



**YAPIŞTIRILAN MALZEME ÜZERİNDE
OLUŞTURULAN ÇENTİK VE GİRİNTİLERİN
YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ
BAĞLANTILARIN MUKAVEMETİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Simay BAYRAMOĞLU

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

2022

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YAPIŞTIRILAN MALZEME ÜZERİNDE OLUŞTURULAN ÇENTİK VE
GİRİNTİLERİN YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN
MUKAVEMETİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Simay BAYRAMOĞLU

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Salih AKPINAR

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

17 / 06 / 2022

Simay BAYRAMOĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPIŞTIRILAN MALZEME ÜZERİNDE OLUŞTURULAN ÇENTİK VE GİRİNTİLERİN YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN MUKAVEMETİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Simay BAYRAMOĞLU

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Salih AKPINAR

Yapıştırılmalı bağlantılarının geleneksel birleştirme metotlarının bir alternatifi olabileceği düşüncesiyle, 1980'lerden itibaren birçok farklı yapıştırılmalı bağlantı geometrileri havacılıkta kullanılmıştır. Günümüzde kullanılan bağlantı geometrilerinden biri tek tesirli bindirme geometrisidir. Bu bağlantı geometrisinde eksantrik yüklemeye dolayı bindirme bölgesinin uçlarında hasara neden olan soyulma gerilmeleri oluşmaktadır. Bu gerilmelerin azaltılması bağlantının mukavemetini artırmaktadır. Bu çalışmada, yapıştırılan malzemede farklı uzunlukta, derinlikte çentik ve girintiler oluşturularak elde edilen tek tesirli bindirme (TTB) bağlantıların mukavemetleri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmada yapıştırıcı olarak DP460 yapısal yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme olarak ise AA2024-T3 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. İlk olarak yapıştırılan malzemede farklı uzunlukta ve kalınlıkta girintiler ile farklı genişlik ve derinlikte çentikler kullanılarak elde edilen TTB'nin mukavemetleri incelenmiştir. Bağlantı mukavemeti açısından elde edilen en iyi girintili veya çıkıntılı bağlantılar tespit edilmiş olup, girinti ve çıkıntı geometrisinin birlikte olduğu bağlantıların mukavemetleri incelenmiştir. Sonuç olarak TTB bağlantılarda yapıştırılan malzemenin bindirme bölgesinin dış kısmına girinti yapılması bağlantının mukavemetini yaklaşık %29, çentik yapılması ise yaklaşık %27 artırmaktadır. Ayrıca bağlantıda hem çentiğin hem de girintinin birlikte kullanılması bağlantının mukavemetini daha da iyileştirmektedir. Ek olarak sunulan çalışmada deneysel elde edilen veriler nümerik analiz ile karşılaştırılmış olup, verilerin birbiriyle oldukça tutarlı olduğu görülmüştür.

2022, 66 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, Mukavemet iyileştirme, Yapıştırılan malzemede çentik, Yapıştırılan malzemede girinti

ABSTRACT

MS. Thesis

THE EFFECT OF CO-CREATION OF NOTCHES AND RECESSES IN THE ADHERED MATERIAL ON THE STRENGTH OF SINGLE-LAP ADHESIVE JOINTS: EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS

Simay BAYRAMOĞLU

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Salih AKPINAR

Since the 1980s, many different adhesive joint geometries have been used in aerospace, with the idea that adhesive bonded joints could be an alternative to conventional bonding methods in aerospace applications. One of the joint geometries used today is the single-overlap joint geometry. In this joint geometry, peeling stresses occur due to eccentric loading that cause damage in the thrust zone. Reducing these stresses increases joint strength. In this study, the strengths of single-lap joints (SLJ) obtained by creating notches and recesses of different lengths and depths in the adhered material were investigated experimentally and numerically. In the study, the DP460 structural adhesive was used as the adhesive, and the AA2024-T3 aluminum alloy was used as the adherend. First, the strengths of the SLJ obtained by using different lengths and thicknesses of recesses and notches of different widths and depths in the adherend were investigated. Then, the best recessed or protruding joints obtained in terms of joint strength were determined, and the joint strengths with the best both recess and protrusion geometry were examined. As a result, in single lap joints, indenting the adhesive outside the lap zone increases joint strength by approximately 29%, and notching increases by 27%. In addition, the use of both the notch and the recess in the joint improves the joint strength further. Additionally, in the presented study, experimental data were compared with numerical analysis and it was observed that the data were quite consistent with each other.

2022, 66 pages

Keywords: Adhesively bonded joint, Strength improvement, Adherend notching, Adherend recessing

TEŞEKKÜR

“Yapıştırılan Malzeme Üzerinde Oluşturulan Çentik ve Girintilerin Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Mukavemeti Üzerine Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma; Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez çalışma konusunu bana önererek, çalışmalarım süresince deneyim ve yardımlarını esirgemeyen, araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşılıp ufkumu açan sayın hocam Doç. Dr. Salih AKPINAR’a minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman bir borç bilirim.

Öğrenim hayatımın her aşamasında her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen annem Sema BAYRAMOĞLU, babam Salçın BAYRAMOĞLU ve kız kardeşlerim Sude ve Sena’ya çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca arkadaşlığı ile yanımda olan Ayşegül Sinem TARHAN, Bengisu Şeyda KOP, Ezgi KÜÇÜKÇELİK, Kübra DEMİR, Resül ŞAHİN ve Tefik Oğuzhan ERGÜDER’e teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmamı yürütmemde ve bitirmemde maddi desteğiyle katkı sağlayan Erzurum Teknik Üniversitesi BAP birimine teşekkürü bir borç bilirim.

Simay BAYRAMOĞLU

Haziran 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Yapışma İşlemi.....	2
1.1.1. Yapışma teorileri	3
1.1.1.1. Mekanik yapışma teorisi.	3
1.1.1.2. Difüzyon teorisi.....	3
1.1.1.3. Zayıf sınır tabaka teorisi.....	3
1.1.1.4. Yüzeyle tutunma (adsorpsiyon) teorisi.....	4
1.1.1.5. Elektrostatik teorisi	4
1.2. Yapışmayı Etkileyen Faktörler	4
1.3. Yapıştırıcılar	5
1.3.1. Kürleşme mekanizmalarına göre yapıştırıcılar	6
1.3.1.1. Kimyasal reaksiyonlarla kürleşen yapıştırıcılar	6
1.3.1.2. Fiziksel reaksiyonlarla kürleşen yapıştırıcılar	8
1.3.2. Formlarına göre yapıştırıcılar	10
1.4. Yapıştırma Bağlantıları	11
1.4.1. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme tipleri	12
1.4.2. Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar çeşitleri	14
1.4.3. Yapıştırılacak yüzeylerin hazırlanma işlemleri	15
1.4.3.1. Yapıştırılacak yüzeyin hazırlanması	16
1.4.3.2. Yüzeyle ön işlemleri.....	17
1.4.3.3. Yüzeyle işlemleri.	18
1.4.4. Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları.....	19
1.5. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	21

1.5.1. Deneysel yöntemler	21
1.5.1.1. Çekme testi.....	21
1.5.1.2. Kayma testi.....	22
1.5.1.3. Soyulma testi.....	23
1.5.1.4. Basma testi	24
1.5.1.4. Kırılma tokluğu testi	24
1.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi	24
1.6.1. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları	25
1.6.2. Ansys paket programı	26
1.6.2.1. Modelleme.....	26
1.6.2.2. Çözümleme	27
1.6.2.3. Sonuçları görüntüleme	29
1.7. Cohesive Zone Model ile Sayısal Analiz.....	30
2. KAYNAK ÖZETLERİ	32
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	39
3.1. Yapıştırılan Malzeme	39
3.2. Deneyde Kullanılan Yapıştırıcı.....	39
3.3. Yapıştırma Bağlantılarının Hazırlanması.....	40
3.4. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Hasar Yüklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi	44
3.5. Yapıştırma Bağlantılarının Nümerik Analizi	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	49
4.1. Girintili Tek Tesirli Bağlantıların Deneysel Sonuçları	49
4.2. Çentikli Tek Tesirli Bağlantıların Deneysel Sonuçları	50
4.3. Girintili-Çentikli Tek Tesirli Bağlantıların Deneysel Sonuçları.....	51
4.4. Nümerik Analiz Sonuçları	52
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	60
KAYNAKLAR	62

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
B	Yapıştırma bağlantıların genişliği
D	İki kuvvet hattı arasında mesafe (mm)
E	Elastisite modülü (gpa) (kn/mm ²)
E _{COH}	Molekülleri sonsuz bir mesafeye ayırmak için gereken enerji
EI	Eğilme rijitliği (N*mm ²)
F	Kuvvet (N)
Hz	Frekans birimi
I	Atalet momenti (kalınlık yönünde) mm ⁴
M	Eksantriklikten dolayı oluşan moment
mm	Milimetre
P	Maksimum yük (N)
R	Gerilme oranı
t	Malzeme kalınlığı
V	Molar hacim
δ	Çözünürlük parametresi
σ ₁	1. Asal gerilme bileşeni
σ ₂	2. Asal gerilme bileşeni
σ ₃	3. Asal gerilme bileşeni
σ _a	Gerilme genliği
σ _m	Ortalama gerilme
σ _{max}	Maksimum gerilme
σ _{min}	Minimum gerilme
σ _x	X yönündeki normal gerilme bileşeni
σ _y	Y yönündeki normal gerilme bileşeni
σ _z	Z yönündeki normal gerilme bileşeni
τ	Kayma gerilmesi

Kısaltmalar

AA2024	Havacılık Alüminyum Alaşımı (2000 serisi)
ASTM	The American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
CZM	Cohesive Zone Model
EN	Avrupa Standardizasyon Komitesi
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Örgütü)
KEY	Kohezif enerji yoğunluğu
MISO	Multilinear Isotropic Hardening
SiC	Silisyum karbür
SLJ-TTB	Single lap Joint (Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantısı)
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
USA	United States of America (Amerika Birleşik Devletleri)
YÜTAM	Erzurum Teknik Üniversitesi Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Perçin, kaynak ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantıya ait gerilim dağılımı	1
Şekil 1.2. Yapıştırma bağlantılarındaki adhezyon ve kohezyonun şematik gösterimi	2
Şekil 1.3. Yapıştırma bağlantı geometrilerinin 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 1.4. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarında kullanılan gerilme tipleri: (a) Çekme, (b) Kayma, (c) Soyulma, (d) Ayrılma.....	13
Şekil 1.5. ISO 10365 standardında belirtilen yapıştırılmış bağlantılarda oluşan temel hasar çeşitleri (a) Kohezyon hasarı, (b) Adezyon hasarı, (c) Yapıştırılan malzemedeki ayrılma (delaminasyon) hasarı	14
Şekil 1.6. Yüzey hazırlama işlemleri	16
Şekil 1.7. Çekme testi temel geometrisi	22
Şekil 1.8. Tek tesirli bağlantılarda eğilme momenti etkisinden sonra elde edilen geometri	22
Şekil 1.9. T- Soyulma numunesi.....	23
Şekil 1.10. D 3433 ASTM tarafından önerilen standart Cohezive Zone Hasar Modeli .	31
Şekil 1.11. İki ayırıcı yapışkan yüzeyin şematik modeli (a) Çift doğrusal kohezif model (b) [(a)'da tanımlanan konumlara karşılık gelen numaralandırılmış aşamalar]	30
Şekil 3.1. AA2024-T3 Alüminyum alaşımının gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı	39
Şekil 3.2. DP460 yapıştırıcının gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı	39
Şekil 3.3. Bağlantıların geometrik parametreleri (a) Tek tesirli bindirme bağlantısı, (b) Girintili tek tesirli bindirme bağlantısı, (c) Çentikli tek tesirli bindirme bağlantısı (d) Girintili ve çentikli tek tesirli bindirme bağlantısı	40
Şekil 3.4. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda kullanılan özel tasarlanmış kalıp ..	42
Şekil 3.5. Yapıştırıcı kalınlığını belirlemek için kullanılan metal parçalar	43
Şekil 3.6. (a) Yüzey hazırlama işlemi uygulandıktan sonra yapıştırılan malzemeler, (b) Kürleşme sonrası bağlantı numuneleri	44

Şekil 3.7. Yüzeğe boya püskürtme	44
Şekil 3.8. Deneşlerde kullanılan sınır şartları ve yükleme	45
Şekil 3.9. Tek tesirli bindirme bağlantılarının nümerik analiz modeli	46
Şekil 3.10. Maksimum soyulma gerilmelerine göre sayısal yakınsama analizi.	47
Şekil 3.11. Baskın bilineer CZM yasası (a) Mod-I (b) Mod-II.....	47
Şekil 4.1. Deneşsel çalışmadan elde edilen GTTB bağlantılarının ortalama maksimum kırılma yükleri	50
Şekil 4.2. Deneşsel çalışmadan elde edilen ÇTTB bağlantılarının ortalama maksimum kırılma yükleri	51
Şekil 4.3. Deneşsel çalışmadan elde edilen GÇTTB bağlantılarının ortalama maksimum kırılma yükleri	52
Şekil 4.4. GÇTTB-3 tipinin deneşsel ve sayısal analiz görüntüleri	54
Şekil 4.5. Deneş sırasında yüksek hızlı kamera tarafından elde edilen RNSLJ-3'ün hasar görüntüsü	55
Şekil 4.6. TTB, GTTB-1, GTTB-2, GTTB-3, GTTB-4 ve GTTB-5 tiplerinin bindirme uzunluğu boyunca gerilme dağılımları (a) Soyulma gerilmesi (σ_z), (b) Kayma gerilmesi (τ_{yz})	56
Şekil 4.7. TTB, ÇTTB-1, ÇTTB-2, ÇTTB-3 ve ÇTTB-4 tiplerinin bindirme uzunluğu boyunca gerilme dağılımları (a) Soyulma gerilmesi (σ_z), (b) Kayma gerilmesi (τ_{yz})	57
Şekil 4.8. SLJ tipinde yapıştırılan malzemede oluşan y yönünde normal gerilme (σ_y) dağılımları.....	58
Şekil 4.9. ÇTTB-5, ÇTTB-6 ve ÇTTB-7 tiplerinin bindirme uzunluğu boyunca gerilme dağılımları (a) Soyulma gerilmesi (σ_z) (b) Kayma gerilmesi (τ_{yz})	58
Şekil 4.10. TTB, GÇTTB-1, GÇTTB-2, GÇTTB-3 ve GÇTTB-4 tiplerinin bindirme uzunluğu boyunca gerilme dağılımları (a) Soyulma gerilmesi (σ_z) (b) Kayma gerilmesi (τ_{yz})	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

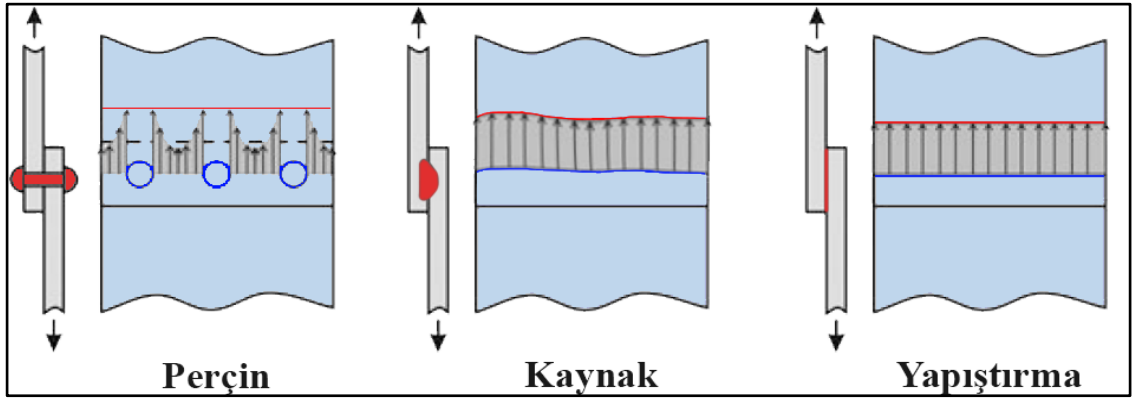
Çizelge 1.1. Yağ temizleme işleminde kullanılan solvent bazlı temizleyiciler	17
Çizelge 3.1. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar için deneysel parametreler	41
Çizelge 3.2. DP460 yapıştırıcısı için CZM modelinde kullanılan mekanik özellikler ..	48
Çizelge 4.1. Sayısal analiz, deneysel ortalama hasar yükleri ve bağlantıların yer değiştirmesi.....	53



1. GİRİŞ

Yüzyıllardır kullanılmakta olan yapıştırıcıların büyük çoğunluğu kemikler, deriler, balıklar, süt ve bitkiler gibi doğal ürünlerden oluşmaktaydı. Ancak, ileri teknolojik uygulamalarda kullanılan yapıştırıcılar 1940'ların ortasında tanıtılan sentetik polimerler sayesinde önemli ölçüde gelişmiştir. Artık günümüzde evde, endüstride, ulaşımda ve daha birçok yerde yapıştırıcı kullanmayan bir ürün hayal etmek oldukça zordur.

Yapıştırılarak birleştirilen bağlantılar, mühendislik uygulamalarında mekanik bağlantılara karşı artan bir alternatiftir. Bu bağlantılar, geleneksel mekanik bağlantı elemanlarına göre daha yüksek bir sertliğe, daha düzgün bir yük aktarımına, daha düşük ağırlık ve maliyete sahiptir. Şekil 1.1'de yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantıdaki gerilim dağılımının perçinli bir bağlantıya göre nasıl daha yüksek bir sertlik ve daha düzgün bir gerilim dağılımı sağlayabileceğini göstermektedir. Yapıştırıcının polimerik doğasından ötürü, yapıştırılarak birleştirilmiş bağlantılar, aynı zamanda yüksek yorulma mukavemetine sahip olmayı sağlayan iyi sönümleme özellikleri vardır.



Şekil 1.1. Perçin, kaynak ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantıya ait gerilim dağılımı

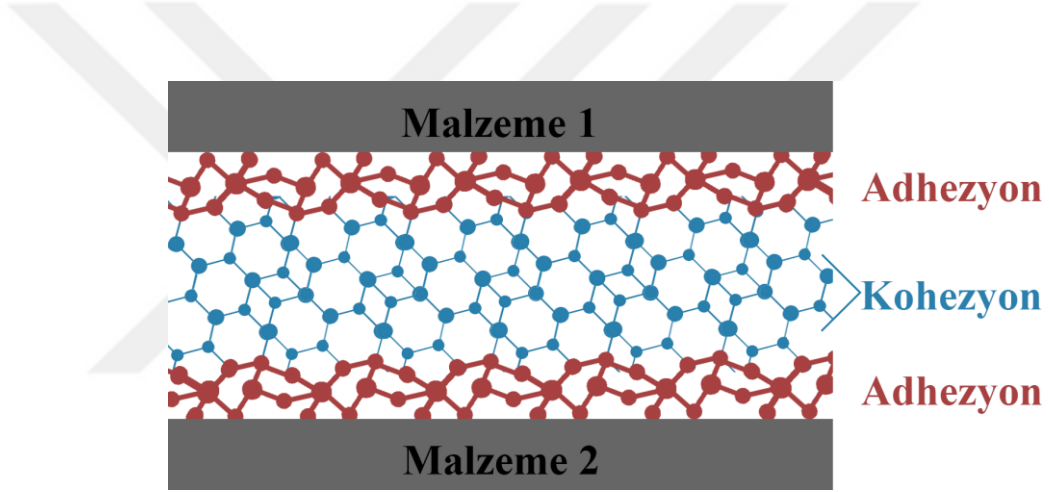
Yapıştırma bağlantılarıyla ilgili uygulamalar günümüzde çok çeşitlidir ve hemen hemen her tür endüstride kullanılmaktadır. Havacılık endüstrisi, bu teknolojinin öncülerinden biridir ve uçaklarda kompozit kullanımı arttığından giderek daha fazla yapıştırıcı kullanılmaktadır. Demiryolu ve otomotiv endüstrisi de daha hafif araçlar üretmek için yapıştırıcılara yönelmektedir. İnşaat, ayakkabı ve elektronik endüstrisi diğer örneklerdir. Biyoloji ve tıp gibi gelişmekte olan alanlar, örneğin protezler, yapay organlar

1. GİRİŞ

için malzemelerin biyouyumluluğunda önemli konular olan yüzeylerde hücre yapışması ve protein yapışmasına dayanan cerrahi yapıştırıcılar geliştirilmeye devam edilmektedir (da Silva et al. 2018).

1.1. Yapışma İşlemi

Yapışma, iki ya da daha fazla malzemeyi yapıştırıcıyla birleştirme işlemidir. Yapışma işleminde adhezyon ve kohezyon olarak adlandırılan iki mekanizma bulunmaktadır. Adhezyon iki maddenin temas yüzeylerindeki yapışma kuvvetidir. Kohezyon ise yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir.



Şekil 1.2. Yapıştırma bağlantılarındaki adhezyon ve kohezyonun şematik gösterimi

Malzemelerin yapıştırıcı ile birleştirilmesi işlemi önemli avantajlara sahiptir. Yapıştırıcı tüm birleşme yüzeyine statik ve dinamik yüklerin düzgün dağılmasını sağlayarak gerilmenin belirli noktalarda yoğun bir duruma gelmesine engel olur. Bu yüzden yapıştırıcıyla birleştirilmiş bir yapışma bağlantısı, eğilme ve titreşime, mekanik yöntemler ile yapılan bağlantılardan daha dayanıklıdır. Yapıştırıcı aynı zamanda birleşim yerinin sızdırmazlığını da sağlar, böylece mekanik yöntemlerle birleştirilmiş parçalarda görülebilen korozyonu engeller.

Yapıştırıcı kullanımına karar vermeden önce dikkate edilmesi gereken işlemler vardır. Örneğin, yapıştırıcı yapıştırılacak malzemelere uygun olmalı, hesaplanan çalışma

yükü ve ortamına dayanmalıdır. Ayrıca, yüzey hazırlığı, kürleşme sistemi ve bunların süre ve maliyetleri de dikkate alınmalıdır.

1.1.1. Yapışma teorileri

Günümüze kadar yapışma olayını açıklamak için bilim insanları tarafından teoriler ortaya atılmıştır. Bu teoriler;

1.1.1.1. Mekanik yapışma teorisi

Mekanik yapışma teorisi, yapışkan ve pürüzlü bir malzemenin yüzeyi arasındaki kenetlenmeye odaklanır. McBain and Hopkins tarafından ortaya atılan bu teoride, yüzey üzerine sıvı yapıştırıcı uygulandığı zaman, yapıştırıcının gözeneklere girerek mekanik tutunma olacağını ve dolayısıyla iyi bir yapışma meydana geleceğini ifade etmiştir (Packham 2003). Makro ölçekte pürüzlü bazı yüzeylere olduğu kadar anodize alüminyum gibi mikrofibröz ve mikro gözenekli yüzeylere de uygulandığı gösterilmiştir (da Silva et al. 2018).

1.1.1.2. Difüzyon teorisi

Bu yapışma teorisi, 1960'larda Voyutskii tarafından ortaya atılmıştır. Polimer halkalarının birbiri içinde difüzyona uğraması ile (dağılmasıyla) iki faz arasındaki molekül alışverişine dayanan difüzyon teorisi daha çok polimerler arasında gerçekleşmesine rağmen metal ve polimer ara yüzeylerinde çok az meydana gelen bir durumdur. Başka bir deyişle bu teori; iki komşu faz arasında molekül alışverişini kabul etmektedir (Voyutskii and Voiutskii 1963).

1.1.1.3. Zayıf sınır tabaka teorisi

Zayıf sınır tabaka teorisi, temel yapışmadan ziyade bir kırılma teorisidir. Bu teori, yapıştırılan yüzeyler arasında bulunan yağ, gres, oksit veya pas gibi kirleticilerin yapıştırma verimini düşüreceğini açıklamaktadır. Bu yüzden temiz ve kuru yüzeylerin

yapıştırılmasında daha güçlü tutunma ve kuvvetli bir yapışma işleminin olacağını ifade eder (da Silva et al. 2018).

