

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



YAPIŞTIRMA BAĞLARINDA YORULMA DAYANIMININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YAPRAK NİSA OĞUZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ali ORAL (Tez Danışmanı)
Doç. Dr. Gülcan TOKTAŞ (Eş Danışman)
Doç. Dr. Demet GÖNEN OCAKTAN
Prof. Dr. Kadir ÇAVDAR
Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

BALIKESİR, ARALIK - 2022

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Yapıştırma Bağlarında Yorulma Dayanımının Deneysel Olarak İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yaprak Nisa OĞUZ

(imza)

ÖZET

**YAPIŞTIRMA BAĞLARINDA YORULMA DAYANIMININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPRAK NİSA OĞUZ
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ALİ ORAL)
(EŞ DANIŞMAN: DOÇ. DR. GÜLCAN TOKTAŞ)
BALIKESİR, ARALIK- 2022**

Mühendislik malzemelerinde görülen hasar tiplerinin %90'ı yorulmadan kaynaklanmaktadır. Bu nedenle tasarım çalışmaları yapılırken malzemelerde oluşan hasar tiplerinin bilinmesi önem arz etmektedir. Statik ve dinamik yükleme koşulları altında çalışan malzemelerin davranışlarını belirlemek için statik ve dinamik testler yapılmaktadır. Bu çalışmada rüzgar türbini kulelerinde braket olarak kullanılan AISI 1040 karbon çeliğinden elde edilen levha ve silindirik şeklindeki parçalar 3M'e ait akrilik yapıştırıcı yardımıyla yapıştırılmıştır. Yapıştırma bağının statik mukavemet değerleri (kayma gerilmesi, eğilme gerilmesi ve eşdeğer gerilme) mekanik deney düzeneği ile belirlenmiştir. Ayrıca; kule içinde ısı ve bası gerilmeleri etkisiyle yorulma meydana geldiğinden, yapıştırılan parçaların titreşimli gerilme altında R=0 gerilme oranında değişken eşdeğer gerilmeye bağlı olarak S-N eğrisi elde edilmiştir. Deneyler sonunda, statik kopma gerilmesinin %50'si kadar gerilme uygulandığında yapıştırma bağında sonsuz ömür elde edilmiştir. Revize edilen makinenin tasarım hesaplamaları ve elde edilen deneysel veriler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrulanmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Yapıştırma, yorulma, test cihazları

Bilim Kod / Kodları : 91419, 91433

Sayfa Sayısı : 57

ABSTRACT

**FEATURE RESISTANCE IN ADHESIVE BONDS EXPERIMENTAL
INVESTIGATION
MASTER'S THESIS
YAPRAK NİSA OĞUZ
BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. ALİ ORAL)
(CO-SUPERVISOR: DOÇ. DR. GÜLCAN TOKTAŞ)
BALIKESİR, DECEMBER- 2022**

90% of the damage types seen in engineering materials are due to fatigue. For this reason, it is important to know the damage types that occur in the materials while designing studies. Static and dynamic tests are performed to determine the behavior of materials operating under static and dynamic loading conditions.

In this study, sheet and cylindrically shaped parts made of AISI 1040 carbon steel used as brackets in wind turbine towers were adhered to with the help of 3M acrylic adhesive. Static strength values (shear stress, bending stress and equivalent stress) of the adhesive bond were determined by mechanical test setup. In addition; since fatigue occurs in the tower due to the effect of thermal and pressure stresses, the S-N curve is obtained depending on the variable equivalent stress at the stress rate $R = 0$ under the vibrating stress of the bonded parts. As a result of the experiments, infinite life of the adhesive bond was obtained when a stress of 50% of the static breaking stress was applied. The design calculations of the revised machine and the experimental data obtained were verified using the finite element method.

KEYWORDS: Bonding, fatigue, testing equipment

Science Code / Codes : 91419, 91433

Page Number : 57

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
KISALTMALAR LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	4
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. YAPIŞTIRICI VE YAPIŞTIRMANIN TEMEL KAVRAMLARI	10
3.1 Kaynak veya Lehimleme	10
3.2 Yapıştırıcı	10
3.3 Yapışma	11
3.3.1 Adhezyon	12
3.3.2 Kohezyon	13
3.4 Yapıştırıcı Kullanımının Diğer Birleştirme Yöntemlerine Göre Avantajları	13
3.5 Yapıştırıcı Kullanımının Dezavantajları	13
3.6 İyi Bir Bağlantının Gereklilikleri	14
3.7 Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri	14
3.7.1 Başarısız bir bağlantının değerlendirilmesi	15
3.8 Yükler ve Bunlardan Kaynaklanan Gerilmeler	16
3.8.1 Yapıştırma bağlantısının tasarımı	16
3.9 Malzeme Yüzey Hazırlama Teknikleri	18
3.9.1 Metallerin yüzey işlemi	18
3.9.2 Yapıştırma için yüzeyin hazırlanması	18
3.9.2.1 Yapıştırmadan önce yüzeyin yağdan arındırılması	19
3.9.2.2 Mekanik hazırlık	19
3.9.2.3 Islanabilirlik testi	19
3.10 Yapıştırma Bağlarının Testleri	21
3.10.1 Çekme	21
3.10.2 Kesme (Kayma)	22
3.10.3 Soyma	22
3.10.4 Darbe	22
3.10.5 Yorulma analizi	22
3.11 Sonlu Elemanlar Metodu	26
4. MATERYAL VE METOD	29
4.1 Yapıştırılan Malzeme ve Özellikleri	29
4.2 Yapıştırıcı ve Özellikleri	30
4.3 Numune Hazırlama	31
4.4 Statik Test	34

4.5 Yorulma Cihazı Tasarımı ve Testi.....	35
4.5.1 Yorulma cihazı tasarım doğrulama çalışmaları	40
4.5.1.1 Biyel kolu analizi	40
4.5.1.2 Ara parça analizi	42
4.5.2 Yapışma bağının nalizi.....	44
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	48
6. SONUÇLAR.....	52
7. KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Doğrudan gerilim aralıkları için yorulma mukavemeti eğrileri.....	2
Şekil 2.1: Elektromekanik yay yorulma cihazı	9
Şekil 3.1: Yapıştırıcı	11
Şekil 3.2: Bir yapıştırma bağlantısının enine kesiti	12
Şekil 3.3: Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantıya etki eden kuvvetler	12
Şekil 3.4: Perçin ve yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantıdaki estetik görünüm farkı.....	13
Şekil 3.5: Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar tipleri; a) Yapıştırıcı ile birleştirilmiş malzeme, b) adhezyon hasarı, c) kohezyon hasarı	14
Şekil 3.6: En yaygın yük türleri ve gerilim dağılımları	17
Şekil 3.7: Soyulma yükleri ve yapısal dönüşümleri.....	17
Şekil 3.8: En iyiden en kötüye doğru sıralanan ıslanabilirlik testleri	20
Şekil 3.9: Kirli yüzeye yapıştırıcı uygulaması	20
Şekil 3.10: Temiz yüzeye yapıştırıcı uygulaması	21
Şekil 3.11: Değişken zorlamalar	23
Şekil 3.12: Yorulma testi için sinüzoidal yükleme	24
Şekil 3.13: S-N (Wöhler) Eğrisi.....	25
Şekil 3.14: Yorulma yük değişim sayısı	25
Şekil 3.15: Yorulmayı etkileyen faktörler.....	26
Şekil 3.16: Sonlu elemanlar modelinin düğüm noktası	27
Şekil 4.1: Braketin (deney numunesi) ölçüleri.....	30
Şekil 4.2: İki bileşenli yapıştırıcı ve tabancası	30
Şekil 4.3: Statik deney numunesi hazırlama aşaması	32
Şekil 4.4: Statik deney numunesi bağlantı plakası ölçüleri.....	32
Şekil 4.5: Yorulma numunesinin hazırlanma aşamaları	33
Şekil 4.6: Yorulma deney numunesi ve ölçüleri	34
Şekil 4.7: Statik test düzeneğinin 3D modeli.....	35
Şekil 4.8: Yorulma test cihazının 3D görüntüsü	35
Şekil 4.9: Kayış-kasnak mekanizması	36
Şekil 4.10: Deneylerde kullanılan yaylar	39
Şekil 4.11: Tasarımı ve imalatı yapılan yorulma test cihazı	40
Şekil 4.12: Gerilme değeri	40
Şekil 4.13: Uygulanan gerilme genliği.....	41
Şekil 4.14: Yorulma analiz sonuçları; a) Ömür, b) Güvenlik faktörü, c) Hasar, d) Eşdeğer alternatif gerilme.....	42
Şekil 4.15: Hesaplanan gerilme değeri.....	42
Şekil 4.16: Yorulma analiz sonuçları; a) Ömür, b) Hasar analizi, c) Güvenlik faktörü	43
Şekil 4.17: Yapıştırma bağı için geliştirilen yorulma test cihazı	43
Şekil 4.18: Yapıştırma bağı için geliştirilen yorulma test cihazının ayrıntılı görüntüsü	44
Şekil 4.19: Yapılan analizin sınır şartları görüntüsü.....	45
Şekil 4.20: Yapıştırıcının Von-Mises gerilme dağılımı	45
Şekil 4.21: Yer değiştirme.....	46
Şekil 4.22: Gerilme değeri	46
Şekil 4.23: Hasar yüzdesi.....	47
Şekil 4.24: Ömür	47
Şekil 5.1: Statik test sonucunda kopma yüzeyleri.....	49

Şekil 5.2: Yorulma testi sonucunda kopma yüzeyleri.....	49
Şekil 5.3: Elde edilen S-N Eğrisi	50
Şekil 5.4: Hatalı numuneler.....	51

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Düz elemanlar ve mekanik olarak sabitlenmiş bağlantılar.....	3
Tablo 1.2: Kaynak bağlantıları ve takviyeleri	3
Tablo 3.1: Değerlendirme ve çözüm yolları	15
Tablo 3.2: Yapıştırıcı arızasının nedenleri ve onarım yöntemleri	15
Tablo 3.3: Yorulma yük modları	24
Tablo 4.1: Kimyasal analiz değerleri (% ağırlık)	29
Tablo 4.2: AISI 1040 karbon çeliğinin mekanik özellikleri	29
Tablo 4.3: Yapıştırıcının mekanik özellikleri	31
Tablo 4.4 : Sıcaklığa bağlı olarak yapıştırıcının işlem, taşınma ve kurlenme süreleri	31
Tablo 4.5: Kayış malzemeleri ve özellikleri	38
Tablo 4.6: Yorulma cihazında kullanılan yaylar, rijitlikleri ve uyguladıkları bası kuvvetleri (x=20 mm için)	38
Tablo 4.7: Deneylerde kullanılan yaylar, strok mesafesi, rijitlikleri ve uyguladıkları bası kuvvetleri	39
Tablo 4.8: Hesaplanan normal ve kayma gerilmesi değerleri	41
Tablo 5.1: Statik test sonuçları	50

SEMBOL LİSTESİ

F	:Uygulanan Kuvvet (N)
σ_e	:Eğilme Gerilmesi (N/mm ²)
$\sigma_{eş}$:Eşdeğer Gerilme (N/mm ²)
σ_r	:Gerilme Aralığı (N/mm ²)
σ_{mak}	:Maksimum Gerilme (N/mm ²)
σ_{min}	:Minimum Gerilme (N/mm ²)
σ_a	:Gerilme Genliği (N/mm ²)
σ_m	:Ortalama Gerilme (N/mm ²)
R	:Gerilme Oranı
τ_k	:Kayma Gerilmesi (N/mm ²)
P_{mak}	:Maksimum Kuvvet (N)
A_0	:Alan (mm ²)
M_e	:Eğilme Momenti (Nmm)
I_x	:Alan Atalet Momenti (mm ⁴)
y	:Tarafsız Eksene Olan Mesafe (mm)
k	:Yay rijitliği (N/mm)
x	:Strok (mm)
P	:Güç (kW)
M_d	:Döndürme momenti (Nmm)
ω	:Açısal hız (1/s)
$F_ç$:Çevresel kuvvet (N)
d_k	:Küçük kasnak çapı (mm)
d_b	:Büyük kasnak çapı (mm)
i	:Çevrim oranı
n	:Devir sayısı (dev/dak)
β_1	:Sarılma açısı (derece)
a	:Eksenler arası mesafe (mm)
L	:Kayış uzunluğu (mm)
F_1	:Gergin kol kuvveti (N)
F_2	:Gevşek kol kuvveti (N)

