



**TAM DEĐIŐKEN YORULMA YÜKÜNE MARUZ
YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ
BAĞLANTILARDA YAPIŞTIRILAN MALZEME
KALINLIĞI ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Resül ŞAHİN

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

2021

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TAM DEĞİŞKEN YORULMA YÜKÜNE MARUZ YAPIŞTIRICIYLA
BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA YAPIŞTIRILAN MALZEME
KALINLIĞI ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Resül ŞAHİN

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Salih AKPINAR

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2021

Her hakkı saklıdır

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

**TAM DEĞİŞKEN YORULMA YÜKÜNE MARUZ YAPIŞTIRICIYLA
BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA YAPIŞTIRILAN MALZEME
KALINLIĞI ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Salih AKPINAR danışmanlığında, Resül ŞAHİN tarafından hazırlanan bu çalışma 11 / 01 / 2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Ali Fatih Yetim	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Salih AKPINAR	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Ahmet ÇALIK	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. Arzu GÖRMEZ

Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Erzurum Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından 2019/16 no'lu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

15 / 12 / 2020

Resül ŞAHİN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TAM DEĞİŞKEN YORULMA YÜKÜNE MARUZ YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARDA YAPIŞTIRILAN MALZEME KALINLIĞI ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Resül ŞAHİN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Salih AKPINAR

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar birçok mühendislik uygulamalarında kullanılmakta olup, günümüzde en önemli kullanım alanları havacılık, uzay ve otomotiv sektörleridir. Havacılıkta kullanılan yapıştırma bağlantıları genellikle dinamik yüklemeye maruz kalmaktadır. Bu tarz yüklemelere maruz kalan yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bağlantılarda yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme kalınlığı bağlantının hasar yükü açısından önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu tez çalışmasında, 2, 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlığına sahip yapıştırılan malzeme kullanılarak oluşturulan tek tesirli yapıştırma bağlantıların, önce statik dayanımları ve daha sonra genel değişken çeki ve tam değişken eğme yorulma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Yapıştırılan malzeme olarak havacılık sektöründe kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve yapıştırıcı olarak ise DP460 yapısal ve Araldite 2015 yapıştırıcıları kullanılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, yapıştırılan malzeme kalınlığı artması ile bağlantıların statik çeki ve eğme dayanımlarının arttığı görülmüştür. Ayrıca yapıştırılan malzeme kalınlığının artması bağlantıların yorulma performanslarına da önemli derecede katkı sağlandığı deneysel olarak elde edilmiştir.

2021, 62 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, Yapıştırılan malzeme kalınlığı, Tek tesirli yapıştırma bağlantısı, Yorulma

ABSTRACT

MS. Thesis

EFFECTS OF ADHEREND MATERIAL THICKNESS ON THE ADHESIVELY BONDED JOINTS SUBJECT TO FULL VARIABLE FATIGUE LOAD

Resül ŞAHİN

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Salih AKPINAR

Adhesive bonded joints are used in many engineering applications that is recently the most important areas of use are aerospace and automotive industries. Adhesive joints used in aerospace are generally subject to dynamic loading. It is known that the thickness of the adhesive and adherend material bonded has a significant effect on the damage load of the bond in single lap joints combined with adhesive subjected to dynamic loads. In this thesis, first the static strength and then the fully variable tensile and four-point bending fatigue properties of the single lap bonding joints, which were created using the adherend material with thickness of 2, 3, 4, 5 and 6 mm, were experimentally investigated. AA2024-T3 aluminum alloy used in the aerospace industry as the adherend material and DP460 structural and Araldite 2015 adhesives were used as the adhesive. According to the results of the study, it was observed that as the thickness of the adherend material increased, the static tensile and bending strength of the single lap joints increased. In addition, it has been experimentally obtained that the increase in adherend material thickness contributes significantly to the fatigue strength of single lap joints.

2021, 62 page

Keywords: Adhesively bonded Joints, Adherend Thickness, Single Lap Joints, Fatigue

TEŞEKKÜR

“*Tam Değişken Yorulma Yüküne Maruz Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Yapıştırılan Malzeme Kalınlığı Etkisinin İncelenmesi*” başlıklı bu çalışma, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

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

Eğitim hayatımın her aşamasında, her türlü maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen değerli aileme, özellikle ablam Nurcan ŞAHİN BAKKAL ve abimlerim İbrahim ŞAHİN ve Oğuz ŞAHİN'e sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam sırasında tecrübelerinden ve desteklerinden yararlandığım arkadaşlarım Kübra DEMİR ve Simay BAYRAMOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatımdan bana her türlü destek olan en yakın arkadaşım ve dostum Onur Ahmet AYDIN'a çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) çok teşekkür ederim.

Resül ŞAHİN

Ocak 2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Yapışma Mekanizmaları (Teorileri).....	2
1.1.1. Mekanik kilitleme teorisi	2
1.1.2. Elektrostatik teori.....	3
1.1.3. Difüzyon teorisi	3
1.1.4. Islanma teorisi.....	4
1.1.5. Kimyasal yapışma teorisi.....	4
1.1.6. Zayıf sınır tabaka teorisi	4
1.2. Yapıştırma Bağlantıları	5
1.3. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Yükleme Çeşitleri.....	7
1.4. Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Çeşitleri	9
1.5. Yorulma	10
1.5.1. Yorulma ömrü.....	12
1.6. Yapıştırma Bağlantılarında Yorulma	13
1.7. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	14
1.7.1. Deneysel yöntemler	14
1.7.1.1. Çekme testi.....	14
1.7.1.2. Soyulma testi	15
1.7.1.3. Ayrılma testi.....	15
1.7.1.4. Kayma testi.....	16
1.7.1.5. Kırılma tokluğu testi	17
2. LİTERATÜR ÖZETİ	19
3. MATERYAL ve YÖNTEM	26
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	26

3.2. Yapıştırma Bağlantısı Numuneleri.....	28
3.3. Yapıştırma Bağlantı Numunelerin Hazırlanması.....	30
3.3.1. Numunelerin kesimi.....	30
3.3.2. Numunelerin yüzey hazırlama işlemi.....	30
3.3.3. Yapıştırma bağlantılarının hazırlanması.....	31
3.4. Yapıştırma Bağlantılarının Deneysel Hasar Yüklerinin Belirlenmesi.....	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	39
4.1. Yapıştırma Bağlantılarının Statik Dayanımlarının Sonuçları.....	39
4.2. Genel Değişken Çeki Yorulma Yüküne Maruz Yapıştırma Bağlantıların Mekanik Özellikleri.....	45
4.3. Tam Değişken Eğme Yorulma Yüküne Maruz Yapıştırma Bağlantıların Mekanik Özellikleri.....	51
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ.....	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 **Açıklama**

AA2024	Havacılık Alüminyum Alaşımı (2000 serisi)
ASTM	The American Society for Testing and Materials(Amerikan test ve malzeme kurumu)
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası standartlar Örgütü)
KEY	Kohezif enerji yoğunluğu
SiC	Silisyum karbür
SLJ	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. Yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantı türleri a) tek tesirli bindirme, b) çift tesirli bindirme, c) boyun bindirme, d) açılı bindirme, e) kademeli (teraslama), f) tek takviyeli bindirme, g) çift takviyeli bindirme, h) alın bağlantı, i) silindirik bindirme, j) soyulma	7
Şekil 1.2. Yapıştırma ile birleştirilmiş bağlantılarda oluşan gerilme çeşitleri a) normal gerilme, b) kayma gerilmesi, c) ayrılma(açılma) gerilmesi, d) soyulma gerilmesi	8
Şekil 1.3. Yapıştırma bağlantısı ile perçinli bağlantının yorulma dayanım karşılaştırması	9
Şekil 1.4. Hasar türleri şematik olarak gösterimi, a) adezyon hasarı, b) yapıştırıcı malzemenin kohezif hasarı, c) karışık mod hasarı, d) yapıştırılan malzeme hasarı.....	10
Şekil 1.5. Yorulma da kullanılan gerilmeler	10
Şekil 1.6. Gerilme genliği ile ortalama gerilme arasındaki ilişki	11
Şekil 1.7. Yorulma dayanımını etkileyen faktörler ve arasındaki ilişkiler	12
Şekil 1.8. Punta kaynağı ve farklı tip yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların yorulma özellikleri	13
Şekil 1.9. ASTM standartlarında bir çekme numunesi ve ölçüleri (ASTM D897, ASTM D2095)	15
Şekil 1.10. Kenar ayrılma testinin şematik gösterimi	16
Şekil 1.11. Kayma testi için kullanılan bir numunenin şematik gösterimi	17
Şekil 1.12. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesinde gerçekleşen hasar modları.....	18
Şekil 3.1. Tez kapsamında yapılan deneylerin çalışma şeması	26
Şekil 3.2. AA2024-T3 Alüminyum alaşım malzemesinin mekanik özellikleri (Durmuş ve Akpınar (2020))	27
Şekil 3.3. Yapıştırıcı Malzemelerinin Mekanik Özellikleri a) DP460, b) Araldite 2015 (Durmuş ve Akpınar (2020), Akpınar, Gültekin vd. (2016)).....	27
Şekil 3.4. Çekme deneylerine ait tek tesirli yapıştırma bağlantısının geometrik boyutları	28
Şekil 3.5. Eğilme deneylerine ait tek tesirli yapıştırma bağlantısının geometrik boyutları	28
Şekil 3.6. Numune hazırlama işleminin şematik gösterimi	29

Şekil 3.7. Farklı kalınlıklarda malzemelerin kesilmiş ve hazırlanmış hali	30
Şekil 3.8. Numunelerin aseton içerisinde bekletilmesi	31
Şekil 3.9. Etüvde çıkarılmış numunelerin yapıştırılmaya hazır hali	31
Şekil 3.10. Yapıştırma bağlantılarının üretiminde kullanılan kalıp	32
Şekil 3.11. Yapıştırma bağlantısının üretim şeması.....	33
Şekil 3.12. a) Sıcak pres, b) Sıcak presten çıkarılmış numuneler	34
Şekil 3.13. a) Kürleşme sonrası oluşan dolgular, b) Dolgularından temizlenmiş bağlantı numuneleri.....	35
Şekil 3.14. Deney numuneleri üzerine yapıştırılmış lap'ler.....	35
Şekil 3.15. Üretimi tamamlanmış tek tesirli bindirme bağlantıları.....	36
Şekil 3.16. Üniversal test cihazı ve sınır şartları.....	37
Şekil 3.17. Eğme aparatı	37
Şekil 3.18. Yorulma cihazı; a) çeki yükü uygulaması, b) eğme yükü uygulaması.....	38
Şekil 4.1. Farklı yapıştırılan malzeme kalınlığına sahip çekme numunelerinin statik dayanımları	40
Şekil 4.2. Yapıştırma bağlantılarının hasar mekanizması.....	41
Şekil 4.3. Çeki statik yüküne maruz kalan yapıştırma bağlantıların hasar yüzeyleri	42
Şekil 4.4. Farklı yapıştırılan malzeme kalınlığına sahip eğme numunelerinin statik dayanımları	43
Şekil 4.5. Eğme statik yüküne maruz kalan yapıştırma bağlantıların hasar yüzeyleri ...	44
Şekil 4.6. Farklı yapıştırılan malzeme kalınlığına sahip bağlantıların çeki S-N grafiklerinin karşılaştırması.....	48
Şekil 4.7. Çeki yorulma yüküne maruz yapıştırma bağlantıların hasar yüzeyleri.	50
Şekil 4.8. Farklı yapıştırılan malzeme kalınlığına sahip bağlantıların eğme S-N grafiklerinin karşılaştırması.....	53
Şekil 4.9. Eğme yorulma yüküne maruz yapıştırma bağlantıların hasar yüzeyleri.	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Yapıştırma bağlantılarını için deneysel parametreler	29
Çizelge 4.1. Genel değişken çeki yorulma yüküne maruz bağlantıların kuvvet ve çevrim sayısı arasındaki ilişkisi	47
Çizelge 4.2. Tam değişken eğme yorulma yüklemelerine maruz bağlantıların kuvvet ve çevrim sayısı arasındaki ilişki	52



1. GİRİŞ

Yapıştırıcı, iki malzemenin yüzeylerine uygulandığında bunları birleştirecek ve ayrılmaya direnebilecek bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Yapıştırıcı (adhesive) genel bir terim olmakla birlikte, yapıştırıcı denildiğinde çimento, yapışkan, macun gibi ifadeler gelmektedir. Birçok yapıştırıcı çeşidi bulunmakta olup bunları farklı özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Yapıştırıcı çeşitleri;

- Fiziksel şekline göre; sıvı yapıştırıcı ve film yapıştırıcı
- Kimyasal şekline göre; epoksi yapıştırıcı
- Yapıştırılan malzeme türüne göre; metal-metal yapıştırıcı, kâğıt yapıştırıcı
- Kullanım koşuluna göre; soğuk yapıştırıcı, çözücü esaslı yapıştırıcı

olarak sınıflandırılabilmektedirler. Son yıllarda yapıştırıcı malzemelerin birçok üstün özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılmaya başlanılmıştır. Kullanım alanların artmasından dolayı yapıştırıcı malzemeler üzerinde son yıllarda çok fazla araştırmalar yapılmıştır. Yapıştırıcılar genellikle iki malzemenin geleneksel birleştirme yöntemi ile birleştirilmemesi durumunda veya iki farklı yapıştırılan malzemeyi (adherend) birleştirmek için kullanılmaktadır. Yapısal yapıştırma bağlantıları, havacılık, otomotiv ve deniz gibi çeşitli alanlarda perçin cıvata gibi klasik mekanik bağlantı türlerine göre üstün özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. (Ebnesajjad 2014)

Günümüzde yapıştırma bağlantıların çok kullanılmasından kaynaklı olarak bu tarz birleşim türleri için birçok araştırma yapılmaktadır.

1.1. Yapışma Mekanizmaları (Teorileri)

Yapıştırma bağlantılarında yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasında bir ara yüzey teması ile bağlantının tamamlandığı göz önünde tutulmaktadır. Aslında yapıştırma bağlantılarında gerilme analizi ve sürekli kırılma mekaniklerinin yönleri tartışılmaktadır. Bu kavramlara bakıldığında bağlantının dayanımı bağlantı geometrisine, yapıştırıcının ve yapıştırılan malzemenin mekanik özelliklerine, test sıcaklığı ve oranına bağlı olduğu söylenmektedir. Bu tartışmalarda, yüzey ve ara yüzey yönlerin nadiren tartışıldığı görülmekte olup, ancak yapıştırma olayını tamamen anlayabilmek için bu kavramlar detaylı olarak tartışılması gereklidir. Yapıştırma bağlantılarında genellikle hasar, yapıştırıcının kohezif kırılması veya yapıştırılan malzemede hasar oluşumuyla meydana gelmektedir. Yapıştırma bağlantılarında görülen bu hasar türlerini daha iyi anlayabilmek için yapışma mekanizmalarına bakılmalıdır. Tarihsel sıralama ile bahsedilecek olunursa mekanik kilitleme, elektrostatik, difüzyon ve yüzey etki (ıslanabilirlik, kimyasal yapışma, zayıf sınır tabaka) teorileri vardır. Bireysel olarak kullanılan tek bir teori ile yapışma mekanizmasını anlayabilmek çok zordur. Her bir yapıştırma mekanizmasının rolü farklı tür yapıştırıcı ile birleştirilmiş sistemler için değişiklik göstermektedir. (Bharti 2018)

1.1.1. Mekanik kilitleme teorisi

Bu teoriye göre, yapışmanın yapıştırılan malzeme yüzeyinden gözenekler, oyuklar ve diğer yüzey düzensizliklerine yapıştırıcının nüfuz etmesi ile meydana geldiği söylenmektedir. Yapıştırıcı, sıkışan havayı ara yüzeyde uzaklaştırır. Böylece, yapıştırıcı her iki yapıştırılan malzemenin yüzey pürüzlülüğüne nüfuz eder, bundan dolayı iki malzemenin birleştirileceği sonucuna varılır. Bu mekanik kilitlemenin yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda dayanımına olumlu bir etki sağlar. Yapıştırıcılar genellikle gözenekli aşındırılmış yüzeylere pürüzsüz yüzeylere göre daha güçlü bağlar oluşturur. Ancak bu teori evrensel olarak uygulanabilir değildir, çünkü pürüzsüz yüzeyler arasında iyi yapışma da meydana gelir. Bir yapıştırılan malzemenin yüzeyi aşındırıldıktan sonra yapışma özeliği aşağıda verilen bir veya birden fazla sebepten dolayı artar.

- Mekanik kilitleme
- Temiz bir yüzey oluşumu

1. GİRİŞ

- Daha reaktif bir yüzey oluşumu
- Temas yüzey alanı artışı

Literatür de yüzey pürüzlülüğünün artması ile birleştirmenin dayanaklılığı ve bağlantının dayanımı ile ilişkili olduğunu gösteren birçok çalışma vardır. (Bharti 2018)

1.1.2. Elektrostatik teori

Bu teorinin özelliğinde yapışma, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasındaki elektrostatik etkiler nedeniyle gerçekleştiğini ileri sürmektedir. Elektronik bant yapılarının aksine, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında teorik olarak bir elektron transferi gerçekleşir. Böylece elektriksel çift tabaka biçimindeki elektrostatik kuvvetler yapışkan-yapıştırıcı ara yüzeyinde oluşturulur ve bu kuvvetler ayrılmaya karşı dirençten sorumludurlar. Bu teori, yapıştırılan malzemedan yapıştırıcı soyulduğunda elektrik deşarjlarının gözlemlendiği gerçeği ile desteklenmiştir. Elektrostatik mekanizma, polimer-metal yapışma bağının makul bir açıklaması olup, metalik olmayan sistemlerde, elektronik mekanizmanın yapışma çalışmalarına katkısı hesaplanmış ve kimyasal bağlanma ile karşılaştırıldığında daha az olduğu bulunmuştur.(3)

1.1.3. Difüzyon teorisi

Bu teoride yapışma, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasındaki moleküllerin ara difüzyon yoluyla geliştirildiğini göstermektedir. Difüzyon yasası öncelikle hem yapıştırıcı hem de yapıştırılan malzeme hareket edebilen nispeten uzun zincirli moleküllere sahip polimerler olduğunda uygulanabilir. Malzemelerin doğası ve bağlama koşulları, difüzyonun gerçekleşip gerçekleşmediğini ve ne ölçüde gerçekleştiğini etkileyecektir. Termoplastiklerin çözücü yapıştırma veya ısı kaynağı (üretim yöntemi olan kaynak, birleştirme) moleküllerin difüzyonunun bir sonucu olarak kabul edilir.

Ara yüzeyde gerilme yoğunluğu yok, çünkü fiziksel özelliklerde süreksizlik yoktur. Kohezif enerji yoğunluğu (*KEY*), difüzyon bağıını yorumlamak için kullanılabilir. Yapıştırıcı ve yapıştırılan arasındaki çözünürlük parametreleri eşleştiğinde bağ mukavemeti maksimum olur.

1. GİRİŞ

$$KEY = \frac{E_{COH}}{V}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{E_{COH}}{V}}$$

E_{COH} , molekülleri sonsuz bir mesafeye ayırmak için gereken enerji miktarıdır, V molar hacimdir ve δ çözünürlük parametresidir.

1.1.4. Islanma teorisi

Bu teoride yapışma, iki malzeme ve gelişen yüzey kuvvetleri arasındaki moleküler temastan kaynaklanmaktadır. Bağ oluşumundaki ilk adım, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeler arasında ara yüzey kuvvetlerinin oluşmasıdır. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında sürekli temas kurma işlemine “ıslatma” denir. Bir yapıştırıcının katı bir yüzeyi ıslatması için yapıştırıcı, katının kritik yüzey geriliminden daha düşük bir yüzey gerilimi gerektirir. Van der Waals kuvvetleri, moleküller arasındaki mesafeye son derece duyarlıdır, Bu kuvvetler normalde çoğu durumda yapışkan bağ mukavemetini hesaba katmayacak kadar küçüktür.

1.1.5. Kimyasal yapışma teorisi

Bu mekanizma, yüzey kimyasal kuvvetlerine bir yapışma bağının oluşumunu sağlar. Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasında oluşan hidrojen, kovalent ve iyonik bağlar dispersiyon çekici kuvvetlerinden daha güçlüdür. Genel olarak, kimyasal bağlanma sırasında ortaya çıkan dört tür etkileşim vardır. Bunlar kovalent bağlar, hidrojen bağları, Van der Waals kuvvetleri ve asit-baz etkileşimleridir. Bir yapıştırıcı bağ için etkileşimlerin doğası gereği, ara yüzeyin kimyasal bileşimine bağlıdır.