1.1.1.4. Yüze tutunma (adsorpsiyon) teorisi

Adsorpsiyon yapışma teorisinin temel fikri, iki malzeme arasındaki yapışmanın moleküler düzeyde temas olmasından kaynaklanır. İki malzeme temas ettiğinde, aralarında çekim kuvvetleri olacaktır. Buna Van der Waals kuvveti denir. Yapıştırma işlemlerinde uygulanan ve en çok kabul gören bir teoridir. Yapıştırıcı ve yapıştırma yapılacak malzeme arasında iyi bir bağ oluştuğunda, ara yüzeyde moleküller ve atomlar arası çekim kuvvetlerinin meydana gelmesi durumunda, yapışma olayının ortaya çıktığını ifade etmektedir.

1.1.1.5. Elektrostatik teorisi

Deryagin ve Krotova tarafından 1948 yılında ortaya atılan bu teoriye göre, farklı türde çekim kuvvetine sahip malzemelerin birbiriyle temas gerçekleştirmesi sonucunda potansiyel bir ayrım meydana gelir ve meydana gelen bu kuvvet sonucunda yapışma olayı gerçekleşir. Elektrostatik yapışma teorisi, bir yapışkan bağın tahrip edilmesi sırasında gözlenebilen kıvılcım gibi elektriksel olaylara işaret eder ve yapıştırıcı ile alt tabaka arasında elektrostatik yük transferini dikkate alır (da Silva et al. 2018).

1.2. Yapışmayı Etkileyen Faktörler

Yapıştırma bağlantılarında bazı fiziksel ve kimyasal faktörler yapıştırıcının etkin olması ve yapışmanın sağlanabilmesi için oldukça önemlidir. Bu faktörlerden bazıları aşağıda verilmiştir. Yapıştırma işlemi sırasında bu faktörlerden bir veya birden fazlası etkili olabilmektedir.

Sıcaklık: Yapıştırıcılar genellikle oda sıcaklığında aktiftir. Ancak birçok kimyasal reaksiyonda olduğu gibi yüksek sıcaklıklarda aktivitesi daha da artar. Bu yüzden sıcaklık kontrolü etkili bir şekilde yapılmalıdır.

1. GİRİŞ

Zaman: Yapıştırıcının kuruyarak etkin hale gelmesi için belirli bir sürenin geçmesi gerekir. Geçen bu süre yapıştırıcının etkin olma süresidir. Bu süre basınç, sıcaklık veya katalizörler yardımıyla düşürülebilir.

Basınç: Yapıştırılan bağlantıların üzerine yapılan basınç sayesinde, yapıştırıcının bulunduğu yerin şeklini alması ve dolayısıyla yapıştırıcının etkin olması sağlanır. Ayrıca bu işlem yapışma süresini de kısaltmaktadır.

Katalizör: Bazı yapıştırıcı türlerinin etkin olabilmeleri için reaksiyon başlatıcı, hızlandırıcı ve artırıcı gibi maddelerin kullanılması gerekir. Özellikle elastomerik ve termoset yapıştırıcılarda önemli olan katalizörler tek ve çift bileşenli yapıştırıcılarda da oldukça önemli bir role sahiptir (Şahin 2011).

Yüzey pürüzlüğü: Yapıştırıcının çok parlak yüzeylere tutunma olasılığı düşmekte olup, yapışmanın yapılacağı pürüzlülüğü çok fazla olan yüzeylerde ise adhezyon ve tam ıslanma olayları gerçekleşemeyeceği için önemli bir faktördür (Yılmaz 2020).

Yapıştırma kalınlığı: Yapıştırma kalınlığının değişimi yapıştırma bağlantıları üzerinde etkili bir rol oynamaktadır. Yapıştırma kalınlığının artması ile bağlantının mukavemetinin azaldığı; yapıştırma kalınlığının yeterli seviyede olmaması ise tutunmayı zorlaştırdığı görülen sonuçlardan bazılarıdır.

1.3. Yapıştırıcılar

Yapıştırıcı, malzemelerin yüzeyine uygulandığında bunları bir araya getirebilen ve ayrılmaya direnebilen bir malzeme olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle yapıştırıcı, aynı veya farklı malzemeleri birleştirmek için kullanılan kimyasal bir maddedir. Yapıştırıcılar, kürleşme mekanizmalarına (kimyasal, fiziksel) ve formlarına göre sınıflandırılabilir. Yapıştırıcıların temel bileşenleri olarak kullanılan hammaddelerin fiziksel ve kimyasal davranışlarının incelenmesi gerekir.

1. GİRİŞ

Günümüzde işleme özellikleri, mukavemetleri ve dayanıklılık özellikleri açısından birbirlerinden önemli ölçüde farklılık gösteren çok çeşitli bir yapıştırıcı dizisi mevcuttur. Bir yapıştırıcının etkili olabilmesi için, bir maddenin iki temel şartı yerine getirmesi gerekir:

- Birleştirme işleminin belirli bir noktasında, yapıştırıcı yüksek moleküler hareketliliğe sahip olmalıdır. Yani malzemenin birleşmesine izin vermek için az ya da çok viskoz bir sıvının özelliklerine sahip olması gerekir.

-Yapışkan tabaka içinde, sırasıyla çekme, kesme ve soyma kuvvetlerinin iletilmesine izin vermek için malzeme mümkün olduğunca düşük bir moleküler hareketliliğe sahip olmalıdır. Yani teknik açıdan dayanıklı bir madde gibi davranması gerekir (Packham 2005).

1.3.1. Kürleşme mekanizmalarına göre yapıştırıcılar

Yapıştırıcılar, kürleşme mekanizmaları açısından kimyasal ve fiziksel reaksiyonlara göre kürleşen olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Kimyasal reaksiyonlarla kürleşen yapıştırıcılar aynı zamanda yapısal yapıştırıcılar olarak da adlandırılır ve gerçekleştirdiği reaksiyon sonucu sertleşerek çok güçlü bir yapışma meydana getirir. Fiziksel reaksiyonlarla kürleşen yapıştırıcılar ise yapısal olmayan yapıştırıcılar olarak adlandırılır ve daha düşük yapışma mukavemetine sahiptir.

1.3.1.1. Kimyasal reaksiyonlarla kürleşen yapıştırıcılar

Küçük boyutları nedeniyle çoğunlukla sıvıdırlar. Bu durumda, yapışkanlara uygulanan sıvı yapıştırıcı, kimyasal reaksiyona hazır monomer moleküllerinden oluşur. Yapıştırıcının uygulanmasında ve yapıştırılacak yüzeylerin birleştirilmesinden sonra, yapıştırıcı hattında kimyasal bir reaksiyon meydana gelir. Kimyasal reaksiyonlarla kürleşen yapıştırıcılar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Habenicht 2009).

Anaerobik reaksiyonla kürleşen yapıştırıcılar: Oksijensiz ortamda oda sıcaklığında kürleşebilen yapıştırıcılar olup, tek komponentli bileşiklerdir. Tutucu ya da

1. GİRİŞ

diş tutucu bileşik olarak da bilinirler. Bu yapıştırıcılar, ortamda oksijen bulunmadığından plastik, kauçuk, cam gibi malzemelerin yüzeyine iyi tutunarak yapışma kalitesini artırır ve kürleşme hızlı bir şekilde gerçekleşir. Ayrıca bu türdeki yapıştırıcılar sızıntı oluşmasını engelleyerek bakım gereksinimini azaltır ve kullanıldıkları alanlarda verim sağlar. Anaerobik yapıştırıcıların önemli özellikleri şunlardır;

- Darbe Direnci, kimyasal yapısı sebebiyle, bu yapıştırıcıların oluşturduğu bağlar titreşim ve çarpma yüküne göre daha fazla dayanım ve esneklik sağlar.

- Dayanım, direkt kuvvete, yüksek titreşime ve sıcaklığa (-55 °Cs ile +230 °C), dayanan güçlü bağlar sağlar.

- Hafiflik, gerilmeyi bağlantı üzerine dağıtmak için daha ince ve hafif malzemeler kullanılmasına olanak tanır.

- Farklı malzemeleri birleştirme özelliğinin yanı sıra iki farklı metalin yapıştırıldığı durumlarda da paslanmaya karşı direnç sağlar (Şahin 2011).

- Verimlilikleri oldukça yüksektir (Anonim 2021a).

Aniyonik reaksiyonla kürleşen yapıştırıcılar: Siyanoakrilatlar olarak adlandırılan bu hızlı yapıştırıcılar plastik, porselen, ahşap, metal ve cam yüzeyleri gözenekli olsa bile çabuk kuruyarak yapışmasını sağlar. Yapıştırıcıyı sadece bir yüzeye sürmek yeterli olup, yapıştırıcı nem ile reaksiyona girer. Bu yüzden yapıştırıcı fazla miktarda kullanılırsa sertleşmesini engelleyen asit nötralize olduğundan dolayı daha fazla nem gerekir ve yapışma gerçekleşemez. Siyanoakrilat yapıştırıcıların önemli özellikleri şunlardır:

- Yüksek ısı direnci

- Çabuk kuruması (2-50 sn)

- Çok az bir miktarla bile yapışma sağlaması

- Çok küçük boşluklara nüfuz etme kabiliyetidir (Anonim 2021d, 2021g).

Ortam nemi ile kürleşen yapıştırıcılar: Bu yapıştırıcılar, çoğunlukla havadaki nem ile aniden kürleşen tek komponentli, poliüretan esaslı yapıştırıcılardır. Yüksek hızlı ve dirençli bir yapışma sağlar. Bu yapıştırıcıların önemli özellikleri şunlardır;

-Mükemmel bir yapışma direncine sahiptir,

-Hızlı bir şekilde kürleşir,

-Suya dayanıklıdır,

-İyi bir şekilde boşlukları doldurur (Anonim 2021i).

Isı ile kürleşen yapıştırıcılar: Bu yapıştırıcılar havacılık endüstrisinde sıkça kullanılır ve genellikle çift komponentli yapıştırıcılardır. Epoksi bu yapıştırıcılara bir örnektir. Reçine ile sertleştiriciden oluşan bu yapıştırıcılar malzemeye uygulanmadan önce karıştırılması gerekir.Kullanılan yapıştırıcıya göre kürleşme sıcaklıkları farklılık göstermektedir. En düşük kürleşme sıcaklığı genelde 100 °C'dir ve kürleşme süresi sıcaklık arttıkça azalır. Raf ömürleri uzun olan epoksi yapıştırıcıların dayanıklılığı da oldukça yüksektir.

1.3.1.2. Fiziksel reaksiyonlarla kürleşen yapıştırıcılar

Kimyasal olarak reaksiyona giren veya reaktif yapıştırıcılar yerine, fiziksel olarak sertleşen yapıştırıcılardan söz edilir. Fiziksel reaksiyonlarla kürleşen yapıştırıcılar kürleşirken yapısında herhangi bir kimyasal olay gerçekleşmez. Bir eriyiğin soğutulması ya da basınca duyarlı yapıştırıcılar bu sınıfta ele alınır. Çünkü bu yapıştırıcıların kürleşmesi için gerekli olan basınç uygulaması ve hal değişimleri fiziksel işlemlerdir. Fiziksel reaksiyonlarla kürleşen yapıştırıcılar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

Ultraviyole (UV) yapıştırıcılar: Ultraviyole ışığı (UV) ile kürleşen bu yapıştırıcıların kürleşme zamanı UV ışığının dalga boyu ve şiddetiyle orantılı olarak

1. GİRİŞ

değişmektedir. Bu nedenle bu tür yapıştırıcılar ışığın geçirgen olduğu cam-cam, cam-metal bağlantılar ve UV geçirgen plastik (Pleksiglas) bağlantıları için kullanılabilir. UV yapıştırıcılarda, optimum kürleşmenin sağlanması için yapıştırıcıya UV ışığının tam olarak uygulanması gerekir. Bu yapıştırıcılarla birleştirilen yapıların ışığa karşı duyarlılığından dolayı ışık geçirgenliği düşük hatta hiç geçirmeyen ambalajlarda karanlık ortamlarda muhafaza edilmesi gerekir. Bu yapıştırıcının avantajları, çok kısa sürede kürleşmeleri ve tek bileşenli uygulamalarıdır.

Sıcakta eriyen yapıştırıcılar (sıcak eriyikler): Fiziksel olarak kürleşen bu yapıştırıcılar, katı, yüksek moleküler bir halde bulunur ve herhangi bir çözücü içermez. Bu yapıştırıcılar akışkan hale gelinceye kadar ısıtılırlar, bağlantı yüzeyleri üzerine koyulurlar ve oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilirler. Erimiş halde veya yapışkanlar üzerinde daha iyi ıslanma elde edebilmek için temas basıncı ve ısı altında eritilen bir toz veya folyo olarak uygulanırlar. Bu yapıştırıcıların kullanıldığı üretim işlemleri, yüksek ısıtma ve soğutma oranları kullanılarak anlık zamanlama ile gerçekleştirilebilir. Bu yapıştırıcılarla metaller veya iletken malzemeler yapıştırılırken, yapıştırılan maddelerin ısıyı iyi iletmesi sebebiyle, eriyik halde bulunan yapıştırıcının arayüzün yakınında çok hızlı katılaşmamasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde yüzeyler tamamen ıslanamaz ve yapıştırma bağlantısının verimi azalır. Bu yüzden bu tür yapıştırıcılar kullanıldığında yapıştırıcıların önceden ısıtılması tavsiye edilir. Erime noktasına ulaşıldıktan sonra bu yapıştırıcıların yapısına spesifik maddeler eklenerek çapraz bağlanma sürdürülebilir, bu da sıcakta eriyen yapıştırıcıların mukavemetinde ve uzun süreli dayanıklılığında bir artış sağlar. Sıcakta eriyen yapıştırıcıların bir dezavantajı, doğası gereği, kürleşmeden kullanıldığında, sadece işlem sıcaklığına kadar ısınmaya karşı dirençli olmalarıdır. Ancak bu yapıştırıcılar ısı ile dağıtılabilir ve yeniden oluşturulabilir olması nedeniyle avantaj sağlar. Kürleşme sonrasında sıcakta eriyen yapıştırıcılar nispeten düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 60-80° C) uygulanabilirken, kürleşmiş durumda 120-150° C sıcaklıklara dayanabilir (Brockmann et al. 2009).

Polivinil asetatlar (PVAC): Emülsiyon formunda kullanılan ve bazen “beyaz tutkal” olarak da adlandırılan polivinil asetat (PVA), oda sıcaklığının üzerinde bir camsı geçiş sıcaklığına ($T_g \approx 28^\circ\text{C}$) sahiptir, bu nedenle formülasyonuna plastikleştiricilerin eklenmesi gerekir. Bu yapıştırıcılar daha çok kitap ciltleme, kâğıt yapıştırma, bardak

yapıştırıcılar, taşınabilir yapıştırıcılar (pullar) ve mobilya endüstrisinde kullanılır. Ayrıca metallerin ve oto güvenlik camlarının yapısal yapıştırılmasında da kullanılır (da Silva et al. 2018).

Basınca duyarlı yapıştırıcılar (PSA): Basınca duyarlı yapıştırıcılar (PSA'lar) tipik olarak, oda sıcaklığında kısa bir süre uygulanan basınç altında yüzeyleri temas ettirerek nesnelere bir arada tutmak için kullanılır. Doğal kauçuk basınca duyarlı yapıştırıcılar için kullanılan tipik malzemelerdir. Bu malzemeler, akışkanlığa direnç göstermek için viskoz özelliklere, yük taşıyabilmek için kısmi elastik davranışa, soyma ve yapışma sağlamak için enerji depolama yeteneğine ve ayrıca kullanımları sırasında enerjiyi dağıtma yeteneğine sahiptir.

1.3.2. Formlarına göre yapıştırıcılar

Formlarına göre yapıştırıcılar, macun, film, toz ve sıvı gibi farklı gruplarda ele alınabilirler. Bunlar;

Macun tipi yapıştırıcılar: Kompozit veya metal parçaları yapıştırmak için kullanılan çift komponentli yapıştırıcı grubudur. Viskozitesi yüksek olup, yapışma kabiliyeti mükemmel yakındır.

Film tipi yapıştırıcılar: Bu yapıştırıcılar epoksi esaslı yapıştırıcılar olup, kompozit veya metalik malzemelerin yapıştırılmasına yardımcı olarak kullanılırlar. İnce filmler metallerin onarılmasında kullanılırken, kalın filmler kompozitlerin onarılmasında kullanılır.

Düşük viskoziteli yapıştırıcılar: Yüksek sıcaklıkta (120-1800°C) veya oda sıcaklığında sertleşen epoksi reçine esaslı yapıştırıcılardır. Genellikle sandviç levhalarda kullanılır.

Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar: Kompozit elyaf kumaşların birleştirilmesi ile dolgu ve göçük tipi tamirlerde kullanılan bu yapıştırıcılar, oda sıcaklığında sertleşir ve çift komponentli yapıya sahiptir.

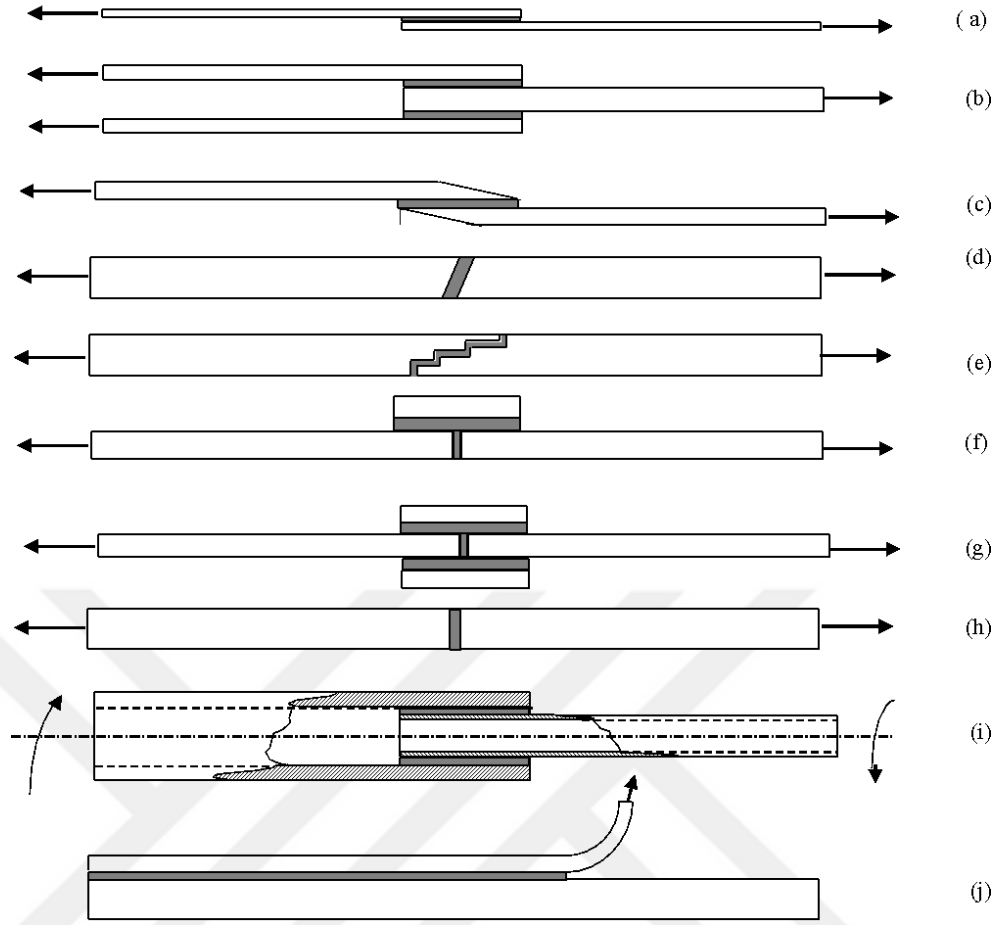
Reçineler: Epoksi reçine yapıştırıcıları şüphesiz en önemli reaktif yapıştırıcı grubunu temsil eder. Çünkü bu tür organik bileşiklerin çok çeşitli uygulama alanları için özel yapım yapıştırıcılar sunabilmelerini sağlayan çeşitli formülasyon olanakları vardır. Çift komponentli düşük viskoziteye sahip olan bu yapıştırıcılar özellikle kompozit elyaf kumaşlarının ıslatılması için kullanılır (Habenicht 2009).

Köpükler: Özellikle kuruma esnasında hacmin artması sebebiyle birleştirdiği malzemelerdeki boşlukları doldurma yetenekleriyle bilinen köpük yapıştırıcılar, kullanıldıkları bağlantılarda kuvvetli yapışma sağlar. Yaklaşık kalınlıkları en az 2 mm'dir.

1.4. Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırma bağlantıları, iki veya daha fazla parça arasında birleştirme işleminin, parçaların yüzeyleri arasına yerleştirilen metalik olmayan bir yapışkan malzemenin katılması veya sertleştirilmesi ile gerçekleştirildiği bir işlemdir. Birleştirilen yüzeyler ısıtılabilmesine karşın erimezler. Yapıştırılacak parça yüzeyine sürülen ince tabaka yapıştırıcının basınçlı veya basınçsız ortamda belirli bir sürede tutulması sonucunda kimyasal reaksiyon vermesiyle makro moleküller oluşur ve böylece sertleşme meydana gelir. Bu anlamda yapıştırma bağlantıları, kaynak ve lehimleme bağlantılarına benzer, ancak meydana gelen yapıştırma metalürjik bir bağ olmayıp, doğası gereği kimyasal bir bağdır. Geçmişte deri, kâğıt, porselen, lastik, ahşap gibi malzemelerin birbirine bağlanmasında yapıştırma işlemi oldukça yaygın kullanılmıştır. Günümüzde ise yapıştırıcı maddelerin gelişimi ile birlikte hafif metal konstrüksiyonlarda, kompozit malzemelerin birleşiminde, mil göbek bağlantıları, elektronik, otomotiv, havacılık gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır (Akkurt 2005; Lumley 2010; Koç 2015).

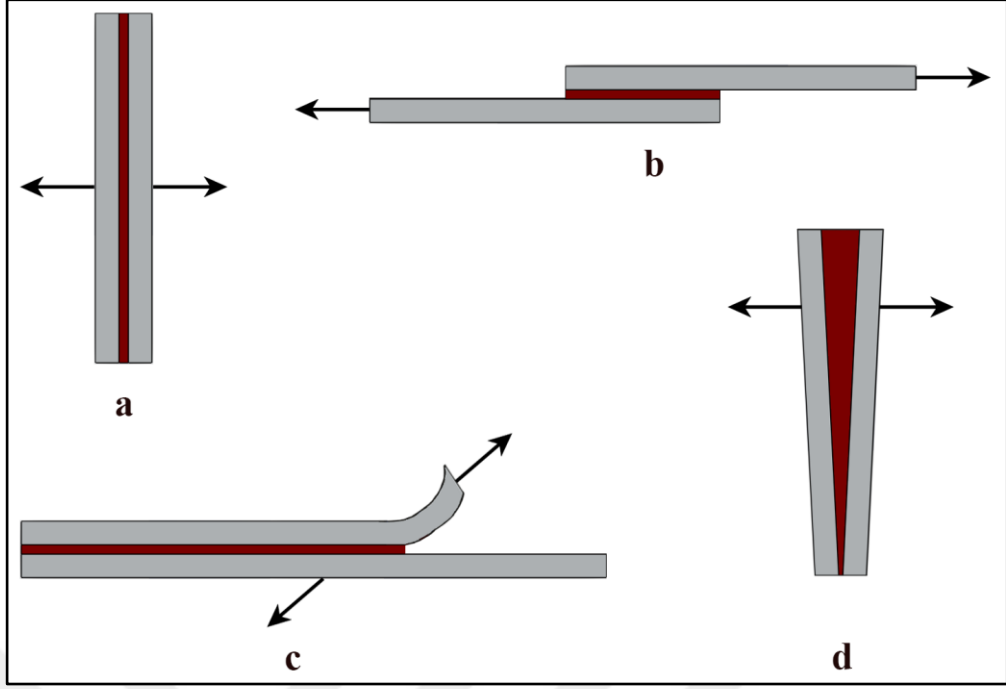
Mühendislik alanında kullanılan yapıştırma bağlantı tiplerinden en yaygın olanları Şekil 1.3'te verilmiştir.



