Tip-II d (2)	4865	0,975	Ö.K.H
Tip-I d (3)	3518	0,963	Ö.K.H	Tip-II d (3)	5075	1,018	K.H.
Tip I d Ortalama	3980	0,966		Tip II d Ortalama	5039	1,032	
Tip-I e (1)	1809	0,622	Ö.K.H	Tip-II e (1)	2430	0,635	K.H
Tip-I e (2)	1765	0,538	K.H	Tip-II e (2)	2590	0,692	K.H
Tip-I e (3)	1907	0,643	Ö.K.H	Tip-II e (3)	2503	0,689	K.H
Tip I e Ortalama	1827	0,601		Tip II e Ortalama	2507	0,672	

F: Hasar Yüğü, **ΔL :** Yer Değişirme, **K.H:** Kohesif Hasar, **Ö.K.H:** Özel Kohesif Hasar

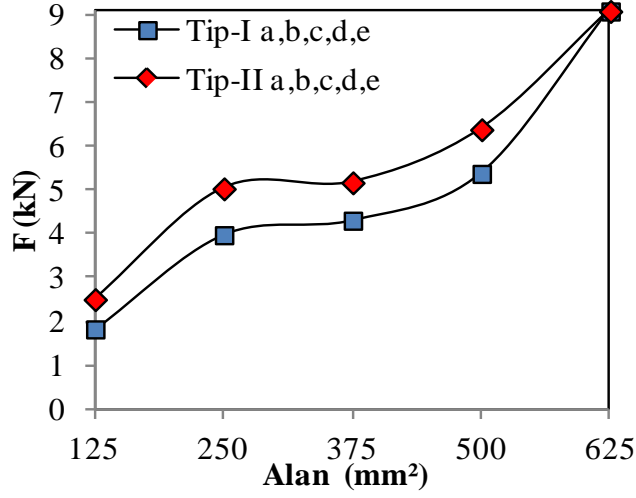
**Şekil 4.1.** Tip-I ve Tip-II bağlantılarına ait kuvvet-yer değişirme grafiği

Aynı yapıştırma alanına sahip, bindirme uzunluğu sabit olup ($L=25$ mm) genişliği azalan Tip-I ile genişliği sabit olup ($W=25$) bindirme uzunluğu azalan Tip-II bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar incelendiğinde (Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1), her iki bağlantı tipinde de yapışma alanının artması bağlantının yük taşıma ve yer değiştirme kapasitesini artırdığı görülmektedir.

Bindirme uzunluğu sabit ($L=25$ mm) tutulup, genişliğin azalması ile elde edilen bağlantı tipi incelendiğinde (Tip-I), genişliğin azalması ile bağlantının hasar yükündeki azalma oranı aynı olmayıp, genişlik %20'lik sabit oranlarla 25 mm'den sırasıyla 20,15,10 ve 5 mm düşmesi bağlantıda meydana gelen hasar yükünü yaklaşık sırasıyla %40, %52, %56 ve %80 düşürmektedir.

Genişliğin sabit ($L=25$ mm) tutulup, bindirme uzunluğunun azalması ile elde edilen bağlantı tipi incelendiğinde (Tip-II), bindirme uzunluğunun azalması ile bağlantının hasar yükündeki azalma oranı aynı olmayıp, genişlik %20'lik sabit oranlarla 25 mm'den sırasıyla 20,15,10 ve 5 mm'ye düşmesi bağlantıda meydana gelen hasar yükünü yaklaşık sırasıyla %30, %43, %45 ve %72 oranında düşürmektedir.

Tip-I ve Tip-II tek tesirli bağlantı konfigürasyonları aynı alana sahiptir ve aynı alanda karşılaştırıldığında; Tip-I b' ye göre Tip-II b yaklaşık %19, Tip-I c'ye göre Tip-II c yaklaşık %20, Tip-I d'ye göre Tip-II d yaklaşık %26 ve Tip-I e'ye göre Tip-II e yaklaşık %37 daha fazla yük taşımıştır (Şekil 4.2). Aynı yapışma alanına sahip bu bağlantı tiplerinin sonuçları, malzemenin genişliğinin artırılması bağlantının hasar yükünü daha fazla etkilediğini göstermektedir.



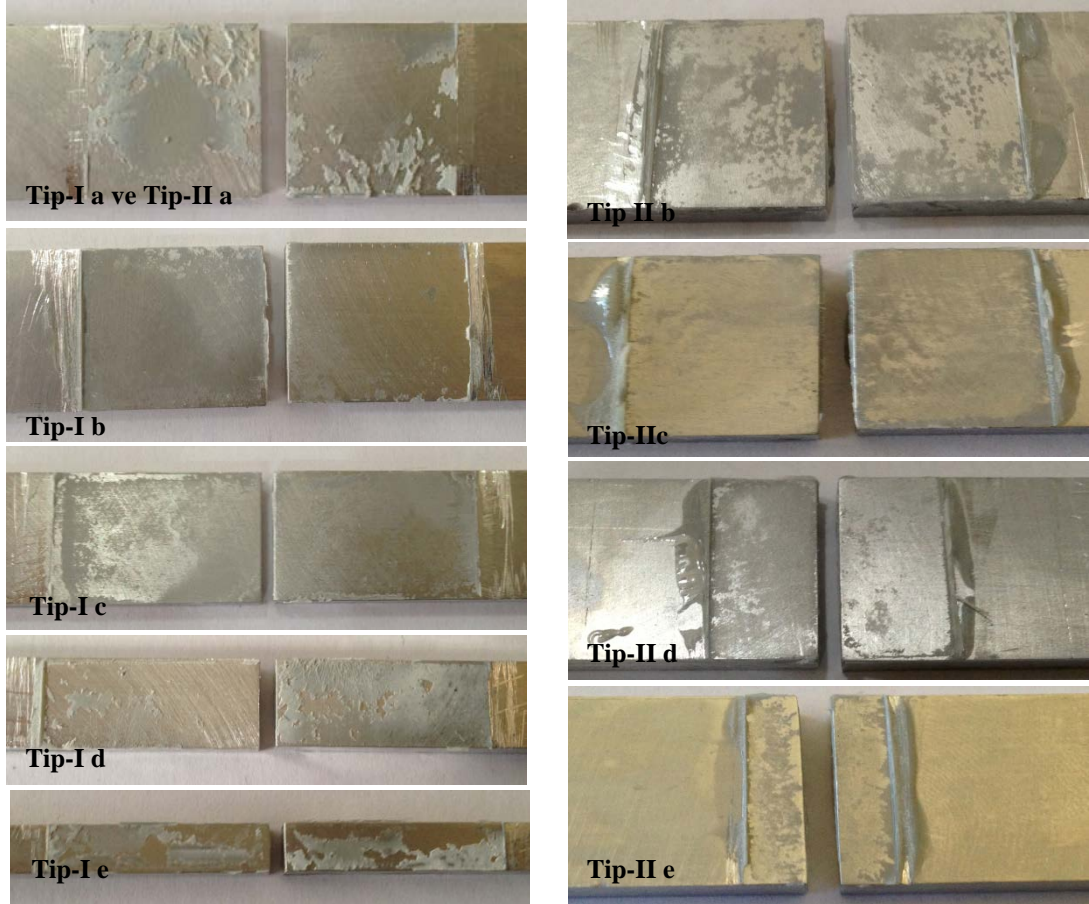
Şekil 4.2. Tip-I ve Tip-II bağlantılarının aynı yapıştırma alanında karşılaştırılması

Çizelge 4.1’de verilen maksimum hasar yükleri ile ve Şekil 4.2’de verilen grafik birlikte incelendiğinde, aynı yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında, bindirme uzunluğunun artırılması bağlantının yük taşıma ve yer değiştirme kapasitesini artırdığı görülmektedir. Ancak bindirme uzunluğundan ziyade malzemenin genişliğinin artırılması bağlantının yük taşıma ve yer değiştirme kapasitesini daha fazla artırdığı anlaşılmaktadır.

Çekme yüküne maruz Tip-I ve Tip-II tek tesirli bağlantı konfigürasyonlarında kullanılan malzemelerde, bindirme uzunluğunun 25 ve 20 mm olduğu bağlantı tiplerinde (Tip-I a ve Tip-II a) plastik deformasyon yapıştırma bölgesinin serbest uçlarında soyulma gerilmelerinin etkisiyle çok az miktarda oluşmuştur. Bindirme uzunluğunun kısa olduğu olduğu bağlantı tiplerinde malzemelerde plastik deformasyon gözlemlenmemiştir. Hasar bağlantıların serbest uçlarında başlamış ve bağlantı kopuncaya kadar devam etmiştir.

ISO 10365’te tanımlanan hasar tipleri göz önünde bulundurularak, numunelerin hasar yüzeyleri incelenirse; numune yüzeylerinde kohesiv hasar ve özel kohesiv hasar tipi meydana geldiği söylenebilir (Şekil 4.3 ve Çizelge 4.1). Şekil 4.3 ve Çizelge 4.1 incelenirse; Tip-I b,c ve Tip-II e’de her iki numune yüzeyinde de eşit kalınlıkta yapıştırıcı kaldığı yani kohesiv hasar tipi meydana geldiği, Tip-I a,d,e, Tip-II b, c, d

bağlantı konfigürasyonlarında ise numune yüzeylerinde kalan yapıştırıcı eşit miktarda olmayıp özel kohesif hasar tipi oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.3. Tip-I ve Tip-II bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri

4.1.1.b. Tip-III ve Tip-IV bağlantı konfigürasyonlarından elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

Aynı yapışma alanına (sırasıyla 500, 400, 300, 200, 100 mm²) ve farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip Tip-III ve Tip-IV tek tesirli bağlantı numune konfigürasyonlarından üçer adet test edilmiş; hasar yükleri, yer değiştirmeleri ve hasar tipleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.4'te verilmiştir. Tip-III ve Tip-IV bağlantı konfigürasyonları içinde yer alan bazı numune tipleri diğer bağlantı tipleri içinde de yer almaktadır (Örneğin; Tip-I b ve Tip-IV a numuneleri aynı bağlantı numunesidir). Tekrar

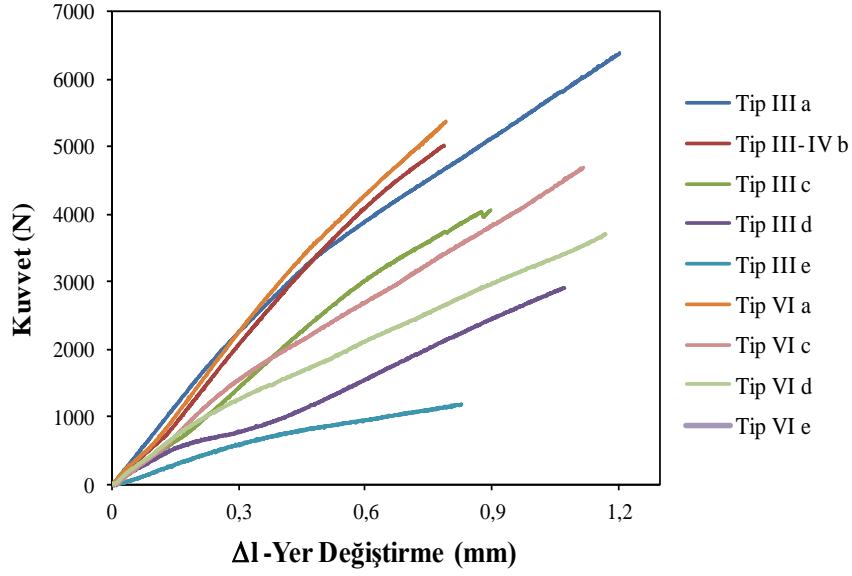
eden bu deney numuneleri karşılaştırma ve daha anlaşılır bir şekilde değerlendirme yapmak için çizelge ve şekillerde tekrarlanmıştır.

Çizelge 4.2. Tip-III ve Tip-IV bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar

Numune No	F (N)	ΔL (mm)	Hasar Tipi
Tip-III a (1)	6258	1,136	Ö.K.H
Tip-III a (2)	6315	1,248	Ö.K.H
Tip-III a (3)	6522	1,222	Ö.K.H
Tip-III a Ortalama	6390	1,202	
Tip-III b (1)	4968	1,178	Ö.K.H
Tip-III b (2)	4985	1,218	Ö.K.H
Tip-III b (3)	5065	1,183	K.H
Tip-III b Ortalama	5006	1,193	
Tip-III c (1)	4034	0,896	Ö.K.H
Tip-III c (2)	3946	0,765	Ö.K.H
Tip-III c (3)	4165	1,036	Ö.K.H
Tip-III c Ortalama	4048	0,899	
Tip-III d (1)	2875	0,988	K.H
Tip-III d (2)	2931	1,080	K.H
Tip-III d (3)	2905	1,151	K.H
Tip-III d Ortalama	2903	1,073	
Tip-III e (1)	1390	0,896	K.H.
Tip-III e (2)	1308	0,851	Ö.K.H
Tip-III e (3)	1415	0,965	Ö.K.H
Tip-III e Ortalama	1371	0,904	

Numune No	F (N)	ΔL (mm)	Hasar Tipi
Tip-IV a (1)	4909	0,685	K.H
Tip-IV a (2)	5440	0,796	K.H
Tip-IV a (3)	5796	0,892	K.H
Tip-IV a Ortalama	5381	0,791	
Tip-IV b (1)	4968	1,178	Ö.K.H
Tip-IV b (2)	4985	1,218	Ö.K.H
Tip-IV b (3)	5065	1,183	K.H
Tip-IV b Ortalama	5006	1,193	
Tip-IV c (1)	4755	1,043	Ö.K.H
Tip-IV c (2)	4545	0,986	Ö.K.H
Tip-IV c (3)	4776	1,046	Ö.K.H
Tip-IV c Ortalama	4692	1,025	
Tip-IV d (1)	3710	1,215	K.H.
Tip-IV d (2)	3668	1,203	K.H
Tip-IV d (3)	3750	1,260	Ö.K.H
Tip-IV d Ortalama	3709	1,226	
Tip-IV e (1)	1980	0,980	Ö.K.H
Tip-IV e (2)	2110	1,103	Ö.K.H
Tip-IV e (3)	2075	1,118	Ö.K.H
Tip-IV e Ortalama	2055	1,067	

F: Hasar Yüğü, **ΔL :** Yer Değişirme, **K.H:** Kohesif Hasar, **Ö.K.H:** Özel Kohesif Hasar



Şekil 4.4. Tip-III ve Tip-IV bağlantılarına ait kuvvet-yer değiştirme grafiği

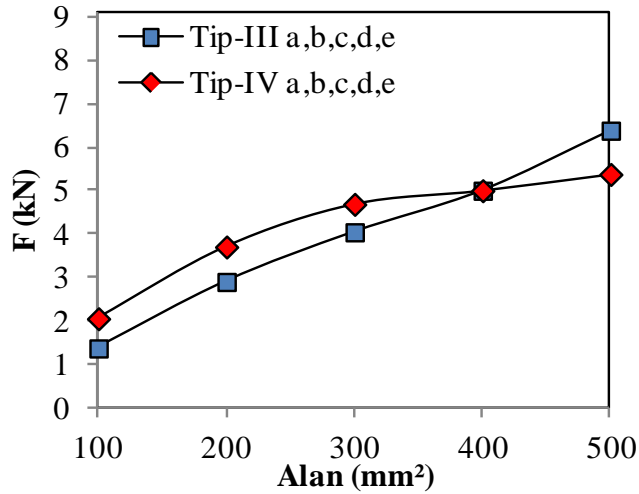
Aynı yapıştırma alanına sahip, bindirme uzunluğu sabit olup ($L=20$ mm) genişliği azalan Tip-III ile genişliği sabit olup ($W=20$) bindirme uzunluğu azalan Tip-IV bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar incelendiğinde (Çizelge 4.2 ve Şekil 4.4), her iki bağlantı tipinde de yapışma alanının artması bağlantının yük taşıma kapasitesini artırdığı görülmektedir.

Bindirme uzunluğu sabit ($L=20$ mm) genişliği azalan Tip-III bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar incelendiğinde; yapışma alanındaki %20 oranındaki azalma, bağlantının yük taşıma kapasitesini aynı oranda azaltmayıp sırasıyla %22, %37, %54 ve %79 oranında azalttığı görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde; genişliğin 25 mm'den 20 mm'ye düşmesi yapışma alanındaki azalma miktarı ile orantılı olarak bağlantının hasar yükünü de azaltmaktadır. Ancak Tip-III d ve e bağlantıları incelenirse, genişliğin 10 mm'den 5 mm'ye düşmesi bağlantının hasar yükünü önemli miktarda azaltmıştır. Bu sonuçta malzemenin genişliğinin etkisi daha belirgin bir şekilde görülmektedir.

Genişliği sabit ($L=20$ mm) bindirme uzunluğu azalan Tip-IV bağlantı konfigürasyonlarına ait sonuçlarda ise; yapışma alanındaki %20 oranındaki azalma,

bağlantının yük taşıma kapasitesini sırasıyla yaklaşık %6, %12, %31 ve %61 oranında azalttığı görülmektedir. Bindirme uzunluğunun 25 mm'den 20 mm'ye düştüğü Tip IV-b bağlantısında hasar yükündeki azalma miktarı %6 iken, bindirme uzunluğunun 10 mm'den 5 mm'ye düştüğü Tip-IV e bağlantısında %44 oranındadır. Buradan bindirme uzunluğunun hasar yüküne etkisinin bindirme uzunluğunun daha küçük değerlerinde daha etkili olduğu sonucu çıkarılabilir.

Aynı yapışma alanına sahip Tip-III ve Tip-IV bağlantı konfigürasyonları aynı yapışma alanında karşılaştırıldığında; Tip-IV a'ye göre Tip-III a yaklaşık %19, Tip III-c'ye göre Tip-IV c %16, Tip III-d'ye göre Tip-IV d %28 ve Tip-III e'ye göre Tip-IV e %50 daha fazla yük taşımıştır (Şekil 4.5).