KISALTMALAR LİSTESİ

SW	:Şok Dalgası
EML	:Elektromanyetik Fırlatıcı Testi
TAST	:Thick Adherend Shear Test
FE	:Sonlu Eleman Simülasyonu
SLJ	:Tek Bindirmeli Bağlantı
TSLJ	:Üç Kademeli Bindirme Bağlantısı
USMW	:Ultrasonik Metal Kaynak
FEA	:Dinamik Sonlu Eleman Analizi
AISI	:American Iron and Steel Institute

ÖNSÖZ

Öğrenim hayatım boyunca yoluma ışık tutan, bilgi ve birikimleriyle çalışmama farklı açılardan bakmamı sağlayan, yorulma deneylerinin beni yorduğu dönemlerde olumlu yaklaşımlarıyla bana destek olup toparlayan ve öğrencileri olmaktan her zaman gurur duyduğum danışmanım Prof. Dr. Ali ORAL'a ve eş danışmanım Doç. Dr. Gülcan TOKTAŞ'a teşekkür ederim. Çalışmamın her aşamasında yanımda olup tamamlanmasına en büyük katkıyı sağlayan, özverili davranışı, nezaketi ve sonsuz sabrı için Arş. Gör. Yunus Emre Nehri'ye teşekkür ederim. Deney, tasarım ve sonraki birçok aşamada her sorumu titizlikle yanıtlayıp desteklerini esirgemeyen Mustafa Burak Gedikli'ye teşekkür ederim. Çalışmamda proje desteklerinden dolayı Gesbey Enerji Türbini Kule Üretim San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge merkezine teşekkür ederim. Kendi hedeflerimi ve en çok canım babamın hayallerini gerçekleştirmek için çıktığım bu yolda her zaman yanımda olan, en büyük destekçim biricik annem ve babam, en büyük neşe kaynağım ablam, eniştem ve Pamuk'uma teşekkür ederim.

Balıkesir, 2022

Yaprak Nisa OĞUZ

1. GİRİŞ

Son yıllarda, özellikle teknik alanda gerçekleştirilen uygulamalarda yapıştırıcı kullanımı hızlı bir şekilde artmış ve yapıştırıcı teknolojisinde önemli gelişmeler görülmüştür. Yapıştırıcı kullanımındaki bu artışla birlikte yapışma ve yapıştırıcı bilimindeki daha temel çalışmalara merak uyanmaya başlamış ve dikkatleri üzerine çeken yapıştırıcıların bağlantı oluşumu ve mekanik performansına ilişkin bilgi düzeyimiz büyük ölçüde artmıştır.

Yapıştırıcılar, aynı veya farklı malzemelerden olmalarına bakılmaksızın yüzeylerin bir arada tutulmasını sağlayan madde olarak tanımlanabilir [1, 2]. Yapıştırıcılar katı, sıvı ve bant gibi birçok fiziksel şekilde bulunabilir ve işlevsel yapılarına göre yapısal ve yapısal olmayan yapıştırıcılar olarak ikiye genel sınıfa ayrılırlar. i-Yapısal yapıştırıcılar, yüksek mukavemetli yapıştırıcıları tanımlamak için kullanılırken, ii-yapısal olmayan yapıştırıcılar çok daha düşük mukavemet ve kalıcılığa sahip yapıştırıcılar için kullanılmaktadır.

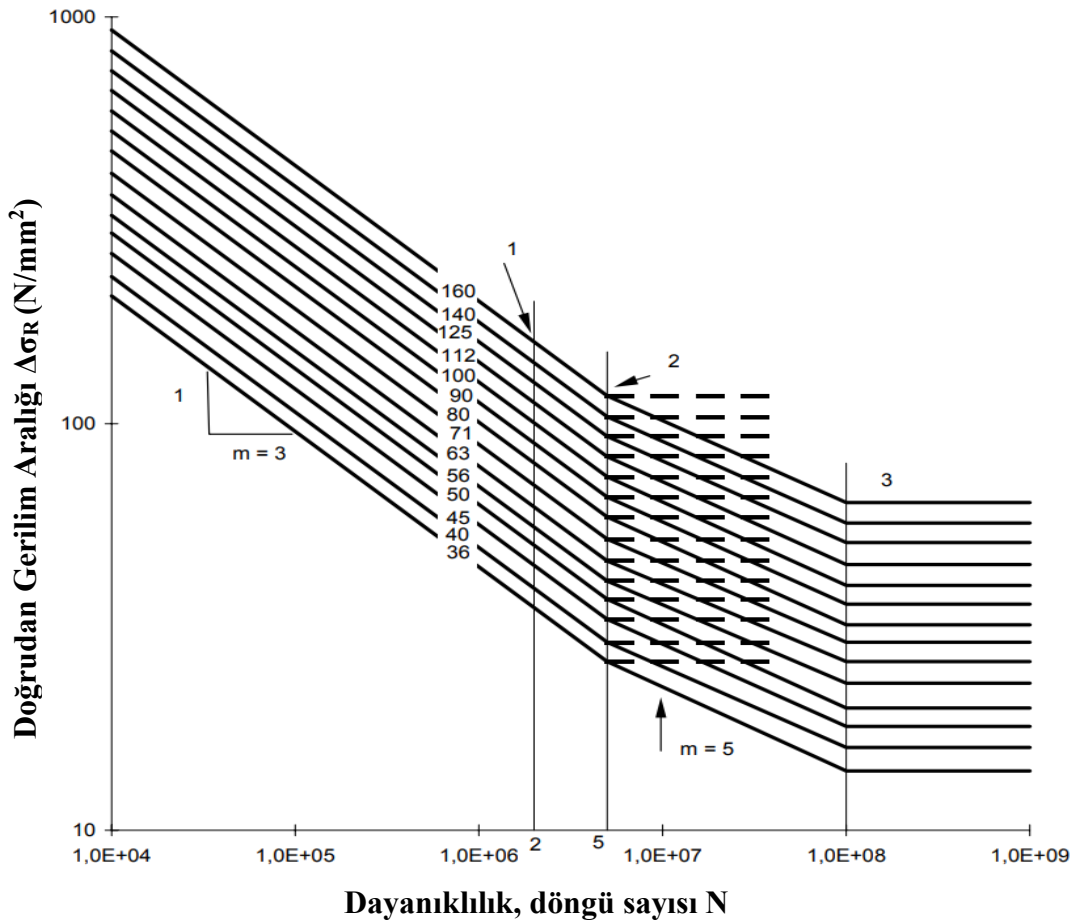
Farklı tip ve boyuttaki malzemelerle uyumlu ve maliyetlerinin düşük olması, yapıştırıcıların kaynak, lehim, cıvata ve perçin bağlantılarına göre üstünlüğünü ön plana çıkarmaktadır. Yüzey ile sürekli temasının olması da mekanik birleştirme yöntemlerine göre avantajlarından biridir. Hafif olmaları, dayanıklı olmaları ve çevre dostu olmaları da önemli özelliklerindedir. Sektörde bu tarz özelliklere sahip olan malzemelere olan talebin artmasından dolayı farklı endüstrilerde yapıştırma bağlantıları kilit bir teknoloji haline gelmiştir. Otomotiv endüstrisi, sivil havacılık, mikro elektronik ve optoelektronik gibi bir çok endüstriyi de ilgilendirmektedir [3, 4].

Yenilenebilir enerji endüstrisinde önemli bir yere sahip olan rüzgâr kule türbinlerindeki merdivenlerin kule duvarına montajında bağlantı elemanı olarak kullanılan braketler; geleneksel olarak kaynakla birleştirilmektedir. Birleştirilme sonrası kaynakta oluşan ısı girdisi parçalarda dip çatlaklarına sebep olmaktadır. Rüzgâr kule türbinleri gözle fark edilemese bile bir salınımına maruz kalmaktadır. Oluşan bu salınımla tekrarlı gerilmelerin etkisinden dolayı kaynak uçlarında çatlaklar oluşmakta ve zamanla bu çatlaklarda ilerleme meydana gelmektedir.

TS EN 1993-1-9 numaralı “Çelik yapıların tasarımı” standardında [5] geçen kaynak yapılmış ve yapılmayan malzemenin yorulma mukavemet sınırları Şekil 1.1’de verilmiştir.

İlgili standartta, yorulma yüküne maruz kalan elemanların ve bağlantıların yorulma direncinin değerlendirilmesi için yöntemler gösterilmiştir. Bu yöntemler malzeme üretimi ve uygulamasından kaynaklanan geometrik ve yapısal kusurların etkilerini içeren, büyük ölçekli numunelerle yapılan yorulma testlerinden türetilmiştir. Verilen değerlendirme yöntemleri, tüm yapısal çelik, paslanmaz çelik ve korumasız yaşlandırma çelik sınıfları için geçerlidir. Yorulma mukavemetleri, normal atmosferik koşullar altında ve yeterli korozyon koruması ve düzenli bakım ile çalışan yapılar için geçerlidir.

Rüzgâr kule türbinleri içerisinde kullanılan braketlerin kule içerisine kaynaklanması halinde TS EN 1993-1-9 numaralı standartta düz ve mekanik bağlantılar için verilen kategori 160'daki (Tablo 1.1) yorulma sınırı kategori 80'e (Tablo 1.2) düşmektedir ve yorulma mukavemet sınırı önemli ölçüde azalmaktadır.

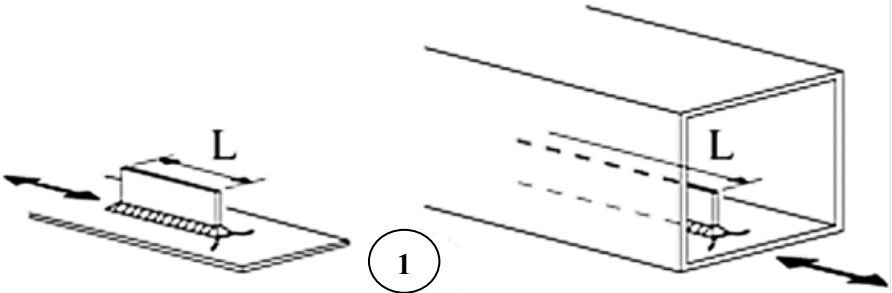


Şekil 1.1: Doğrudan gerilim aralıkları için yorulma mukavemeti eğrileri.

Tablo 1.1: Düz elemanlar ve mekanik olarak sabitlenmiş bağlantılar.

Detay kategorisi	160
Yapısal detay	NOT: Kategori 160 ile ilişkili yorulma dayanımı eğrisi en yüksek olanıdır. Hiçbir detay kategorisi, herhangi bir döngü sayısında daha iyi bir yorulma mukavemetine ulaşamaz.
Tanım	Haddelenmiş ve ekstrüde edilmiş ürünler: 1) Levhalar ve lamalar; 2) Haddelenmiş profiller; 3) Dikişsiz içi boş profiller, dikdörtgen veya dairesel.
Gereksinimler	Ayrıntılar 1) ila 3): Keskin kenarlar, yüzey ve haddeme kusurları, taşlama ile kusurlar giderilip düzgün bir geçiş sağlanana kadar iyileştirilecektir.

Tablo 1.2: Kaynak bağlantıları ve takviyeleri.

Detay kategorisi	80 ($L \leq 50\text{mm}$)
Yapısal detay	
Tanım	Boyuna bağlantılar: 1) Detay kategorisi, L bağlantısının uzunluğuna göre değişir.
Gereksinimler	Bağlantının kalınlığı yüksekliğinden daha az olmalıdır.