1.1.6. Zayıf sınır tabaka teorisi

Bu teori ilk olarak Bikerman tarafından tanımlanmıştır. Ara yüzeydeki bağ hasarının, yapıştırıcıda bir kopma veya zayıf bir sınır tabakasından kaynaklandığını belirtir. Zayıf sınır tabakaları, yapıştırıcıdan, yapıştırılan malzemeden, çevreden veya bu faktörlerden herhangi birinin birleşiminden kaynaklanabilir. Yapıştırıcıda zayıf sınır

1. GİRİŞ

tabakaları oluşabilir veya bir safsızlık yapıştırma yüzeyine yakın yoğunlaşır ve alt tabakaya zayıf bir bağlantı oluşturursa yapışabilir.

Bağlantıda hasar yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gerçekleşir ve bu kısımda oluşan sınıra zayıf sınır tabaka denir. Polietilen ve metal oksitler, doğal olarak zayıf sınır katmanları içerebilen malzeme örnekleridir. Polietilen zayıf, düşük polimer boyunca eşit olarak dağıtılan moleküler ağırlık bileşenidir. Bu zayıf sınır tabakası ara yüzeyde bulunur ve polietilen yapışkan olarak kullanıldığında düşük başarısız strese katkıda bulunur. Bazı metal oksitler baz metallerine zayıf bir şekilde bağlanır.

1.2. Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeden oluşan bir bağlantı sistemidir. Yapıştırma bağlantıları kullanıldığı yere göre farklı geometrilerde ve tasarımlarda olabilmektedir. Yapıştırma bağlantılarında yorulma direnci, yapı ağırlığında azalma, sızdırmazlık ve titreşim sönümlenme özellikleri ve üretim maliyetlerinin azalması gibi avantajları vardır. Bununla birlikte, geleneksel birleştirme tekniklerinin yanında yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların daha yaygın kullanımını önleyen birkaç husus vardır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların, geleneksel bağlantı türlerine göre avantajları vardır. Bunlar;

- Farklı malzemeler birleştirebilirler (Metal-plastik, Metal- Kauçuk).
- İnce metallerin birleştirilmesi çok uygundur.
- Bağlantılarda gelişmiş gerilme dağılımı vardır.
- Tasarımda esnekliği sağlamaktadır.
- Çok kolay ve maliyet olarak etkili bir tekniktir.
- Yüksek darbe ve titreşim sönümlenme özelliği vardır.

Bu gibi birçok avantajlarından dolayı kullanımları daha geniş bir alana yayılmaktadır (Ebnesajjad 2014). Yapıştırma bağlantılarının birçok avantajlarının olması ve yaygın olarak kullanmasına rağmen yapıştırma bağlantıların dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar;

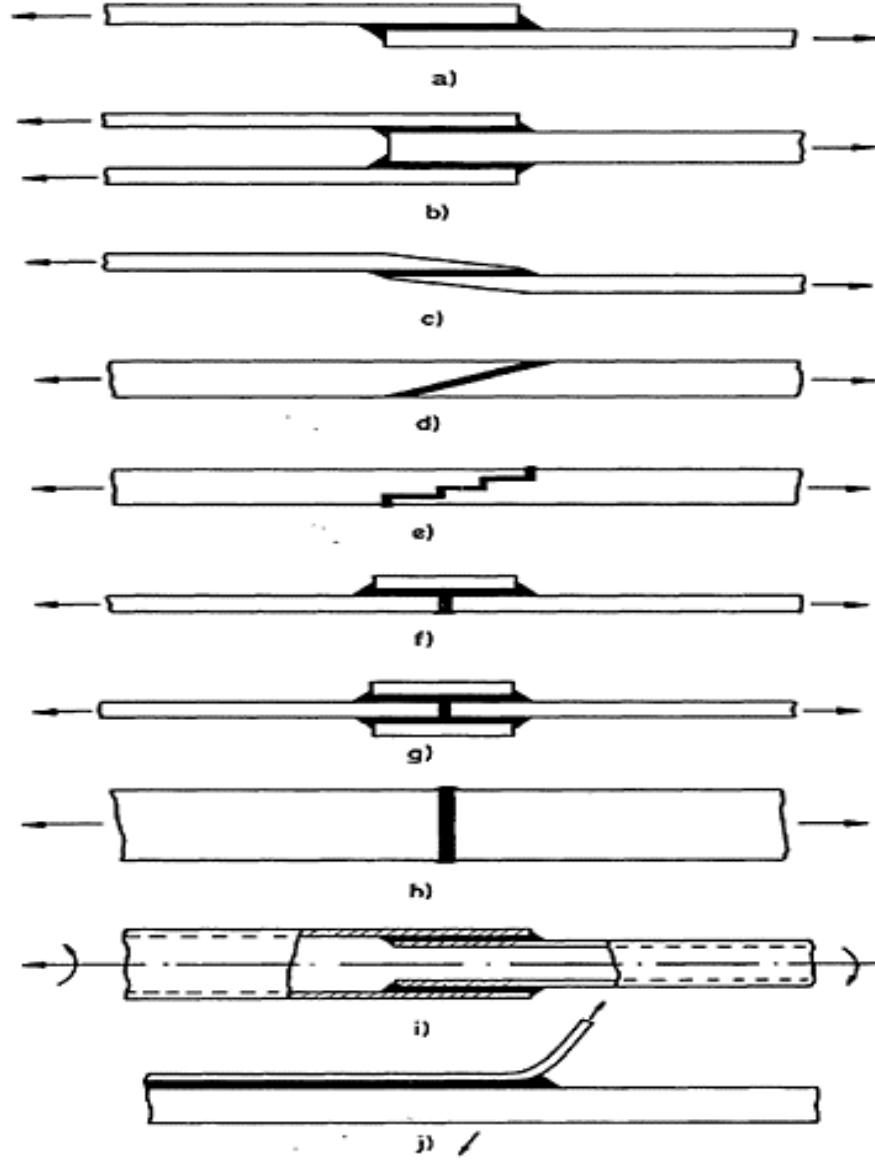
1. GİRİŞ

- Yapıştırmayı sağlayabilmek için önceden yapışma yüzeyinin dikkatli bir şekilde kimyasal ya da mekanik aşındırıcılar ile hazırlanması gereklidir.
- Kürleşme için yüksek sıcaklık gereklidir.
- Diğer birleştirme yöntemlerine göre yapışmanın sağlanabilmesi için yapıştırılan kısmın sabitlenmesi gereklidir.
- Yüksek sıcaklıklarda çalışmamaktadırlar.
- Yüksek sıcaklıklar için özel yapıştırıcılar kullanılmakta ve bunlarda daha çok maliyetlidirler.
- Çoğu yapıştırma sistemi için sabit bir işlem gereklidir (malzeme temizliği, yüzey hazırlığı gibi).
- Yüzey hazırlığı için kullanılan kimyasal çözücüler sağlık sorunu yaşatabilmektedir.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda, iyi bir yapışma sağlayabilmek için;

- Bağlantı için uygun yapıştırıcı seçimi
- İyi bir bağlantı tasarımı
- Yüzey temizliği
- Birleştirilecek yüzeylerin ıslanması
- Uygun yapıştırma işlemi (katılma ve kürleşme)

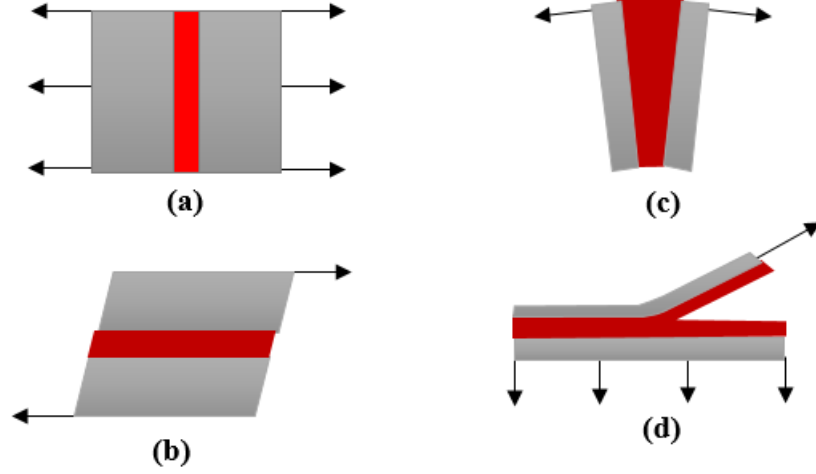
gibi gereklilikler vardır (Bharti 2018). Günümüzde yapıştırıcılar havacılık, endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Özer 2018). Yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantı türleri Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantı türleri a) tek tesirli bindirme, b) çift tesirli bindirme, c) boyun bindirme, d) açılı bindirme, e) kademeli (teraslama), f) tek takviyeli bindirme, g) çift takviyeli bindirme, h) alın bağlantı, i) silindirik bindirme, j) soyulma (Adams and Wake 1984).

1.3. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Yükleme Çeşitleri

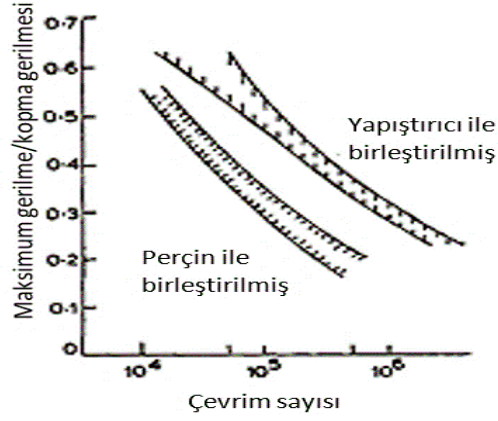
Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar çalışma koşulları altında birçok dış etki ve zorlamalara maruz kalmakta bu zorlanmalardan kaynaklı olarak yapıştırma bağlantılarının yapıştırma bölgelerinde birçok gerilme türü oluşmaktadır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar denildiğinde yaygın olarak görülen dört çeşit gerilme türü aklımıza gelmektedir. Bu gerilmeler; normal, kayma, çatlama ve soyulma gerilmeleridir (Kinloch 1987) (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda oluşan gerilme çeşitleri a) normal gerilme, b) kayma gerilmesi, c) ayrılma(açılma) gerilmesi, d) soyulma gerilmesi (Kinloch 1987).

Yapıştırma bağlantılarının tasarımlarında birkaç önemli durum vardır. Yapıştırıcı malzeme olarak kullanılan polimerlerin dayanımları ve modülleri diğer malzeme türlerine göre düşük olmasına rağmen ince saç veya levha gibi malzemeleri birleştirmek esas uygulamalarıdır. Yapıştırıcı malzemelerin kesme veya basma durumlarına göre çekme, soyulma ve yarıma altında birim şekilde değiştirme ve tokluk değerleri her zaman yüksektir.

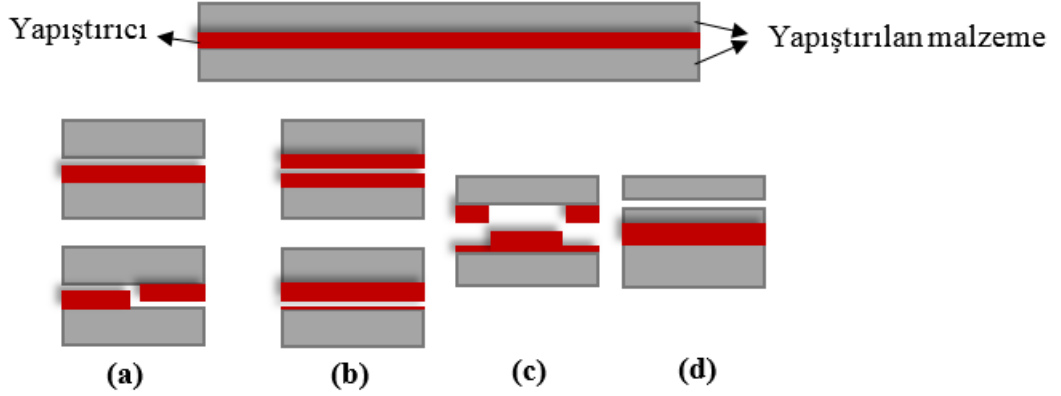
Yapıştırma bağlantılarında hasar diğer mekanik bağlantı türlerinde olduğu gibi dayanabileceği yüke ulaştığında hasar gerçekleşmektedir. Yorulma ve darbe yüklemelerine maruz yapıştırma bağlantılarda oluşan hasar doğrudan yapıştırıcının kopma (ayırma) gerilmesi ile ilişkilidir. Yorulma yüklemelerinde uygulanan gerilme oranı, mekanik bağlantılardan çok yapıştırma bağlantılarında önemlidir. Havacılık sanayisinde belirlenen yüklemelerden sonra belirli gerilme değerine ulaşacağı varsayıldığından kopmanın olacağı sıklıkla kullanılan bir arıza kriteridir (Adams 1984). Ayrıca Şekil 1.3’de verilen perçinle birleştirilmiş bağlantılar ile yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların yorulma performansları incelendiğinde, yapıştırma bağlantıların yorulma performanslarının daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 1.3. Yapıştırma bağlantısı ile perçinli bağlantının yorulma dayanım karşılaştırması.

1.4. Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Çeşitleri

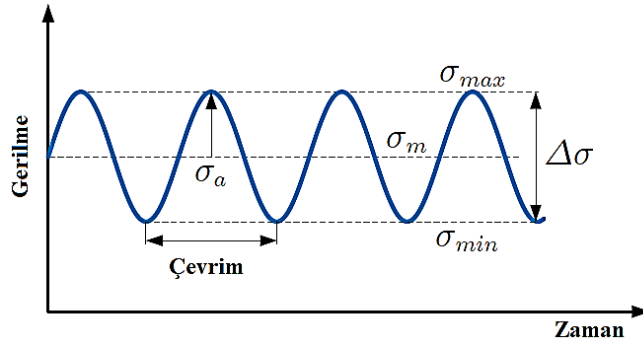
Yapıştırıcının veya yapıştırma bağlantılarının mekanik performanslarını daha iyi açıklayabilmek için hasar mekanizmalarını belirlemek gerekmektedir. Yapıştırma bağlantılarında, genelde adhezyon veya kohezyon olarak iki farklı hasar tipi vardır (ISO 10365). Yapıştırma bağlantılarında oluşabilecek temel hasar tipleri Şekil 1.4'de verilmiştir. Adhezyon hasar, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki ara yüzey hasarıdır (Şekil 1.4a). Kohezyon hasar ise, yapıştırılan iki yüzey üzerinde yapıştırıcı tabaka kaldığından gerçekleşen bir hasardır (Şekil 1.4b). Adhezyon ile kohezyon hasarın birlikte olduğu zaman oluşan hasar ise karışık-mod hasarıdır (Şekil 1.4c). Şayet yapıştırma bağlantılarında yapıştırılan malzemede hasar oluşuyorsa, bu durum yapıştırılan malzeme hasarı olarak ifade edilmektedir (Şekil 1.4 d). Yapıştırma bağlantılarında hasar genellikle yapışma veya kohezyon hasarının yüzde olarak ifade edilmektedir. Bu yüzde hesabı kohezif veya yapıştırma şeklinde gerçekleşmiş temas alanının hacimsel oranı üzerinden yapılır. Bir hasar gerçekleştiğinde hasar modunun tam ve doğru şekilde belirlenmesi zaman ve para kazancı sağlarken aynı zamanda hasarın anlaşılmasına yardımcı olur (Bharti 2018).



Şekil 1.4. Hasar türleri şematik olarak gösterimi, a) adezyon hasarı, b) yapıştırıcı malzemenin kohezyon hasarı, c) karışık mod hasarı, d) yapıştırılan malzeme hasarı.

1.5. Yorulma

Yorulma, bir yapının veya bağlantının tekrarlı veya salınımlı yüklemeler altında kırılması olayıdır. Yorulmanın önemi ise, bir malzemenin statik yükleme altındaki maruz kaldığı gerilme değerinin daha az gerilme seviyelerinde bağlantıda hasar oluşmasıdır. Mühendislikte kullanılan tüm malzemeler statik yüklerden ziyade yorulma yüklerine maruz kalmaktadır. Yorulma yükleri sabit veya değişken genlikli olarak meydana gelmektedir. Yorulma yükleri yorulma gerilmelerini hesaplamak için kullanılır ve günümüzde kullanılan birçok yazılım yorulma gerilmelerini test esnasında hesaplamaktadır (Pedersen, 2018). Yorulma performansını etkileyen iki önemli gerilme bulunmakta olup ve bu gerilmeler, gerilme genliği (σ_a) ve ortalama gerilme (σ_m) dir (Pedersen 2018) (Şekil 1.5).



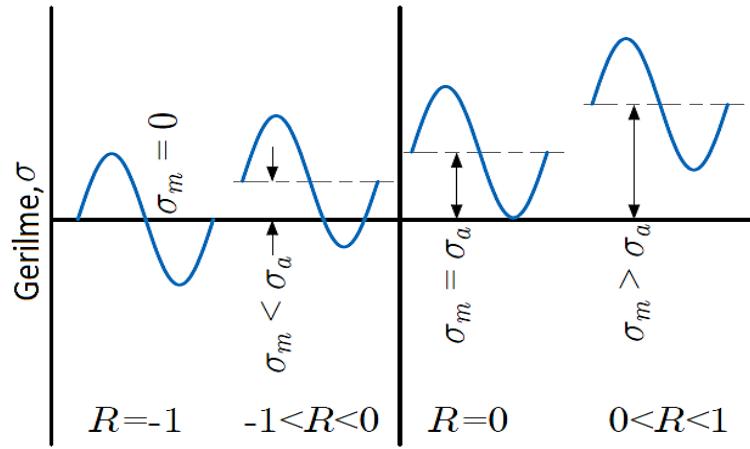
Şekil 1.5. Yorulma da kullanılan gerilmeler (Pedersen 2018).

1. GİRİŞ

Gerilim genliği, bir çevrimdeki minimum ve maksimum gerilim arasındaki fark olarak bulunur. Gerilme genliği yerel veya normal gerilme değerleri açısından belirlenebilir. Geleneksel olarak makine bileşenleri için gerilme genlikleri, kaynaklı bileşenler için ise gerilme aralıkları kullanılır. Pratikte ortalama gerilme, gerilme genliği ile sıklıkla ilişkilendirilir. Örneğin; eğer genlik artarsa ortalama gerilmede artar ve bu durum aşağıdaki (Denklem 1.1) gibi ifade edilir ve bu denklem gerilme oranı olarak isimlendirilir (Pedersen 2018).

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (1.1)$$

Yorulma testlerinde R (gerilme oranı) değeri +1 ile -1 arasında değişim göstermektedir. R değeri -1 olduğunda yükleme tam değişken yükleme (eğilmeli yorulma) olup, R değeri 0 olduğunda ise yükleme titreşimli çekme yüklemesidir. Gerilme genliği ile ortalama gerilme arasındaki ilişki ve değişimler Şekil 1.6' da gösterilmektedir.



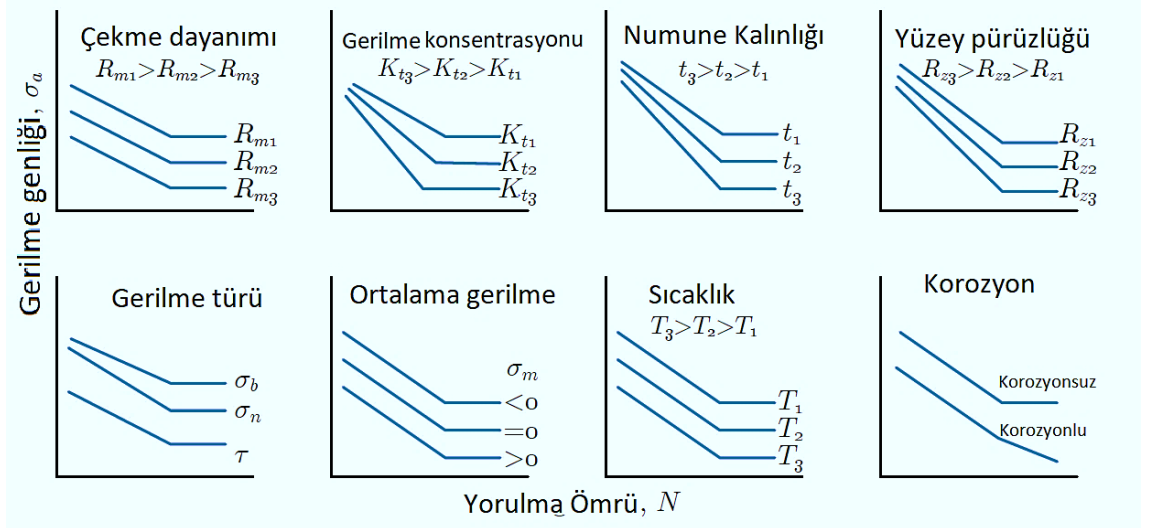
Şekil 1.6. Gerilme genliği ile ortalama gerilme arasındaki ilişki (Pedersen, 2018).