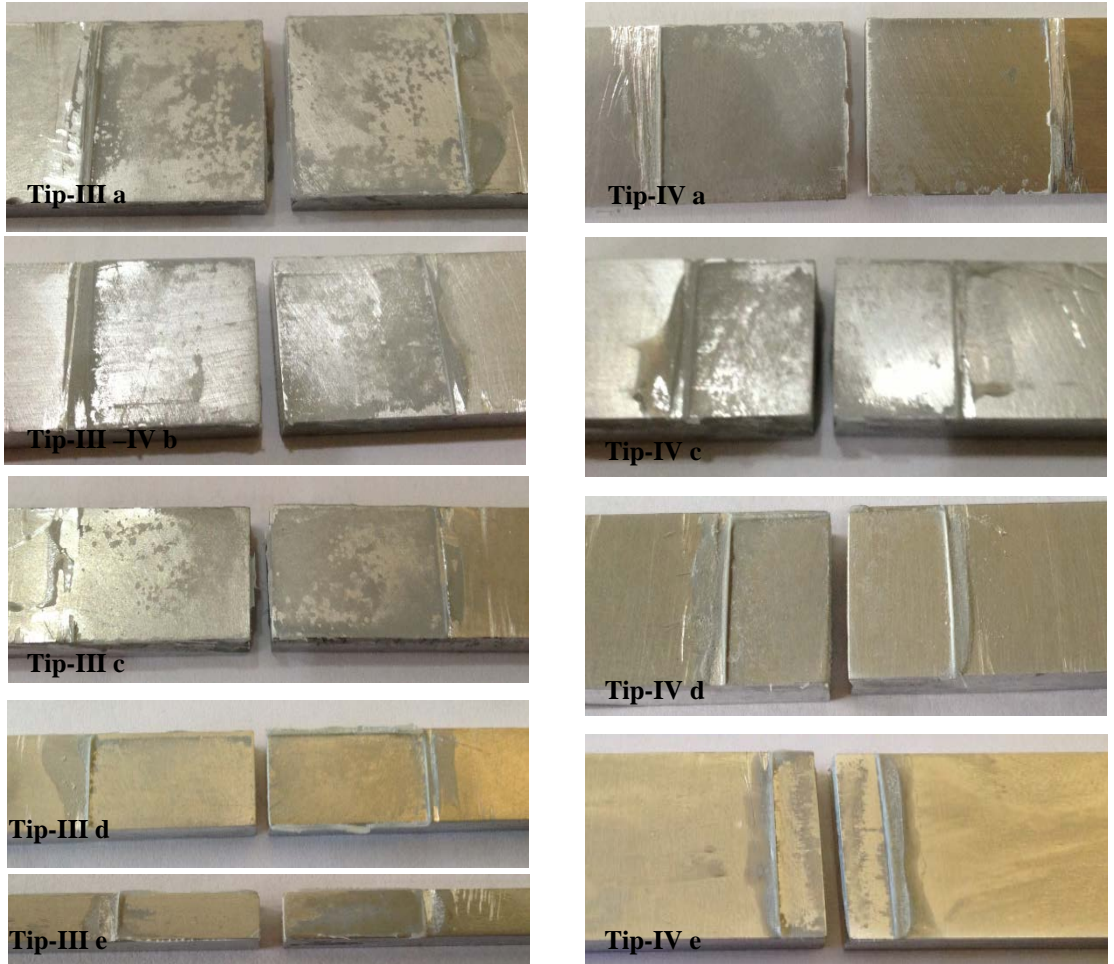


Şekil 4.5. Tip-III ve Tip-IV bağlantılarının aynı yapışma alanında karşılaştırılması

Çizelge 4.2'de verilen hasar yükleri ile ve Şekil 4.5'de verilen grafik birlikte incelendiğinde, aynı yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında, bindirme uzunluğunun artırılması ziyade malzemenin genişliğinin artırılması bağlantının yük taşıma ve yer değiştirme kapasitesini daha fazla artırdığı anlaşılmaktadır.

Çekme yüküne maruz Tip-III ve Tip-IV tek tesirli bindirme bağlantılarında kullanılan malzemelerde plastik deformasyon gözlemlenmemiştir. Hasar bağlantıların serbest uçlarında başlamış ve bağlantı kopuncaya kadar devam etmiştir.

ISO 10365’te tanımlanan hasar tipleri göz önünde bulundurularak, tek tesirli bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri incelenirse numune yüzeylerinde kohesiv hasar ve özel kohesiv hasar tipi meydana geldiği söylenebilir (Şekil 4.6 ve Çizelge 4.2). Şekil 4.6 ve Çizelge 4.2 incelenirse; Tip-III a,b,c,e ve Tip-IV b,c,e’de özel kohesiv, Tip-III d ve Tip-IV a ve d’de kohesiv hasar tipi meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 4.6. Tip-III ve Tip-IV bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri

4.1.1.c. Tip-V ve Tip-VI bağlantı konfigürasyonlarından elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

Aynı yapışma alanına (sırasıyla 375, 300, 225, 150, 750 mm²) ve farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip Tip-V ve Tip-VI tek tesirli bağlantı numune konfigürasyonlarından üçer adet test edilmiş; hasar yükleri, yer değiştirmeleri ve hasar tipleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7’te verilmiştir. Tip-V ve VI tek tesirli bindirme bağlantı numuneleri içerisinde de, diğer bağlantı tipleri içinde kullanılan numuneler karşılaştırma ve daha anlaşılır bir şekilde değerlendirme yapmak için tekrarlanmıştır.

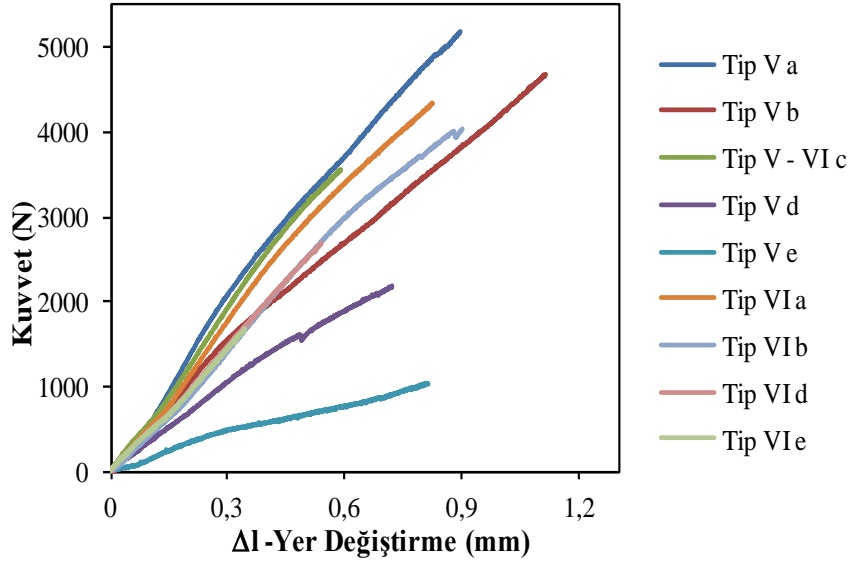
Çizelge 4.3 Tip-V ve Tip-VI bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar

Numune No	F (N)	ΔL (mm)	Hasar Tipi	Numune No	F (N)	ΔL (mm)	Hasar Tipi
Tip-V a (1)	5028	1,108	Ö.K.H	Tip-VI a (1)	4125	0,698	K.H
Tip-V a (2)	5303	1,073	Ö.K.H	Tip-VI a (2)	4271	0,728	K.H
Tip-V a (3)	5200	1,113	Ö.K.H	Tip-VI a (3)	4537	0,776	K.H
Tip-V a Ortalama	5177	1,098		Tip-VI a Ortalama	4311	0,734	
Tip-V b (1)	4755	1,043	Ö.K.H	Tip-VI b (1)	4034	0,896	Ö.K.H
Tip-V b (2)	4545	0,986	Ö.K.H	Tip-VI b (2)	3946	0,765	Ö.K.H
Tip-V b (3)	4776	1,046	Ö.K.H	Tip-VI b (3)	4165	1,036	Ö.K.H
Tip-V b Ortalama	4692	1,025		Tip-VI b Ortalama	4048	0,899	
Tip-V c (1)	2765	0,682	Ö.K.H	Tip-VI c (1)	2765	0,682	Ö.K.H
Tip-V c (2)	3253	0,825	Ö.K.H	Tip-VI c (2)	3253	0,825	Ö.K.H
Tip-V c (3)	4678	0,971	K.H.	Tip-VI c (3)	4678	0,971	K.H.
Tip-V c Ortalama	3565	0,826		Tip-VI c Ortalama	3565	0,826	
Tip-V d (1)	1970	0,638	K.H	Tip-VI d (1)	2584	0,698	Ö.K.H
Tip-V d (2)	1950	0,630	K.H	Tip-VI d (2)	2721	0,708	Ö.K.H
Tip-V d (3)	2265	0,658	Ö.K.H	Tip-VI d (3)	2781	0,715	Ö.K.H
Tip-V d Ortalama	2055	0,642		Tip-VI d Ortalama	2695	0,707	
Tip-V e (1)	970	0,558	Ö.K.H	Tip-VI e (1)	1603	0,768	Ö.K.H
Tip-V e (2)	919	0,538	Ö.K.H	Tip-VI e (2)	1768	0,972	Ö.K.H
Tip-V e (3)	1156	0,698	K.H.	Tip-VI e (3)	1668	0,813	K.H
Tip-V e Ortalama	1015	0,563		Tip-VI e Ortalama	1679	0,851	

F: Hasar Yüğü, **ΔL :** Yer Değiştirme, **K.H:** Kohesif Hasar, **Ö.K.H:** Özel Kohesif Hasar

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.7’de verilen deneysel sonuçlar incelenirse; aynı yapıştırma alanına sahip, bindirme uzunluğu sabit olup (L=15 mm) genişliği sırasıyla 25, 20, 15, 10

ve 5 mm olan Tip-V tek tesirli bağlantı geometrisi ile genişliği sabit olup ($W=15$) bindirme uzunluğu sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 mm olan Tip-VI tek tesirli bindirme bağlantı konfigürasyonlarında, yapışma alanının artması bağlantının yük taşıma kapasitesini artırdığı görülmektedir.



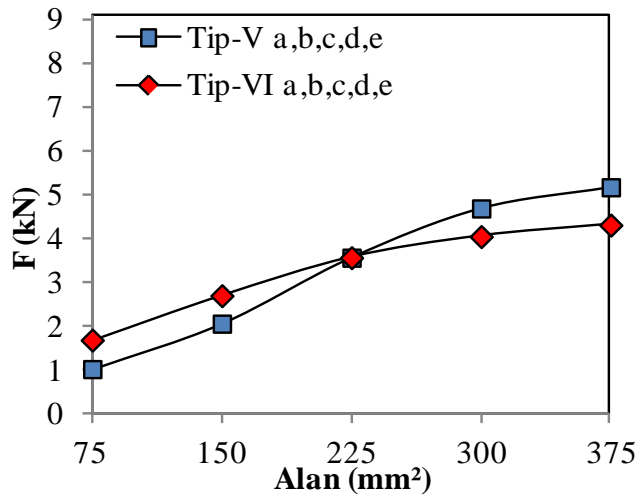
Şekil 4.7. Tip-V ve Tip-VI bağlantılarına ait kuvvet-yer değiştirme grafiği

Tip-V tek tesirli bindirme bağlantısına ait hasar yükleri incelenirse; yapışma alanındaki azalma miktarı ile hasar yükündeki azalma miktarının aynı oranda olmadığı görülür. Bağlantıların yapışma alanındaki %20 oranındaki azalma miktarı (375, 300, 225, 150, 75 mm²) hasar yüklerini sırasıyla yaklaşık %9, %31, %60 ve %80 oranında azaltmaktadır. Sabit bindirme uzunluğunda malzeme genişliğinin 25 mm'den 20 mm'ye düşmesi bağlantının yük taşıma kapasitesini %9 oranında azaltırken, genişliğin 10mm'den 5mm'ye düşmesinde yük taşıma kapasitesi %102 oranında azalmaktadır. Malzeme genişliğinin daha küçük değerleri için, bağlantının mukavemetinde genişliğin etkisi çok büyük bir oranda görülmektedir.

Genişliğin sabit 15 mm, bindirme uzunluğunun ise sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 mm olduğu Tip-VI tek tesirli bindirme bağlantısı konfigürasyonlarına ait hasar yükleri incelenirse; yapışma alanındaki %20 oranındaki azalma miktarı (375, 300, 225, 150, 75

mm²) bağlantının hasar yükünü sırasıyla yaklaşık %6, %17, %37 ve %61 oranında azaltmaktadır. Sabit genişlikte, bindirme uzunluğunun 25mm'den 20mm'ye düştüğü Tip VI-b bağlantı tipinde hasar yükü %6 azalırken, bindirme uzunluğunun 10mm'de 5mm'ye düştüğü Tip-VI e bağlantısında %60 oranında büyük bir azalma söz konusudur. Yani bindirme uzunluğunun etkisi daha küçük mesafelere düştüğünde hasar yükünü önemli derecede etkilemektedir.

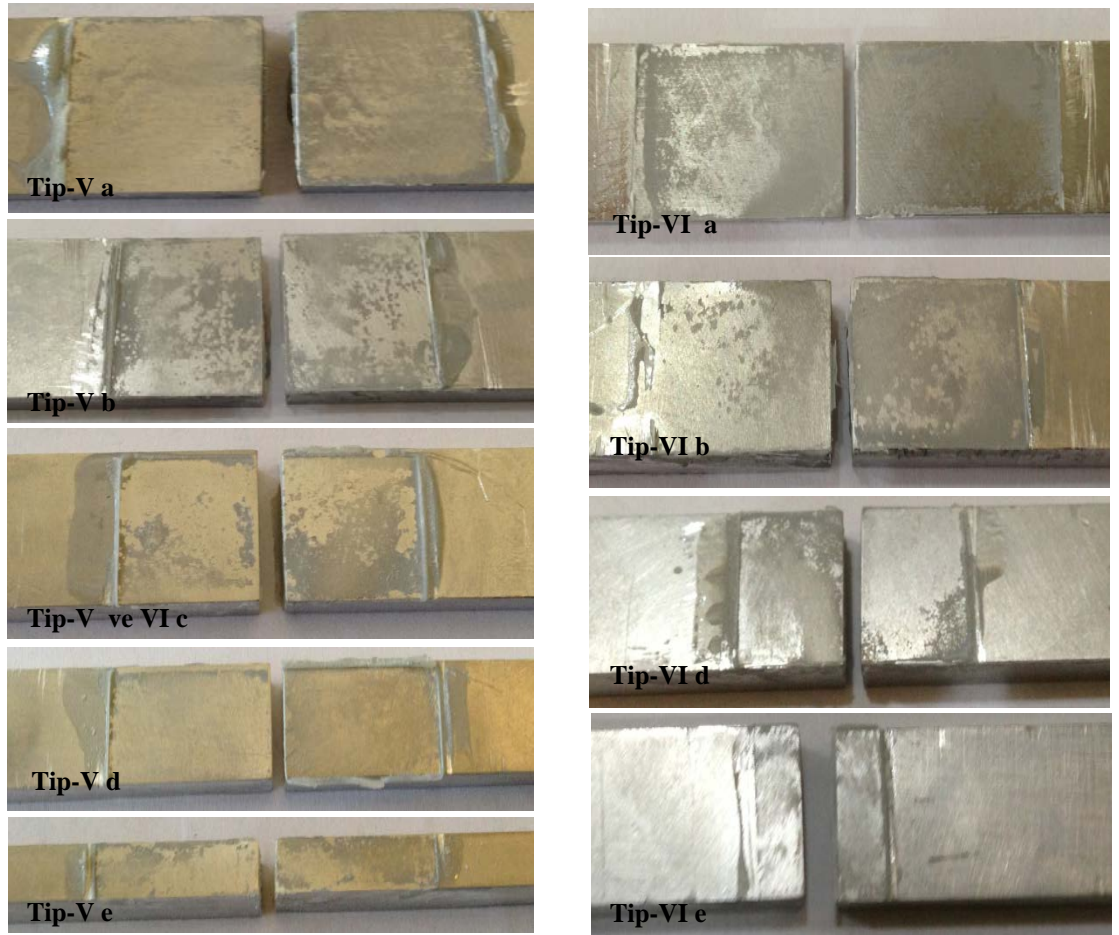
Tip-V ve Tip-VI bağlantı konfigürasyonları aynı yapışma alanında karşılaştırıldığında; Tip-VI a'ya göre Tip-V a %16, Tip VI-b'ye göre Tip-V b %13, Tip-V d'ye göre Tip-VI d %23 ve Tip-V e'ye göre Tip-VI e %39 daha fazla yük taşımıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Tip-V ve Tip-VI bağlantılarının aynı yapışma alanında karşılaştırılması

Şekil 4.8'deki grafik ve Tip-V ve Tip-VI tek tesirli bağlantı geometrilerine ait hasar yükleri incelendiğinde aynı yapışma alanındaki tek tesirli bağlantı geometrilerinde bağlantının bindirme uzunluğunu artırdığımız zaman bağlantının yük taşıma kapasitesi artmıştır. Ancak bağlantının bindirme uzunluğu yerine malzemenin genişliğini artırmak bağlantının yük taşıma kapasitesini daha fazla artırmıştır. Bunun sebebi tek tesirli bindirme bağlantılarında; bindirme uzunluğu boyunca bağlantının orta kısmının yük taşımadığı, hasarın bağlantının serbest uçlarında başladıktan sonra gerçekleştiği ile açıklayabiliriz.

Numunelerin hasar yüzeyleri ISO 10365'te verilen hasar tipleri dikkate alınarak incelenirse, Tip V-d ve Tip VI-a bağlantı konfigürasyonlarında hem alt hem de üst yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabakasının eşit miktarda kaldığı ve kohesiv hasar tipi meydana geldiği görülür. Tip-V ve Tip-VI tek tesirli bindirme bağlantılarına ait diğer numune yüzeyleri incelendiğinde ise, hem alt hem de üst yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabakasının eşit miktarda kalmadığı, yani özel kohesiv hasar tipi meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Tip-V ve Tip-VI bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri

Ayrıca çekme yüküne maruz Tip-V ve Tip-VI tek tesirli bindirme bağlantılarında kullanılan malzemelerde plastik deformasyon gözlemlenmemiştir. Hasar bağlantıların serbest uçlarında başlamış ve bağlantı kopuncaya kadar devam etmiştir

4.1.1.d. Tip-VII ve Tip-VIII bağlantı konfigürasyonlarından elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

Aynı yapışma alanına (sırasıyla 250, 200, 150, 100, 5 mm²) ve bindirme uzunluğu sabit (L=10 mm) ve malzeme genişliği sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 mm olan Tip-VII ve genişliği sabit (W=10 mm) bindirme uzunluğu sırasıyla 25, 20, 15, 10 ve 5 mm olan Tip-VIII tek tesirli bağlantı numune konfigürasyonlarından üçer adet test edilmiş ve hasar yükleri, yer değiştirmeleri ve hasar tipleri Çizelge 4.4 ve Şekil 4.10'da verilmiştir.

