



**YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ KADEMELİ
BAĞLANTILARDA KADEME UZUNLUĞU İLE
BAĞLANTININ HASAR YÜKÜ ARASINDAKİ
İLİŞKİNİN İNCELENMESİ**

Melek DURMUŞ

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: DoÇ. Dr. Salih AKPINAR**

2019

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ KADEMELİ BAĞLANTILARDA
KADEME UZUNLUĞU İLE BAĞLANTININ HASAR YÜKÜ ARASINDAKİ
İLİŞKİNİN İNCELENMESİ**

Melek DURMUŞ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Salih AKPINAR

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2019

Her hakkı saklıdır

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

YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ KADEMELİ BAĞLANTILARDA
KADEME UZUNLUĞU İLE BAĞLANTININ HASAR YÜKÜ ARASINDAKİ
İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Doç.Dr.SalihAKPINAR danışmanlığında, Melek DURMUŞ tarafından hazırlanan bu çalışma 28 / 06 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ana Bilim Dalı Seçiniz Ana Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **Seçin(.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	:	<i>İmza</i>	:
Üye	:	<i>İmza</i>	:
Üye	:	<i>İmza</i>	:
Üye	:	<i>İmza</i>	:
Üye	:	<i>İmza</i>	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması tarafındannolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

28 / 06 / 2019

Melek DURMUŞ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ KADEMELİ BAĞLANTILARDA KADEME UZUNLUĞU İLE BAĞLANTININ HASAR YÜKÜ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Melek DURMUŞ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Salih AKPINAR

Havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde kullanılan kompozit veya farklı tür malzemelerin birleştirilmesinde büyük avantajlarından dolayı sıklıkla tercih edilen birleştirme yöntemlerinden biri yapıştırıcıyla birleştirme yöntemidir. Yapıştırıcıyla birleştirme yönteminde sıklıkla kullanılan bağlantı tipi ise tek tesirli bindirme bağlantı tipidir. Tek tesirli bindirme bağlantılarda, eksantirik yüklemekten dolayı bindirme bölgesinin uçlarında hasara neden olan soyulma gerilmeleri oluşmakta ve bu soyulma gerilmelerini azaltmak için farklı bağlantı tipleri kullanılmaktadır. Bu bağlantı tiplerinden biriside, bindirme bölgesine kademeler açılarak elde edilen kademeli bindirme bağlantı tipidir. Bu çalışmada, çeki yüküne maruz aynı yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantı, tek kademeli bindirme bağlantı ve beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantı tiplerinin mekanik özellikleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum alaşımı, yapıştırıcı olarak ise çift bileşenli DP460 yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır. Sonuç olarak, üç kademeli bindirme bağlantı tipi diğer bağlantı tiplerine göre daha fazla yük taşımaktadır. Ayrıca üç kademeli bindirme bağlantı tipinde kademe uzunluğunun değişmesi bağlantının hasar yükünü önemli derecede etkilemektedir. Deneysel ve nümerik analizden elde edilen hasar yükleri incelendiğinde, nümerik analizde cohesive zone model kullanılması deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının birbiriyle oldukça uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada elde edilen diğer bir sonuç ise, üç kademeli bindirme bağlantısında bindirme bölgesinin uçlarında açılan ilk kademelinin yaklaşık optimum uzunluğunun elde edilmiş olmasıdır.

2019, 65 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, Üç kademeli bindirme bağlantı, Çeki testi, Nümerik analiz.

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE LENGTH OF THE JOINT AND THE DAMAGE LOAD OF THE JOINT IN THE ADHESIVELY BONDED STEP LAP JOINTS

Melek DURMUŞ

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Salih AKPINAR

One of the often preferred bonding methods is the adhesive bonding method because of the great advantages of combining composite or different types of materials used in the aerospace, space and automotive industries. The type of connection that is often used in the method of bonded with adhesive is the single-lap joint connection type. Single-lap joints, due to eccentric loading, peel stresses that cause damage to the ends of the overlap zone are formed and different connection types are used to reduce these stripping stresses. One of these connection types is the type of stepping lap connection obtained by opening the steps to the overlap zone. In this study, have the same bonding area, single lap overlap joint, single step lap overlap joint and have the five different step length three step lap overlap joints types mechanical properties are experimentally and numerically investigated. In the experimental study, AA2024-T3 aluminum alloy as adherend material, the two-component DP460 structural adhesive is used as adhesive. As a result, the connection type to the three-step carries more load than other connection types. In addition, the change in the step length of the three-step joints type to has a significant effect on the damage load of the connection. When the damage loads obtained from the experiments and numerical analysis were examined, it was concluded that using the cohesive zone model in numerical analysis and the results of experimental and numerical analysis were quite compatible with each other. Another result obtained in the study is that the approximate optimum length of the first stage opened at the ends of the overlap zone in the three-step lap joints is obtained.

2019, 65 page

Keywords: Adhesively bonded joints, Three-step lap joint, Tensile testing, Numerical analysis.

TEŞEKKÜR

TEŞEKKÜR

“Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Kademeli Bağlantılarda Kademe Uzunluğu İle Bağlantının Hasar Yükü Arasındaki İlişkinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışma konusunu bana önererek, çalışmamın her aşamasında her konuda destek veren, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen, düzenli ve disiplinli bir şekilde çalışmayı öğreten değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Salih AKPINAR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca her konuda olduğu gibi tez çalışmam sürecinde de desteklerini ve yardımlarını eksik etmeyen başta ikiz kardeşim Meltem DURMUŞ olmak üzere anneme, babama, tüm aileme ve arkadaşlarıma sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Bu çalışmanın yapılacak olan diğer çalışmalara ışık tutmasını temenni ederim.

Melek DURMUŞ
28/Haziran / 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Yapışma.....	1
1.1.1.1. Mekanik Yapışma Teorisi.....	3
1.1.1.2. Adsorpsiyon Teorisi.....	3
1.1.1.3. Difüzyon Teorisi.....	3
1.1.1.4. Elektrostatik Teorisi.....	4
1.1.1.5. Kimyasal Yapışma Teorisi.....	4
1.1.1.6.Zayıf Sınır Tabaka Teorisi.....	4
1.2. Yapıştırıcılar.....	5
1.2.1. Yapısal Yapıştırıcıların Sınıflandırılması.....	6
1.3. Yapıştırma Bağlantıları.....	8
1.3.1. Yapıştırma Bağlantılarında Gerilme Çeşitleri.....	10
1.3.2. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri.....	13
1.3.3. Yapıştırma Yapılacak Yüzey Hazırlama İşlemleri.....	14
1.3.3.1. Yüzey Hazırlama Yöntemleri.....	14
1.4. Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerini Belirlemek.....	16
1.4.1. Bulk Numuneler ile Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerini Belirlemek.....	16
1.4.1.1. Çekme Deneyleri.....	17
1.4.1.2. Kayma Deneyleri.....	18
1.4.1.2.1.Burulma Yöntemi.....	18
1.4.1.2.2. Çentikli Levha (Arcan) Yöntemi.....	18
1.4.1.2.3. Çentikli Kiriş (Iosipescu) Yöntemi.....	18
1.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi	19
1.5.1. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları.....	20
1.5.2. ANSYS Paket Programı.....	20

1.5.2.1. Modelleme.....	21
1.5.2.2. Çözümleme.....	23
1.5.2.3. Sonuçları görüntüleme.....	24
1.6. Cohesive Zone Model ile Sayısal Analiz.....	25
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	27
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	33
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	33
3.2. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantı Numunelerin Hazırlanması.....	34
3.3. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Hasar Yüklerinin Belirlenmesi.....	39
3.4. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Nümerik Analizi.....	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	42
4.1. Tek tesirli, Tek Kademeli ve Üç Kademeli Bindirme Bağlantıların Deneysel Sonuçları.....	42
4.2. Üç Kademeli Bindirme Bağlantıların Nümerik Analizi.....	48
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR.....	60
ÖZGEÇMİŞ.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

T_n^{\max}

Maksimum normal cohesive çekme σ_{\max}

δ_n^{\max}

Deformasyon boyunca elde edilen maksimum normal yer
değiştirme

°

Derece

E

Young modülü

P

Uygulanan yük, N

ϵ_t

Çeki şekil değiştirme değeri

ν

Poisson oranı

σ_t

Çeki gerilme değeri

Kısaltmalar

CZM

Cohesive Zone Model

DCB

Çift Konsal Kiriş

MISO

Multilinear Isotropic Hardening

OSLJ

One Step Lap Joint

SLJ

Single Lap Joint

TSLJ

Three Step Lap Joint

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Yapıştırmanın ek yerlerindeki kuvvetler.....	2
Şekil 1.2	Difüzyonun aşamaları.....	4
Şekil 1.3	Kaynak, perçin ve yapıştırıcılar ile birleştirmede oluşan gerilme yığılımları.....	9
Şekil 1.4	Yapıştırma bağlantısında oluşan “adhezyon” ve “kohezyon”.....	10
Şekil 1.5	Gerilme Tipleri ve Bindirme bölgelerinde gerilme dağılımları: (a)çekme, (b)kesme, (c)soyulma (peel), (d) çekme-makaslama (cleavage).....	11
Şekil 1.6	Yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantı çeşitleri, (a) tek tesirli bindirme, (b) çift tesirli bindirme, (c) boyun bindirme, (d) açılı bindirme, (e) teraslama, (f) tek takviyeli bindirme, (g) çift takviyeli bindirme,(h) alın bağlantı, (i) silindirik bindirme, (j) soyulma.....	12
Şekil 1.7	ISO 527-2'ye göre çekme numuneleri.....	17
Şekil 1.8	Losipescu ve Arcan Test Numuneleri.....	19
Şekil 1.9	Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Yükleme Sırasında Oluşan Soyulma Gerilmesinin Etkisi.....	25
Şekil 1.10	ASTM tarafından önerilen standart D 3433 Cohezive Zone Hasar Modeli.....	26
Şekil 3.1	Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların geometrik parametreleri a) Tek tesirli bindirme bağlantısı, b) Tek kademeli bindirme bağlantısı, c) Üç kademeli bindirme bağlantısı.....	35
Şekil 3.2	Yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmış numuneler.....	36
Şekil 3.3	Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda kullanılan kalıp.....	36
Şekil 3.4	a) Kürleşme sonrası elde edilen bağlantılar, b) Yapıştırma işlemi tamamlanmış bağlantılar.....	37
Şekil 3.5	Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların bindirme bölgesinin sprej boya ile kapatılması.....	38

Şekil 3.6	Çeki yükünün uygulanması ve sınır şartları.....	39
Şekil 3.7	Video ekstensometre, yüksek hızlı kamera ve deneylerde uygulanan yükleme.....	40
Şekil 3.8	Kademeli bindirme bağlantısının sonlu elemanlar modeli.....	41
Şekil 4.1	Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların deneylerinden elde edilen ortalama maksimum hasar yükleri.....	43
Şekil 4.2	Üç kademeli bindirme bağlantısının kuvvet yer değiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.....	44
Şekil 4.3	Üç kademeli bindirme bağlantısının deney esnasında hızlı kamera ile elde edilen hasar görüntüsü, a) Tip 2-21-2, b) Tip 4-17-4, c) Tip 6-13-6,d) Tip 8-9-8, e) Tip 10-5-10.....	45
Şekil 4.4	2-21-2 kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantısının tipinin kuvvete göre hasar görüntüsü.....	46
Şekil 4.5	Beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantılarında çatlak oluşumu ve yayılımı.....	47
Şekil 4.6	DP460 yapıştırıcıya birleştirilmiş bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri.....	47
Şekil 4.7	2-21-2 bindirme uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantı tipinin deneysel ve nümerik analiz görüntüsü.....	48
Şekil 4.8	Üç kademeli bindirme bağlantı tiplerinin deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması, a) Tip III a, b) Tip III b, c) Tip III c, d) Tip III d, e) Tip III e.....	50
Şekil 4.9	Üç kademeli bindirme bağlantı tiplerinin kritik hasar yüzeyleri.....	51
Şekil 4.10	Tip IIIa bağlantı tipinden elde edilen kritik hatların karşılaştırılması, a) soyulma gerilmesi (σ_y), b) kayma gerilmesi (τ_{xy}).....	52
Şekil 4.11	Tip IIIa, b, c, d ve e bağlantı tiplerinin ABCDEF hattı boyunca elde edilen gerilme dağılımları; a) σ_x , b) σ_y , c) σ_z , d) τ_{xy} , e) τ_{yz} , f) τ_{xz}	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge1.1	Temel hasar tipleri (ISO 10365).....	13
Çizelge 3.1	AA2024-T3 Alüminyum Alaşım Malzemenin ve DP460 Yapısal Yapıştırıcının Mekanik Özellikleri.....	33
Çizelge 3.2	Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar için deneysel parametreler.....	38
Çizelge 3.3	CZM modeli için DP460 yapıştırıcısının özellikleri.....	41



1. GİRİŞ

Eski çağlardan beri farklı veya aynı malzemeleri birbirine eklemek ve onları kullanım yerine ve amacına uygun olarak bir arada tutmak maksadıyla birçok malzeme ve teknik bulunmaktadır. Kaynak, lehim, cıvata, perçin gibi yıllardır kullanılan bağlantı yöntemlerine alternatif olarak bağlantı güvenirliliğinin gerektiği havacılık, uzay, otomotiv, altyapı sistemi, tıp, elektronik paketleme, spor, inşaat ve deniz endüstrilerinde yapıştırıcı teknikleri kullanılmaktadır (Temiz 2003).

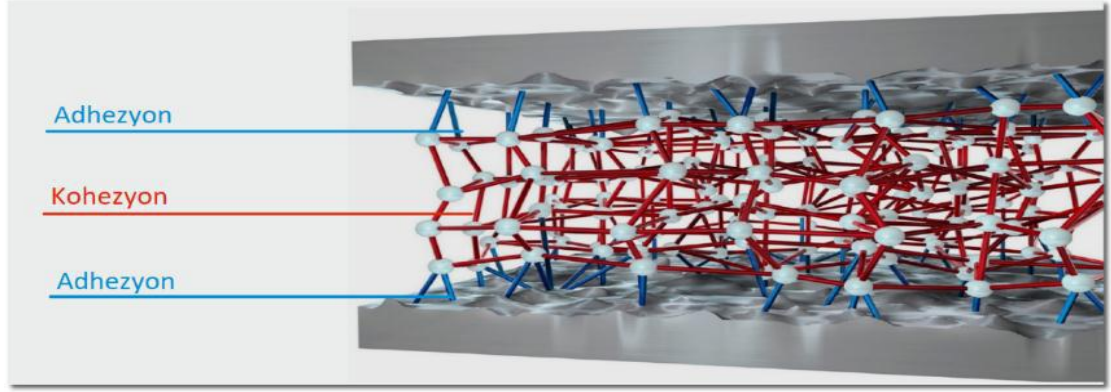
Yapıştırıcı, malzemeleri yüzey etkileşimleri ile bir arada tutabilen malzeme olarak tanımlanmıştır (ASTM D907-74 1974). Son yıllarda yapıştırıcılar üzerine yapılan çalışmalarda yapıştırma bağlantılarının bazı avantajlarından dolayı birçok alanda kullanılmıştır.

Alüminyum bağlantı elamanının yüksek yük kapasitesi, basit imalat yöntemleri ve tekrar üretilme kolaylıkları ile yapıştırıcılara göre bazı avantajlara sahip olmasına rağmen imalatçıların beklentilerini 1970'lere kadar karşılayamamıştır. Üretim ve bakım maliyetlerini azaltma, iyileştirilen yapısal etki (uniform yük dağılımı ve daha hafif yapı), yüksek performans ve kalite imalat kavramları öne çıktığı için imalatçılar tüm bu özellikleri rahatlıkla karşılayabilecek durumda olan yapıştırıcılara önem verdiler. 1970'lerde uçak imalatlarında yapıştırıcıları kullanmaya başladılar (Kodakoğlu 1996).

Yapıştırıcılar, malzemelerin birleştirilmesinde birçok avantaj sağladıklarından dolayı hemen hemen tüm sektörlerde kullanımı hızla artmaktadır.

1.1. Yapışma

Yapışma, malzeme ile yapıştırıcı arasındaki çekiciliktir (Kinloch 1987). Yapışma olayında adhezyon ve kohezyon olarak adlandırılan iki mekanizma vardır. Adhezyon, temel olarak farklı iki malzeme arasındaki çekim kuvvetidir (Pizzi 1994). Kohezyon ise yapıştırıcı molekülleri arasında oluşan kuvvettir.



Şekil 1.1. Yapıştırmanın ek yerlerindeki kuvvetler (Loctite 1988).

Malzemelerin yapıştırıcı ile birleştirilmesi, mekanik bağlantı elemanları kullanılmasıyla kıyaslandığı zaman önemli avantajları vardır. Yapıştırıcı yük ve gerilimi tüm birleşme yüzeyine yaydığı için statik, dinamik yüklerin düzgün dağılmasını sağlar ve gerilmenin belirli noktalarda yoğunlaşmasına engel olur. Dolayısıyla yapıştırıcıyla birleştirilmiş bir yapışma bağlantısı, bükülme ve titreşime, mekanik yöntemler ile (örneğin perçin) yapılan bağlantılardan daha sağlamdır (Loctite European Group).

Malzeme ve yapıştırıcının temas etmesiyle de yapışma bağlantı sistemi oluşur. Bağlantı sistemi malzeme, yapıştırıcı uygulanan yüzey işlemleri ve malzeme ile yapıştırıcı arasındaki ara fazlardan oluşur. Yapışma bağlantılarının dayanımlarını değerlendirmek bu bileşenlere etki eden dış yüklere, mekanik ve çevresel faktörlere bağlıdır. Yapıştırma bağlantılarının dayanımı sadece bu faktörlere değil malzeme, yapıştırıcı, malzeme ile yapıştırıcının etkileşimi, bağlantı geometrisi ve şartları, bağlantıdaki artık gerilmeler ve yapıştırmada oluşan hatalara bağlıdır. Yapışmanın iyi olması ve yapıştırıcı ile malzemenin iyi etkileşimi bağlantı performansını etkileyen faktörlerdir ve bu yüzden yukarıdaki etmenler dikkate alınmalıdır. (Parvatareddy 1997).

1.1.1.Yapışma Teorileri

Yapışma mekanizmalarını moleküler, mikroskobik ve makroskobik kavramlarla alınıp bu teoriler bilim insanları tarafından ortaya atılmıştır.

1.1.1.1. Mekanik Yapışma Teorisi

Katı yüzeye yapıştırıcı sürüldüğünde, yapıştırıcı malzemenin gözeneklerine girer ve katlaşmasıyla mekanik tutunmanın olacağı dolayısıyla iyi bir yapışma gerçekleşecektir (McBain vd. 1925). Malzeme yüzeylerini pürüzlendirmek ve yüzey temizleme işlemlerini iyi gerçekleştirmek yapıştırıcının malzeme yüzeyine daha iyi yayılmasını sağlar (Jennings 1972).

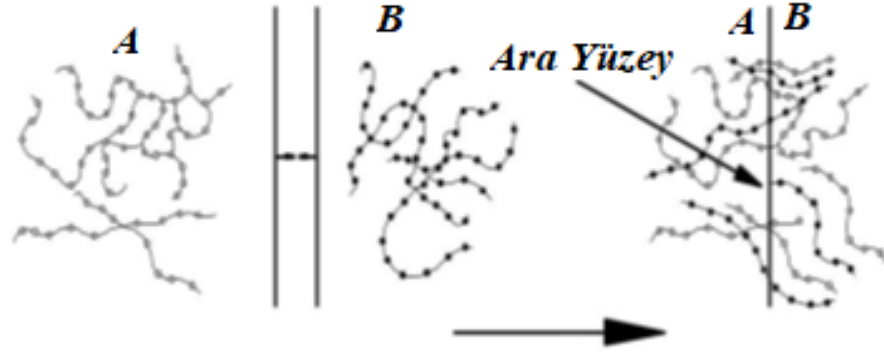
1.1.1.2. Adsorpsiyon Teorisi

Malzeme ile yapıştırıcı arasında temasın iyi olması ile ara yüzeyler arasında atomlar arası ve moleküller arası kuvvetlerle yapışmanın gerçekleştiğini söyler. Yapıştırıcı ve malzeme ara yüzeyindeki kuvvetler genel olarak iki kategoride gruplanmaktadır.

- a) İyonik, kovalent ve metalik bağları içeren birincil kuvvetler.
- b) Van der Waals kuvvetleri, dipole-dipole, induced dipole-dipole, hidrojen bağları ve asit-baz iç etkileşimini içeren ikincil kuvvetler (Kinloch 1980).

1.1.1.3. Difüzyon Teorisi

Yapıştırıcı ve malzeme arasında moleküler seviyede difüzyon gerçekleşmesidir. Oluşmuş difüzyonun derecesi, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki moleküller uygunluğa ve yapıştırılan malzemenin hacmine bağlı olarak değişir. (Carpenter 1999). Bu teori; iki komşu faz arasında molekül alışverişini kabul etmektedir (Voyutski 1963). Difüzyon Şekil 1.2' de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Difüzyonun aşamaları (Fourche 1995).

1.1.1.4. Elektrostatik Teorisi

Hesaplanan elektrostatik kuvvetleri van der Waals kuvvetleriyle karşılaştırılmış ve metal-yapıştırma bağlantısındaki yapışması deneysel olarak ölçülmüştür. Elektrostatik yapışmaya sağladığı katkının, van der Waals kuvvetleri ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğu ve ölçtüğü yapışma işinin de elektrostatik ve van der Waals kuvvetlerin toplamından daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır (Skinner 1953).

1.1.1.5. Kimyasal Yapışma Teorisi

Moleküllerin adhezyon olayını iyonik ve kovalent bağ ile meydana getirmesidir. Bağların yapıştırıcı ve malzeme arasında yüksek bağ dayanımı oluşabileceğini söyler.

1.1.1.6. Zayıf Sınır Tabaka Teorisi

Temiz yüzeylerde daha kuvvetli yapışma işlemi olacağını söyler. Yüzeyler arasında kirleten tabakaların var olması durumunda bağlantı zayıflar. Yağ, pas, gres vb. zayıf sınır tabakalarının oluşmasına fırsat oluşturur. Düşük yüzey enerjisine sahip polimerler dışında kuru ve temiz malzeme yüzeyi daha kuvvetli yapışma işleminin gerçekleşmesine katkı sağlar.

1.2. Yapıştırıcılar

Yapıştırıcı tanımlanacak olursa malzemeleri bir arada tutan madde olarak tanımlaması yapılır. Yapışma ise iki yüzeyin moleküller, iyonlar ve atomlar arası etkileşimlerinden oluşan çekim kuvvetleri ile bir arada tutulması olarak tanımlanır. Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme yüzeyi arasında gerçekleşen olay yapışma olayıdır (Kinloch 1987).

Yapışma bağlantılarının dayanımlarının etkili olabilmesi, yapışma uygulanacak malzeme yüzeyi, yapıştırıcının özellikleri ve yapısı, yapıştırıcının kürleşme şartları gibi yapışma olayını oluşturan faktörler göz önünde tutulmalıdır. İyi bir şekilde bağlantı yapılması isteniyorsa malzeme yüzeyinde üretimden veya çevresel etkilerden kaynaklı olabilecek herhangi bir olumsuz etmen, yapıştırıcının yüzeye iyi dağılmasını engelleyeceğinden dolayı, yüzeyden temizlenmeli ve yapışma şartları sağlanmalıdır.