Yorulma yüksek derecede yönlenmeye bağlı bir olgu olduğundan dolayı genellikle gerilme genliğini hesaplamak için eş değer gerilme kriteri (von misses) yerine bir yöndeki gerilme bileşenleri ($\sigma_x/\sigma_y/\sigma_z$) veya asal gerilmeler ($\sigma_1/\sigma_2/\sigma_3$) kullanılır.

1.5.1. Yorulma ömrü

Yüksek çevrimli deneyler için yorulma dayanımı veya yorulma ömrü genellikle S-N eğrileri ile ifade edilmektedir. S-N eğrilerinin birçoğu doğrusal, çift doğrusal ve doğrusal olmayan şeklinde kullanılmaktadır. Bu tarz eğriler genellikle çift logaritmik eksen olarak çizilmekte olup, gerilme değişimi ise doğrusaldır. Yorulma eğrileri deneysel çalışmalar ile elde edilmekte olup, her bir deneysel numunenin gerilme genliği ve yorulma ömrü kaydedilmektedir. Yorulma testleri kullanılan numuneler gerçek bileşenlerden kesilerek alınmış veya karakteristik olarak çok iyi tanımlayan küçük numuneler ile yapılmaktadır. S-N grafiklerinin bir özelliği de bağımlı değişken N'nin birincil ekseninde ve bağımsız değişken σ_a 'nın ikincil ekseninde çizilmesidir.

Yorulma deneylerinde, malzeme türünün yanı sıra yorulma ömrünü etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Çekme dayanımı, sıcaklık, yüzey pürüzlüğü gibi birçok faktörün yorulma dayanımını etkilemekte olup, Şekil 1.7'de yorulma dayanımı ile ilişkileri gösterilmektedir.

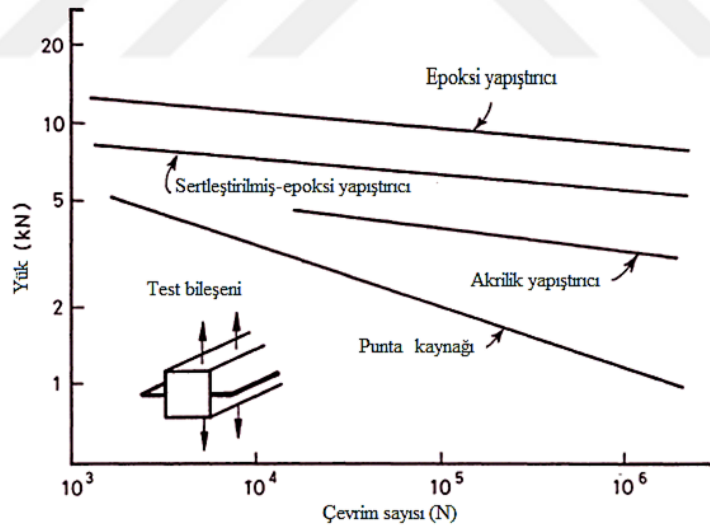


Şekil 1.7. Yorulma dayanımını etkileyen faktörler ve arasındaki ilişkiler (Pedersen 2018).

1.6. Yapıştırma Bağlantılarında Yorulma

Yapıştırma bağlantıları statik yüklemelerden ziyade genellikle dinamik ve çevresel etkilere (kimyasal, ısı ve rüzgar) maruz kalmaktadır. Dinamik ve çevresel etkilere maruz kalan yapıştırma bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek ve performanslarını artırmak oldukça önemlidir. Bu kapsamda yapıştırma bağlantıların yorulma performanslarını artırmak için, farklı tip bağlantı geometrisi, yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğu gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, diğer geleneksel yöntemlerle birleştirilmiş bağlantılara (perçin, cıvata ve nokta kaynağı) göre yorulma performansları daha iyidir. Şekil 1.8’de verilen punta kaynağı ve farklı tip yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların yorulma performansları incelendiğinde, yapıştırma bağlantıların performanslarının daha iyi olduğu görülmektedir. Ancak yapıştırıcı karakterinin değişmesi yapıştırma bağlantısının performansını etkilemektedir.



Şekil 1.8. Punta kaynağı ve farklı tip yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların yorulma özellikleri (Kinloch 1987).

Mühendislik malzemelerinde olduğu gibi yapıştırma bağlantılarında da yorulma davranışlarını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler Şekil 1.7’de verilmiştir. Ancak bu faktörlerin yanı sıra yapıştırma bağlantılarında uygulanan kuvvetin şekli (sinüs veya kare), frekansı ve bağlantı geometrisi yorulma performansını etkilemektedir (Kinloch 1987).

1.7. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bu tez çalışması kapsamında yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde deneysel yöntemler kullanılmıştır.

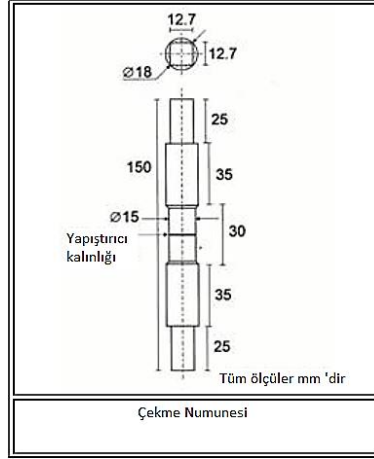
1.7.1. Deneysel yöntemler

Günümüzde kullanılan birçok mühendislik malzemeleri gibi yapıştırma bağlantılarının da mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmektedir. Yapıştırma bağlantıların da yapıştırılan malzeme, yapıştırıcı türü, bağlantı türü ve yükleme koşulları gibi birçok faktör bağlantıların mekanik özelliklerini etkilemektedir (Kuenzi and Stevens 1963). Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarında kullanılan yapıştırıcıların ve yapıştırılan malzemelerin mekanik özellikleri, ISO 527-2 ve ASTM E8 standardında belirtilen parametrelere göre yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerden üretilen bulk numune testlerinden elde edilir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemede ise, birçok test yöntemi vardır. Bu test yöntemleri ASTM standartlarında belirtilmiştir (ASTM D3433, ASTM D1002, ASTM D790, ASTM 1184, ASTM 3528).

Yapıştırma bağlantılarında temel yükleme modlarına karşılık yapılan deneysel testler, çekme, soyulma, T-soyulma, ayrılma, kayma ve kırılma tokluğu testleri olup aşağıda bu testler ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

1.7.1.1. Çekme testi

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların çekme testinde yük doğrudan veya dolaylı olarak gerilmeler şeklinde uygulanmaktadır. Yapıştırıcının çeki testi ile mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan bağlantı tipi Şekil 1.9’ da verilen alın bağlantı tipidir. Çekme testinde kullanılan silindirik alın bağlantısında belirli kalınlığa sahip yapıştırıcı tabakası teste tabi tutulur. Alın bağlantıda yapıştırıcı sadece çeki gerilmelerine maruz kalır. Test sonrasında yapıştırıcının ortalama mukavemet değeri, kopma anındaki yükün alın bağlantısının yapışma alanına bölünmesi ile elde edilir.



Şekil 1.9. ASTM standartlarında bir çekme numunesi ve ölçüleri (ASTM D897, ASTM D2095).

1.7.1.2. Soyulma testi

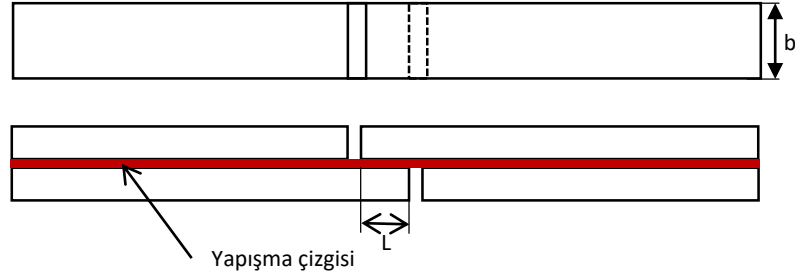
Soyulma testi, yapıştırıcılarının performansını belirlemede ve geliştirilmesinde önemli bir yeri vardır. Soyulma testinde yapıştırıcı malzemenin soyulma direnci belirlenir. Soyulma direnci, yapıştırma bağlantılarında yapıştırılan malzemeleri ayırmak için yapışma hattı boyunda ölçülen birim test genişliğindeki ortalama kuvvet değeri olarak tanımlanmaktadır. Soyulma direnci hem yapıştırılan malzeme ile hem de yapıştırıcı kalınlığı ile ilişkilidir. Örneğin; aynı kalınlıkta olmak şartı ile yapıştırılan malzeme çelik olması, alüminyum'a göre daha yüksek soyulma mukavemeti değerine sahip olduğu bilinmektedir. Yapıştırma bağlantılarında;

- T-Soyulma
- Yüzer silindir yöntemi
- Kasnak tırmanma soyulma yöntemi

gibi yaygın kullanılan üç soyulma testi vardır.

1.7.1.3. Ayrılma testi

Ayrılma gerilmeleri, (temel olarak yapıştırıcıya dik olarak uygulanan konsantre çekme gerilmeleri) yapıştırma bağlantılarında oluşabilecek en yaygın yükleme biçimlerindedir. Bu test yöntemi, havacılık ve savunma endüstrilerinde yaygın olarak



Şekil 1.11. Kayma testi için kullanılan bir numunenin şematik gösterimi.

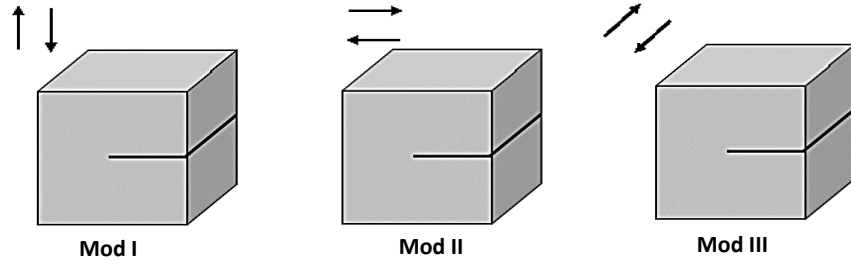
Bu tip bağlantılarda yapıştırıcının kayma mukavemeti aşağıdaki verilen denklem 1.2 ile belirlenmektedir.

$$\tau = \frac{P}{bL} \quad (1.2)$$

Burada P maksimum yük, b bağlantının genişliği ve L ise bağlantının bindirme uzunluğudur. Bu testlerde yapıştırılan malzemede herhangi bir yer değiştirme olmaması veya ihmal edilecek seviyede olması için yapıştırılan malzeme olarak sert çelik kullanılmaktadır.

1.7.1.5. Kırılma tokluğu testi

Farklı yükleme koşulları altında çatlak başlangıcı ve ilerlemesine karşı direnci belirlemek için kırılma tokluğu testleri yapılmaktadır. Bu test yöntemleri, kırılma mukavemeti açısından yapıştırıcı, yapıştırılan malzemenin yüzeyi ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme etkileşimlerini değerlendirmek için kullanılır. Örneğin, mod I yorulma testlerinden elde edilen kırılma tokluğu verileri kullanılarak yapıştırma bağlantılarının yorulma ömürleri tahmin edilebilir. Çatlak ilerlemesi, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeden oluşan bağlantı sisteminin kırılma tokluk değeri aşıldığında meydana gelmektedir. Çatlak başlangıcı ve büyümesi durumu genellikle, çatlak açma (Mod I), kayma (Mod II) ve karışık (Mod III) mod koşullarında meydana gelmektedir.(Şekil 1.12)



Şekil 1.12. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesinde gerçekleşen hasar modları.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu tez çalışması kapsamında; genel değişken çeki ve tam değişken eğme yorulma yüküne maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında, yapıştırılan malzeme kalınlığının bağlantı yorulma performansına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada farklı yükleme durumlarında (çekme ve eğme) yapıştırma bağlantılarının statik ve yorulma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan literatür araştırmasında;

- Tam değişken yorulma yüküne maruz tek tesirli yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin incelenmediği,
- Eğilme yüküne maruz tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, yapıştırılan malzeme kalınlığının etkisi sadece Zamani, Silva et al. (2019)'nın yaptığı çalışmada görülmüştür.

Karachalios, Adams et al. (2013)'nin yaptığı çalışmada, eğilme yükü altında tek tesirli bindirme bağlantılarında yapıştırıcı kalınlığının, yapıştırılan malzeme kalınlığının ve bindirme bölgesi uzunluğunun mekanik özelliklerini incelenmiştir. Çalışmada bindirme bölgesinin uzunluğunun eğilme davranışa bir etkisinin olmadığı, yapıştırılan malzeme kalınlığının çok fazla etkili olduğu gözlemlenmiştir. Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında yük aktarımı yerel olarak bindirme bölgesinin uçlarında olduğundan dolayı, hasarın soyulma mekanizması ile gerçekleştiği görülmüştür.

Akpınar, Gültekin vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, farklı genişliklere sahip yapıştırılan malzemenin statik dayanım özelliği deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada yapıştırılan malzeme olarak alüminyum yapıştırıcı olarak ise DP460 yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırılan malzemenin bindirme genişliği ve uzunluğu artıkça bağlantının hasar yükü de artmaktadır. Aynı yapıştırma alanına sahip yapıştırma bağlantılar için bindirme uzunluğunun artırılmasından ziyade bindirme genişliğinin artırılması bağlantının yük taşıma kapasitesi açısından daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Bindirme genişliğinin artırılması, bağlantının bindirme bölgesinin uçlarında oluşan soyulma gerilme değerlerini azalttığı sonucuna varılmıştır.

Gültekin, Akpınar vd. (2015) yapılan başka bir çalışmada ise; yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarda, yapıştırılan malzeme kalınlığının bağlantı mekanik özelliklerine etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan inceleme iki aşamalı olarak yapılmıştır. İlk aşamada alt ve üst malzemenin kalınlıkları aynı olup, beş farklı kalınlık kullanılmıştır. İkinci aşamada ise alt malzeme kalınlığı aynı tutulup üst malzemede beş farklı kalınlık kullanılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre yapıştırılan malzemenin kalınlığına bağlı olarak bağlantı hasar yüklerinin değiştiği ve nümerik analiz ile yapılan gerilme analizlerin deneysel çalışma ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Kadioglu, Avil vd. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı bindirme uzunluğu ve yapıştırılan malzeme kalınlığına sahip fiber kompozit malzemelerin çekme ve eğilme özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada bindirme uzunlukları sırasıyla 15, 25 ve 40 mm malzeme kalınlıkları ise 2 ve 3 mm olarak alınmıştır. Bindirme uzunluğu arttığında çekme dayanımının arttığı, eğilme dayanımının ise etkilenmediği görülmüştür. Yapılan çalışmada bağlantının hasar şekillerine göre, çekme deneylerinde hasar yapıştırıcı tabakadan, eğme deneylerinde ise kompozit tabakaya yakın bir şekilde gerçekleştiği ifade edilmiştir.

Zaroug, kadioglu et al. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, aynı ve farklı tür yapıştırılan malzemelerde cıvata, yapıştırıcı ve karma yöntemler kullanılarak birleştirilmiş yapıştırma bağlantıların mekanik özellikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada 2 farklı yapıştırılan malzeme (AL7075 ve AL6061) ve 3 farklı kalınlık (2, 4 ve 6 mm) değeri kullanılmıştır. Yapıştırılan malzeme kalınlığı 2 mm ve birleştirme türü karma (cıvata ve yapıştırıcı) olduğunda, bağlantıdaki hasarın yapıştırılan malzemede meydana geldiği görülmüştür. Fakat kalınlık artırıldığında hasarın tamamen cıvatada meydana geldiği ifade edilmiştir. Yapıştırılan malzeme kalınlığı artırıldığında hasar yükünün de arttığı, yer değiştirme miktarının ise azaldığı görülmüştür.

Aydın, Özel vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli yapıştırma bağlantılarının dayanımını ve hasarını doğrusal olmayan sayısal çözüm metodu kullanarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada yapıştırılan malzeme kalınlığı ve bindirme bölgesi uzunluğu arttıkça hasar yükünde artma olduğu, kalınlık arttıkça eşdeğer gerilme bindirme bölgesinin uçlarından merkeze doğru ilerlediği görülmüştür. Kayma

gerilmesinin etkisi ile bindirme uzunluğuna bağlı olarak bindirme bölgesinin orta kısmında aniden kırılma veya ayrılmanın olduğu deneysel çalışmalarda görülmüştür.

Khoramishad, Akhavan-Safar et al. (2016) tarafından yapılan çalışmada tek tesirli yapıştırma bağlantılarında teorik bir metot kullanarak statik dayanımını, çalışmada yapıştırılan malzeme türü ve bindirme bölgesi uzunluğu etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada bindirme uzunlukları olarak 15, 30 ve 60 mm ve yapıştırılan malzeme kalınlıkları olarak ise 1,5, 2, 2,5, 3,5, 5 ve 6,5 mm alınmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, hem bindirme uzunluğu artması hem de yapıştırılan malzeme kalınlığının artması bağlantının hasar yükünü artırdığı gözlemlenmiştir. Uygulanan teorik yaklaşım ile elde edilen hasar yüklerinin deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Geleneksel tüm bağlantılarda olduğu gibi yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda maruz kaldığı çevresel etkilerden dolayı sadece statik yüklemelere maruz kalmaktan ziyade sıklıkla dinamik yüklemelere de maruz kalmaktadır. Statik yüklemeye maruz bağlantıların deneysel çalışmaları, yorulma deneyi çalışmalarına göre daha az süre ve hata payı içermektedir. Deneysel yorulma çalışmalarında sreler uzun ve maliyetli olduğundan, yorulma analizlerinde teorik ve sayısal çalışmalar kullanılmaktadır. Yapıştırma bağlantılarının yorulma özellikleri üzerine farklı araştırmalar ve metotlar kullanılmaktadır.

Lee, Kim et al. (1991) tarafından yapılan bir çalışmada, boru şeklindeki dairesel kesitli tek tesirli yapıştırma bağlantılarda yüzey pürüzlülüğü ve yapıştırıcı kalınlığının yorulma özelliğine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada yüzey pürüzlüğü 0,5 μm ile 3 μm arasında değişimi, yapıştırıcı kalınlığı ise 0,15 mm ile 1,7 mm arasında değişmektedir. Çalışmanın sonucuna göre, yapıştırıcı kalınlığı azaldığında yorulma çevrim değeri artmakta olup, yüzey pürüzlülük değeri azaldığında ise yorulma çevrim değeri de azalmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü değeri 1,5 μm ile 2,5 μm arasında yorulma çevrim değerinin değişmediği ve en uygun değerin 2 μm olduğu ifade edilmiştir.

Khoramishad, Crocombe et al. (2010) tarafından yapılan çalışmada, dinamik yüklemeye maruz tek tesirli yapıştırma bağlantılarında uygulanan yük oranının (R) etkisi hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada yk oranı (R) olarak

0,1 ve 0,5 değerleri kullanılmıştır. R değeri artığında yapıştırıcı malzemede sertleşme olduğundan dolayı (yapıştırma malzemesinin rijitlik değeri artığından) bağlantının yorulma performansının artığı gözlemlenmiştir. Ayrıca alışma kapsamında kullanılan sayısal model ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu, hasar başlangıcını ve ilerlemesini çok iyi tahmin edildiği görülmüştür.

Yapıştırma bağlantılarının yorulma ömürleri çoğunlukla yorulma yüküne ve yük oranına bağlıdır. Katnam, Crocombe et al. (2010) yapılan çalışmada, yorulma hasar modeli ile yapıştırma bağlantılarının hasar davranışları ve yorulma ömür tahminleri deneysel ve sayısal olarak elde edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, yük oranı artıkça yorulma hasar dayanımının düştüğü sonucuna varılmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan hasar modelinde, ortalama gerilme değeri artıkça modelin yorulma ömür tahmininin daha başarılı olduğu ve deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu grlmektedir.

Sarfara, Vassilopoulos et al. (2011) tarafından yapılan bir diğer çalışmada cam elyaf kompozitten imal edilmiş n gerilmeli çift tesirli yapıştırma bağlantılarının farklı yük oranlarında yorulma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada yk oranları (R) sırasıyla 0,1, -1 ve 10 olarak ele alınmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, çeki genel değişken ve tam değişken yüklemelerden dolayı yorulma hasarı çoğunlukla fiber tabakalarda oluşan yırtılma ile meydana gelmiştir. R oranı 0,1 ve -1 olduğunda rijitlik azalması benzer olduğu, R değeri 10 olduğunda ise rijitlik azalması daha az olduğu gözlemlenmiştir. Rijitlik azalmasında R oranının etkisi az olduğunu ifade edilmiştir.