Kaynak ile birleştirilen bağlantılarda oluşan bu hasarı önlemek amacıyla son zamanlarda braketlerin kule içine birleştirilmesinde yapıştırıcı kullanımı büyük ilgi görmeye başlamıştır. İyi bir konstrüksiyonda statik mukavemeti oldukça yeterli olarak boyutlandırılan yapıştırma bağlarının dinamik şartlar altındaki davranışları tam olarak bilinmemektedir. Dinamik şartlar altında çalışan makine elemanlarının değerlendirilmesi

için yorulma testlerine başvurulmaktadır. Yorulma testleri, bir yapının benzer koşullar altında nasıl performans göstereceğini anlamak için tekrarlı yükler uygulanarak gerçekleştirilen özel bir mekanik test yöntemidir. Yorulma test cihazlarında, belirli bir yük tekrar sayısında veya numuneyi hasara uğratan kadar tekrarlı gerilmeler uygulanmaktadır [6]. Bu testlerin kullanılma amacı, yorulma ömrü ve çatlak büyüme verilerini oluşturarak kritik konumları belirlemek veya yorulmaya duyarlı olabilecek bir yapının güvenliğini göstermektir. Literatürde farklı görünüm ve özelliklerde yorulma test cihazları bulunmasına rağmen sadece yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımı test etmek için tasarlanmış bir cihaza rastlanmamıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada yapıştırıcı ile birleştirilen metal malzemelerin eğme, kayma ve eşdeğer gerilmeleri belirlenmiştir. Rüzgâr türbin kulelerinin içine yapıştırılan braketler, yapıştırma bölgesinde kayma ve eğilme gerilmesine zorlanmaktadır. Yapıştırılan parçaların, gerçek uygulamadaki statik kayma ve eğilme gerilmesini belirleyebilmek için ilk olarak standart dışı bir statik test düzeneği kullanılmıştır. Daha sonra dinamik davranışlarını belirleyebilmek için de Gönen ve arkadaşları [7] tarafından geliştirilen elektromekanik yay yorulma cihazı revize edilerek, dinamik kayma ve eğilme gerilmesi uygulayan bir yorulma test cihaz tasarımı yapılmıştır. Bu sayede yapıştırma bağlarında yorulma dayanımının incelenmesi amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu çalışmada literatür araştırması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, yapıştırıcılar ve yapıştırıcıların yorulma analizleri için yapılan çalışmalar incelenmiştir. Yayınlarda farklı uygulama koşullarında gerçekleştirilen örneklere yer verilmiştir. İkinci aşamada, yorulma test cihazları üzerine çalışmalar incelenmiştir.

Kinloch çalışmasında, mühendislikte kullanılan yapıştırıcıların avantajları ve dezavantajları üzerinde tartışarak yapışkan bir bağlantının oluşumunda üç farklı aşamayı (i. Yapıştırıcının kolay yayılması, ii. Yükleri taşıyabilmesi için sertleşmesi ve iii. Yapışma dayanım ömrünün tayini) tanımlamanın mümkün olduğunu göstermiştir [8].

You ve arkadaşları çalışmalarında, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların darbe özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilen deneysel yöntemleri incelemiştir. Tartışılan araştırma konuları arasında düşük, orta, yüksek ve çok yüksek hız altındaki yapışan eklemler için test yöntemleri yer almaktadır. Çalışmada, düşük hız aralığı test yöntemleri; standart darbe testleri (hem yapıştırılmış blokları hem de şeritleri içerir) ve yapıştırıcıyla birleştirilmiş standart olmayan kiriş bükme darbe testleri, orta hız aralığının test yöntemleri; İzod, Charpy, hidrolik ve pnömatik testler, yüksek hızlı darbe testi için Hopkinson (Kolsky) çubuğu, yüksek hız darbe testleri için ise şok dalgası (SW) ve elektromanyetik fırlatıcı (EML) testi sunulmuştur. Ayrıca darbe testi yöntemlerinin uygulamadaki durumunu da tartışmışlardır [9].

Peretz, yapıştırıcıların kesme davranışını, ince yapışkan tabakalar için özel olarak yapılmış bir burulma cihazı ile değerlendirmiştir. Kaydettiği burulma momenti yer değiştirme eğrisinden, yapıştırıcı kalınlığı boyunca lineer kayma gerilimi dağılımı ve enine kesit alanında tekdüze kayma gerilimi dağılımını dikkate alarak kesme gerilmelerini hesaplamıştır [10].

Jeandrau ve arkadaşları, bir epoksi bazlı yapıştırıcının statik ve yorulma yüklemesi altındaki mekanik davranışını ve arıza kriterlerini belirlemek için dökme numuneler üzerinde çekme testleri, farklı yükleme koşullarında Arcan-Mines testleri gibi farklı test sistemlerini incelemiştir. Yorulma yüklemesi için statik bir kırılma kriteri önermiş ve genişletmişlerdir. TAST (Kalın Yapışmış Kayma Testi) ve tek tesirli kesme testleri

yaparak önceki testlerle karşılaştırma yapmışlardır. Önerilen modelleri doğrulamak için ise Sonlu Eleman (FE) simülasyonunu kullanmışlardır [11].

Gavgalı ve arkadaşları çalışmalarında, çekme ve dört nokta eğilme testlerine tabi tutulan tek bindirmeli bağlantılar (SLJ) ve üç kademeli bindirme bağlantılarının (TSLJ) statik ve yorulma dayanımlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Üç kademeli bindirme bağlantısında, tek bindirmeli bağlantıya göre hem çekme hem de yorulma ömrü sınır değerlerinin yaklaşık %100 arttığını tespit etmişlerdir [12].

Carboni ve arkadaşları, hafif alaşımlı ince levhalardan yapılmış hibrit bindirmeli ultrasonik metal kaynak (USMW artı yapışkan bağlama ile elde edilen) bağlantıların yorulma davranışını incelemişlerdir. Farklı gerilme oranlarında (0.1, 0.3 ve 0.7) yorulma testleri yaparak uygulanan daha yüksek ortalama gerilmelerle farklı kırılma mekanizmaları elde etmişlerdir [13].

Porcoe ve arkadaşları, bir epoksi film yapıştırıcısında (FM94) yapıştırıcı kalınlığının yorulma çatlak büyümesi üzerindeki etkisini, deneyler ve sayısal modellemelerle araştırmışlardır. Yapılan deneylerde kalınlık artışı ile çatlak büyüme oranının arttığı gözlenmiştir. Birim çatlak büyümesi için gereken enerjinin yapıştırıcı kalınlığına bağlı olmadığı bulunmuştur. Sayısal analizde ise, birim çatlak büyümesi başına gereken enerjinin yapışkan kalınlığına duyarlı olmadığı, ancak plastik enerji yayılımının kalınlıkla birlikte arttığını doğrulamışlardır [14].

Curley ve arkadaşları, yapıştırıcıyla bağlanmış tek bindirmeli bağlantının yorulma performansını test etmişlerdir. Eklemlerin, ıslak ve kuru bir ortamda yorulma testleri yapılmıştır. İlk olarak çatlak büyüme oranını, hem kuru hem de ıslak bir test ortamında incelemişlerdir. İkinci olarak, tek bindirmeli bağlantı için uygulanan yorulma yüklerinin bir fonksiyonu olarak, çatlak uzunluğu ile gerinim-enerji salınım hızının değişimini tanımlamak için analitik ve sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Üçüncü olarak, benzer test koşulları altında, tek bindirmeli bağlantılar için kullanılanlarla aynı ortamda elde edilen kısa süreli kırılma mekaniği testlerinden elde edilen deneysel sonuçlar, teorik çalışmalardan elde edilen modelleme sonuçları ile birleştirilmiştir. Testler sonucunda, teorik tahminler ile deneysel sonuçlar arasındaki uyumun çok iyi olduğunu tespit etmişlerdir [15].

Goglio ve arkadaşları, yapısal yapıştırma için iki bileşenli bir epoksi yapıştırıcının dinamik davranışını değerlendirmişlerdir. Özellikle gerinim hızının, yapıştırıcı uygulanmış numunelerin çekme ve basınç dayanımı üzerindeki etkisine odaklanmışlardır. Deneysel testler, bir hidrolik evrensel test makinesi ve Hopkinson basınç çubuğu ile gerçekleştirilmiştir. Testlerin sonucunda, gerinim hızının artmasıyla yapışma mukavemetinin önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir [16].

Asgharifar ve arkadaşları, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların katı mermi etkisi altında geçici gerilim dağılımını incelemek için üç boyutlu (3-D) dinamik sonlu eleman analizi (FEA) gerçekleştirmişlerdir. Sonlu eleman analizini desteklemek için çarpma tertibatı olarak metalik toplar aracılığıyla darbe yüklemesine maruz kalan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Yapıştırıcı tabakanın kalınlığı, katı mermi boyutu ve hızı, yapıştırıcının malzeme özellikleri ve bağlantının dinamik gerilimi üzerindeki gerinim hızı etkisi dahil olmak üzere işlem parametrelerinin etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal analizlerde, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların katı mermi etkisi altında karmaşık bir 3 boyutlu gerilim durumunun olduğu sonucuna varmışlardır [17].

Özel ve arkadaşları, çekme yükü altında farklı alt ve üst yapışma konfigürasyonları ile yapıştırılmış tek bindirmeli bağlantı (SLJ) geometrisinin mekanik özelliklerini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal analizlerden elde edilen verilerle, farklı fiber oryantasyon dizisine, farklı yapışma kalınlıklarına ve bindirme uzunluğuna sahip kompozit yapıştırıcıların, SLJ'deki bağlantının hasar yükünü ve gerilme dağılımlarını etkilediği sonucuna varmışlardır [18].

Şık ve arkadaşları, taşıt araçlarındaki jantların yorulma ömürlerini test etmek amacıyla bir yorulma test cihazı tasarlayarak analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle sabit ve radyal yönde yük uygulayacak bir sistem kurmuşlardır. Tasarımlarında yalnızca lastik takılmış jant dönmektedir. Burada radyal yönde yük, yüzeyi düzgün ve uzunluğu, yüklü lastiğin genişliğinden daha büyük olan bir silindirle uygulanmaktadır. Yapılan test ve sonlu eleman analiz sonuçlarının birbirleriyle tutarlı olduğunu tespit etmişlerdir [19].

Hocaoğlu çalışmasında, farklı çap ve boydaki kalıp yayları ve bası yaylarının, değişken yüklemeler altındaki davranışlarını belirleyebilmek için yeni bir cihaz tasarlamıştır.

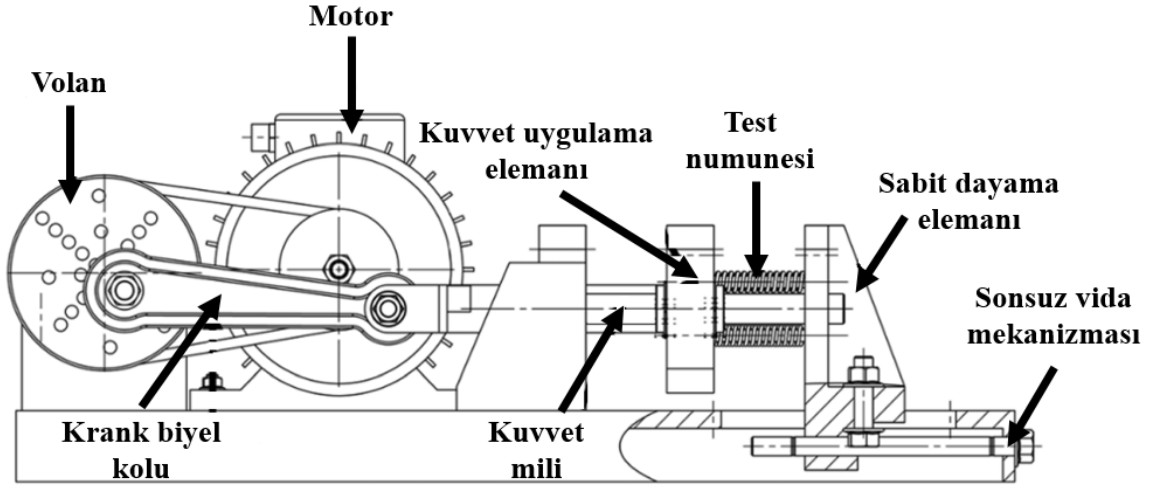
Tasarlanan cihazda motor devir sayısını, kayış-kasnak mekanizmasıyla düşürmektedir. Daha sonra milin ucunda bulunan aparatlarla dairesel hareketi aksel harekete çevirerek bu baskı yükünü yaya uygulamaktadır [20].