Yapıştırma yapılacak malzeme, malzemenin şekli, bağlantı mukavemeti, çalışma şartları gibi faktörlere dayanarak farklı sınıflara ayrılmaktadır. Kullanımları sırasındaki fiziksel veya kimyasal durumlarına göre sıvı yapıştırıcılar, karışım halindeki yapıştırıcılar, hamur halindeki yapıştırıcılar, toz durumundaki yapıştırıcılar ve katı halde bulunan yapıştırıcılardır. Kullanım yerlerine göre ise tabakalı yapıştırıcılar, basınca duyarlı yapıştırıcılar ve yapısal yapıştırıcılar olmak üzere üç gruba ayrılır (Apalak 2003).

Tabakalı yapıştırıcılar: Malzemenin yüzey alanının büyük bir kısmını oluşturur. Etiketleme ve paketleme gibi daha az yük taşıyan yerlerde kullanılmaktadır.

Basınca duyarlı yapıştırıcılar: Geçici birleşme ve düşük yük taşıyan yerlerde kullanılmaktadır.

Yapısal yapıştırıcılar: Yapışma bölgesi tüm malzemenin küçük bir kısmına sahiptir. Sürekliliği kaybolmadan yük taşıyabilen ve yüksek yük taşıyabilen yapıştırıcılardır. Bu yüzden uzay sanayisi, gemicilik ve otomotiv gibi sektörlerde sıklıkla kullanılmaktadır.

1.2.1. Yapısal Yapıştırıcıların Sınıflandırılması

Yapısal yapıştırıcılar kimyasal reaksiyon ile sertleşerek iyi bir yapışma oluşmasını sağlar. En çok kullanılan yapısal yapıştırıcılar aşağıdaki gibidir.

1. Akrilik,
2. Anaerobik,
3. Silikonlar,
4. Epoksiler,
5. Poliüretan,
6. Fenolikler,
7. Siyanoakrilikler.

1. Akrilikler: Bu yapıştırıcılar iki bileşenli olup yapıştırma yüzeyine reçine ve sertleştirici sürülerek yapılır. Hem neme karşı çok iyi dayanıma sahiptirler hem de iyi bir soyulma mukavemetleri vardır. $-110^{\circ}\text{C}/120^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında elastik özelliklerini korumalarına rağmen yanıcı oldukları için yüksek sıcaklıklarda bozulurlar.

2. Anaerobik: Havada sıvı halde bulunan bu yapıştırıcı tipinden oksijen uzaklaştırmayla kürleşmesi gerçekleştirilir. Bunu ise yapıştırıcı uygulandıktan sonra hava girişine engel olacak biçimde kaplama ile gerçekleştirilir. Rutubet ve çözeltilere karşı direnleri yüksek olduğu için 150°C ye kadar olan sıcaklıklarda metal ve termosetlerin yapıştırılmaları için kullanılırlar. Ancak bağlantı dayanımları yüksek olmadığı için genellikle sızdırmazlık olarak kullanılırlar.

3. Silikonlar: 60°C ve 370°C aralığında iyi çalışma şartlarına sahiptir. Esnek zincir yapısına sahip oldukları için iyi soyulma mukavemeti gösterirler. Mikroelektronik endüstrisi ve metal, plastik, cam ve lastiklerin yapıştırılmasında kullanımları yaygındır.

4. Epoksiler: Reçine ile sertleştiriciden oluşan çift bileşenli yapıştırıcılardır. Uygulamadan önce bu iki bileşen karışmış olmalıdır. Yüksek çekme ve kayma dayanımı, sürtünme direnci ve yüksek rijitlik gibi iyi mekanik özellikler gösterdiği için mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kürleşme sıcaklıkları

1. GİRİŞ

oda sıcaklığından yüksek sıcaklık değerlerine kadar değişmektedir. Kürleşmeden sonra yapıştırıcıda meydana gelen daralma artık gerilmeler oluşmasına sebep olmaktadır. 140°C nin üzerinde epoksi bağlantılar bozulmaktadır. Epoksinin plastik ve metal yüzeylerde yapışması zayıf olduğundan dolayı bağlantıda meydana gelmiş olan hasar, kohezifden ziyade adheziftir, yani yapıştırıcı ile esas malzeme arayüzeyinde ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra, epoksi uygulamak amacıyla yapıştırılan ahşap yapılarda hasar, bağlantı yerinde değil ahşap malzemenin kendi içinde oluşmaktadır (Temiz 2003).

5. Poliüretan: Epoksi yapıştırıcılarla karşılaştırıldığında çalışma ömürleri daha kısa ve nemli ortamlara daha hassastırlar. Düşük sıcaklıklarda epoksilerden daha iyi mukavemet gösterirler. Oda sıcaklığında veya ısıtılarak kürleştirilirler. Kürleşme esnasında boyut değişikliği olmadığından artık gerilme oluşması çok azdır. Toksik özellikleri olduğundan dolayı elle teması zararlı olabilir.

6. Fenolikler: Doğal bileşiklerden elde edilemeyen yapıştırıcılardandır. -60°C gibi düşük sıcaklık değerlerinde gevrektirler ve yüksek sıcaklıklarda kürleşirler.

7.Siyanoakrilikler: Dokunulduğu zaman bile hemen yapıştığı için süper yapıştırıcı olarak tanınırlar. Metal, lastik ve plastik yapıştırmada kullanılırlar. İyi temizlenmiş yüzeye ince tabaka halinde sürülerek bağlantı gerçekleştirilir. Yapıştırıcının kürleşmesi için nem ile reaksiyona girmesi gerekir. Soyulma mukavemetleri düşüktür.

Bu yapısal yapıştırıcılar olarak bilinenler dışında yapısal olmayan yapıştırıcılar diye adlandırılan ve kimyasal reaksiyonla sertleşen yapıştırıcı türleri ile karşılaştırıldığında daha düşük yapışma mukavemetine sahip olan fiziksel değişimle sertleşen yapıştırıcılarda bulunmaktadır. Bu yapıştırıcı türleri aşağıdaki gibi gruplandırılabilir.

- Sıcak eriyikler
- Ultraviyole yapıştırıcılar
- Kauçuk yapıştırıcılar
- PVA'lar (Polivinil Acetates)
- Basınç gerektirmeyen yapıştırıcılar (Gültekin 2014).

1. GİRİŞ

Yapıştırma bağlantılarında istenilen özellikleri elde etmenin en önemli parametrelerinden biri uygun yapıştırıcı seçilmesidir. Yapıştırıcı seçimi yapılırken aşağıdaki belirtilen bazı hususlara dikkat etmek gerekir (MIL- HDBK-691B 1987).

- Çevresel faktörler
- Yapıştırıcı bağlantısında kullanılmasının düşünüldüğü malzemenin yapışabilme yeteneği
- Çalışma şartları
- Kürleşme şartları ve uygulama yöntemi gibi üretim süreçleriyle ilgili parametrelerin belirlenmesi
- Sağlık şartlarına uygunluk
- Maliyet

1.3. Yapıştırma Bağlantıları

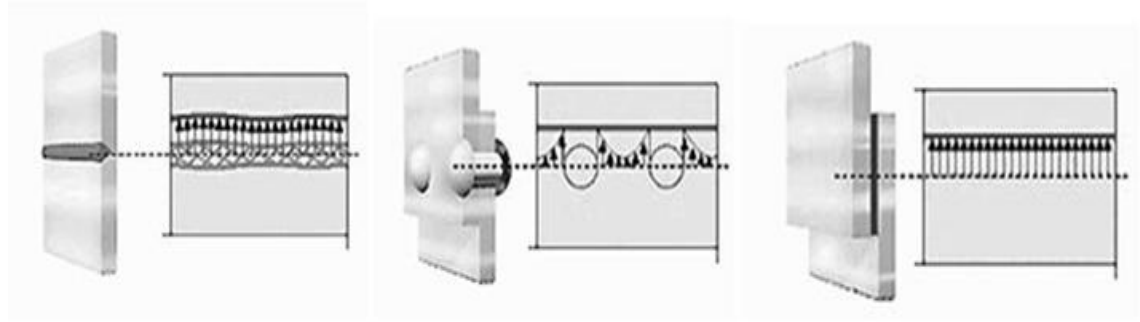
Alternatif bir birleştirme yöntemi ve onarım yöntemi olan yapıştırıcıların diğer yöntemlere göre birçok avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır. Avantajları aşağıdaki gibidir (Akpınar 2008).

- Düzgün gerilme dağılımı elde edilebilir (Şekil 1.3)
- Benzer veya farklı malzemeleri birleştirebilir
- Esas malzemelerin (adherend) özellikleri bozulmaz
- Sızdırmazlık elemanı olarak kullanılabilir
- İnce metal parçaları etkili bir şekilde birleştirebilir
- Isı ve elektrik iletkenliğine karşı yalıtkan malzeme olarak kullanılabilir
- Maliyet açısından etkili ve uygun bir tekniktir
- Yüksek darbe ve titreşim sönümler
- Farklı ve karışık geometri şekilleri birleştirebilir
- Daha pürüzsüz yüzeyler elde edilir
- Korozyon direnci geliştirilebilir
- Dikkat çekici dayanım ve ağırlık oranı

1. GİRİŞ

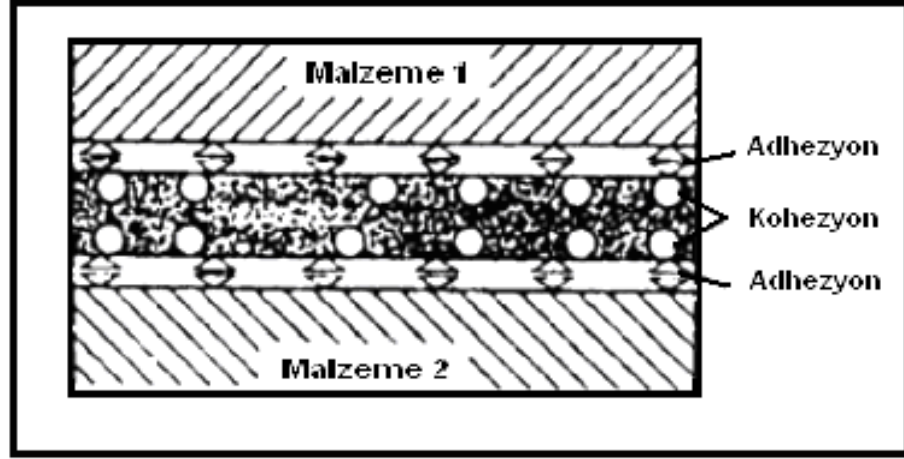
Bu kadar avantajarağmen yapıştırıcı kullanımı bazı dezavantajlara da sahiptir. Bu dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir (Akpınar 2008).

- Kötü ve zor çevre şartları bulunduğunda uzun çalışma ömrü elde etmek maksadıyla bir takım yüzey işlemleri gerekebilir
- Yapıştırma bağlantısının ömrü, maruz kaldığı çevresel şartlara bağlıdır
- Zaman ve sıcaklığa bağımlı olarak yapıştırıcının mekanik özellikleri değişiklik göstermektedir
- Yapısal yapıştırıcılar, mekanik özellikleri iyi (çekme, kesme) olmalarına rağmen, soyulma mukavemetleri düşüktür
- Mukavemet ve toklukları, çekme ve kayma durumlarında nispeten düşüktür.



Şekil 1.3. Kaynak, perçin ve yapıştırıcılar ile birleştirmede oluşan gerilme yığılmaları (Loctite 1998)

Bağlantının mukavemeti iki esas olaya bağlıdır. Bunların birincisi, yapıştırıcının molekülleriyle birbirine bağlanan parçaların yüzeyleri arasında ortaya çıkan ve fiziksel ve kimyasal bir nitelik taşıyan adhezyon olayıdır. İkincisi ise yapıştırıcının iç mukavemetini tayin eden, yapıştırıcı moleküllerinin kendi aralarında bulunan bağ kuvveti anlamına gelen kohezyon olayıdır (Rende 2000) (Şekil 1.4.).

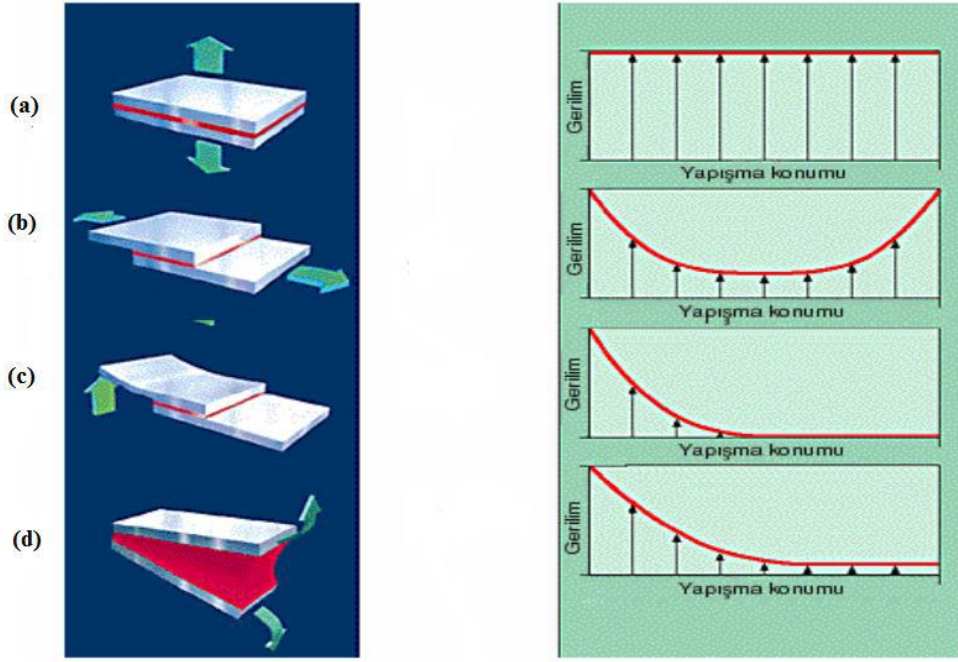


Şekil 1.4. Yapıştırma bağlantısında oluşan “adhezyon” ve “kohezyon” (Rende 2000)

Yapışma bağlantıları kullanılmasının birçok avantajı olmasına rağmen mekanik özelliklerini belirlemede zorluklarla karşılaşmaktadır. Yapışma bağlantılarının mekanik özelliklerini belirlemeye ek olarak yükleme durumunda gerilme dağılımlarını ve dayanımlarını tahmin etmek gerekmektedir.

1.3.1. Yapıştırma Bağlantılarında Gerilme Çeşitleri

Yapışma bağlantıları kullanılan yere göre farklı gerilmeler etkilidir. Bunlar çekme, kesme, soyulma (peel), çekme-makaslama (cleavage) dir. Bağlantı mukavemetlerinden en yüksek verimi elde etmek için, bu gerilme çeşitlerini göz önünde bulundurmamak gerekmektedir (Temiz 2003).



Şekil 1.5. Gerilme Tipleri ve Bindirme bölgelerinde gerilme dağılımları: (a)çekme, (b)kesme, (c)soyulma (peel), (d) çekme-makaslama (cleavage) (Loctite 1988).

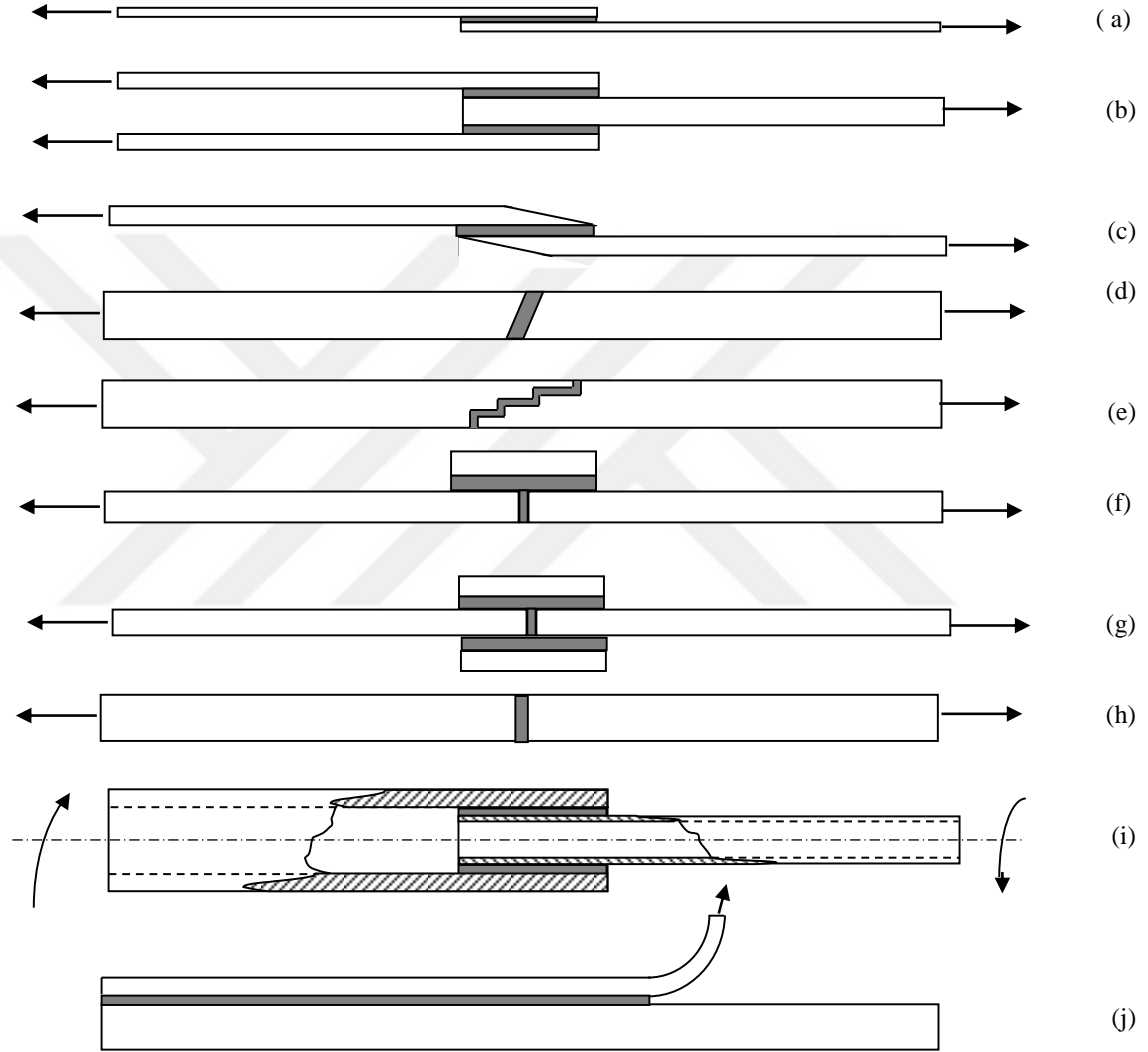
Bağlantılarda istenilen verimin elde edilmesi için gerilme durumları göz önünde bulundurulmalıdır ve ona göre tasarımları yapılmalıdır.

- a) **Çekme:** Bu tip yüklemelerde kuvvetler yapıştırıcı tabakasına dik bir şekilde etkir. Bu kuvvetlerden dolayı oluşan gerilme ise yapışma alanına eşit şekilde dağılır. Fakat kuvvetler eksenden kaçık olarak etkirse, bindirme uzunluğu boyunca düzgün bir şekilde gerilme dağılımı elde edilemez. Buna ek olarak çekme yüklemesi altında yüksek oranda bir eğilme oluşursa, gerilme dağılımı yine bindirme boyunca düzgün bir şekilde olmayacaktır (Temiz 2003).
- b) **Kesme:** Kesme yükleri yapıştırılan alanına düzgün şekilde etki eder. Tüm yapışma alanına etki etmesi bağlantı ömrünü artırır.
- c) **Soyulma:** Bu tür gerilmeler malzemelerin en az birinin esnek olmasına bağlıdır. Bu yükleme çeşidinde bağlantı sınırlarında oluşan gerilme yüksektir. Bağlantı geniş ya da yük düşük olmadıkça yapışma bağlantısı çabuk bozulur.
- d) **Çekme-Makaslama:** Bu tip yüklemelerde, genellikle eksenden kaçık çekme kuvvetinin veya momentinin sonucu olmaktadır. Önceki gerilmelerin tersine bu gerilme yapışma alanına eşit olmayan şekilde etkimektedir. Bağlantının bir tarafında yoğunlaşmaktadır. Bu gerilmeyi karşılamak için yeteri derecede

1. GİRİŞ

yapışma alanına ihtiyaç duyulur. Çekme veya kesme gerilmelerine göre bu alan daha fazla olduğundan dolayı bu tarz bağlantı tavsiye edilmez; nedeni ise maliyeti artırmasıdır (Kayacan 1988).

Mühendislikte yaygın olarak kullanılan bağlantı tipleri Şekil 1.6.'da gösterilmiştir.





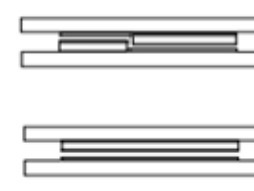
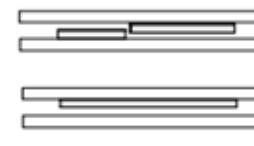


Şekil 1.6. Yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantı çeşitleri, (a) tek tesirli bindirme, (b) çift tesirli bindirme, (c) boyun bindirme, (d) açılı bindirme, (e) teraslama, (f) tek takviyeli bindirme, (g) çift takviyeli bindirme, (h) alın bağlantı, (i) silindirik bindirme, (j) soyulma (Adams and Wake 1984).

1.3.2. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri

Yapıştırıcının veya yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini anlayabilmek için hasar tiplerini belirlemek gerekmektedir. Yapıştırma bağlantılarında, genelde adhezyon ve kohezyon olarak iki hasar tipi vardır (ISO 10365). Temel hasar tipleri aşağıda gösterilen Çizelge 1.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Temel hasar tipleri (ISO 10365).

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

1. GİRİŞ

Adhezyon hasarı, yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı ara yüzeyinde oluşan hasar türüdür. Gözle görülebilen ayrılma olmaktadır. Oluşma nedeni ise yeterince yüzey hazırlama işleminin yapılmaması ve uygun yapıştırıcı kullanılmamasıdır.

Kohezyon hasarı, yapışma bağlantısında yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasında gözle görülebilir bir hasarın olmasıdır. Aşırı yüklenme, sıcaklık gibi etmenlerden dolayı oluşabilir.

Yapışma bağlantılarının mekanik özelliklerini belirlemede hasar tipleri de önemlidir. Normal şartlarda kohezyon hasarı olması gerekirken yüzey hazırlama işleminin düzgün yapılmamasından dolayı adhezyon hasarı gerçekleşir ve bu da mekanik özelliklerini belirlemeyi zorlaştırır. Temel hasar tiplerinin belirlenmesi, bir yapışma bağlantısına uygulanan herhangi bir mekanik testten elde edilen verilerin iyi şekilde anlaşılmasını ve oluşan hasar türlerinin sınıflandırmaya tabi tutulmasını sağlamaktadır. Hasar tipleriyle ilgili temel sınıflandırma Çizelge 1.1’de verilmiştir. Eğer hasar tipibirden çok oluşmuşsa hasar tiplerinin her birinin ortalama yüzde oranlarının tanımlamaları tümünün sonunda verilmesi gereklidir (Akpınar 2008).