Khoramishad, Crocombe et al. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, yapıştırma ile birleştirilmiş bağlantıların farklı değişken genlikli yüklemeler altında yorulma özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada yk oranı (R) 0,1 ve çalışma frekansı 5 Hz olarak ele alınmış olup, literatürde var olan deneysel verilere göre bir karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmada oluşturulan sayısal modelin, farklı değişken genlikler için yorulma hasar tahmini için olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapılan yorulma hasarı tahmininde hasarın geometriden bağımsız olduğu ve aynı yapıştırıcı sistemi (aynı yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme ve yüzey özellikleri) içerisinde farklı modellere uygulanabildiği ifade edilmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Wu, Zhao et al. (2013) tarafından yapılan çalışmada, iki farklı malzeme kullanılarak elde edilen çift tesirli yapıştırma bağlantılar farklı ön yorulma yüklerine maruz bırakılmış olup, yorulma yük oranının etkisi yorulma sonrası bağlantının statik dayanımına bakılarak incelenmiştir. Çalışmada yapıştırma bağlantıları öncelikle 0,2 ile 0,6 yük oranları arasında ön yorulma yüklerine maruz bırakılmış ve bu ön yorulma sonrası bağlantının statik dayanımı elde edilmiştir. Yorulma yük oranı arttığında, yapıştırıcıma bağlantısının dayanımında yaklaşık % 4,5 azalma olduğu görülmüştür. Bu çalışmaya göre yorulma hasarı yapışma hattında meydana gelmektedir. Bu sebep ile yorulma yük oranının değişiminin yorulma hasarına çok fazla etkisini olmadığı söylenmiştir.

Azari, Jhin et al. (2014) tarafından yapılan çalışmada, yapıştırma bağlantılarına uygulanan yorulma yükü ve yer değiştirme oranına bağlı olarak bağlantıda oluşan yorulma çatlak ilerlemesi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada çatlak ilerlemesi enerji salınımının bir fonksiyonu olduğundan, yapıştırıcının kırılma enerji değerleri ele alınmıştır. Yorulma yük oranı $R(0,1$ ile $0,5$ arası) arttığında kırılma enerji değeri de artmaktadır. Yorulma çatlak ilerlemesi kırılma enerji ile ilişkilendirilmiştir. Yorulma değeri yükten ve yer değiştirmeden bağımsız olduğu ifade edilmiştir.

Pereira, Reis et al. (2015) tarafından yapılan çalışmada, sabit genlikli yüklemeye maruz kalan yapıştırma bağlantılarının farklı gerilme oranlarındaki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma frekansı 10 Hz olup, gerilme oranı (R) ise 0,05 – 0,7 aralığında değişmektedir. Yorulma ömrünün gerilme genliği üzerinde çok az etkili olduğu maksimum gerilmenin ise yorulma ömrünü önemli derecede etkilediği belirtilmiştir. Maksimum kayma gerilmesi açısından bakıldığında, ortalama gerilme değeri arttığında yorulma değeri de artmaktadır. Çalışmadan elde edilen diğer bir sonuç ise; yorulma sonsuz ömür 1 milyon çevrim olarak ele alındığında, R değeri arttıkça maksimum kayma gerilmesi değeri de arttığı görülmüştür.

Mariam, Afendi et al. (2018) tarafından yapılan çalışmada, alüminyum ve cam fiber kompozitten yapılmış tek tesirli yapıştırma bağlantıların statik ve yorulma dayanımı özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada cıvata, yapıştırma ve karma (hem cıvata hem de yapıştırma) şeklinde üç farklı bağlantı türü kullanılmıştır. Yorulma testleri için gerilme oranı (R) 0,1 ve gerilme genlik değerleri %30' dan % 90' a kadar değerler

alınmıştır. Deneysel sonuçlardan elde edilen veriler göre, karma bağlantının diğer bağlantı türlerine göre en yüksek dayanım ve rijitliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Diğer taraftan, Zamani, Silva et al. (2019) tarafından yapılan çalışmada ise, dört nokta eğme yüküne maruz alüminyum ve karbon fiber takviyeli kompozit yapıştırma bağlantıların yorulma ömrü ve çatlak başlangıcı araştırılmıştır. Çalışmada yük oranı (R) 0,5 ile -1 ve frekansı 10 Hz olarak alınmıştır. Yorulma yük değeri azaldığında çatlak başlangıç için gerekli yorulma ömrü değeri artmaktadır. R değeri -1'e doğru gittiğinde çatlak başlangıç bölgesi azalmakta olup, yorulma dayanım değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Reis, Monteiro et al. (2015) tarafından yapılan çalışmada ise, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların farklı yükleme frekansında yorulma davranış etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda 2, 10 ve 40 Hz yükleme frekans değerleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmadan frekansın arttığında yapıştırıcıdaki sıcaklığında artışı görülmüştür. 2 Hz'den 10 Hz'e kadar kayma dayanımının arttığı, 10 Hz'den 40 Hz' kadar ise kayma dayanımı değerinin azaldığı fakat azalma miktarı 2 Hz frekansındaki değerini geçmemektedir. Yapılan çalışmada 2 Hz ile 40 Hz arası frekans değerleri için hata miktarı az olduğundan dolayı farklı frekanslar değerleri için doğrusal olarak yorulma ömrü tahmini yapılabilmektedir.

Shahani and Pourhosseini (2018) tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli yapıştırma ile birleştirilmiş bağlantılarda yapıştırılan malzemenin kalınlığının yorulma ömrüne etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada yapıştırılan malzeme alüminyum ve yapıştırıcı olarak ise AF163-2 (film yapıştırıcı) kullanılmıştır. Deneysel sonuçlardan elde edilen verilere göre, yapıştırılan malzeme kalınlığı arttığında yorulma dayanımının da arttığı söylenmiştir. Bunun yanında malzeme kalınlığı arttıkça bağlantının hasarı yapıştırılan malzemedeki değil yapıştırıcı da meydana gelmektedir. Smith-Watson-Topper kriteri kullanılarak yapıştırılan malzemenin kalınlığa bağlı olarak yorulma ömrü hesaplanmış olup, yorulma deneylerinin maliyeti ve zamanına açısından uygulanan bu yöntemin çok önemli olduğu görülmüştür.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

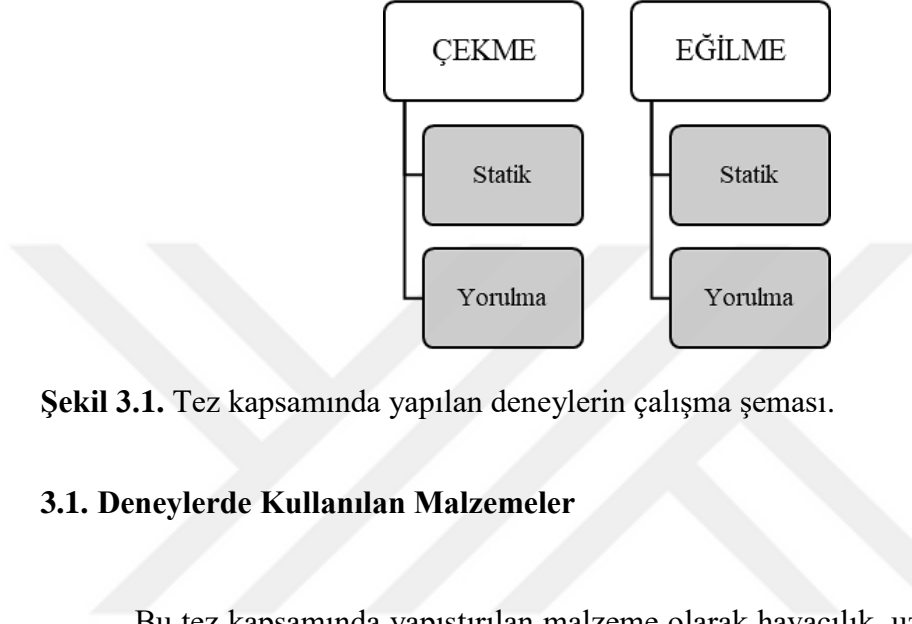
Azari et al. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, sertleştirilmiş epoksi yapıştırıcının Mod I'deki yorulma davranışının farklı malzeme türleri üzerinde etkisi, kürleşme artık gerilmesi ve yapıştırılan malzemenin rijitliği açısından deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Yapıştırılan malzemenin elastisite modülü artığında (alüminyum'dan çelik'e) yorulma değeri azalmakta, çatlak büyüme oranı ise artmakta olduğu gözlemlenmiştir. Ancak çelik malzemenin alüminyum malzemeye göre daha fazla bağlantı dayanımı sağladığı görülmüştür. Yapıştırma bağlantısında yapıştırıcının plastik bölgelerinin daha fazla rijitliğe sahip olması çatlak ilerleme hızını da artırmaktadır. Yapılan deneysel çalışmada yorulma özelliklerinin değişiminde kürleşme artık gerilmesi etkisinin az olduğu, ana sebebi ise bağlantının rijitliği olduğu ifade edilmiştir.

Azari, Ameli et al. (2013) tarafından yapılan çalışmada, yapıştırıcı malzemesinin Mod I'deki kırılma tokluğu değeri yapıştırılan malzemenin kalınlığına bağlı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada yapıştırılan malzeme kalınlıkları 1,6 mm ile 12,7 mm arasındadır. Yapıştırılan malzeme kalınlığı artıkça kırılma tokluğu değeri azaldığı, çatlak ilerlemesinin değişmediği ve kalınlığı artması ile yapıştırma bağlantısının dayanımının arttığı görülmüştür. Çalışmada yükler arasında yapılan faz açısı farkına bağlı olarak yorulma davranışında bir değişikliğin olmadığı ancak yüksek faz açısında kalınlığın etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan literatür araştırmasına göre; yapıştırılan malzemenin kalınlığının yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerine önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların çalışma koşulları göz önüne alındığında, bağlantılar statik yüklemelere maruz kalmasından ziyade dinamik yüklemelere de maruz kalmaktadır. Budan dolayı yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda, yapıştırılan malzemenin kalınlığının hem çeki hem de eğme yorulma davranışı üzerine etkisi bu tez kapsamında incelenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

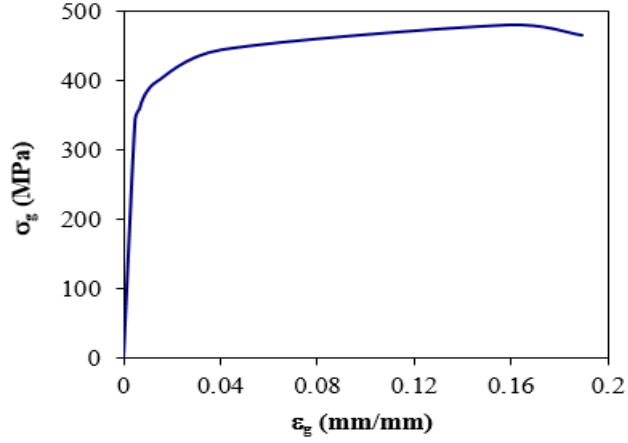
Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar iki ana başlık altında toplanmış ve tek tesirli yapıştırma bağlantılarında çekme ve eğilme davranışları incelenmiştir. Tez çalışmasında yapılan deneylerin şematik gösterimi şekil 3.1’de verilmiştir.



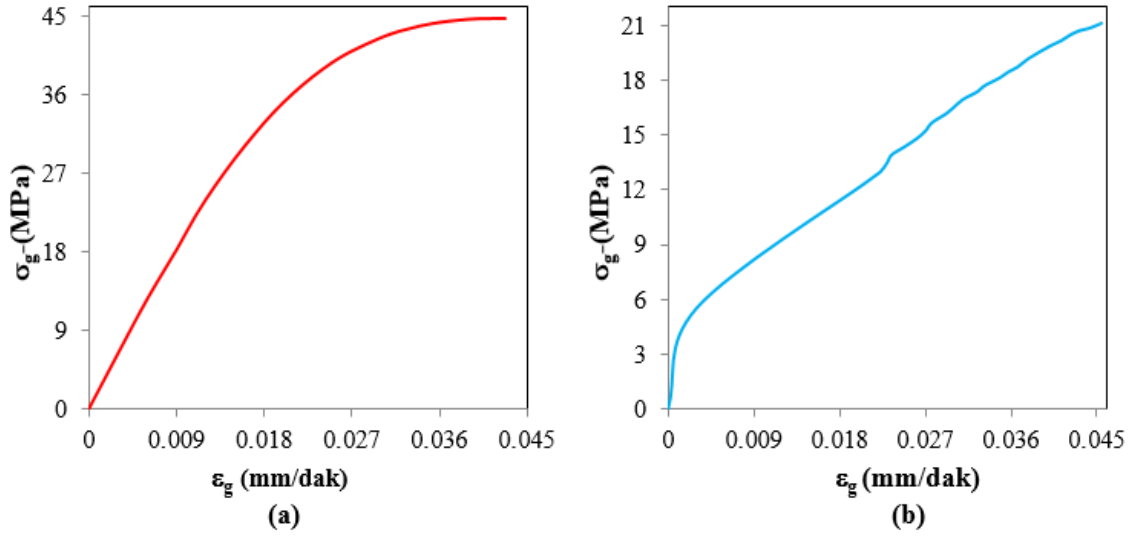
Şekil 3.1. Tez kapsamında yapılan deneylerin çalışma şeması.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu tez kapsamında yapıştırılan malzeme olarak havacılık, uzay ve otomotiv gibi çeşitli alanlarda üstün mekanik ve dinamik özelliklerinden dolayı AA2024-T3 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Yapıştırıcı olarak ise, çekme test numunelerinde DP 460 çift bileşenli sert yapısal yapıştırıcı, eğme testlerinde ise Araldite 2015 çift bileşenli orta sert yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırılan malzemenin ve yapıştırıcıların (DP460 ve Araldite 2015 Epoksi) bulk numunelerinden elde edilen mekanik özellikleri sırasıyla Şekil 3.2’de ve Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.2. AA2024-T3 Alüminyum alaşım malzemesinin mekanik özellikleri (Durmuş ve Akpınar (2020)).

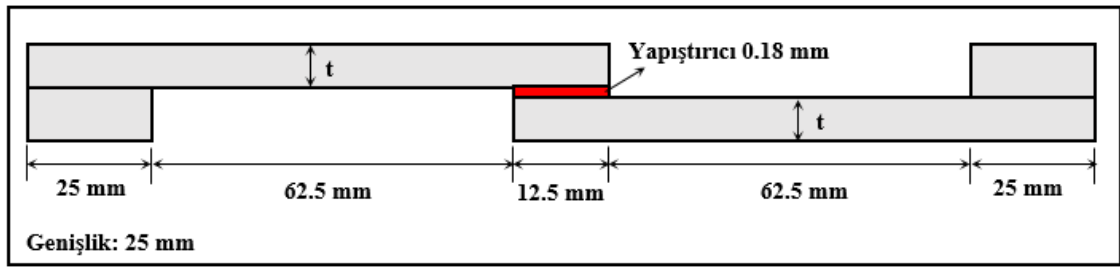


Şekil 3.3. Yapıştırıcı Malzemelerinin Mekanik Özellikleri a) DP460, b) Araldite 2015 (Durmuş ve Akpınar (2020), Akpınar, Gültekin vd. (2016)).

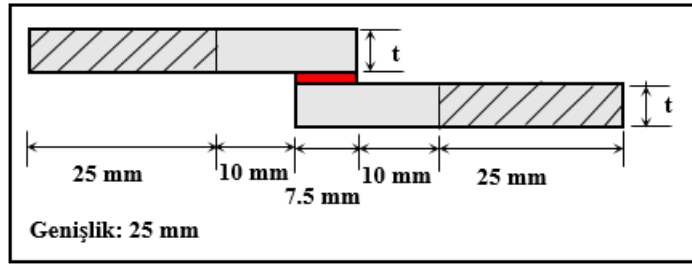
Çalışmada 3M şirketi (St. Paul, MN, USA) tarafından üretilen DP460 ve Huntsman şirketi (Basel, Switzerland) tarafından üretilen Araldite 2015 çift bileşenli bir yapıştırıcılar kullanılmıştır. Her iki yapıştırıcıda epoksi (X) ve hızlandırıcı (Y) olup, bunların hacimce karışım oranları X:Y=2:1'dir. Yapısal malzemelerin (seramik, cam, metal ve kompozit) birleştirilmesinde çoğunlukla kullanılan yapıştırıcıların zamana ve sıcaklığa bağlı olarak kürleşme şartı bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan DP460 epoksi yapıştırıcılar 70°C sıcaklıkta 120 dakika, Araldite 2015 epoksi yapıştırıcılar için ise 70°C sıcaklıkta 120 dakika bekletilerek kürleşme şartları sağlanmıştır.

3.2. Yapıştırma Bağlantısı Numuneleri

Bu çalışmada tek tesirli bindirme bağlantısının (SLJ: Single Lap Joint) yapıştırılan malzemenin genişliği ve bindirme uzunluğu aynı olup, yapıştırılan malzemenin kalınlığının değişmesi ile farklı bağlantı türleri hazırlanmıştır. Çekme ve eğilme deneyleri için yapıştırma bağlantısına ait geometrik özellikler sırasıyla Şekil 3.4'te ve Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Çekme deneylerine ait tek tesirli yapıştırma bağlantısının geometrik boyutları.



Şekil 3.5. Eğilme deneylerine ait tek tesirli yapıştırma bağlantısının geometrik boyutları.

Ayrıca yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının test türüne ve kalınlığına bağlı olarak adlandırılan yapıştırma bağlantılarının deneysel parametreleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.1. Yapıştırma bağlantılarını için deneysel parametreler.

Bağlantı Tipi	Yapıştırılan Malzeme Kalınlığı (mm)	Test Tipi	Bindirme Uzunluğu (mm)
SLJ-SÇ-2	2	Çeki-Statik	12,5
SLJ-SÇ-3	3	Çeki-Statik	12,5
SLJ-SÇ-4	4	Çeki-Statik	12,5
SLJ-SÇ-5	5	Çeki-Statik	12,5
SLJ-SÇ-6	6	Çeki-Statik	12,5
SLJ-SE-2	2	Eğme-Statik	7,5
SLJ-SE-3	3	Eğme-Statik	7,5
SLJ-SE-4	4	Eğme-Statik	7,5
SLJ-SE-5	5	Eğme-Statik	7,5
SLJ-SE-6	6	Eğme-Statik	7,5
SLJ-ÇY-2	2	Çeki-Yorulma	12,5
SLJ-ÇY-3	3	Çeki-Yorulma	12,5
SLJ-ÇY-4	4	Çeki-Yorulma	12,5
SLJ-ÇY-5	5	Çeki-Yorulma	12,5
SLJ-ÇY-6	6	Çeki-Yorulma	12,5
SLJ-EY-2	2	Eğme-Yorulma	7,5
SLJ-EY-3	3	Eğme-Yorulma	7,5
SLJ-EY-4	4	Eğme-Yorulma	7,5
SLJ-EY-5	5	Eğme-Yorulma	7,5
SLJ-EY-6	6	Eğme-Yorulma	7,5

Şekil 3.4'te ve Şekil 3.5'te gösterilen bağlantıların kalınlıkları (t) sırasıyla 2, 3, 4, 5 ve 6 mm olacak şekilde numuneler hazırlanmıştır. Bir numunenin hazırlanma işlem adımları Şekil 3.6'daki grafikte şematik olarak gösterilmektedir.