Balcıoğlu ve arkadaşları, ahşap levhalar, plastik esaslı levhalar, fiber takviyeli kompozitler ve hafif metalik levhaların eğilmeli yorulma davranışlarını belirlemek amacıyla bir yorulma cihazı geliştirmişlerdir. Ankastre tipteki cihazın kontrolünü bilgisayar yazılımı sağlanmaktadır. Geliştirilen test cihazının aynı anda 10 numuneyi test edebilme özelliği sayesinde zamandan ve enerjiden tasarruf sağlamışlardır. Bilgisayar yazılımı sayesinde numunelerin test zamanı, test frekansı, eğme kuvveti, rijitlik kaybı, yük tekrar sayısı gibi parametrelere yazılımın ara yüzünden ve internet üzerinden izleyerek müdahale edilebilmektedir. Oluşan herhangi bir hasar sonucunda kullanıcının e-posta adresine uyarı mesajı ve testle ilgili veriler gönderilmektedir [21].

Wang ve arkadaşları, kapalı mekanik güç akışına dayalı yeni bir dişli yorulma test cihazı tasarlamışlardır. Güç aktarım devresinin statik ve dinamik simülasyon analizlerini yaparak, normal çalışma frekansı altında yapısal dayanım ve kararlılığını kontrol etmişlerdir. Kapalı güç testlerinde enerji dağıtma cihazlarının olmaması uzun süreli çalışan yorulma testleri için uygun bir zemin hazırlamaktadır. Simülasyon sonuçları, tasarımın ve teorik hesaplamaların doğrulandığını göstermiştir [22].

Pach ve arkadaşları, sabit genlikli ve çok çeşitli yük oranları altındaki kompozit malzemelerin yorulma testlerini gerçekleştiren bir yorulma test cihazı tasarlamışlardır. Bu cihazla, ilgili standart gereksinimlerin yerine getirilmesini, geleneksel servohidrolik test makinelerine kıyasla çok düşük bir maliyetin sağlanmasını hedeflemişlerdir [23].

Gönen ve arkadaşları, yayların yorulma dayanımlarını test etmek amacıyla titreşimli gerilme altında çalışan bir yorulma cihazı geliştirmişlerdir (Şekil 2.1). Cihazda dört adet yay, üzerine etki eden kuvvetlerin eşit dağılmasını sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir. Kuvvet, elektrik motorundan alınan hareketin 1/3 çevrim oranına sahip kayış kasnak mekanizması ile biyel koluna aktarılarak iteneğin ileri-geri hareketi ile sağlanmıştır [7]. Geliştirilen yorulma cihazı revize edilerek bu çalışmada yapııştırma bağı ile birleştirilen deney numunesinin yorulma testleri için kullanılmıştır.



Şekil 2.1: Elektromekanik yay yorulma cihazı [7].

3. YAPIŞTIRICI VE YAPIŞTIRMANIN TEMEL KAVRAMLARI

Makina imalatında montaj işlemini gerçekleştirmek için çeşitli birleştirme yöntemleri kullanılabilir. Alternatif birleştirme yöntemleri arasında yapıştırıcıyla birleştirme, kaynaklama, lehimleme, sert lehimleme ve mekanik bağlama yer almaktadır.

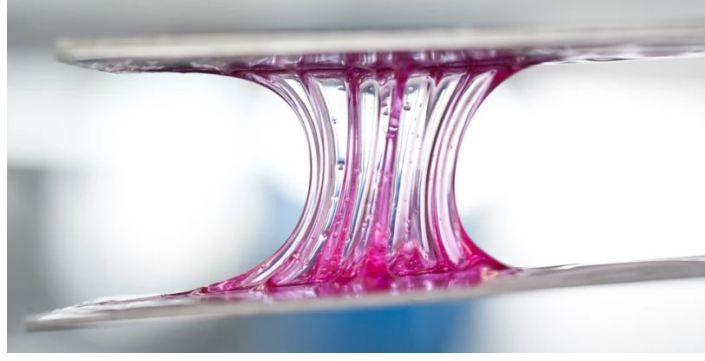
3.1 Kaynak veya Lehimleme

Kaynak, çoğunlukla ana metali eritmek ve parçaları kaynaştırmak için yüksek sıcaklığın kullanıldığı metalleri birleştirme yöntemidir. İşlem, iki metal arasında bir bağlantı yapmak için kullanılır. Lehim ise, ana metali eritmeden iki veya daha fazla metalin birleştirilmesi işlemidir. İş, iki metal arasına lehim adı verilen ayrı bir alaşım yerleştirilerek yapılır ve bu lehim eritilerek birleştirilir.

Kaynaklı veya lehimli bağlantıların avantajları, aşınma direnci, çok yüksek mukavemet ve termal ve elektrik iletkenliğidir. Ancak, bu yöntemlerin birçok sınırlaması vardır. Örneğin sadece uygun metaller kullanılabilir. Kaynak veya lehimleme sırasında yüksek sıcaklıkların etkisi altında parçalar deforme olabilmektedir. Ek olarak, malzemenin ısıtılması gerilme ve yapısal bozulmaya neden olurken sökme işlemi zor veya imkânsız olabilir.

3.2 Yapıştırıcı

Yapıştırıcı, malzemeleri yüzey teması ile bir arada tutabilen ve ayrılmaya direnebilen bir malzeme olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.1). Yapıştırıcıların birincil işlevi, parçaları bir araya getirmektir. Yapıştırıcılar, bu amacı, gerilimleri bir elemandan diğerine, mekanik bağlantı elemanlarıyla elde edilenden çok daha düzgün bir şekilde ileterek gerçekleştirir. Yapıştırıcılar giderek günlük hayatımızı çevrelemektedir. Bu malzemeleri geliştirmek, üretmek ve pazarlamak için önemli işletmeler vardır ve hemen hemen her iş ve endüstride kullanılmaktadır. Yapıştırıcılar, tutma ve bağlama güçlerine göre seçilir. Genellikle kesme ve çekme dayanımı yüksek malzemelerdir. Yapıştırıcıların işlevsel yapılarına göre iki türü vardır: yapısal ve yapısal olmayan yapıştırıcılar [24, 25].



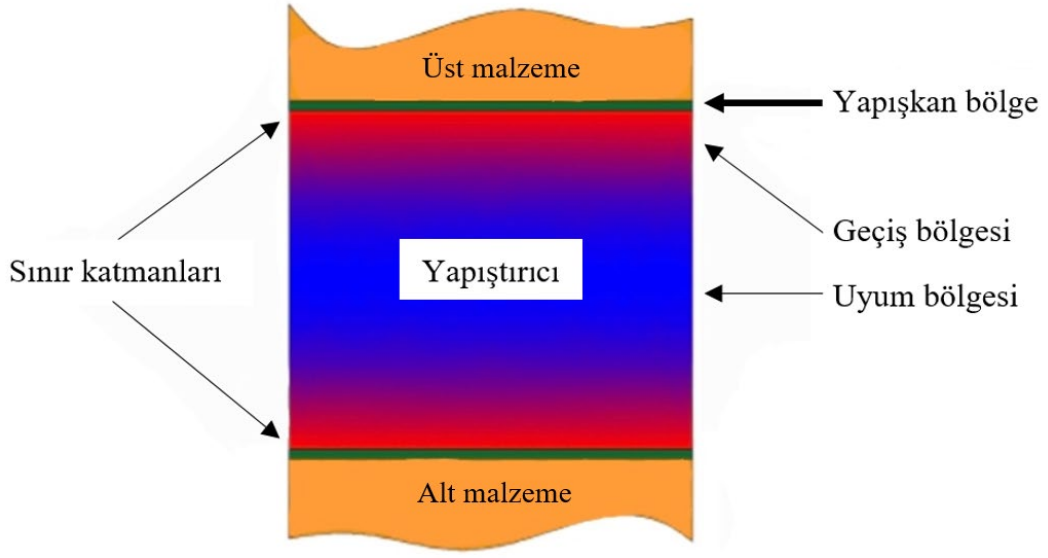
Şekil 3.1: Yapıştırıcı [26].

Yapısal yapıştırıcılar, genellikle mukavemeti yüksek olan bir yapıştırıcıyı tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Bu terim genellikle yüksek kesme mukavemetine (inç kare veya psi başına 1.000 pound'dan fazla) ve iyi çevresel dirence sahip yapıştırıcıları tanımlamak için kullanılmaktadır. Yapısal yapıştırıcılara örnek olarak epoksi, termoset akrilik ve üretan sistemleri verilebilir. Yapısal yapıştırıcıların genellikle uygulandıkları ürünün ömrü boyunca dayanması beklenir [27].

Yapısal olmayan yapıştırıcılar, çok daha düşük mukavemet ve kalıcılığa sahip yapıştırıcılardır. Genellikle geçici sabitleme veya zayıf alt tabakaların yapıştırılması için kullanılırlar. Yapısal olmayan yapıştırıcılara örnek olarak basınca duyarlı filmler, ahşap yapıştırıcı, elastomerler ve dolgu macunları verilebilir [27].

3.3 Yapışma

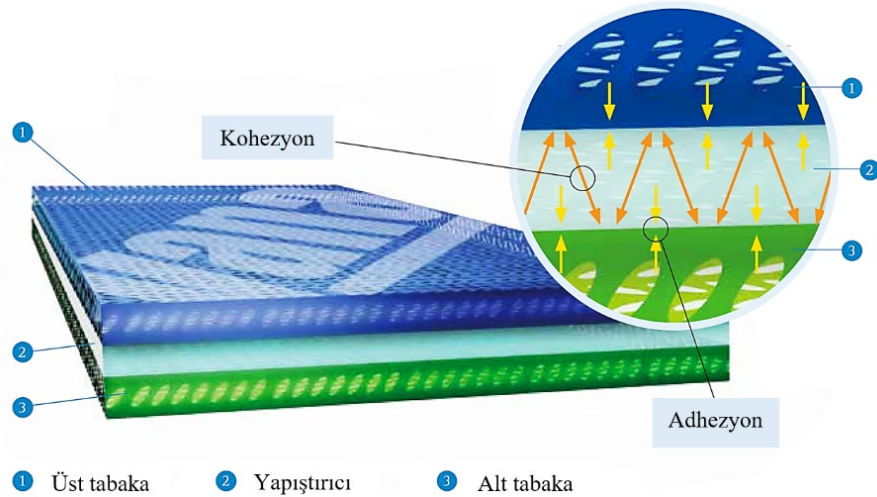
Yapışma, iki yüzeyin fiziksel ve kimyasal kuvvetlerden oluşabilen fazlar arası kuvvetler tarafından bir arada tutulmasıdır (Şekil 3.2). Bu kuvvetler adhezyon ve kohezyon kuvvetidir (Şekil 3.3).



Şekil 3.2: Bir yapıştırma bağlantısının enine kesiti [28].

3.3.1 Adhezyon

Temas halindeki maddelerin yüzeyleri arasında uygulanan moleküler çekimdir. Başka bir deyişle adhezyon, yapıştırıcının uygulanan yüzeye yapışması veya bağlanması için doğrudan temas ettirilen farklı moleküler türler arasındaki çekim işlemidir. Malzeme ve yapışkan moleküller birbirine yaklaştığında, aralarında moleküller arası kuvvetler yoluyla mikroskobik düzeyde yapışma kuvvetleri meydana gelir [28, 29].