Şekil 1.3. Yapıştırma bağlantı geometrilerinin 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).

1.4.1. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme tipleri

Yapıştırma bağlantılarına uygulanabilecek farklı türde gerilme kuvvetleri vardır. Bu kuvvetler çekme, kayma ve soyulmadır. Yapıştırıcıların soyulma etkisinin oluşturduğu gerilme dağılımlarına karşı dayanımları zayıf iken çekme, basma ve kayma yüklerinin oluşturduğu gerilme dağılımlarına karşı mukavemetleri oldukça iyidir (Akpınar 2012).



Şekil 1.4. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda kullanılan gerilme tipleri (a) Çekme, (b) Kayma, (c) Soyulma, (d) Ayrılma.

Çekme: İlk temel gerilme tipi çekme kuvvetidir (Şekil 1.4'a). Çekme, tüm bağlantı üzerinde eşit olarak uygulanan kuvvettir. Bu testte, bilinen boyutta izotropik bir malzeme çekme testi cihazına sıkıca kenetlenir ve numunenin aksel boyutuna bir kuvvet uygulanır. Çekme yönü düz, aynı zamanda düzlem üzerinde ve yapıştırıcılı olan bağdan uzaktır. Kuvvet, bağlantı hattının tüm alanına eşit olarak dağılır.

Kayma: Yapıştırıcı boyunca uygulanan itici bir kuvvet olup, yüzeylerin birbiri üzerinde kaymasına sebep olur. Burada tekrar, kuvvet düzlemedir ve kuvvet, bağ hattının tüm alanı boyunca dağılmıştır. Şekil 1.4b'de gösterilen ölçümde, bilinen boyuttaki bir örnek, kuvvetler birbirine karşı gelecek şekilde yüzleri üzerindeki bir kuvvete (F) maruz bırakılır. Bu kuvvet, kesme kuvveti olarak bilinir ve yapıştırma bağlantılarının test ve performansında büyük önem taşır. Çoğu yapıştırma bağlantısı, yapıştırıcıyı gerilim veya yarıma kuvvetlerinden ziyade kesmeye tabi tutacak şekilde tasarlanmıştır.

Soyulma: Bir yapıştırıcıyı karakterize etmek için kullanılan son ölçüm Şekil 1.4 c'de gösterilmektedir. Birleşme alanının tek bir noktasına etki eden bir kuvvet tipidir. Yüzeylerden en az biri esnektir. Burada kuvvetin çekme şeklinde uygulandığı, ancak

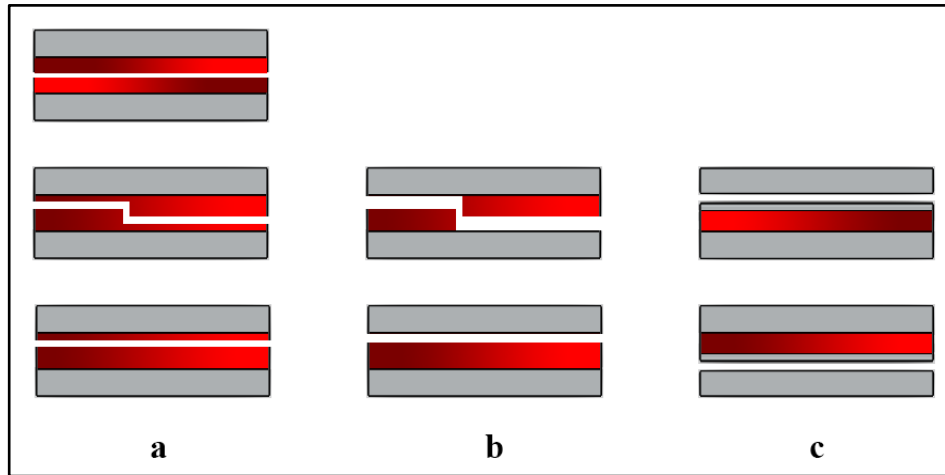
1. GİRİŞ

malzeme yüzeylerinin birinde önceden açılan bir çentiğin bulunduğu görülmektedir. Numunenin maruz kaldığı bu kuvvet, ayrılma kuvveti olarak da bilinmektedir. Bu test, çoğu malzemede en zayıf olan özelliği ortaya çıkardığından yapıştırma bağlantıları için de oldukça önemlidir (Anonim 2021j; Pocius 2021).

Ayrılma: Şekil 1.4d’de gösterilen yüklemde, çoğunlukla eksenden kaçık çekme kuvvetinin veya momentinin sonucu oluşmaktadır. Diğer gerilmelerin aksine bu gerilme yapışma alanına eşit olmayan bir şekilde etki etmekte ve bağlantının bir tarafında yoğunlaşmaktadır.

1.4.2. Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar çeşitleri

Yapıştırıcının veya yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin daha iyi değerlendirilebilmesi için farklı yüklem şekillerinde hasar tiplerinin belirlenmesi gerekir. Yapıştırma bağlantılarında adhezyon, kohezyon ve karışık mod olmak üzere üç tip hasar modeli vardır (Solmaz 2008). Adhezyon hasarı yapıştırılan malzeme-yapıştırıcı ara yüzeyindeki ayrılmadan meydana gelen kopma olayı iken, kohezyon hasarı ise yapıştırıcıdaki hasardan dolayı ortaya çıkmaktadır. Karışık-mod hasarı ise adhezyon ve kohezyon hasarının aynı anda olduğu zaman oluşan hasar tipidir.



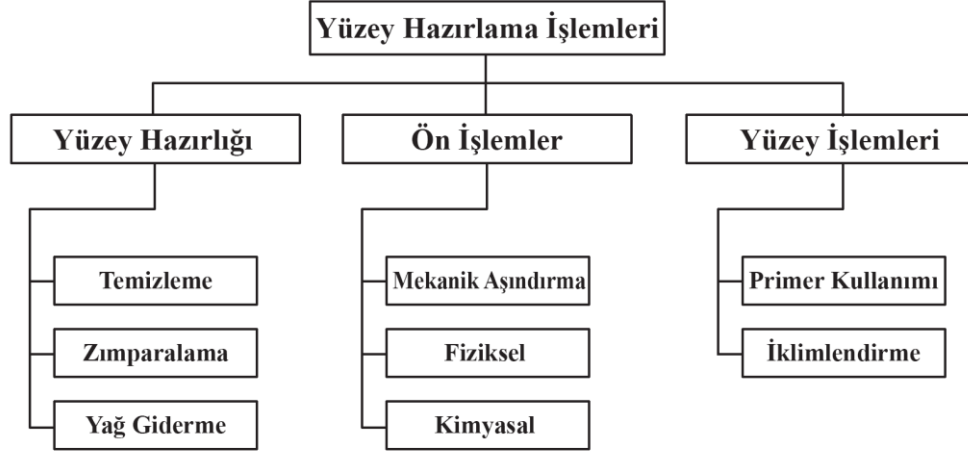
Şekil 1.5. ISO 10365 standardında belirtilen yapıştırılmış bağlantılarda oluşan temel hasar çeşitleri a) Kohezyon hasarı, b) Adezyon hasarı, c) Yapıştırılan malzemedeki ayrılma (delaminasyon) hasarı.

Hasarlı bir yapıştırma bağlantısının yüzeylerindeki hasar göz ile kontrol edilebilir. Ayrıca hasarın yapıştırıcı malzemedeki (adhezyon veya kohezyon hasarı) ya da yapıştırılan parçalardan olduğu anlaşılabilir. Bağlantılarda meydana gelen hasar şekillerine göre yapışma kuvvetini iyileştirmek için bazı yöntemler kullanılabilir. Adhezyon hasarı oluşmuş ise, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemenin arasındaki temas eden yüzey yapışmanın zayıf noktasıdır. Bu hasara sebep olan etkenler, yapışma için uygun olmayan malzeme kullanılması veya yapıştırılan malzeme yüzeyinin kirden iyi bir şekilde arındırılmaması düşünülebilir. Söz konusu iki durumda da yüzeye elverişli olan ön-işlem gerçekleştirilmesiyle yapışma kuvveti artırılabilir. Eğer yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıda kohezyon hasarı oluşmuş ise, yapıştırıcı ile malzeme arasında gözle görülen bir kopma olayı vardır. Bu hasar çeşidinde gerilme yığılması ve sıcaklık gibi dış etkenler nedeniyle yapıştırıcıya çok fazla gerilme uygulanmıştır. Kohezyon hasarına uğramış yapıştırma bağlantılarının problemleri, parça şekillerini değiştirerek veya daha elverişli yapıştırıcı ile yapıştırılarak giderilebilir. Genellikle yapılan deneysel çalışmalarda kohezyon hasarı elde edilmesi tercih edilir. Şayet adhezyon hasarı elde ediliyorsa yapıştırma sürecinde bir hata yapılmış sonucuna ulaşılabilir.

1.4.3. Yapıştırılacak yüzeylerin hazırlanma işlemleri

Yapıştırma işleminden önce yüzey hazırlama işlemlerinin uygulanmasının ana nedenleri şunlardır:

1. Yapıştırılan malzemenin yüzeyinde zayıf bir tabaka oluşumunu kaldırması veya önlemesi,
2. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme yüzeyi arasındaki moleküler etkileşim derecesini maksimize etmek,
3. Ara yüzeyler boyunca gelişen yapışma kuvvetlerini optimize ederek başlangıçta ve bağlantının ömrü boyunca yeterli mukavemetini sağlamak,
4. Yapıştırılan malzeme üzerinde belirli bir yüzey mikroyapısı oluşturmak sebebiyle yüzey hazırlama işlemleri yapılır (Ebnesajjad 2014).



Şekil 1.6. Yüzey hazırlama işlemleri

1.4.3.1. Yapıştırılacak yüzeyin hazırlanması

Temizleme: Yapıştırma bağlantılarında yüzey ile yapıştırıcı arasında temas sağlanamaması bağlantıların mekanik özelliklerine olumsuz yönde etki eder. Yapıştırma bağlantıları tasarlanırken elverişli bir yapıştırıcı ve yüzey hazırlama yöntemi belirlenmelidir. En iyi yapışma bağlantısı sağlanması için yapıştırılacak yüzeylerin kir, pas, boya, yağ vb. gibi kalıntılardan arındırılmasına ihtiyaç duyulur. Zımparalama veya fırçalama yoluyla mekanik temizlik tercih edilir.

Zımparalama: Bu adım esas olarak eşit yapışkan katmanların elde edilmesi için gereklidir. Burada, özellikle test amaçlı kullanılan küçük yapışkan yüzeyler söz konusu olduğundan, test numunesindeki çapağı çıkarmak gerekir. Daha büyük yapışkan yüzeyler söz konusu olduğunda, yapışkanların düzeltilmesi paralel yapıştırıcı hatlar için bir ön koşuldur.

Yağ giderme: Yağ giderme, organik solventler ile kalıntı bırakmadan temizleme işlemidir. Bu işlem, en önemli ön koşullardan biridir. Çoğunlukla mekanik bir temizleme yeterli değildir. Yapıştırılacak yüzeylerdeki kir, pas, boya, yağ vb. gibi kalıntılar Çizelge 1.1'de gösterilen bazı yağ çözücü maddelerle temizlenir. Numuneler 66°C-99°C suya batırılır. Saf suda yıkama yaptıktan sonra kurutulur. Bütün koşullarda numunelerin yüzeyleri iyi bir şekilde yıkanmalı ve durulanmalıdır. Eğer iyi bir şekilde temizleme

1. GİRİŞ

yapılmazsa bu yapıştırıcının kürleşmesine engel olur ve yapışma kuvvetini düşürebilir (Habenicht 2009; Tek 2011; Şekercioğlu ve Özenç 2012).

Çizelge 1.1. Yağ temizleme işleminde kullanılan solvent bazlı temizleyiciler

Solvent	Temizleme Kapasitesi	Yanıcılık veya Parlayıcılık
Hidrokarbonlar (İzoparafınler)	İyi	Evet
Ketonlar (Aseton)	İyi	Evet
Alkoller (İzopropanol)	Orta	Evet
Su Bazlı	İyi	Hayır

1.4.3.2. Yüzeý ön işlemleri

Yüzeý hazırlığını takiben, güçlü bir yapıştırılmış birleşme bağlantısı oluşturmak için gerekli olan yapışma yüzeýleri üzerinde yapışkan kuvvetleri oluşturmak yüzeý ön işleminin görevidir. Taşlama, fırçalama veya zımparalama en önemli yöntemlerdir.

Mekanik aşındırma: Oksit tabakası ile kaplı olan yapıştırılacak malzemelerin yüzeýleri yağ giderme işlemleri ile giderilemeyen bu tabakaya mekanik olarak (taşlama, fırçalama veya zımparalama gibi) bazı ön işlemleri yapmak gerekir. Yapıştırma bağlantılarının mukavemetinin değişimini etkileyen en önemli faktörlerden biri de yüzeý pürüzlülüğü olup, bu etki yapıştırılacak malzemenin yüzeý alanının artması ile sağlanır. Bu etki sayesinde yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasındaki bağ artar. İstenilen yüzeý pürüzlülüğü değeri zımparalama işlemleri ile sağlanır.

Fiziksel: Taşlama, fırçalama veya zımparalama malzeme yüzeýinde kimyasal değişikliklere neden olmaz. Bu nedenle, fiziksel ve kimyasal ön işlemleri yöntemleri yüzeýlerin kimyasal modifikasyonuna yöneliktir. Yapıştırma bağlantıları üzerindeki aşırı yüksek talepler için yapışkan kuvvetlerini daha da artırmak ve diğer yandan zayıf bir şekilde bağlanabilen malzemeyi (örneğin plastikler) yapıştırılabilir hale getirmek mümkündür.

Kimyasal: Tüm kimyasal yöntemler, sağlığa son derece zararlı agresif kimyasallar gerektirme dezavantajını taşır. Uygulamaları yasal zorunluluklara ve dolayısıyla güçlü güvenlik düzenlemelerine tabidir ve kullanımdan sonra kimyasalların bertarafı için yüksek harcama gerektirir. Bu nedenle endüstride, sadece, özellikle bağlanmış bağlantıların uzun ömürlü olduğu istisnai durumlarda uygulanırlar, Aynı zamanda korozyon gibi yüksek gerilime maruz kalanların garanti edilmesi gerekir. Bunun bir örneği, uçakların 30 yıla kadar hizmet ömürleri olan havacılık endüstrisidir.

1.4.3.3. Yüzey işlemleri

Bir yüzeyin yapışma özellikleri daha da artırılması isteniyorsa veya yapıştırma bağlantıları özellikle yüksek miktarda nem ve korozyona maruz kalıyorsa, ön işlem sonrası yüzey işlemleri yapılır.

Primer kullanımı: Genel anlamı ile primer, yapışma performansını artırmak amacıyla yapıştırıcıdan önce yapıştırılacak yüzeye uygulanan kaplamadır. Genellikle, yapıştırıcı uygulamaları için primer kullanımı esas olarak üretimden hemen sonra malzemeye uygulanır, ancak yüzeyin ön işleminden sonra da uygulanması yaygındır.

Çoğunlukla primerler, çözücü içerisinde seyreltilmiş kimyasallardan elde edilir. Primer, yapıştırma yapılacak yüzeylere püskürtülerek veya fırça yardımıyla uygulanır. Çözücü (solvent) maddenin buharlaşması için bir süre beklenir. Yapıştırıcı ile yüzey arasında kimyasal bir bağ oluşturan yüzey primerleri genellikle yapışma kabiliyetini artırır.

İklîmlendirme: Sıcaklık ve nem dalgalanmasıyla, yapıştırıcı ile birleştirilmiş kısımlardaki su yoğunlaşması yapışkan özelliklerini sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, yapışma koşullarını korumak veya geliştirmek amacıyla yapılan bir işlemdir. Ayrıca korozyon sürünmesi durumunda olduğu gibi, yapıştırma işlemi tamamlandıktan sonra bile bir yüzeyin kontrolsüz değişimini önlemek amacıyla yapılır. Bu nedenle, özel koşullar için, yapıştırılan bağlantıyı çevreleyen alanların dış etkilere karşı korunması da gereklidir.

1.4.4. Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, diğer birleştirme yöntemlerine göre birçok avantaj ve dezavantaja sahiptir.

Avantajları;

- Yapıştırma bağlantıları, vida ve perçin bağlantılarında olduğu gibi açılan delikler tarafından zayıflatılmaz. Bu nedenle, güç aktarımı noktasal değil yüzeyle ilişkili olup, daha homojen bir gerilim dağılımı gösterirler.
- Kaynakta olduğu gibi ergime sonucu kristal yapıda değişikliğe neden olmaz ve ısıl gerilmeler oluşmaz. Gerilme dağılımı hemen hemen her noktada eşit olduğundan sürekli mukavemette kopma tehlikesi olmaz.
- Diğer birleştirme yöntemleriyle birleştirilemeyecek kadar ince malzemelerin (<500 µm) birleştirilmesi yapılabilir. Bu prosedür, özellikle hafif yapıların üretimi ve ağırlık azaltımı (havacılık ve uzay sanayi gibi) için önemlidir.
- Yapıştırma bağlantıları yapılırken çok yüksek ısı ve basınç gereksinimi yoktur. İşlem kolay ve ucuzdur. Dolayısıyla yapıştırılan malzemeler kendi özelliklerini korurlar ve bu durum kompozit malzemelerin gelişimine olanak sağlamıştır.
- Farklı özelliklere sahip malzeme türlerinin birleştirilmesine imkân tanır. Örneğin, metal olmayan malzemeler ile metallerin birleştirilmesinde kullanılabilir.
- Korozyona karşı korunma görevi yapar. Çatlak korozyonu tehlikesi yoktur.
- Ana malzemede herhangi bir delik, çentik vb. açılmadığı sürece kesit zayıflaması olmaz.
- Sönümlenme ve izolasyon özelliklerine sahiptir. İletken ve yalıtkan olarak faydalanılabilir.

Dezavantajları;

- Yapıştırıcı olarak kullanılan maddelerin mukavemetlerinin düşük olması sebebiyle yapıştırma yüzeylerine geniş olması gerekir.
- Yapışkan tabakanın ısı direnci sınırlıdır. Yapıştırıcının temel malzemesine bağlı olarak, maksimum mukavemet için sıcaklıklar yaklaşık 120 ila 300° C arasındadır.
- Yapıştırılan yüzeylere doğru yapıştırıcı ve bunların sınır tabakaları, nem gibi çevresel etkilerden zarar görebilir, bu da mukavemetin azalmasına neden olur.
- Yüzeylerin hazırlanması hassasiyet gerektirir ve yapıştırma bağlantıları üretiminde, kürleşmenin sağlanması zaman alır.
- Tahribatsız test yöntemlerinin mevcudiyeti oldukça sınırlıdır.
- Yapıştırıcılar kimyasal ve ısıl etkilere karşı hassastır.
- Yapıştırma işlemi için özel aparatlar ve ısı kaynakları gerekebilir. Bunlar da maliyetin artmasına sebep olur.
- Birleştirme için basınç veya ısı gerekir.
- Yapısal yapıştırıcılar, mekanik özellikleri iyi (çekme, kesme) olmalarına rağmen, soyulma mukavemetleri düşüktür (Akpınar 2008).
- Genel olarak diğer bağlantı şekillerine göre mukavemetleri sınırlı ve ömürleri azdır. Uzun süreli kullanım, bağlantının özelliklerini değiştirebilir (Dinç 2007; Brockmann et al. 2009; Habenicht 2009; Lumley 2010; Koç 2015).

1.5. Yapıştırma Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

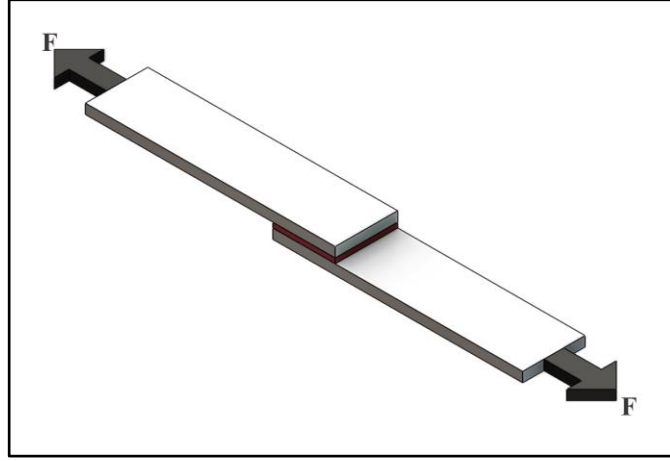
Yapıştırma bağlantılarında optimum tasarımın bulunması için bağlantıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu bağlantıların günümüzde mekanik özelliklerinin test edildiği nümerik ve deneysel olmak üzere iki türde birçok yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada hem nümerik hem de deneysel yöntemlerden faydalanılmıştır.

1.5.1. Deneysel yöntemler

Farklı endüstriyel dallar ve ticaret arasında, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için ISO (Uluslararası Standardizasyon Örgütü), EN (Avrupa Standardizasyon Komitesi) ve ASTM tarafından çeşitli test yöntemleri geliştirilmiştir. Çekme, kayma, soyulma, kırılma tokluğu ve ayrılma deneyleri yapıştırma bağlantılarında ana yükleme tiplerinde yapılan deneysel yöntemlerdir (Brockmann et al. 2009).

1.5.1.1. Çekme testi

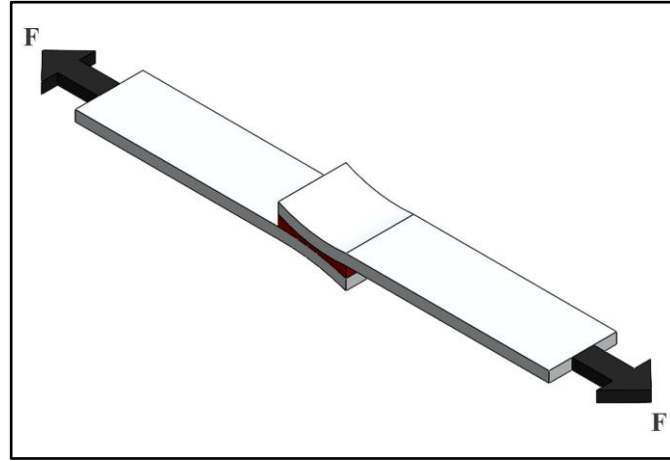
Çekme testi, bir numunenin kopana dek tek ekseninde çekme kuvvetlerine maruz bırakıldığı temel bir malzeme bilimi testidir. Bir yapıştırılmış bağlantının çekme testi, yapıştırıcıyı, bağ çizgisinin numuneye uygulanan kuvvetin yönüne dik olduğu bir gerilim durumuna etki eder. Bu kuvvetlerde oluşan gerilme yığılması yapışma bölgesine eşit bir şekilde dağılır. Fakat kuvvetler eksenden kaymış bir şekilde etki ederse, bindirme uzunluğu boyunca düzgün bir 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). Bu test, belirli bir yüzeye uygulanabilir bir yapışma değeri belirlemek için kullanılabilir. Bir yapıştırıcının gerilme özelliklerini değerlendirmek için tipik bir örnek Şekil 1.7’de gösterilmektedir (Dillard and Pocius 2002; Brockmann et al. 2009; Anonim 2021c).