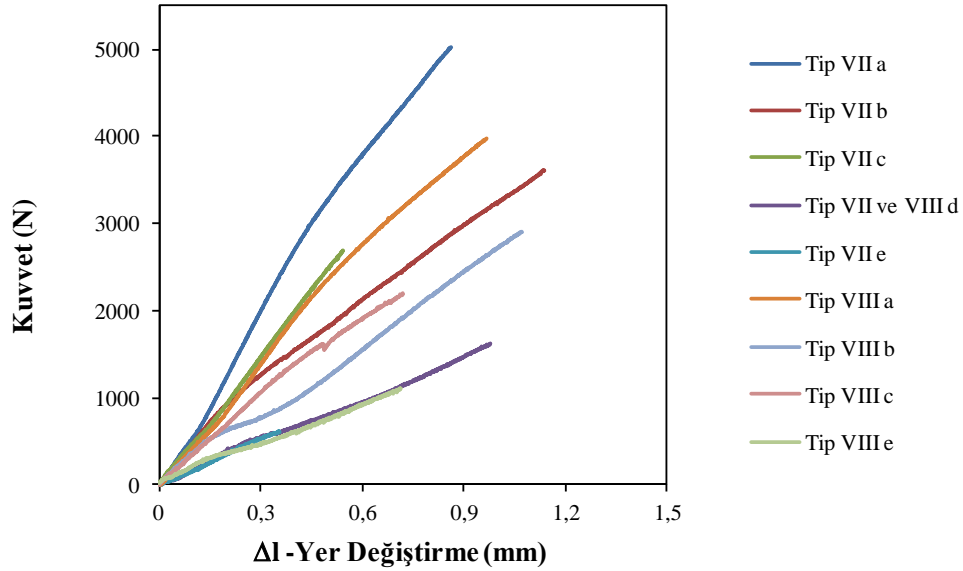
Çizelge 4.4 Tip-VII ve Tip-VIII bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar

Numune No	F (N)	ΔL (mm)	Hasar Tipi	Numune No	F (N)	ΔL (mm)	Hasar Tipi
Tip-VII a (1)	5187	1,103	Ö.K.H	Tip-VIII a (1)	4662	0,965	Ö.K.H
Tip-VII a (2)	4865	0,975	Ö.K.H	Tip-VIII a (2)	3900	0,970	Ö.K.H
Tip-VII a (3)	5075	1,018	K.H.	Tip-VIII a (3)	3518	0,963	Ö.K.H
Tip-VII a Ortalama	5039	1,032		Tip-VIII a Ortalama	3980	0,966	
Tip-VII b (1)	3710	1,215	K.H.	Tip-VIII b (1)	2875	0,988	K.H
Tip-VII b (2)	3668	1,203	K.H	Tip-VIII b (2)	2931	1,080	K.H
Tip-VII b (3)	3750	1,260	Ö.K.H	Tip-VIII b (3)	2905	1,151	K.H
Tip-VII b Ortalama	3709	1,226		Tip-VIII b Ortalama	2903	1,073	
Tip-VII c (1)	2584	0,698	Ö.K.H	Tip-VIII c (1)	1970	0,638	K.H
Tip-VII c (2)	2721	0,708	Ö.K.H	Tip-VIII c (2)	1950	0,630	K.H
Tip-VII c (3)	2781	0,715	Ö.K.H	Tip-VIII c (3)	2265	0,658	Ö.K.H
Tip-VII c Ortalama	2695	0,707		Tip-VIII c Ortalama	2055	0,642	
Tip-VII d (1)	1610	0,998	Ö.K.H	Tip-VIII d (1)	1610	0,998	Ö.K.H
Tip-VII d (2)	1568	0,852	Ö.K.H	Tip-VIII d (2)	1568	0,852	Ö.K.H
Tip-VII d (3)	1625	1,072	Ö.K.H	Tip-VIII d (3)	1625	1,072	Ö.K.H
Tip-VII d Ortalama	1601	0,974		Tip-VIII d Ortalama	1601	0,974	
Tip-VII e (1)	520	0,446	Ö.K.H	Tip-VIII e (1)	959	0,650	Ö.K.H
Tip-VII e (2)	605	0,495	Ö.K.H	Tip-VIII e (2)	1137	0,728	Ö.K.H
Tip-VII e (3)	663	0,520	Ö.K.H	Tip-VIII e (3)	1212	0,740	Ö.K.H
Tip-VII e Ortalama	596	0,487		Tip-VIII e Ortalama	1102	0,706	

F: Hasar Yüğü, **ΔL :** Yer Değiştirme, **K.H:** Kohesif Hasar, **Ö.K.H:** Özel Kohesif Hasar

Aynı yapıştırma alanına sahip, bindirme uzunluğu sabit olup (L=10 mm) genişliği azalan Tip-VII tek tesirli bağlantı konfigürasyonları ile genişliği sabit olup (W=10 mm) bindirme uzunluğu azalan Tip-VIII tek tesirli bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel

sonuçlar incelendiğinde (Çizelge 4.4 ve Şekil 4.10), her iki bağlantı tipinde de yapışma alanının artması bağlantının yük taşıma ve yer değiştirme kapasitesini artırdığı görülmektedir.

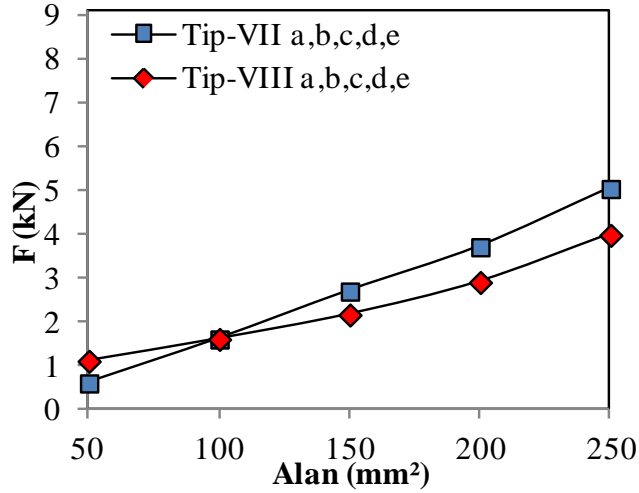


Şekil 4.10. Tip-VII ve Tip-VIII bağlantılarına ait kuvvet-yer değiştirme grafiği

Tip-VII tek tesirli bindirme bağlantısına ait deneysel sonuçlar incelendiğinde; bağlantının yapışma alanındaki azalma miktarı ile hasar yükündeki azalma miktarı aynı oranda olmadığı bu bağlantı tipinde de görülmektedir. Malzemenin genişliğinin 25 mm'den 20 mm'ye inmesi durumunda bağlantı alanı %20 oranında azalırken, bağlantının hasar yükündeki azalma oranı yaklaşık %27, genişlik 20 mm'den 15 mm'ye düştüğünde hasar yükü yaklaşık %27, genişlik 15 mm'den 10 mm'ye indiğinde hasar yükü yaklaşık %40 ve genişlik 10 mm'den 5 mm'ye indiğinde hasar yükü yaklaşık %63 oranında azalmıştır.

Genişliği sabit, bindirme uzunluğu 25, 20, 15, 10 ve 5 mm olan Tip-VIII tek tesirli bindirme bağlantı numunelerine ait deneysel sonuçlarda da aynı durum söz konusudur. Bağlantılarda yapışma alanındaki %20 oranındaki azalma (250, 200, 150, 100 ve 50 mm²), hasar yükünü sırasıyla yaklaşık %27, %45, %59 ve %72 oranında azaltmıştır. Aynı yapıştırma alanına sahip, bindirme uzunluğu sabit olup (L=10 mm) genişliği azalan Tip-VII ile genişliği sabit olup (W=10 mm) bindirme uzunluğu azalan Tip-VIII

bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar aynı yapışma alanında karşılaştırıldığında; Tip-VIII a'ya göre Tip-VII a yaklaşık %22, Tip-VII b'ye göre Tip-VII b yaklaşık %21, Tip-VIII c'ye göre Tip-VII c yaklaşık %19 ve Tip-VII e'ye göre Tip-VIII e yaklaşık %46 daha fazla yük taşımaktadır (Şekil 4.11 ve Çizelge 4.4).



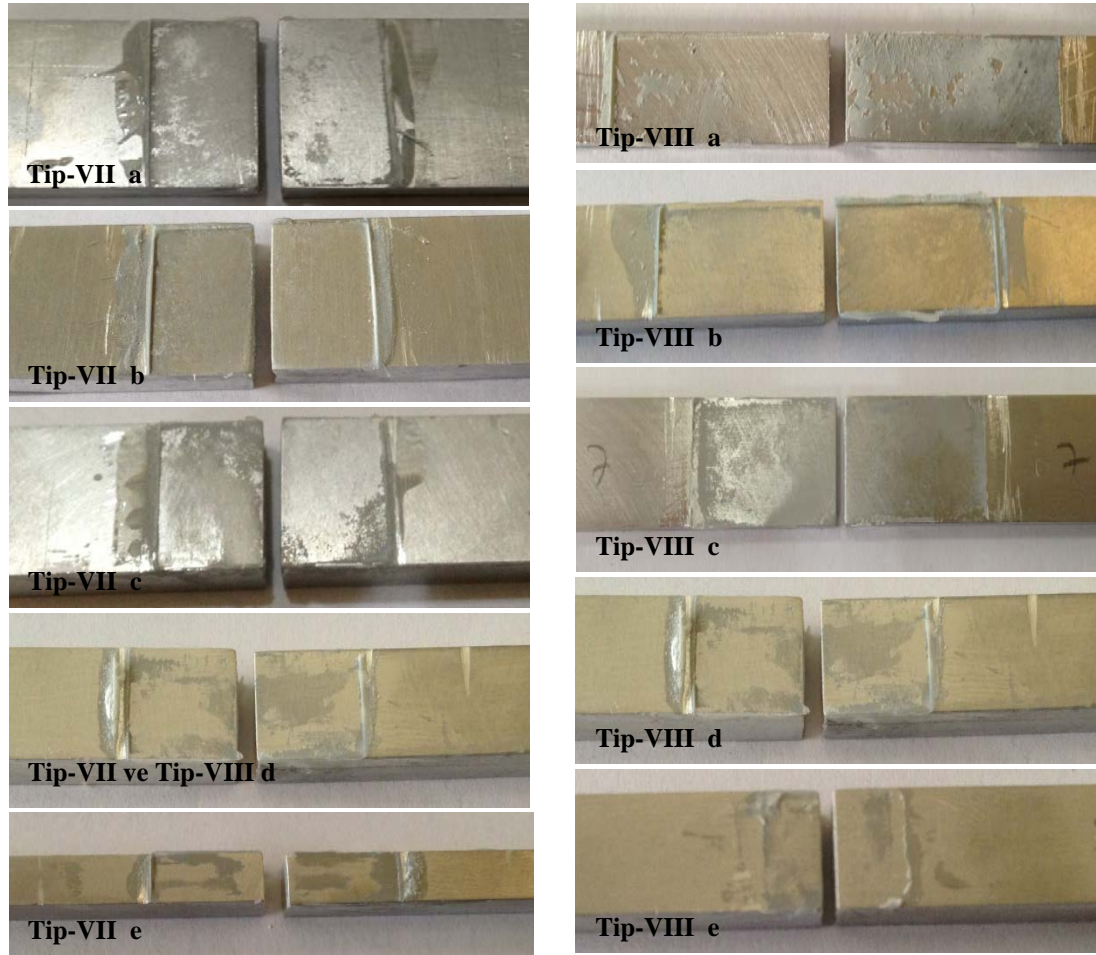
Şekil 4.11. Tip-VII ve Tip-VIII bağlantılarının aynı yapışma alanında karşılaştırılması

Tip-VII ve Tip-VIII tek tesirli bindirme bağlantılarında bindirme uzunluğunun ve genişliğin artırılması bağlantının yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Ancak Çizelge 4.4'de verilen hasar yükleri ile ve Şekil 4.11'de verilen grafik birlikte incelendiğinde, aynı yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarında (Tip-VII ve Tip-VIII), bindirme uzunluğunun artırılmasından ziyade malzemenin genişliğinin artırılması bağlantının yük taşıma kapasitesini daha fazla artırdığı görülmektedir.

Deney esnasında gözlemlenen çekme yüküne maruz Tip-VII ve Tip-VIII tek tesirli bindirme bağlantılarında plastik deformasyon meydana gelmemiş ve hasarın bağlantıların serbest uçlarında başladığı gözlemlenmiştir.

Tip-VII ve Tip-VIII tek tesirli bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri ISO 10365'te verilen hasar tipleri dikkate alınarak incelenirse, Tip-VII'b ve Tip-VIII b ve c bağlantı konfigürasyonlarında hem alt hem de üst yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabakasının eşit miktarda kaldığı ve kohesiv hasar tipi meydana geldiği görülür. Tip-VII ve Tip-VIII

tek tesirli bindirme bağlantılarına ait diğer numune incelendiğinde ise, hem alt hem de üst yapıştırılan malzemedeki yapıştırıcı tabakasının eşit miktarda kalmadığı, yani özel kohesiv hasar tipi meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. Tip-VII ve Tip-VIII bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri

4.1.1.e. Farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip tüm bağlantılar için deneysel sonuçlar ve karşılaştırılması

Bir önceki kısımda aynı yapışma alanına sahip, birinde genişliği sabit bindirme uzunluğu azalan, diğerinde ise bindirme uzunluğu sabit genişliği azalan tek tesirli bağlantı konfigürasyonlarına ait deneysel sonuçlar gruplandırılarak verilmiştir. Çizelge

4.5'te ise farklı yapışma alanına sahip farklı genişlik ve bindirme uzunluğundaki tek tesirli bağlantı numunelerini karşılaştırmak için deneysel sonuçların tümü verilmiştir.

Çizelge 4.5. Tüm bağlantı tipleri için deneysel sonuçlar

Numune Tipi	W-L (Genişlik-Bindirme Uzunluğu)	Yapışma Alanı (mm ²)	Deneysel Hasar Yüğü F_{exp} (N)	Max. Yer Değiştirme
Tip I a	25-25	625	9094	1,237
Tip I b	20-25	500	5381	0,791
Tip I c	15-25	375	4311	0,734
Tip I d	10-25	250	3980	0,966
Tip I e	5-25	125	1827	0,601
Tip II a	25-25	625	9094	1,237
Tip II b	25-20	500	6390	1,202
Tip II c	25-15	375	5177	1,098
Tip II d	25-10	250	5039	1,032
Tip II e	25-5	125	2507	0,672
Tip III a	25-20	500	6390	1,202
Tip III b	20-20	400	5006	1,193
Tip III c	15-20	300	4048	0,899
Tip III d	10-20	200	2903	1,073
Tip III e	5-20	100	1371	0,904
Tip IV a	20-25	500	5381	0,791
Tip IV b	20-20	400	5006	1,193
Tip IV c	20-15	300	4692	1,025
Tip IV d	20-10	200	3709	1,226
Tip IV e	20-5	100	2055	1,067
Tip V a	25-15	375	5177	1,098
Tip V b	20-15	300	4692	1,197
Tip V c	15-15	225	3565	0,826
Tip V d	10-15	150	2055	0,642
Tip V e	5-15	75	1015	0,563
Tip VI a	15-25	375	4311	0,734
Tip VI b	15-20	300	4048	0,899
Tip VI c	15-15	225	3565	0,826
Tip VI d	15-10	150	2695	0,707
Tip VI e	15-5	75	1679	0,851

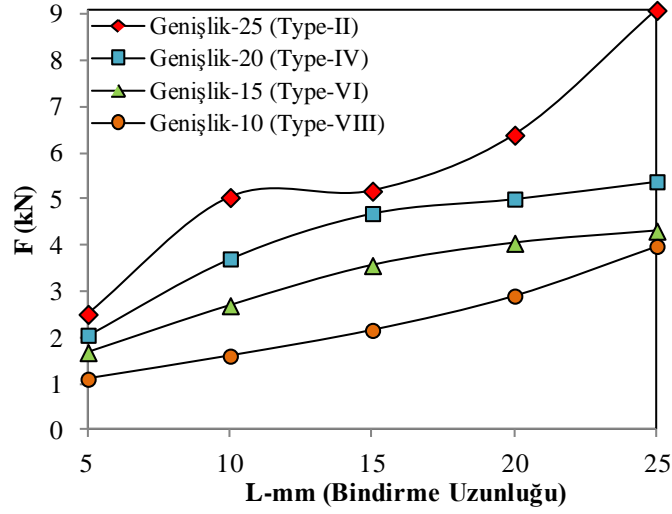
Çizelge 4.5. (devamı)

Numune Tipi	W-L (Genişlik-Bindirme Uzunluğu)	Yapışma Alanı (mm ²)	Deneysel Hasar Yüğü F_{exp} (N)	Max. Yer Değiştirme
Tip VII a	25-10	250	5039	1,032
Tip VII b	20-10	200	3709	1,226
Tip VII c	15-10	150	2695	0,707
Tip VII d	10-10	100	1601	0,974
Tip VII e	5-10	50	596	0,487
Tip VIII a	10-25	250	3980	0,966
Tip VIII b	10-20	200	2903	1,073
Tip VIII c	10-15	150	2160	0,642
Tip VIII d	10-10	100	1601	0,974
Tip VIII e	10-5	50	1102	0,716

Genişliği sabit 5 mm olup bindirme uzunluğu 25,20,15,10 mm olan Tip-I e, Tip-III e, Tip-V e ve Tip-VII e ile bindirme uzunluğu sabit 5 mm olup genişliği 25,20,15,10 mm olan Tip-II e, Tip-IV e, Tip-VI e ve Tip-VIII e bağlantılar karşılaştırıldığında, Tip-I e'ye göre Tip-II e yaklaşık 37%, Tip-III e'ye göre Tip-IV e yaklaşık %50, Tip-V e'ye göre Tip-VI e yaklaşık %65 ve Tip-VII e'ye göre Tip-VIII e yaklaşık %85 daha fazla yük taşımıştır. Burada önemli bir nokta aynı yapıştırma alanına sahip bağlantılarda, yapıştırma alanı azaldıkça genişliğin etkisinin daha fazla olduğu ve bağlantının yük taşıma kapasitesindeki artış oranı daha fazla olduğu görülmektedir.