1.3.3. Yapıştırma Yapılacak Yüzey Hazırlama İşlemleri

Yapışma bağlantısı, yüzey ile yapıştırıcının adhezyon ve kohezyon kuvvetine bağlıdır. Yapıştırma bağlantılarında yüksek dayanımlar elde etme açısından en önemli aşamalardan biri yüzey hazırlığıdır. Başarılı bir bağlantı yapmak için uygun yüzey temizleme ve uygun yapıştırıcı türü belirlenmelidir.

1.3.3.1. Yüzey Hazırlama Yöntemleri

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının uzun süreli çevre şartlarına maruz kalacağı durumlarda yüzey hazırlanmasında kimyasal ön işlem uygulanmak etkili bir yöntemdir. Alüminyum alaşımlarının yüzey hazırlanmasında kullanılan iki temel yöntem türü, asitle dağlama ve anotlama işlemleridir. Asitle dağlama ve anotlama işlemlerinde çoğunlukla fosforik asit yada kromik asit kullanılmaktadır (ASTM D2651-1990).

1. GİRİŞ

Anotlama işlemi elektrolitik olarak yüzeye koruyucu oksit tabaka oluşturulmasıdır ve sadece alüminyum alaşımlarında kullanılır. Anotlama işleminde fosforik asit kullanılarak yüzeyin yapışma kabiliyetini ve korozyon dayanımını artırmak için yapışma yüzeyinde kristal film tabakası oluşturulur. Parçalar fosforik asit çözeltisine daldırıldığı zaman yüzeylerinde demir fosfat ya da çinko fosfat kristalleri oluşur.

Sülfürik asit-dikromat işlemi alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yüzey hazırlanmada kullanılan etkili, kontrol edilebilir ve güvenilir bir metoddur. Bu yöntem uzay ve havacılık sanayisinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kromik asitle anotlama işlemi, metal yüzeyde kromik asit çözeltisi ile non-kristal film tabakasının oluşturulmasıdır. Bu yöntem uygulandığı zaman yüzeyin yapışma ve korozyon dayanımını artırmaktadır.

Alüminyumun kullanılacağı alanda çevre şartları zor olacak ise alüminyumun korozyondan korunması dikkat edilmesi gereken bir unsurdur. Çözelti ile temizleme ve mekanik aşındırma yöntemleri korozyon dayanımı artırmadıkları için yüksek nem gibi çevresel dayanımın etkili olduğu yerlerde kullanılması tavsiye edilmez. Alüminyum yüzeyler hazırlanırken bazı aşamalar uygulanır. Bunlar;

a-) Yağ, gres atıklarının yüzeyden temizlenmesi için asetonla yıkama,

b-) Perkloretlen buharıyla yağ giderme işlemi,

c-) Aşağıda kimyasal bileşenleri verilmiş olan çözeltilerin birine belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir sürede daldırma işlemi (ASTM D2651-1990).

Sülfürik Asit/Ferrik Sülfat Çözeltisi;

Sülfürik asit (6,5-9,5 N)	%27-36 (ağırlıkça)
Ferrik sülfat	135-165 g/l
Sıcaklık	60-65°C
Daldırma süresi	10-12 dakika

1. GİRİŞ

Sülfürik Asit/Sodyum Dikromat Çözeltisi;

Sülfürik asit (66°Be)	287,9-310 g/l
Sodyum dikromat	28-67,3 g/l
Alüminyum alaşımı-2024	1,5 g/l
Sıcaklık	60-65°C
Daldırma süresi	12-15 dakika

d-) 40 °C de bulunan suya 1-2 dakika daldırma

e-) Oda sıcaklığında bulunan saf suya daldırma

f-) 60 °C deki fırında kurutma

Yüzey hazırlama işlemi yapılan numuneler toz ve kirden uzak tutularak 48 saat içinde yapıştırma işlemi yapılmalıdır. 20 m² lik bir alüminyumun yüzey hazırlaması için yaklaşık 4,5 litre çözelti yeterli olmaktadır (Akpınar 2012).

1.4. Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerini Belirlemek

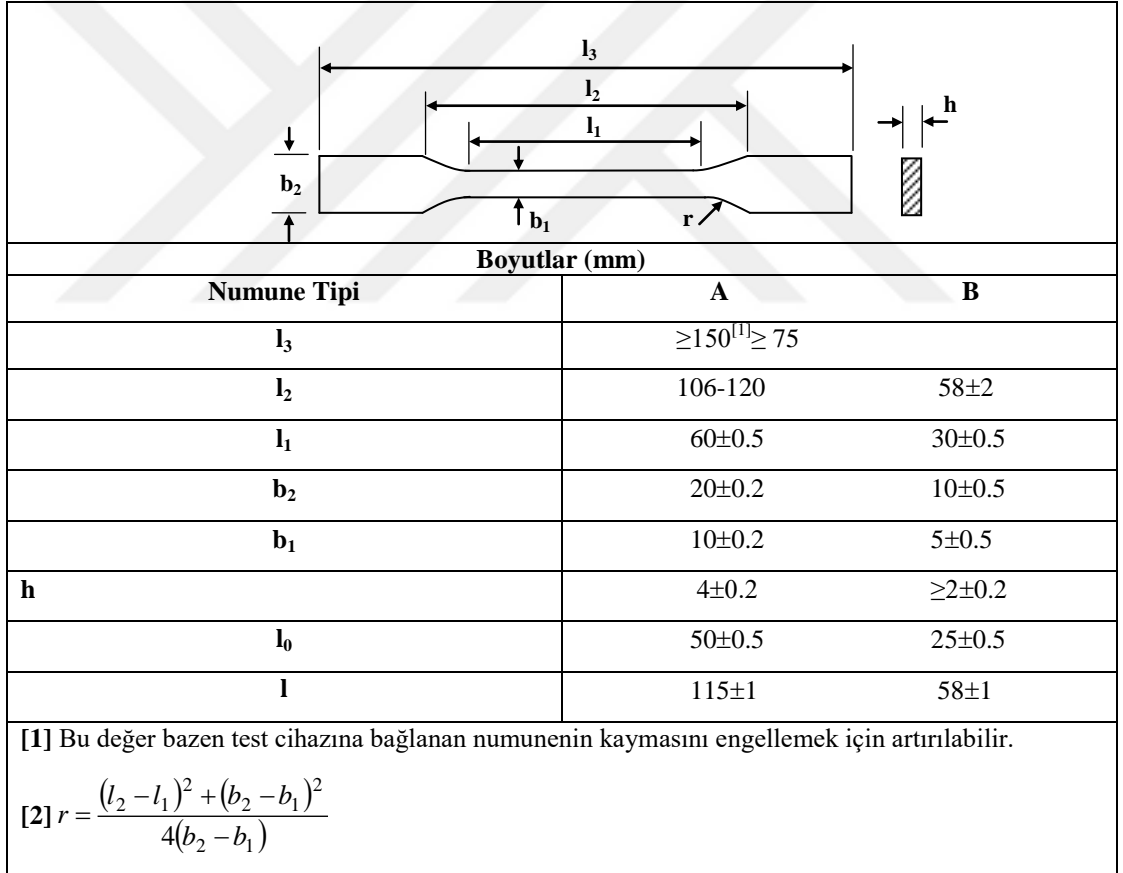
Yapıştırma bağlantılarında en uygun tasarımı belirlemek için mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için de bulk formda numuneler ile bu özellikler test edilir.

1.4.1. Bulk Numuneler ile Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerini Belirlemek

Bulk numuneler, doğrudan yapıştırıcıdan üretilen deney numunelerdir. Genellikle kalıplara yapıştırıcıların yerleştirilerek basınç uygulanarak gerekli kürleşme şartlarında kürleştirilmesiyle elde edilirler. Yük altında gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi veren mekanik özellikler yapıştırıcılarda farklı yükleme yani çekme ve kayma testleriyle belirlenmektedir.

1.4.1.1. Çekme Deneyleri

Çekme deneyleri için numune üretiminde genellikle Şekil 1.7' de gösterilen geometriler kullanılmaktadır. Numuneler hazırlanırken gerçek bağlantıdaki yapıştırıcı kalınlığına göre alınması ideal bir durum olacaktır. Epoksi gibi rijit uzun numuneler için Şekil 1.7. A poliüretanlar gibi esnek kısa numuneler için Şekil 1.7. B şeklinde numune kullanımı uygundur. Yapıştırıcıların sünek özelliklerinden dolayı ince numune üretimi zordur ve bu yüzden 2 mm kalınlığında numunelerin üretimi yapılmaktadır. Numune kalınlığı fazla seçilmesi takdirde kürleşme sırasında ekzotermik reaksiyon oluşması yapıştırıcının yanmasına neden olacağından numune kalınlığının seçimine dikkat etmek gerekmektedir (da Silva 2012).



Şekil 1.7. ISO 527-2'ye göre çekme numuneleri

Yapıştırıcıların çekme deneyi sırasında oluşan gerilme-şekil değiştirme diyagramları kırılma yüküne uyumlu yük hücreleri ve gerinim ölçerler kullanılarak elde edilmektedir.

Bulk numuneler çekme deneyleri yapıldıktan sonra elde edilen gerilme – şekil değiştirme eğrilerini kullanarak bu numunelerin elastisite modülü, poisson oranı, çekme gerilmesi, kırılma anındaki gerinim değeri gibi mekanik özelliklere ulaşılmaktadır.

1.4.1.2. Kayma Deneyleri

Kayma deneyleri, çekme deneyleri kadar gelişmemiş olduğu için yapıştırıcıların bulk numunelerinin kayma testleri sınırlıdır. Fakat farklı yöntemler ile kayma yükü altında bulunan numunelerin mekanik özelliklerini belirlemede farklı bazı yöntemler kullanılmaktadır (Dean ve Duncan 1996).

1.4.1.2.1. Burulma Yöntemi

Burulma yönteminde silindirik bulk numuneler kullanılmaktadır ve bu numunelere burulma momenti (M_b) uygulanır. Bilinen ölçüm uzunluğunda açılma dönmesi (q) bulunur. Bu tip deneysel yöntemler, özel cihazların kullanımını gerektirmektedir. Deneylerde kullanılacak olan bulk numuneler bazı tip yapıştırıcılar için üretilmez ve bu yöntem özellikle küçük şekil değiştirmeleri için doğrudur. Ayrıca numunenin kesiti boyunca düzgün olmayan kayma gerilmelerinin oluştuğu ve plastik şekil değiştirmelerinin oluştuğu bölgede ölçülen gerilme-şekil değiştirme davranışında düzeltmeler yapılması gerektiğine dikkat edilmelidir (Thomas and Adams 1996).

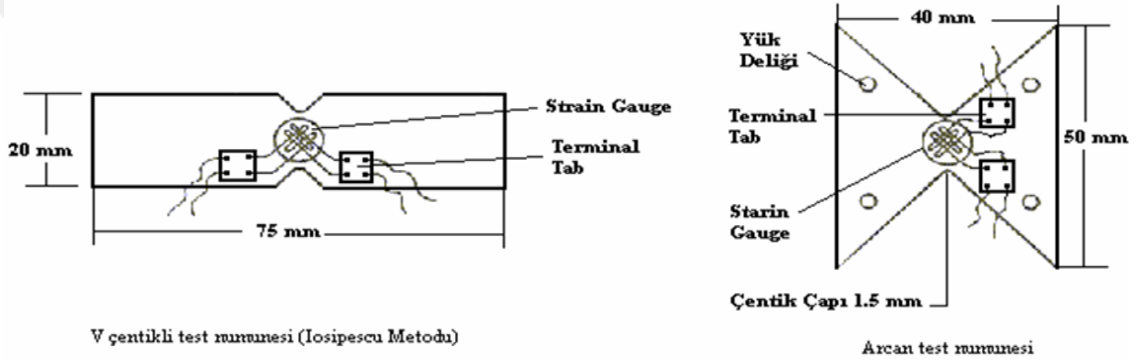
1.4.1.2.2. Çentikli Levha (Arcan) Yöntemi

Bu yöntem yapıştırıcı ve kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlerken daha ince bulk numunelerin kullanılmasına olanak sağlar (Arcan 1978). Strain gauge kullanılmasından kaynaklanan sorunlar özel extensometreler kullanılarak giderilmektedir. %10 dan az kayma şekil değiştirmesi gösteren yapısal yapıştırıcılarda doğru sonuçlar vermektedir (Duncan and Dean 1996).

1. GİRİŞ

1.4.1.2.3. Çentikli Kiriş (Iosipescu) Yöntemi

Bu yöntem Şekil 1.8’ de gösterilen çentikli bulk numuneler kullanılmaktadır. Çentikler arasındaki bölgeye kayma gerilmesi üretilebilecek şekilde yük uygulanmaktadır. Genellikle 75 mm genişliğinde, 20 mm yüksekliğinde ve 4 mm kalınlığında, iki V çentik bulunan bir kesite sahiptir. Strain gauge’ler çentikli bölgelere yerleştirilerek şekil değiştirmeleri hesaplanır. Böyle numunelerin kullanılmasındaki en büyük sorun çentik bölgesinde lokal gerilme yığılmalarının olmasıdır. Bu yığılmalardan dolayı gevrek malzemelerde erken hasar oluşabilmektedir. Bu yüzden de malzemelerin kayma-şekil değiştirme davranışları belirlenemeyebilir (Duncan ve Dean 1996).



Şekil 1.8. Iosipescu ve Arcan Test Numuneleri (Duncan ve Dean 1996).

1.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Herhangi bir fiziksel olguyu daha kapsamlı bir şekilde anlamak ve nicelleştirmek için çoğunlukla kısmi diferansiyel denklemler (PDE’ler) kullanılmaktadır. Son yıllarda bilgisayar işlemlerinin artmasıyla birlikte sayısal teknikler geliştirildi ve bunlardan biri de sonlu elemanlar analizidir. Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık problemleri daha basit yapılara bölerek her bir bölmenin kendi içinde çözümlenmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm yöntemidir. Sonlu elemanlar ile nümerik analiz yapılması ekonomik, emniyetli ve performanslı yapılaşma bağlantısı elde edebilmesinde önemli bir unsurdur. Nümerik yöntemler karmaşık geometri, yük, malzeme özellikleri ve sınır şartlarına uydurulabilmektedirler.

1. GİRİŞ

Nümerik olarak incelenecek bölge, çeşitli küçük geometrik şekilli parçalara ayrılır. Bu parçalara analiz elemanı adı verilir. Bu analiz elemanları dikdörtgen, üçgen, paralel kenar, ve yamuk şekillerinde olabilmektedir. Analiz elemanının seçimi analizi yapılacak bölgeye bağlıdır. Oluşturulan küçük analiz elemanları yapı üzerinde bir araya gelerek ağ biçiminde oluşurlar. Bu ağın kesişme noktalarına da düğüm adı verilmektedir. Şekilde oluşturulan düğümler, analiz elemanlarının birbirleri ile ilişkisini sağlar. Bu sonlu elemanlar düğüm noktalarında birbirlerine bağlı kabul edilmektedir ve bu düğüm noktalarının yer değiştirmeleri problemlerin bilinmeyen ana parametreleridir (Demir 2016).

1.5.1. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları

- Sonlu elemanlar boyutlarının esnekliği ve değişik şekilli geometrilere ayrılabilirdiğinden dolayı karışık şekilli cisimlere uygulanabilir.
- Sınır şartları kolaylıkla uygulanabilir.
- Çok bağıntılı bölgesi veya köşesi bulunan bölgeler kolaylıkla incelenebilir.
- Bilgisayarların gelişmesinden dolayı çözüm hızı yüksektir.
- Eleman sayısının artması tam çözüme daha çok yaklaşmaktadır. Bu avantajlarından dolayı da son zamanlarda birçok araştırmacı tarafından kullanılan bir çözüm metodu olmuştur (Vasudevan 1989).

1.5.2. ANSYS Paket Programı

ANSYS paket programı fiziğin tüm dalları ile ilişkili olan mukavemet, titreşim, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi gibi alanlarda kullanılabilen bir sonlu elemanlar programıdır. Bu program yapılan testlerin ve çalışma ortamlarını simüle ederek üretim gerçekleşmeden sanal ortamda test edilmesine fırsat verir. Bu test sırasında görülen zayıf noktaların tespiti iyileştirme yapılmasına olanak tanımaktadır.

Genel olarak ANSYS programı kullanarak üç kademedede sonlu elemanlar analizi yapılmaktadır.

1.5.2.1. Modelleme

Modellemede yapılması gereken aşamalar aşağıdaki gibidir.

- **Başlığın belirlenmesi:** Problemin daha sonraki dönemlerde rahat erişilebilir olması amacıyla yapılan işe bir isim vermek olarak düşünülebilir. Bu aşama özellikle aynı model üzerinde, farklı yükleme seçenekli çözümler gerçekleştirildiği durumlarda çok faydalıdır.
- **Modelin oluşturulması:** Model genellikle 2D ya da 3D uzayda uygun birimler (m., mm., in., vb.) kullanılarak çizimleri yapılır. Sonlu elemanlar modeli, 2 boyutlu veya 3 boyutlu modeller olarak sınıflandırılabilir. Analizi yapılacak fiziksel modelin bu modellerden hangisine girdiğinin önceden belirlenmesi gerekir. Sistemin 3 boyutlu olduğu modellerde mümkün ise, düzlem gerilme, düzlem şekil değiştirme veya eksenel simetri özellikleri kullanılarak modeli 2 boyutlu olarak tasarlanabilir. Sistemde simetri olması halinde bunu tanımlamak, sonlu elemanlar modelimizin basitleştirilmesine fayda sağlar. Modelin oluşturulduğu sırada dikkat edilmesi gereken konulardan biri ise, çizimde kullanılan birimlerle malzeme özellikleri ve uygulanan yük birimlerinin birbirleriyle uyumlu olması gerekir.
- **Eleman tipinin belirlenmesi:** Eleman seçimi, analizlerde de kullanılacak matematiksel modeli belirlemek açısından son derece önemlidir. Elemanların seçimi yapılacak analizin çeşidine göre belirlenir. Yani statik, termal, akışkan veya elektromanyetik analizler için farklı eleman tipleri kullanılır.

Benzer şekilde analizi yapılacak modelin boyutu da (2 veya 3 boyutlu) eleman seçimindeki etkenlerden birisidir. 2 boyutlu modellerin X-Y düzleminde tanımlanması gerekmektedir. Eksenel simetrik modeller 2 boyutlu model olarak kabul edilirler.

ANSYS'in geniş bir eleman kütüphanesi bulunur. Bir eleman, maksimum sekiz karakterden oluşan ve grup tanımlaması içeren bir isim ile belirlenmesi yapılır. Ek

olarak ise her bir elemana ait özel bir numara bulunur. Kütüphaneden bir eleman seçimi ise **ET** komutu ile gerçekleştirilir.

- **Malzeme özelliklerinin girilmesi:** Birçok eleman tipi, analizi yapabilmek için malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesini gerektirir. Uygulamaya bağlı olarak, malzeme özellikleri, lineer veya lineer olmayan, izotropik veya anizotropik, sıcaklıktan bağımsız veya sıcaklığa bağımlı olabilir.

Her bir malzeme grubu için bir malzeme referans numarası girilir. Malzeme referans numarasını ve malzemelerin özelliklerini gösteren tabloya malzeme tablosu adı verilir. Bir analiz sürecinde birden fazla malzeme ile çalışmak mümkündür.

Model elemanlara bölüdüğü zaman ilgili malzeme numarasının belirtilmesi gereklidir. Bu işlem **MAT** komutunun **MAT**, Malzeme Numarası şeklinde kullanılmasıyla yapılabilir.

- **Modelin elemanlara bölünmesi:** Sonlu elemanlarda çözümün gerçekleştirilebilmesi için eleman ve düğüm noktalarına ihtiyaç vardır. Elemanlara bölme işlemi katı modelin eleman ve düğüm noktaları ile doldurulması işlemidir.

Sonlu elemanlar analizinde elemanlarına bölme işleminde, eleman yoğunluğunun artması doğru çözüme o denli yaklaştırır. Ancak, eleman yoğunluğunun artması, çözüm süresini artırır ve bilgisayar kaynağına olan gereksinimi de o ölçüde artırır. Bu yüzden de gerekli olan eleman yoğunluğuna doğru şekilde karar vermek gerekir. Bunu analiz öncesinde tahmin etmek ise oldukça güçtür.

Bir katı modeli elemanlarına bölme işlemine, eleman şekline karar vererek başlamak iyi bir başlangıç olacaktır. Bunun için kullanılan komut ise **MSHAPE** komutudur (www.biyomed.com).

1.5.2.2. Çözümleme

Çözümlemede yapılması gereken aşamalar aşağıdaki gibidir.

Analiz tipinin belirlenmesi: Modelin oluşturulmaya başlandığında analiz tipi önceden belirlense bile, ANSYS programı içerisinde analiz tipinin belirlenmesi işlemi genellikle çözüm işlemcisi yapılır.

Genel olarak analizler;

-Elektromanyetizma

- Akışkan

- Bağlı Alan (coupled field) alanlarından birine dahildir.

Analizin ismi geçen bilim dallarından birine aitliği, seçilen elemanın tipi ile yani elemanın sahip olduğu serbestlik derecesi ile belirlenir.

Analiz tipinin belirlenmesinde kullanılan komut **ANTYPE**komutudur. Bu komut ANTYPE, Analiz Tipi, Analiz Durumu biçiminde kullanılır.

- **Sınır şartlarının tanımlanması:** Eğer modele herhangi bir yük uygulaması yapılırsa, model bilgisayarın sanal dünyasında sonsuza kadar ivmelenir. Bu ivmelenme bir sınırlılık veya sınır şartı uygulanana kadar da devam eder. Yapısal sınır şartları çoğunlukla sıfır yerdeğiştirme, termal sınır şartları belirlenmiş bir sıcaklık veya akışkan sınır şartları için bir basınç diye tanımlaması yapılır. Bir sınır şartı tüm yönlerde (x,y,z) uygulanabileceği gibi, yalnızca belirli bir yönde de tanımlası yapılabilir. Sınır şartları anahtar noktalarda, düğüm noktalarında, çizgi veya alanlarda tanımlanabilir. Sınır şartı, simetri tipinde olabilir veya olmayabilir.
- **Yüklerin uygulanması:** ANSYS programı içerisinde yük tanımlama işlemi belirli şartlar altında sistem davranışının belirlenmesi için gerçekleştirilir. Bir analiz yaparken yük tanımlama işlemi, anahtar öneme sahip bir kademedir.