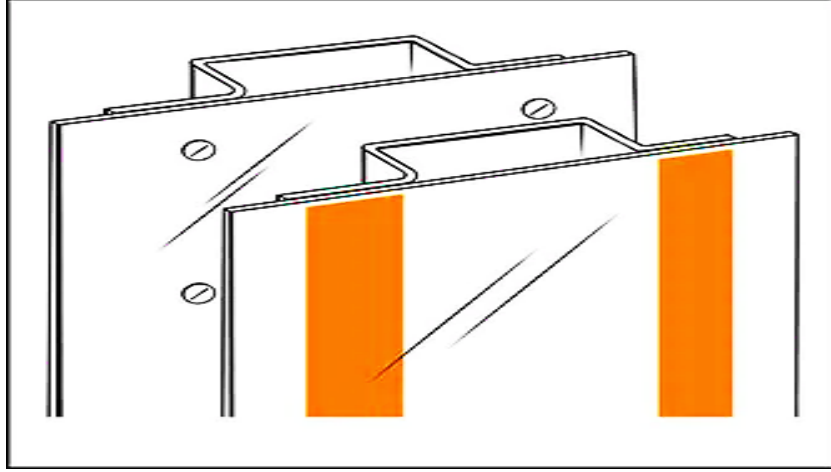
Şekil 3.3: Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bir bağlantıya etki eden kuvvetler [30].

3.3.2 Kohezyon

Yapıştırıcının parçacıklarının bir arada tutulduğu durum yani iç mukavemet olarak tanımlanabilir [28]. Kohezyon bağı yapışkan tabakayı sağlam tutar ve bölünmesini önler.

3.4 Yapıştırıcı Kullanımının Diğer Birleştirme Yöntemlerine Göre Avantajları

- Titreşimi, yorulmayı ve gürültüyü azaltır,
- Farklı şekil ve kalınlıktaki, zor birleşen malzemeleri birleştirir,
- Benzer veya farklı malzemelerin herhangi bir kombinasyonunu birleştirir,
- Aynı anda yapışır ve sızdırmazlık sağlar,
- Benzer olmayan metaller arasındaki galvanik korozyonu önler veya en aza indirir,
- Vida ve perçin noktalarındaki gerilim yoğunluğunu azaltır,
- Üretim verimliliğini etkileyebilir,
- Ağırlığı azaltır,
- Estetik görünümü iyileştirir (Şekil 3.4)
- Mekanik birleştirmelerden daha ucuz ve daha hızlıdır [27, 31].



Şekil 3.4: Perçin ve yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantıdaki estetik görünüm farkı [32].

3.5 Yapıştırıcı Kullanımının Dezavantajları

- Uzun kurlenme süreleri gerekebilir,
- Isı ve basınç gerekebilir,
- Kalıp ve bağlama gerektirebilir,
- Genellikle sabit bir süreç yönetimi gerektirir,

- Düşük darbe dayanımı mevcuttur,
- Kullanım ömrü çevreye bağlıdır,
- Uygulamada bazen özel eğitim gerekir [27].

3.6 İyi Bir Bağlantının Gereklilikleri

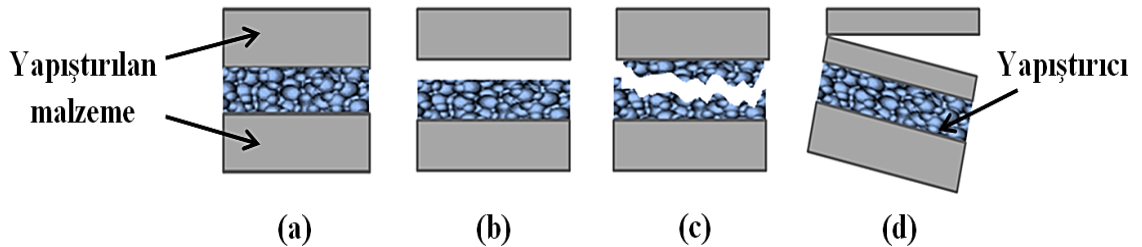
Yapıştırılacak olan parçaların başarılı bir şekilde birleştirilmesi, uygun bir süreç gerektirmektedir. Yapıştırma süreci uygun sıcaklık, basınç ve yapışma süresine tabi tutulduktan sonra yapıştırılacak yüzeylere uygulanmalıdır.

İyi bir yapıştırıcı bağı için temel gereksinimler şunlardır:

- Uygun yapıştırıcı seçimi
- İyi bir bağlantı tasarımı
- Yüzeylerin temizliği
- Yapıştırılacak yüzeyin iyi ıslatılması yani yapıştırıcı ile yapıştırılan yüzey arasında sürekli bir temas olması
- Uygun yapıştırma işlemi (katılaştırma ve kürleme) [25]

3.7 Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Hasar Tipleri

Yapıştırılan malzemeler ve yapıştırıcı arasında oluşan hasar tipleri genel olarak üçe ayrılmaktadır (Şekil 3.5). Ayrılma yapıştırılan tabaka ile yapıştırıcı arasında meydana gelirse, buna adhezyon hasarı denir (Şekil 3.5.b). Eğer ayrılma her iki yüzeyde yapıştırıcı ile kaplı bölgede meydana gelirse buna, kohezyon hasarı denir (Şekil 3.5.c). Bazen, yapışkan bağ o kadar güçlüdür ki, ayrılma bağdan uzak yapıştırılan malzemelerden birinde meydana gelir. Buna, yapıştırılan malzemede kohezyon hasarı denir (Şekil 3.5.d) [25].



Şekil 3.5: Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar tipleri; a) Yapıştırıcı ile birleştirilmiş malzeme, b) adhezyon hasarı, c) kohezyon hasarı, d) yapıştırılan malzemenin kohezyon hasarı.

3.7.1 Başarısız bir bağlantının değerlendirilmesi

Bağlantıda bir hatanın ortaya çıkması, bize bağlantının sadece zayıf noktasını gösterir, ancak başarısızlığın nedenleri hakkında bilgi vermez. Hatanın düzeltilmesi için öncelikle nedenlerinin bulunması gerekir. Başarısız bağlantıya sebep olan noktalar ve çözüm yolları Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Değerlendirme ve çözüm yolları [1].

Hatanın kaynağı	Dayanıklılığı artırmanın yolları
yapışma hatası	Kuşkusuz, yapıştırmanın zayıf noktası, yapıştırılan kısım ile yapıştırıcı arasındaki sınır tabakasıdır. Ya yanlış yapıştırıcı kullanılmış ya da yapıştırılacak yüzey kirlidir. Her iki durumda da uygun yüzey hazırlığı ile mukavemet artırılabilir.
uyum hatası	Yapıştırıcı, dış etkiler (örn. gerilim konsantrasyonu, sıcaklık, eskime) nedeniyle aşırı yüklenmiştir. Onarım: eklem geometrisinde yapısal değişiklikler ve/veya daha uygun bir yapıştırıcı.

Tablo 3.2: Yapıştırıcı arızasının nedenleri ve onarım yöntemleri [1].

Olası nedenler	Çözümler
Yanlış malzemeler	Toleransları, boşlukları ve malzemeleri kontrol edin ve denetimi artırın.
Kirlenmiş malzemeler	Yüzey hazırlığını kontrol edin ve uygun şekilde düzeltin (örn. temizlik maddeleri, temizleme prosedürleri, ara depolama).
Kaynağın yanlış uygulanması	Tüm proses parametrelerini kontrol edin, bağlantı yapın, sabitleme tipini ve prosedürünü optimize edin, sabitlemeden sonra tüm sertleşme koşullarının karşılanıp karşılanmadığını kontrol edin.
Yapıştırıcı yetersiz sertleştirilmiş	Kürleme koşullarını kontrol edin (bağlantı, hava erişimi, sıcaklık, nem, vb.). Teknik veri sayfasında verilen kürleme sürelerine uyun. Tutkalın son kullanma tarihinin geçmediğini kontrol edin.
Mekanik aşırı yük veya uygun olmayan gerilme (soyulma)	Yapıştırma yüzeyini artırın ve/veya bağlantı geometrisini iyileştirin. Yapıştırıcı seçimini gerilim tipine göre (gerilme, kayma vb.) kontrol edin.
Termal aşırı yükleme	En yüksek sıcaklık direncine sahip yapıştırıcıyı seçin.
Sıvı veya gazlı ortam nedeniyle yapışkan tabakada korozyon veya penetrasyon ve hasar	Yapıştırılacak parçaların uygun bir kaplamasını veya yapısını kullanarak, ortam ile temas olmayacak şekilde derz boşluğunu yüzeyin temasında sabitleyin

3.8 Yükler ve Bunlardan Kaynaklanan Gerilmeler

Yapıştırıcı üzerindeki yüklerin etkisi, çeşitli gerilmelere neden olmaktadır. Çekme ve basma yükleri için, yapıştırma hattı boyunca gerilme dağılımı eşittir. Bu nedenle, gerilmeleri hesaplamak için etki eden kuvvetler basit bir şekilde bağlanma alanına bölünür. Aslında, çekme ve sıkıştırma çok nadirdir. Soyulma, yarıлма ve kesme yükleriyle daha sık karşılaşılmaktadır.

3.8.1 Yapıştırma bağlantısının tasarımı

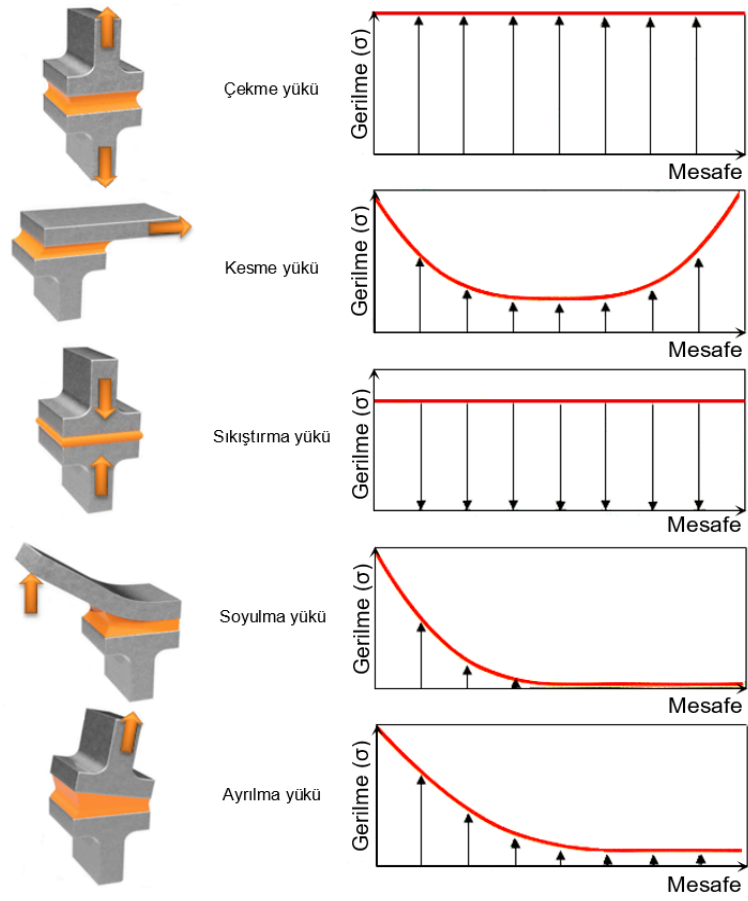
Yapıştırıcı eklemının tasarımı için, gerilimleri mümkün olduğu kadar üniform olarak dağıtmak çok önemlidir. Tasarımcılar, yüklü bağlantıdaki gerilimlerin tam olarak nasıl dağıldığını bilmelidir. Yapıştırıcı bir bağlantı tasarlanırken dikkate alınması gereken bir takım göstergeler vardır. Bunlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Soyulma ve yarıлма kuvvetlerinin en aza indirilmesi:

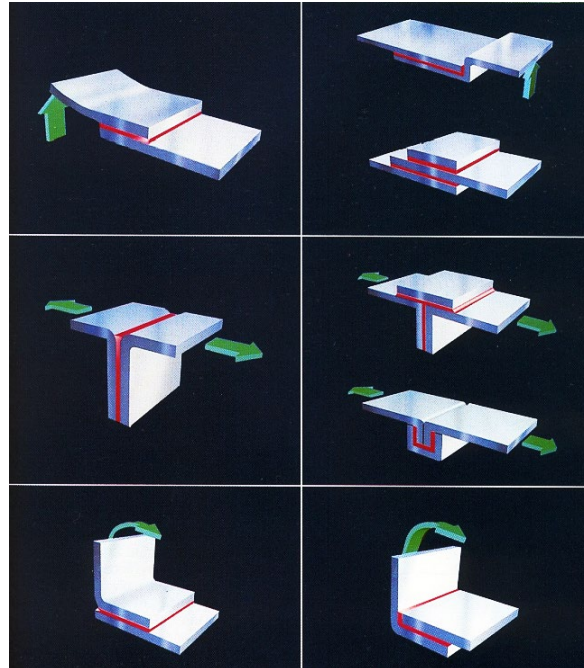
Şekil 3.6'da gerilim dağılım eğrilerine bakıldığında, soyulma ve yarıлма kuvvetlerinin mümkün olduğu kadar azaltılması gerektiği görülmektedir. Şekil 3.7'de bu kuvvetlerin daha az zararlı olanlarla nasıl değiştirileceğine dair bazı önerilere yer verilmiştir.