4.1.1.f. Bindirme uzunluğunun bağlantının genişliğine etkisi

Şekil 4.13'te verilen genişliği sabit tek tesirli bağlantı konfigürasyonlarında, (Tip-II, Tip-IV, Tip-VI ve Tip-VIII) kuvvet-bindirme uzunluğu grafiği incelendiğinde, bindirme uzunluğunun etkisi bağlantıların genişliğine bağlı olarak değiştiği görülmektedir.



Şekil 4.13. Genişliği sabit numuneler için kuvvet-bindirme uzunluğu eğrisi

Genişliği 25 mm olan bağlantılarda bindirme uzunluğu 5 mm'den 10 mm' ye ve 20 mm'den 25 mm'ye çıktığında bağlantının yük taşıma kapasitesinde önemli bir artış olduğu, ancak 10 mm'den 15 mm'ye çıktığında ise artış oranı neredeyse değişmediği anlaşılmaktadır.

Genişliği 20 ile 15 mm olan bağlantılarda ise bindirme uzunluğu 15 mm'den 25 mm'ye çıktığında bağlantının yük taşıma kapasitesinde artış oranının azaldığı görülmektedir.

Ayrıca burada önemli bir nokta, bağlantılarda yapıştırma alanı dikdörtgenden kareye doğru gidildikçe bağlantının yük taşıma kapasitesindeki artış oranı artmaktadır.

4.1.2. Farklı kalınlıklara sahip numunelerden elde edilen deneysel sonuçlar

Malzeme kalınlığının bağlantının hasar yüküne etkisini deneysel olarak incelemek için; alt ve üst malzeme aynı kalınlığa sahip olup beş farklı kalınlık (8-8, 6.4-6.4, 4.8-4.8, 3.2-3.2 ve 1.6-1.6) ve alt malzeme kalınlığı sabit olmak üzere üst malzeme kalınlığı beş farklı kalınlığa (4.8-8, 4.8-6.4, 4.8-4.8, 4.8-3.2 ve 4.8-1.6) sahip iki farklı tipte tek tesirli bağlantı numune konfigürasyonlarından üçer adet test edilmiş, kuvvet-yer değiştirme, elde edilen maksimum hasar yükü ile her numunede oluşan hasar tipleri verilmiştir.

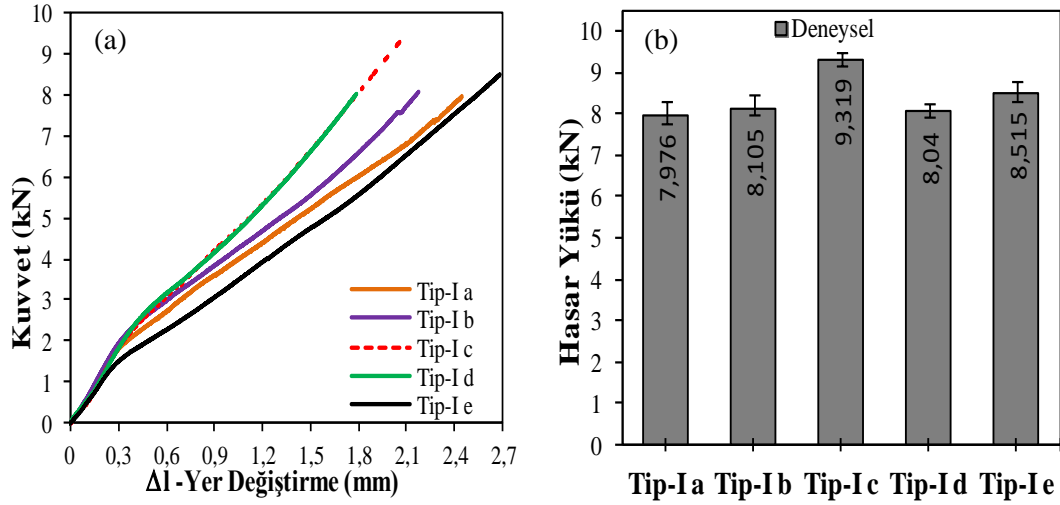
4.1.2.a. Malzeme kalınlığı aynı olan Tip-I bağlantısı için deneysel sonuçlar

Alt ve üst yapıştırılan malzeme kalınlığı aynı olan (Tip-I) tek tesirli bağlantı geometrisi konfigürasyonlarından üçer adet test edilmiş ve her bir bağlantı numunesi için hasar yükleri ile ortalama hasar yükleri, hasar tipi ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri Çizelge 4.6 ve Şekil 4.14 a ve b’de verilmiştir.

Aynı kalınlıkta olan tek tesirli bağlantı numunelerine ait Çizelge 4.6’da verilen maksimum hasar yükleri incelendiğinde, yapıştırılan malzemenin kalınlığının artması veya azalması bağlantının hasar yükünü yaklaşık olarak %15 oranında etkilemektedir.

Çizelge 4.6. Aynı kalınlığa sahip (Tip-I) numunelere ait deneysel sonuçlar

Numune No	t_1-t_2 (mm)	F (N)	ΔL (mm)	Hasar Tipi
Tip-I a (1)	8.0-8.0	7850	2,415	Ö.K.H
Tip-I a (2)		8050	2,492	Ö.K.H
Tip-I a (3)		8028	2,425	Ö.K.H
Tip I a Ortalama		7976	2,444	
Tip-I b (1)	6.4-6.4	8210	2,120	K.H.
Tip-I b (2)		7920	2,216	K.H.
Tip-I b (3)		8185	2,189	K.H.
Tip I b Ortalama		8105	2,175	
Tip-I c (1)	4.8-4.8	9125	2,040	Ö.K.H
Tip-I c (2)		8930	1,994	Ö.K.H
Tip-I c (3)		9902	2,125	Ö.K.H
Tip I c Ortalama		9319	2,053	
Tip-I d (1)	3.2-3.2	7965	1,726	Ö.K.H
Tip-I d (2)		8120	1,862	Ö.K.H
Tip-I d (3)		8035	1,785	Ö.K.H
Tip I d Ortalama		8040	1,791	
Tip-I e (1)	1.6-1.6	7960	2,563	Ö.K.H
Tip-I e (2)		8900	2,792	Ö.K.H
Tip-I e (3)		8685	2,688	Ö.K.H
Tip I e Ortalama		8515	2,681	
K.H: Kohesif Hasar, Ö.K.H: Özel Kohesif Hasar				

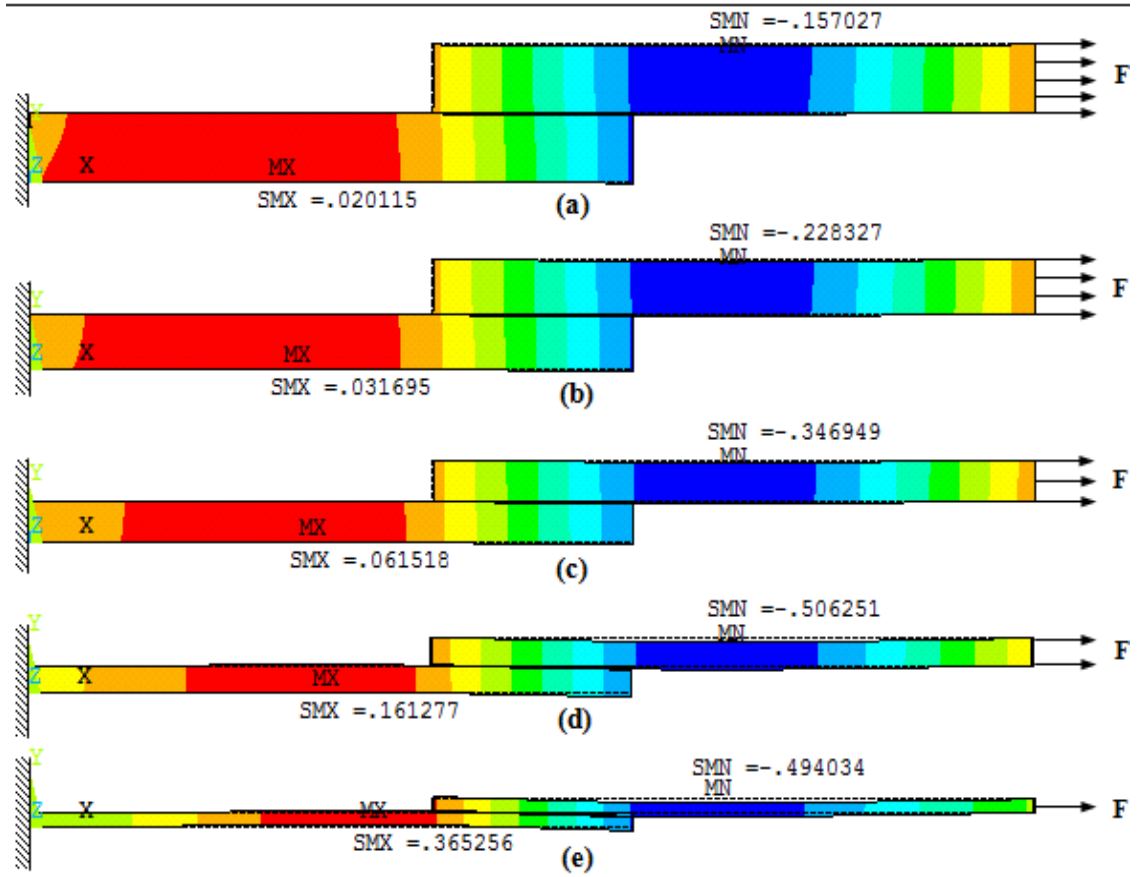


Şekil 4.14. Tip-I bağlantısı için grafikler:

*a. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi, b. Ortalama hasar yükü

Bağlantının yük taşıma kapasitesi açısından en iyi sonuç, yapıştırılan malzeme kalınlığının 4.8 mm olan bağlantı tipinde (Tip-I c) elde edilmektedir. Yapıştırılan malzeme kalınlığının 1.6 mm olduğu Tip-I e bağlantı tipine göre diğer bağlantı tipleri karşılaştırıldığında, kalınlığın 3.2 veya 6.4 mm'ye çıkması bağlantının hasar yükünü yaklaşık %5 azalttığı, kalınlığın 4.8 mm'ye çıkması bağlantının hasar yükünü yaklaşık %9 artırdığı ve kalınlığın 8 mm'ye çıkması durumunda ise bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 6.3 azalttığı deneysel verilerden anlaşılmaktadır.

Deneylemlerden elde edilen bu sonuçları açıklayabilmek için sonlu elemanlar analizi (S.E.A.) kullanılarak, 8 kN'luk çeki yükü altında Tip-I bağlantı tipinde y yönünde meydana gelen deformasyonları göz önünde tutmak gerekir (Şekil 4.15). Deneylemlerden ve sonlu elemanlar yönteminden elde edilen sonuçlar birlikte incelendiğinde; sonuçların malzemenin rijitliği ve eğilme momenti olmak üzere iki faktöre bağlı olduğu söylenebilir.



Şekil 4.15. Sonlu elamanlar yöntemiyle elde edilen y yönündeki deformasyonlar:
*a. Tip-I a, b. Tip-I b, c. Tip-I c, d. Tip-I d, e. Tip-I e

Malzeme kalınlığı 1.6 mm olan bağlantıda (Tip-I e) her iki malzemede plastik deformasyon oluşmakta (Şekil 4.15 e) ve bu deformasyon normal gerilmeleri ve eğilme momentini azaltmaktadır. Çünkü yük hattı her bir malzemenin orta kısmına daha da yakındır.

Ancak malzeme kalınlığının ince olması tüm bağlantı rijitliğini azaltmakta ve yükleme esnasında bağlantıda enine sapma (transverse deflexion) ve bindirme bölgesinin uç kısmında soyulma gerilmelerinin artmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda bu durumu Tip-I e için Şekil 4.16'da verilen hasar yüzeyide desteklemektedir.

Malzeme kalınlığı 1.6 mm'den 3.2 mm'ye çıkması durumunda, bağlantı sertliğinin arttığı ve buda bağlantıda enine sapmayı azaltıp, bindirme bölgesinin uçlarında

meydana gelen soyulma gerilmelerini biraz azaltmaktadır (Şekil 4.15 d). Ancak kalınlığın artması yük hattını her bir malzemenin orta kısmından uzaklaştırdığı ve bu durum eğilme momentini artırmaktadır.

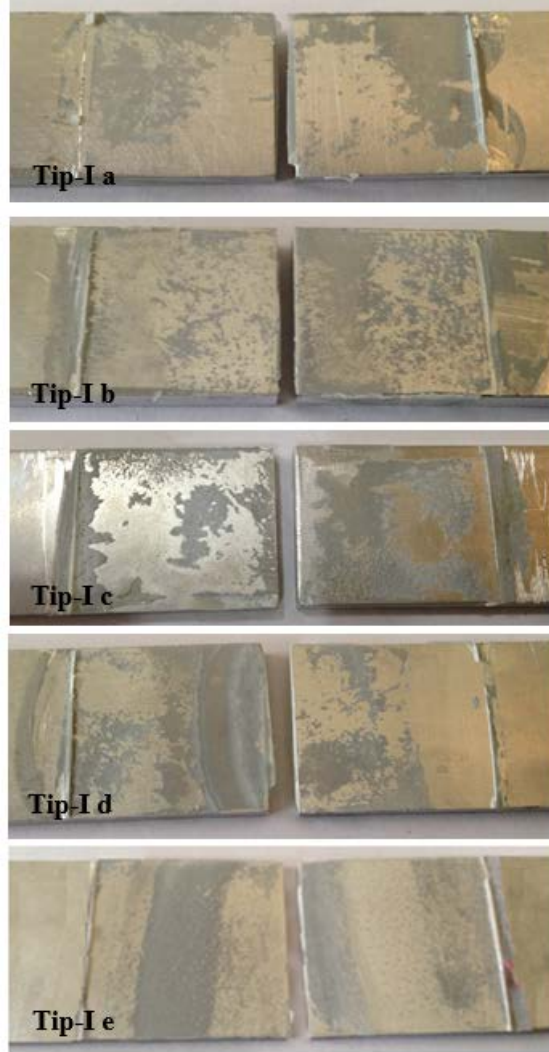
Malzeme kalınlığı 3.2 mm'den 4.8 mm'ye çıkması durumunda, bağlantı sertliğinde artış olmakta ve buda bindirme bölgesinin uçlarında meydana gelen soyulma gerilmelerini azaltmaktadır (Şekil 4.15 c). Diğer taraftan kalınlığın artması eğilme momentini artırmaktadır. Ancak soyulma gerilmelerindeki azalma oranı ile eğilme momentindeki artma oranı birbirini dengelemekte olup, bağlantının yük taşıma kapasitesini maksimum yapmaktadır.

Malzeme kalınlığı 4.8 mm'den 6.4 mm'ye çıkması, bağlantı sertliğini biraz daha artırıp ve buda bindirme bölgesinin uçlarında meydana gelen soyulma gerilmelerini biraz daha azaltmaktadır (Şekil 4.15 b). Ancak kalınlığın 6.4 mm'ye çıkması eğilme momentini önemli derecede artırmakta olup, soyulma gerilmelerindeki azalma ile eğilme momentindeki artış uyumsuz olmaktadır. Bu durum bağlantının yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır.

Malzeme kalınlığı 6.4 mm'den 8 mm'ye çıkması, bağlantı sertliğini ve eğilme momentini önemli derecede artırdığı ve bu da bindirme bölgesinin uçlarında gerilme yığılmalarını oluşturduğu söylenebilir (Şekil 4.15 a).

Aynı kalınlıkta tek tesirli bağlantı numunelerin (Tip-I) hasar yüzeyleri ISO 10365'te verilen hasar tipleri dikkate alınarak incelenirse, Tip-I b bağlantı konfigürasyonunda hem alt hem de üst yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabakasının eşit miktarda kaldığı ve kohesiv hasar tipi meydana geldiği görülür. Diğer tek tesirli bindirme bağlantılarına ait diğer numune yüzeyleri standartta verilen hasar tipleri dikkate alınarak incelendiğinde ise, hem alt hem de üst yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabakasının eşit miktarda kalmadığı, yani özel kohesiv hasar tipi meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.16).

Ayrıca malzeme kalınlığının 1,6 mm olduğu Tip-I e bağlantı numunelerinde, malzemelerde aşırı plastik deformasyon meydana gelirken, malzeme kalınlığının giderek arttığı Tip-I b, c, d ve e bağlantı numunelerinde ise plastik deformasyon giderek azalmıştır.



Şekil 4.16. Aynı kalınlıktaki Tip-I bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri

4.1.2.b. Malzeme kalınlığı farklı olan Tip-II bağlantısı için deneysel sonuçlar

Alt ve üst yapıştırılan malzeme kalınlığı farklı olan (Tip-II) tek tesirli bağlantı geometrisi konfigürasyonlarından üçer adet test edilmiş ve her bir bağlantı numunesi

için hasar yükleri ile ortalama hasar yükleri, hasar tipi ve kuvvet-yer değiştirme eğrileri Çizelge 4.7 ve Şekil 4.17 a ve b’de verilmiştir.