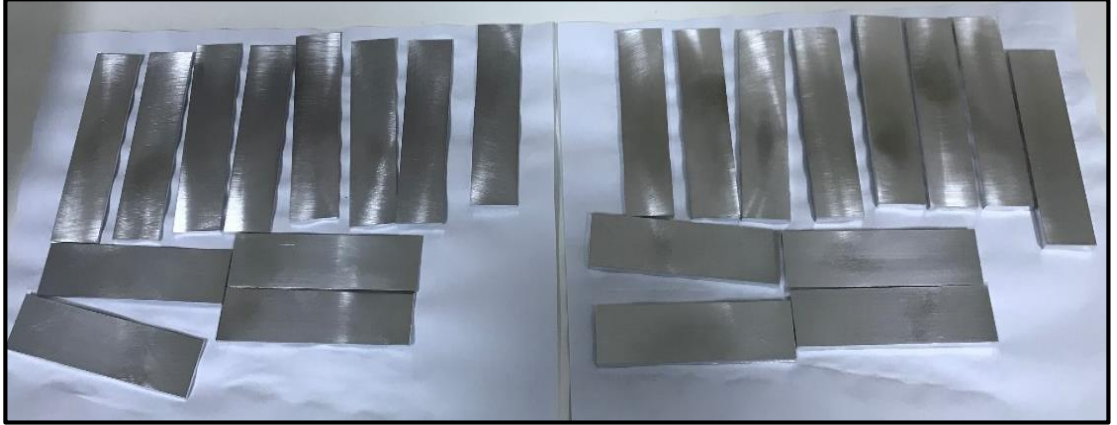
Şekil 3.6. Numune hazırlama işleminin şematik gösterimi.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

zımparalanmıştır. Zımpara işlemi bittikten sonra yapıştırılan malzemeler mekanik temizleme tozu ile yıkanmıştır. Yıkanan her bir yapıştırılan malzeme temizleme işlemi sırasında su ve diğer gibi kalıntıları uzaklaştırmak için 10 dakika asetonda bekletilmiştir (Şekil 3.8). Asetondan çıkarılan numuneler 60°C sıcaklıktaki bir etüv içerisinde kurutulmuş yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmıştır (Şekil 3.9). Her bir yapıştırılan malzeme yüzeyinde aynı yüzey hazırlama işlemi uygulanmıştır.



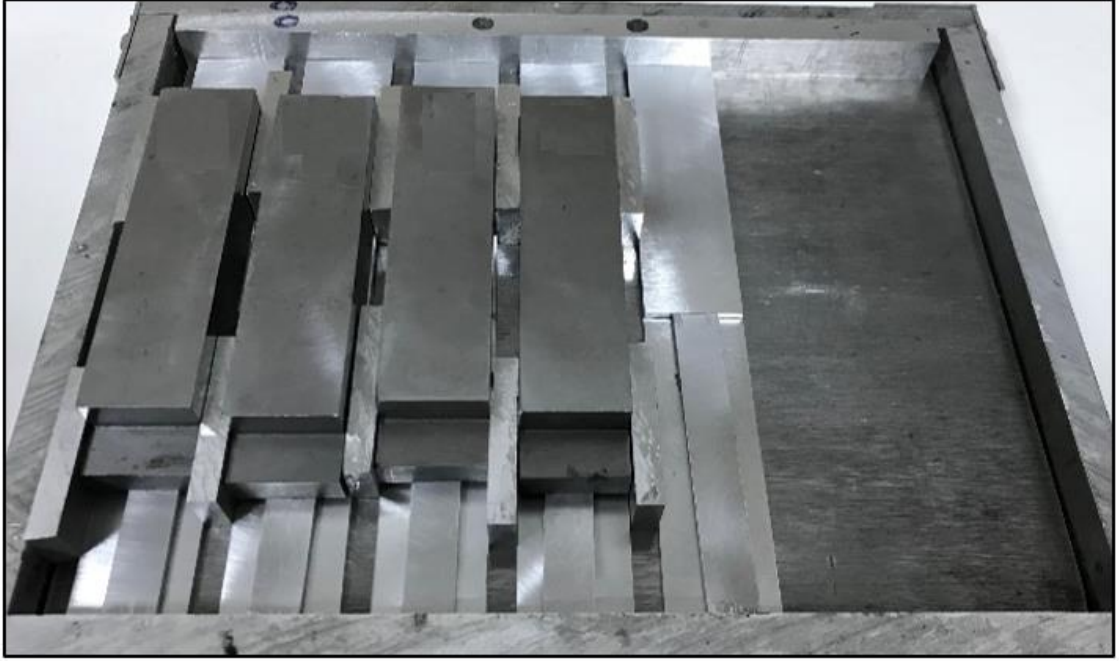
Şekil 3.8. Numunelerin asetonda bekletilmesi.



Şekil 3.9. Etüvde çıkarılmış numunelerin yapıştırılmaya hazır hali.

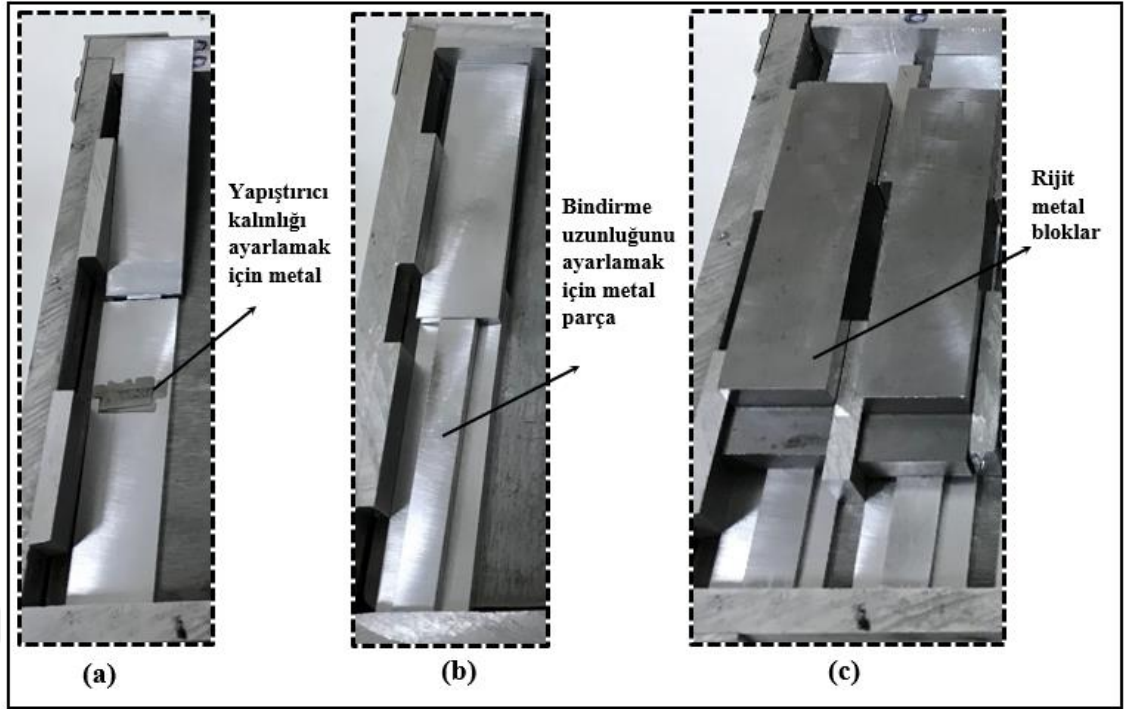
3.3.3. Yapıştırma bağlantılarının hazırlanması

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısı üretmek için Şekil 3.10'da gösterilen özel yapıştırma kalıbına ihtiyaç duyulmaktadır. Kalıp ve yardımcı aparatlar ile istenilen yapıştırıcı kalınlığı, bindirme uzunluğu ve bağlantı kalınlığı yapılabilmektedir.



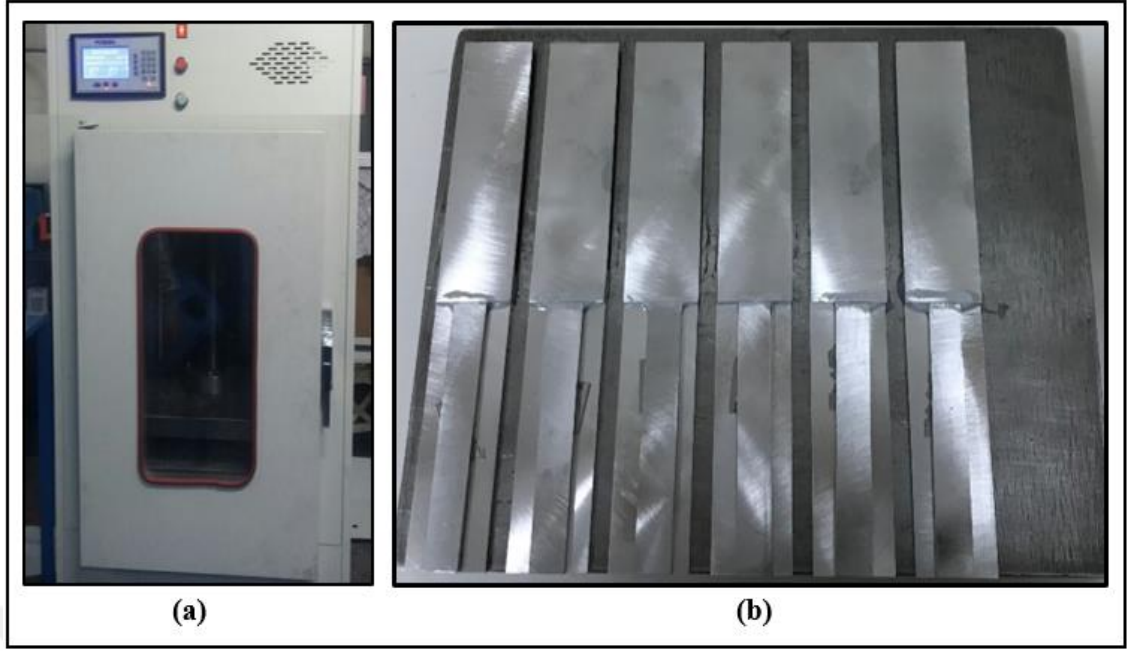
Şekil 3.10. Yapıştırma bağlantılarının üretiminde kullanılan kalıp.

Yapıştırma bağlantılarının üretimi için, yüzey hazırlama işlemi yapılmış yapıştırılan malzeme alınarak kalıp yüzeyine konulur ve ardından yapıştırıcı kalınlığını sağlayacak ince küçük metal parçalar yapıştırılan malzemenin serbest yüzeyine yerleştirilir (Şekil 3.11a). Daha sonra bindirme uzunluğunu ayarlamak için yapıştırılan malzeme kalınlığında metal parçalar yerleştirilir (Şekil 3.11b). Yapıştırma bağlantılarının kürleşme esnasında uygulanacak basıncın üniform uygulanması bağlantı üzerine için rijit metal bloklar konulmuştur (Şekil 3.11c)



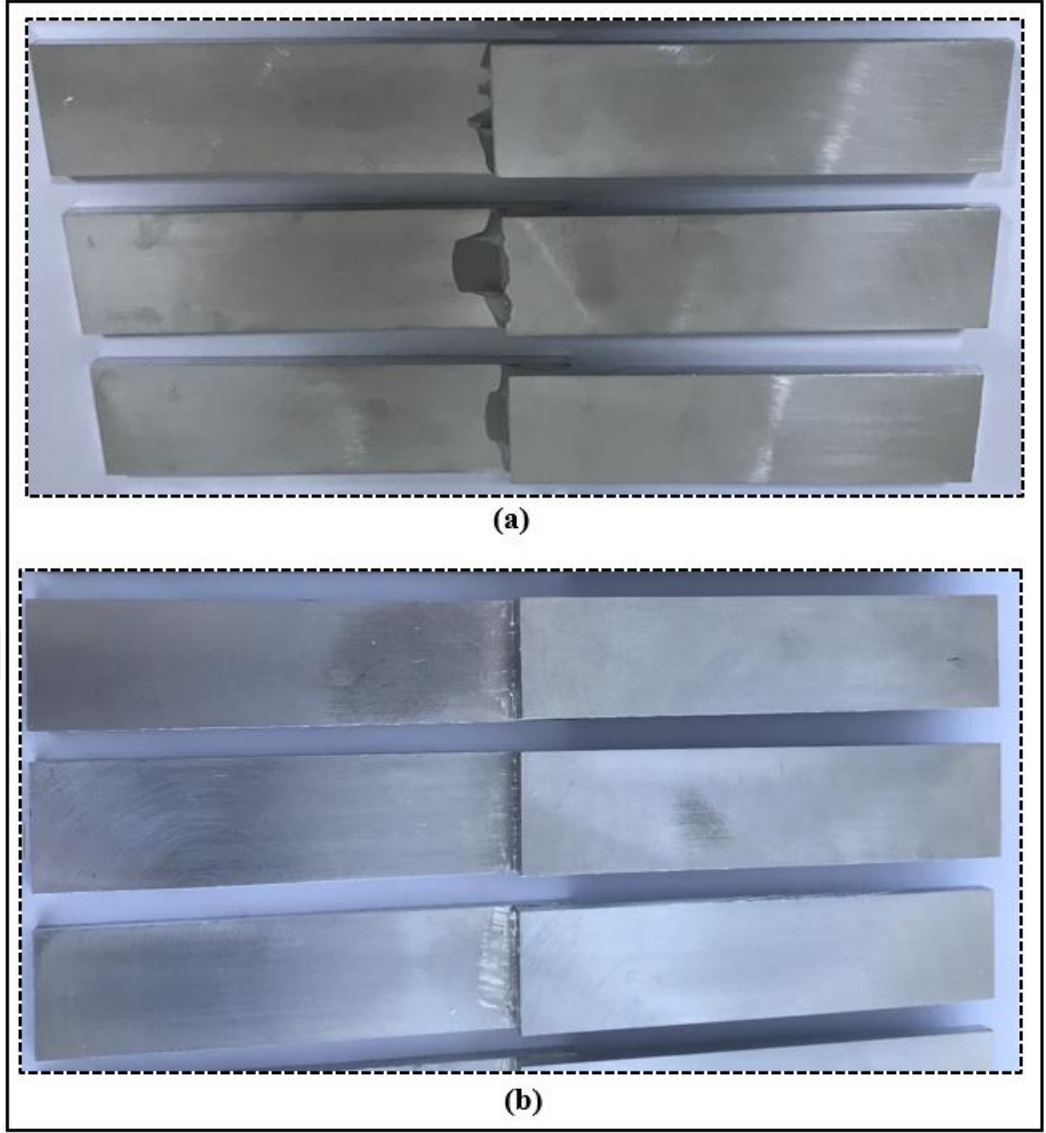
Şekil 3.11. Yapıştırma bağlantısının üretim şeması.

Yapıştırıcının kürleşmesi sıcaklığa ve zamana bağlı olduğundan dolayı, kalıp içerisine yerleştirilmiş yapıştırma bağlantı numuneleri Şekil 3.12a’da gösterilen sıcak prese yerleştirilmiştir. Numuneler 70°C ’ de 120 dakika bekletilerek kürleşmesi sağlanmıştır. Kürleşme işlemi tamamlandıktan sonra numunelerin kalıptan çıkarılması için kalıp sökülmüştür (Şekil 3.12b).



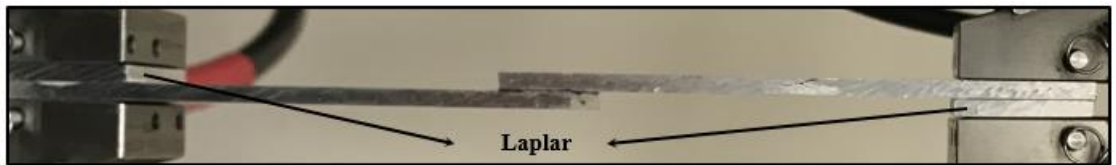
Şekil 3.12. a) Sıcak pres, b) Sıcak presten çıkarılmış numuneler.

Yapıştırıcı kalınlığını ve bindirme uzunluğunu ayarlamak için kullanılan metal parçalar numuneler üzerinden çıkarılmıştır. Kürleşme esnasında fazla kalan yapıştırıcı bindirme bölgesinin serbest kısımlarından dışarı çıkmaktadır (Şekil 3.13a). Dışarı çıkan bu yapıştırıcı bindirme bölgesinin kenarlarında dolgu oluşturmakta ve bu durum bağlantının hasar yükünü etkilemektedir. Bundan dolayı dışarı çıkan bu dolgu yapıştırıcılar kesici takım yardımıyla bağlantıdan temizlenmiştir (Şekil 3.13b).



Şekil 3.13. a) Kürleşme sonrası oluşan dolgular, b) Dolgularından temizlenmiş bağlantı numuneleri.

Tek tesirli bindirme bağlantıların geometrisi göz önüne alındığında, deney sırasında oluşacak eksantrikliği ortadan kaldırmak için cihazın çene kısımlarına denk gelen bağlantının her iki ucuna lap adı verilen yardımcı elemanlar yapıştırılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Deney numuneleri üzerine yapıştırılmış lap'ler.

Yapıştırılan malzeme kalınlığı sırasıyla 2, 3, 4, 5 ve 6 mm olan tek tesirli bindirme bağlantı numunelerinin tümü aynı yöntemle üretilmiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Üretimi tamamlanmış tek tesirli bindirme bağlantıları.

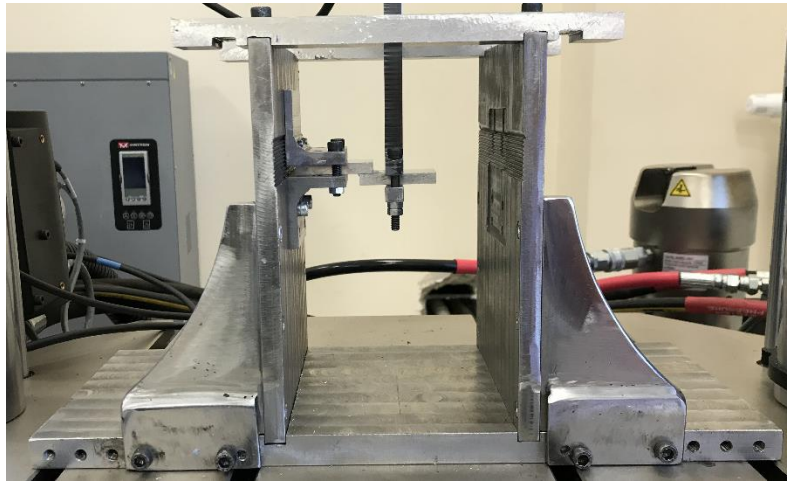
3.4. Yapıştırma Bağlantılarının Deneysel Hasar Yüklerinin Belirlenmesi

Mekanik ve dinamik testlerin tümü Erzurum Teknik Üniversitesi Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezinde (YÜTAM) yapılmıştır. Tek tesirli bindirme bağlantıların statik çeki deneyleri 100 kN yük hücresine sahip bilgisayar kontrollü Instron-5982 (USA) üniversal çekme cihazında 19°C ve %30 nem oranında 1 mm/dak.'lık çeki hızında yapılmıştır. Sınır şartları ve numunelere uygulanan yükleme Şekil 3.16'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.16. Üniversal test cihazı ve sınır şartları.

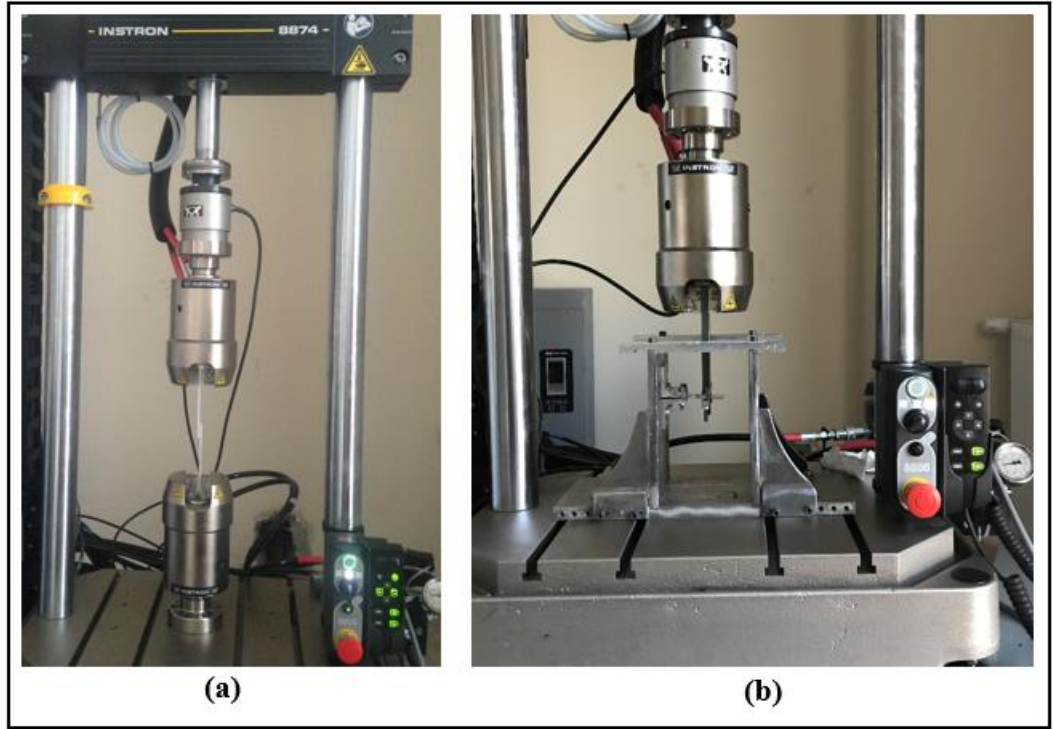
Eğme deneylerin tümü ise 25kN yük hücresine sahip bilgisayar kontrollü Instron 8874 (USA) üniversal statik/dinamik test cihazında 19°C ve %30 nem oranında 5 mm/dak.'lık eğme hızında yapılmıştır. Statik ve tam değişken eğme yükünü uygulayabilmek için Şekil 3.17'de verilen deney aparatı kullanılmıştır. Bu deney aparatı Tübitak 1002-119M666 no'lu proje kapsamında alınmıştır.