Yapıştırma yüzeyinin maksimize edilmesi:

Yapıştırma eklemını iyileştirmenin veya yapıyı yapıştırmaya uygun hale getirmenin bir diğer basit ve çok önemli yolu, yapıştırma yüzeyini arttırmaktır. Çoğu zaman, yüzey alanı çok küçükse, soyulma veya yarıлма gerilimleri çok güçlü olur. Yapıştırıcının tepkimesi, bir yük oluşturur. Genel olarak, bir parça ne kadar rijit ise, geometrisinin bağlantı kuvveti üzerindeki etkisi o kadar az olur.



Şekil 3.6: En yaygın yük türleri ve gerilim dağılımları [1, 31].



Şekil 3.7: Soyulma yükleri ve yapısal dönüşümleri [1].

3.9 Malzeme Yüzey Hazırlama Teknikleri

Yapıştırma bir yüzey olayı olduğundan, yapıştırma işleminden önce yapılan hazırlık başarının anahtarıdır. Yapıştırma işlemlerinde yüzey hazırlığı yapışan yüzeylerin daha dayanıklı bir şekilde bağlanması için büyük önem arz etmektedir. Her zaman pratik olmamakla birlikte, temel yapışan materyalin, arada hiçbir oksit film tabakası, boya, astar, kromat kaplama, fosfat kaplama veya silikon ayırıcı madde olmadan doğrudan yapıştırıcıya maruz bırakılması arzu edilir. Bu tür tabakalara zayıf sınır tabakaları denir ve bunların mevcudiyetinde yapıştırıcı asla yapışan yüzeyle doğrudan temas etmez [33].

3.9.1 Metallerin yüzey işlemi

Metaller yüksek enerjili yüzeylere sahiptir. Atmosferdeki yağları ve diğer kirlenmeleri emer. Bu yüzden metal yüzeylerini temizlemeden (ve zımparalamadan) kaliteli bir yapışkan bağ elde etmek mümkün değildir. Metalik bir numunenin yüzeyinin hazırlanması, hepsi her zaman uygulanmayan birden fazla adımı içerir. Bu adımlar aşağıda listelenmiştir:

1. Temizleme (çözücü veya başka bir kimyasal kullanarak)
2. Korozyon direncinin iyileştirilmesi
3. Astarlama (bir malzemenin yüzeye uygulanması)
4. Yüzeyi güçlendirmek için yüzey sertleştirme (mekanik veya kimyasal) [33]

3.9.2 Yapıştırma için yüzeyin hazırlanması

Optimum yapıştırma sonucunu elde etmek için uygun yüzey hazırlığı şarttır. Yapışma kuvveti daha çok yapıştırıcı ile birleştirilen yüzeyler arasındaki yapışmaya bağlıdır. Yüzeyler ne kadar dikkatli hazırlanır ve temizlenirse yapışkan bağlar o kadar güçlenmektedir.

Yapışma şu şekilde desteklenebilir:

- Yapıştırılmış yüzeylerden istenmeyen katmanların yağdan arındırma veya taşlama yoluyla çıkarılması
- Astarlarla kaplayarak yeni bir aktif yüzey oluşturma
- Aşındırma, plazma kaplama vb. ile yüzey aktivitesinin değiştirilmesi [1].

3.9.2.1 Yapıştırma öncesi yüzeyin yağdan arındırılması

En iyi yapıştırma işlemi için, yapıştırılacak olan her iki yüzeyde bulunabilecek yağ, gres, toz ve diğer kir kalıntılarının tamamen temizlenmesi gerekmektedir. Bunun için buharlaşan ve kalıntı bırakmayan solventler en uygundur.

Alkali veya asit içerikli olan su bazlı temizleyiciler neredeyse her zaman korozyon önleyici katkı maddeleri içermektedir. Temizlenen yüzeylerde kalarak yapıştırıcının yapışmasını azaltabilir veya kurummasını engelleyebilirler. Bu tür temizleme sistemleri kullanılacaksa, yapıştırıcı üzerindeki etkileri önceden kontrol edilmelidir. Ancak her durumda yapıştırılacak yüzeyler yıkanmalı ve silinmelidir [1].

3.9.2.2 Mekanik hazırlık

Kirli metal yüzeyler yağdan arındırıldıktan sonra bile giderilemeyen bir oksit tabakasıyla kaplanır. Karşılaşılan bu durum sonunda kumlama, taşlama veya tel fırçalama gibi mekanik yüzey işlemleri gereklidir. Kumlama, geniş yüzeylerin temizlenmesi için çok uygundur. Bu şekilde elde edilen pürüzlülük, çok büyük taneli aşındırıcı kullanılmaması şartıyla yapıştırma işlemini kolaylaştırır. Aşınma da benzer şekilde faydalı bir etkiye sahiptir. Bu durumda uygun tane boyutunun kullanılması önemlidir (örneğin alüminyum için 300 ila 600, çelik için 100). Kumlamadan sonra, taşlama veya fırça temizliğinden sonra, tüm aşındırıcı kalıntıları gidermek için parçalardaki yağlar giderilmelidir. Çok kirli parçalar da işlemeden önce yağdan arındırılmalıdır, böylece aşındırıcı tanecikler yüzeye kir yaymaz. Uygulamada, işleme yöntemi çok basittir ve genellikle iyi sonuçlar verir.

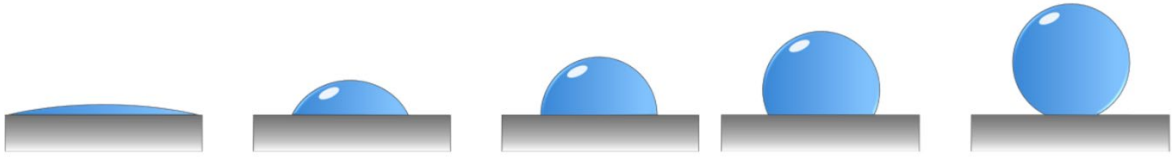
Plastik veya kauçuk parçaları yapıştırırken, önce yüzey filmi ve ayırıcı maddeler gibi kirleticiler çıkarılmalıdır. Oksit aşındırıcıların plastik, dökme demir ve alüminyum temizliği için uygun olduğu kanıtlanmıştır. Kauçuk yüzeyler solventlerle temizlenebilir veya silinebilir [1].

3.9.2.3 Islanabilirlik testi

Yüzeyin yapıştırmaya hazırlığı su damlası yöntemi ile kolaylıkla kontrol edilebilir. Test, temizlenmiş yüzeylere birkaç damla su uygulanmasından oluşur. Yetersiz temizlenen yüzeyde su damlası küre şeklini korur ve yüzeyin tekrar temizlenmesi gerekir. Damla yüzeye yayılırsa, yeterli nemin olduğu ve yapıştırma yüzeyinin temiz olduğu anlamına

gelir (Şekil 3.8). Ancak bu yöntem, alüminyum ve magnezyum üzerinde anodize (koruyucu katman) edilmiş katmanları test etmek için uygun değildir.

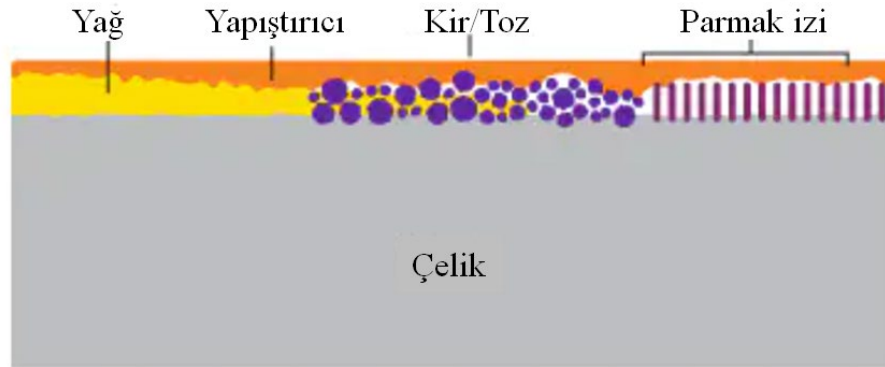
Su damlası testi, kolaylıkla elde edilebildiği için uygundur, ancak yüzey gerilimini etkileyen değişen derecelerde su sertliği nedeniyle faydası sınırlıdır. Bazı durumlarda damıtılmış su bile bu testte anlamlı sonuçlar vermemektedir. Bu nedenle, özel durumlarda, belirli yüzey gerilimlerine sahip karşılaştırmalı sıvı setleri önerilir. Bu test yalnızca bir ıslanabilirlik testi olup yapışkanlığı test etmemektedir [1].



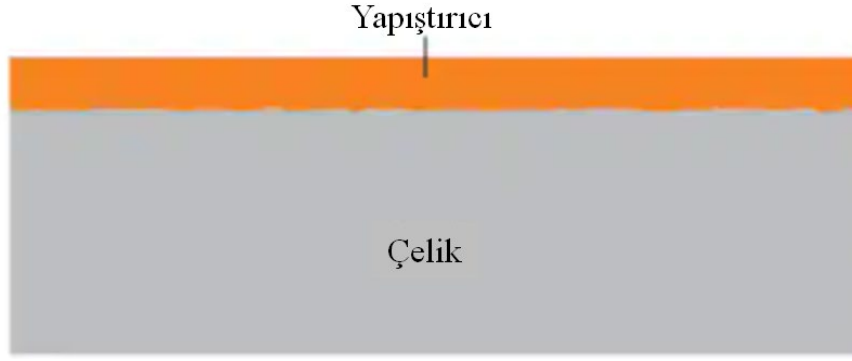
Şekil 3.8: En iyiden en kötüye doğru sıralanan ıslanabilirlik testleri [34].

Yüzey işlemleri uygulanmamış kirli yüzeylerde yapıştırıcının yüzey teması ve yüzeye akma potansiyeli azdır.

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da sırasıyla kirli yüzey ve temiz yüzey arasındaki yapışma kalitesi açısından fark yer almaktadır.



Şekil 3.9: Kirli yüzeye yapıştırıcı uygulaması [31].



Şekil 3.10: Temiz yüzeye yapıştırıcı uygulaması [31].