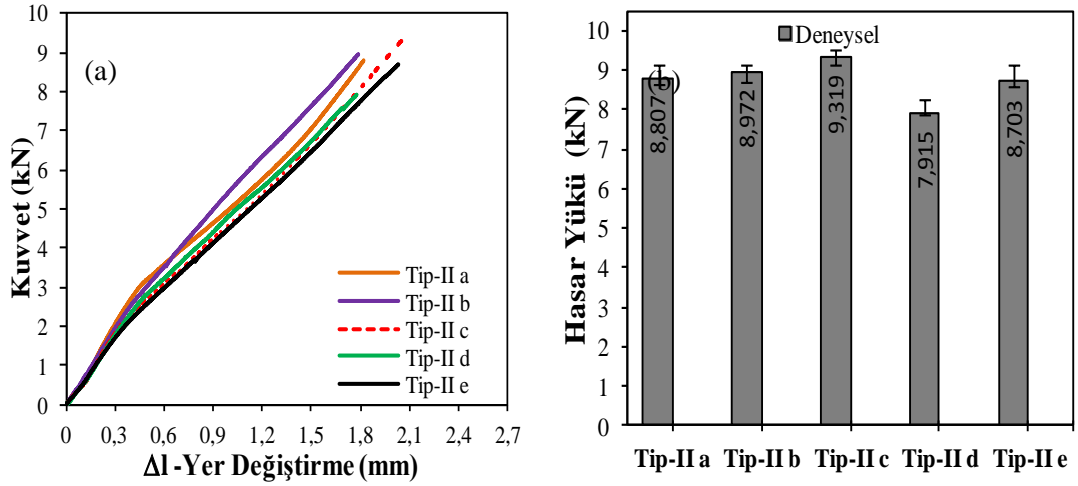
Çizelge 4.7. Farklı kalınlığa sahip (Tip-II) numunelere ait deneysel sonuçlar

Numune No	t_1-t_2 (mm)	F (N)	ΔL (mm)	Hasar Tipi
Tip-II a (1)	4.8-8.0	9048	1,848	Ö.K.H
Tip-II a (2)		8393	1,765	Ö.K.H
Tip-II a (3)		8980	1,835	Ö.K.H
Tip-II a Ortalama		8807	1,816	
Tip-II b (1)	4.8-6.4	8760	1,689	Ö.K.H
Tip-II b (2)		8860	1,720	Ö.K.H
Tip-II b (3)		9296	1,952	Ö.K.H
Tip-II b Ortalama		8972	1,787	
Tip-II c (1)	4.8-4.8	9125	2,040	Ö.K.H
Tip-II c (2)		8930	1,994	Ö.K.H
Tip-II c (3)		9902	2,125	Ö.K.H
Tip-II c Ortalama		9319	2,053	
Tip-II d (1)	4.8-3.2	8105	1,746	Ö.K.H
Tip-II d (2)		8250	1,895	Ö.K.H
Tip-II d (3)		7390	1,681	Ö.K.H
Tip-II d Ortalama		7915	1,774	
Tip-II e (1)	4.8-1.6	7965	1,716	Ö.K.H
Tip-II e (2)		8895	2,112	Ö.K.H
Tip-II e (3)		9249	2,280	Ö.K.H
Tip-II e Ortalama		8703	2,036	
K.H: Kohesif Hasar, Ö.K.H: Özel Kohesif Hasar				

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.17 b’de verilen alt ve üst malzeme kalınlığı farklı Tip-II (4.8-8, 4.8-6.4, 4.8-4.8, 4.8-3.2 and 4.8-1.6) bağlantıları için verilen ortalama maksimum hasar yükleri incelendiğinde, yapıştırılan malzemedan birinin kalınlığının artması veya azalması bağlantının hasar yükünü azaltmaktadır.

Alt ve üst malzeme kalınlığı 4.8 mm olan bağlantı tipine (Tip-II c) göre Tip-II b ve Tip-II a tipleri karşılaştırıldığında, üst malzeme kalınlığının 6.4 mm çıkması bağlantının

hasar yükünü yaklaşık %3.7 ve üst malzeme kalınlığının 8 mm çıkması durumunda ise bağlantının hasar yükünü yaklaşık %5.5 oranında azaltmaktadır.



Şekil 4.17. Tip-II bağlantısı için grafikler:
*a. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi, b. Ortalama hasar yükü

Daha önce diğer bağlantı tipi (Tip-I) için yapılan analizler göz önüne alındığında, üst malzeme kalınlığının artması yük hattını her bir malzemenin kalınlığının orta hattından uzaklaştırdığı için eğilme momentini artırmaktadır. Eğilme momentindeki bu artış bindirme bölgesinin uçlarında aşırı derece gerilme yığılmaları oluşturmaktadır.

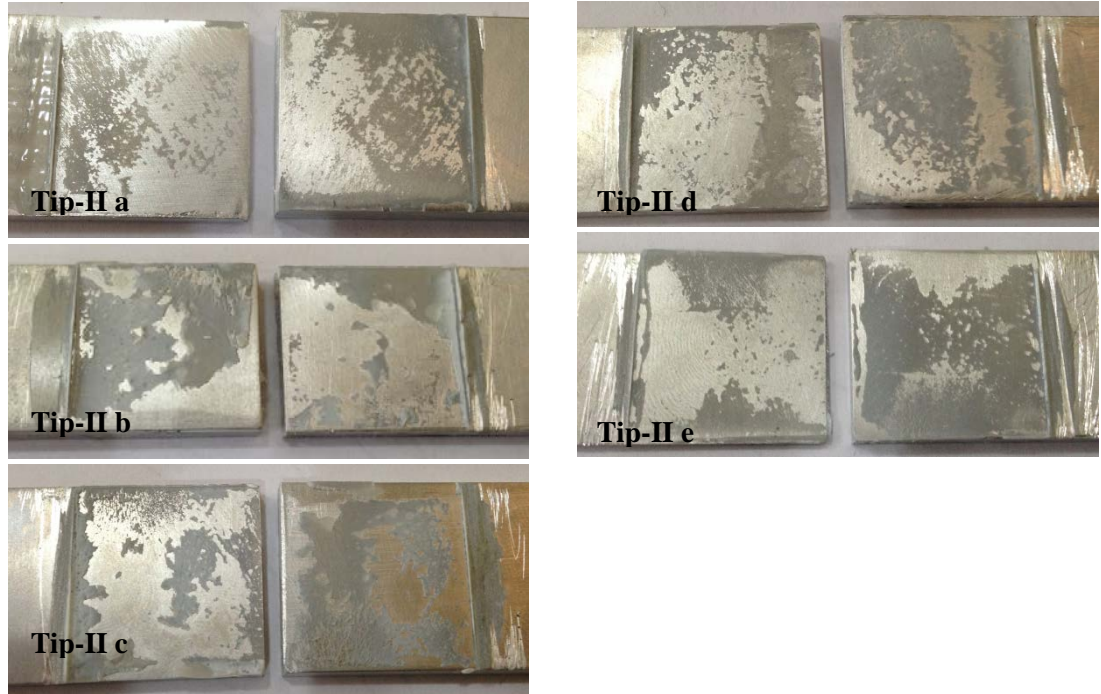
Alt ve üst malzeme kalınlığı 4.8 mm olan bağlantı tipi (Tip-II c) Tip-II b ve Tip-II a tipleri ile karşılaştırıldığında ise üst malzeme kalınlığının 3.2 mm inmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık %15 ve üst malzeme kalınlığının 1.6 mm inmesi durumunda ise bağlantının hasar yükünü yaklaşık %6.6 azaltmaktadır. Bu durum kalınlığı azalan malzemenin rijitliği azalacağından o malzemede plastik deformasyon oluşmaktadır.

Günümüzde yapılan bilimsel araştırmalar bir sistemde kullanılan elemanların boyutu ve ağırlığı son derece önemli olduğunu göstermektedir. Yapılan araştırmalar sistemin ağırlığını azaltma yönündedir. Bu durum göz önüne alındığında, yapılan bu çalışmada elde edilen önemli sonuçlardan biri ise malzeme kalınlığını artırarak bağlantının hasar yükünün artırılmayacağıdır. Örneğin her iki malzeme kalınlığı 4.8 mm olan bağlantı

tipi, kalınlığı 8 mm olan bağlantı tipine göre yaklaşık %17 daha fazla yük taşımaktadır. Diğer bir örnek ise, malzeme kalınlığı 4.8-4.8 mm olan bağlantı tipi kalınlığı 4.8-1.6 mm olan bağlantı tipi ile karşılaştırıldığında, bağlantının ağırlığı %50 artarken hasar yükü sadece % 6.6 artmıştır.

Farklı kalınlıkta tek tesirli bağlantı numunelerin (Tip-II) hasar yüzeyleri ISO 10365'te verilen hasar tipleri dikkate alınarak incelenirse, türm bağlantı konfigürasyonunda hem alt hem de üst yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabakasının eşit miktarda kalmadığı ve özel kohesiv hasar tipi meydana geldiği görülür. (Şekil 4.18).

Ayrıca üst malzeme kalınlığının 1,6 mm olduğu Tip-II e bağlantı numunelerinde, üst malzemede aşırı plastik deformasyon meydana gelirken, üst malzeme kalınlığının giderek arttığı Tip-II b, c, d ve e bağlantı numunelerinde ise plastik deformasyon giderek azalmıştır.



Şekil 4.18. Farklı kalınlıktaki Tip-II bağlantı numunelerine ait hasar yüzeyleri

4.2. Elasto-Plastik Sonlu Eleman Analizlerinden Elde Edilen Sonuçlar

DP 460 yapısal yapıştırıcısı kullanılarak elde edilen 8 farklı tipte genişlik-bindirme uzunluğuna ve alt malzeme ile üst malzeme kalınlığı aynı olan, alt malzeme kalınlığı sabit üst malzeme kalınlığı değişen farklı kalınlıklara sahip tek tesirli bağlantı numunelerinde; yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alınarak, çekme durumu için geometrik olarak lineer olmayan sonlu eleman yöntemi (S.E.Y.) kullanılarak gerilme analizi yapılmıştır.

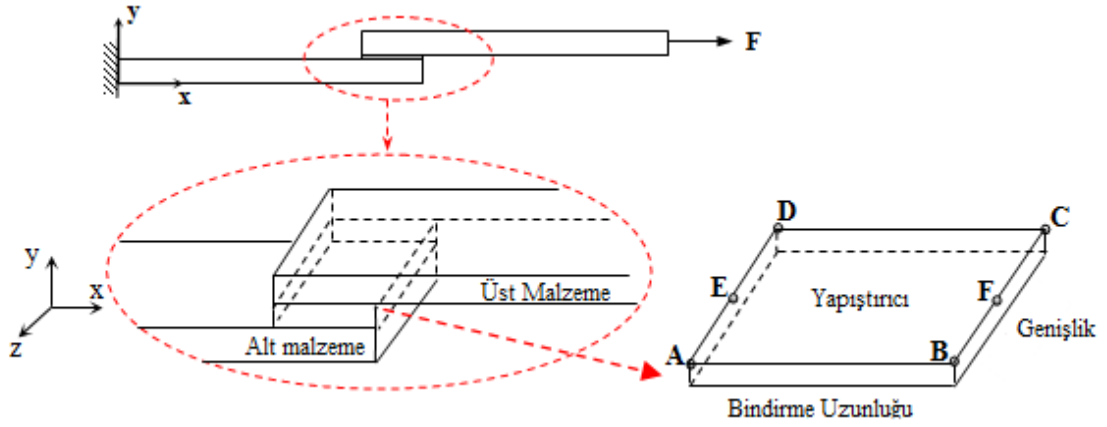
Lineer olmayan sonlu elemanlar analizlerinde; bulk numunelerin çekme deneyinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alınmıştır. Yapıştırıcı tabakası ve yapıştırılan malzemelerde oluşan eş değer gerilmelerin hesaplanmasında von Mises akma kriteri kullanılmıştır.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısı yüklendiğinde, yapıştırıcı tabakasında iki eksenli gerilme (σ_x , σ_y ve τ_{xy}) oluşur. Burada eş değer gerilmeler ($\sigma_{eş}$), von Mises akma kriterine göre hesaplanmış ve bu eş değer gerilmeler yapıştırıcı tabakasının her hangi bir noktasında, yapıştırıcıların maksimum çekme dayanımına ($\sigma^*=44,62$ MPa) ulaştığında hasarın meydana geldiği kabul edilmiştir.

Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler belirli kabullere göre iki boyutlu ya da tek boyutlu hale indirgenerek çözülebilmektedir. Ayrıca, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda, yapıştırıcı tabakasında iki boyutlu modelleme için yapılan kabuller (düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme) uygun olmayan ya da eksik çözümlere neden olabilmektedir. Bu yüzden çeki yüküne maruz DP460 kullanılarak hazırlanmış bağlantı numuneleri düzlem şekil değiştirme kabulüne göre üç boyutlu modellenerek çözüm yapılmıştır.

4.2.1. Farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip numunelerin 3-boyutlu sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar

Farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip numuneler için nümerik analiz Tip-I ve Tip-II bağlantıları için yapılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar incelenirse, hasarın başlaması açısından en kritik bölgelerin yapıştırıcı ile üst yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde (ABCD yüzeyi) olduğu görülür (Şekil 4.19). Bu yüzden gerilme dağılımları EF hattı üzerinden çizilmiştir.

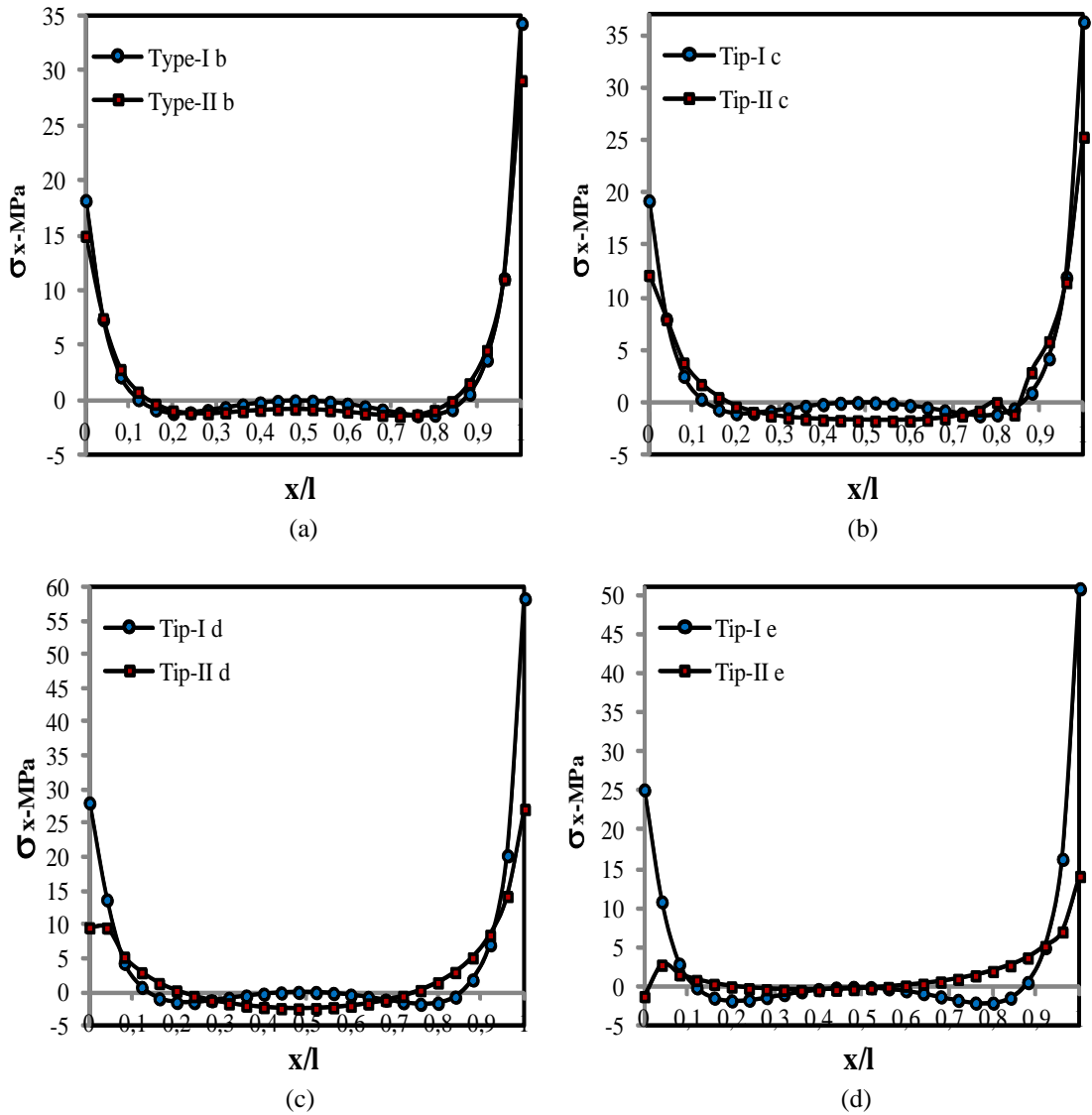


Şekil 4.19. Farklı genişlik-bindirme uzunluğundaki bağlantılarda kritik hasar yüzeyi