Şekil 1.7. Çekme testi temel geometrisi

1.5.1.2. Kayma testi

Kayma testi, bir yapıştırıcının gerçek kayma mukavemeti yükünü bulmak için kullanılan bir yöntemdir. Bir yapıştırıcının gerçek kayma mukavemeti, ancak normal gerilmeler tamamen ortadan kaldırıldığında belirlenebilir. Numune geometrisinden dolayı, kuvvet uygulaması eksantriktir ve yapıştırıcı, Şekil 1.8’de gösterildiği gibi eğilme momentinin bir sonucu olarak bir eksen üzerinde döner.



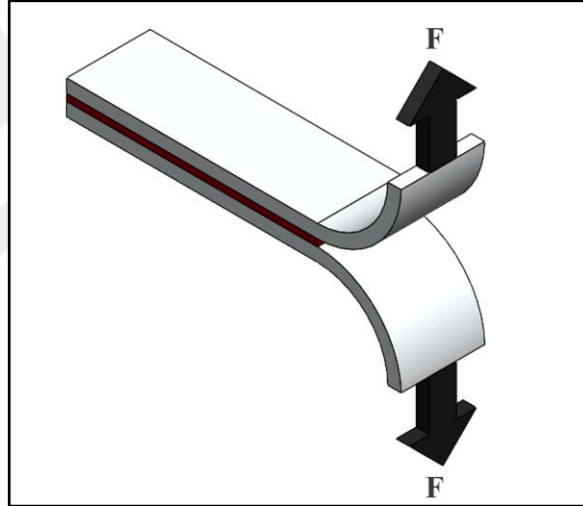
Şekil 1.8. Tek tesirli bağlantılarda eksantrik yükleme nedeniyle oluşan eğilme momenti

Mevcut olarak kullanılan yöntemlerden kalın malzeme kayma testi (Thick Adherend Shear Test) çoğunlukla yapıştırıcının kayma mukavemet yükünü bulmak için kullanılır. Bu test, mümkün olan en düzgün kesme gerilme dağılımını elde etmek ve hasarı başlatabilecek diğer gerilme durumlarını en aza indirmek için kısa bir bindirme

uzunluğuna sahip kalın, sert yapıştırıcılardan oluşan numuneler üzerinde gerçekleştirilir (Brockmann et al. 2009).

1.5.1.3. Soyulma testi

Soyulma testi çoğunlukla bir malzemedeki yapışkanın yapışma mukavemetini ölçölendirmek için kullanılır. Bu testte yapıştırıcı malzemenin soyulma direnci saptanır ve yapışkan bağ mukavemetinin nitelendirilmesi için uygulanan bir yöntemdir. Soyulma testi, yapıştırıcılardan en az birinin ölçüm sırasında plastik olarak deforme olabilen esnek bir malzemeden hazırlanması dışında bölünme testlerine oldukça benzerdir. Tipik bir soyulma testi, şekil 1.9'da gösterilmektedir (Brockmann et al. 2009; Anonim 2021h).



şekil 1.9. T- Soyulma numunesi

Eşit kalınlıktaki iki malzeme bir yapıştırıcıyla birleştirilir, ardından numunelerin uçları veya çıkıntıları bir çekme testi makinesinin çeneleri tarafından tutulur ve daha sonra tanımlanmış bir deformasyon oranında ayrılır. Yapıştırıcılar aynı kalınlığa, eğilme modölüne ve akma mukavemetine sahipse, ortaya çıkan soyulma simetrik olurken, çatlak ara yüzeyi genellikle yapışkan bağ hattının merkezinden aşağı doğru yayılır.

1.5.1.4. Basma testi

Basma testi, malzemeye basma yükü uygulanması sonucu numune boyunda kısalma veya ezilme meydana getiren bir deney yöntemidir. Basma testinde uygulanan yük, çekme testinde uygulanan yükün tam tersi şeklinde etki etmektedir. Basma testi, çoğunlukla çekme deneyi test cihazlarında uygulanır. Bu deney genellikle basma mukavemetleri çekme mukavemetlerinden yüksek olan gevrek malzemelere uygulanır (Anonim 2021f).

1.5.1.5. Kırılma tokluğu testi

Çatlak ucu açma yer değiştirme testi gibi kırılma tokluğu testi, bir malzemedeki çatlağın uzayacağı koşulları ölçer. Kırılma tokluğu testi esnasında, yorulmaya bağlı bir ön çatlağı olan numune, artan bir gerilme yüküne maruz bırakılır. Çatlak uzadıkça yük ve yer değiştirme ölçülerek malzemenin çatlak direnci belirlenir. Kırılma tokluğu deneylerinin en önemli aşaması deney parçası tasarımıdır. Deney parçası, düzlem şekil değiştirme şartlarını sağlayabilmesi için yeterli kalınlığa sahip olmalıdır. Aynı şart çatlak boyu içinde geçerlidir (Anonim 2021e; Gülmez 2021).

1.6. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) mühendislik alanında ve matematik sisteminde çoğunlukla kullanılan bir sayısal analiz metodudur. İlk kez 1940'lı yıllarda ortaya atılmış olup 1950'lerde ise uçak tasarımlarında uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntem iki veya üç boyutlu kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünde kullanılır. Sonlu eleman analizi, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar dahil olmak üzere herhangi bir yapıya uygulanabilen genel bir gerilim analiz tekniğidir.

Sonlu elemanlar yönteminin asıl mantığı karışık bir problemi basitleştirerek çözüm sağlamaktır. Bu yöntemde çözüm yapılacak alan, sonlu elemanlar adı verilen çok sayıda, birbirine bağlı, küçük alt bölgelere bölünmektedir. Kısacası birbirlerine düğüm noktaları ile bağlanmış oldukları için problemin çözümü daha basitçe yapılmış olur. Bu teknik, bir yapı yüklendiğinde sistemin enerjisini en aza indiren deforme olmuş şekli

alacağını belirten durağan potansiyel enerji teoremine dayanmaktadır. Bu deformasyon, genellikle eleman sınırlarında bulunan ayırık noktalara sahip olan düğümlerin yer değiştirmeleri açısından bulunur. Buradaki probleme bağlı olarak çok fazla denklemler elde edilir. Bu denklemlerin çözümünde ise bilgisayardan yararlanmak zorunlu olmuştur. Yapısal bir analizde FEM'in uygulanışı şu şekildedir;

- Analizi yapılacak olan yapı düğüm noktası içeren elemanlarla parçalara ayrılır.
- Her eleman için fiziksel büyüklük belirtilir.
- Düğüm noktalarından bağlanan elemanların denklem sistemi oluşturulur.
- Oluşturulan sistem denklemleri örneğin yer değiştirme gibi belirsiz olan değerler için çözüm yapılır.
- Seçilen parçaların istenilen mukavemet değerleri hesaplanır (Anonim 2014).

1.6.1. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları

- Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) farklı malzeme ve geometrik özelliklere sahip cisimlerin modellenmesi ve çözümlenmesine yardımcı olur.

- Genellikle mühendislik problemlerinin çözümlerinde uygulanır.

- Sınır şartları, sistemin esas denklemleri kurulduktan sonra kolayca satır sütun uygulamalarıyla denklem sistemine eklenir.

- Anizotropi, nonlineer gibi farklı ve karışık malzeme özellikleri bu sistemde kolaylıkla modellenir.

- Bu yöntemin matematiksel bir temelini yanı sıra, aynı zamanda fiziksel anlamı da vardır.

1. GİRİŞ

Bu yüzden sonlu elemanlar yönteminin mühendislik uygulamalarındaki yeri çok önemlidir. Fakat bilinmesi gerekir ki bu yöntemde gerçeğe yakın bir sonuç elde etmek için düzgün bir modelleme yapılıp, sınır şartları ve yükün parçaya uygun bir şekilde olması gerekir (Gültekin 2014; Dursun 2021).

1.6.2. ANSYS paket programı

Özellikle mühendislik alanında bilgisayar desteği alınarak çözümlene ve simülasyonların yapılabildiği bir paket programdır. Bu paket program yardımıyla yapısal analiz, ısı transferi, mekanik analiz, akışkanlar mekaniği analizi, titreşim analizi gibi farklı branşlarda etkili hesaplar yapılır. Ülkemizde ve dünyada bilgisayar destekli mühendislik programlarının başında olan ANSYS programında sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Fiziğin tüm dallarında etkili olan ANSYS, yapılan testleri simüle ederek deney yapılmadan değerlendirilme yapılmasına imkân tanır. Genellikle ANSYS programı kullanılarak üç basamakta sonlu eleman analizi yapılır (Durmuş 2019; Anonim 2021b).

1.6.2.1. Modelleme

Modellemede yapılması gerekenler aşamalar şeklinde aşağıda gösterilmiştir.

Problem başlığının belirlenmesi: Daha sonraki zamanlarda probleme rahat erişim sağlanabilmesi için yapılan bir işlemdir. Bu işlem, özellikle aynı numunelerde farklı yüklemelerin test edilmesi durumunda oldukça yarar sağlamaktadır.

Numune modeli oluşturulması: Modellerin çizimi iki boyutlu (2D) ya da üç boyutlu (3D) ortamda birimlerden (m., mm., in., vb) yardım alınarak yapılır ve çizildikleri ortama göre sınıflandırma yapılabilir. Üzerinde hesaplama yapılacak modellerin hangi boyutta çizileceği önceden belirlenmelidir. Sistemin 3D olduğu modeller düzlem şekil değiştirme aksenal simetri veya düzlem gerilme özellikleri kullanılarak 2D hale getirilebilir. Simetrik sistemlerde, simetritelerin programa tanıtılması sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yaparken kolaylık sağlar. Bu aşamada kullanılan birimler ile malzeme özellikleri ve uygulanan yükün birbirleri ile uyum içinde olmasına dikkat edilmesi gerekir.

Eleman türünün belirlenmesi: Analizde uygulanacak olan matematiksel modelin belirlenmesi sırasında eleman türünün seçimi oldukça önemli bir yere sahiptir. Yapılması planlanan analizlerin türlerine (Termal, akışkan, statik vb.) göre elemanlar seçilir. Ayrıca modelin boyutu da (3D veya 2D) eleman seçimi için önemli bir etkidir. 2D düzlemlerde modellerin, tanımlanan X-Y eksenlerinde olması gerekir. Bir eksen etrafında simetrisi olan modellerin iki boyut olduğu varsayılır.

Zengin eleman kütüphanesine sahip olan ANSYS programında bir elemanın isim belirlenmesi yapılırken sekiz karakter kullanılır ve grup açıklaması içerir. Ayrıca bütün elemanlar kendine ait bir numaraya sahiptir. Yapılacak analize uygun eleman seçimi ANSYS kütüphanesinden yapılır.

Malzeme özelliklerinin tanımlanması: Yapılacak analizlerin gerçekleştirilmesi için malzeme özelliklerinin elemanlara tanımlanması gerekir. Analizlere göre bu özellikleri, izotrop veya anizotrop, sıcaklığa bağımlı veya bağımsız ya da lineer veya nonlineer olabilir. Tüm malzeme gruplarına verilen bir referans numarası tanımlandıktan sonra malzeme özelliklerinin gösterildiği bir malzeme tablosu oluşturulur. ANSYS programında analiz yapılırken birden çok malzeme kullanılabilir. Oluşturulan model elemanlara ayrıldığı zaman malzeme numarasının gösterilmesine ihtiyaç duyulur.

Modelin elemanlara bölünmesi: Yapılan analizlerin çözülebilmesi için düğüm noktası ve elemanlara gerek duyulur. Modellemesi yapılan katı modelin düğüm noktaları ve elemanları, elemanlara ayırma yoluyla gerçekleştirilir. Sonlu eleman analizinde elde edilen elemanların bölme işleminde eleman yoğunluğu artış gösterirse doğru sonuca yaklaşılr. Fakat, eleman yoğunluğu artarsa çözme süresi de aynı şekilde artar. Bundan dolayı eleman yoğunluğunda optimumu sağlamak gerekir. Optimum noktayı analiz yapılmadan önce tahmin etmek neredeyse imkansızdır. Bu işleme daha iyi başlangıç yapabilmek için eleman şekline karar verilmesi gerekir.

1.6.2.2. Çözümleme

Çözümlemede yapılması gerekenler aşamalar şeklinde aşağıda gösterilmiştir.

Analiz çeşidinin belirlenmesi: Model oluşturulduğu zaman çözümlemede kullanılacak analiz çeşidi saptansa da ANSYS içerisinde bu çözüm çeşidinin belirlenmesi çoğunlukla çözüm işlemcisi ile gerçekleştirilir. Genellikle kullanılan analizler aşağıdaki alanlarından birine dahildir.

- Elektromanyetizma
- Akışkan
- Bağlı Alan (coupled field)

Eleman seçimi ile sahip olduğu serbestlik derecesi yardımıyla yapılan analizin bahsedilen bilim dallarından birine ait olmadığı belirlenebilir.

Sınır şartlarının belirlenmesi: Oluşturulan modele yük uygulaması yapıldığı zaman, ANSYS sonsuza kadar çözüme devam eder. Bu işlem bir sınır şartı belirlenip, programa girilinceye kadar sürer. Termal sınır şartlarında sıcaklık, akışkanlarda basınç ve yapısal sınır şartlarında ise genellikle yer değiştirme belirlenmesi yapılır. Bu sınır şartı bütün eksenlerde (x,y,z) tanımlanabilir iken, tek bir yönde de tanımlama gerçekleştirilebilir. Belirlenen sınır şartları çizgilerde, alanlarda, düğüm noktalarında veya kilit noktalarda kullanılabilir. Ayrıca simetrik ya da asimetrik olabilir.

Yüklerin uygulanması: Sistemin davranışını saptamak üzere belirli sınır şartlarında ANSYS programında yük tanımlama işlemi yapılır. Bu işlem sonlu eleman analizleri yapılırken oldukça önemli bir aşamadır.

Sonlu elemanlar veya katı modellerin üzerine birçok yük etkisi gerçekleştirilebilir. Örneğin bu yükler bir düğüm noktası üzerine etki edebilir. ANSYS çözüm yaparken bu yüklerin nasıl etki ettiğine bakmaksızın bu yükleri sonlu eleman yükleri olarak kabul eder. Bu da yükler katı model üzerine uygulanmış olsa bile çözüme başlarken ANSYS bunları başlangıç sınır değer şartlarına göre elemanlara veya düğüm noktalarına transfer etmesiyle aynı manaya gelmektedir. Yükler genel olarak aşağıdaki şekilde sınıflara ayrılır.

1. GİRİŞ

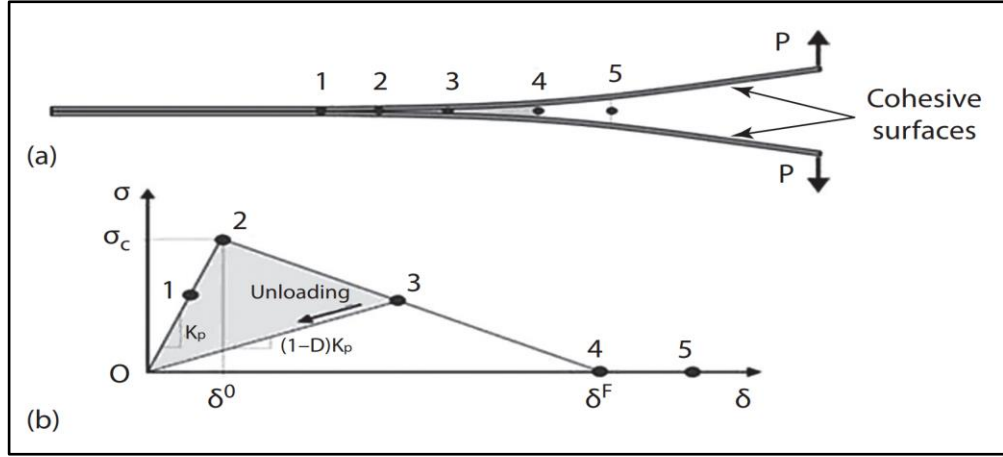
- Kuvvetler
- Yapısal yükler
- Eş alan yükleri
- Atalet yükleri
- Cisim yükleri
- Yüzey yükleri
- Termal yükler
- Serbestlik derecesi sınırlılıkları

Çözüm: Sonlu elemanlar çözücüsü genellikle ön çözücü, matematik motoru ve son çözücü olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Ön çözücü aşamasında program modeli okuyarak matematiksel olarak formülleştirir ve sonuçları görüntüleme aşamasından aldığı verileri inceleyerek eksik bir şey bulduğunda ikinci bölümdeki matematik motorunun devreye girmesini engeller. Eğer modelde hata yoksa çözücü devreye girer direnç matrisini meydana getirerek yer değiştirme sonucunu veren matematik motorunun devreye girmesi için komut verir. Matematik motoru tarafından çıkan sonuçlara göre düğüm noktalarında deformasyon miktarı, hız ve gerilme gibi değerler elde edilir.

1.6.2.3. Sonuçları görüntüleme

Bu bölümde çıkan sonuçlar okunur ve yorumlanır. Sonuçlar üç şekilde sunulabilir

Sonuçları görüntüleme bölümü: Bu bölümde çözümlenen analizin sonuçları kontur grafikler, tablo ve deforme olmuş cisim şeklinde sunulurken, aynı zamanda modelin yük altındaki davranışı animasyon ile de görselleştirebilir. Çoğunlukla yapısal türdeki problemlerde en etkili metot kontur grafikleridir. Sonuçları görüntüleme koordinat ekseninde belli bir açıda oluşan gerilme ve birim şekil değiştirme hesabında kullanılır. Şekil değiştirme ve akma gerilme sonuçlarının görüntülenmesi etkin olan birim şekil değiştirme ve gerilme sonuçlarıyla mümkündür. Ayrıca plastik şekil değiştirme miktarı ve birim şekil değiştirme enerjisi kolayca görselleştirilebilir. Görseller anlaşılır bir şekilde kontur grafikler olarak alınabilse de elde edilen sonuçların gerçekte ne kadar



Şekil 1.11. İki ayırıcı yapışkan yüzeyin şematik modeli (a) Çift doğrusal kohezif model (b) [(a)'da tanımlanan konumlara karşılık gelen numaralandırılmış aşamalar].

Şekil 1.11a'da, Mod I (ayırma modu) kırığı için kalibre edilmiş tipik bir çift doğrusal yapı modelini göstermektedir. Grafik, iki kırık yüzeyin ayrılması devam ederken, ayırma yer değiştirmesinin bir fonksiyonu olarak gerilme değişimini ve kilit noktaları tanımlamaktadır. 1. noktada malzemenin hasar görmediği elastik aralıktaki malzemenin tepkisini temsil eder. 2. nokta, hasarın başlangıcındaki gerilme durumuna karşılık gelir. Gölgeledi üçgen alan, kısmen hasarlı durumda dağılan enerjiyi temsil eder. 3. noktada yükleme ortadan kaldırıldığı için hiçbir hasar parametresi dikkate alınmaz. 4. noktada, iki yüzeyin ayrılması başlar (Pizzi and Kashmiri 2017).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantı geometrisinde, soyulma gerilmelerini azaltarak bağlantı mukavemetini artırmak için, bindirme bölgesine yakın yerlerde yapıştırılan malzeme (adherend) çentik açılarak yapılan geometrik modifiyedir.

Sancaktar and Simmons (2000), tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantılarda yapıştırılan malzeme üzerine açılan çentiğin bağlantı mukavemeti ve deformasyon davranışı üzerindeki etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmada yapıştırılan malzeme olarak 6061-T6 alüminyum alaşımı ve yapıştırıcı olarak üç farklı tip yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın deneysel sonuçlarına göre bindirme bölgesinin uçlarında çentiklerin açılması bağlantının mukavemetini yaklaşık %29 artırdığı görülmüştür. Bu sonuç, nümerik sonuçlarla karşılaştırıldığında maksimum soyulma gerilmesinde yaklaşık %27'lik bir azalmaya karşılık geldiği ifade edilmiştir (Sancaktar and Simmons 2000).

Yan et al. (2007), tarafından yapılan çalışmada, Çentik uzunluğu ve derinliğin yanı sıra yapıştırıcının elastik modülünün yapışma hattında (mid-bondline) ve yapıştırıcıda meydana gelen gerilme dağılımı etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Yapışma bölgesinin orta kısmına tekabül eden yapışma hattındaki yapışma kenarının dışında yer alan iki paralel çentik olduğunda maksimum gerilmenin önemli ölçüde azaldığı ve bağlantının bu bölgesindeki asıl gerilimin arttığı sonucuna varılmıştır. Maksimum gerilmenin önce azaldığı ve ardından çentiğin uzunluğu arttıkça tekrar arttığı belirlenmiştir. Paralel çentiğe karşılık gelen durumda, orta bağ hattındaki gerilme dağılımı çentik derinliği arttıkça önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Çekme yükünün neden olduğu maksimum gerilmeler, yapıştırıcıdaki paralel çentik kenarlarına yakın yerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Yapıştırıcının elastik modülü arttığında, orta bağ çizgisindeki gerilmelerin neredeyse tüm değerlerin arttığı görülmüştür. Çentiğin, düşük elastik modüllü bir yapıştırıcı ile orta bağ hattındaki maksimum gerilme üzerindeki etkisi önemsizdi, ancak yüksek elastik modüllü yapıştırıcılar için maksimum gerilmenin belirgin bir şekilde azaldığı sonucuna varılmıştır (Yan et al. 2007).

Ouinas et al. (2010), tarafından yapılan çalışmada, farklı malzemelerle yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarında, yapıştırıcı kayma modülü, yapıştırıcı kalınlığının ve bindirme uzunluğunun gerilim konsantrasyonundaki değişimleri üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Ayrıca bağlantıların mekanik özelliklerinin, dairesel bir çentik varlığında ve yokluğunda kayma gerilmesi üzerindeki değişimi incelenmiştir. Maksimum kesme gerilmesinin, kullanılan malzeme türü ne olursa olsun bindirme uzunluğunun yaklaşık %18'i kadar bir mesafede bulunduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Gerilme yoğunluğu faktörünün karesiyle doğrusal orantılı olan dağılmanın olumsuz etkisi sebebiyle gerilim yoğunluk faktörünün arttığı görülmüştür. Çatlak uzunluğunun, çentik uzunluğunun beşte ikisinde maksimum değere ulaştığı sonucuna varılmıştır (Ouinas et al. 2010).

Ouinas (2012), tarafından yapılan çalışmada, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bir alüminyum bindirme bağlantısının davranışını analiz etmek için sonlu elemanlar (FE) yöntemi kullanılmıştır. Dairesel ve yarı dairesel çentiklerin oluşturduğu çatlakın gerilme konsantrasyon faktörü ile gerilme şiddeti faktörü karşılaştırılmıştır. Tek tesirli bindirme bağlantıları, çentik ve kopmanın yapıştırma bağlantılarının mukavemeti ve hasar koşulları ile kombine etkisini incelemek için analiz edilmiştir. Gerilme konsantrasyon ve gerilme yoğunluk faktörünün kopma etkisinden etkilendiğini ve değerlerinin büyüklüğü ile önemli ölçüde orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Ouinas 2012).

Beigrezaee et al. (2019), tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantılarında açılan çentiklerin genişliği ve derinliği bağlantı mukavemeti üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğu deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Açılan çentiklerin tek tesirli bindirme bağlantılarının mukavemeti üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemek için, iki tür yapıştırıcı (bir gevrek ve bir sünek) seçilmiştir. Gevrek yapıştırıcı için UHU endfest 300 ve sünek yapıştırıcı olarak Pirelli kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yapıştırılan malzeme ise alüminyum 7000 serisidir. Bu incelemeye göre açılan çentiğin genişliği ve derinliği bağlantıda oluşan soyulma gerilmelerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Yapıştırılan malzeme kalınlığına göre açılan çentik derinlik oranı %20'i olan bağlantıda, gevrek yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda bağlantı mukavemeti yaklaşık %100 artarken, sünek yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların

mukavemetindeki artış yaklaşık %25 olduğu deneysel olarak elde edilmiştir (Beigrezaee et al. 2019).