3.10 Yapıştırma Bağlarının Testleri

Test, malzeme bilimi ve mühendisliğinin her alanında önemlidir, ancak özellikle yapıştırıcılarda çok önemlidir. Bu tür testler sadece yapıştırıcının doğal gücünü değil, aynı zamanda yapıştırma tekniğini, yüzey temizliğini, yüzey işlemlerinin etkinliğini, yüzeylerin aşındırılmasını, yapıştırıcının uygulanması ve kütleme döngüsünü de değerlendirir. Yapıştırıcı testleri, aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli nedenlerle kullanılır:

- Özelliklerin karşılaştırılması (gerilme, kayma, soyulma, eğilme, darbe ve bölünme mukavemeti, mukavemet, yorulma, çevresel direnç, iletkenlik vb.)
- Yapıştırıcıların uygun olup olmadığını belirlemek için bir grup yapıştırıcı için kalite kontrolleri
- Yüzeyin ve/veya diğer hazırlıkların etkinliğinin kontrol edilmesi
- Performans tahmininde yararlı parametrelerin belirlenmesi (iyileştirme koşulları, kurutma koşulları, bağ hattı kalınlığı vb.) [25].

3.10.1 Çekme

Çekme testleri, yükün bağ hattının düzlemine dik ve bağ alanlarının merkezi doğrultusunda uygulandığı deneylerdir. Çekme testleri, yapıştırıcıları değerlendirmek için kullanılan en yaygın testler arasındadır. Yapısal yapıştırıcıların çekme dayanımları karşılaştırıldığında, çoğu yapısal malzemeye göre yüksek çekme dayanımlarına sahiptir. Çekme testinin avantajlarından biri, temel ve karmaşık olmayan çekme gerilimi, modülü ve mukavemet verileri vermesidir.

3.10.2 Kesme (Kayma)

Kesme gerilmeleri, bağına paralel ve malzeme kesit düzlemi boyunca uygulanan gerilmelerdir. Kesme testleri çok yaygındır, çünkü numunelerin hazırlanması kolaydır ve birçok yapısal yapıştırıcı için örnekler oluşturmak, geometriyi kopyalamak kolaydır. Çekme testlerinde olduğu gibi, gerilme dağılımı homojen değildir ve kesme gerilmesini yükün bağlama alanına vermek genellikle geleneksel olmakla birlikte, bağlama hattındaki maksimum gerilme, ortalama gerilmeden oldukça yüksek olabilir. Yapıştırıcıdaki gerilim de kesmeden farklı olabilir. Yapıştırıcı kalınlığı ve yapışma sertliği gibi faktörlere bağlı olarak, yapıştırıcı "kesme" bağlantısının başarısızlığına, kesme veya gerilim hakim olabilir.

3.10.3 Soyma

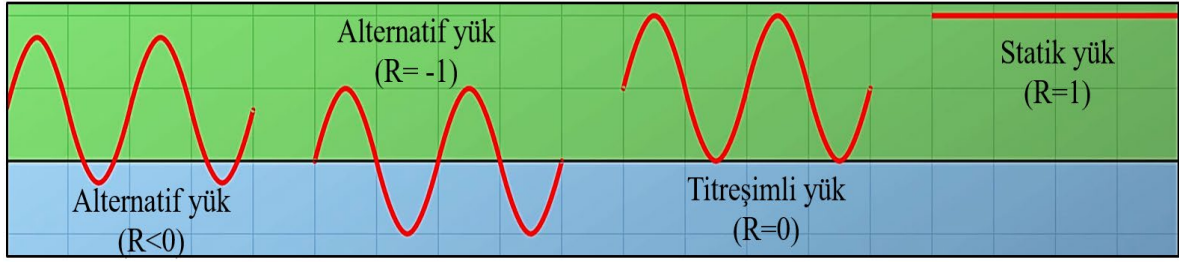
Esnek yapıştırıcılarla kullanılması amaçlanan soyma testleri, yüksek düzeyde bölgesel gerilmelere karşı direnci ölçmek için tasarlanmıştır. Bu nedenle soyulma kuvvetlerinin lineer kenarlara uygulandıkları kabul edilir. Yapıştırılan kısım ne kadar esnek ve yapıştırıcı modülü ne kadar yüksek olursa, gerilimli alan o kadar doğrusala indirgenir. Gerilim daha sonra sonsuza yaklaşır. Üzerinde gerilimin uygulandığı alan, yapıştırılan malzemenin ve yapışkanın kalınlığına ve modülüne bağlı olduğundan tam olarak değerlendirilmesi çok zordur. Uygulanan gerilim ve kopma gerilimi doğrusal değerler, yani doğrusal inç başına pound olarak rapor edilir.

3.10.4 Darbe

Darbe testleri, yapıştırıcıların kısa bir zamanda diliminde uygulanmakta olan kuvvetleri azaltma veya emme yeteneğini ölçer. Esasen, bu testler, bir yapıştırıcının uygulanan bir yüke karşı hız hassasiyetini ölçer.

3.10.5 Yorulma analizi

Makina elemanlarında iki tip zorlama şekli vardır. Bunlar; statik ve değişken zorlamadır. Elemanların kesitlerinde meydana gelen gerilmeler zamana göre değişmediği durumlarda statik zorlamayken, elemanı zorlayan kuvvetin ve elemanın kesitindeki gerilmeler zamana göre değişiklik gösteriyorsa bu durumda da dinamik zorlamalar meydana gelmektedir [35]. Değişken zorlamalar herhangi bir tarzda veya periyodik olabilmektedir. Statik zorlamalar, çoğu malzemenin uygulamasında, araştırılmasında ve seçilmesinde faydalı olsa da, aralıklı olarak uygulanan gerilme veya yorulma gibi zorlu koşulları kapsamaz (Şekil 3.11).



Şekil 3.11: Değişken zorlamalar [36].

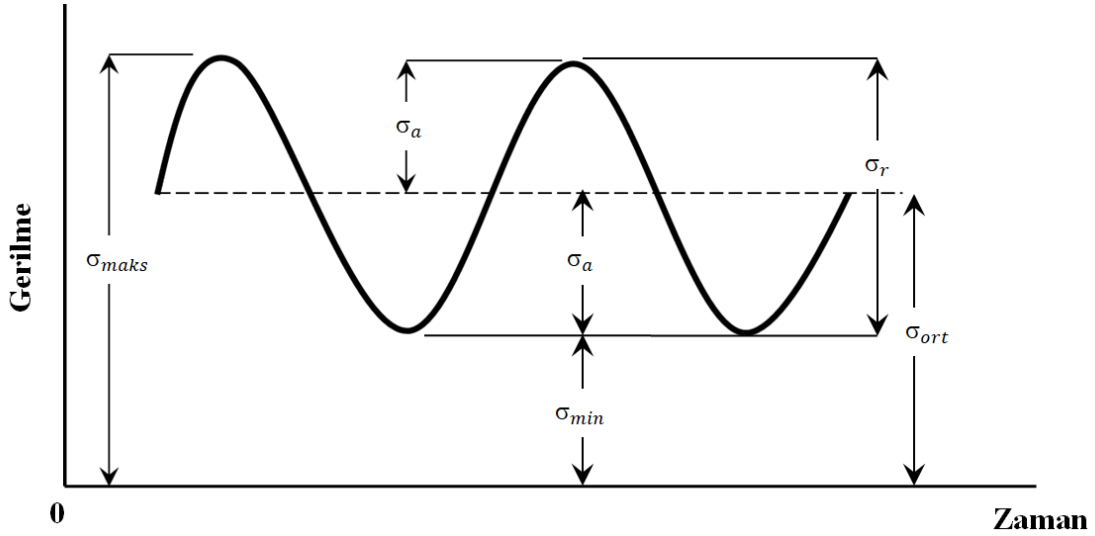
Malzemelerin yorulması, döngüsel veya tekrarlanan yüklerin uygulanmasından kaynaklanan özelliklerdeki değişiklikleri ifade eder. Yorulma yükündeki durum Şekil 3.12’de verilen, maksimum gerilme (σ_{mak}), minimum gerilme (σ_{min}), gerilme aralığı (σ_r), gerilme genliği (σ_a), ortalama gerilme (σ_{ort}) ve gerilme oranı (R) ile tanımlanmıştır. Maksimum ve minimum gerilmenin tespit edilmesi ile geriye kalan parametreler Eşitlik (3.1), Eşitlik (3.2), Eşitlik (3.3) ve Eşitlik (3.4) ile bulunmaktadır [35, 37].

$$\sigma_r = \sigma_{mak} - \sigma_{min} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{mak} + \sigma_{min}}{2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{mak} - \sigma_{min}}{2} \quad (3.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{mak}} \quad (3.4)$$



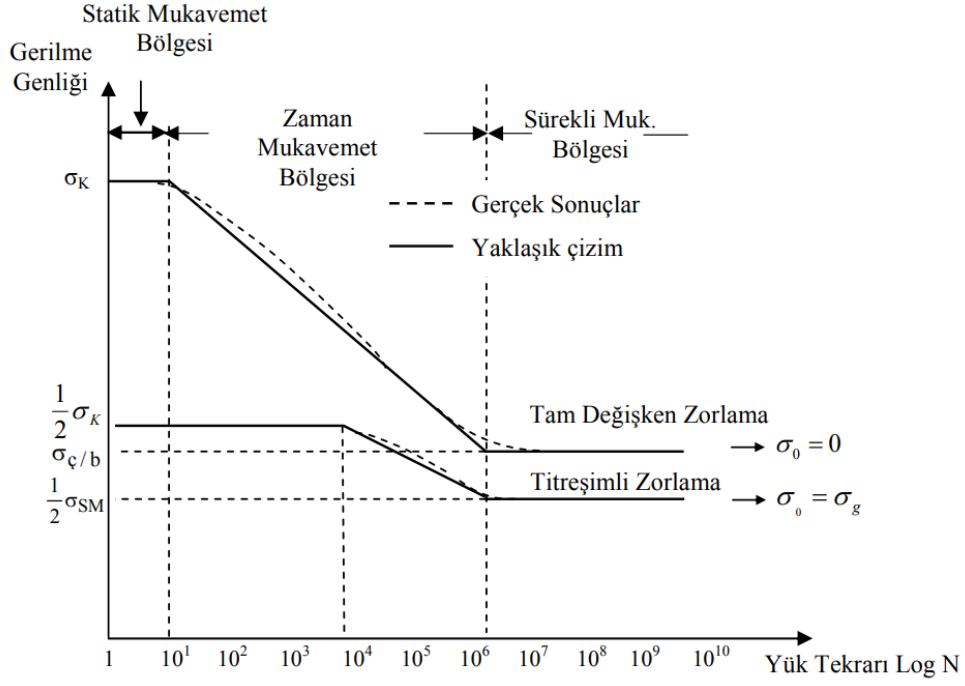
Şekil 3.12: Yorulma testi için sinüzoidal yükleme.

Gerilme oranı olan R , yorulma yükünün modunu gösterir. R oranlarına bağlı olarak uygulanabilecek yük çeşitleri Tablo 3.3'te özetlenmiştir [37].

Tablo 3.3: Yorulma yük modları.