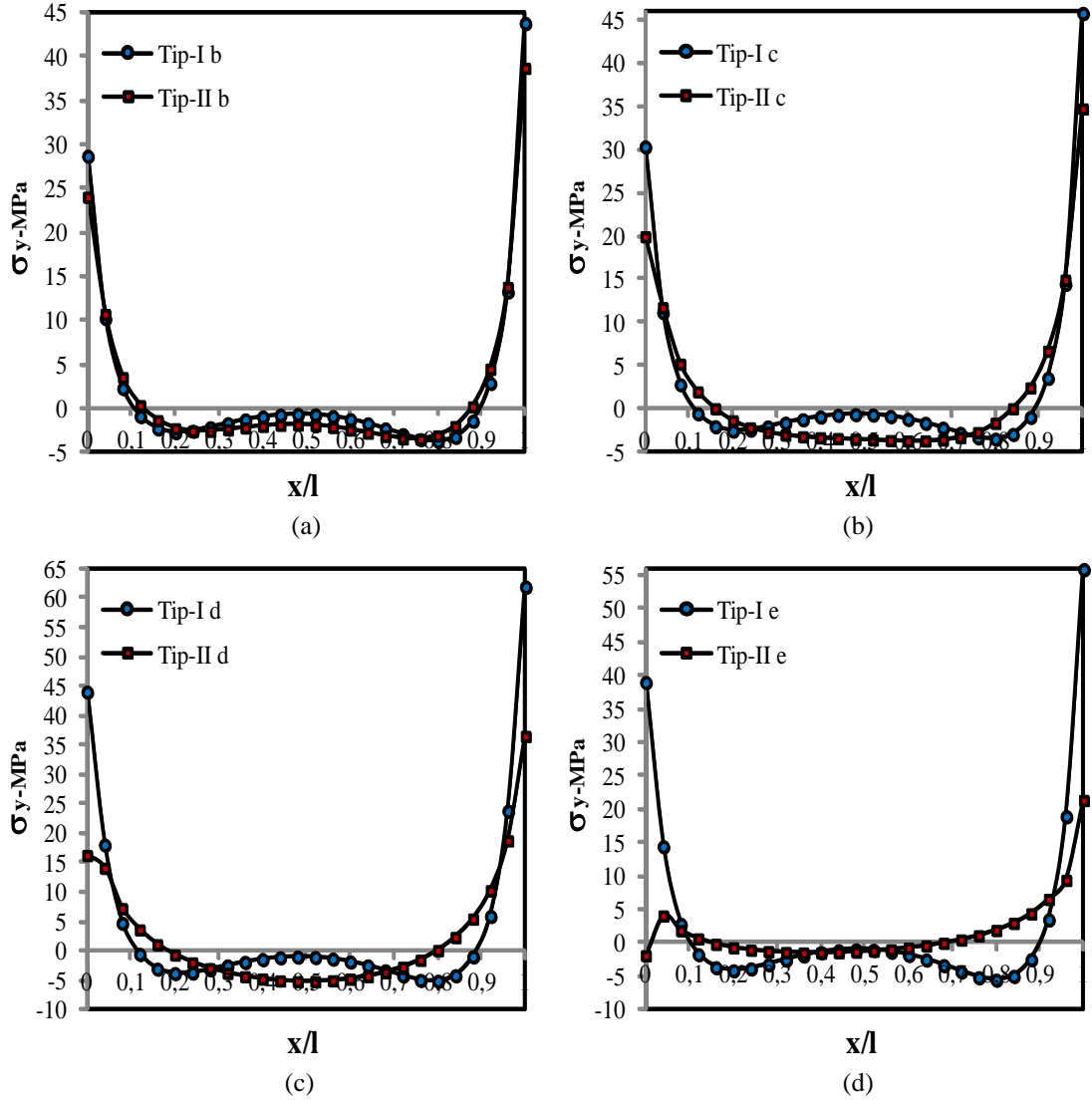
Analizlerde, çeki yükü olarak deneylerden elde edilen en hasar yükünün yaklaşık yarısı kadar (Yapıştırıcı alanı aynı olan Tip-I b and Tip-II b için 2500 N, Tip-I c and Tip-II c için 2000N, Tip-I d and Tip-II d için 2000 N ve Tip-I e and Tip-II e için ise 900 N) çeki yükü uygulanmıştır.

Farklı bindirme uzunluklarında oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırabilmek için, gerilme dağılımı hesaplanan noktanın yatay eksen üzerindeki koordinat değeri (x), kendi bindirme uzunluğuna (l) bölünerek normalleştirilmiştir. Benzer şekilde farklı genişlikleri de z koordinat değeri, kendi genişliğine (w) bölünerek normalleştirilmiştir.

Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’te verilen normal ve Şekil 4.23’te verilen kayma gerilme dağılımlarının karşılaştırılması incelendiğinde, gerilme dağılımları genel olarak bindirme uçlarında yüksek değerler alırken uçlardan merkeze doğru gidildikçe gerilmeler sıfıra yakın değerler almakta ve Şekil 4.19’de verilen ABCD yüzeyinde gösterilen F noktasında maksimum değeri almaktadır.



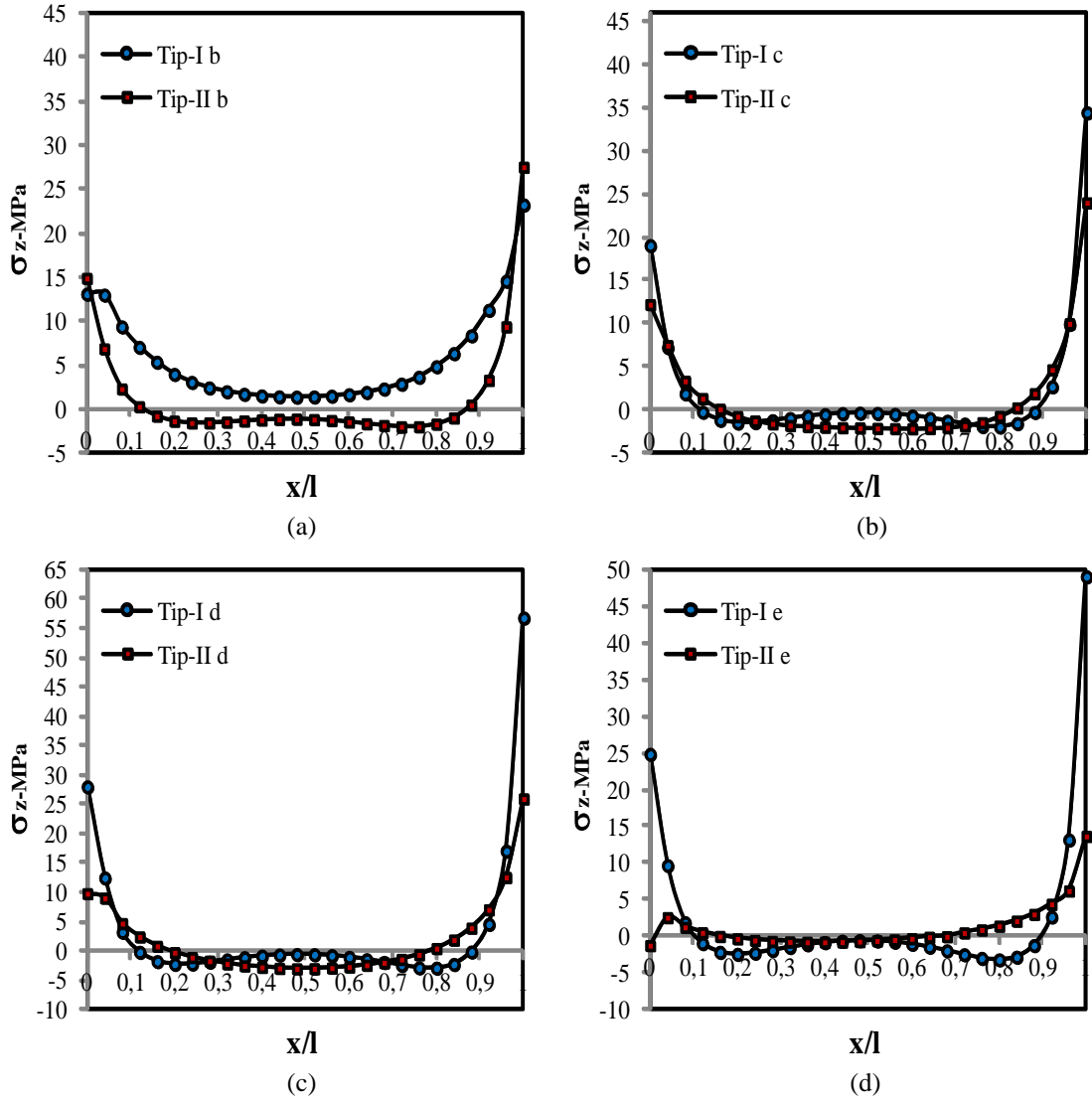
Şekil 4.20 Yapıştırıcı tabakasındaki EF hattı boyunca normal (σ_x) gerilme dağılımları:
*a. Tip-I b ve Tip-II b, b. Tip-I c ve Tip-II c, c. Tip-I d ve Tip-II d, d. Tip-I e ve Tip-II e



Şekil 4.21. Yapıştırıcı tabakasındaki EF hattı boyunca soyulma (σ_y) gerilmesi dağılımları:

*a. Tip-I b ve Tip-II b, b. Tip-I c ve Tip-II c, c. Tip-I d ve Tip-II d, d. Tip-I e ve Tip-II e

Aynı yapıştırma alanına sahip tek tesirli yapışma bağlantılarda, bindirme uzunluğuna göre genişliğin artması bindirme uzunluğunun uçlarında (E and F noktalarında) meydana gelen soyulma gerilmelerini (σ_y hasar açısından kritik olan gerilme) azaltmaktadır. Hasara neden olan bu gerilmelerdeki azalma bağlantının yük taşıma kapasitesini artırmaktadır.

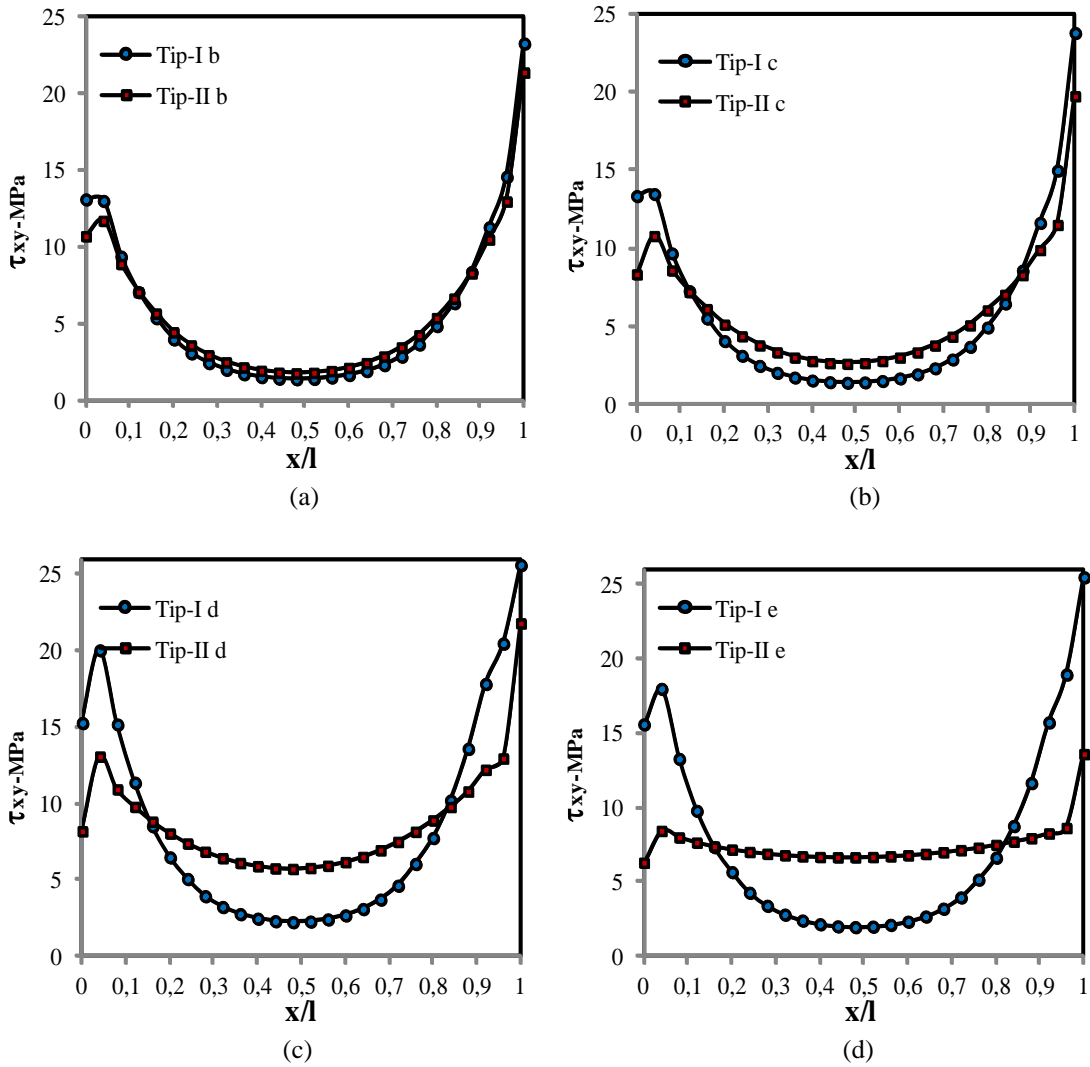


Şekil 4.22. Yapıştırıcı tabakasındaki EF hattı boyunca normal (σ_z) gerilme dağılımları:
*a. Tip-I b ve Tip-II b, b. Tip-I c ve Tip-II c, c. Tip-I d ve Tip-II d, d. Tip-I e ve Tip-II e

Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’te verilen grafiklerden, normal gerilme dağılımlarının (σ_x , σ_y ve σ_z), EF hattı doğrultusunda (bindirme uzunluğu boyunca) ve (E ve F noktaları) maksimum değer alırken, uçlardan merkeze doğru gidildikçe bu gerilme değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir.

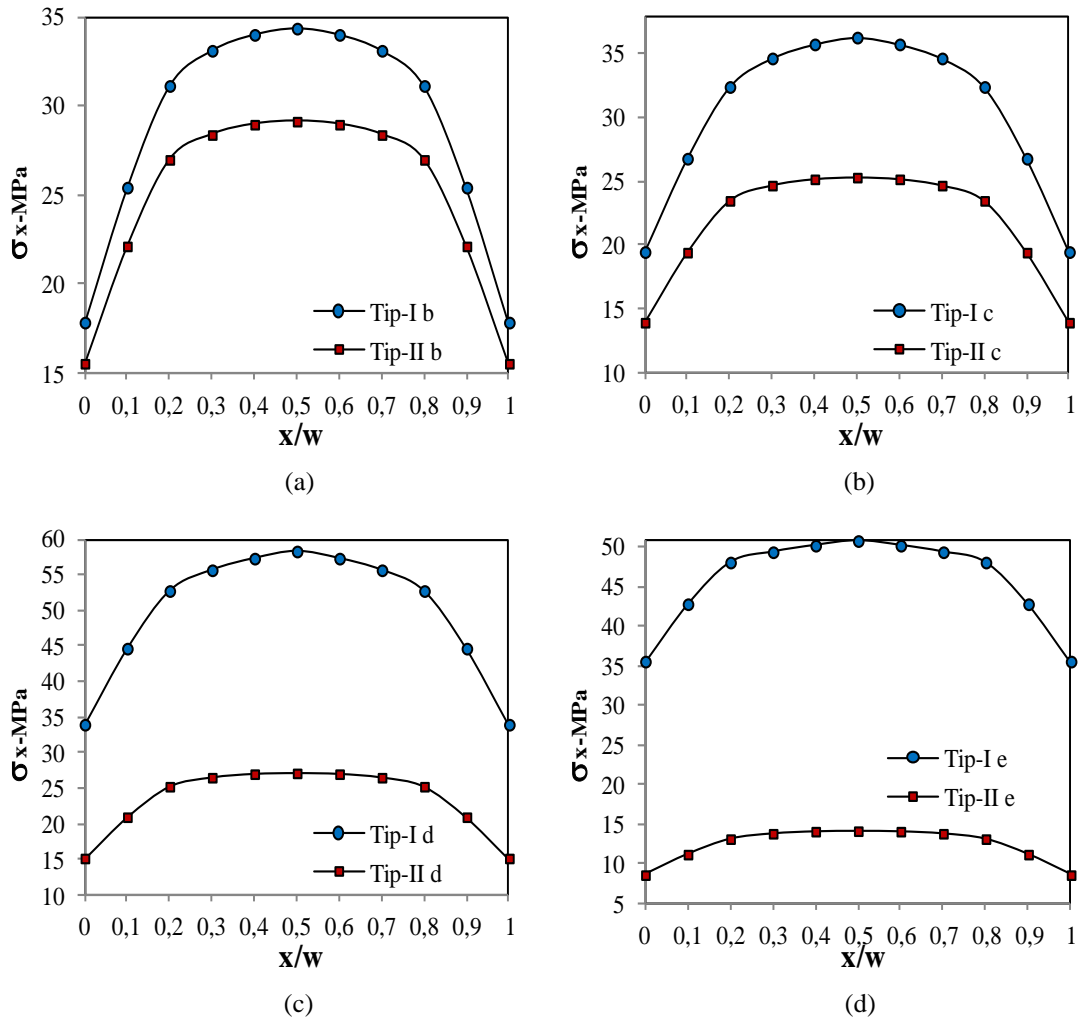
Deneysel çalışmalarda aynı yapıştırıcı kullanılarak hazırlanmış aynı yapışma alanına sahip Tip-I ve Tip-II tek tesirli bağlantı numunelerinin taşıdıkları yükler karşılaştırıldığında, Tip-I b’ye göre Tip-II b yaklaşık %19, Tip-I c’ye göre Tip-II c

yaklaşık %20, Tip-I d'ye göre Tip-II d yaklaşık %26 ve Tip-I e'ye göre Tip-II e yaklaşık %37 daha fazla yük taşımıştır. Bu bağlantı tipleri için verilen gerilme analizleri incelendiğinde, genişliğin sabit tutulup bindirme uzunluğunun azaltıldığı Tip-II bağlantı numunelerine ait gerilme değerleri, bindirme uzunluğunun sabit tutulup genişliğin azaltıldığı Tip-I bağlantı numunelerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, verilen gerilme analiz sonuçları ile deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.23. Yapıştırıcı tabakasındaki EF hattı boyunca kayma (τ_{xy}) gerilme dağılımları:
*a. Tip-I b ve Tip-II b, b. Tip-I c ve Tip-II c, c. Tip-I d ve Tip-II d, d. Tip-I e ve Tip-II e