Pek çok yük, katı model veya sonlu elemanlar modelin üzerinde uygulanması yapılabilir. Örnek olarak kuvvetler, bir düğüm noktasına veya bir anahtar noktaya uygulanabilir. Yüklerin nasıl uygulandığına bakılmaksızın ANSYS çözücüsü bunları sonlu elemanlar yükleri olarak algılar. Yani yükler katı model üzerine uygulanmış yükler ise, bunlar otomatik bir biçimde çözüm başlangıcında düğüm noktası ve elemanlara transfer edilirler. Genel olarak, yükleri altı kategoriye ayırmak uygundur. Bunlar;

- Yapısal
- Termal
- Serbestlik derecesi sınırlılıkları
- Kuvvetler(bir noktaya yoğunlaşan yükler)
- Yüze yükleri
- Cisim yükleri
- Atalet yükleri
- Eş alan yükleridir.

- **Çözüm:** Genelde bir sonlu elemanlar çözücüsü üç kısma ayrılır. Bunlardan birincisi ön-çözücü, ikincisi matematik motoru ve üçüncüsü son-çözücüdür. Ön-çözücü, modeli okur ve modeli matematiksel biçimde formüle eder. Sonuçları görüntüleme kademesinde tanımlanan tüm parametreler ön-çözücü tarafından kontrol edilir ve herhangi bir şeyin eksik bırakıldığını bulursa, matematik motorunun devreye girmesini engeller. Model doğruysa, çözücü devreye girerek eleman direngenlik matrisini oluşturur ve yer değiştirme, basınç gibi sonuçları üreten matematik motorunu devreye sokar. Matematik motoru tarafından çıkarılan sonuçlar, son-çözücü kullanılarak düğüm noktaları için deformasyon miktarı, gerilme, hız gibi değerler üretilir (www.biymed.com).

1.5.2.3. Sonuçları görüntüleme

Sonuçları görüntüleme bölümü; sonuçların okunduğu ve yorumlandığı bölümdür. Sonuçlar; tablo halinde, kontur grafikler halinde da deforme olmuş cisim şeklinde sunulabilir. Ayrıca animasyon kullanımı ile modelin yük altındaki davranışını da gözler önüne sunabilir. Yapısal tipteki problemlerin sunulmasında, kontur grafikler

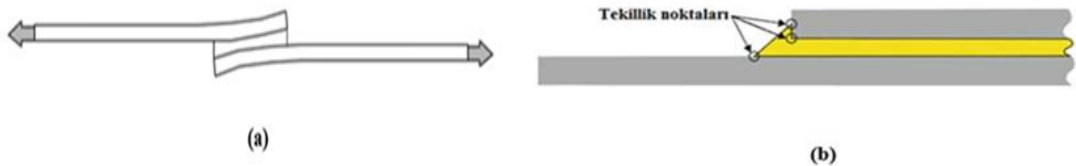
1. GİRİŞ

genellikle en etkin metod olarak kullanılır. Sonuçları görüntüleme, x, y, z koordinatlarında hatta koordinat ekseninde belli bir açıdaki gerilme ve birim şekil değiştirmelerin hesaplanmasında kullanılabilir. Etkin gerilme ve birim şekil değiştirme sonuçlarıyla akma gerilmesi ve şekil değiştirme sonuçlarını görmek mümkündür. Bunun dışında birim şekil değiştirme enerjisi ve plastik şekil değiştirme miktarı da kolay bir şekilde görsel olarak elde edilebilir.

Sonuçlar görsel biçimde çok etkileyici bir şekilde kontur grafikler olarak rahatlıkla elde edilebilse de sonuçların kalitesi, modelin fiziksel problemi gerçekte ne kadar yansıttığına ve dolayısıyla analizi yapılan modelin kalitesine bağlıdır. Başarılı bir analiz yapmak için dikkatli bir planlama yapılma zorunluluğunu göz ardı etmemek gerekir (www.biomed.com).

1.6. Cohesive Zone Model ile Sayısal Analiz

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılara yükleme sırasında soyulma gerilmelerinin etkisiyle malzemenin uç kısımlarının dönmesi, malzemenin plastik davranış göstermesinden dolayı gerilmelerin doğru biçimde hesaplanabilmesi için geometrik olarak lineer olmayan analiz gerektirir (Şekil 1.9a). Yapıştırma bağlantılarının lineer olmayan sonlu elemanlar analizinde, son birkaç yıla kadar yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım; bulk numunelerin çekme deneyinden sağlanan gerilme-şekil değiştirme davranışlarını göz önünde bulundurarak, malzemelerin elastik - plastik gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin kullanılarak yapılmaktadır. Ancak bağlantının serbest uçlarında gerilme tekilliğinin olması ve gerilmelerin kullanılan ağ sayısına bağlılığı olması bu yaklaşımı sorunlu hale getirmektedir (Şekil 1.9b).

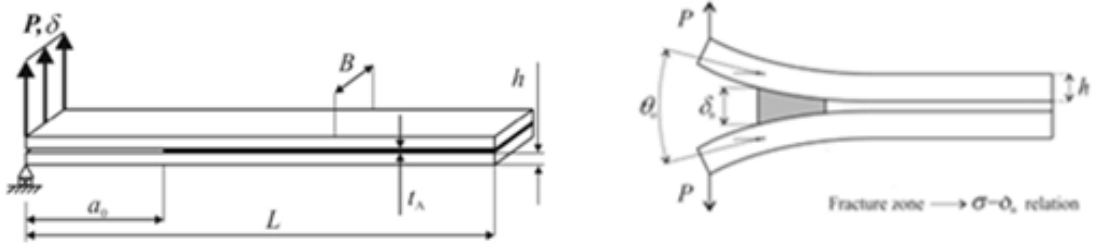


Şekil 1.9.Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Yükleme Sırasında Oluşan Soyulma Gerilmesinin Etkisi

1. GİRİŞ

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların nümerik analizlerinde karşılaşılan bazı sorunlar nedeniyle, son zamanlarda başarılı bir şekilde kullanılan, hem gerilme analizine hem de kırılma mekaniğine dayalı olan, Cohesive Zone Model ilgi görmektedir. Bu model; çatlak başlangıcını, ilerlemesini ve hasarın oluşmasını simüle ederek, sadece hasar tahminini değil aynı zamanda hasar ilerlemesini de tahmin etmek amacıyla kullanılır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda, cohesive zone model ile sonlu elemanlar analizi yapabilmek için bazı parametrelerin bilinmesi gerekir.

Elastisite ve kayma modülü parametreleri, bulk numunelerin testleriyle hesaplanır. Kırılma enerjisi parametreleri ise Mod-I'deki çift konsol kiriş (Double Cantilever Beam) ya da konikleştirilmiş çift konsol kiriş (Tapered Cantilever Beam) numunelerin testleri yardımıyla hesaplamaları yapılır. Mod-I'de kullanılan kırılma enerjisini belirlemek amacıyla ise ASTM tarafından önerilen standart D 3433 (Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints) standardı kullanılır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. ASTM tarafından önerilen standart D 3433 Cohesive Zone Hasar Modeli

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatür araştırıldığında; yapıştırıcıyla birleştirilmiş birçok bağlantı tipine (single-lap joint, double-lap joint, butt joint, T joint, beveland scarf joint) rastlanmaktadır. Bu bağlantı tiplerinden biri single-lap joint (SLJs) tipi olup, bu bağlantı tipinin geometrisi basit olduğundan dolayı geniş bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analizler göstermiştir ki yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda soyulma gerilmeleri ve büyük gerilme yığılmaları bağlantının serbest uçlarında oluşmaktadır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılardaki bu soyulma gerilmelerinin etkisini azaltıp, bağlantının mukavemetini artırmak için birçok yöntem vardır.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mukavemetini artırmak için yöntemlerden biri bindirme uzunluğunu artırmaktır (Ozel vd. 2012, Kim et al. 2008). (Ozel vd. 2012) tarafından yapılan bir çalışmada, bindirme uzunluğunun film yapıştırıcı ile elde edilen bağlantı üzerine etkisi incelenmiştir. İnceleme sonucunda, bindirme uzunluğunun artırılması bağlantının hasar yükünü artırmıştır. Ancak hasar yükündeki bu artış belirli bir bindirme uzunluğuna kadar geçerli olup, bu uzunluktan sonraki bindirme uzunluğundaki artışın hasar yüküne etki etmediği anlaşılmıştır (Kim et al. 2008).

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mukavemetini artırmak için yapılan diğer bir yöntem ise bindirme bölgesinde çift yapıştırıcı (sert ve yumuşak yapıştırıcı) kullanma tekniğidir. (Fitton et al. 2005; Temiz et al. 2006; daSilva et al. 2009; dasNeves et al. 2009 ve Campilho et al. 2011) tarafından yapılan çalışmalarda, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda bindirme bölgesinde çift yapıştırıcı kullanılmasının hasar yüküne etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda, çift yapıştırıcı kullanılarak elde edilen bağlantının tek yapıştırıcı kullanılarak (sert ve yumuşak yapıştırıcı) elde edilen yapıştırma bağlantısına göre daha fazla yük taşıdığı ve bindirme bölgesinin uçlarındaki gerilme konsantrasyonunu düşürdüğü görülmüştür.

Literatür araştırıldığında, yapıştırıcı ile birleştirilmiş stepped-lap adhesive bağlantıların bağlantı dayanımı üzerine etkisinin incelendiği farklı çalışmalar vardır (Kimiaefar et al. 2013 ve Sawa et al. 2010). Ancak bu bağlantı tipinde genellikle yapıştırılan malzeme olarak kompozit kullanılmıştır (Kimiaefar et al. 2013, Kim et al. 1995). Ichikawa vd.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2008 tarafından yapılan çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak çelik kullanılarak elde edilen kademeli yapıştırma bağlantının statik çeki yükü altında davranışı deneysel ve üçboyutlu sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. İnceleme sonucunda, yapıştırıcının ara yüzeyinin uçlarında oluşan maksimum asal gerilme değerleri maksimum olduğu görülmektedir. Yapıştırıcı kalınlığının azaltılması, yapıştırıcının elastisite modülü ve kademe sayısı artırılması maksimum gerilme değerini azaltmaktadır (Sawa et al. 2010).

Silva et al. (2018), tarafından yapılan çalışmada, üç farklı yapıştırıcı kullanılarak (esnek, orta derecede esnek ve sert) elde edilen üç kademeli bindirme bağlantısında bindirme uzunluğunun çeki dayanımına etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Bağlantı cohesive zone model ile modellenmiş olup, bağlantıda oluşan normal ve kayma gerilmeleri sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır. Hem yapıştırıcı tipinin hem bindirme bölgesinin uzunluğunun bağlantı dayanımı etkilediği sonucuna varılmıştır. Esnek yapıştırıcılarda aşamalı bir kırılma olurken sert yapıştırıcılarda ise ani bir kırılma olduğu görülmüştür. Ayrıca sert yapıştırıcının daha kısa kademe uzunluğunda, esnek yapıştırıcılarda ise kademe uzunluğunun artırılmasının daha iyi sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

Akpinar (2014), tarafından yapılan bir çalışmada, aynı yapıştırma alanına sahip tek tesirli, tek kademeli ve üç kademeli bindirme bağlantı tiplerinin hasar yükleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum alaşımı, yapıştırıcı olarak SBT9244 esnek yapıştırıcı ve DP460 sert yapıştırıcı kullanmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin gerilme analizlerini incelenmiştir. Tek kademeli ve üç kademeli bindirme bağlantıların hasar yükü tek tesirli bindirme bağlantılara göre artmıştır. Fakat en fazla artış üç kademeli bindirme bağlantılarda olmuştur. Nümerik analiz sonuçlarına göre yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların bindirme bölgesinin uçlarında oluşan soyulma gerilmeleri tek ve üç kademeli bağlantılarda azaldığı, ancak en fazla azalmanın üç kademeli bindirme bağlantılarında olduğu görülmüştür. Bindirme bölgesinde oluşan bu soyulma gerilmelerin azalması bağlantı dayanımını artırdığı sonucu göz önüne alındığında, yapılan çalışmanın deneysel ve nümerik verilerinin birbiriyle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Machado et al. (2018), tarafından yapılan çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak üç kademeli AA6082 T651 alüminyum alaşımı ve yapıştırıcı olarak ise sert epoksi Araldite AV138, esnek epoksi Araldite2015 ve esnek poliüretan Sikaforce 7752 kullanılarak farklı bindirme uzunluklarında (12,5; 25; 37,5;50 mm) elde edilen bağlantılar da oluşan kayma ve soyulma gerilmeleri genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Bindirme bölgesinin uzunluğu ve yapıştırıcının karakteri bağlantıda oluşan hasarı etkilediği ve bindirme uzunluğunun artırılması sert yapıştırıcılara göre esnek yapıştırıcılarda bağlantı dayanımı açısından daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapıştırıcıyla yapıştırılmış bağlantıların nümerik analizi, deneysel nümerik verilerle karşılaştırma yapmak için çok önemlidir. Yayınlanan literatürlerde, yapıştırıcıyla yapıştırılmış bağlantıların nümerik analizinde kullanılmış olan birkaç yöntem vardır. Fakat en uygun olduğu düşünülen Cohesive Zone Model (CZM), yapıştırıcıyla yapıştırılmış bağlantılarda nümerik analizleri için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yayınlanan literatürlerde CZM kullanılarak nümerik analiz yapılan birçok çalışma bulunmaktadır.

Campilho et al. (2012), tarafından yapılan bir çalışmada tek tesirli bindirme bağlantısının üç farklı bağlantı tipini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Yapılan çalışmada bindirme bölgesinde sadece yapıştırıcı, sadece nokta punta kaynak ve yapıştırıcı ile birlikte punto kaynak kullanılarak elde edilen bağlantıların hasar yükleri deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca deneylerden elde edilen veriler ile nümerik analizden elde edilen veriler karşılaştırılmış olup, nümerik analizde yapıştırıcının cohezive zone model (CZM) ile modellenmesi deneysel ve nümerik analizin uyumu açısından oldukça önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Campilho et al. (2011), tarafından yapılan bir çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak AA6082 T651 alüminyum alaşımı yapıştırıcı olarak Araldite AV138 kullanmışlardır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek ve çift tesirli bağlantılarda bindirme uzunluğunun 5 mm ve 20 mm olduğu durumlarda bağlantıda oluşan gerilmeleri karşılaştırmışlardır. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile yapıştırıcının mukavemet ve kırılma mekaniği incelenmiştir. Cohesive zone modelinin hasar büyüme kısıtlamasından dolayı oluşan sorun Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (XFEM) teknikleri ile giderilmeye

2. KAYNAK ÖZETLERİ

çalışılmıştır. Çift tesirli yapıştırma bağlantılarının tek tesirli yapışma bağlantılarına göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kazaz et al. (2018), tarafından yapılan bir çalışmada, yapıştırıcı içerisine nanoyapı eklenerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcının atmosferik ve termal çevrim koşullarında kayma mukavemetini nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Nanoyapı katkılı yapıştırıcıların kayma hasar yükü TAST (Thick Adherend Shear Test) yöntemini ile deneysel olarak elde edilmiş olup, deneysel veriler ile nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Nümerik analizlerde cohesive zone model (CZM) kullanılmış olup, kullanılan CZM analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

Campilho et al. (2013), tarafından yapılan bir çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların dayanım tahminleri için cohesive zone model ve bağlantıların hasar yükü tahminleri için ise Sonlu Elemanlar (SE) yöntemi ile hasar büyümeleri incelenmiştir. Tek tesirli bindirme bağlantılarda yapıştırıcı tabakası cohesive zone modeli ile üçgen, doğrusal olmayan ve trapez gibi üç farklı durum incelenmiştir. Böylece yapıştırıcı tabakası için en uygun olan cohesive zone model şekli değerlendirilmiştir. Sonuç olarak ise sert yapıştırıcılarda cohesive zone model şeklinin ihmal edilebilir olduğu ancak sünek yapıştırıcılarda uygulanan cohesive zone model şeklinin önemli olduğu ve yapılan deneylerde trapez şeklindeki cohesive zone modelin daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Ribeiro et al. (2016), tarafından yapılan çalışmada ise, yapıştırılan malzeme olarak alüminyum ve kompozit kullanılarak farklı yapıştırıcıların ve farklı bindirme uzunluğunun hasar yüküne etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Nümerik analizlerde Cohesive zone model (CZM) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılmış olup, farklı bindirme uzunluklarında gerilme analizleri yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucu olarak ise sert yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda hasar yükü açısından bindirme uzunluğunun etkisi göz ardı edilebilir olduğu ancak yumuşak yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda ise bindirme uzunluğu ile hasar yükü arasında doğrusal bir iyileşme olduğu sonucuna varılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Luo et al. (2016), tarafından yapılan çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak tabakalı kompozit kullanılarak tek tesirli bindirme bağlantısının bindirme uzunluğu ve kompozitin tabaka kalınlığının etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Tek tesirli bindirme bağlantısının nümerik analizinde üç boyutlu cohesive zone model kullanılarak tabakalar arası deliminasyon ve yapıştırıcı hasarı simüle edilmiştir. FEM uygulanmasıyla elde edilen simülasyon sonuçları deney sonuçları ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Tek tesirli bağlantı numunelerinde bindirme bölgesinin uçlarında oluşan soyulma gerilmeleri bağlantının hasarına neden olduğu, maksimum normal ve kayma gerilmeleri bindirme uzunluğunun uçlarında meydana gelirken minimum normal ve kayma gerilmeleri bindirme uzunluğunun orta kısımlarında meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

Pinto et al. (2014), tarafından yapılan bir çalışmada, aynı geometrik boyutlara sahip yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında iki farklı yapıştırıcı (sert ve yumuşak) ve farklı yapıştırıcı kalınlıklarının etkisi incelenmiştir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda yapıştırıcı kalınlığının etkisi deneysel olarak elde edilirken, bağlantıda oluşan gerilmeler ise sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Bindirme bölgesinde oluşan hasarı daha iyi simüle etmek için bağlantının sonlu elemanlar modeli cohesive zone model ile yapılmıştır. Sonuç olarak ise yapıştırıcı kalınlığının artması bağlantının hasar yükünde azalmalara neden olduğu ve bindirme bölgesinin uçlarında oluşan gerilmelerin aşırı artmasına neden olduğu sonucuna varmışlardır.

Li et al. (2017), tarafından yapılan çalışmada, titreşim yükleri altında çelik ve tabakalı karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerden yapılmış tek tesirli bindirme bağlantıların yorulma dayanımı deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki, titreşim çevrimi artıkça bağlantının maksimum dayanımı ve hasar yer değişimi aşamalı olarak düşmüştür. Yapıştırılan malzemeler arasındaki yapıştırıcıyı ve hasar ilerlemesini simüle etmek için cohesive zone model çalışma alanı içerisinde gömülü işlem bölgesi olarak adlandırılan yeni bir çekme-ayırılma yasası kullanılmıştır. Tek tesirli bindirme bağlantısının yapıştırıcı tabakasındaki titreşim döngüsü ise bir sonlu elemanlar yöntemi olan ABAQUS ile incelenmiştir. Sonuç olarak ise tüm tek tesirli bindirme bağlantı numunelerinde titreşim miktarı artıkça, bağlantının kuvvet-yer değiştirmesi azaldığı görülmüştür.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Ghoddous et al. (2015), tarafından yapılan çalışmada, L geometrisine sahip malzemeler Z şeklinde ince bir yapıştırıcı tabakası ile birleştirilerek elde edilen gömülü bağlantının nümerik analizi yapılmıştır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantının bindirme bölgesinin orta kısmında farklı boyutlarda boşluk bırakarak kayma gerilmeleri test edilmiştir. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemeler ANSYS programı ile iki boyutlu olarak modellenmiştir. Tek tesirli gömülü bindirme bağlantısı ile tek tesirli gömülü boşluklu bindirme bağlantısı karşılaştırıldığında, boşluklu bağlantılarda kayma gerilmesinin etkisinin daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

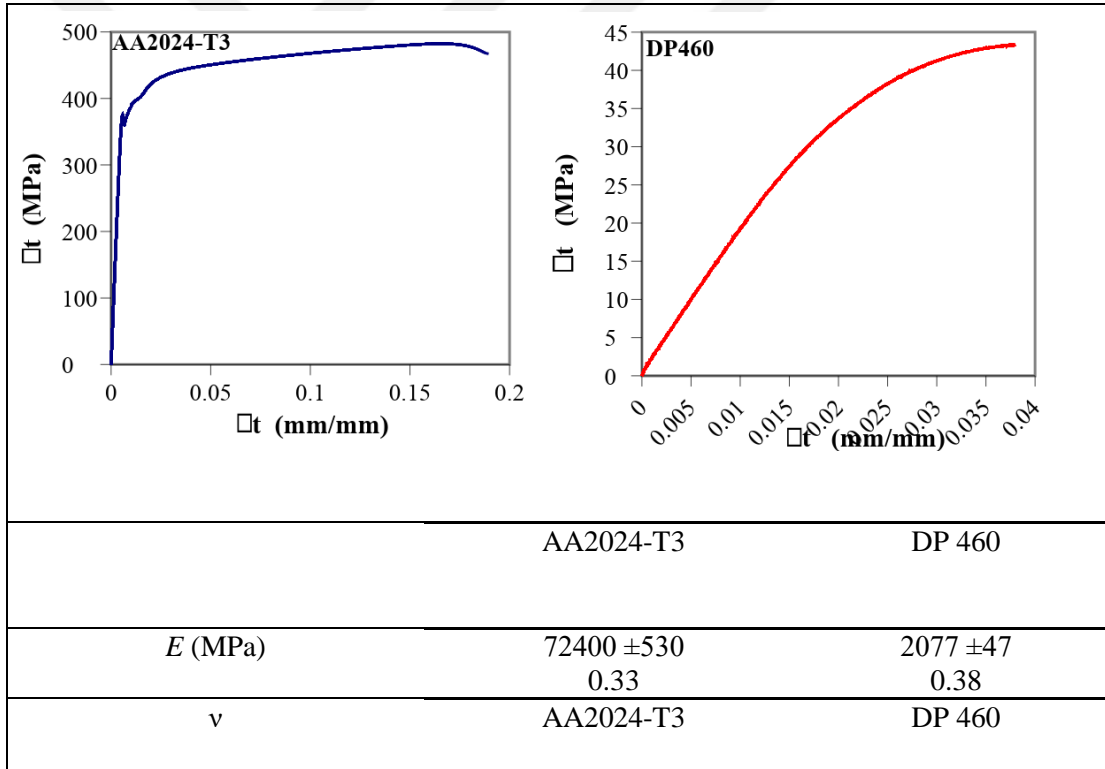


3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak üstün mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı havacılık, uzay, denizcilik ve genel mühendislik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Yapıştırıcı olarak ise sert yapıştırıcı olan 3M (St. Paul, MN, USA) firması tarafından üretilen çift bileşenli DP460 yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır. Çizelge 3.1’ de hem yapıştırıcının hem de yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir (Akpınar 2012).

Çizelge 3.1. AA2024-T3 Alüminyum Alaşım Malzemenin ve DP460 Yapısal Yapıştırıcının Mekanik Özellikleri



Çizelge 3.1’de verilen gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrileri, yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcıya ait bulk numunelerin deneysel kuvvet-uzama verileri denklem (3.1)’de verilen formüller yardımıyla elde edilmiştir.