Şekil 3.17. Eğme aparatı.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Yapıştırma bağlantıların tam değişken yorulma özelliklerini belirlemek için, deneylerin tümü 25 kN yük hücresine sahip bilgisayar kontrollü Instron 8874 (ABD) üniversal yorulma cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.18). Yorulma testi prosedürleri ASTM D3166 tarafından önerilmekte olup ve bazı araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır (Mactabi vd. 2013; Khashaba vd. 2018; ASTM D3166-99 2012). Tüm yorulma testleri için sinüzoidal dalga formu kullanılmıştır. Çekme ve eğilme deneylerinde kullanılan yük oranları sırasıyla $R=0,1$ ve $R=-1$, yine çekme ve eğilme deneylerinin çalışma frekansları sırasıyla 20 Hz ve 4 Hz'dir. Yorulma deneylerinde kullanılan sınır şartları statik çeki ve eğme deneylerinde kullanılan sınır şartlarıyla aynı olup, sınır şartları Şekil 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.



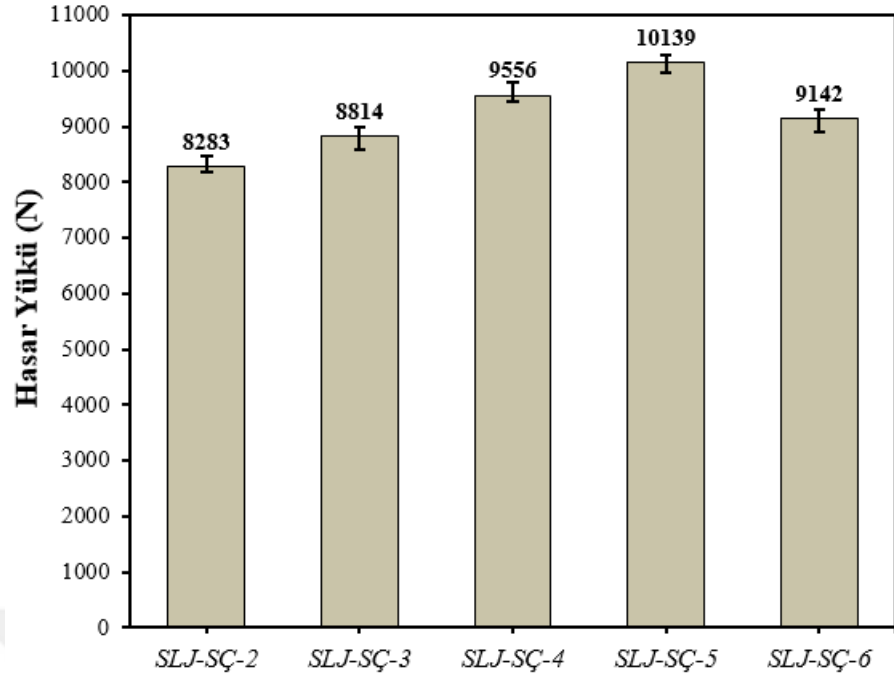
Şekil 3.18. Yorulma cihazı; a) Çeki yükü uygulaması, b) Eğme yükü uygulaması.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışmasında kapsamında ele alınan farklı yapıştırılan malzeme kalınlıklarından üretilmiş tek tesirli yapıştırma bağlantılarının statik ve dinamik test bulgularından bahsedilmektedir. Araştırma bulguları ve tartışma kısmı üç ana başlık altında toplanmıştır.

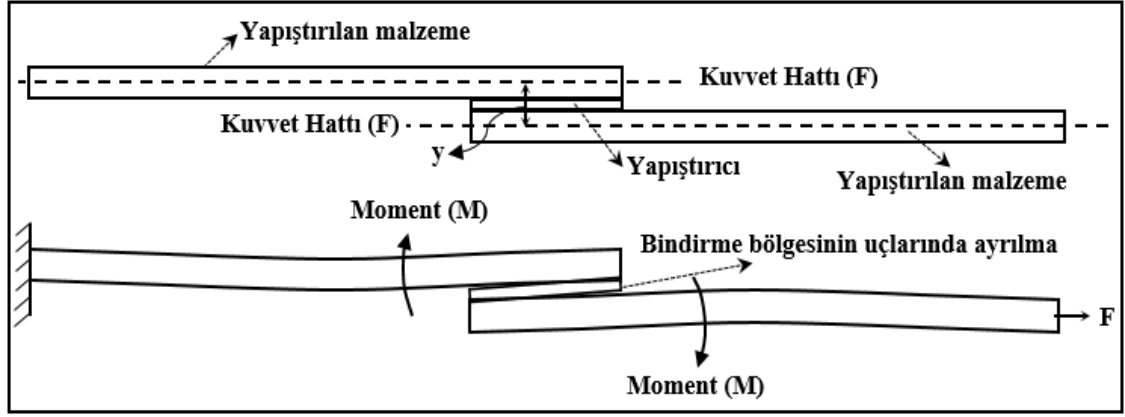
4.1. Yapıştırma Bağlantılarının Statik Dayanımlarının Sonuçları

Öncelikli olarak farklı kalınlıklarda üretilen yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının, statik çekme ve eğme dayanımları belirlenmiştir. DP460 sert yapıştırıcı ile birleştirilmiş beş farklı malzeme kalınlığına sahip tek tesirli bindirme bağlantı geometrisinden (SLJ-SÇ-2, SLJ-SÇ-3, SLJ-SÇ-4, SLJ-SÇ-5 ve SLJ-SÇ-6) üçer numune üretilmiş olup, çeki deneylerinden elde edilen ortalama hasar yükleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1’de verilen bu hasar yükleri incelendiğinde, yapıştırılan malzeme kalınlığının artması bağlantının hasar yükünü artırmaktadır. Yapıştırılan malzeme kalınlığı 2 mm olan bağlantı tipine (SLJ-SÇ-2) göre diğer bağlantı tipleri karşılaştırıldığında, kalınlık 3 mm çıkması (SLJ-SÇ-3) bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 6, kalınlık 4 mm’ye çıkması (SLJ-SÇ-4) bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 15, kalınlık 5 mm’ye çıkması (SLJ-SÇ-5) bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 22 ve kalınlık 6 mm’ye çıkması durumunda ise (SLJ-SÇ-6) bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 10 artırdığı deneysel verilerden anlaşılmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Farklı yapıştırılan malzeme kalınlığına sahip çekme numunelerinin statik dayanımları.

Ancak deneylerden elde edilen bu sonuçları açıklayabilmek için öncelikle yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının hasar mekanizmasının iyi bilinmesi gerekmektedir. Şöyle ki; yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılar çeki yüküne maruz kaldığında, yapıştırılan malzemelerdeki kuvvet hatları ile yapıştırıcı hattı birbiriyle çakışmayıp, Şekil 4.2’de görüldüğü üzere iki hat arasında y kadar bir mesafe bulunmaktadır. Bu y mesafesi bağlantıda bir moment ($M= F*y$) oluşturur. Eksantrik yükmeden dolayı oluşan bu moment bağlantının bindirme bölgesinin uçlarında çatlaklar oluşturur. Bu çatlaklar bağlantının bindirme bölgesinin merkezine doğru ani ilerlemesi ile hasar oluşmaktadır.



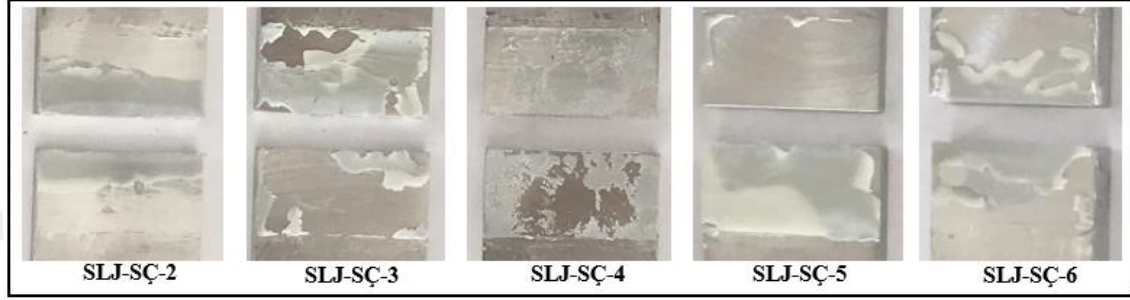
Şekil 4.2. Yapıştırma bağlantılarının hasar mekanizması.

Tek tesirli bindirme bağlantılar için verilen hasar mekanizması göz önüne alındığında, yapıştırılan malzeme kalınlığı 2 mm olan bağlantıda y mesafesi diğer bağlantılara (3,4, 5 ve 6 mm) göre küçüktür. Bundan dolayı oluşan eğilme momenti değeri diğer kalınlıklardan dolayı oluşan eğilme moment değerine göre daha azdır. Ancak malzeme kalınlığının ince olması (2 mm) bağlantının eğilme rijitliğini de (EI) azalttığından dolayı yüklem esnasında bağlantıda enine sapmayı (kalınlık yönündeki yer değiştirme) artırmaktadır. Yapıştırılan malzeme kalınlığını 2 mm den 3, 4 ve 5 mm ye çıkması durumunda, bağlantıların rijitliğindeki artıştan dolayı enine sapma azalmakta ve buda bağlantının hasar yükünü artırmaktadır. Diğer taraftan kalınlığın artması y 'ye bağlı olarak eğilme momentini artırmaktadır. Ancak bağlantının eğilme rijitliğindeki (EI) artma oranı ile eğilme momentindeki (M) artma oranı birbirini dengelemekte olup, bağlantının yük taşıma kapasitesini artırmaktadır.

Malzeme kalınlığı 5 mm den 6 mm ye çıkması, bağlantıların rijitliğini biraz daha artırıp ve buda bindirme bölgesinin uçlarında meydana gelen enine sapmayı biraz daha azaltmaktadır. Ancak kalınlığın 6 mm çıkması eğilme momentini önemli derecede artırmakta olup, enine sapsmadaki azalma ile eğilme momentindeki artış uyumsuz olmaktadır. Bu durum bağlantının yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır.

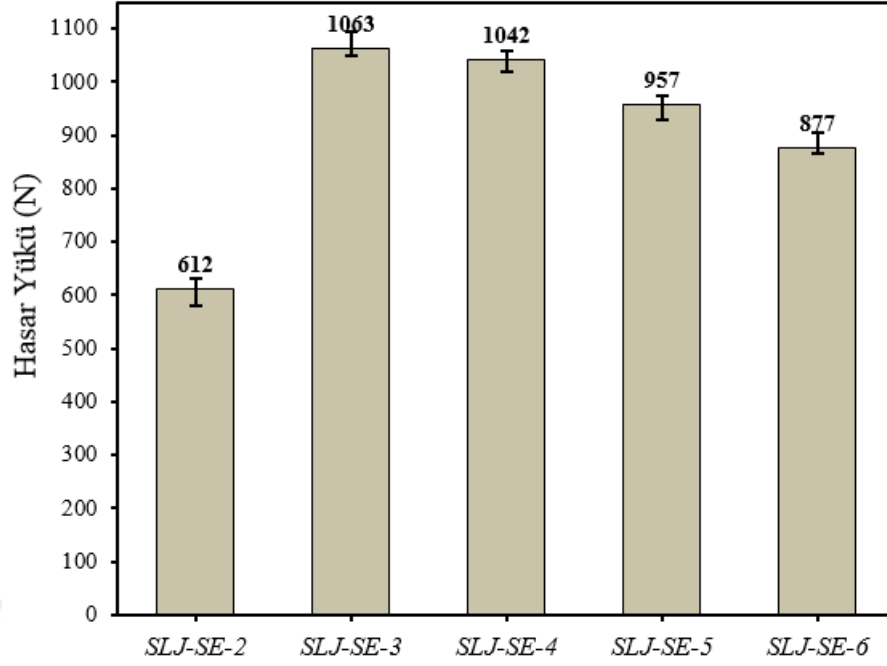
Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin tam olarak anlaşılması için hasar türünün doğru belirlenmesi oldukça önemlidir. Şekil 4.3'te verilen yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarda oluşan hasar tipleri ISO 10365' de tanımlanan hasar tiplerine göre belirlenmiştir. Şekil 4.3'te verilen hasar yüzeyleri incelendiğinde, yapıştırılan malzeme kalınlığı az olan tüm bağlantı tiplerinde

(SLJ-SÇ-2, SLJ-SÇ-3) özel kohezyon hasar (alt ve üst yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabaka kalınlığının aynı olmaması durumu) oluşmaktadır. Ancak yapıştırılan malzeme kalınlığı artığında (SLJ-SÇ-5) hasar tipi özel kohezyon hasardan adhezyon hasara (hasar yapıştırıcı tabakası ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyi arasında oluşur ve yapıştırıcı tabakası alt veya üst malzemede kalma durumu) dönüşmektedir. Yapıştırılan malzeme kalınlığı 6 mm olduğunda hasar tipi tekrar özel kohezyon hasara dönüşmektedir.



Şekil 4.3. Çeki statik yüküne maruz kalan yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri.

Araldite 2015 yapısal yapıştırıcı ile birleştirilerek elde edilen beş farklı malzeme kalınlığına sahip tek tesirli bindirme bağlantı geometrisinden üçer numune üretilmiş olup, bu numunelerin statik eğme testlerinden elde edilen ortalama hasar yükleri Şekil 4.4’de verilmiştir. Şekil 4.4’de verilen bu hasar yükleri incelendiğinde, yapıştırılan malzeme kalınlığının artması bağlantının hasar yükünü artırmaktadır. Yapıştırılan malzeme kalınlığı 2 mm olan bağlantı tipine (SLJ-SE-2) göre diğer bağlantı tipleri karşılaştırıldığında, kalınlık 3 mm çıkması (SLJ-SE-3) bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 74, kalınlık 4 mm’ye çıkması (SLJ-SE-4) bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 70, kalınlık 5 mm’ye çıkması (SLJ-SE-5) bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 56 ve kalınlık 6 mm’ye çıkması durumunda ise (SLJ-SE-6) bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 43 artırdığı deneysel verilerden anlaşılmaktadır (Şekil 4.4).

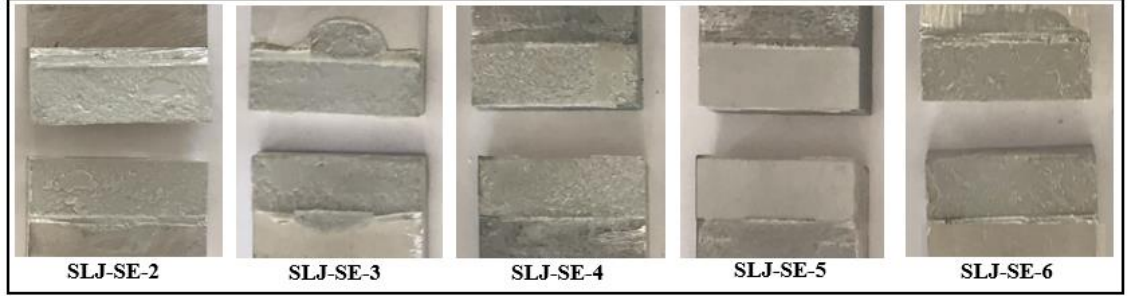


Şekil 4.4. Farklı yapıştırılan malzeme kalınlığına sahip eğme numunelerinin statik dayanımları.

Malzeme kalınlığı 2 mm den 3, 4, 5 ve 6 mm' ye çıkması durumunda, yapıştırılan malzemenin eğilme rijitliği artmaktadır. Bu durum bağlantının hasar yükünü de artırmaktadır. Ancak bağlantının eğilme rijitliğindeki artma oranı ile bağlantının yük taşıma kapasitesini artma oranı aynı olmamaktadır. Bunun nedeni şu şekilde açıklanabilir. Malzeme kalınlığı 2 mm olduğunda, üzerine gelen statik eğme yükü malzemeyi plastik deformasyona uğrattığından dolayı bağlantıdan elde edilen hasar yükü yapıştırıcının mukavemetini yansıtmamaktadır. Malzeme kalınlığı 3 mm olduğunda malzemenin eğilme rijitliği bir miktar arttığı için bağlantının hasar yükü artmaktadır. Ancak malzeme kalınlığı 4, 5 ve 6 mm olduğunda, malzemenin eğilme rijitliği daha fazla arttığından dolayı üzerine gelen statik eğme yükünün büyük bir kısmını yapıştırıcıya aktarmaktadır. Bu durumda yapıştırılan malzemenin kalınlığının artması üzerine gelen eğme yükünü sönmüleme kabiliyetini azaltmaktadır. Bundan dolayı da hasar yükü tekrar azalmaktadır.

Şekil 4.5'te verilen Araldite-2015 yapısal yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarda oluşan hasar tipleri ISO 10365' de tanımlanan hasar tiplerine göre belirlenmiştir. Şekil 4.5'te verilen statik eğme yüküne maruz bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, tüm bağlantı tiplerinde (SLJ-SE-2, SLJ-SE-3, SLJ-SE-4, SLJ-SE-5 ve

SLJ-SE-6) kohezyon hasar (alt ve üst yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabaka kalınlığının aynı olması durumu) oluşmaktadır.



Şekil 4.5. Statik eğme y¼k¼ne maruz yapıştırma bağlantıların hasar y¼zeyleri.

Yapıştırma bağlantılarının statik ¼eki ve eğme dayanımları belirlendikten sonra bağlantıların genel değişken ¼eki ve tam değişken eğme yorulma performansları incelenmiştir. Statik ¼eki ve eğme dayanımları g¼z ¼n¼ne alınarak belirli y¼k oranlarında genel değişken ¼eki ve tam değişken eğme yorulma y¼k¼ uygulanarak bağlantıların S-N grafikleri elde edilmiştir. S-N grafiklerinde genel değişken ¼eki yorulma i¼in 10^6 , tam değişken eğme yorulma i¼in ise 2.10^5 ¼evrim sonsuz ¼m¼r kabul edilmiştir.

4.2. Genel Değişken Çeki Yorulma Yüküne Maruz Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri

Çizelge 4.1 ve Şekil 4.4 'de verilen tek tesirli bindirme bağlantılarının genel değişken çeki yorulma S-N eğrilerini elde etmek için her bir bağlantı tipinin ortalama statik hasar yükünün belirli oranlarında yük uygulanmıştır. Genel değişken çeki yorulma deneyleri R=0,1 yük oranında ve 20 Hz çalışma frekansında yapılmıştır. Her yük seviyesi için beş numune test edilerek ortalama çevrim sayısı elde edildi. S-N eğrilerinde sonsuz ömür olarak 10^6 çevrim kabul edildi.

Çeki yüküne maruz yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında, her iki malzemede oluşan kuvvet hattı kesişmediğinden dolayı eksantrik yükleme oluşmaktadır (Şekil 4.2). Bu eksantrik yüklemeye dolaylı bağlantı bindirme bölgesinin çevresinde eğilme momenti oluşmaktadır. Eğilme momentinin değeri, bağlantıdaki yapıştırılan malzeme kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. Her iki yapıştırılan malzemedeki kuvvet hattı arasındaki mesafe (y) arttıkça bağlantıda oluşan eğilme momentinin değeri artmaktadır. Bu durum bağlantının yük taşıma kapasitesine olumsuz etki etmektedir. Ancak yapıştırılan malzemenin kalınlığının artması atalet momentine bağlı olarak bağlantının eğilme rijitliğini (Elastisite modülü * atalet momenti-E.I) artırmaktadır. Bu durum ise bağlantıda oluşan eğilme momentine karşı bağlantının direncini artırmaktadır.