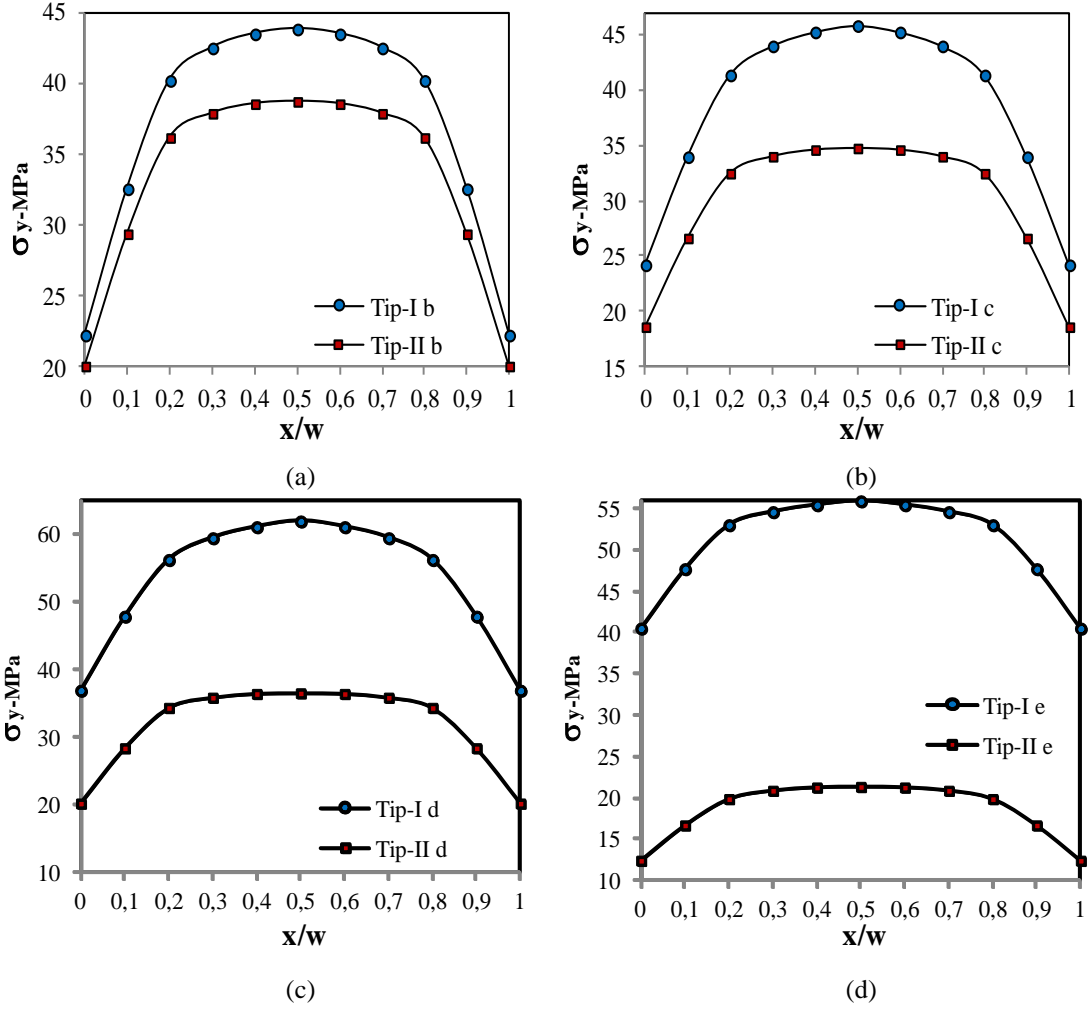
Şekil 4.23'te verilen τ_{xy} kayma gerilme dağılımları karşılaştırıldığında ise, aynı yapıştırma alanına sahip bağlantılarda genişliği fazla olan bağlantıların uçlarında meydana gelen gerilmelerin azaldığı ve bu gerilmeler bindirme uzunluğunun orta kısmına doğru transfer edildiği görülmektedir. Kayma gerilmelerinin analiz sonuçları, soyulma gerilmelerinde ifade edilen analiz sonuçları ile benzerdir.



Şekil 4.24. Yapıştırıcı tabakasındaki BC hattı boyunca normal (σ_x) gerilme dağılımları: *a. Tip-I b ve Tip-II b, b. Tip-I c ve Tip-II c, c. Tip-I d ve Tip-II d, d. Tip-I e ve Tip-II e

BC hattı üzerinde (malzemenin genişliği doğrultusunda) yapılan gerilme analiz sonuçları Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de verilmiştir. Gerilme dağılımları genel olarak bindirme uçlarında düşük değerler alırken uçlardan merkeze

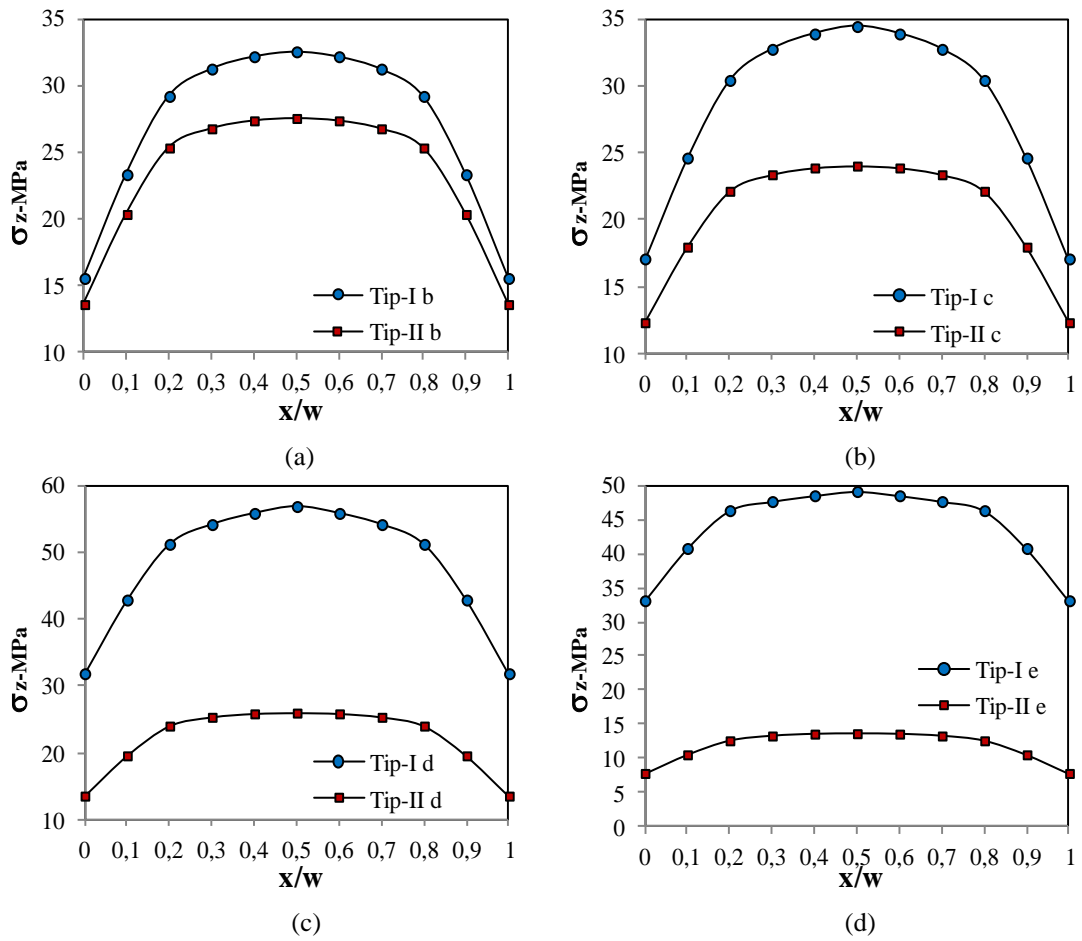
doğru gidildikçe gerilme değerleri artmakta ve Şekil 4.19’da verilen ABCD yüzeyinde gösterilen F noktasında maksimum değer almaktadır.



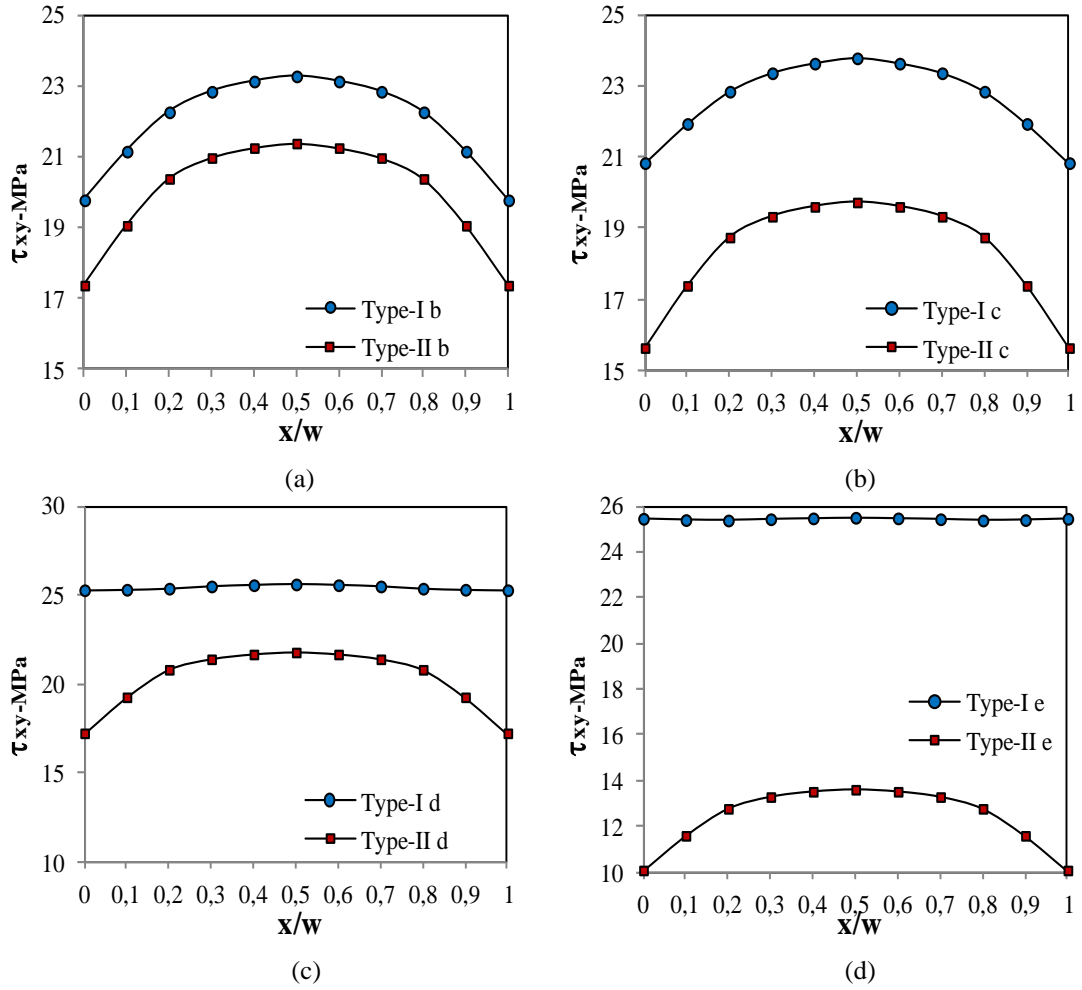
Şekil 4.25. Yapıştırıcı tabakasındaki BC hattı boyunca normal (σ_y) gerilme dağılımları:
*a. Tip-I b ve Tip-II b, b. Tip-I c ve Tip-II c, c. Tip-I d ve Tip-II d, d. Tip-I e ve Tip-II e

Sonlu elemanlar metodu ile yapılan gerilme analizlerinde; Şekil 4.25’de verilen ve bağlantıda hasara neden olan σ_y soyulma gerilmelerinin BC hattı üzerinde (Şekil 4.19) bulunan F noktasında maksimum değer aldığı görülmektedir. Şekil 4.25’de verilen Tip-I ve Tip-II bağlantı tipleri için verilen gerilme analizleri incelendiğinde, genişliğin sabit tutulup bindirme uzunluğunun azaltıldığı Tip-II bağlantı numunelerine ait gerilme değerleri, bindirme uzunluğunun sabit tutulup genişliğin azaltıldığı Tip-I bağlantı numunelerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, Tip-I ve Tip-II bağlantı

tipleri için diğer normal ve kayma gerilme dağılımlarının verildiği grafikler incelendiğinde aynı durumun söz konusu olduğu görülmektedir. Bu gerilme analiz sonuçları, deneysel sonuçlarla uyum içerisindedir. Deneysel sonuçlar ve gerilme analizler birlikte incelendiğinde; deneysel sonuçlarda genişliğin sabit olduğu Tip-II bağlantı konfigürasyonlarının daha fazla yük taşıdığı ve bununla birlikte gerilme değerlerinin aynı yapışma alanına sahip Tip-I bağlantılarına göre daha düşük çıktığı bu durumu kanıtlamaktadır (Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27).



Şekil 4.26. Yapıştırıcı tabakasındaki BC hattı boyunca normal (σ_z) gerilme dağılımları:
*a. Tip-I b ve Tip-II b, b. Tip-I c ve Tip-II c, c. Tip-I d ve Tip-II d, d. Tip-I e ve Tip-II e



Şekil 4.27. Yapıştırıcı tabakasındaki BC hattı boyunca kayma (τ_{xy}) gerilme dağılımları:
*a. Tip-I b ve Tip-II b, b. Tip-I c ve Tip-II c, c. Tip-I d ve Tip-II d, d. Tip-I e ve Tip-II e

Tüm grafikler incelendiğinde, dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir sonuç ise, aynı yapıştırma alanına sahip bağlantıların karşılaştırılmasında, bindirme uzunluğunun ucunda (BC hattında) meydana gelen soyulma gerilmelerindeki azalma aynı oranda olmayıp, yapıştırma alanının azalması ile bu oranın arttığı görülmektedir. Yapıştırma alanı az olan bağlantılarda, genişliğin hasar yüküne etkisinin daha fazla olduğu ve bu sonuçlar deneylerden elde edilen sonuçları desteklediği görülmektedir.

Ayrıca tüm numuneler için kayma gerilme dağılımları genişlik boyunca uniform olmayıp, merkezde (F noktasında) maksimum uçlarda (B ve C noktalarında) minimum olduğu görülmektedir (Şekil 4.27). Ancak, genişliğinin azalan bağlantılarda (Tip-I d ve Tip-I e) genişlik boyunca uçlarda meydana gelen gerilmeler (B ve C noktalarında)

artarak B-C hattı boyunca τ_{xy} kayma gerilmesi dağılımlarını uniform hale gelmektedir (Şekil 4.27 c ve Şekil 4.27 d).

Ayrıca sonlu eleman analizlerinden yapıştırıcı ile birleştirilmiş Tip-I ve Tip-II tek tesirli bağlantı geometrileri için 500 N'luk adımlar ile ortalama hasar yükü elde edilmiştir (Çizelge 4.8). Bu değerler deneysel yöntemle elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında sonuçların oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

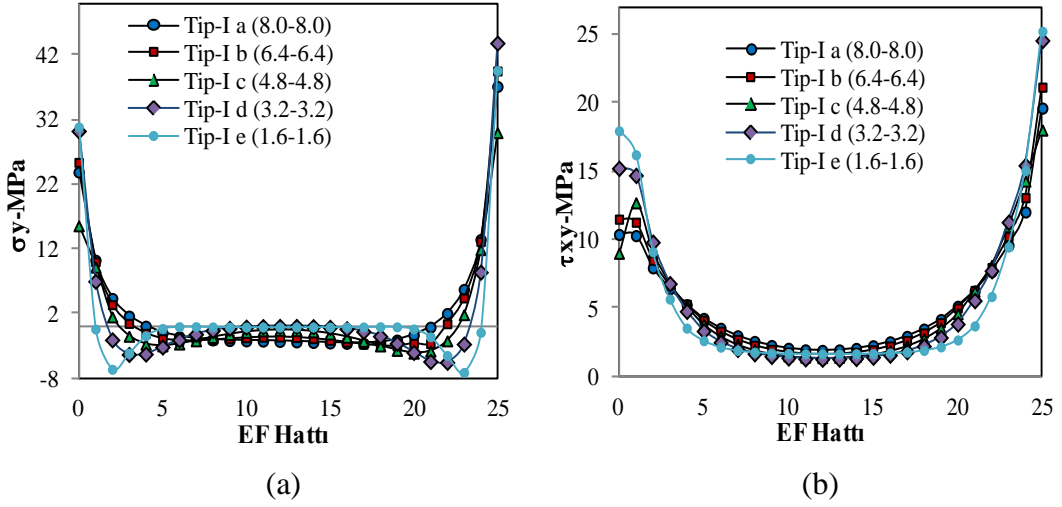
Çizelge 4.8 Deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen ortalama hasar yükü

Numune Tipi	W-L (Genişlik-Bindirme Uzunluğu)	Yapışma Alanı (mm ²)	Deneysel Hasar Yükü F_{EXP} (N)	Sonlu Elemanlardan Elde Edilen Hasar Yükü F_{SEY} (N)	F_{SEY}/F_{EXP}
Tip I a	25-25	625	9094	8860	0,97
Tip I b	20-25	500	5381	5530	1,02
Tip I c	15-25	375	4311	4420	1,02
Tip I d	10-25	250	3980	3860	0,97
Tip I e	5-25	125	1827	1860	1,02
Tip II a	25-25	625	9094	8860	0,97
Tip II b	25-20	500	6390	6520	1,02
Tip II c	25-15	375	5177	5120	0,98
Tip II d	25-10	250	5039	5010	0,99
Tip II e	25-5	125	2507	2630	1,04

4.2.2. Farklı kalınlıklara sahip numunelerin 3-boyutlu sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar

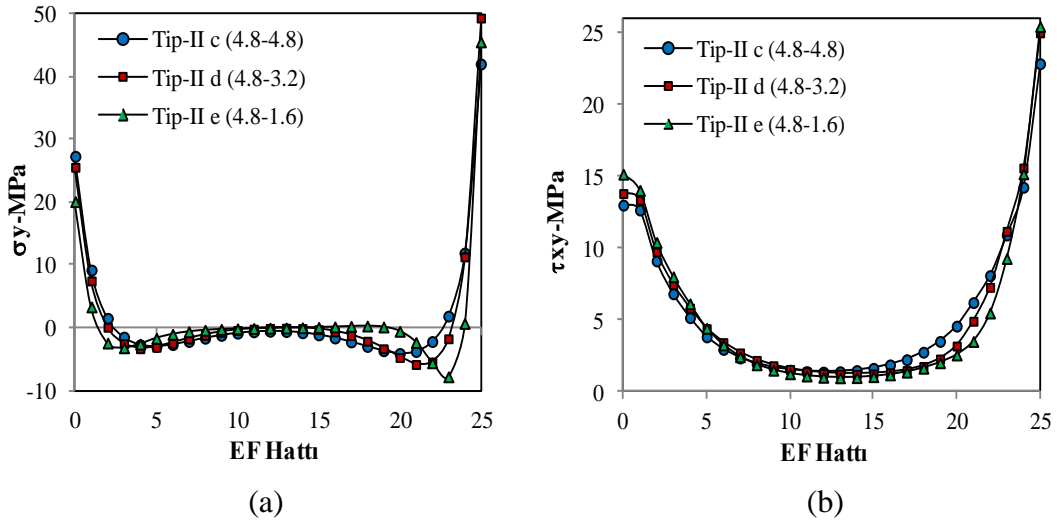
Literatürde yapılan çalışmalar incelenirse, hasarın başlaması açısından en kritik bölgelerin yapıştırıcı ile üst yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde (ABCD yüzeyi) olduğu görülür (Şekil 4.19). Bu yüzden gerilme dağılımları, farklı genişlik-bindirme uzunluğuna sahip numune tipleri için yapılan analizlerde olduğu gibi EF hattı üzerinden çizilmiştir.