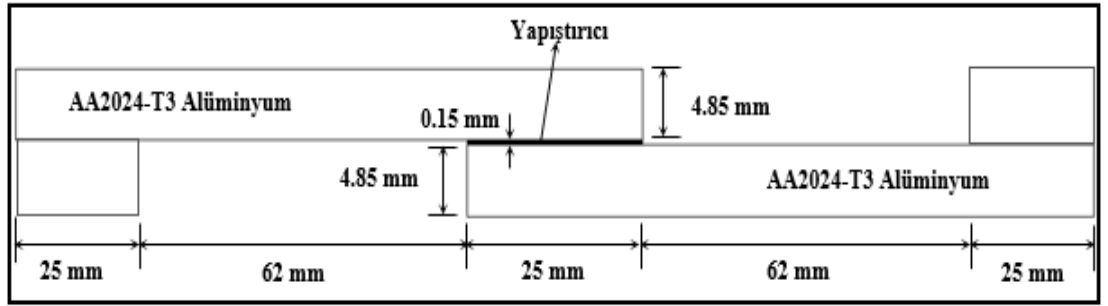
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \sigma = \frac{P}{A} \quad \varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon) \quad \sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3.1)$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

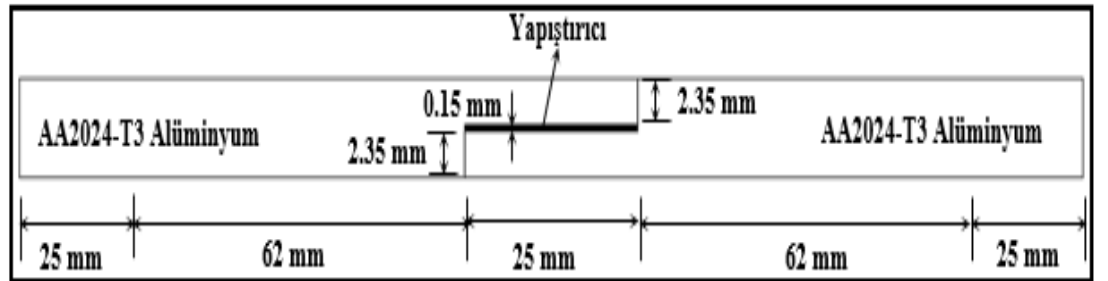
Çalışmada kullanılan yapıştırıcı 3M™ DP460; epoksi (B) ve hızlandırıcı (A) nın hacimce B:A=2:1 oranında karışımıyla oluşan sıvı yapıştırıcıdır. Yapısal malzemelerin (metal, seramik, cam ve kompozit) birleştirilmesinde sıklıkla kullanılan bu yapıştırıcının zamana ve sıcaklığa bağlı olarak birkaç farklı kürleşme şartı bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan kürleşme şartı ise, 120 °C sıcaklıkta 60 dakika bekletilerek elde edilmiştir.

3.2. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantı Numunelerinin Hazırlanması

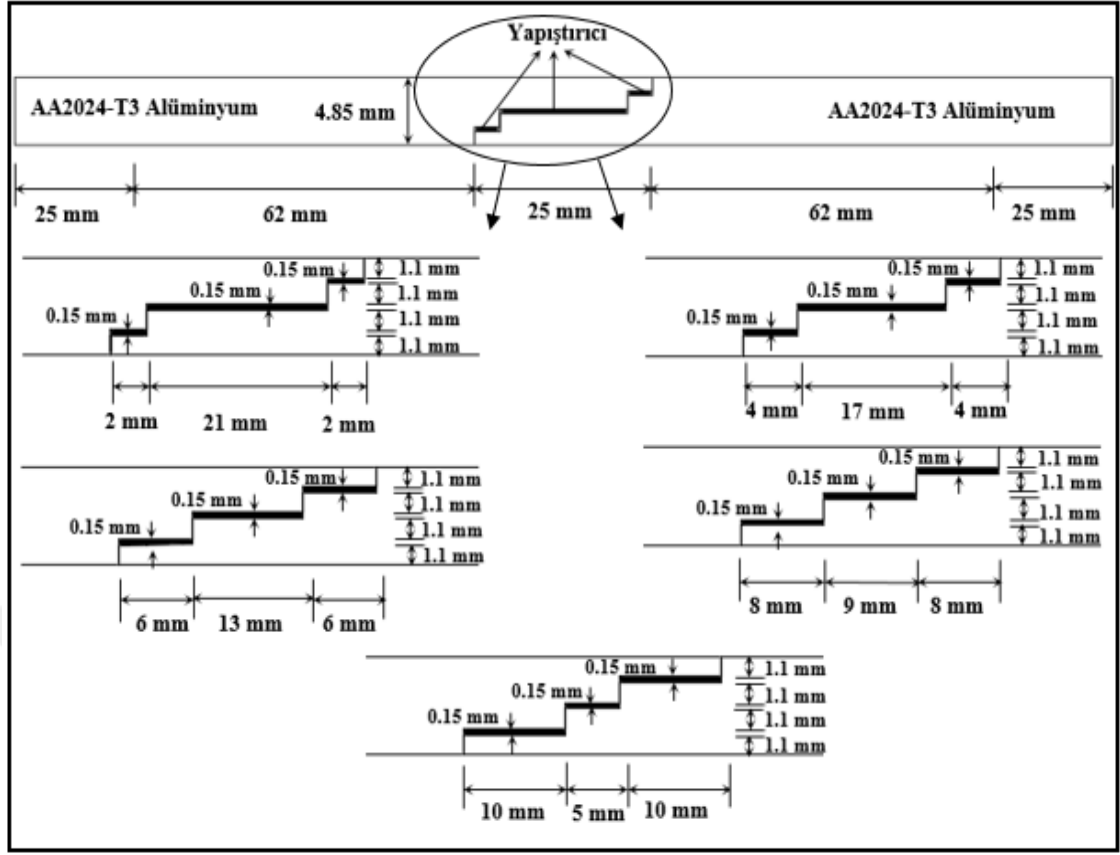
Çalışmada, yapıştırılan malzemenin kalınlığı, genişliği ve bindirme uzunluğu aynı olan tek tesirli bindirme bağlantısının (Single Lap Joint-SLJ), tek kademeli bindirme bağlantısının (One Step Lap Joint –OSLJ) ve beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantısının (Three Step Lap Joint –TSLJ) mekanik davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Bu numunelere ait geometrik parametreler Şekil 3.1’de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

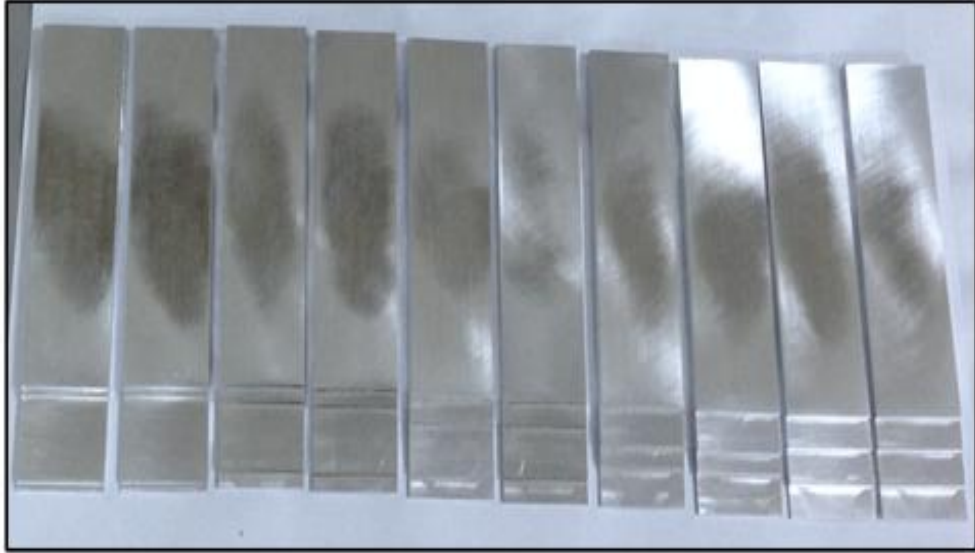
Şekil 3.1. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların geometrik parametreleri a) Tek etkili bindirme bağlantısı, b) Tek kademeli bindirme bağlantısı, c) Üç kademeli bindirme bağlantısı.

Şekil 3.1'de verilen geometrik parametreler elde edilmesi için 4.85 mm kalınlığında 2000*1000 mm ebadında levha elmas testere ile 112*25 mm ebadında parçalara ayrılmıştır. Daha sonra tek kademeli ve üç kademeli bindirme bağlantılarında kullanılan numuneler üç eksenli CNC freze tezgâhında ± 0.001 mm hassasiyetinde bindirme bölgesine tek ve üç kademe açılmış olup numuneler istenilen boyutlara getirilmiştir.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların deneylerinde standart sapmanın yüksek olmaması ve bağlantının yük performansının iyi olabilmesi için yapıştırılan malzemelere yüzey hazırlama işlemi uygulanması gerekmektedir. Bundan dolayı istenilen geometrik boyutlara getirilmiş numunelerde oluşan çapakların ve numune üzerindeki yağ, gres, kir gibi atıkların temizlenmesi için numuneler 400 grade SiC zımpara ile zımparalanmıştır. Daha sonra 400 grade SiC zımpara işleminde numuneler

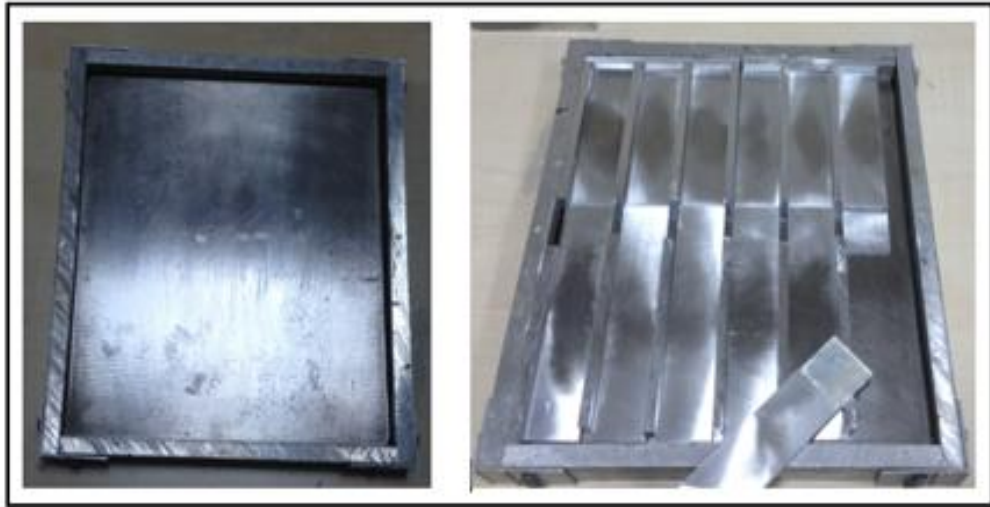
3. MATERYAL ve YÖNTEM

üzerinde oluşan zımpara çiziklerin yok edilmesi için numuneler 1000 grade SiC zımpara ile zımparalanmış ve pürüzsüz yüzey elde edilmiştir. Zımpara işlemi bittikten sonra numuneler toz deterjan ile yıkandıktan sonra numuneler 10 dakika asetonda bekletilmiştir. Asetondan çıkarılan numune parçaları 60°C sıcaklıktaki bir etüv içerisinde kurularak yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmış numuneler.

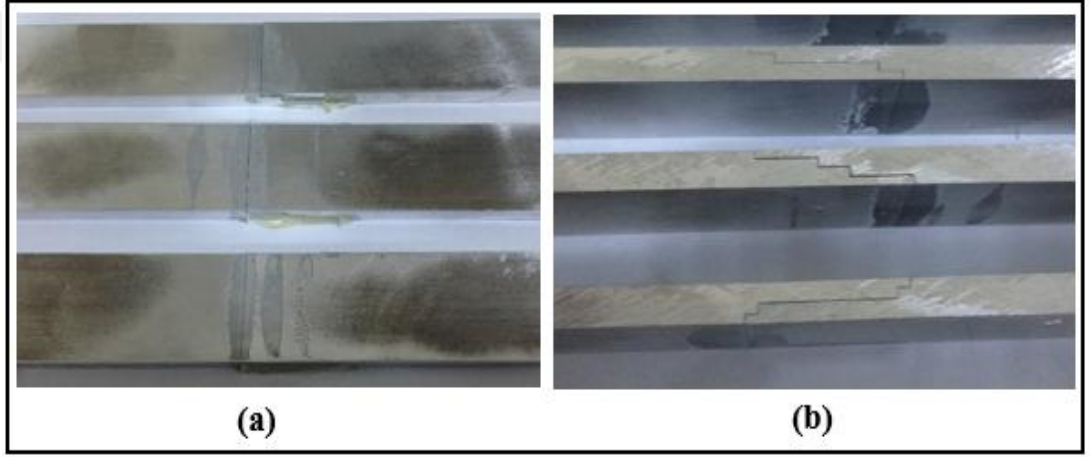
Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda yapıştırıcı tabakası kalınlığının ayarlanabilmesi ve yapıştırılan malzemelerin konumunun korunabilmesi için özel bir kalıp kullanılması gerekmektedir. Bundan dolayı yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların üretiminde Şekil 3.3’de gösterilen kalıp kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda kullanılan kalıp.

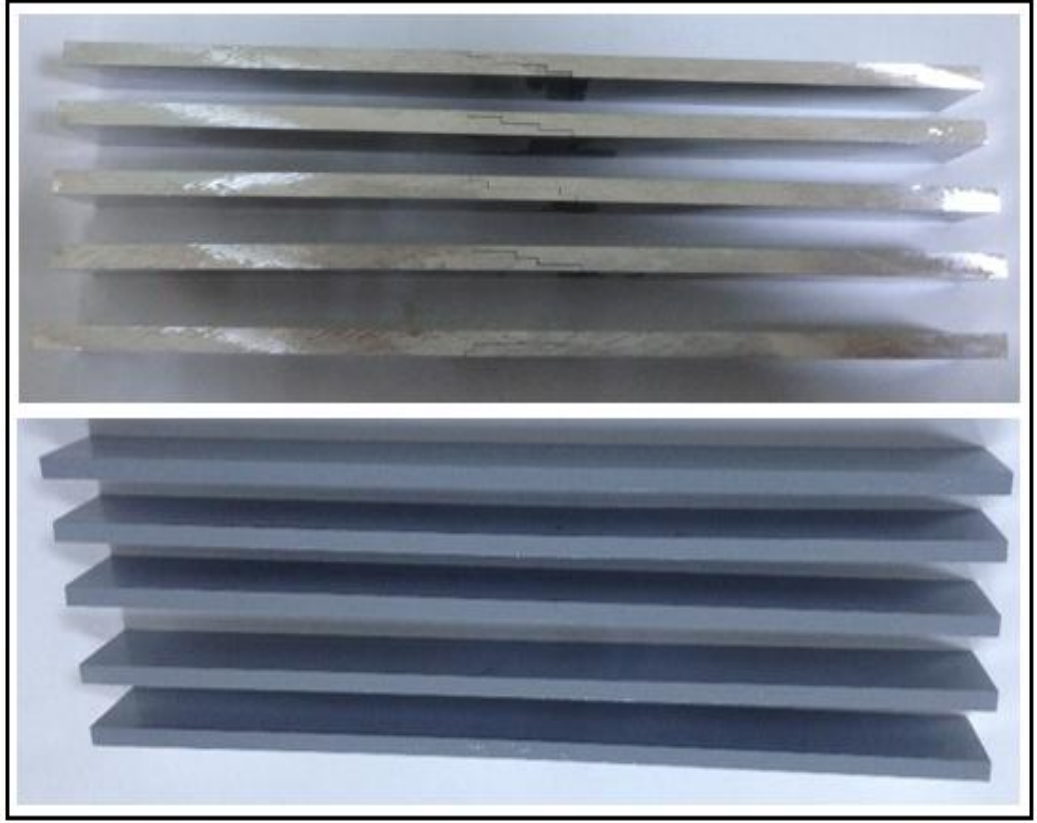
3. MATERYAL ve YÖNTEM

DP460 sıvı yapıştırıcı bindirme bölgelerine uygulanmış ve bir master yardımıyla yapıştırılacak yüzeylere yayılmıştır (Şekil 3.3). Tek tesirli bindirme bağlantılarda yapıştırıcı kalınlığının 0.15 mm olması için bağlantının her iki ucuna 0.15 mm kalınlığında metal parçalar konuldu. Yapıştırıcı için verilen kürleşme şartları, sıcak pres fırınının kontrol paneli kullanılarak programlandı ve numunelerin kürleşmesi sağlanmıştır. Numunelere uygulanan kürleşme şartı sağlandıktan sonra numuneler ortam şartında soğumaya bırakılmıştır. Şekil 3.4a'da gösterildiği gibi soğuyan numuneler kalıp içerisinden çıkarılarak kürleşme esnasında dışarı taşan fazla yapıştırıcılar keskin bir bıçak yardımıyla temizlenmiş ve böylece yapıştırma işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.4b).



Şekil 3.4. a) Kürleşme sonrası elde edilen bağlantılar, b) Yapıştırma işlemi tamamlanmış bağlantılar.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda hasar bindirme bölgesinin uçlarında başlayan çatlakın merkeze doğru ilerlemesiyle oluşmaktadır. Bağlantıların deneyleri esnasında bindirme bölgesinde oluşan çatlakın ilerlemesini daha iyi tespit etmek için yapıştırma işlemi tamamlanmış numunenin yüzeyine spreyci boya ile ince bir film tabaka oluşturuldu (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların bindirme bölgesinin sprej boya ile kapatılması.

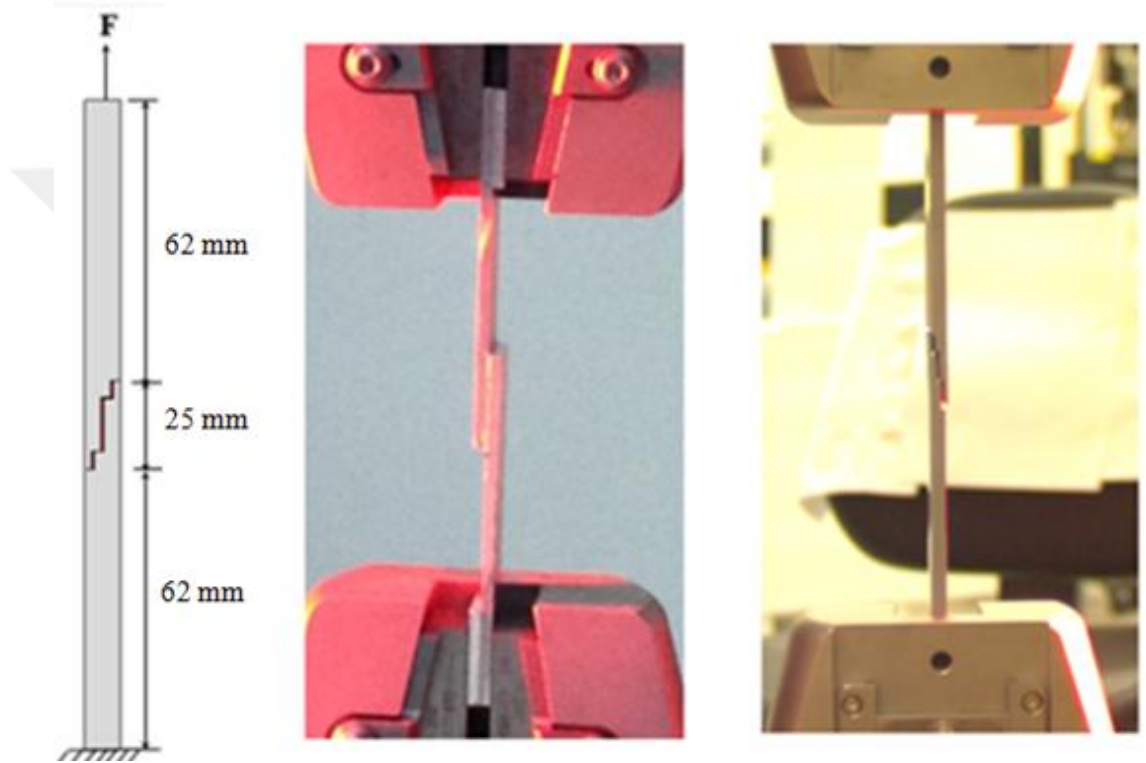
Ayrıca yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme, tek kademeli bindirme ve beş farklı üç kademeli bindirme bağlantılar Çizelge 3.2’de verildiği gibi üç farklı tip olarak adlandırılmıştır.

Çizelge 3.2. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar için deneysel parametreler

Numune	Bağlantı Tipi	Bindirme Uzunluğu (mm)	Adhesive Area (mm ²)
Tek Tesirli Bindirme Bağlantı	Tip I	25	625
Tek kademeli Bindirme Bağlantı	Tip II	25	625
Üç Kademeli Bindirme Bağlantı	Tip III a	2-21-2	625
Üç Kademeli Bindirme Bağlantı	Tip III b	4-17-4	625
Üç Kademeli Bindirme Bağlantı	Tip III c	6-13-6	625
Üç Kademeli Bindirme Bağlantı	Tip III d	8-9-8	625
Üç Kademeli Bindirme Bağlantı	Tip III e	10-5-10	625

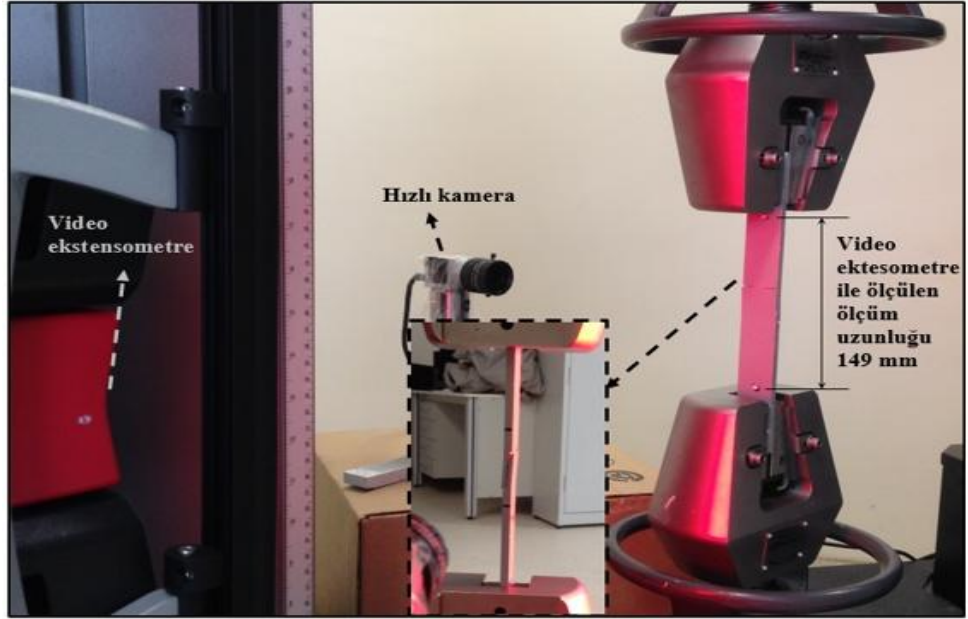
3.3. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Hasar Yüklerinin Belirlenmesi

Deneilerin tümü Instron 100 kN (USA) üniversal çekme cihazında 18°C ve %25 nem oranında 1 mm/dak.'lık şekil değiştirme hızında yapılmıştır. Her üç tipteki numuneler (Tip I-Tip II-Tip III) için sınır şartları ve uygulanan kuvvet aynıdır. Her numune yakından gözlemlenmiş ve hasar sonrası hasar bölgesi incelenmiştir. Aynı zamanda, numunelerin taşıyabildikleri maksimum yük tespit edilmiştir.