Genel değişken çeki yorulma deneyleri esnasında yapılan gözlemler sonucu farklı bir durum ortaya çıkmıştır. Şöyle ki, tek tesirli bindirme bağlantılarının çeki yorulma deneylerinde uygulanan saniyede 20 çevrim (20 Hz), bağlantıda eksantrik yükleme sonucu oluşan eğilme momentinden dolayı bağlantıda yanal bir titreşim etkisi oluşturmaktadır. Yapıştırılan malzemenin kalınlığına göre bu titreşimin etkisi değişmektedir.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılar için yukarıda verilen hasar mekanizması ve deneyler esnasında yapılan gözlemlere göre, Çizelge 4.1'de verilen deneysel veriler yorumlanması gerekmektedir. Çizelge 4.1'de verilen deneysel veriler incelendiğinde, yapıştırma bağlantılarına statik hasar yükünün yaklaşık %30'u

uygulandığında (3000 N), yapıştırılan malzeme kalınlığının 2 mm'den 3 mm'ye çıktığında çevrim sayısının düştüğü görülmektedir. Ancak yapıştırılan malzemenin kalınlığı 3 mm'den 4 mm'ye çıktığında çevrim sayısı artmakta olup, 4 mm'den 5 mm'ye çıktığında ise tekrar çevrim sayısı düşmektedir. Yapıştırılan malzemenin kalınlığı 5 mm'den 6 mm'ye çıktığında tekrar çevrim sayısı artmaktadır. Yapıştırılan malzeme kalınlığına bağlı olarak oluşan bu tutarsızlık, bağlantıda oluşan eğilme momenti ile eğilme rijitliği arasındaki ilişki ve uygulanan hasar yükünün yaklaşık %30'u kadar olmasıyla bağlantıda oluşan yanal titreşimin etkisi daha fazla hissedilmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

Ayrıca sonsuz ömür olarak kabul edilen 10^6 çevrim için uygulanan yükler karşılaştırıldığında, yapıştırılan malzeme kalınlığı 2 mm'den (SLJ-ÇY-2) 3 mm'ye çıktığında (SLJ-ÇY-3) uygulanan yük yaklaşık % 6 azalmaktadır (Çizelge 4.1). Ancak malzeme kalınlığı 2 mm'den 4 mm'ye çıktığında (SLJ-ÇY-4) uygulanan yük yaklaşık %12, 5 mm'ye çıktığında (SLJ-ÇY-5) yaklaşık %24 ve 6 mm'ye çıktığında (SLJ-ÇY-4) ise yaklaşık %40 artmaktadır. Bu durum bağlantıda oluşan eğilme momenti ve yapıştırılan malzemenin eğilme rijitliği ile açıklanabilir. Yapıştırılan malzemenin kalınlığının 2 mm olması durumuna göre malzemenin eğilme rijitlikleri ve eğilme momentleri incelendiğinde, malzeme kalınlığı 3 mm olduğunda malzemenin eğilme rijitliği yaklaşık %237 ve eğilme momenti yaklaşık %46, malzeme kalınlığı 4 mm olduğunda malzemenin eğilme rijitliği yaklaşık %700 ve eğilme momenti yaklaşık %92, malzeme kalınlığı 5 mm olduğunda malzemenin eğilme rijitliği yaklaşık %1463 ve eğilme momenti yaklaşık %138 ve malzeme kalınlığı 6 mm olduğunda ise malzemenin eğilme rijitliği yaklaşık %2601 ve eğilme momenti yaklaşık %183 artmaktadır. Yapıştırılan malzemenin kalınlıklarının 2 mm ile 3 mm olan bağlantıların karşılaştırılmasında, yapıştırma bağlantılarında malzemenin eğilme rijitliğine göre bağlantıda oluşan eğilme momentinin etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak malzemenin eğilme rijitliğindeki artış oranı, bağlantıda oluşan eğilme momentinin artış oranından daha fazla olması bağlantının yorulma performansını artırmaktadır.

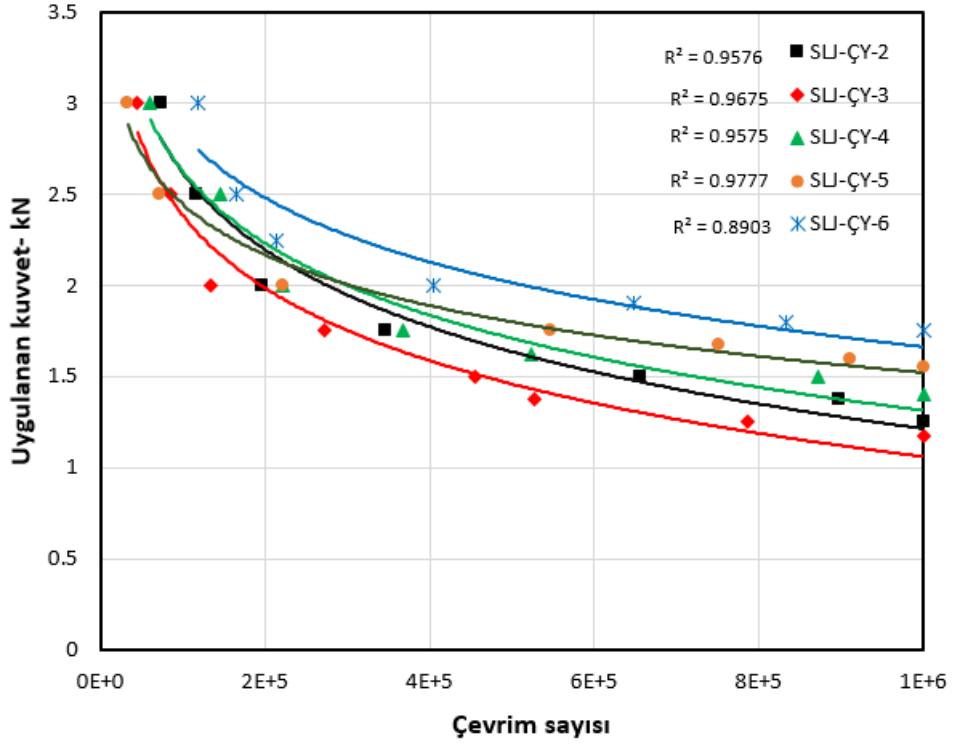
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.1. Genel değişken çeki yorulma yüküne maruz bağlantıların kuvvet ve çevrim sayısı arasındaki ilişkisi.

<i>Bağlantı Tipi</i>	<i>Malzemenin Eğilme Rijitliği (kN mm²)</i>	<i>Bağlantının Eğilme Momenti (M=y.F)</i>	<i>Kuvvet-N</i>	<i>Ortalama Çevrim Sayısı</i>	<i>Uygulanan Yorulma Yükü/Statik Yük</i>
<i>SLJ-ÇY-2a</i>	1206	2,18F	3000	73214	0,36
<i>SLJ-ÇY-2b</i>	1206	2,18F	2500	116125	0,30
<i>SLJ-ÇY-2c</i>	1206	2,18F	2000	195654	0,24
<i>SLJ-ÇY-2d</i>	1206	2,18F	1750	347174	0,21
<i>SLJ-ÇY-2e</i>	1206	2,18F	1500	656727	0,18
<i>SLJ-ÇY-2f</i>	1206	2,18F	1375	897643	0,17
<i>SLJ-ÇY-2g</i>	1206	2,18F	1250	1.000.000	0,15
<i>SLJ-ÇY-3a</i>	4072	3,18F	3000	45515	0,34
<i>SLJ-ÇY-3b</i>	4072	3,18F	2500	84812	0,28
<i>SLJ-ÇY-3c</i>	4072	3,18F	2000	134416	0,23
<i>SLJ-ÇY-3d</i>	4072	3,18F	1750	271567	0,20
<i>SLJ-ÇY-3e</i>	4072	3,18F	1500	456377	0,17
<i>SLJ-ÇY-3f</i>	4072	3,18F	1375	527063	0,16
<i>SLJ-ÇY-3g</i>	4072	3,18F	1250	787441	0,14
<i>SLJ-ÇY-3h</i>	4072	3,18F	1175	1.000.000	0,13
<i>SLJ-ÇY-4a</i>	9653	4,18F	3000	61017	0,31
<i>SLJ-ÇY-4b</i>	9653	4,18F	2500	146124	0,26
<i>SLJ-ÇY-4c</i>	9653	4,18F	2000	221128	0,20
<i>SLJ-ÇY-4d</i>	9653	4,18F	1750	367170	0,18
<i>SLJ-ÇY-4e</i>	9653	4,18F	1625	523854	0,17
<i>SLJ-ÇY-4f</i>	9653	4,18F	1500	871953	0,16
<i>SLJ-ÇY-4g</i>	9653	4,18F	1400	1.000.000	0,15
<i>SLJ-ÇY-5a</i>	18854	5,18F	3000	33572	0,30
<i>SLJ-ÇY-5b</i>	18.54	5,18F	2500	72306	0,25
<i>SLJ-ÇY-5c</i>	18854	5,18F	2000	220997	0,20
<i>SLJ-ÇY-5d</i>	18854	5,18F	1750	546435	0,17
<i>SLJ-ÇY-5e</i>	18854	5,18F	1675	752478	0,16
<i>SLJ-ÇY-5f</i>	18854	5,18F	1600	911374	0,16
<i>SLJ-ÇY-5g</i>	18854	5,18F	1550	1.000.000	0,15
<i>SLJ-ÇY-6a</i>	32580	6,18F	3000	118736	0,33
<i>SLJ-ÇY-6b</i>	32580	6,18F	2500	164553	0,27
<i>SLJ-ÇY-6c</i>	32580	6,18F	2250	214862	0,25
<i>SLJ-ÇY-6d</i>	32580	6,18F	2000	404381	0,22
<i>SLJ-ÇY-6e</i>	32580	6,18F	1900	648614	0,21
<i>SLJ-ÇY-6f</i>	32580	6,18F	1800	832672	0,20
<i>SLJ-ÇY-6g</i>	32580	6,18F	1750	1.000.000	0,19

Şekil 4.6’da verilen yapıştırma bağlantıların S-N eğrileri incelendiğinde iki önemli sonuca ulaşılmaktadır. Bunlardan birincisi, yapıştırma bağlantıların S-N eğrileri non-lineer formunda olmasıdır. Bunun nedeni yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcının şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil değiştirme

kabiliyeti düşük olan malzemeler (çelik türü metalik malzemeler) yorulmaya maruz kaldığında S-N eğrileri genellikle lineer olmaktadır. Yapıştırma bağlantılarının deneylerden elde edilen bu non-linear S-N eğrileri, yapılan deneylerin doğruluğunu göstermektedir.



Şekil 4.6. Farklı yapıştırılan malzeme kalınlığına sahip bağlantıların çeki S-N grafiklerinin karşılaştırması.

İkinci önemli sonuç ise, tek tesirli bindirme bağlantılarında eksantrik yüklemekten dolayı oluşan eğilme momentin etkisi uygulanan maksimum kuvvetin artmasıyla daha fazla olmasıdır. Şöyle ki, deneyler esnasında yapılan gözlemlerde, bağlantıya 300/3000 N ($R=0,1$)'luk maksimum çeki kuvveti uygulandığında, eksantrik yüklemekten dolayı yanal yönde titreşim olduğu görülmüştür. Fakat uygulanan kuvvet seviyesi azaldığında, oluşan bu titreşimin de azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yapıştırılan malzeme kalınlığının artması malzemenin eğilme rijitliğini artırdığından dolayı, bağlantıda oluşan eğilme momentini sönmüleme kabiliyetini artırmaktadır. Bu durum Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, yapıştırılan malzeme kalınlığının artması bağlantının yorulma dayanım limitini önemli derecede artırmaktadır.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin tam olarak anlaşılması için hasar türünün doğru belirlenmesi oldukça önemlidir. Şekil 4.6'da verilen

yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarda oluşan hasar tipleri ISO 10365' de tanımlanan hasar tiplerine göre belirlenmiştir. Şekil 4.7'de verilen hasar yüzeyleri incelendiğinde, yüksek yük seviyeleri ve düşük çevrimlere maruz tüm bağlantı tiplerinde özel kohezyon hasar (alt ve st yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabaka kalınlığının aynı olmaması durumu) oluşmaktadır.

Ancak tüm bağlantı tiplerinde uygulanan maksimum yük seviyesi azaldığında ve çevrim sayısı artığında hasar tipi özel kohezyon hasardan adhezyon hasara (hasar yapıştırıcı tabakası ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyi arasında oluşur ve yapıştırıcı tabakası alt veya st malzemede kalma durumu) dönüşmektedir. Literatürde yapılan çalıŐmalara göre (Kim M.H. and Hong H.S (2018)) bu durum çatlak büyümesi yönüyle ilişkilidir. Tüm bağlantı tiplerinde, yorulma dayanım limitine (sonsuz çevrim- 10^6) yakın çevrimlerde adhezyon hasar tipi oluşmaktadır. eki yorulma deneyleri sonrası yapılan incelemede, yapıştırılan malzemelerde plastik deformasyon oluŐmamıŐtır.



Şekil 4.7. Çeki yorulma yüküne maruz yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri.

4.3. Tam Değişken Eğme Yorulma Yüküne Maruz Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri

Tek tesirli bindirme bağlantıların tam değişken eğme yorulma S-N eğrilerini elde etmek için her bir bağlantı tipinin ortalama statik hasar yükünün belirli oranlarında yük uygulanmıştır. Tam değişken eğme yorulma deneylerinde yapıştırıcı olarak Araldite 2015 yapısal yapıştırıcı kullanılmış olup, bindirme uzunluğu 7,5 mm'dir. Deneyler R=-1 yük oranında ve 4 Hz çalışma frekansında yapılmış olup, her bir yük seviyesi için beş numune test edilerek ortalama çevrim sayısı elde edilmiştir. Tam değişken eğme yorulma S-N eğrilerinde sonsuz ömür olarak 2.10^5 çevrim kabul edilmiştir.

Çizelge 4.2'de verilen tam değişken eğme yorulmaya maruz bağlantıların sonuçları incelendiğinde, yapıştırılan malzeme kalınlığının artması bağlantının çevrim sayısını önemli derecede etkilemektedir. Bağlantıların statik hasar yüklerinin yaklaşık % 47'sine karşılık gelen yorulma yükleri göz önüne alındığında, malzeme kalınlığı 2 mm olan bağlantılarda (SLJ-EY-2c) hasar yaklaşık 17000 çevrimde oluşurken, malzeme kalınlığı 3 mm olduğunda (SLJ-EY-3a) hasar 1190 çevrimde, malzeme kalınlığı 4 mm olduğunda (SLJ-EY-4a) hasar yaklaşık 1250 çevrimde, malzeme kalınlığı 5 mm olduğunda (SLJ-EY-5b) hasar 2570 çevrimde ve malzeme kalınlığı 6 mm olduğunda (SLJ-EY-6c) hasar yaklaşık 12000 çevrimde olmaktadır. Statik eğme hasar yükünün yaklaşık % 47'si kadar büyük bir yorulma yükünde, yapıştırılan malzeme kalınlığı ince olması (2 mm) yapıştırılan malzemenin yer değiştirmesi fazla olduğundan uygulanan yorulma yükünün yapıştırıcıya etkisini azaltmaktadır. Malzeme kalınlığı 3 mm'ye çıktığında, malzemenin eğilme rijitliği bir miktar arttığı ve yer değiştirme miktarı azaldığı için çevrim sayısı önemli derecede düşmektedir. Ancak malzeme kalınlığı 4, 5 ve 6 mm'ye çıktığında ise, uygulanan yorulma yükü yapıştırılan malzeme tarafından karşılanmasından dolayı çevrim sayısı tekrar artmaktadır.

Diğer taraftan sonsuz ömür olarak kabul edilen çevrimde (2.10^5 çevrim) statik hasar yükü oranları incelendiğinde, 2 mm kalınlığına sahip bağlantılar (SLJ-EY-2h) statik hasar yükünün yaklaşık %12'sinde, 3 mm kalınlığına sahip bağlantılar (SLJ-EY-3g) yaklaşık %14'ünde, 4 mm kalınlığına sahip bağlantılar (SLJ-EY-4g) yaklaşık %19'unda, 5 mm kalınlığına sahip bağlantılar (SLJ-EY-5g) yaklaşık %26'sında ve 6 mm kalınlığına

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

sahip bağlantılar (SLJ-EY-3g) ise yaklaşık %31’inde sonsuz ömür çevrimine ulaşmaktadır (Çizelge 4.2).

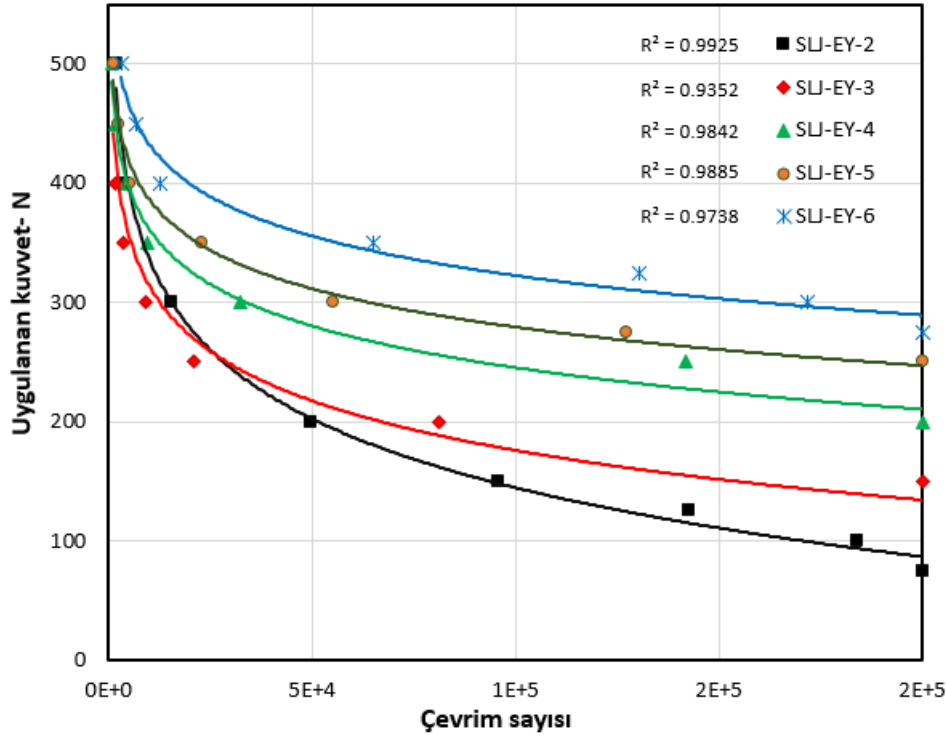
Çizelge 4.2. Tam değişken eğme yorulma yüklemelerine maruz bağlantıların kuvvet ve çevrim sayısı arasındaki ilişki.

<i>Bağlantı Tipi</i>	<i>Malzemenin Eğilme Rijitliği (kN mm²)</i>	<i>Kuvvet N</i>	<i>Ortalama Çevrim Sayısı</i>	<i>Uygulanan Yorulma Yüğü/Statik Yüğü</i>
SLJ-EY-2a	1206	500	1800	0,82
SLJ-EY-2b	1206	400	3532	0,65
SLJ-EY-2c	1206	300	15322	0,49
SLJ-EY-2d	1206	200	49771	0,33
SLJ-EY-2e	1206	150	95839	0,25
SLJ-EY-2f	1206	125	142513	0,20
SLJ-EY-2g	1206	100	183952	0,16
SLJ-EY-2h	1206	75	200000	0,12
SLJ-EY-3a	4072	500	1190	0,47
SLJ-EY-3b	4072	400	1599	0,38
SLJ-EY-3c	4072	350	3796	0,33
SLJ-EY-3d	4072	300	8958	0,28
SLJ-EY-3e	4072	250	21056	0,24
SLJ-EY-3f	4072	200	81188	0,19
SLJ-EY-3g	4072	150	200000	0,14
SLJ-EY-4a	9653	500	1130	0,48
SLJ-EY-4b	9653	450	1678	0,43
SLJ-EY-4c	9653	400	3964	0,38
SLJ-EY-4d	9653	350	9348	0,34
SLJ-EY-4e	9653	300	32188	0,29
SLJ-EY-4f	9653	250	141657	0,24
SLJ-EY-4g	9653	200	200000	0,19
SLJ-EY-5a	18854	500	1150	0,52
SLJ-EY-5b	18854	450	2570	0,47
SLJ-EY-5c	18854	400	5077	0,42
SLJ-EY-5d	18854	350	22889	0,37
SLJ-EY-5e	18854	300	55043	0,31
SLJ-EY-5f	18854	275	127234	0,29
SLJ-EY-5g	18854	250	200000	0,26
SLJ-EY-6a	32580	500	3096	0,57
SLJ-EY-6b	32580	450	6740	0,51
SLJ-EY-6c	32580	400	12774	0,46
SLJ-EY-6d	32580	350	64993	0,40
SLJ-EY-6e	32580	325	130240	0,37
SLJ-EY-6f	32580	300	171857	0,34
SLJ-EY-6g	32580	275	200000	0,31

Ayrıca yapıştirılan malzeme kalınlığının 2 mm olması durumuna göre (SLJ-EY-2h) malzemenin eğilme rijitlikleri ve $2 \cdot 10^5$ çevrim için uygulanan yükler karşılaştırıldığında, malzeme kalınlığı 3 mm olduğunda (SLJ-EY-3g) malzemenin eğilme

rijitliği yaklaşık %237 ve yorulma yükü yaklaşık %100, malzeme kalınlığı 4 mm olduğunda (SLJ-EY-4g) malzemenin eğilme rijitliği yaklaşık %700 ve yorulma yükü yaklaşık %167, malzeme kalınlığı 5 mm olduğunda (SLJ-EY-5g) malzemenin eğilme rijitliği yaklaşık %1463 ve yorulma yükü yaklaşık %234 ve malzeme kalınlığı 6 mm olduğunda (SLJ-EY-6g) ise malzemenin eğilme rijitliği yaklaşık %2601 ve yorulma yükü yaklaşık %267 artmaktadır. Yapıştırılan malzemenin eğilme rijitliğinin artması bağlantının tam değişken eğme yorulma dayanım limitini önemli derecede artırdığı sonucu çıkarılabilir. Bunun nedeni olarak; yapıştırılan malzeme kalınlığı arttıkça, malzemenin eğilmede ki yer değiştirme miktarı azaldığı ve uygulanan yorulma yükünün önemli bir kısmı yapıştırılan malzeme tarafından karşılanmasından dolayı olduğu söylenebilir.