Bahrami et al. (2019), tarafından yapılan çalışmada, çentik derinliği, genişliği, açısı ve bindirme uzunluğu gibi birçok farklı parametrelerin tek tesirli bindirme bağlantısında meydana getirdiği normal ve kayma gerilme dağılımlarının etkileri deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapıştırılan malzeme olarak Alüminyum 7075-T6 alaşımı, yapıştırıcı olarak UHU 300 Plus kullanılmıştır. İki farklı kürleşme yöntemi ile beş farklı çentik derinliği dikkate alınmıştır. Birinci kürleşme metodunun ikinci kürleşme metoduna göre daha az mukavemete sahip olduğu görülmüştür. Deneysel ve sonlu elemanlar (FEM) sonucuna göre çentik derinlik oranı arttıkça, hesaplanan soyulma gerilmesinin iyileştirilmesine bağlı olarak hasar yükünün arttığı sonucuna varılmıştır (Bahrami et al. 2019).

Kanani et al. (2020), tarafından yapılan çalışmada, epoksi yapıştırıcı ile tek tesirli bindirme bağlantılarının performansını artırmak için yapıştırma alanına çentikler eklenerek maksimum gerilme en aza indirmek amaçlanmıştır. Çeşitli çentik tasarımına sahip tek tesirli bindirme bağlantılarının (SLJ'lerin) optimum tasarımını bulmak için sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılmış ve tasarımları doğrulamak için deneyler yapılmıştır. Benzer yapışma ve yapıştırıcıya sahip tek tesirli bindirme bağlantılarının gerilme dağılımı, çentikli tek tesirli bindirme bağlantı kenarlarındaki tepe gerilmelerinin, değiştirilmemiş SLJ'den önemli ölçüde daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır (Kanani et al. 2020).

Çam ve Özel (2020), tarafından yapılan çalışmada, yapıştırma bağlantıları üzerindeki zıt çentiklerin, adhezif olarak bağlanmış tek tesirli bindirme bağlantıları üzerindeki çekme dayanımı deneysel ve nümerik olarak araştırılmıştır. Yapıştırılan malzeme olarak 7075-T7 alüminyum alaşımı yapıştırıcı olarak DP 460 kullanmışlardır. Optimum çentik geometrisi elde etmek için yapıştırıcılar üzerinde farklı çentik geometrileri oluşturulmuş ve Taguchi yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Daha sonra kohezif bölge modeli kullanılarak optimum çentik geometrileri dikkate alınarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Son olarak, sonlu eleman analizi sonuçları deneysel olarak doğrulanmıştır. Yapılan nümerik ve deneysel çalışmalar, çentiklerin yapıştırma

bağlantıları üzerindeki gerilme mukavemetini arttırdığını ortaya çıkarmıştır. En yüksek artışın görüldüğü Tip-III bağlantılarındaki hasar yükü %15 artmıştır. Ayrıca çentik şekli, uzunluğu, derinliği ve bindirme alanına olan mesafenin hasar yükü üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna varılmıştır (Çam and Özel 2020).

Beigrezaee et al. (2021), tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantılarında bindirme bölgesinin dış kısımlarına dikdörtgen ve yarı dairesel çentikler açarak, bağlantıların statik dayanımları nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Tek tesirli bindirme bağlantılarda bindirme bölgesinin dış kısmına çentik açılması bağlantı mukavemetini yaklaşık %110 artırdığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca açılan çentiğin dikdörtgen veya yarı dairesel olması bağlantı mukavemetindeki iyileştirmeler arasında anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür. Bu durum yapıştırma bağlantılarının mukavemetindeki iyileştirilme açılan çentiğin geometrisine bağlı olmadığını göstermektedir (Beigrezaee et al. 2021).

Bahrami et al. (2020), tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantılarında (SLJ'ler) mukavemet iyileştirmesini değerlendirmek için iki çeşit geometrik yapışma modifikasyonu nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Yapıştırılan malzeme olarak alüminyum 7075 alaşımı kullanılmıştır. Temel çentik parametreleri olarak bindirme uçlarında derinlik, genişlik ve mesafe için optimum değerler sonlu elemanlar simülasyonu kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra, değiştirilmemiş bir SLJ ile simüle edilmiş konik ve çentikli SLJ'ler üretilip, üzerinde deneyler yapılmıştır. Hem sonlu elemanlar analizinde hem de deneylerden elde edilen veriler sonucunda, geometrisi konikleştirilmiş modifikasyona sahip olan SLJ'lerin hasar yüklerinin, çentik modifikasyonuna sahip SLJ'lerin hasar yüklerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca hem dış çentik hem de konik modifikasyon yönteminin SLJ'lerin mukavemetinin önemli ölçüde artırabileceği sonucuna varılmıştır (Bahrami et al. 2020).

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş single-lap bağlantıların mukavemetini artırmak için uygulanan yöntemlerden bir diğeri ise, bindirme bölgesinde yapıştırılan malzemenin dış kısmına girinti açma işlemidir. Yapıştırma bağlantılarında girinti açma işlemi bağlantı mukavemeti açısından en etkili parametre olarak tanımlanmıştır. Girinti açma işlemi temel olarak single-lap bağlantıların bindirme bölgesinde oluşan eksantrikliği azaltarak

yapıştırma bağlantılarının mukavemetinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Literatürde bu konuda birkaç araştırma bulunmaktadır

Yan and Yu (2006), tarafından yapılan çalışmada, girinti uzunluğu ve konumunun, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların farklı bindirme uzunluğuna göre mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre girinti uzunluğu arttıkça SLJ'lerin yük taşıma kapasitesini azalttığı, ancak girintinin uygun konumu ve geniş olması bu bağlantının mukavemetini belirgin bir şekilde artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca açılan girintinin konumunun, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mukavemeti üzerinde de daha iyi bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Yan and Yu 2006).

Sancaktar ve Nirantar (2012), tarafından yapılan çalışmada, yapıştırma bağlantı uçlarını inceltmenin tek tesirli bindirme bağlantılarının geometrisinde bağlantı mukavemeti ve deformasyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bağlantılar, doğrusal ve doğrusal olmayan malzeme davranışını içeren sonlu elemanlar (FE) teknikleri kullanılarak geometrik olarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonuçları daha sonra, iki farklı yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılan, farklı yüzey aşındırma koşullarına sahip alüminyum ve çelik bağlantılara sahip farklı tek tesirli konfigürasyonlar için deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapıştırılan malzeme olarak alüminyum ve çelik, yapıştırıcı olarak ise EPON 830 kullanılmıştır. Elde edilen FE sonuçlarına göre, bağlantı uçları inceltmiş geometrilerin modifiye edilmemiş geometrilere göre normal ve kayma gerilmelerinin önemli ölçüde azaldığı sonucu, deneysel sonuçlarla da tutarlı olduğu bulunmuştur. Bağlantı mukavemeti azalan koniklik açısı ile arttığı, dikkate alınan en küçük değerde ($\sim 10^\circ$) ise maksimuma ulaştığı görülmüştür (Sancaktar and Nirantar 2003).

Pinto et al. (2014) tarafından yapılan çalışmada, gevrek bir yapıştırıcı ile yapıştırılan tek tesirli bindirme bağlantıların bindirme bölgesinin kenarlarında açılan girintilerin bağlantı dayanımı üzerindeki etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapıştırılan malzeme olarak AA6082 T651 alüminyum alaşımı yapıştırıcı olarak ise Araldite AV138 kullanmışlardır. Yapılan incelemede bindirme uzunluğu ile girintinin uzunluğu ve derinliği optimize edilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, bindirme bölgesinin dış kısımlarına girinti yapılması bindirme bölgesinde yapışmanın

esnekliğini arttırdığı ve bu durum bağlantıda oluşan maksimum soyulma gerilmelerini önemli derecede azaltmaktadır. Ayrıca girintinin uzunluğunun ve derinliğinin değişmesi, bağlantının yük taşıma kapasitesindeki artışı değiştirmekle birlikte bağlantı mukavemetini en fazla %21 artırdığı ifade edilmiştir (Pinto et al. 2014).

Moya-Sanz et al. (2017) tarafından yapılan çalışmada ise, tek eksenli gerilme yüküne maruz kalan tek tesirli bindirme bağlantılarında girinti oluşturmanın, bağlantı mukavemeti üzerindeki etkisini değerlendirmek için Cohesive Zone Model (CZM) kullanılarak bir sayısal model geliştirilmiştir. Tek tesirli bindirme bağlantıları üzerinde farklı uzunlukta ve derinlikte girinti açılarak elde edilen bağlantı konfigürasyonlarının nümerik analizleri yapılarak bağlantı hasar yükü tahminleri yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucuna göre, yapıştırma bağlantısında girinti yapılması bağlantının mukavemetini önemli derece artırmaktadır (Moya-Sanz et al. 2017).

Çalık and Yildirim (2017) tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantılarında hem girintinin hem de bi-adhesive'in bağlantıda oluşan gerilmelere etkisini sonlu eleman (FE) yöntemi ile nümerik olarak incelenmiştir. Farklı geometrik parametrelerin kullanıldığı sonlu elemanlar simülasyonlarından elde edilen sonuçlara göre, bağlantıda oluşturulan girinti ve bi-adhesive'in bağlantıda oluşan soyulma gerilmelerini ve maksimum asal gerilmelerini önemli derecede azalttığını ortaya koymaktadır. Ayrıca bağlantıda oluşan gerilmeler açısından girinti uzunluğunu değişiminden ziyade girinti derinliğinin değişiminin daha etkili olduğu anlaşılmaktadır (Çalık and Yildirim 2017).

Saraç (2021) tarafından yapılan çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir; ilk aşamada, önceki deneysel çalışma verilerine göre, sonlu elemanlar analizi programı (ANSYS) kullanılarak tek tesirli bindirme bağlantı modelleri oluşturulmuştur ve gerilme analizleri incelenmiştir. Daha sonra deneysel çalışmada elde edilen hasar yükleri uygulanarak gerilme analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda bindirme uçlarında meydana gelen soyma ve kayma gerilmeleri hasar yükü oluşumunda önemli rol oynadığı incelenmiştir. Bağlantıların sonlu elemanda hasar yüklerini bulmak için iki farklı yaklaşım uygulanmıştır. Bu yaklaşımlar maksimum stres teorisi ve Von-Mises eşdeğer

2. KAYNAK ÖZETLERİ

gerilimidir. Sonlu eleman analiz sonucunda, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında yaklaşık olarak %80 benzerlik olduğu anlaşılmaktadır (Saraç 2021).

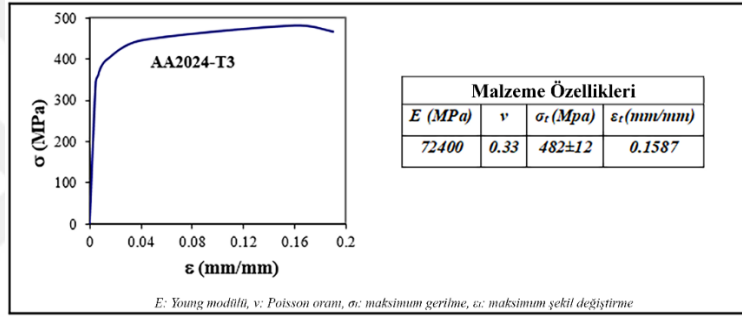
Bu çalışmada, farklı girinti ve çentiklerden oluşan ve çekme yüküne maruz kalan farklı tek bindirmeli bağlantı (TTB) konfigürasyonlarının mekanik davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çekme yüküne maruz kalan TTB'lerin hasar yükleri, yer değiştirme yetenekleri ve hasar yüzeyleri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca cohesive zone (CZM) modellerinin TTB konfigürasyonlarının nümerik analizleri yapılmış ve bağlantıda oluşan soyulma gerilmeleri elde edilmiştir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Yapıştırılan Malzeme

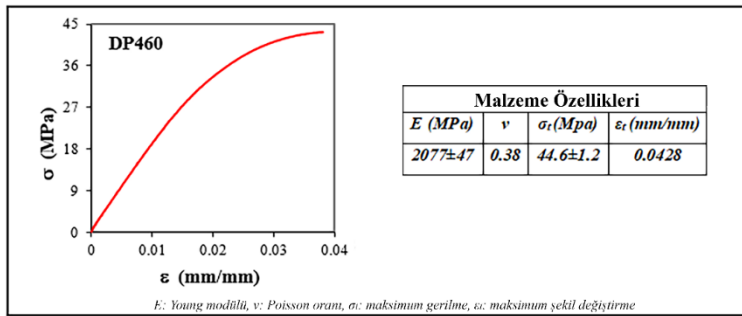
Bu çalışmada; havacılık, uzay, denizcilik ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı işlenebilirliği, yüksek korozyon dayanımı, fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı kullanılmıştır. Alaşımın malzeme özellikleri Şekil 3.1’de verilmiştir. Aynı zamanda, birçok uluslararası standart yapıştırıcıların bağlantıdaki performansını belirlemek için bu alüminyum alaşımının kullanılmasını tavsiye etmektedir (ASTM D1002, ISO).



Şekil 3.1 AA2024-T3 alüminyum alaşımının gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Akpınar 2013).

3.2. Deneyde Kullanılan Yapıştırıcı

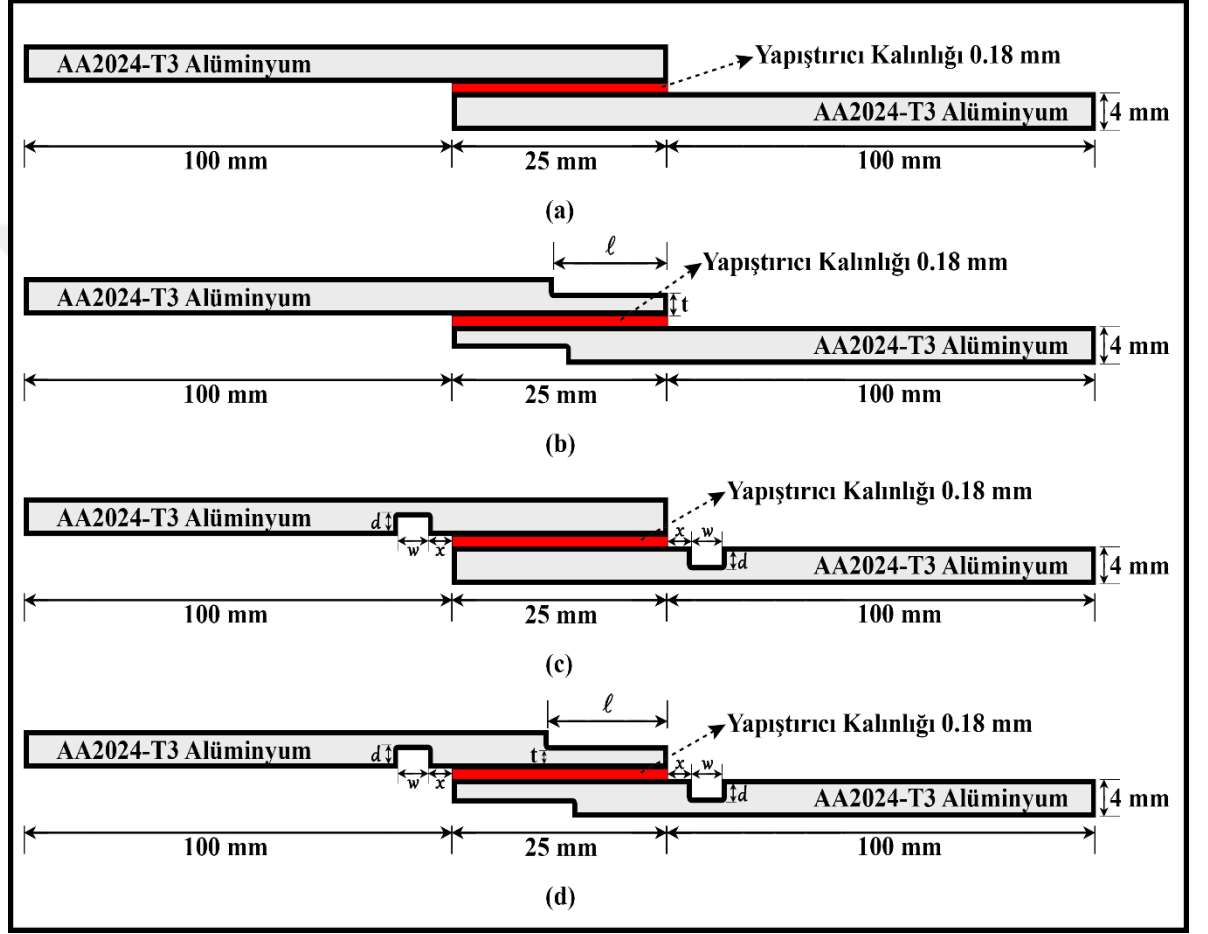
Yapıştırıcı olarak sert yapıştırıcı olan 3M (St. Paul, MN, USA) firması tarafından üretilen çift bileşenli DP460 yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır. Şekil 3.2’de yapıştırıcının mekanik özellikleri verilmiştir (Akpınar 2013).



Şekil 3.2. DP460 yapıştırıcının gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramı (Akpınar 2013).

3.3. Yapıştırma Bağlantılarının Hazırlanması

Bu çalışmada malzeme kalınlığı, bindirme uzunluğu ve genişliği aynı olan tek tesirli bindirme bağlantıları (TTB), çentikli (ÇTTB), girintili (GTTB), girintili ve çentikli (GÇTTB) tasarımlara sahip olan yapıştırma bağlantıları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Bu numunelere ait geometrik modeller Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Bağlantıların geometrik parametreleri (a) Tek tesirli bindirme bağlantısı, (b) Girintili tek tesirli bindirme bağlantısı, (c) Çentikli tek tesirli bindirme bağlantısı, (d) Girintili ve çentikli tek tesirli bindirme bağlantısı.

Çizelge 3.1. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar için deneysel parametreler

Numune	Bağlantı Tipi	l (mm)	t (mm)	d (mm)	x (mm)	w (mm)
Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	TTB	-	-	-	-	-
Girintili Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GTTB-1	5	2	-	-	-
Girintili Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GTTB-2	10	2	-	-	-
Girintili Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GTTB-3	15	2	-	-	-
Girintili Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GTTB-4	20	2	-	-	-
Girintili Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GTTB-5	25	2	-	-	-
Girintili Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GTTB-6	10	1	-	-	-
Girintili Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GTTB-7	10	3	-	-	-
Girintili Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GTTB-8	20	1	-	-	-
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-1	-	-	1	0	3
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-2	-	-	1	2	3
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-3	-	-	1	4	3
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-4	-	-	1	6	3
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-5	-	-	1	0	6
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-6	-	-	1	0	9
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-7	-	-	1	0	12
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-8	-	-	0.5	0	3
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-9	-	-	1.5	0	3
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-10	-	-	0.5	0	6
Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	ÇTTB-11	-	-	0.5	0	9
Girintili-Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GÇTTB-1	10	2	1	0	3
Girintili-Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GÇTTB-2	10	2	1	0	9
Girintili-Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GÇTTB-3	10	1	1	0	3
Girintili-Çentikli Tek Tesirli Bindirme Bağlantısı	GÇTTB-4	10	1	1	0	9

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Şekil 3.3'te verilen geometrik modelleri elde etmek için 4 mm kalınlığında ve 2.000x1.000 mm ebadındaki levha numuneler elmas testere ile 100x25 mm boyutunda kesilmiştir. Elde edilen numuneler daha sonra üç eksenli CNC freze tezgâhında, GTTB, ÇTTB ve GÇTTB bağlantı numunelerindeki çentik ve girintiler açılmıştır.

Yapıştırma bağlantılarının mukavemetinin yüksek olması, kullanılacak yüzey hazırlama metotlarına bağlıdır. Bu nedenle hazırlanan numuneler üzerine yapıştırma işlemi yapılmadan önce aşağıda detaylı olarak belirtilen yüzey hazırlama işlemleri uygulanmıştır.

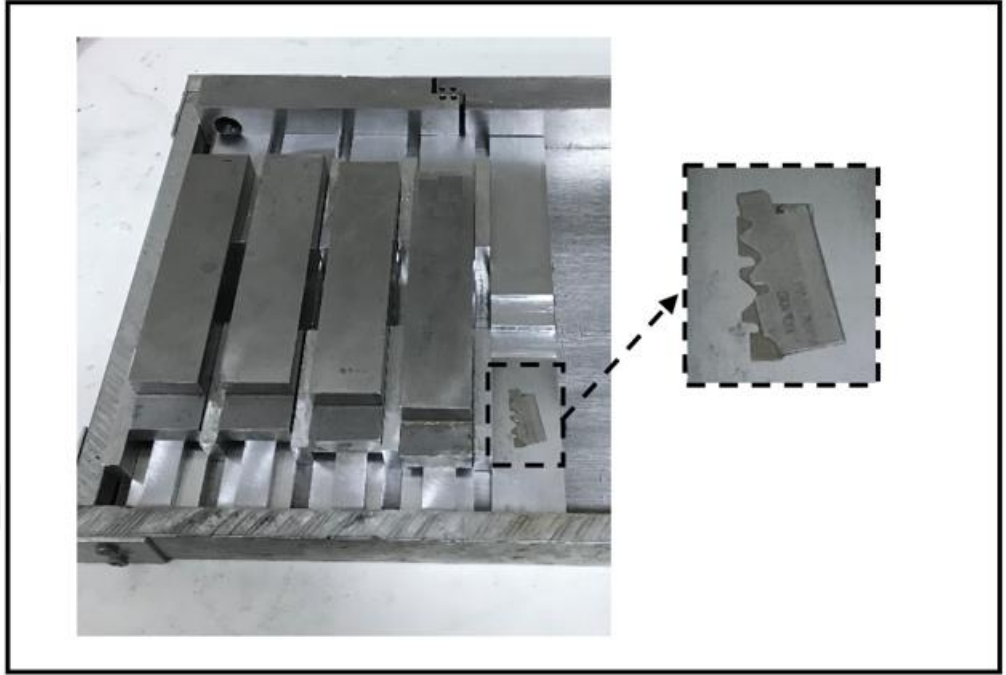
Numuneler, kesme işlemi sırasında oluşan çapak, kir, gres, yağ gibi atıkların giderilmesi için 600 grade SiC zımpara ile zımparalanmış ve bu zımpara işlemi sonrasında numuneler üzerinde oluşan çizikleri azaltmak amacıyla 1.000 grade SiC zımpara ile zımparalanmıştır. Bu işlem sayesinde daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Daha sonra numuneler musluk suyu ve toz temizleyici kullanılarak yıkanmıştır. Yıkama işleminin ardından numuneler, 20 dakika süreyle aseton içerisinde daldırılmıştır. Buna takiben numune parçaları 60 °C sıcaklıkta bir fırın içinde kurutulmuştur ve böylece yüzey hazırlama işlemi tamamlanmıştır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıları hazırlarken, numunelerin kalıp içerisinde kaymayarak sabit kalması ve istenilen yapıştırıcı kalınlığının ayarlanabilmesi için Şekil 3.4'te gösterilen özel tasarlanmış bir kalıp kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda kullanılan özel tasarlanmış kalıp