Şekil 3.6. Çeki yükünün uygulanması ve sınır şartları.

Bağlantı numunelerinin testinde çift kamera kullanılmıştır (Şekil 3.7). Kamera-1 (video ekstensometre) Şekil 3.7’de gösterilen iki nokta arasındaki yer değiştirmeyi verilerini elde etmek için kullanılırken, kamera-2 (hızlı kamera) ise bindirme bölgesinde oluşan çatlak ve ilerlemesinin görüntüsünü elde etmek için kullanılmıştır. Kamera-2 ile test boyunca saniyede 10 görüntü alınmıştır.



Şekil 3.7. Video ekstensometre, yüksek hızlı kamera ve deneylerde uygulanan yükleme.

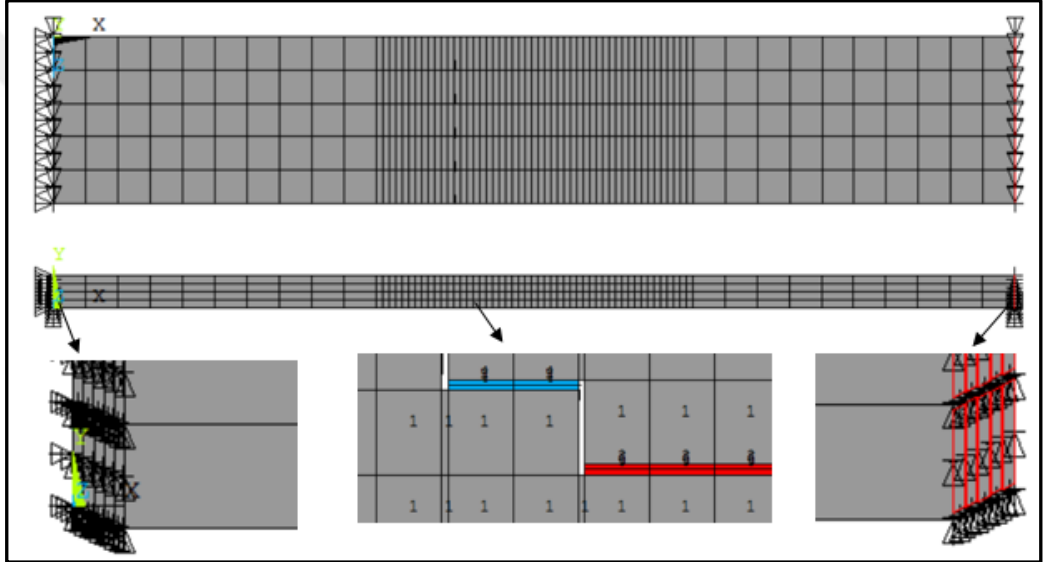
3.4. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Nümerik Analizi

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan numune ANSYS 16paket programı ile 3 boyutlu modellenmiştir (Şekil 3.8). Bağlantıların sayısal analizlerinde yapıştırılan malzeme (AA2024-T3) için lineer olmayan malzeme davranışı göz önüne alınarak Multilinear Isotropic Hardening (MISO) malzeme model kullanıldı. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda bindirme bölgesinin uçlarında soyulma gerilmeleri, orta kısımlarda ise kayma gerilmeleri daha baskın oluşmaktadır. Nümerik analizde deneysel olayı daha iyi simüle etmek için yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların nümerik analizlerinde yapıştırıcı bölgesinde malzeme modeli olarak Mode I (soyulma) ve Mode II (kayma) Dominated Bilinear Cohesive Zone Model (CZM) seçildi.

Sonlu elemanlar analizinde kullanılan numune boyutları, yükleme ve sınır şartları deneysel çalışmada kullanılanlarla aynıdır. Üç boyutlu analizde, yapıştırılan malzeme üç serbestlik derecesi ve 20 düğüm noktasına sahip elemanlar (Solid 186) kullanılarak modellenmiştir. Gerilme dağılımının kritik olduğu bölgelerde (bindirme bölgesi ve bindirme bölgesine yakın yerlerde) daha küçük mesh kullanılmıştır (Şekil 3.8). Nümerik modelde farklı mesh yoğunluklarında denemeler yapıldı ve gerilme analizleri göz önüne alınarak sayısal çözümler için gereken süreyi azaltmak için ideal mesh boyutu seçildi.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

CZM gerilmeler ve yer değiştirmeler arasındaki ilişki üzerine dayanır ve Şekil 3.8’de gsterildiği gibi yapıştırıcı kohesiv mukavemetine (çekici için T_n , kayma için T_s) kadar elastik davranış sergiler (Şekil 3.9). ANSYS 16 paket programında CZM ile analiz yapmak için T_n^{\max} (δ_n^{\max}), G_{IC} , T_t^{\max} (δ_t^{\max}) ve G_{IIC} parametrelerin bilinmesi gerekir. Akpınar (2018) ve Kazaz (2018) tarafından yapılan çalışmalarda Mode I ve Mode II deneyleri yapılarak bu değerler elde edilmiş olup izelge 3.3’de verilmiştir. Burada G_{IC} (the tensile critical strain energy release rate) ift konsol kiriş bağlantısının deneyinden elde edilen değer olup, G_{IIC} (the shear critical strain energy release rate) ise kalın malzeme kayma testi bağlantısından elde edilmiştir. Sunulan çalışmada bu değerler kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Kademeli bindirme bağlantısının sonlu elemanlar modeli.

Çizelge 3.3. CZM modeli için DP460 yapıştırıcısının özellikleri (Akpınar (2018) ve Kazaz (2018))

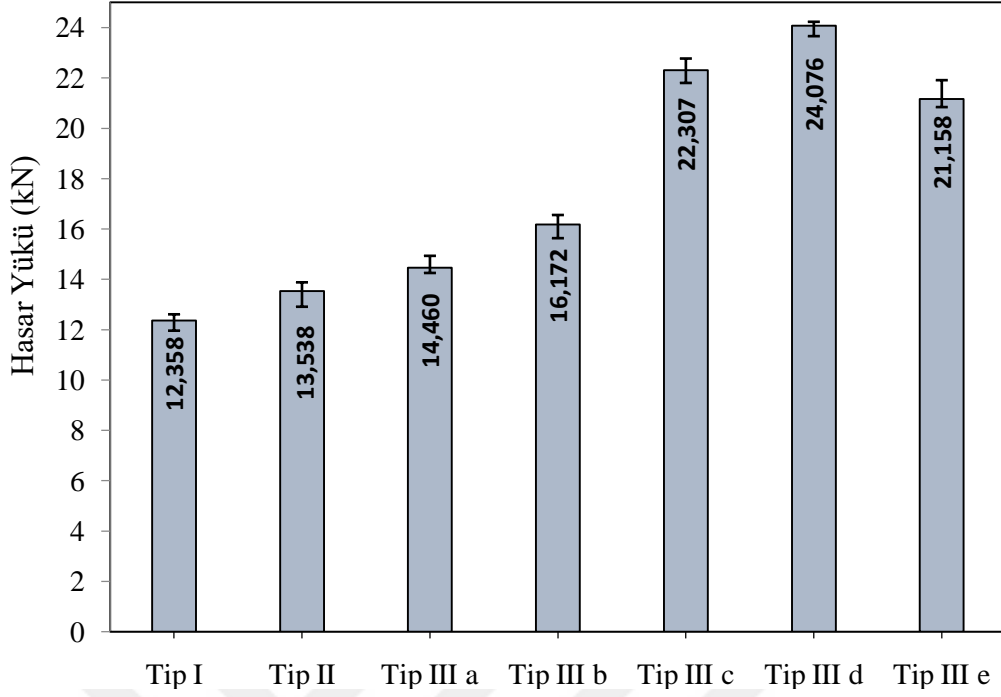
σ_t^{\max} (MPa)	G_{IC} (N/mm)	T_t^{\max} (MPa)	G_{IIC} (N/mm)
32.6	2.56	28.5	11.71

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Tek tesirli, Tek Kademeli ve Üç Kademeli Bindirme Bağlantıların Deneysel Sonuçları

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantı tipinde (Tip-I) ve tek kademeli bağlantı tipinde (Tip-II), bindirme bölgesinin uçlarında meydana gelen soyulma gerilmeleri bindirme bölgesinin uçlarında bir çatlak oluşturur ve bu çatlağın bindirme bölgesinin merkezine doğru ani ilerlemesiyle hasar oluşur. Bindirme bölgesine kademe yapıldığında (Tip III), bindirme bölgesinin uçlarında başlayan çatlağın merkeze doğru ani ilerleyişi engellenir ve bağlantının yük taşıma kapasitesi artar. Bu sonuç daha önce Akpınar (2014) tarafından yapılan bir çalışmada elde edilmiştir. Fakat Akpınar (2014) tarafından yapılan bu çalışmada, birinci kademenin uzunluğu 5 mm ikinci kademenin uzunluğu 15 mm ve üçüncü kademenin uzunluğu 5 mm olacak şekilde tek tip üç kademeli bindirme bağlantısının hasar yükü incelenmiştir. Sunulan çalışmada ise birinci, ikinci ve üçüncü kademe uzunluğunun değişmesiyle bağlantının hasar yükünün nasıl değiştiği incelenmiştir.

Aynı yapıştırma alanına sahip (625 mm^2) DP460 sert yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli (Tip-I) , tek kademeli (Tip-II) ve beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli (Tip-III a,b,c,d ve e) bindirme bağlantı geometrisinden üçer numune üretilmiş olup, deneylerden elde edilen ortalama hasar yükleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1’de verilen bu hasar yükleri incelendiğinde, aynı yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantı geometrisinin (Tip-I) hasar yüküne göre tek kademeli bindirme bağlantı geometrisinin (Tip-II) hasar yükünde yaklaşık %9,5 artış olmuştur. Bu artış Tip-I bağlantı tipinde eksantrikyüklemeden dolayı oluşan momentin etkisi Tip-II bağlantı tipinde minimize edilmesi ile açıklanabilir.

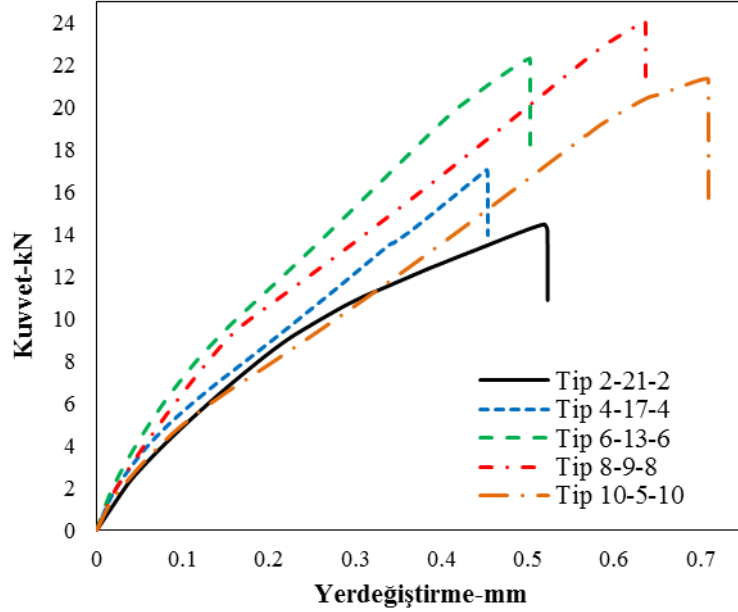


Şekil 4.1. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların deneylerinden elde edilen ortalama maksimum hasar yükleri

Ancak tek tesirli bindirme bağlantısı (Tip-I) ile üç kademeli bağlantı geometrisi (Tip-III) karşılaştırıldığında ise, bindirme bölgesi 2-21-2 olan üç kademeli bağlantı geometrisinin (Tip-III a) hasar yükünde yaklaşık %17, bindirme bölgesi 4-17-4 olan üç kademeli bağlantı geometrisinin (Tip-III b) hasar yükünde yaklaşık %31 bindirme bölgesi 6-13-6 olan üç kademeli bağlantı geometrisinin (Tip-III c) hasar yükünde yaklaşık %80, bindirme bölgesi 8-9-8 olan üç kademeli bağlantı geometrisinin (Tip-III d) hasar yükünde yaklaşık %95 ve bindirme bölgesi 10-5-10 olan üç kademeli bağlantı geometrisinin (Tip-III e) hasar yükünde yaklaşık %71 artış olmuştur. Burada en önemli sonuçlardan biri, bindirme bölgesinin uçlarındaki kademe uzunluğunun artırılması bağlantının hasar yükünü önemli derecede artırmaktadır. Fakat kademe uzunluğunu belirli bir orandan daha fazla artırılması bağlantının hasar yükünde azalmaya neden olmaktadır.

Diğer taraftan Şekil 4.2’de verilen beş bağlantı tipinin kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde, aynı bindirme uzunluğuna sahip bağlantılarda kademe uzunluğunun değişmesi bağlantının hem hasar yükünü hemde yer değiştirme

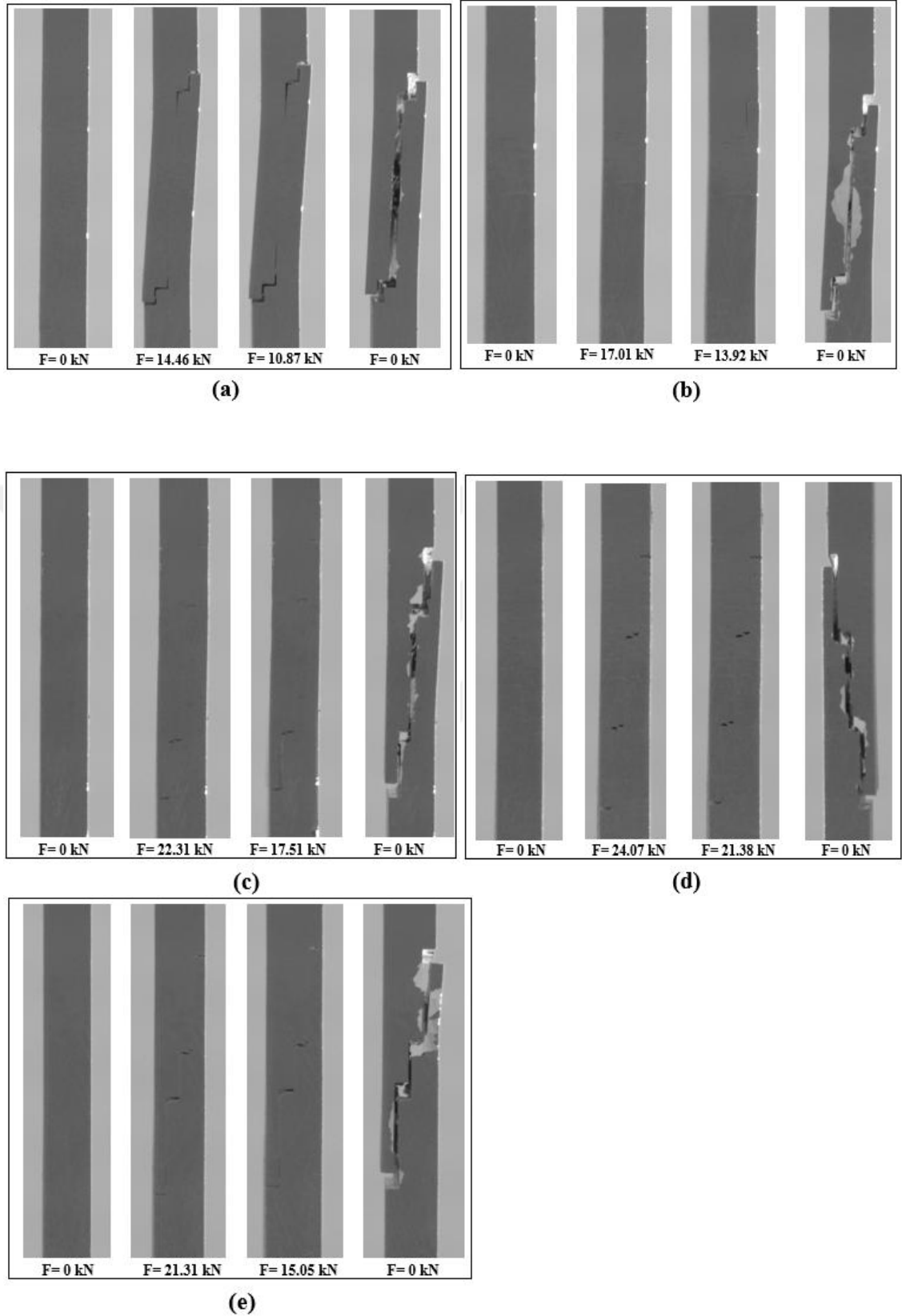
kapasitesini önemli derecede değiştirdiği görülmektedir. Kademe uzunluğunun 2 mm'den 8 mm'ye kadar çıkması bağlantının hem yük taşıma hem de yer değiştirme kapasitesini artırmaktadır. Fakat kademe uzunluğu 8 mm'den 10 mm'ye çıkarıldığında bağlantının hasar yükü azalmakta iken yerdeğiştirmesi artmaktadır.



Şekil 4.2. Üç kademeli bindirme bağlantısının kuvvet yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.

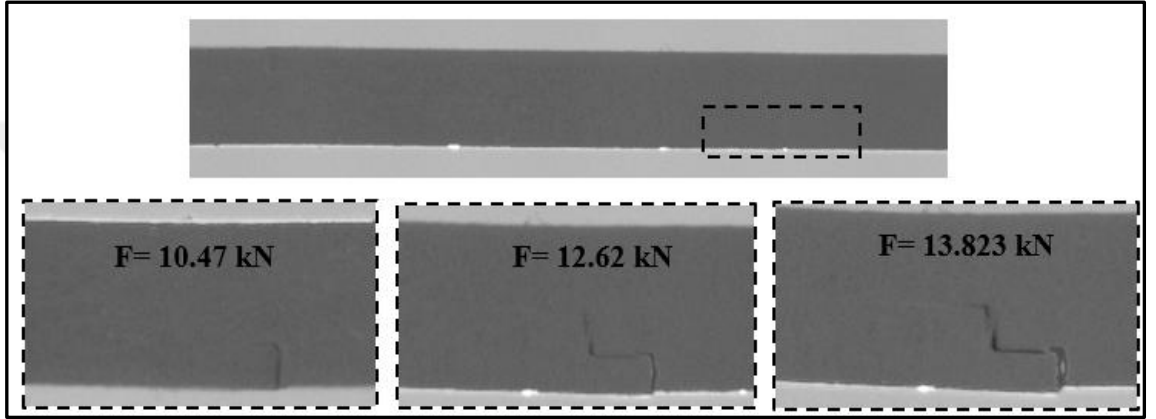
Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların bindirme bölgesinde kademe yapılması bağlantının hasar yükünde önemli derecede artışa neden olduğu yukarıda verilen deneysel sonuçlardan anlaşılmaktadır. Ancak hasar yükündeki bu artışa neden olan durumu daha iyi açıklayabilmek için deneyler esnasında bindirme bölgesinden hızlı kamera ile görüntüler alınmış ve incelenmiştir (Şekil 4.3).

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş kademeli bindirme bağlantı tipinde, bindirme bölgesinin uçlarında meydana gelen soyulma gerilmeleri bindirme bölgesinin uçlarında bir çatlak oluşturur ve bu çatlağın bindirme bölgesinin merkezine doğru ani ilerlemesiyle hasar oluşur. Şekil 4.3'de verilen deney esnasında hızlı kamera ile bindirme bölgesinden elde edilen görüntüler incelendiğinde, bindirme bölgesinin her iki ucunda çatlağın başladığı ve çatlağın ilk kademeyi geçip ikinci kademede maksimum seviyeye geldiği zaman ani bir şekilde merkeze doğru ilerleyip hasar oluşmaktadır.



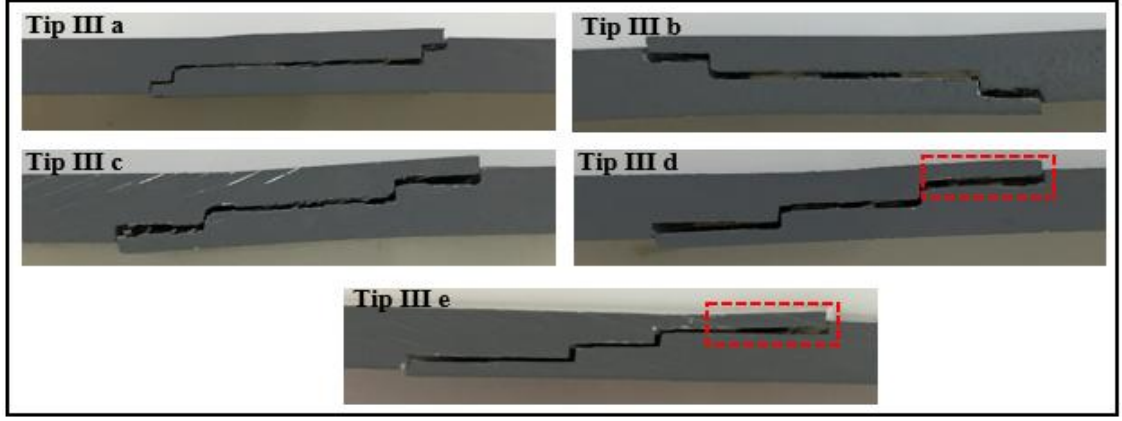
Şekil 4.3. Üç kademeli bindirme bağlantısının deney esnasında hızlı kamera ile elde edilen hasar görüntüsü, a) Tip 2-21-2, b) Tip 4-17-4, c) Tip 6-13-6, d) Tip 8-9-8, e) Tip 10-5-10.

Şekil 4.4’de verilen 2-21-2 kademe uzunluğuna sahip bağlantı tipinin (Tip IIIa) hasar fotoğrafı incelendiğinde, çatlağın bindirme bölgesinin uçlarından başladığı ($F=10.47$ kN) ve çatlak ilk kademeyi geçtikten sonra ikinci kademede başladığı görülmektedir. Çatlağın ikinci kademede başlayıp ($F=12.62$ kN) merkeze doğru ani bir şekilde ilerlemektedir. Aslında kademe olmasaydı çatlak bindirme bölgesinde başlayıp merkeze doğru ani bir şekilde ilerlemesiyle hasarın oluşacağı anlaşılmaktadır. Fakat ilk kademe çatlağın merkeze ani ilerlemesini engelleyip, ikinci kademede de çatlak başladıktan sonra hasar oluşmaktadır. Bu durum bağlantının hasar yükünü artırmaktadır.