Gerilme analizlerinde, EF hattında oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırmak ve analiz etmek için 3000 N'luk çeki yükü altında meydana gelen gerilme dağılımları incelenmiştir.



Şekil 4.28. Farklı kalınlıklara sahip Tip-I numuneleri için EF hattı boyunca gerilme dağılımları:

*a. Sozulma gerilmeleri (σ_y), b. Kayma gerilmeleri (τ_{xy})



Şekil 4.29. Farklı kalınlıklara sahip Tip-II numuneleri EF hattı boyunca gerilme dağılımları:

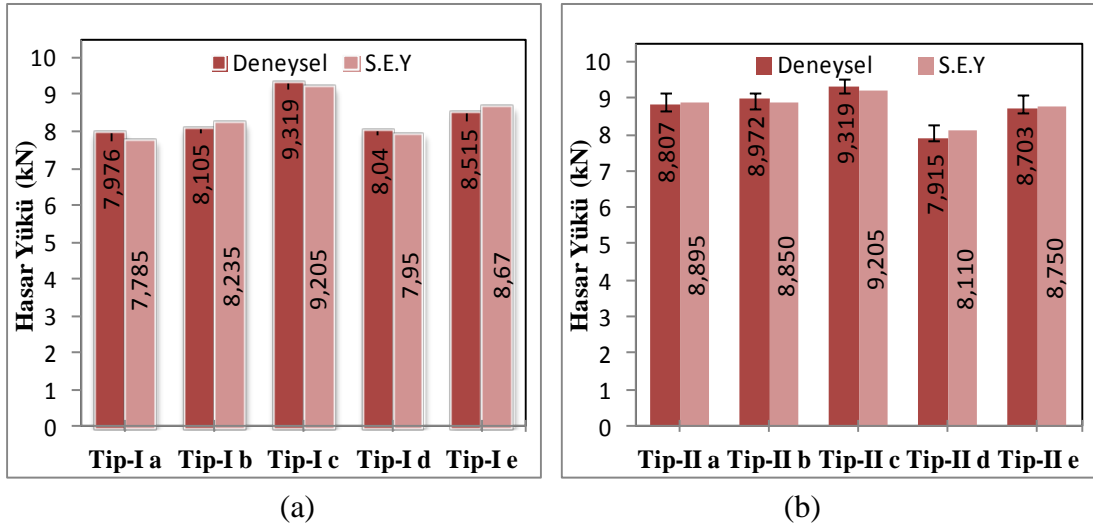
*a. Sozulma gerilmeleri (σ_y), b. Kayma gerilmeleri (τ_{xy})

Alt ve üst malzeme kalınlığı aynı olan Tip-I bağlantısı için Şekil 4.28 a ve b'de verilen grafiklerden ve alt malzeme kalınlığı sabit üst malzeme kalınlığı ise değişen Tip-II bağlantısı için Şekil 4.29 a ve b'de sozulma (σ_y) ve kayma gerilme dağılımlarının (τ_{xy}), EF hattı doğrultusunda (bindirme uzunluğu boyunca) ve (E ve F noktaları) maksimum

değer alırken, uçlardan merkeze doğru gidildikçe bu gerilme değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir.

Gerilme dağılımları incelendiğinde, plastik deformasyon bindirme bölgesinin uçlarında meydana gelen ve hasara neden olan soyulma gerilmelerini (σ_y) ve kayma gerilmelerini (τ_{xy}) artırmaktadır. Ayrıca soyulma ve kayma gerilmelerindeki artış oranı deneylerden elde edilen hasar yüklerini desteklemektedir.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş malzeme kalınlıkları değişen Tip-I ve Tip-II tek tesirli bağlantı geometrileri için 500 N'luk adımlar ile ortalama hasar yükü elde edilmiştir. Bu değerler deneysel yöntemle elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 4.30).



Şekil 4.30. Deneyden ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen hasar yükleri:

*a. Tip-I, b. Tip-II

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Çekme yüküne maruz farklı genişlik ve farklı kalınlıklardaki malzemeler kullanılarak elde edilen tek tesirli bindirme bağlantı konfigürasyonlarının mekanik davranışlarını deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel ve nümerik analizler sonunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarda bindirme uzunluğunun artırılması, bağlantının yük taşıma ve yer değiştirme kapasitesinin değerini artırmaktadır. Ancak bindirme uzunluğunun artırılmasından ziyade genişliğinin artırılması, bağlantının hem yük taşıma hemde yer değiştirme kapasitesini daha fazla artırmaktadır.
- Aynı yapıştırma alanına sahip bağlantılarda, bindirme uzunluğunu artırmak yerine genişliğin artırılması bağlantının yük taşıma kapasitesini yaklaşık %20 ile %40 arasında artırmaktadır. Ancak aynı yapıştırma alanına sahip bağlantılarda, yapıştırma alanı azaldıkça genişliğin etkisinin daha fazla olduğu ve bağlantının yük taşıma kapasitesindeki artış oranını yaklaşık %40 ile %85 'e kadar çıkarmaktadır.
- Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bağlantılarda yapıştırma alanı dikdörtgenden kareye doğru gidildikçe bağlantının yük taşıma kapasitesindeki artış oranı artmaktadır. Ayrıca bağlantıların deneylerinden elde edilen hasar yüzeyleri incelenmiş olup, genel olarak kohesiv ve özel kohesiv hasar modu meydana gelmiştir.
- Aynı yapıştırma alanına sahip bağlantılarda, bindirme uzunluğuna göre genişliğin artması, bindirme uzunluğunun uçlarında (E ve F) meydana gelen soyulma gerilmelerini azaltmaktadır. Bu azalma bağlantının yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Ancak uçlarda meydana gelen soyulma gerilmelerindeki azalma aynı oranda olmayıp, yapıştırma alanının azalması bu oranı artırmaktadır. Sonlu elemanlar analizden elde edilen bu sonuçlar, deneylerden elde edilen sonuçlarla son derece uyumludur.

- Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda malzeme kalınlığı bağlantı mukavemeti üzerine etkisinin olduğu, ancak bu etkinin önemli bir seviyede olmadığı anlaşılmaktadır.
- Malzeme kalınlığını artırılması bağlantının hasar yükünün artırmayıp, aksine bağlantının ağırlığını artırarak sisteme daha fazla yük gelmektedir. Örneğin malzeme kalınlığı 4,8 mm olan bağlantı tipi, kalınlığı ağırlık bakımından %66 daha fazla olan 8 mm bağlantı tipine göre yaklaşık % 17 daha fazla yük taşımıştır.
- Malzeme kalınlığının artması veya azalması ile edilen sonuçlar iki faktörün kombinasyonuna bağlıdır: malzemenin rijitliği ve eğilme momenti. Malzeme kalınlığı 4,8 mm olan bağlantı tipinde bu iki faktör birbiriyle uyumlu olup, bağlantının yük taşıma kapasitesini maksimum yapmaktadır.
- Malzeme kalınlığının farklı olduğu Tip-I ve Tip-II c,d,e için verilen bindirme bölgesinde meydana gelen soyulma (σ_y) ve kayma gerilmeleri (τ_{xy}) dağılımları, deneylerden elde edilen sonuçları desteklemektedir. Ayrıca nümerik analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile uyum içerisindedir.

KAYNAKLAR

- Adams, R.D., and Peppiat, N.A., 1974. Stres Analysis of Adhesive Bonded Lap Joints, *Journal of Strain Analysis*, 9(3) 185-196.
- Adams, R.D. and Wake, W.C., 1984. *Structural Adhesive Joints*. Elsevier Applied Science Publishers, London.
- Adin, H., Turgut, A., 2013. The Effects of Width on the Strength of Adhesively Bonded Z Joints Subjected to Tensile Loads. *Journal of Adhesion*. 89,1–18.
- Akpınar, S., 2008. Kaymaya Maruz Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Akpınar, S., 2012. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş T-bağlantılarda Üç Boyutlu Gerilme analizi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Akpınar, S., 2013a. Effects of Laminate Carbon/Epoxy Composite Patches on the Strength of Double-Strap Adhesive Joints: Experimental and Numerical Analysis. *Materials and Design*, 51, 501-512.
- Akpınar, S., Doru, M.O., Ozel, A., Aydın, M.D. and Ghaffarzadeh, H.J., 2013b. The Effect of the Spew Fillet on an Adhesively Bonded Single-Lap Joint Subjected to Bending Moment. *Composites Part B*, 55, 55-64.
- Akpınar, S., 2013c. Effects of Different Curvature Patches on the Strength of Double-Strap Adhesive Joints. *The Journal of Adhesion*, 89,937-947.
- Akpınar, S. and Aydın, M.D., 2014. 3-D Non-Linear Stress Analysis on the Adhesively Bonded Composite Joint Under Bending Moment. *International Journal of Mechanical Science*, 81,149-157.
- ASTM D1002, 1983. Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (metal-to-metal).
- ASTM E8, 1999. Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials.
- ASTM D2651-01, 2008. Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding.
- Aydın, M.D., 2003. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Tek Tesirli Bindirme Bağlantısının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bigwood, D.A. and Crocombe, A.D., 1989. Elastic Analysis and Engineering Design Formulate for Bonded Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 9(4), 229-242.
- Bigwood, D.A. and Crocombe, A.D., 1990. Non-Linear Adhesive Bonded Joint Design Analyses. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10 (1), 31-41.
- Costa, M.H.S., Monteiro, A.H. and Palazzetti, R., 2012. Failure Analysis of Adhesively Bonded Joints in Composite Materials. *Materials and Design*, 33, 242-247.
- Crocombe, A.D., Bigwood, D.A. and Richardson, G., 1990. Analyzing Structural Adhesive Joints for Failure. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 10 (3), 167-178.
- Crocombe, A.D., Adams, R.D., 1981. Influence of the Spew Fillet and Other Parameters on the Stress Distribution in the Single Lap Joint. *Journal of Adhesion*, 13,41–55.

- Dorn, L., Liu, W., 1993. The Stress State and Failure Properties of Adhesive-Bonded Plastic/Metal Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesive*, 13,21–31.
- Doru, M.O., Ozel, A., Akpınar, S. and Aydın, M.D., 2014. The Effect of the Spew Fillet on Adhesively Bonded Single-Lap Joint Subjected to Tensile Loading: Experimental and 3-D Non-Linear Stress Analysis. *The Journal of Adhesion*, 90,195-209.
- Duncan, B. and Dean, G., 2003. Measurement and Models for Design with Modern Adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23, 141-149.
- 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.
- Gali, S., Dolev, G., and Ishai, O., 1981. An Effective Stress-Strain Concept in The Mechanical Characterization of Structural Adhesive Bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1(3), 135-140.
- Gediktaş, M., 1995. Makine Elemanları Bağlama Elemanları Konstrüksiyon ve Hesap”, 4.Bölüm, Çağlayan Kitabevi, Beyoğlu İstanbul, 104-119.s.
- Grant, L.D.R., Adams, R.D. and da Silva L.F.M., 2009. Experimental and Numerical Analysis of Single-Lap Joints For the Automotive Industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29 (4), 405-413.
- Goland, M. and Reissner, E., 1944. The Stresses in Cemented Joints, *Journal of Applied Mechanics*, 11, A17-A27.
- He, X., 2011. A Review of Finite Element Analysis of Adhesively Bonded Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesive*, 31, 248–264.
- He, X., 2011. FEA of Stress Behavior in the Single-Lap Adhesive Joint. *International Conference on Advanced Materials and Computer Science*, Chengdu.
- Higgins, A., 2000. Adhesive Bonding of Aircraft Structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20 (5), 367-376.
- ISO 10365, 1992. Adhesives- Designation of main failure patterns.
- ISO 4587, 1995. Adhesives- Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies.
- ISO 15166-1, 1998. Adhesives- Methods of preparing bulk specimens- Part 2: Two-part systems.
- ISO 527-2, 1993. Plastics- Determination of tensile properties- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics.
- ISO 2818, 2009. Plastics- Preparation of test specimens by machining.
- İşcan, B., 2007. Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Z Tipi Bağlantıların Mekanik Analizi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Jennings, C.W., 1972. Surface Roughness and Bond Strength of Adhesives. *Journal of Adhesion*, 4,25-38.
- Kayacan, R., 1988. Yapıştırma ve Metal Bağlantılar İçin Yapıştırıcı Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kim, T.H., Kweon, J.H., Choi, J.H., 2008. An Experimental Study on the Effect of Overlap Length on the Failure of Composite-to-Aluminum Single-Lap Bonded Joints. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27 (10),1071–1081.
- Kinloch, A. J., 1987. *Adhesion and Adhesive Science and Technology*. First Edition, Chapman and Hall.

- Kong, F.R., You, M., Zheng, X.L., 2008. Three-Dimensional Finite Element Analysis of the Stress Distribution in Bi-Adhesive Bonded Joints. *Journal of Adhesion*, 84,105–124.
- Kumar, S., Pandey, P.C., 2010. Behaviour of Bi-adhesive Joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24 (7),1251–1281.
- Loctite Worldwide Design Handbook, 1998.
- McBain, J.W. and Hopkins, D.G., 1925. On Adhesives and Adhesive Action. *Journal of Physical Chemistry*,29(2),188-204.
- Marques, E.A.S., da Silva, L.F.M., 2008. Joint Strength Optimization of Adhesively Bonded Patches. *Journal of Adhesion*, 84,915–934.
- Ozel, A., Aydın, M.D. and Temiz, Ş., 2004. The Effects of Overlap Length and Adherend Thickness on the Strength of Adhesively Bonded Joints Subjected to Bending Moment. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18(3), 313-325.
- Ozel, A., Temiz, S. and Aydın, M.D., 2005. Effect of Overlap Length on Durability of Joints Bonded With a Pressure-Sensitive Adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19 (1), 57–71.
- Ozel, A., Yazıcı, B., Akpınar, S., Aydın, M.D. and Temiz, S., 2014. A Study on the Strength of Adhesively Bonded Joints With Different Adherends. *Composites Part B*, 62,167-174.
- Pinto, A.M.G., Campilho, R.D.S.G., Mendes, I.R., Baptista, A.P.M., 204. Numerical and Experimental Analysis of Balanced and Unbalanced Adhesive Single-Lap Joints Between Aluminium Adherends. *Journal of Adhesion*, 90: 89-103.
- Piresa, I., Quintinoa, L., Durodolab, J.F., Beevers, A., 2003. Performance of Bi-Adhesive Bonded Aluminium Lap Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesive*, 23(3),215–223.
- Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M., Antunes, F., 2011. Effect of Adherend's Rigidity on the Shear Strength of Single Lap Adhesive Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31, 193-201.
- Sayman, O., 2012. Elasto-Plastic Stress Analysis in an Adhesively Bonded Single-Lap Joint, *Composites Part B*, 43(2), 204-209.
- Sayman, O., Ozel, A., Pasinli, A., Ozen, M.,2013. Nonlinear Stress Analysis in Adhesively Bonded Single-Lap Joint, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27 (21), 2304-2314.
- Solmaz, M.Y., 2008. Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Taibi A.A., Boukhili, R., Achion, S. and Boukheli, A., 2006. Bonded Joints With Composites Adherends Part II Finite Element Analysis of Joggle Lap Joints. *International Journal of Adhesion and Adhesive*, 26, 237-248.
- Tek, G., 2011. Tek ve Çift Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında Gerilme Analizi. Y.Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Temiz, Ş., 2003. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri Üzerine Çevresel Faktörlerin Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Temiz, S., 2006. Application of Bi-Adhesive in Double-Strap Joints Subjected to Bending Moment. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 20(14),1547–1560.

- Temiz, S., Akpınar, S., Aydın, M.D. and Özel, A., 2013. Increasing Single Lap Joint Strength by Adherend Curvature-Induced Residual Stresses. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27, 244-251.
- Tezcan, S., 2001. Yapıştırma Bağlantılarının Dinamik Yükler Altındaki Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Tın, S., 2006. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Tasarım ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- TSEN 13887, 2007. Yapısal Yapıştırıcılar-Metallerin ve Plastiklerin Yapışma Öncesi Yüzey Hazırlama Kılavuzu
- Volkersen, O., 1938. Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten Mit Konstanten Laschenquerschriften, *Luftfahrtforschung*, 15, 41-47.
- Vooley, G.R. and Carver, D.R., 1971. Stress Concentration Factors for Bonded Lap Joint. *Journal of Aircraft*, 8, 817-820.
- Voyutskii, S.S., 1963. Autohesion and Adhesion of High Polymers, Wiley-Interscience, New York.
- You, M., Wang, P., Yu, H.Z., Li, M., and Zhao, Y.L., 2012. Numerical Analysis of Bi-Adhesive Bonded Single Lap Composite Joint with Mechanics Analysis. 2nd International Conference on Intelligent Materials and Mechanical Engineering, Yichang.
- Zhao, X., Adams, R.D., da Silva, L.F.M., 2011. Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Prediction. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25 (8), 837-856.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Erzurum'un Aşkale ilçesinde doğdu. İlk, Orta ve Lise Öğrenimini Aşkale'de tamamladı. 2011 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Ağustos 2012 yılında Kafkas Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı'na araştırma görevlisi olarak atandı. Aynı yıl Ankara Üniversitesi Yabancı Diller Yüksekokulu'nda dil eğitiminin ardından Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.