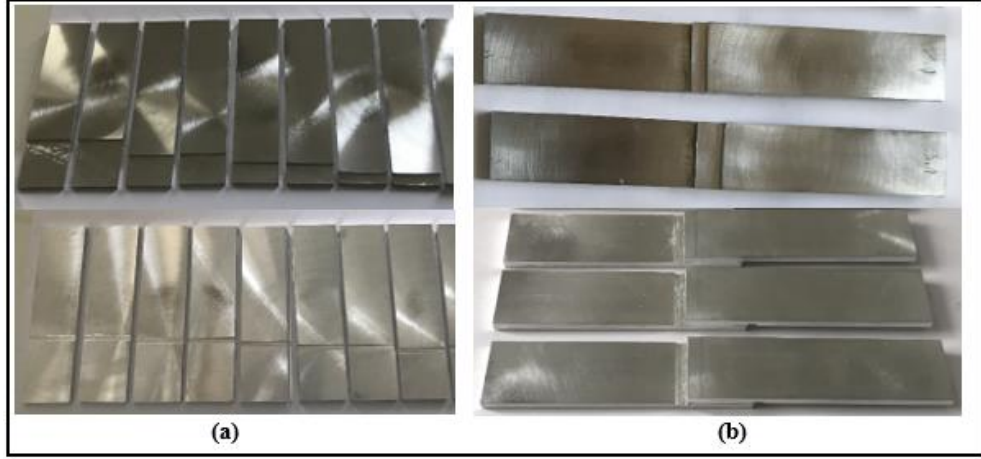
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bağlantı numunelerin kürleşme sonrası kalıptan kolayca çıkarılması amacıyla, üretim kalıbı silikon yağlayıcı (3M Scotch™ 1600) ile yağlanmıştır. Bağlantı numunelerinin yapışma bölgesine bir master yardımıyla yapıştırıcı sürülmüştür. Yapıştırıcı kalınlığının 0,18 mm olması için, 0,18 mm kalınlığında metal parçalar bağlantı numunelerinin serbest uçlarına konulmuştur. Yapıştırma bağlantılarının bindirme uzunluğunun ayarlanması ve üniform basınç sağlanması için yapıştırılan malzeme kalınlığında alüminyum kalıp aparatları Şekil 3.5'te gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



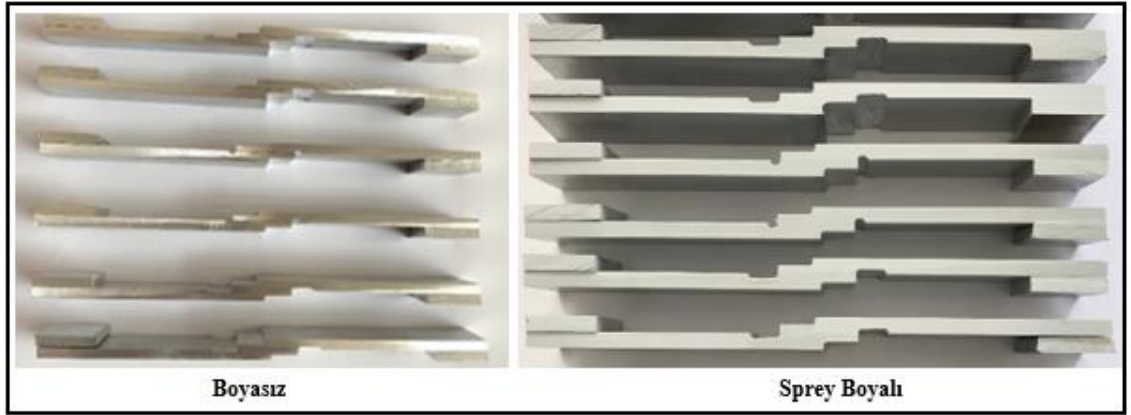
Şekil 3.5. Yapıştırıcı kalınlığını belirlemek için kullanılan metal parçalar

Daha sonra numunelerin bulunduğu kalıp sıcak prese konulmuştur. Yapıştırıcı DP460 için sıcaklık, basınç ve süreye bağlı olarak bazı farklı kürleşme koşulları bulunurken, bu çalışmada kürleşme 0,15 MPa basınç altında 70 °C'de 120 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Kürleşme sonrası bağlantının bindirme bölgesinin uçlarında oluşan fazla yapıştırıcılar numune yüzeylerinden temizlenmiştir (Şekil 3.6). Çünkü bindirme bölgesinin uçlarında kalan bu fazla yapıştırıcılar bağlantının hasar yükünü etkilemektedir. Her bir bağlantı türü için üç numune olmak üzere toplam yetmiş iki numune üretilmiştir.



Şekil 3.6. (a) Yüzey hazırlama işlemi uygulanmış yapıştırılan malzemeler (b) Kırılma sonrası bağlantı numuneleri.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda hasar, bindirme bölgesinin uçlarında başlayan çatlağın merkeze doğru ilerlemesiyle oluşmaktadır. Bağlantıların deneyleri esnasında bindirme bölgesinde oluşan çatlağın başlamasını ve ilerlemesini daha iyi tespit etmek için yapıştırma işlemi tamamlanmış numunenin yüzeyine spreylenmiş boyayla ince bir film tabaka oluşturulmuştur (Şekil 3.7).



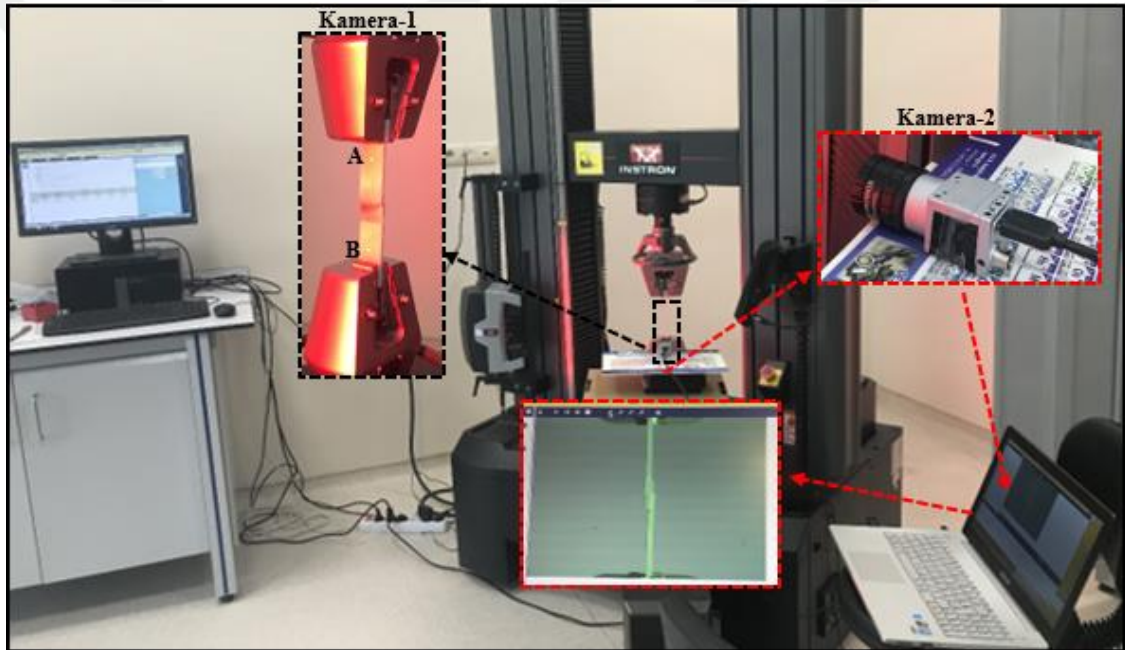
Şekil 3.7. Yüzeyi spreylenmiş boyayla kapatılmış bağlantı numuneleri

3.4. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Hasar Yüklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Tüm çekme deneyleri, bilgisayar kontrollü Instron-5982-100 kN (ABD) üniversal çekme cihazı kullanılarak 23°C ve %30 nem oranında, 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sınır koşulları ve yükleme Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Şekil 3.8’de görüldüğü üzere bağlantı numunelerinin testinde çift kamera kullanılmıştır. Kamera-1 (video ekstansometre), Şekil 3.8’de gösterilen A ve B noktaları arasındaki yer değiştirmeyi ölçer. Bunun nedeni deney yapıldığı esnada çene ile numune arasındaki sürtünmeden kaynaklanan yer değiştirme ile cihazın bağlantı elemanlarındaki boşluktan kaynaklanan yer değiştirme verileri, cihazın strokundan elde edilen yer değiştirme verilerini önemli derecede etkilemektedir (Çalık and Akpınar 2019). Kamera-2 (high-speed video) ise çatlakların ilerlemesini ve yanal yer değiştirme (eksantrik yüklenmeden dolayı yanal eğilme) verilerini elde etmek için kullanılmıştır. Yüksek hızlı video ile test sırasında saniyede beş görüntü alınmıştır. Ayrıca çekme testleri sırasında bağlantılar dikkatlice gözlemlenmiş ve numunelerin taşıyabileceği maksimum yük kaydedilmiştir.

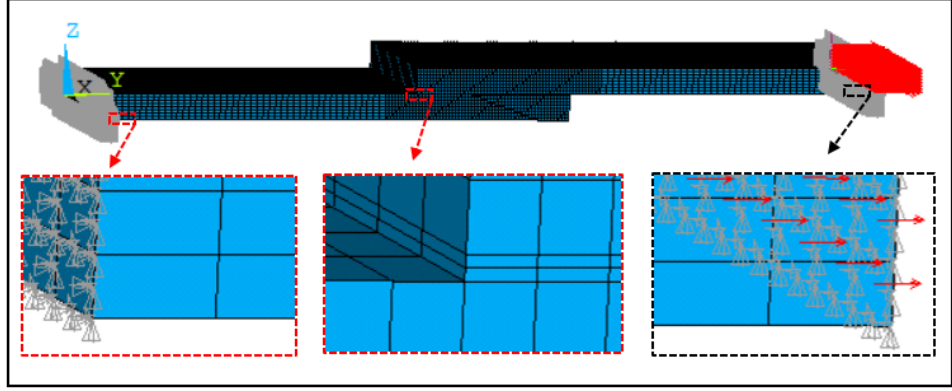


Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan sınır şartları ve yükleme

3.5. Yapıştırma Bağlantılarının Nümerik Analizi

TTB, GTTB, ÇTTB ve GÇTTB bağlantı tipleri Şekil 3.9’da ANSYS 19.1 paket yazılımı kullanılarak 3 boyutlu (3D) olarak modellenmiştir. Bağlantıların sayısal analizlerinde yapıştırılan malzeme (AA2024-T3) için lineer olmayan malzeme davranışı göz önüne alınarak Multilinear Isotropic Hardening (MISO) malzeme modeli kullanılmıştır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda bindirme bölgesinin uçlarında soyulma gerilmeleri, orta kısımlarda ise kayma gerilmeleri daha baskın oluşmaktadır. Bu

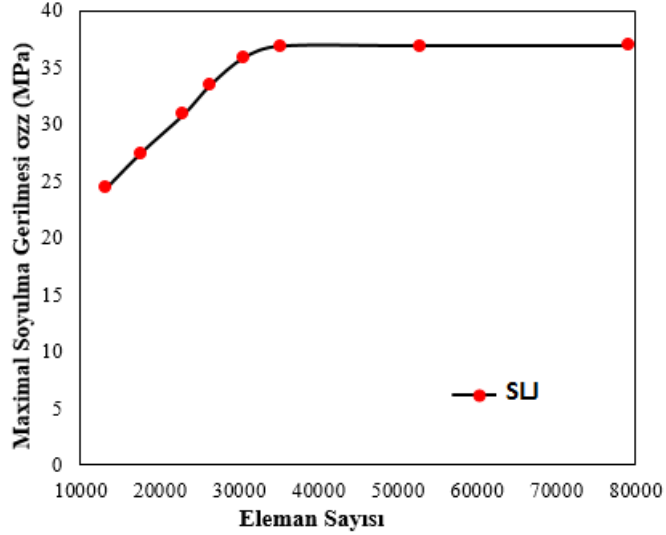
nedenle deneysel çalışmayı nümerik analiz ile daha iyi simüle etmek için, bağlantıların yapıştırıcı bölgesinde malzeme modeli olarak Cohesive Zone Model (CZM) seçilmiştir.



Şekil 3.9. Tek tesirli bindirme bağlantılarının nümerik analiz modeli

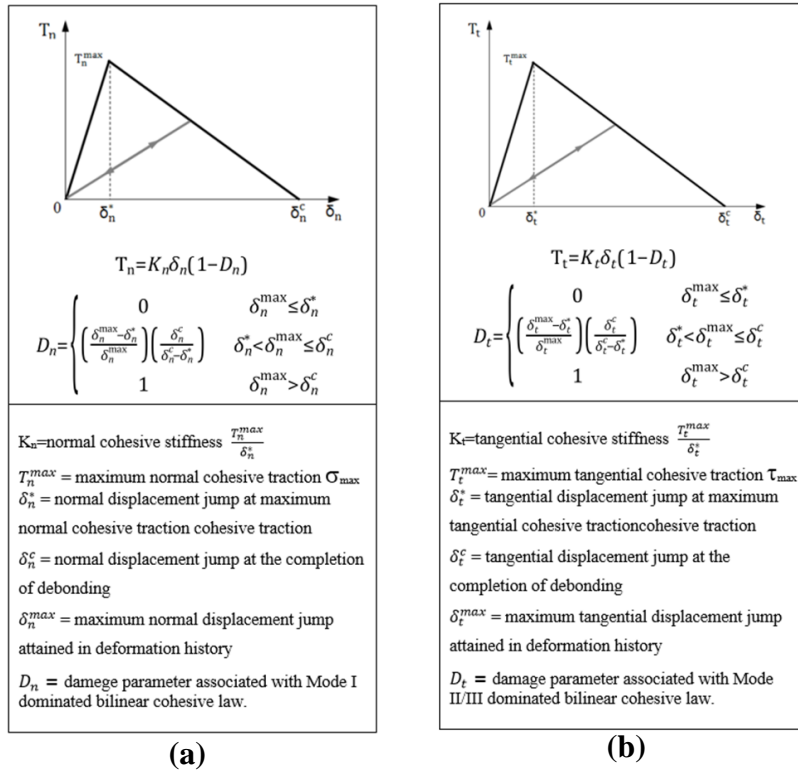
Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan numunelerin boyutları (Şekil 3.3), yükleme ve sınır şartları (Şekil 3.10) deneysel çalışmada kullanılanlarla aynıdır. 3D analizde, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı, Solid 186 aracılığıyla üç serbestlik derecesi ve 20 düğüm noktasına sahip elemanlar kullanılarak modellenmiştir.

Yapıştırma bağlantıların nümerik modellerinde kullanılan ağ sayısı ve boyutu, bağlantıda oluşan gerilmeleri önemli derecede etkilemektedir. Bu nedenle yakınsamayı sağlamak için artırılmış (refined) bir ağ kullanılmıştır. Bağlantı modeline uygun eleman sayısını seçmek için bindirme bölgesinde (yapıştırma bağlantılarında kritik bölge) oluşan soyulma gerilmeleri göz önüne alınarak sonuçların yakınsama çalışması yapıldı (Şekil 3.10). Elemanların sayısını ve boyutunu optimize etmek için TTB tipinde sekiz farklı ağ şeması incelenmiştir. Şekil 3.10'da gösterildiği gibi, bağlantı modelinde 30.000 eleman kullanıldığında gerilmeler yakınsamıştır. Ağlar esas olarak bindirme kısmında iyileştirildikten sonra maksimum gerilmelerin değerleri dengeye ulaşmaya kadar değiştiği açıkça görülmüştür. Nümerik çözümlerdeki gereken süreyi azaltmak için tüm bağlantı tiplerinde ideal ağ yoğunluğu olarak yaklaşık 30.000 eleman alınmıştır.



Şekil 3.10. Maksimum soyulma gerilmelerine göre sayısal yakınsama analizi

CZM, gerilimler ve bağıl yer değiştirmeler (kaymada T_t , çekmede T_n) ile T_n^{max} (maximum normal cohesive traction- σ_n^{max}), G_{IC} (the tensile critical strain energy release rate), T_t^{max} (maximum tangential cohesive traction- τ_t^{max}) and G_{IIC} (the shear critical strain energy release rate) parametreleri arasındaki bir ilişkiye dayanmaktadır (Şekil 3.11) (Kantar et al. 2018; Kazaz et al. 2020).



Şekil 3.11. Baskın bilinear CZM yasası; a) Mod-I, b) Mod-II

3. MATERYAL ve YÖNTEM

ANSYS 18 program paketinde CZM ile analiz edilebilmesi için bu parametrelerin bilinmesi gerekir. Kanar et al. (2018) ve Kazaz et al. (2020), tarafından yapılan çalışmalarda bu değerler Mod I ve Mod II deneyleri yapılarak elde edilmiş olup Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. DP460 yapıştırıcısı için CZM modelinde kullanılan mekanik özellikler

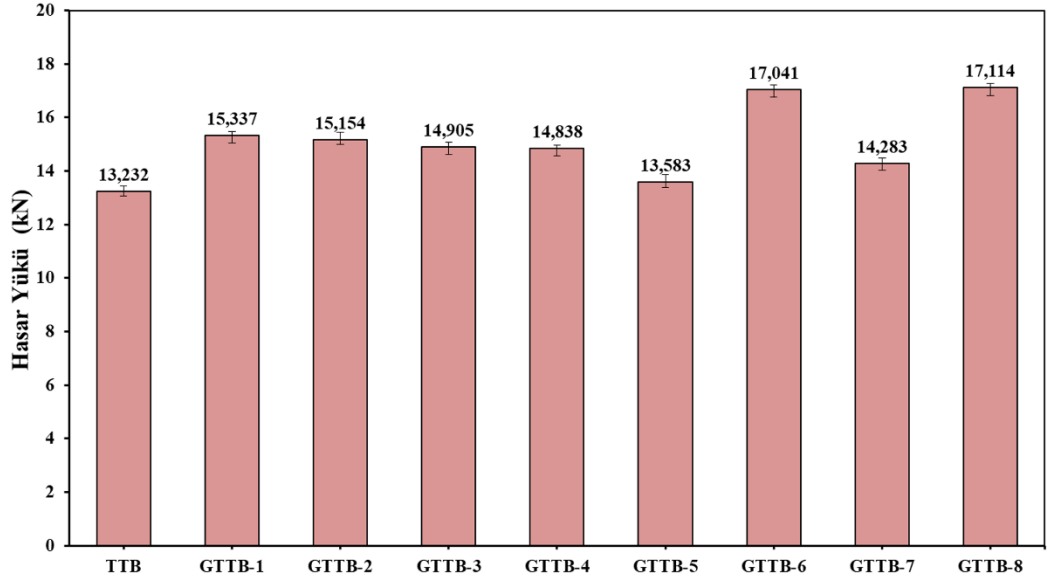
σ_n^{max} (MPa)	G _{IC} (N/mm)	τ_t^{max} (MPa)	G _{IIC} (N/mm)
32,6	2,56	28,5	11,71

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTB, GTTB, ÇTTB ve GÇTTB tiplerinde, çentik veya girinti derinliğinin, kalınlığının ve bindirme bölgesinden mesafesinin değişmesi gibi parametrelerin bağlantı mukavemeti üzerine etkisini incelemek için üçer bağlantı numunesi kırılıncaya kadar çeki yüküne maruz bırakılarak ortalama mukavemetleri elde edilmiştir.

4.1. Girintili Tek Tesirli Bağlantıların Deneysel Sonuçları

Şekil 4.1’de verilen bindirme bölgesinin dış kısmına girinti yapılarak elde edilen GTTB tiplerinin mukavemetleri incelendiğinde; TTB geometrisine göre, girinti kalınlığının 2 mm sabit kalması şartıyla girinti uzunluğunun 5 mm olan bağlantının (GTTB-1) mukavemeti yaklaşık %16 artmaktadır. Ancak bağlantı mukavemetindeki bu artış girinti uzunluğunun artmasıyla azalmaktadır. Şöyle ki, girintinin uzunluğu 10 mm olduğunda (GTTB-2) bağlantı mukavemetindeki artış %14, girintinin uzunluğu 15 mm olduğunda (GTTB-3) %13, girintinin uzunluğu 20 mm olduğunda (GTTB-4) %12 ve girintinin uzunluğu 25 mm olduğunda (GTTB-5) ise %3 olmaktadır. Ayrıca girinti uzunluğu 10 mm sabit kalması şartıyla girinti kalınlığının 1 mm olan bağlantıların (GTTB-6) mukavemeti yaklaşık %29 ve girinti kalınlığının 3 mm olan bağlantıların (GTTB-7) mukavemeti yaklaşık %8 artmaktadır. GTTB geometrisinin mukavemetindeki artışı şu şekilde açıklayabiliriz. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantıları çeki yüküne maruz kaldığında, yapıştırılan malzemelerdeki kuvvet hatları ile yapıştırıcı hattı birbiriyle çakışmayıp, bu iki hat arasında bir mesafe bulunmaktadır. Bu mesafe bağlantıda bir moment oluşturmaktadır. Eksantrik yüklemenin neden olduğu bu momentin etkisi, bağlantının bindirme bölgesinin kenarlarında soyulma gerilmelerine neden olur ve bu gerilmeler bağlantıdaki hasarın ana nedenidir. Bağlantının bindirme bölgesinin üst kısımlarına girinti yapılması (yani yapıştırılan malzemenin kalınlığının azaltılması), bağlantıda oluşan bu momentin etkisinin azaltmakta olup, bu durumda bağlantının hasar yükü artmaktadır. Ancak girinti uzunluğu bindirme uzunluğu ile aynı olması durumunda (25 mm) bağlantının mukavemetindeki artışın yok denecek kadar olmasının nedeni ise, bindirme bölgesinde yapıştırılan malzemenin rijitliğin önemli derecede azalmasıdır.

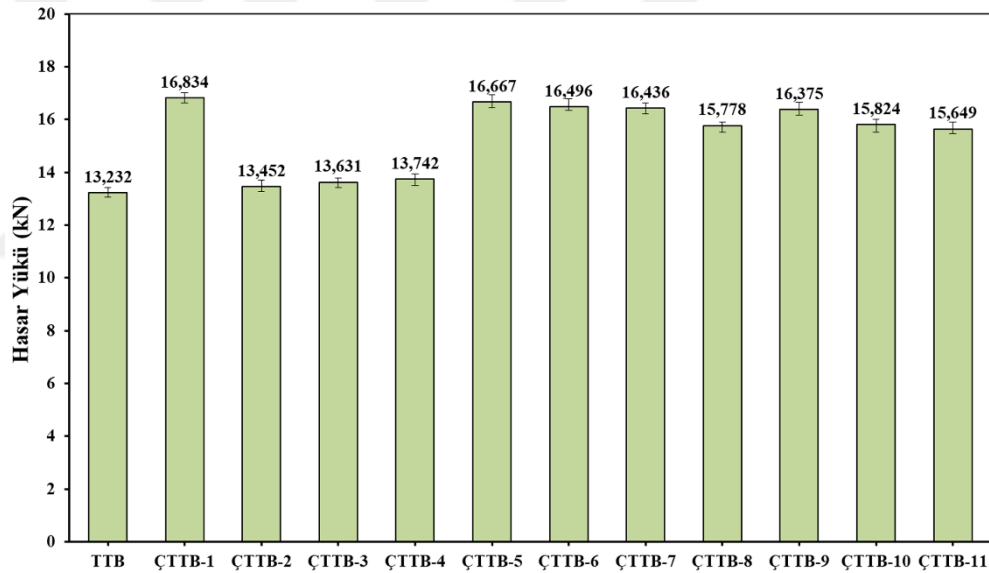


Şekil 4.1. Deneysel çalışmadan elde edilen GTTB bağlantılarının ortalama maksimum kırılma yükleri.