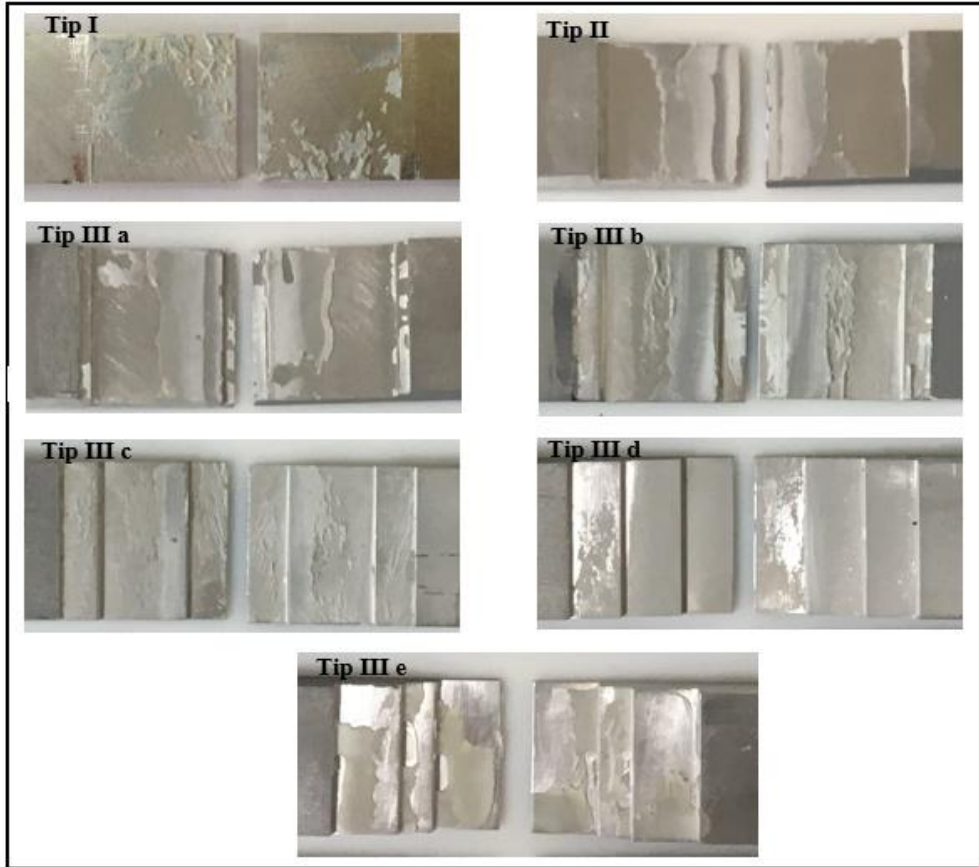
Şekil 4.4. 2-21-2 kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantısının tipinin kuvvete göre hasar görüntüsü.

Ancak çatlağa sebep olan bindirme bölgesinin uçlarında oluşan bu dönmenin uzunluğu (kademe uzunluğu) oldukça önemlidir. Bindirme bölgesinin uçlarında oluşan bu dönme uzunluğu ile ilk kademelin uzunluğu yaklaşık birbirine eşit olduğunda, bağlantının hasar yükü önemli derece artmaktadır (Tip III d). Eğer ilk kademelin uzunluğu bindirme bölgesinin uçlarında oluşan bu dönme uzunluğundan fazla ise bağlantının hasar yükünü azaltmaktadır (Şekil 4.5). Sonuç olarak ilk kademe uzunluğunun belli bir yere kadar artırılması (bindirme bölgesinin uçlarında oluşan dönme miktarı) bağlantının hasar yükünü artırdığı (Tip III a, b, c ve d), ancak ilk kademe uzunluğunun çok fazla artırılması bağlantının hasar yükünü azaltmaktadır (Tip III e).



Şekil 4.5. Beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantılarında çatlak oluşumu ve yayılımı.

Ayrıca ISO 10365 (1992) tanımlanan deformasyon tipleri göz önüne alınarak, Şekil 4.6’da verilen Tip I, Tip II, Tip III a, b, c, d ve e bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, tüm numunelerde özel kohesiv hasar (her iki yapıştırılan malzemenin bindirme bölgesinde eşit yapıştırıcı kalınlığının olmaması) olduğu görülmektedir.

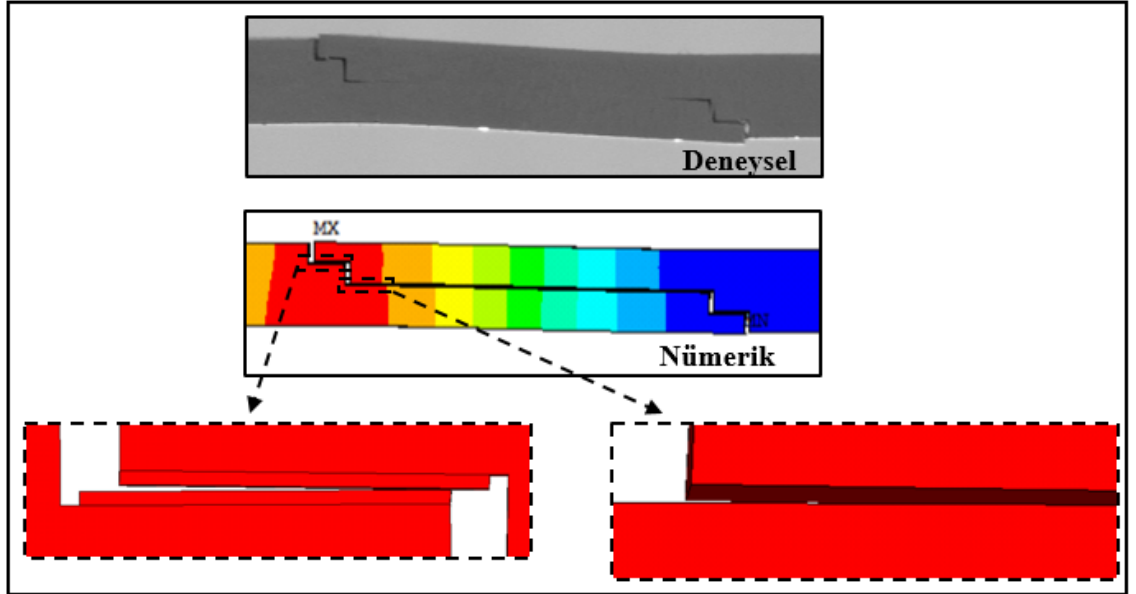


Şekil 4.6. DP460 yapıştırıcıya birleştirilmiş bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri.

4.2. Üç Kademeli Bindirme Bağlantılarının Nümerik Analizi

Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler genellikle belirli kabullerle iki boyutlu ya da tek boyutlu hale indirgenerek çözülebilmektedir. Bununla birlikte, yapıştırma bağlantılarındaki yapıştırıcı tabakasında iki boyutlu modelleme için yapılan kabuller (düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme) eksik çözümlere neden olabilmektedir. Bu yüzden üç kademeli bağlantı tipleri üç boyutlu modellenerek çözüm yapılmıştır.

Cohesive zone model kullanılarak elde edilen 2-21-2 kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantı tipinin maksimum hasar yükünde ($F=14.46$ kN) deneysel ve nümerik analiz görüntüsü karşılaştırıldığında, hem bindirme bölgesinin uçlarında oluşan açılma hemde eksantrik yükleden dolayı bağlantının bindirme bölgesinde oluşan dönme açısından deneysel ve nümerik analiz birbiriyle oldukça uyumlu olduğu Şekil 4.7’de görülmektedir.

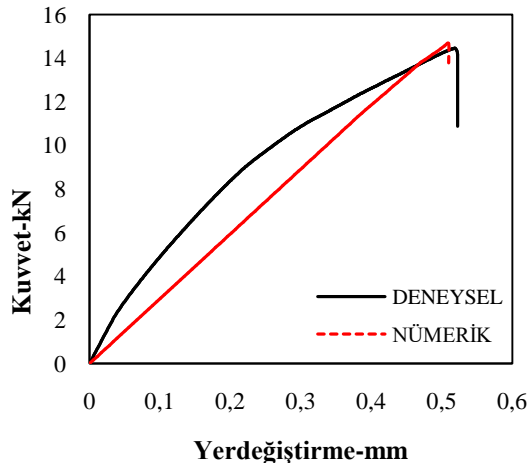


Şekil 4.7. 2-21-2 bindirme uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantı tipinin deneysel ve nümerik analiz görüntüsü.

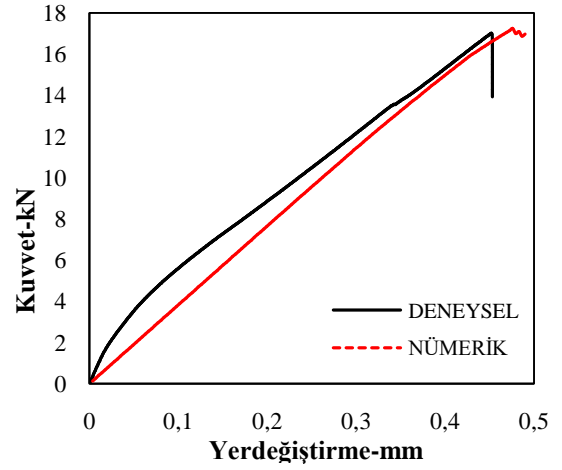
Üç kademeli bindirme bağlantılarının nümerik analizde, bağlantının bir ucu sabit tutulup diğer ucuna x yönünde deplasman verildi. Bu verilen deplasman esnasında bağlantının bindirme bölgesinin uçlarında y yönünde soyulma kuvvetleri (hasara neden olan) oluşmaktadır (Şekil 4.7). Bu kuvvetler bindirme bölgesinin uçlarındaki

yapıştırıcıyı açmaya çalıŐmaktadır. Cohesive zone model analizde kırılma enerjisi kuvvet ve yer deęiŐtirmeye bağlı olduğu göz önüne alındığında, üç kademeli bağlantının bindirme bölgesinin uçlarında oluşan kırılma enerjisi, yapıştırıcının kırılma enerjisine ulaŐtıęında hasar oluşmaktadır.

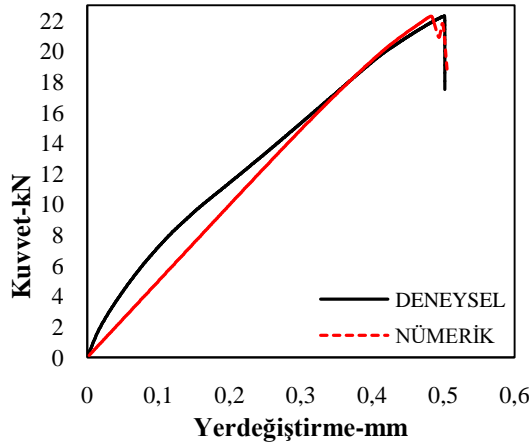
Şekil 4.8’de verilen deneylerden ve nümerik analizden elde edilen hasar yükleri incelendiğinde, deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum üç kademeli bindirme bağlantısının nümerik analizinde cohesivezone model kullanılmasının doğruluğunu göstermektedir. Ayrıca deneylerde yerdeğiştirme verilerinin video ekstensometre ile elde edilmesi, deneysel ve nümerik analizin uyumluluğu açısından son derece önemlidir. Aksi takdirde yerdeğiştirme verilerinin çekme cihazının strokundan elde edildiğinde, çekme cihazının çeneleri ile malzeme arasındaki sürtünme ve cihazın bağlantı elemanları arasındaki boşlukların yükleme esnasında yerdeğiştirme verilerini etkilediğinden, nümerik analiz ile deneysel veriler örtüŐmemektedir.



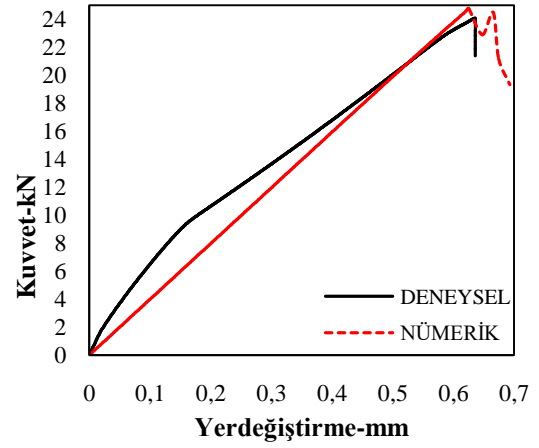
(a)



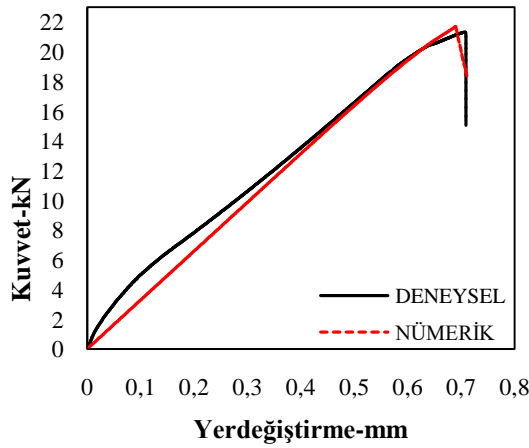
(b)



(c)



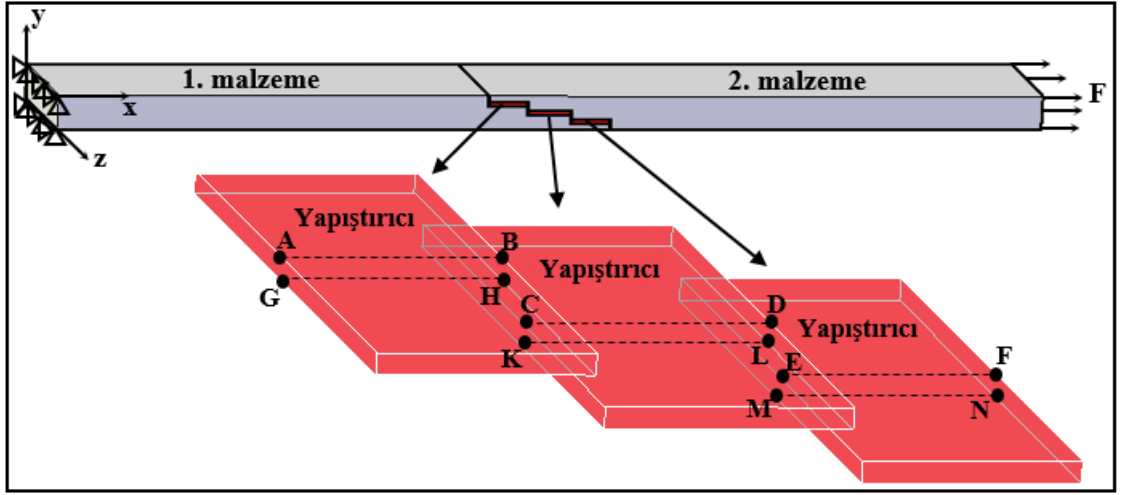
(d)



(e)

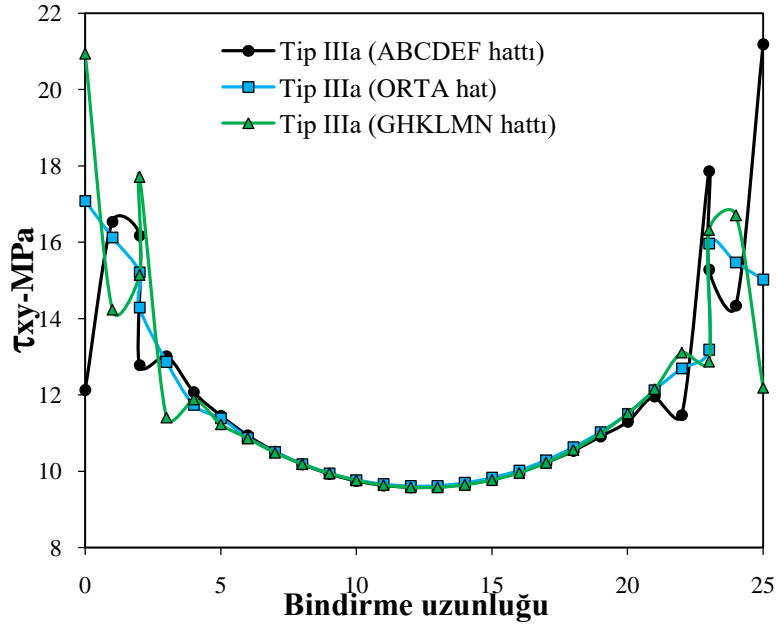
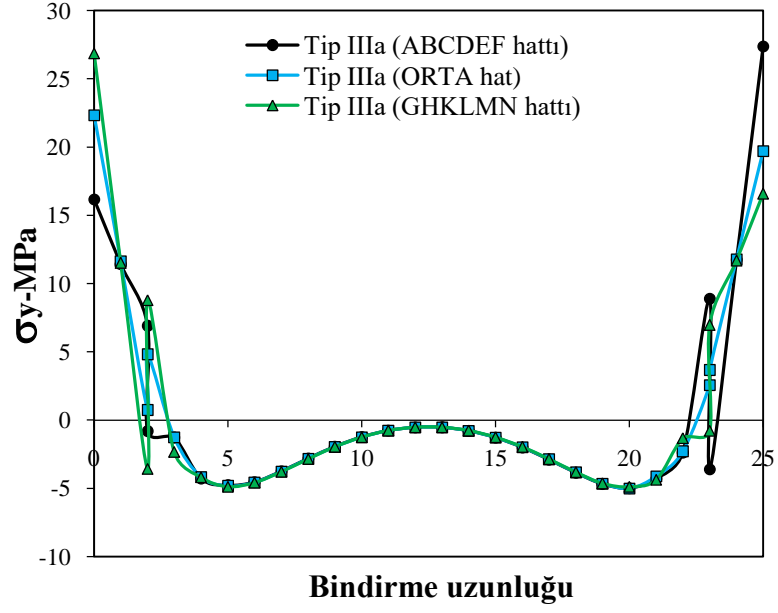
Şekil 4.8. Üç kademeli bindirme bağlantı tiplerinin deneysel ve nümerik olarak karşılaştırılması, a) Tip III a, b) Tip III b, c) Tip III c, d) Tip III d, e) Tip III e.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda yapıştırıcı tabakasında meydana gelen gerilmeleri daha doğru analiz edebilmek için yapıştırıcı tabakasında kritik hattın bulunup bu hatta göre analizlerin yapılması son derece önemlidir. Şekil 4.9’da gösterildiği üzere yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilmeler açısından yapıştırıcı tabakası genişliğinin orta kısmında üç kritik hat vardır. Bunlar birinci malzeme ile yapıştırıcı ara yüzeyi (ABCDEF hattı), yapıştırıcı tabaka kalınlığının orta hattı ve ikinci malzeme ile yapıştırıcı ara yüzeyi (GHKLMN hattı) olan hatlardır.



Şekil 4.9. Üç kademeli bindirme bağlantı tiplerinin kritik hasar yüzeyleri.

Şekil 4.10’da Tip IIIa bağlantı tipinin ABCDEF hattı, orta hat ve GHKLMN hattı boyunca hasara neden olan soyulma (σ_y) ve kayma (τ_{xy}) gerilmeleri incelendiğinde, ikinci malzeme ile yapıştırıcı ara yüzeyinde (ABCDEF hattı) ve birinci malzeme ile yapıştırıcı ara yüzeyinde (GHKLMN hattı) oluşan gerilmeler yapıştırıcı tabaka kalınlığının orta hattında oluşan gerilmelerden daha büyüktür. ABCDEF hattında ve GHKLMN hattında oluşan gerilmeler yaklaşık birbirine eşit olup, sınır ve geometri şartlarından dolayı ters simetri olmaktadır. Bundan dolayı Tip III a, b, c, d ve e için elde edilen gerilmeler ABCDEF hattı üzerinden çizilmiştir.

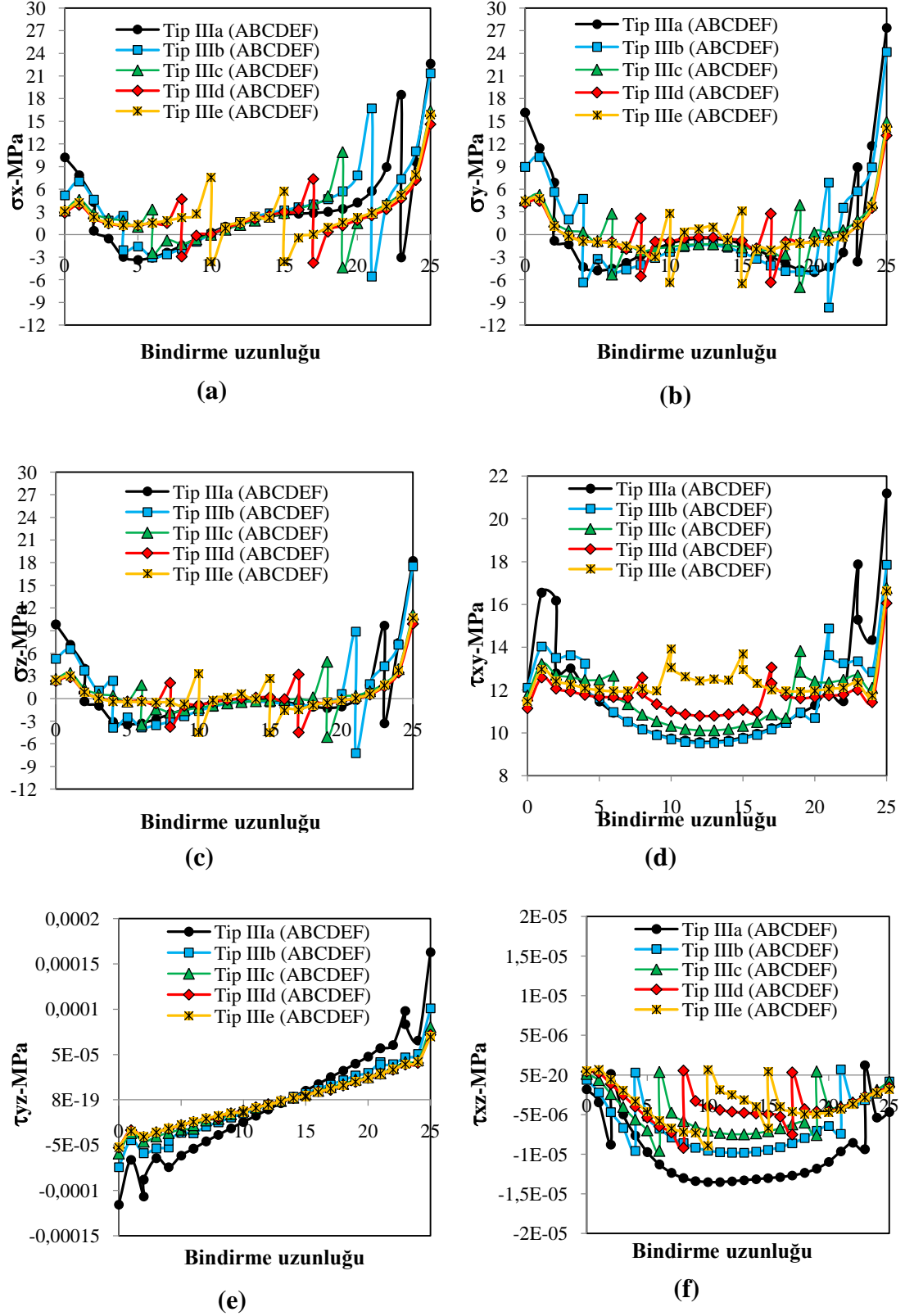


Şekil 4.10. Tip III a bağlantı tipinden elde edilen kritik hatların karşılaştırılması, a) soyulma gerilmesi (σ_y), b) kayma gerilmesi (τ_{xy}).