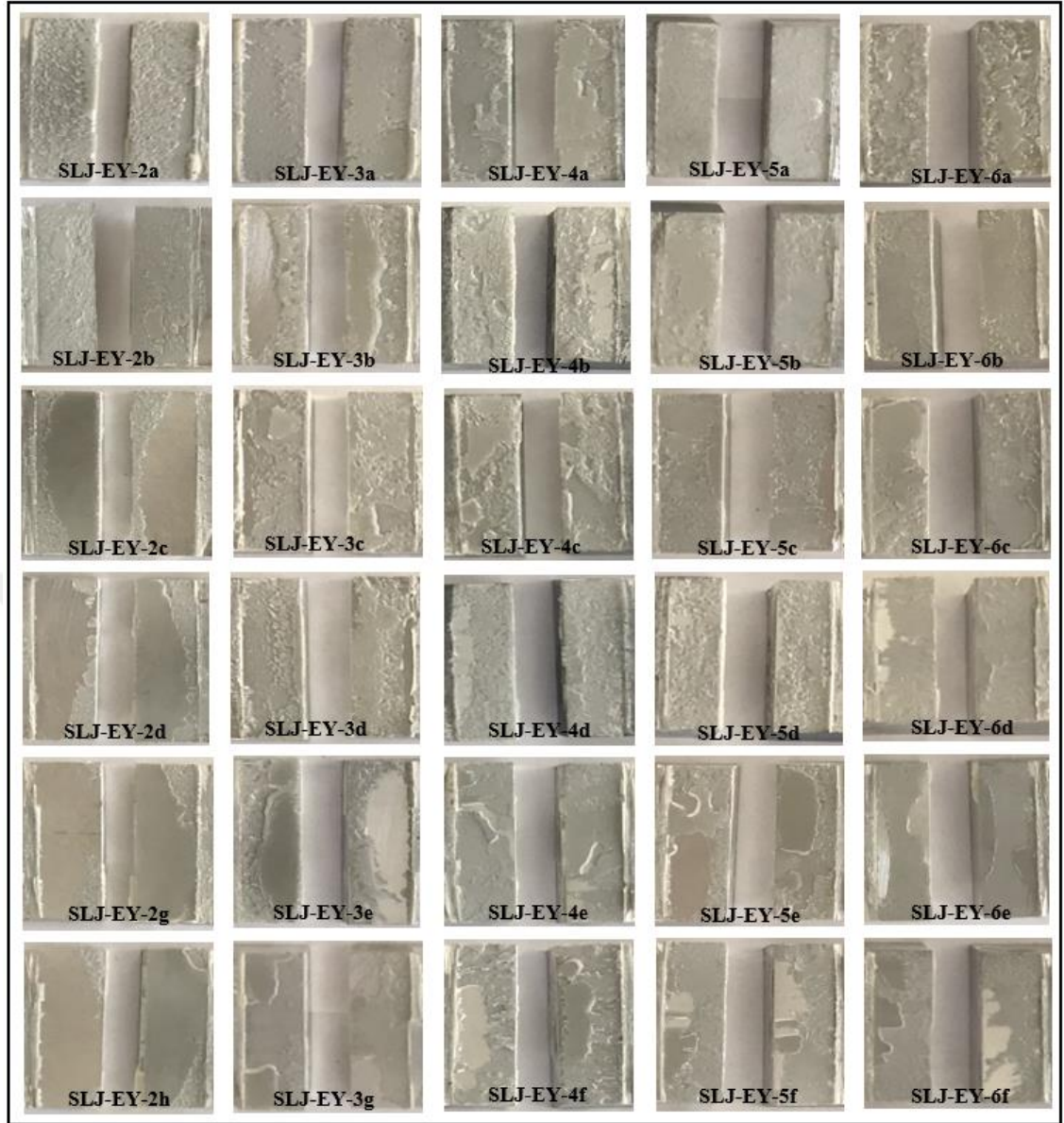
Şekil 4.8’de verilen eğme yorulma yüküne maruz yapıştırma bağlantılarının S-N eğrileri incelendiğinde, yapıştırma bağlantılarında kullanılan hem yapıştırıcının hem de yapıştırılan malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti yüksek olmasından dolayı eğrilerin non-linear formda olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8. Farklı yapıştırılan malzeme kalınlığına sahip bağlantıların eğme S-N grafiklerinin karşılaştırması.

Ayrıca 5.10^4 çevrime kadar olan kısımda non-lineerliğin daha fazla olduğu 5.10^4 çevrimden sonra non-lineerliğin azalarak lineer eğriye dönüőtüđu Şekil 4.8’de görölmektedir. Bunun nedeni 5.10^4 çevrime kadar olan kısımda uygulanan tam değişken yorulma yükünün büyük olması bağlantıda oluşan yer değiştirmeyi artırmasından kaynaklandığı söylenebilir. Tam değişken eğme yorulma yüküne maruz bağlantılarda en iyi sonucun 6 mm malzeme kalınlığına sahip bağlantılardan (SLJ-EY-6) elde edilmiştir.

Şekil 4.9’da verilen yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarda tam değişken eğme yorulma sonrası oluşan hasar tipleri ISO 10365’ de tanımlanan hasar tiplerine göre belirlenmiştir. Şekil 4.9’da verilen hasar yüzeylei incelendiğinde, maksimum yük seviyeleri ve düşük çevrimlere maruz tüm bağlantı tiplerinde (SLJ-EY-2a ve b, SLJ-EY-3a ve b, SLJ-EY-4a ve b, SLJ-EY-5a ve b, SLJ-EY-6a ve b) hem alt hem de üst yapıştırılan malzemede yapıştırıcı tabakasının kaldığı görölr. Bu yüzden bu bağlantı tipleri için kohezyon hasar (yapıştırıcı tabaka hasarı) tipinin meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 4.9. Eğme yorulma yüküne maruz yapıştırma bağlantılarının hasar yüzeyleri.

Ancak diğer bağlantı tiplerinde uygulanan maksimum yük seviyesi azaldığında ve çevrim sayısı artığında hasar tipi kohezyon hasardan özel kohezyon hasara (alt ve üst yapıştırılan malzemede kalan yapıştırıcı tabaka kalınlığının aynı olması durumu) dönüşmektedir. Bunun nedeni çevrim sayısının artmasıyla bağlantıda oluşan sıcaklığın çatlak büyüme yönünü etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Tam değişken yorulma deneyleri sonrası yapıştırılan malzemeler üzerinde yapılan incelemede, maksimum yorulma yüküne maruz 2 mm malzeme kalınlığına sahip bağlantılar (SLJ-EY-2a) hariç yapıştırılan malzemelerde plastik deformasyon oluşmadığı görülmüştür.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, tek tesirli bindirme bağlantısının genel değişken çeki ve tam değişken eğme yorulma yükü altında malzeme kalınlığının hasar yüküne etkisi incelenmiştir. Tezde yapıştırılan malzeme olarak havacılık sektöründe kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve yapıştırıcı olarak ise DP460 ve Araldite 2015 yapısal yapıştırıcılar kullanılmıştır. Bağlantının yorulma hasarına yapıştırılan malzeme kalınlığının etkisini inceleyebilmek için 2, 3, 4, 5 ve 6 mm kalınlığına sahip malzemeler kullanılmıştır. Bu tez kapsamında ilk önce farklı malzeme kalınlığına sahip yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının statik çeki ve eğme hasar yükleri belirlenmiştir. Daha sonra bu bağlantıların çeki ve eğme hasar yükünün belirli oranlarında 10^6 çevrim (kabul edilen sonsuz ömür çevrimi) genel değişken çeki ve tam değişken eğme yorulma yükü uygulanarak S-N grafikleri elde edilmiştir. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar özet olarak aşağıda verilmiştir.

- ❖ Yapıştırılan malzeme kalınlığının artması bağlantının statik çeki hasar yükünü artırmaktadır. Yapıştırılan malzeme kalınlığı 2 mm olan bağlantı tipine göre hasar yükündeki bu artış, 3 mm kalınlığa sahip bağlantılarda yaklaşık % 6, 4 mm kalınlığı sahip bağlantılarda yaklaşık % 15, 5 mm kalınlığa sahip bağlantılarda yaklaşık % 22 ve 6 mm kalınlığa sahip bağlantılarda yaklaşık % 10 olmaktadır.
- ❖ Statik eğme yüküne maruz bağlantılardan elde edilen hasar yüklerine göre, yapıştırılan malzeme kalınlığı 2 mm'den 3 mm'ye çıkması durumunda bağlantının hasar yükü yaklaşık % 74, 4 mm'ye çıkması durumunda yaklaşık % 70, 5 mm'ye çıkması durumunda yaklaşık % 56 ve 6 mm'ye çıkması durumunda ise yaklaşık % 43 arttığı deneysel olarak elde edilmiştir.
- ❖ Yapıştırma bağlantılarına statik hasar yükünün yaklaşık %30'u kadar çeki yorulma yükü uygulandığında, yapıştırılan malzeme kalınlığının 2 mm'den 3 mm'ye çıktığında çevrim sayısının düştüğü, 3 mm'den 4 mm'ye çıktığında çevrim sayısı arttığı, 4 mm'den 5 mm'ye çıktığında çevrim sayısı düştüğü ve 5 mm'den 6 mm'ye çıktığında ise tekrar çevrim sayısı arttığı görülmüştür. Yapıştırılan

malzeme kalınlığına bağılı olarak oluşan bu tutarsızlık, bağlantıda oluşan eğilme momenti ile eğilme rijitliği arasındaki ilişki ve uygulanan yük hasar yükünün yaklaşık %30'u kadar olmasıyla bağlantıda oluşan yanal titreşimin etkisi daha fazla hissedilmesinden kaynaklanmaktadır.

- ❖ Ayrıca sonsuz ömür olarak kabul edilen 10^6 çevrim çeki yorulma yükü uygulandığında, yapıştırılan malzeme kalınlığı 2 mm'den 3 mm'ye çıktığında uygulanan yük yaklaşık % 6 azalmaktadır. Ancak malzeme kalınlığı 2 mm'den 4 mm'ye çıktığında uygulanan yük yaklaşık %12, 5 mm'ye çıktığında yaklaşık %24 ve 6 mm'ye çıktığında ise yaklaşık %40 artmaktadır.
- ❖ Statik eğme hasar yükünün yaklaşık % 47'si kadar büyük bir yorulma yükünde, yapıştırılan malzeme kalınlığı ince olması (2 mm) yapıştırılan malzemenin yer değiştirmesi fazla olduğundan uygulanan yorulma yükünün yapıştırıcıya etkisini azaltmaktadır. Malzeme kalınlığı 3 mm'ye çıktığında, malzemenin eğilme rijitliği bir miktar arttığı ve yer değiştirme miktarı azaldığı için çevrim sayısı önemli derecede düşmektedir. Ancak malzeme kalınlığı 4, 5 ve 6 mm'ye çıktığında ise, uygulanan yorulma yükü yapıştırılan malzeme tarafından karşılanmasından dolayı çevrim sayısı tekrar artmaktadır.
- ❖ Tam değişken eğme yorulma yüküne maruz bağlantıların sonsuz ömür olarak kabul edilen çevrime ($2 \cdot 10^5$ çevrim) ulaşmada uygulanan statik hasar yükü oranları incelendiğinde, 2 mm kalınlığına sahip bağlantılar statik hasar yükünün yaklaşık %12'sinde, 3 mm kalınlığına sahip bağlantılar yaklaşık %14'ünde, 4 mm kalınlığına sahip bağlantılar yaklaşık %19'unda, 5 mm kalınlığına sahip bağlantılar yaklaşık %26'sında ve 6 mm kalınlığına sahip bağlantılar ise yaklaşık %31'inde sonsuz ömür çevrimine ulaşmaktadır.
- ❖ Ayrıca tam değişken eğme yorulma yüküne maruz bağlantılardan elde edilen S-N grafiğe göre, $5 \cdot 10^4$ çevrime kadar olan kısımda non-lineerliğin daha fazla olduğu $5 \cdot 10^4$ çevrimden sonra non-lineerliğin azalarak lineer eğriye dönüştüğü görülmektedir. Bunun nedeni $5 \cdot 10^4$ çevrime kadar olan kısımda uygulanan tam

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

değişken eğme yorulma yükünün büyük olması bağlantıda oluşan yer değiştirmeyi artırmasından kaynaklandığı söylenebilir.



KAYNAKLAR

- Adams, R. D. 1984. Structural Adhesive Joints in Engineering Master thesis, University of Bristol, UK.
- Akpınar, I. A. Gültekin, K. Akpınar, S. Gürses, A. ve Özel, A. 2016. "An experimental study on composite adhesives reinforced with different types of organo-clays." *The Journal of Adhesion* 94(2): 124-142.
- Akpınar, S. Gültekin, K. ve Özel, A. 2014. "The effect of the adherend width on the strength of adhesively bonded single-lap joint_ Experimental and numerical analysis", *Composites Part B: Engineering*, 60: 736-745.
- ASTM D3166-99., 2012. 'Standard Test Method for Fatigue Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading'
- Aydın, M. D. Özel, A. ve Temiz, Ş. 2005. "The effect of adherend thickness on the failure of adhesively-bonded single-lap joints." *Journal of Adhesion Science and Technology* 19(8): 705-718.
- Azari, S. Ameli, A. Papini, M. and Spelt, J.K. 2013. "Adherend thickness influence on fatigue behavior and fatigue failure prediction of adhesively bonded joints", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 48: 181-91.
- Azari, S. Jhin, G. Papini, M. and Spelt, J.K. 2014. "Fatigue threshold and crack growth rate of adhesively bonded joints as a function of load/displacement ratio", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 57: 59-66.
- Bertin, L. 2014. "Tensile Strength of Automotive Aluminum Joints Using Resistance Spot Welding, Self-Piercing Riveting and Adhesive Hybrid Joining Master", University of Windsor.
- Bharti, S. 2018. "Adhesives and Adhesion Technologies: A Critical Review." *American Journal of Polymer Science and Technology* 4(1).
- Durmuş, M. ve Akpınar, S. 2020. "The experimental and numerical analysis of the adhesively bonded three-step-lap joints with different step lengths." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 105.
- Ebnesajjad, S. 2014. *Theories of Adhesion. Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding*: 77-91.
- Gültekin, K. Akpınar, S. ve Özel, A. 2015. "The Effect of Moment and Flexural Rigidity of Adherend on the Strength of Adhesively Bonded Single Lap Joints." *The Journal of Adhesion* 91(8): 637-650.
- Kadioglu, F. Avil, E. Ercan, M. E. ve Aydoğan, T. 2018. "Effects of different overlap lengths and composite adherend thicknesses on the performance of adhesively-bonded joints under tensile and bending loadings." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 369.
- Kanar, B. Akpınar, S. Akpınar, I. A. Akbulut, H. ve Özel, A. 2018. "The fracture behaviour of nanostructure added adhesives under ambient temperature and thermal cyclic conditions", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 97: 120-130.

- Karachalios, E. F. Adams, R. D. and da Silva, L. F. M. 2013. "The behaviour of single lap joints under bending loading", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27: 1811-27.
- Katnam, K. B. Crocombe, A. D. Khoramishad, H. and Ashcroft, I. A. 2010. "Load Ratio Effect on the Fatigue Behaviour of Adhesively Bonded Joints: An Enhanced Damage Model", *The Journal of Adhesion*, 86: 257-72.
- Kazaz, I. Akpınar, S. ve Özel 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: 1627-1638.
- Khashaba, U.A. and Najjar, I.M.R. 2018. "Adhesive layer analysis for scarf bonded joint in CFRE composites modified with MWCNTs under tensile and fatigue loads", *Compos Struct*, 184, 411–27.
- Khoramishad, H. Akhavan-Safar, A. Ayatollahi, M. R. and da Silva, L. F. M. 2016. "Predicting static strength in adhesively bonded single lap joints using a critical distance based method: Substrate thickness and overlap length effects", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 231: 237-46.
- Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, and I.A. Ashcroft., 2010. 'A generalised damage model for constant amplitude fatigue loading of adhesively bonded joints ', *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30: 513-21.
- Khoramishad, H. Crocombe, A.D. Katnam, K.B. and Ashcroft, I.A. 2011. "Fatigue damage modelling of adhesively bonded joints under variable amplitude loading using a cohesive zone model", *Engineering Fracture Mechanics*, 78: 3212-25.
- Kinloch, A. J. 1987. "Adhesion and Adhesives Science and Technology", Springer Netherlands.
- Kuenzi, E. W. and Stevens, G. H. 1963. "Determination of mechanical properties of adhesives for use in the design of bonded joints".
- Lee, Dai Gil, Ki Soo Kim, and Yong-Taek Im. 1991. "An Experimental Study of Fatigue Strength for Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints", *The Journal of Adhesion*, 35: 39-53.
- Mactabi, R. Rosca, L.D. and Hoa, S.V. 2013. "Monitoring the integrity of adhesive joints during fatigue loading using carbon nanotubes", *Compos Sci Technol*, 78, 1–9.
- Mariam, M. Afendi, M. Abdul Majid, M.S. Ridzuan, M.J.M. and Gibson, A.G. 2018. "Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminium alloy_glass fibre reinforced composites fabricated with different joining methods", *Composites structure*, 200: 647-58.
- Özer, H. 2018. "Introductory Chapter: Structural Adhesive Bonded Joints", *Applied Adhesive Bonding in Science and Technology*.
- Pedersen, M. M. 2018. "Introduction to Metal Fatigue", *Concepts and Engineering Approaches*, 83: 98.
- Pereira, A. M., P. N. B. Reis, and J. A. M. Ferreira., 2015. 'Effect of the mean stress on the fatigue behaviour of single lap joints', *The Journal of Adhesion*, 93: 504-13.
- Rao, S. S. 2018. "The Finite Element Method in Engineering", *Katey Birtcher*.

- Reis, P.N.B. Monteiro, J.F.R. Pereira, A.M. Ferreira, J.A.M. and Costa, J.D.M. 2015. "Fatigue behaviour of epoxy-steel single lap joints under variable frequency", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 63: 66-73.
- Sarfaraz, R. Anastasios-Vassilopoulos, P. and Thomas, K. 2011. "Experimental investigation of the fatigue behavior of adhesively-bonded pultruded GFRP joints under different load ratios", *International Journal of Fatigue*, 33: 1451-60.
- Shahani, A. R. and Pourhosseini, S. M. 2018. "The effect of adherent thickness on fatigue life of adhesively bonded joints", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42: 561-71.
- Wu, C. Zhao, X. L. Chiu, W.K. Al-Mahaidi, R. and Duan, W. 2013. "Effect of fatigue loading on the bond behaviour between UHM CFRP plates and steel plates", *Composites Part B: Engineering*, 50: 344-53.
- Zamani, P. Da Silva, L.F.M. Farhangdoost, K. and Jaamialahmadi, A. 2019. "An investigation on fatigue life evaluation and crack initiation of Al-GFRP bonded lap joints under four-point bending", *Composites structure*, 11.
- Zaroug, M. El. Kadioglu, F. Demiral, M. and Saad, D. 2018. 'Experimental and numerical investigation into strength of bolted, bonded and hybrid single lap joints_ Effects of adherend material type and thickness', *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 87: 130-41.