4.2. Çentikli Tek Tesirli Bağlantıların Deneysel Sonuçları

Şekil 4.2’de verilen bindirme bölgesinin her iki uç kısımlarına çentik açılarak elde edilen ÇTTB tiplerinin mukavemetleri incelendiğinde; TTB geometrisine göre, yapıştırılan malzemeye çentik açılması bağlantının mukavemetini artırmaktadır. Çentik derinliği 1 mm ve genişliği 3 mm sabit kalması şartıyla, açılan çentiğin bindirme bölgesinin uç kısımlarından mesafesi 0 mm olan (yani bindirme bölgesinin bitişiğine) bağlantının (ÇTTB-1) mukavemeti yaklaşık %27 artmaktadır. Ancak açılan çentiğin bindirme bölgesinin uç kısımlarından mesafesi 2 mm olduğunda (ÇTTB-2) bağlantının mukavemeti yaklaşık %2, 4 mm olduğunda (ÇTTB-3) bağlantının mukavemeti yaklaşık %3 ve 6 mm olduğunda (ÇTTB-4) ise bağlantının mukavemeti yaklaşık %4 artmaktadır. Çentikli bağlantıların mukavemeti açısından en iyi sonucun bindirme bölgesinin hemen uç kısımlarında açılan çentikli bağlantılar olduğu tespit edildikten sonra, çentik derinliği 1 mm ve çentiğin bindirme bölgesinden mesafesi 0 mm sabit tutularak çentiğin genişliği değiştirilerek bağlantıların mukavemeti incelenmiştir. Çentikli bağlantılarda çentik genişliği 6 mm olduğunda (ÇTTB-5) bağlantının mukavemeti yaklaşık %26, çentik genişliği 9 mm olduğunda (ÇTTB-6) bağlantının mukavemeti yaklaşık %25 ve çentik genişliği 12 mm olduğunda (ÇTTB-7) ise bağlantının mukavemeti yaklaşık %24 artmaktadır.

Ayrıca çentik genişliği 3 mm ve çentiğin bindirme bölgesinden mesafesi 0 mm sabit tutularak çentiğin derinliği 0,5 mm olduğunda (ÇTTB-8) bağlantının mukavemeti yaklaşık %19, çentik derinliği 1,5 mm olduğunda (ÇTTB-9) ise bağlantının mukavemeti yaklaşık %24 artmaktadır. Sonuç olarak ÇTTB geometrisinin mukavemeti açısından en iyi sonuç, çentik derinliği 1 mm çentik genişliği 3 mm ve çentiğin bindirme bölgesinden mesafesi 0 mm olan bağlantılarda (ÇTTB-1) elde edilmiştir. ÇTTB geometrisinin mukavemetindeki artışın nedeni şu şekilde açıklayabiliriz. TTB geometrisi çeki yüküne maruz kaldığında eksantrik yüklemeye dolayısıyla bağlantıda eğilme momenti oluşur ve bu moment bindirme bölgesinin uçlarında gerilme yığılmalarına neden olmaktadır. Bindirme bölgesinin uçlarına çentik açılması bu gerilme yığılmalarının etkisini azaltır ve bu durum bağlantının hasar yükünü artırmaktadır. Ayrıca bağlantıların mukavemetlerindeki artış nedeni detaylı olarak nümerik analiz bölümünde yapılmıştır.

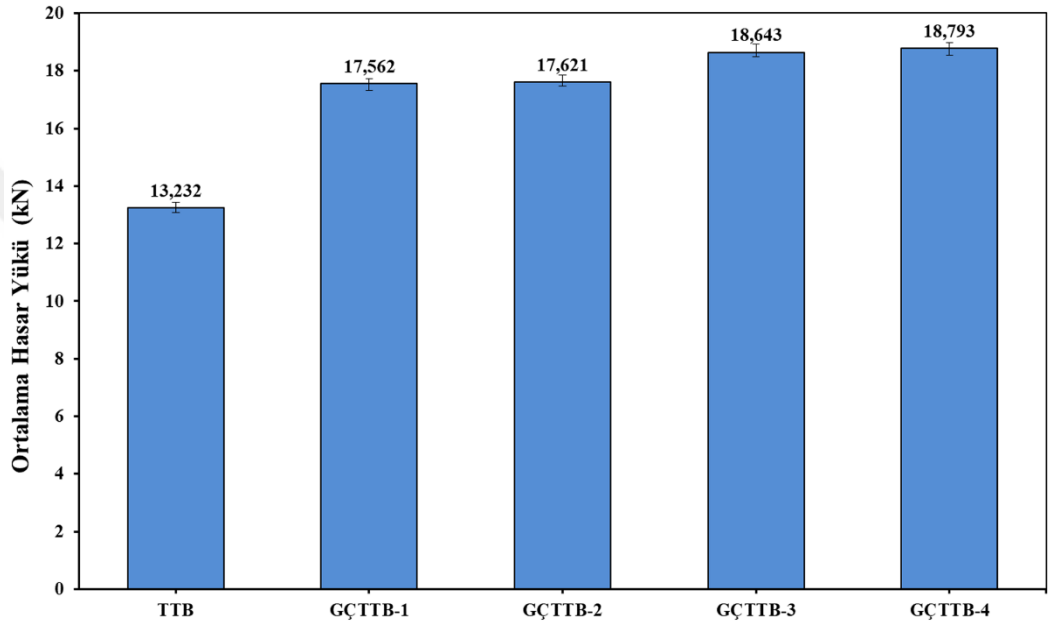


Şekil 4.2. Deneysel çalışmadan elde edilen ÇTTB bağlantıların ortalama maksimum kırılma yükleri.

4.3. Girintili-Çentikli Tek Tesirli Bağlantıların Deneysel Sonuçları

GTTB ve ÇTTB geometrilerinin deneysel olarak hasar yüklerinden elde edilen en iyi sonuçlar göz önüne alınarak, girinti ve çentiğin birlikte olduğu bağlantıların (GÇTTB) mukavemetleri deneysel olarak incelenmiştir. Şekil 4.3'te verilen GÇTTB tiplerinden elde edilen bağlantı mukavemetleri incelendiğinde; TTB tipine göre, GÇTTB-1 ve GÇTTB-2 bağlantı tiplerinin mukavemetleri yaklaşık %33, GÇTTB-3 bağlantı tipinin

mukavemeti yaklaşık %41 ve GÇTTB-4 bağlantı tipinin mukavemeti yaklaşık %42 artmaktadır. GÇTTB tiplerinden elde edilen bu sonuçlar göz önüne alındığında, girintili bağlantılardan elde edilen en iyi bağlantının (GTTB-6) mukavemetindeki artış %29 ve çentikli bağlantılardan elde edilen en iyi bağlantının (ÇTTB-1) mukavemetindeki artış %27 olup her iki bağlantı geometrisinin birleştirilmesiyle elde edilen bağlantının (GÇTTB-3) mukavemetindeki artışın %56 (%29 + %27) olması beklenirken, bağlantının mukavemetindeki artışın yaklaşık %41 olması dikkat çekici bir sonuçtur.



Şekil 4.3. Deneysel çalışmadan elde edilen GÇTTB bağlantıların ortalama maksimum kırılma yükleri.

4.4. Nümerik Analiz Sonuçları

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTB, GTTB, ÇTTB ve GÇTTB tiplerinin nümerik analizinden elde edilen veriler ile deneysel verilerin karşılaştırılması için, bağlantıların nümerik analizde numunenin bir ucu sabit tutulup diğer ucuna y yönünde deplasman verilmiştir. Bu yer değiştirme sırasında, bağlantının bindirme bölgesinin uçlarında z yönünde soyulma gerilmeleri (hasara neden olan) meydana gelmektedir. Bu gerilmeler, üst üste binen alanın uçlarındaki yapıştırıcıyı açmaya çalışır. Kohezyonlu bölge model analizinde – kırılma enerjisinin yük ve yer değiştirmeye bağlı olduğu göz önünde bulundurularak – kırılma enerjisi yapıştırıcıyı ayırmak için gereken enerjiye ulaştığında, bağlantının bindirme bölgesinin uçlarında hasar oluşmaya başlamaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

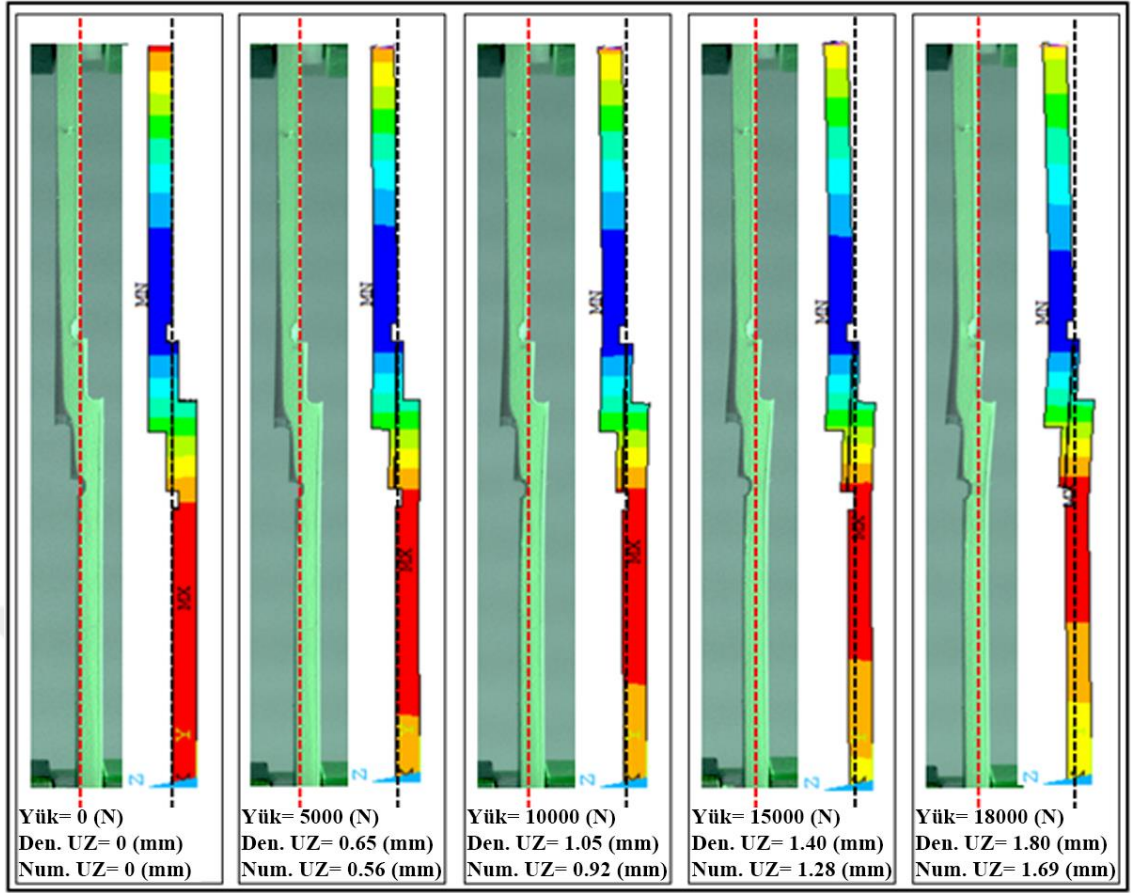
Bağlantıların nümerik analizden ve deneylerden elde edilen hasar yükleri ve yer değiştirme verileri Çizelge 4.1’de karşılaştırılmıştır. Elde edilen bu veriler incelendiğinde, deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu durum yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların nümerik analizinde CZM modeli kullanmanın doğruluğunu göstermektedir. Ayrıca deney esnasında Şekil 3.6’da gösterilen kamera-1 ile A ve B noktaları arasından yer değiştirme verilerinin elde edilmesi, deneysel ve nümerik analizin uyumluluğu açısından oldukça önemlidir. Çünkü çekme cihazının çeneleri ile malzeme arasındaki sürtünme ve cihazın bağlantı elemanları arasındaki boşlukların yükleme esnasında yer değiştirme verilerini etkileyeceğinden, deneylerden elde edilen yer değiştirme verileri nümerik analiz ile uyuşmamaktadır.

Çizelge 4.1. Sayısal analiz, deneysel ortalama hasar yükleri ve bağlantıların yer değiştirmesi.

Bağlantı Tipi	Nümerik Hasar Yükü, F_{NUM} (N)	Deneysel Hasar Yükü, F_{EXP} (N)	F_{NUM}/F_{EXP}	Nümerik Yer Değiştirme, F_{NUM} (N)	Deneysel Yer Değiştirme, F_{EXP} (N)	F_{NUM}/F_{EXP}
TTB	12.860	13.232	0,97	0,36	0,40	0,90
GTTB-1	15.545	15.337	1,01	0,39	0,41	0,95
GTTB-2	15.355	15.154	1,01	0,37	0,40	0,92
GTTB-3	14.710	14.905	0,99	0,37	0,40	0,92
GTTB-4	14.550	14.838	0,98	0,34	0,38	0,89
GTTB-5	13.865	13.583	1,02	0,32	0,35	0,91
GTTB-6	16.745	17.041	0,98	0,41	0,45	0,91
GTTB-7	14.660	14.283	1,03	0,34	0,36	0,94
GTTB-8	17.390	17.114	1,02	0,49	0,53	0,92

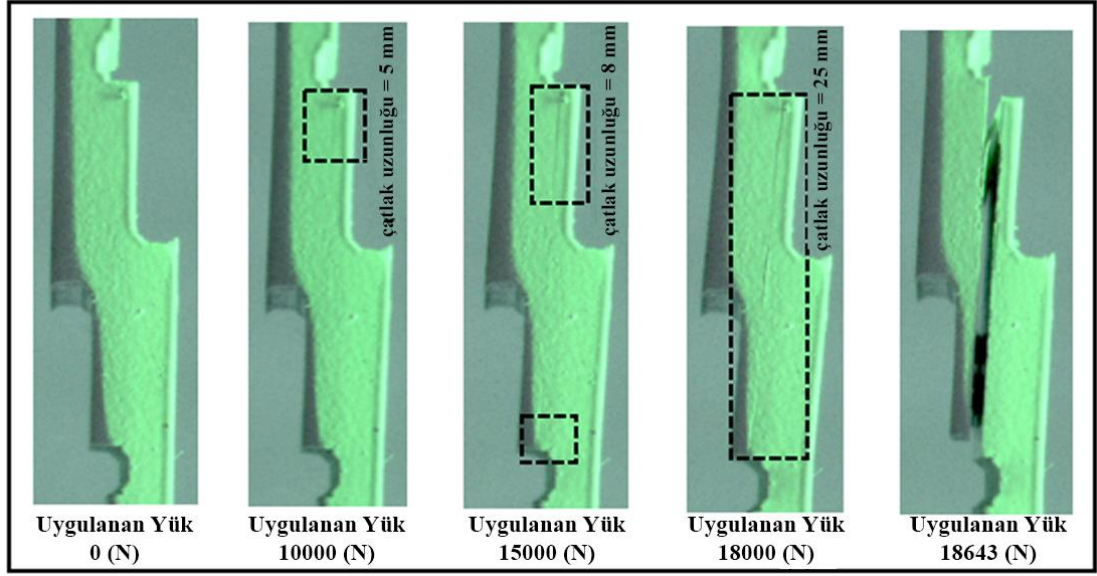
Ayrıca Çizelge 4.1’de verilen yer değiştirme verileri incelendiğinde, girinti kalınlığı 1 mm olan bağlantıların (GTTB-6 ve GTTB-8) yer değiştirme miktarı TTB bağlantıların yer değiştirme miktarına göre daha fazladır. Bunun nedeni TTB tiplerinde eksantrik yükleme nedeniyle oluşan momentin etkisi, girintili bağlantıda oluşan momentin etkisinden daha fazla olmasıdır.

Girinti ve çentiğin birlikte olduğu bağlantı (GÇTTB-3) tipi için 0, 5.000, 10.000, 15.000 ve 18.000 N’luk yüklerde nümerik analiz ile elde edilen z yönündeki yer değiştirme (dönme miktarı) verileri, deney esnasında hızlı kamera (kamera-2) ile elde edilen z yönündeki yer değiştirme verileri karşılaştırıldığında, yaklaşık %94’lük bir uyum olduğu Şekil 4.4’de açıkça görülmektedir.



Şekil 4.4. GÇTTB-3 tipinin deneysel ve sayısal analiz görüntüleri

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı tiplerinde, eksantrik yükleme nedeniyle bindirme bölgesinin uçlarında meydana gelen soyulma gerilmeleri bindirme bölgesinin uçlarında bir çatlak oluşturur ve hasar, bu çatlağın bindirme alanının merkezine doğru ani ilerlemesinden kaynaklanır. Bu hasar olayını ispatlamak için, deney esnasında hızlı kamera (kamera-2) ile GÇTTB-3 tipinin bindirme bölgesinden saniyede 5 görüntü alınarak Şekil 4.5'te verilen hasar mekanizması oluşturulmuştur. Şekil 4.5'te verilen görüntüler incelendiğinde, uygulanan yük 10.000 N olduğunda bindirme bölgesinin bir ucunda çatlağın başladığı ve çatlak uzunluğunun 5 mm olduğu görülürken, uygulanan yük 15.000 N olduğunda bindirme bölgesinin her iki ucunda çatlak oluştuğu ve çatlak uzunluğunun 8 mm olduğu görülmektedir. Ancak uygulanan yük 18.000 N'a ulaştığında, çatlak hızlı bir şekilde ilerleyip çatlak uzunluğu 25 mm'ye ulaşmakta ve böylece hasar oluşmaktadır.

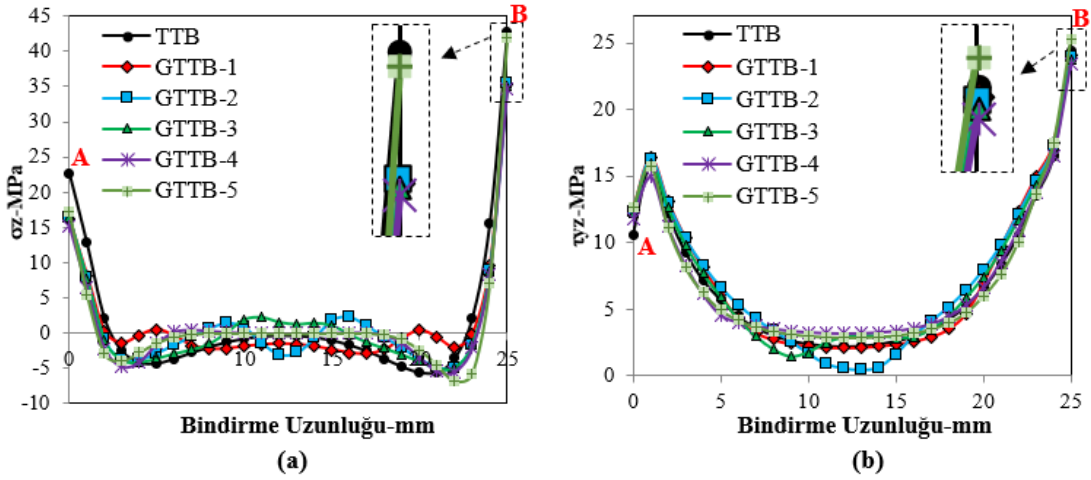


Şekil 4.5. Deney sırasında yüksek hızlı kamera tarafından elde edilen GÇTTB-3'ün hasar görüntüsü.

Yapıştırılan malzeme metal olan yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda hasar genellikle yapıştırıcı tabakasında meydana gelmektedir. Bu nedenle yapıştırma bağlantılarında gerilme analizi yapıştırıcı tabakası üzerinde yapılmaktadır. Yapıştırıcıyla birleştirilen bağlantılarda yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilmelerin daha doğru analiz edilebilmesi için yapıştırıcı tabakasındaki kritik hattın bulunması ve bu hatta göre analizlerin yapılması son derece önemlidir. Yapıştırıcı tabaka kalınlığı göz önüne alındığında, yapıştırıcı tabakasında üç kritik hat bulunmaktadır. Bunlar, yapıştırıcı tabaka kalınlığının orta hattı, yapıştırılan üst malzeme ile yapıştırıcı ara yüzeyi ve yapıştırılan alt malzeme ile yapıştırıcı ara yüzeyi hatlarıdır. Bu tez çalışmasında TTB tipi için bu üç hattın soyulma gerilme dağılımları elde edilmiş olup ve yapıştırılan üst malzeme ile yapıştırıcı ve yapıştırıcı ara yüzeyinden alınan gerilmelerin diğer hatlardan alınan gerilmelerden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu nedenle tüm bağlantı tipleri için elde edilen gerilme dağılımları, 6.500 N'luk (tüm bağlantı tipleri göz önüne alındığında, deneysel olarak elde edilen minimum hasar yükünün yarısı olan yük) bir çekme yükü altında çizilmiştir.

TTB tiplerinde bindirme bölgesine girinti yapılması ve bu girinti uzunluğunun yapıştırıcı tabaka üzerinde meydana gelen gerilme dağılımlarını nasıl etkilediğini analiz etmek için Şekil 4.6'da TTB ve GTTB tiplerinden elde edilen soyulma ve kayma (σ_z ve τ_{yz}) gerilme dağılımlarının karşılaştırılması verilmiştir. İlk olarak, A noktasında oluşan

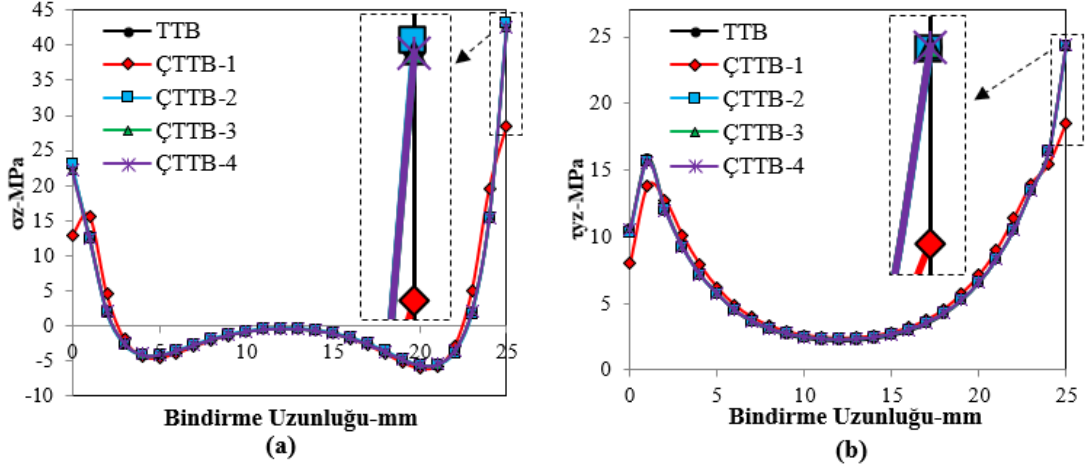
gerilmeler ile B noktasında oluşan gerilmeler arasındaki farkın sınır koşullarından kaynaklanmaktadır (bağlantının bir ucu sabit diğer ucu serbest olması). TTB tiplerinde bindirme bölgesinin dış kısmına girinti yapılması bağlantıda oluşan hem soyulma hem de kayma gerilmelerini önemli derecede azalmaktadır. Ancak girinti uzunluğunun gerilme dağılımları açısından önemli bir parametre olduğu ve girinti uzunluğunun bindirme bölgesinin uzunluğuna eşit olduğunda gerilme dağılımı açısından hemen hemen hiçbir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Bu durum bağlantıların deneysel verileri ile örtüşmektedir.



Şekil 4.6. TTB, GTTB-1, GTTB-2, GTTB-3, GTTB-4 ve GTTB-5 tiplerinde oluşan gerilme dağılımları; (a) Soyulma gerilmesi (σ_z), (b) Kayma gerilmesi (τ_{yz}).