Şekil 4.11’de verilen gerilme dağılımları beş farklı üç kademeli bağlantı tiplerinin (Tip III a, b, c, d ve e) deneysel verilere göre hasar yükünün en az olan bağlantı tipinin (Tip III a) hasar yükünün yaklaşık yarısı olan 7250N’luk çeki yükü altında elde edilmiştir.

Şekil 4.11’de verilen gerilme dağılımları incelendiğinde, bindirme bölgesinin uçlarındaki kademe uzunluğunun değişmesi yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımlarını önemli derecede etkilemektedir. Şöyleki Şekil 4.11 a, b ve c’de verilen normal gerilme (σ_x , σ_y , σ_z) dağılımları incelendiğinde, bindirme bölgesinin uçlarındaki kademe uzunluğunun 2 mm’den 4 mm’ye çıkarıldığında A ve F noktalarında oluşan maksimum gerilme değeri bir miktar düşerken, 4 mm’den 6 mm’ye çıkarıldığında ise maksimum gerilmeler önemli derecede düşmektedir. Bindirme bölgesinin uçlarındaki ilk kademe uzunluğu 6 mm’den 8 mm’ye çıkarıldığında A ve F noktalarındaki maksimum gerilme değeri bir miktar daha düşerken, ilk kademe uzunluğunun 8 mm’den 10 mm’ye çıkarıldığında uçlardaki maksimum gerilme değeri artmaktadır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda hasara neden olan normal gerilme soyulma gerilmesidir (σ_y). Yukarıda bahsedilen durumlar beş farklı bağlantı tipi için elde edilen soyulma gerilmeleri için de geçerlidir (Şekil 4.11b). Beş farklı üç kademe bindirme bağlantısı için elde edilen bu soyulma gerilmeleri (σ_y) ile deneylerden elde edilen hasar yükleri karşılaştırıldığında, birbiriyile oldukça uyumlu olduğu açıkça görülmektedir.

Diğer taraftan üç kademeli bağlantı tiplerinde bindirme bölgesinin uçlarında oluşan (A ve F noktalarında) maksimum çeki karakterli gerilmeler ilk kademedenin sonunda (B ve E noktalarında) minimum ve bası karakterli olduğu görülmektedir. İlk kademedenin sonu ikinci kademedenin başlangıcı olduğundan (B ve E noktaları) minimum ve bası karakterli olan gerilmeler aynı noktada tekrar çeki karakterli olmaktadır. Kademeler arasındaki bu geçiş noktalarında oluşan çeki ve bası gerilmeler arasındaki farklılık kısa kademe uzunluğuna sahip bağlantı tipinde (Tip IIIa) maksimum olurken, bindirme bölgesinin uçlarındaki ilk kademe uzunluğunun artırılması çeki ve bası gerilmeler arasındaki bu farklılığı minimuma indirmiştir. Ayrıca ilk kademe uzunluğunun belirli bir uzunluğa kadar artırılması (8 mm’ye kadar), bindirme bölgesinin uçlarında oluşan ve hasarın başlamasında son derece etkin olan peel (σ_y) gerilmelerin değerini azalttığı ve bu gerilmeleri bindirme bölgesinin merkezine doğru kaydırmaktadır. Ancak bindirme bölgesinin uçlarındaki ilk kademedenin uzunluğu 8 mm’den daha fazla olduğunda (10 mm) bindirme bölgesinin uçlarında oluşan normal gerilmeleri az bir miktar artırdığı görülmektedir. Deneysel ve nümerik analiz sonuçlarına göre, bindirme bölgesinin uçlarındaki ilk kademedenin optimum uzunluğu 8 mm olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.11. Tip IIIa, b, c, d ve e bağlantı tiplerinin ABCDEF hattı boyunca elde edilen gerilme dağılımları; a) σ_x , b) σ_y , c) σ_z , d) τ_{xy} , e) τ_{yz} , f) τ_{xz} .

Ayrıca, τ_{xy} kayma gerilmeleri bindirme uzunluğu boyunca (ABCDEF hattı) F noktasında maksimum olurken, E noktasında ve bindirme bölgesinin orta kısımlarında minimum olmaktadır (Şekil 4.11d). Kayma gerilme (τ_{xy}) dağılımları incelendiğinde, bindirme bölgesinin uçlarındaki kademe uzunluğunun artırılması A ve F noktalarında oluşan maksimum kayma gerilme değerini azaltmaktadır. Normal gerilme dağılımlarında olduğu gibi kayma gerilme dağılımları açısından da bindirme bölgesinin uçlarındaki optimum kademe uzunluğunun 8 mm olduğu anlaşılmaktadır. Üç kademeli bindirme bağlantılarında bindirme bölgesinin uçlarındaki ilk kademenin sonu ile ikinci kademenin başlangıcındaki (kademeler arasındaki geçiş noktaları) oluşan kayma gerilmeleri (τ_{xy}) arasındaki farklılık kısa kademe uzunluğuna sahip bağlantı tipinde (Tip IIIa) maksimum olurken, bindirme bölgesinin uçlarındaki ilk kademe uzunluğunun artırılması kayma gerilmeleri arasındaki bu farklılığı minimuma indirmektedir. Diğer taraftan, beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantı numunelerde çeki yükü sonucu oluşan τ_{yz} ve τ_{xz} kayma gerilme dağılımlarının incelenirse, bu kayma gerilmelerinin ihmal edilebilecek değerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 4.11 e ve f).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının bindirme bölgesine tek kademe ve beş faklı kademe uzunluğuna sahip üç kademe açılarak elde edilen tek tesirli, tek kademeli ve üç kademeli bindirme bağlantılarının çeki yükü altındaki mekanik davranışını belirlemeye yönelik deneysel ve nümerik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmanın deneysel ve nümerik analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- Aynı yapıştırma alanına sahip tek tesirli bindirme bağlantı geometrisinin hasar yüküne göre tek kademeli bindirme bağlantı geometrisinin hasar yükünde yaklaşık %9,5 artış olmuştur. Bu artış tek tesirli bindirme bağlantı tipinde eksantrik yüklemekten dolayı oluşan momentin etkisi tek kademeli bindirme bağlantı tipinde minimize edilmesinden kaynaklanmaktadır.
- Tek tesirli bindirme bağlantısı (Tip-I) ile bindirme bölgesindeki ilk kademe uzunluğunun 2 mm olan (bindirme bölgesindeki kademe uzunluğu 2-21-2 mm olan bağlantı) üç kademeli bağlantı geometrisi karşılaştırıldığında, üç kademeli bindirme bağlantı geometrisinin hasar yükünde yaklaşık %17 artış olmaktadır.
- Üç kademeli bindirme bağlantısında bindirme bölgesindeki ilk kademe uzunluğunun artması bağlantının hasar yükünü artırmaktadır. Şöyle ki tek tesirli bindirme bağlantısı ile bindirme bölgesindeki ilk kademe uzunluğunun 2 mm olan (bindirme bölgesindeki kademe uzunluğu 2-21-2 mm olan bağlantı) üç kademeli bağlantı geometrisi karşılaştırıldığında, üç kademeli bindirme bağlantı geometrisinin hasar yükünde yaklaşık %17 artış olurken, ilk kademe uzunluğu 4 mm (bindirme bölgesindeki kademe uzunluğu 4-17-4 mm olan bağlantı) olduğunda yaklaşık %31, ilk kademe uzunluğu 6 mm (bindirme bölgesindeki kademe uzunluğu 6-13-6 mm olan bağlantı) olduğunda yaklaşık %80 ve ilk kademe uzunluğu 8 mm (bindirme bölgesindeki kademe uzunluğu 8-9-8 mm olan bağlantı) olduğunda ise yaklaşık %95 artış olmaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

- Ancak üç kademeli bindirme bağlantı tipinde ilk kademe uzunluğu 8 mm'den 10 mm'ye (bindirme bölgesindeki kademe uzunluğu 10-5-10 mm olan bağlantı) çıkarıldığında, tek tesirli bindirme bağlantısına göre oluşan hasar yükündeki artış oranı yaklaşık %95'den %71 düşmektedir.
- Üç kademeli bindirme bağlantıların deneylerinden elde edilen dikkat çekici bir sonuç, bindirme bölgesinin uçlarındaki kademe uzunluğunun artırılması bağlantının hasar yükünü önemli derecede artırmaktadır. Fakat ilk kademe uzunluğunun belirli bir orandan daha fazla artırılması bağlantının hasar yükünde azalmaya neden olmaktadır. Üç kademeli bindirme bağlantı tipinde ilk kademe uzunluğunun optimum değeri, bağlantının toplam bindirme uzunluğunun (bu çalışma için 25 mm) yaklaşık %30-35'i (bu çalışma için 8 mm) kadardır.
- Beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantılarından elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerine göre, kademe uzunluğunun değişmesi bağlantının hem hasar yükünü hem de yer değiştirme kapasitesini önemli derecede değiştirmektedir. İlk kademe uzunluğunun 2 mm'den 8 mm'ye kadar çıkması bağlantının hem yük taşıma hem de yer değiştirme kapasitesini artırırken, ilk kademe uzunluğu 8 mm'den 10 mm'ye çıkarıldığında bağlantının hasar yükü azalmakta yer değiştirmesi ise artmaktadır.
- Üç kademeli bindirme bağlantıların deneyleri esnasında hızlı kamera ile bindirme bölgesinden elde edilen görüntülere göre, hasara neden olan çatlakın bindirme bölgesinin her iki ucunda başladığı ve çatlakın ilk kademeyi geçip ikinci kademede maksimum seviyeye geldiği zaman ani bir şekilde merkeze doğru ilerlemesi ile hasarın oluştuğu görülmektedir.
- ISO 10365 tanımlanan deformasyon tipleri göz önüne alınarak bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, tüm bağlantı numunelerde özel kohesiv hasar (her iki yapıştırılan malzemenin bindirme bölgesinde eşit yapıştırıcı kalınlığının olmaması) oluştuğu görülmektedir.

- Beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantıların deneylerinden ve nümerik analizlerinden elde edilen kuvvet- yer değiştirme eğrileri birbiriyle oldukça uyumludur. Deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının birbiriyle oldukça uyumlu olması, bağlantıların nümerik analizinde cohesive zone model kullanılması ve deneylerde yer değiştirme verilerinin video ekstensometre ile elde edilmesine bağlıdır.
- Beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantıların nümerik analizlerinden elde edilen yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımları incelendiğinde, bindirme bölgesinin uçlarında ki kademe uzunluğunun değişmesi yapıştırıcı tabakasındaki oluşan gerilme dağılımlarını önemli derecede etkilemektedir.
- Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda hasara neden olan gerilme soyulma gerilmesidir (σ_y). Beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantıların bindirme bölgesinin uçlarında (A ve F noktalarında) oluşan soyulma gerilme dağılımlarına göre, ilk kademe uzunluğunun 2 mm'den 4 mm'ye çıkarıldığında A ve F noktalarında oluşan maksimum gerilme değeri bir miktar düşerken, 4 mm'den 6 mm'ye çıkarıldığında ise maksimum gerilmeler önemli derecede düşmektedir. Bindirme bölgesinin uçlarındaki ilk kademe uzunluğu 6 mm'den 8 mm'ye çıkarıldığında A ve F noktalarındaki maksimum gerilme değeri bir miktar daha düşerken, ilk kademe uzunluğunun 8 mm'den 10 mm'ye çıkarıldığında uçlardaki maksimum gerilme değeri artmaktadır. Bu soyulma gerilmeleri (σ_y) ile deneylerden elde edilen hasar yükleri karşılaştırıldığında da deneysel ve nümerik verilerin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.
- Kayma gerilme (τ_{xy}) dağılımları incelendiğinde ise, bindirme bölgesinin uçlarındaki kademe uzunluğunun artırılması bindirme bölgesinin uçlarında oluşan (A ve F noktalarında) maksimum kayma gerilme değerini azaltmaktadır. Soyulma gerilme dağılımlarında olduğu gibi kayma gerilme dağılımları açısından da bindirme bölgesinin uçlarındaki optimum kademe uzunluğunun 8 mm olduğu anlaşılmaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

- Ayrıca beş farklı kademe uzunluğuna sahip üç kademeli bindirme bağlantı numunelerde çeki yükü sonucu oluşan τ_{yz} ve τ_{xz} kayma gerilmelerinin ihmal edilebilecek değerlerde olmaktadır.



KAYNAKLAR

- Adams, R.D. and Wake, W.C., 1984. Structural adhesive joints. Elsevier Applied Science Publishers, London.
- 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.
- Akpınar, S. 2014. The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers. Composites Part B Engineering, 67, 170-178.
- Apalak, M.K., Güneş, R. and Fidancı, L. 2003. Geometrically non-linear thermal stress analysis of an adhesively bonded tubular single lap joint. Finite Elements in Analysis and Design, 39, 155-174.
- Arcan, M., Hashin, Z. and Voloshin, A., 1978. A method to produce uniform plane-stress states with applications to fibre reinforced materials. Experimental Mechanics.
- ASTM D2651., 1990. Standard guide for preparation of metal surfaces for adhesive bonding.
- ASTM D2651., 1990. Standard guide for preparation of metal surfaces for adhesive bonding.
- ASTM D 3433-75 Flat and contoured cantilever-beam specimens for determining the adhesive fracture energy.
- ASTM D 907-74. 1974. Definition of terms relating to adhesives.
- Aydın, M.D., 2003. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Campilho, R.D.S.G., Banea, M. D., Neto, J.A.B.P. and da Silva, L.F.M. 2013.modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of thecohesive law shape of the adhesive layer. International Journal of Adhesion & Adhesives, 44, 48–56.
- Campilho, R.D.S.G., Banea, M.D. , Pinto, A.M.G., da Silva, L.F.M. and de Jesus, A.M.P. 2011. Strength prediction of single- and double-lap joints by standard andextended finite element modelling. International Journal of Adhesion & Adhesives, 31, 363–372.

- Campilho, R.D.S.G., Pinto, A.M.G., Banea, M.D. and da Silva, L.F.M. 2012. Optimization study of hybrid spot-welded/bonded single-lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 37, 86–95.
- Campilho, R.D.S.G., Pinto, A.M.G., Banea, M.D., Silva, R.F. and da Silva, L.F.M. 2011. Strength improvement of adhesively bonded joints using a reverse-bent geometry. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 25,2351-2368.
- Carpenter, M.W. 1999. Characterizing the chemistry of yellow-poplar surfaces exposed to different surface energy environments using DCA, DSC and XPS. Master Thesis, West Virginia University, College of Agriculture, Forestry and Consumer Sciences, Department of Wood Science, Morgantown, West Virginia.
- da Silva, L.F.M. and Lopes, M.J.C.Q., 2009. Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique. *Int. J. Adhes. Adhes.* 29, 509–514.
- da Silva, L.F.M., Dillard, D.A., Blackman, B. and Adams, R.D. 2012. *Testing Adhesive Joints: Best Practices*. 468, Weinheim, Germany.
- das Neves, P. J. C., da Silva, L. F. M. and Adams, R. D. 2009. Analysis of mixed adhesive bonded joints. *J. Adhesion Sci. Technol.* 23, 35-61.
- Demir, M. E. 2016. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının üç boyutlu gerilme analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman Üniversitesi.
- Duncan, B.C and Dean, G.D., 1996. Notched-Beam Shear (Iosipescu) and Notched-Plate Shear (Arcan) Methods for Bulk and Joint Test Specimens. NPL Report CMMT(B) 56, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK.
- Fitton, M. D. and Broughton, J. G. 2005. Variable modulus adhesives: an approach to optimized joint performance. *International Journal of Adhesion Adhesives*, 25, 329–336.
- Fourche, G. 1995. An Overview of the Basic Aspects of Polymer Adhesion. Part I: Fundamentals. *Polymeric Engng. & Sci.*, 35, 957–67.
- Ghoddous, B. and Shishehsaz, M. 2015. Investigation on Void Effect on Shear Stress Field in Bonded Stepped-Lap Joint. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13, 331-343.
- Gültekin, K. 2014. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda malzeme genişliğinin ve kalınlığının bağlantının yük taşıma kapasitesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi.

- Ichikawa, K., Shin, Y. and Sawa, T. 2008. A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28, 8, 464-470.
- ISO 10365, 1992. Adhesives- Designation of main failure patterns.
- ISO 10365, 1992. Adhesives- Designation of main failure patterns.
- ISO 10365,(1992(E)) " Adhesives-Designation of main failure patterns Adhesives- Designation of main failure patterns"
- ISO 527-2, 1993. Plastics- Determination of tensile properties- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics.
- Jennings, C.W., 1972. *Journal of Adhesion*, 4,25.
- Kayacan, R., 1988. Yapıştırma ve metal bağlantılar için yapıştırıcı kullanımı.Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Kazaz, I., Akpınar, S. ve Özel, A. 2018. The Effects of thermal cycle and nanostructure reinforcement on the shear load in adhesively bonded joints. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* .
- Kim, H., Lee, S.J. and Lee, D.G. 1995. Development of a strength model for the cocured stepped lap joints under tensile loading. *Composite Structures*, 32, 1-4, 593-600.
- Kim, JH., Park, BJ. and Han, YW. 2004. Evaluation of fatigue characteristics for adhesivelybonded composite stepped lap joint. *Compos Struct*, 66(1):69–75.
- Kim, TH., Kweon, JH. and Choi, JH. 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.
- Kimiaefar, A., Lund, E., Thomsen, OT. and Sørensen, JD. 2013. Asymptotic sampling for reliability analysis of adhesive bonded stepped lap composite joints. *Eng Struct*, 49:655–63.
- Kinloch, A. J. 1987. *Adhesion and Adhesives: Science ve Technology*, Chapman and Hill, London.
- Kinloch, A. J. 1987. *Adhesion and Adhesives: Science ve Technology*, Chapman and Hill, London
- Kinloch, A.J., 1980. *Journal of Materials Science*,15,2141-2151.

- Kodakoğlu L., (1996) Yapıştırıcıların Genel Özellikleri ve Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesinin Analitik ve Nümerik Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dan. Kotil T., İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul Türkiye, 139 s.
- Li, D., Qing, G. and Liu, Y. 2011. A three-dimensional semi-analytical model for the composite laminated plates with a stepped lap repair. *Composite Structures*, 93,7, 1673-1682.
- Li, W., Zhou, S., Shi, Z., Wang, X. and Hu, P. 2017. Experimental and numerical analysis on fatiguedurability of single-lap joints under vibration loads. *The Journal of Adhesion*, 93(3), 187-203.
- Loctite Worldwide Design Handbook, 1988.
- Loctite Worldwide Design Handbook, 1998.
- Luo, Haibo., Yan, Ying., Zhang, Taotao. and Liang, Zudian. 2016. Progressive failure and experimental study of adhesively bonded composite single-lap joints subjected to axial tensile loads. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30, 894-914.
- Machado, R.M.D., Campilho, R.D.S.G. and Rocha, R.J.B. 2018. Extended finite element modelling of aluminium stepped-adhesive joints. *The Journal of Adhesion*,
- McBain, J.W. and Hopkins, D.G., 1925. *Journal of Physical Chemistry*. 29,188.
- MIL-HDBK-691B, 1987. *Military Standardization Handbook-Adhesive Bonding*. Department of Defense, Washington, DC.
- MIL-HDBK-691B, 1987. *Military Standardization Handbook-Adhesive Bonding*. Department of Defense, Washington, DC.
- Ozel, A., Aydin, MD. ve Temiz, S. 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. ve Aydin, MD. 2012. Effect of overlap length on durability of joints bonded with a pressure-sensitive adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 19,1,57-71.
- Parvatareddy, H., 1997. *Durability of Polyimide Adhesives and Their Bonded Joints for High Temperature Applications*. Ph.D. These, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

- Pinto, A. M. G., Campilho, R. D. S. G., Mendes, I. R. and Baptista, A. P. M. 2014. Numerical and experimental analysis of balanced and unbalanced adhesive single-lap joints between aluminium adherends. *The Journal of Adhesion*, 90, 89-103.
- Pizzi, A. 1994. Brief Nonmathematical Review of Adhesion Theories as Applicable to Wood. *Advanced Wood Adhesive Technology*, Chapter 1, Marcel Dekker, Inc.
- Rende, H., 2000, *Makine Elemanları*, İstanbul.
- Ribeiro, T. E. A., Campilho, R.D.S.G., da Silva, L. F. M. and Goglio, L. 2016. Damage analysis of composite–aluminium adhesively-bonded single-lap joints. *Composite Structures*, 136, 25–33.
- Sawa, T., Ichikawa, K., Shin, Y. and Kobayashi, T. 2010. A three-dimensional finite element stress analysis and strength prediction of stepped-lap adhesive joints of dissimilar adherends subjected to bending moments. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30,5, 298-305.
- Silva, J. O. S., Campilho, R. D. S. G. and Rocha, R. J. B. 2018. Crack growth analysis of adhesively-bonded stepped joints in aluminium structures. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 540.
- Skinner, S.M., Savage, R. L. and Rutzler, J., 1953. *Journal of Applied Physics*, 24, 439.
- Temiz, S. 2003. Study of the Effect of Environmental Factors on Mechanical Properties of Adhesively Bonded Joints. Ph. D. Thesis, Ataturk University, Erzurum, Turkey.
- Temiz, S. 2006. Application of bi-adhesive in double-strap joints subjected to bending moment. *J. Adhesion Sci. Technol*, 20, 1547–1560.
- Thomas, R. and Adams, R.D., 1996. The Torsion Method for Bulk and Joint Test Specimens. MTS Adhesives Project 1, Report No 7, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, UK.
- Vasudevan, A.K., Doherty, R.D., 1989, *Aluminum Alloys-Contemporary Research and Applications*, part 6, pp.171-184.
- Voyutskii, S.S. 1963. Autohesion and Adhesion of High Polymers. Vol. 4 of the *Interscience Polymer Reviews Series*, First American edition, Interscience Publishers, Inc.
- www.biymed.com, (www.biymed.com/femmuh/analiz/fem/seynedir.htm), Sonlu Elemanlar Yöntemi ve ANSYS.28.05.2008.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Melek DURMUŞ
Uyruğu : TC
Doğum Tarihi ve Yeri : 12.10.1993 / Bayburt
Medeni Hali : Bekar
Telefon : +90 542 308 92 79
e-mail : melekdurmus211@gmail.com

Eğitim

Derece	Üniversite	
Lisans	Bayburt Üniversitesi	2012-2016
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	2017-devam ediyor

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

ÇORUH YAPI DENETİM LİMİTED ŞİRKETİ- KONTROL ELEMANI 2016- 2017

Uluslararası Kongre Sunum

Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Kademeli Bağlantılarda Kademe Uzunluğunun Hasar Yüküne Etkisi. 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018) October 24-26, 2018, Adana/Turkey