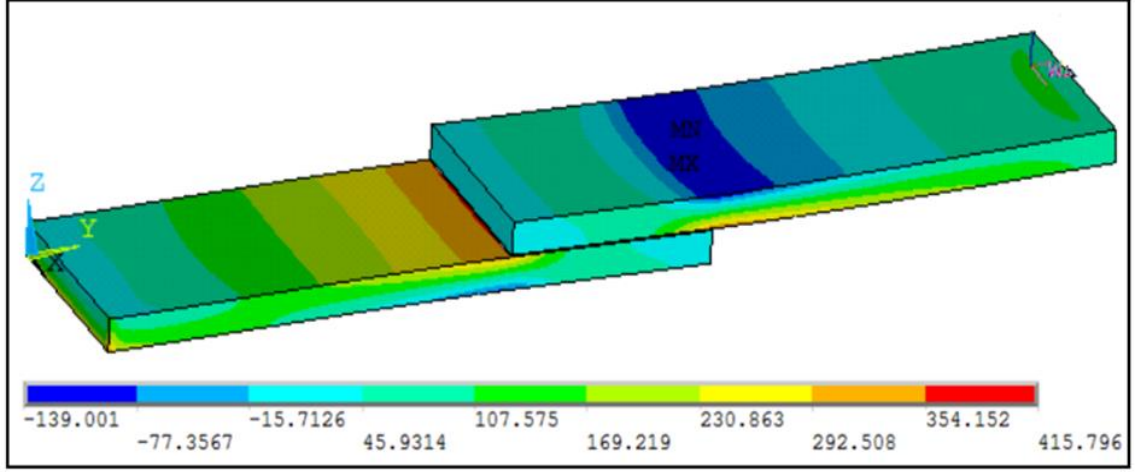
Ayrıca Şekil 4.6a'da verilen soyulma gerilme dağılımları detaylı incelendiğinde, TTB tiplerinde bindirme bölgesinin her iki ucunda gerilmeler maksimum ve çeki karakterli olurken, bindirme bölgesinin her iki ucundan merkeze doğru yaklaşık 2,5 mm gidildiğinde gerilmeler bası karakterli olmaktadır. Bağlantıya 5 mm uzunluğunda girinti yapılması (GTTB-1) 2,5 mm de maksimum bası karakterli olan gerilmeler girinti uzunluğunun bitimine kadar (5 mm) çeki karakterli gerilmelere dönüşmektedir. Girintinin bitiminden sonra gerilmeler tekrar bası karakterli gerilmelere dönüşmektedir. Bu durum GTTB-2, GTTB-3 ve GTTB-4 tipleri içinde geçerlidir. GTTB-5 tipinde gerilme dağılımları ise SLJ tipinde oluşan gerilme dağılımları ile benzerdir. TTB tiplerine göre GTTB tiplerinde oluşan gerilmelerdeki bu azalma, eksantrik yüklemekten dolayı bağlantıda oluşan momentin (yapıştırılan malzemelerdeki kuvvet hatları ile yapıştırıcı hattı birbiriyle çakışmamasından kaynaklı moment) etkisinin azalmasından kaynaklanmaktadır.

TTB tiplerinde bindirme bölgesinin her iki ucunda yapıştırılan malzemeye çentik açılması bağlantıda oluşan kayma ve soyulma (σ_z ve τ_{yz}) gerilme değerlerini azaltmaktadır (Şekil 4.7). Ancak açılan çentiğin bindirme bölgesinin her iki ucundan mesafesi gerilmeler açısından oldukça önemli olup, bindirme bölgesinin hemen bitiminde (çentik mesafesi 0 mm olan ÇTTB-1 tipi) açılan çentiğin gerilmelerdeki azalma açısından en iyi olduğu Şekil 4.7'a ve b'den açıkça görülmektedir.



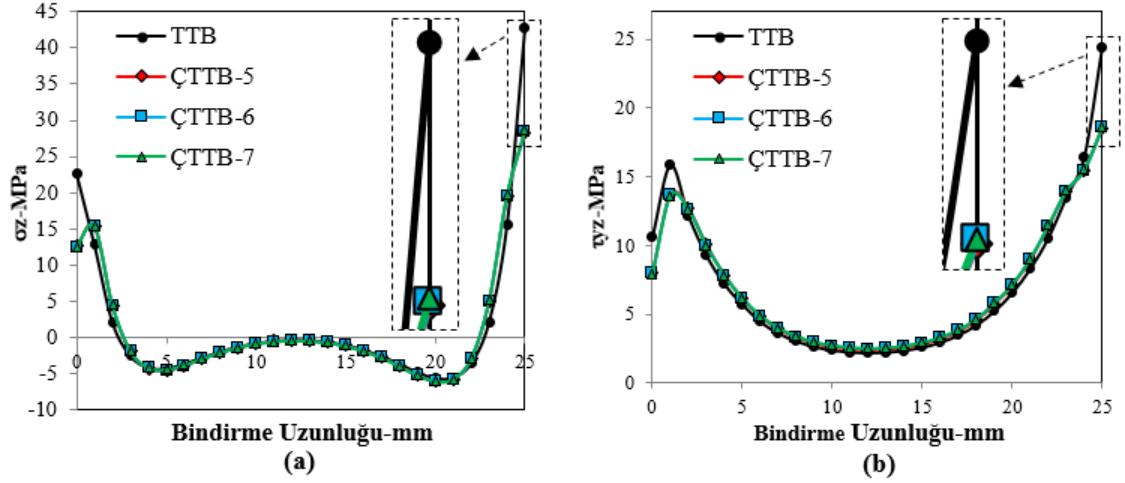
Şekil 4.7. TTB, ÇTTB-1, ÇTTB-2, ÇTTB-3 ve ÇTTB-4 tiplerinde oluşan gerilme dağılımları; (a) Soyulma gerilmesi (σ_z), (b) Kayma gerilmesi (τ_{yz}).

Bu durumu açıklayabilmek için Şekil 4.8'de verilen TTB tipinin yapıştırılan malzemede oluşan gerilmeleri incelememiz gerekmektedir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTB tipi çeki yüküne maruz kaldığında, bağlantıda bir eğilme momenti (eksantrik yüklemekten dolayı) oluşturmaktadır. Oluşan bu moment bindirme bölgesinin her iki ucunda hem yapıştırıcıda hem de yapıştırılan malzemede gerilme yığılmalarına neden olmaktadır. Bindirme bölgesinin hemen bitiminde yapıştırılan malzeme üzerinde çentik açılması bu gerilme yığılmalarının etkisini azaltmakta ve bağlantıda momentten dolayı oluşan dönmeyi rahatlatmaktadır. Bu bağlantının yapıştırıcı bölgesinde oluşan gerilmeleri azaltmakta olup bağlantının hasar yükünü artırmaktadır.



Şekil 4.8. TTB tipinde yapıştırılan malzemede oluşan y yönünde normal gerilme (σ_y) dağılımları.

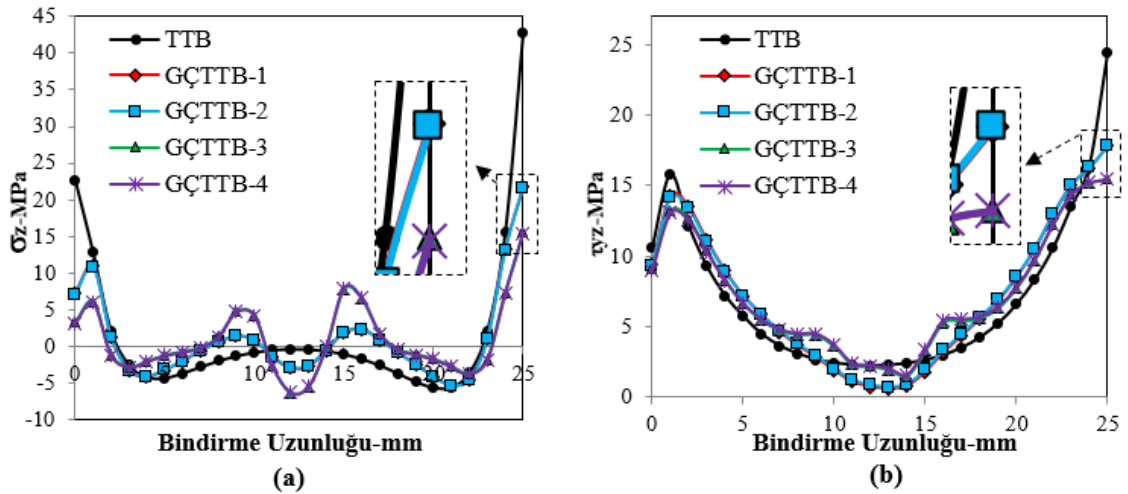
Diğer taraftan bindirme bölgesinin her iki ucundan yapıştırılan malzemeye açılan çentiğin genişliği bağlantıda oluşan gerilme dağılımları açısından önemli bir etkiye sahip değildir (Şekil 4.9). Zaten bu bağlantı tipleri için deneysel olarak elde edilen hasar yüklerinde de önemli bir değişiklik olmadığı Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.9. TTB, ÇTTB-5, ÇTTB-6 ve ÇTTB-7 tiplerinde oluşan gerilme dağılımları; (a) Soyulma gerilmesi (σ_z), (b) Kayma gerilmesi (τ_{yz}).

TTB tipinin bindirme bölgesinin dış kısmına girinti uç kısmına ise çentik yapılması, bağlantının bindirme bölgesinin her iki ucunda oluşan soyulma ve kayma gerilme (σ_z ve τ_{yz}) değerlerini önemli derecede azalttığı Şekil 4.10’da verilen gerilme dağılımlarından görülmektedir. TTB bağlantı tipinin B ucunda oluşan soyulma gerilme değeri yaklaşık 42 MPa iken, GÇTTB-1 ve GÇTTB-2’de yaklaşık 22 MPa, GÇTTB-3 ve

GÇTTB-4 tipinde yaklaşık 16 MPa'dır (Şekil 4.10a). Kayma gerilme dağılımları açısından incelendiğinde ise, SLJ bağlantı tipinin B ucunda oluşan gerilme değeri yaklaşık 24,4 MPa iken, GÇTTB-1 ve tiplerinde GÇTTB-2 yaklaşık 17,8 MPa, GÇTTB-3 ve GÇTTB-4 tiplerinde yaklaşık 15,6 MPa'dır (Şekil 4.10b). Şekil 4.10'da verilen gerilme dağılımlarından elde edilen önemli bir nokta, TTB tiplerinin bindirme bölgesinin orta kısmında (merkezde 20 mm'lik bölge) gerilmeler bası karakterli iken, GÇTTB tiplerinde girintinin bittiği kısımlarda gerilmeler çeki karakterlidir. GÇTTB tiplerinde girinti kalınlığının azalması bu bölgede oluşan çeki karakterli gerilmeleri artırmaktadır. Sonuç olarak TTB ve GÇTTB tiplerinden elde edilen gerilme dağılımlarına göre, bindirme bölgesinin uçlarında oluşan soyulma gerilmeleri GÇTTB tiplerinde uçlardan merkeze doğru transfer edilmiştir (Şekil 4.10a). Bu durum bağlantının mukavemetini önemli derecede artırmaktadır.



Şekil 4.10. TTB, GÇTTB-1, GÇTTB-2, GÇTTB-3 ve GÇTTB-4 tiplerinde oluşan gerilme dağılımları; (a) Soyulma gerilmesi (σ_z), (b) Kayma gerilmesi (τ_{yz}).

Ayrıca, Şekil 4.10 b'de verilen kayma gerilmesi (τ_{yz}) dağılımları incelendiğinde, bindirme bölgesindeki girinti ve çentik, B noktasındaki maksimum kayma gerilmesi değerini azaltmıştır. GÇTTB tiplerinde girintinin bittiği kısımlarda kayma gerilme dağılımlarında düzensizlikler oluşmaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, çekme yüküne maruz kalan dört farklı bağlantı tipinin (TTB, GTTB, ÇTTB ve GÇTTB) mekanik davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Buna göre, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTB tiplerinde bindirme bölgesinde yapıştırılan malzemelerin dış taraflarına girinti yapılması bağlantının mukavemetini yaklaşık %3 ile %29 arasında artırmaktadır. Girintili tek tesirli bağlantıların mukavemetlerindeki bu artışta, girinti uzunluğu ve kalınlığı önemli bir etkiye sahiptir. Bağlantı mukavemeti açısından en iyi sonucun, girinti uzunluğunun 10 mm girinti kalınlığının ise 1 mm olan bağlantılarda (GTTB-6) elde edilmiştir. Bağlantı mukavemetindeki bu artışın nedeni, bindirme bölgesinin üst kısımlarına girinti yapılarak eksantrik yüklemeye dolaylı olarak oluşan eğilme momentinin etkisinin azaltılmasından kaynaklanmaktadır.
- Ayrıca yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTB tiplerinde bindirme bölgesinin her iki ucunda yapıştırılan malzemelere 3 mm genişliğinde ve 1 mm derinliğinde çentik açılması bağlantının mukavemetini yaklaşık %27 arasında artırmaktadır. Açılan çentiğin bindirme bölgesinin uçlarında uzaklaştıkça bağlantı mukavemeti üzerindeki etkisi azalmaktadır. TTB geometrisi çeki yüküne maruz kaldığında bağlantıda oluşan eğilme momenti bindirme bölgesinin uçlarında gerilme yığılmalarına neden olmakta ve bindirme bölgesinin uçlarına çentik açılması bu gerilme yığılmalarının etkisini azaltmaktadır. Bu durum bağlantının mukavemetini artırmaktadır.
- Bağlantıda girinti ve çentiğin birlikte olduğu durumda (GÇTTB), bağlantının mukavemeti yaklaşık %33 ile %41 arasında artmaktadır. Bir yapıştırma bağlantısının mukavemetini yaklaşık %41 artırılması dikkat çekici bir sonuçtur.
- Deneysel çalışmalarda aksenal yer değiştirmeler ve yatay yer değiştirmeler hızlı kameralar ile elde edilmesi deneysel ve nümerik analizin uyumluluğu açısından oldukça önemlidir. Çünkü çekme cihazının çeneleri ile malzeme arasındaki

sürtünme ve cihazın bağlantı elemanları arasındaki boşlukların yükleme esnasında aksenal yer değiştirme verilerini etkilemektedir.

- TTB tipinin bindirme bölgesinin dış kısmına girinti uç kısmına ise çentik yapılması (GÇTTB) bağlantının bindirme bölgesinin her iki ucunda yapıştırıcıda oluşan soyulma ve kayma gerilme (σ_z ve τ_{yz}) değerlerini önemli derecede azaltmaktadır. Bu azalma bağlantı mukavemetindeki artış ile sonuçlanacağı göz önüne alındığında, deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar birbiriyle oldukça uyumludur. Ayrıca TTB ve GÇTTB tiplerinden elde edilen gerilme dağılımlarına göre, bindirme bölgesinin uçlarında oluşan soyulma gerilmeleri GÇTTB tiplerinde uçlardan merkeze doğru transfer edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Adams, R. D. and William, C. W. 1984. Structural Adhesive Joints in Engineering. Springer, 14-114, New York, USA.
- Akkurt, M. 2005. Makina Elemanları cilt: I-II. Birsen Yayınevi Ltd. Şti., 720, İstanbul.
- Akpınar, S. 2013. Effects of laminate carbon/epoxy composite patches on the strength of double-strap adhesive joints: experimental and numerical analysis. Materials and Design (51), 501–512.
- Akpınar, S. 2008. Kaymaya maruz yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 70, Erzurum.
- Akpınar, S. 2012. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş T-Bağlantılarda üç boyutlu gerilme analizi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 152, Erzurum.
- Anonim. 2014. Web Sitesi: <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/sonlu-elemanlar-metodu-nedir-nerelerde-kullanilir/11661#ad-image-0>, Erişim Tarihi: 05.01.2022.
- Anonim. 2021a. Web Sitesi: https://www.3m.com.tr/3M/tr_TR/bonding-and-assembly-tr/structural-adhesives/anaerobic-adhesives/, Erişim Tarihi: 05.01.2022.
- Anonim. 2021b. Web Sitesi: <https://cadsay.com/ansys-nedir>, Erişim Tarihi: 05.01.2022.
- Anonim. 2021c. Web Sitesi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Çekme_testi, Erişim Tarihi: 05.01.2022.
- Anonim. 2021d. Web Sitesi: https://tr.wikipedia.org/wiki/Japon_yapıştırıcısı, Erişim Tarihi: 20.01.2022.
- Anonim. 2021e. Web Sitesi: <https://www.muayene.net/kirilma-toklugu-testi-1220>, Erişim Tarihi: 20.01.2022.
- Anonim. 2021f. Web Sitesi: https://www.alsalab.com/alsalab-dc.php?test=ok&teknik_id=5, Erişim Tarihi: 20.01.2022.
- Anonim. 2021g. Web Sitesi: <https://harmanlikimya.com/urun-kategori/loxeal/siyanoakrilat-yapistiricilar/>, Erişim Tarihi: 25.01.2022.
- Anonim. 2021h. Web Sitesi: <https://www.laboratuar.com/testler/mekanik-testleri/soyulma-mukavemeti-testi>, Erişim Tarihi: 25.01.2022.
- Anonim. 2021i. Web Sitesi: <https://www.teknoyapi.com.tr/tr/urunler/yapistirma-ve-derz-dolgu-malzemeleri/teknopu-sivi-civi>, Erişim Tarihi: 25.01.2022.

- Anonim. 2021j. Web Sitesi: https://www.3m.com.tr/3M/tr_TR/bonding-and-assembly-tr/training-education/science-of-adhesion/common-stress-types-adhesive-joints/, Erişim Tarihi: 25.01.2022.
- Bahrami, B., Ayatollahi M. R., Beigrezaee M. J. and da Silva L. F. M. 2019. Strength improvement in single lap adhesive joints by notching the adherends. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 95(June), 102401.
- Bahrami, B., Ayatollahi M. R. and Beigrezaee M. J. 2020. هدنبسچ ندز خپ اب هدنبسچ یجراخ (Strength Improvement by Mean of Adherend Notching and Adherend Taper in the Adhesive Single Lap Joints). *فناوری کامپوزیت (Composite Science and Technology)*, 2(7), 941-948.
- Beigrezaee, M. J., Ayatollahi M. R., Bahrami B. and da Silva L. F. M. 2019. Failure load analysis in single lap joints - effect of adherend notching. *Engineering Failure Analysis*, 104(January), 75–83.
- Beigrezaee, M. J., Ayatollahi M. R., Bahrami B. and da Silva L. F. M. 2021. A new geometry for improving the strength of single lap joints using adherend notching technique. *The Journal of Adhesion*, 97(11), 1004–1023.
- Brockmann, W., Geiß P. L., Klingen J. and Schröder B. 2009. *Adhesive bonding materials, Applications and Technology*. Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 403, Weinheim.
- Çalik, A. and Yildirim S. 2017. Effect of adherend recessing on bi-adhesively bonded single-lap joints with spew fillet. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 42(3), 317–325.
- Çalık, A. and Akpınar S. 2019. Effect of extensometer usage on obtaining the force-displacement curve of the adhesively single lap joint. *European Mechanical Science*, 3(4), 142–146.
- Çam, S. and Özel A. 2020. The effect of opposing notch geometry on the tensile strength of adhesively bonded single-lap joints. *Engineering Computations*, 37(8), 2895–2911.
- da Silva, Lucas F. M., Öchsner, A. and Adams, R. D. 2018. *Handbook of Adhesion Technology Second Edition*. Springer International Publishing, 1790, UK.
- Dillard, D. A., Pocius A. V. and Chaudhury M. 2002. *Adhesion Science And Engineering*. Elsevier, 1209, Netherlands.
- Dinç, H. 2007. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının tasarım ve analizi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana bilim Dalı, 57, Afyonkarahisar.
- Durmuş, M. 2019. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş kademeli bağlantılarda kademe uzunluğu ile bağlantının hasar yükü arasındaki ilişkinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi,

Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 78, Erzurum.

Dursun, K. 2021. Web Sitesi: <https://www.sanalsantiye.com/sonlu-elemanlar-yontemini-kullanmadan-once-bilmeniz-gerekenler/>, Erişim Tarihi: 30.01.2022.

Gülmez, T. 2021. Web Sitesi: <https://web.itu.edu.tr/gulmezt/MekanikD/KIRILMA.pdf>, Erişim Tarihi: 30.01.2022.

Gültekin, K. 2014. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda malzeme genişliğinin ve kalınlığının bağlantının yük taşıma kapasitesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 112, Erzurum.

Habenicht, G. 2009. Applied adhesive bonding a practical guide for flawless results. Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, 167, Weinheim.

Kanani, A. Y., Hou, X. and Ye, J. 2020. The influence of notching and mixed-adhesives at the bonding area on the strength and stress distribution of dissimilar single-lap joints. *Composite Structures*, 241(January), 112136.

Kanar, B., Akpınar S., Akpınar I. A., Akbulut H. and Ozel, A. 2018. The fracture behaviour of nanostructure added adhesives under ambient temperature and thermal cyclic conditions. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 97(May), 120–130.

Kazaz, I., Akpınar S. and Ozel, A. 2020. The effects of thermal cycle and nanostructure reinforcement on the shear load in adhesively bonded joints. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 27(19), 1627–1638.

Koç, E. 2015. Makina Elemanları Cilt - 1. Akademisyen Kitabevi, 417, Adana.

Lumley, R. 2010. Fundamentals of Aluminium Metallurgy Production Processing and Applications. Elsevier, 828, UK.

Moya-Sanz, E. M., Ivañez, I. and Garcia-Castillo, S. K. 2017. Effect of the geometry in the strength of single-lap adhesive joints of composite laminates under uniaxial tensile load. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 72(October 2016), 23–29.

Ouinaz, D., Bachir Bouiadjra B., Achour, T. and Benderdouche, N. 2010. Influence of disbond on notch crack behaviour in single bonded lap joints. *Materials and Design*, 31(9), 4356–4362.

Ouinaz, D. 2012. Strength of aluminum single-lap bonded joints in various disbond size at circular and semi-circular notches. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 14(6), 753–768.

Packham, D. E. 2005. Handbook of Adhesion Second Edition. Vol. 1. John Wiley & Sons, Ltd., 639, UK.

- Pinto, A. M. G., Ribeiro, N. F. Q. R., Campilho, R. D. S. G. and Mendes, I. R. 2014. Effect of adherend recessing on the tensile strength of single lap joints. *Journal of Adhesion*, 90(8), 649–966.
- Pizzi, A. and Kashmiri, L. M. 2017. *Handbook of Adhesive Technology Third Edition*. CRC Press, 635, New York, USA.
- Pocius, A. V. 2021. *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 377, Munich.
- Şahin, A. 2011. Kompozit metal köpük malzemelerin tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının kesme mukavemetinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 114, Edirne.
- Sancaktar, E. and Nirantar, P. 2003. Increasing strength of single lap joints of metal adherends by taper minimization. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 17(5), 655–675.
- Sancaktar, E. and Simmons, S. R. 2000. Optimization of adhesively-bonded single lap joints by adherend notching. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14(11), 1363–1404.
- Saraç, İ. 2021. Failure analysis of simple overlap bonding joints and numerical investigation of the adhered tip geometry effect on the joint strength. *Materials Testing*, 63(11), 1007–1011.
- Şekercioğlu, T. ve Özenç, M. 2012. Metallerin yapıştırılmasında yüzey hazırlama yöntemlerinin incelenmesi. *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(627), 43–50.
- Sina, E. 2014. *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding*. Elsevier, 341, US.
- Solmaz, M. Y. 2008. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik analiz ve tasarımları. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 153, Elazığ.
- Tek, G. 2011. Tek ve çift-tesirli yapıştırma bağlantılarında gerilme analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 104, Ankara.
- Voyutskii, S. S. and Voiutskii, S. S. 1963. *Autohesion and Adhesion of High Polymers*. Interscience Publishers, 256, Wiley, New York, USA.
- Yan, Y. and Yu, H. 2006. Influence of length and position of recessing on bonding strength of single-lap joints. *Adhesion in China* 3, 27(3), 15-26.
- Yan, Z. M., You, M., Yi, X. S., Zheng, X. L. and Li, Z. 2007. A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminum

single lap joint. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(8), 687–695.

Yılmaz, B. 2020. Epoksi bazlı yapıştırıcılarla birleştirilen metallerin mekanik özelliklerine etki eden faktörlerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana bilim Dalı, 100, Denizli.