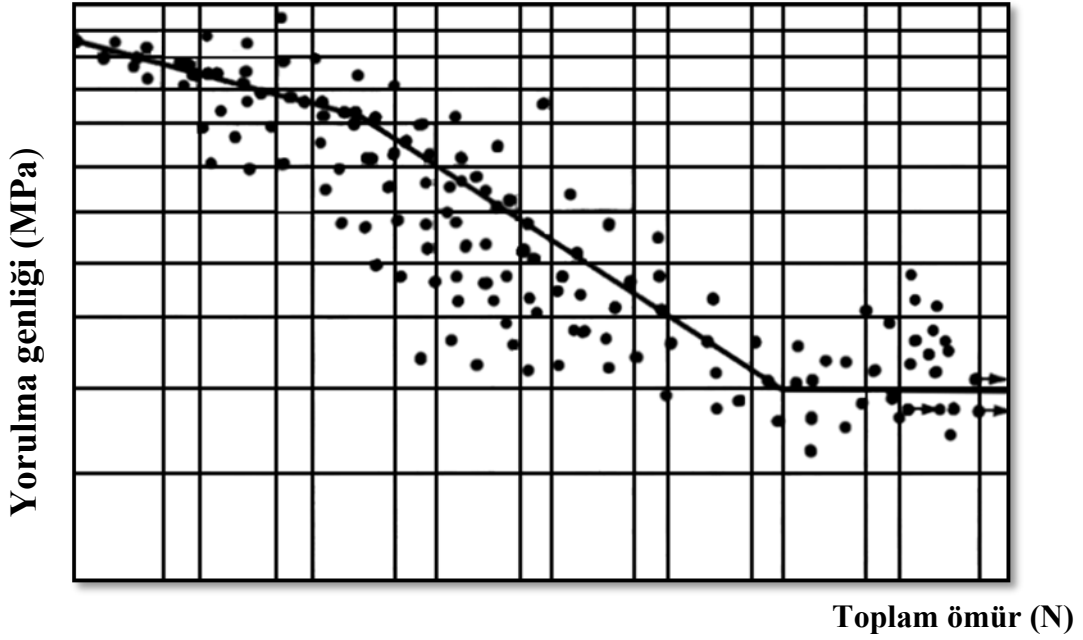
Yorulma Gerilmesi Oranı	Yorulma Yük Modu
$R= 1$	Statik Yükleme
$R= 0$	Çekme-Yüksüz
$0<R<1$	Çekme-Çekme
$R= -1$	Çekme-Basma, Tam Ters
$-1<R<0$	Çekme-Basma

Yorulma analizlerinde numunelerin belirli bir seviyedeki arızaya kadar olan döngü sayısı kaydedilir ve $S - N$ (Wöhler) Eğrisi olarak adlandırılan bir eğri oluşturulur (Şekil 3.13). Belirli bir yük tekrarı sonucu malzemenin kırılmasına neden olan gerilmeleri gösteren kısma Zaman Mukavemet bölgesi, kırılmamanın olmadığı kısma ise Sürekli Mukavemet Bölgesi denmektedir. Zaman mukavemetinden sürekli mukavemete geçiş sayısı olan N_g çelikler için $2 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7$, hafif metaller için $5 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^8$ arasındadır [38].

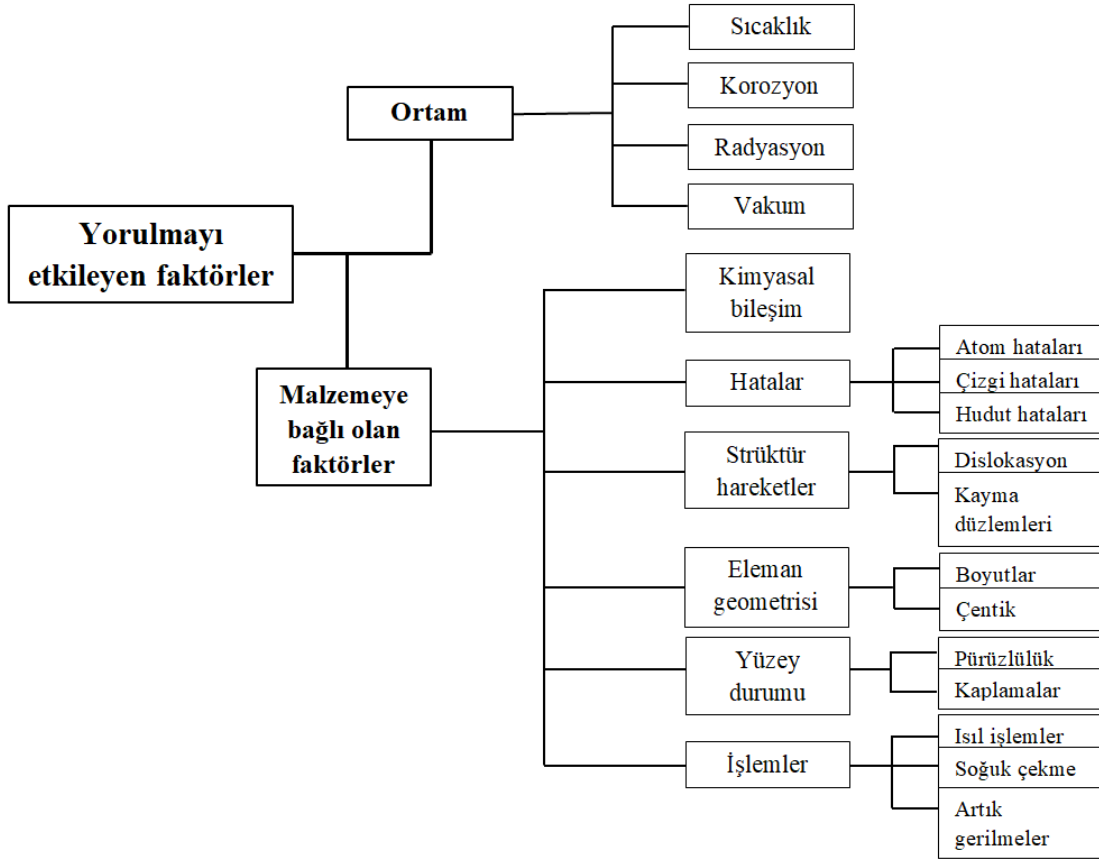


Şekil 3.13: S-N (Wöhler) Eğrisi [38].

Yorulma deneylerinde belirli bir gerilme genliğinde kullanılan deney numunelerinin sayısı fazla ise, Şekil 3.14'deki gibi bir durum ortaya çıkmaktadır. Belirli bir gerilme genliğinde belirli bir ömür değil, geliş güzel değişebilen ve geniş bir dağılıma sahip ömür dizisi elde edilir. Bu dağılımın sebepleri ise Şekil 3.15'te verilmiştir [35].



Şekil 3.14: Yorulma yük değişim sayısı [36].



Şekil 3.15: Yorulmayı etkileyen faktörler.

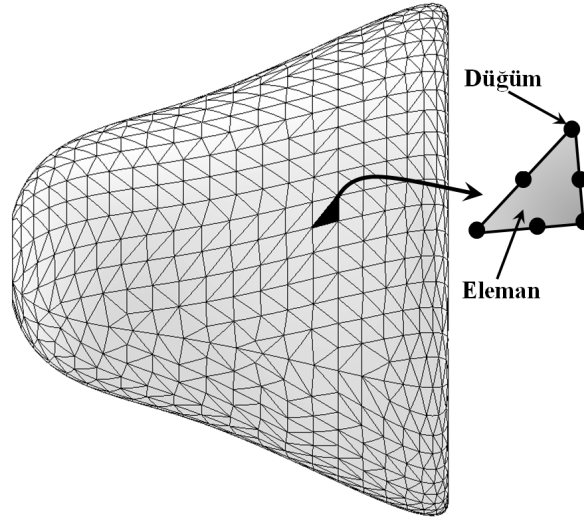
3.11 Sonlu Elemanlar Metodu

Mühendislik problemleri karmaşık çözümler içermektedir. Bu karmaşık çözüm aşamasındaki hassasiyeti azaltmaktadır. Problemlerin çözümünün minimum süreye indirilmesi ve çözümlenemeyen problemlerin bile sonuca ulaşabilmesi için devreye sonlu elemanlar metodu girmiştir.

İlk işlem, bilgisayar destekli tasarım programlarından geometrilerin kullanımını veya benzeri araçlarla geometrilerin inşasını ve elemanların otomatik olarak üretilmesini, düğüm verilerini, sınır koşullarını, malzeme verilerini ve uygulanan yüklemeleri içerir (Şekil 3.16). Son işlem ise, hesaplanan sonuçları listelemek ve grafiksel olarak görüntülemek için kullanılır. (Örneğin, yer değiştirmeler, hızlar, gerilimler, kuvvetler vb.)

İşlem sonrası aşamada, hesaplanan sonuçlar genellikle sonuçların mantıklı olup olmadığını görmek için kontrol edilir (çünkü, örneğin bir giriş hatası nedeniyle, amaçlanan sonlu

eleman modeli yanlış çözülmüş olabilir) ve daha sonra sonuçlar derinlemesine incelenir [39].



Şekil 3.16: Sonlu elemanlar modelinin düğüm noktası.

Sonlu elemanlar yönteminin (FEM) avantajları

1. Modelleme; FEM, karmaşık şekil ve geometrilerin kolaylıkla modellenmesini sağlamaktadır. Bu yöntemle tasarım yapan kişi hem içi hem de dışı modelleyebileceği için kritik faktörlerin bütün yapıyı nasıl etkilediğini ve arızaya sebep olan noktaların neden kaynaklandığını belirleyebilmektedir.
2. Uyarlanabilirlik; FEM, tasarım aşamasında prototiplere olan ihtiyacı en aza indirmek ve belirli bir oranda doğruluğu karşılayabilecek şekilde uyarlanabilmektedir. Oluşturulan prototiplerin birden fazla tekrarlanması yüksek maliyetli ve zaman alan bir süreçtir. Tasarımcı kullanılacak olan bu yöntem ile, farklı tasarım ve malzemelerle kısa sürede ürünü modelleyebilecektir.
3. Kesinlik; Karmaşık bir fiziksel bozukluğu elle modellemek pratik olmayabilirken, FEM kullanan bir bilgisayar sorunu yüksek derecede doğrulukla çözebilir.
4. Zamana bağlı simülasyon; FEM, bir alanda oluşan deformasyonun başka bir alandaki deformasyona bağlı olduğu çarpışma simülasyonları gibi belirli zamana bağlı simülasyonlar için oldukça kullanışlıdır.
5. Sınırlar; FEM ile tasarımcılar, modelin hangi koşullara yanıt vermesi gerektiğini tanımlamak için sınır koşullarını kullanabilir. Sınır koşulları noktasal kuvvetleri,

dağıtılmış kuvvetleri, termal etkileri (sıcaklık değışiklikleri veya uygulanan ısı enerjisi gibi) ve konumsal kısıtlamaları içerebilir.

6. Görselleştirme; Mühendisler, FEM'in ürettiğı ayrıntılı görselleştirmelerle tasarımdaki herhangi bir güvenlik açığııı kolayca tespit edebilir ve ardından yeni verileri yeni bir tasarım yapmak için kullanabilir [40].

Sonlu elemanlar analizini (FEA) içeren oldukça geniş bir program çeşidi mevcuttur. Programların içerisinde bulunan simülasyonlar, tasarımcılara ve mühendislere tasarımlarını hızlı bir şekilde test etmek ve bunları akıllıca yinelemek için ihtiyaç duydukları araçları sağlamaktadır. Doğrusal statik analizden daha karmaşık doğrusal olmayan ve dinamik analize kadar çok çeşitli türler için doğru ve güvenilir sonuçlar sağlamaktadırlar.

4. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, 3M'in akrilik yapıştırıcısının mekanik özellikleri (statik ve dinamik) ve davranışlarını belirlemek amacıyla yorulma cihazı tasarımı ve deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Deney aşamaları aşağıda verilen sıralamayla gerçekleştirilmiştir;

- Numunelerin mekanik aşındırılması,
- Yağdan arındırma ve yüzey temizleme işlemi,
- Numunelerin pürüzlülük ölçümleri,
- Yapıştırma işlemi,
- Kürleşme,
- Statik test,
- Dinamik test (yorulma testi)

4.1 Yapıştırılan Malzeme ve Özellikleri

Deneysel sırasında rüzgar türbin kulesinde kullanılan braket numuneleri için 40 mm çapındaki AISI 1040 karbon çeliği kullanılmıştır. Numuneye ait kimyasal analiz değerleri Tablo 4.1'de, mekanik özellikleri ise Tablo 4.2'de verilmiştir [41].

AISI 1040 karbon çeliği makine imalat sanayinde çok sık kullanılan bir malzemedir. AISI 1040 karbon çeliği yaklaşık %0.40 karbon oranına sahip orta karbonlu bir çeliktir. Yüksek zorlamalı motor parçalarında, yaylarda, transmisyon millerinde, raylarda ve dişlilerde kullanılmaktadır [42, 43].

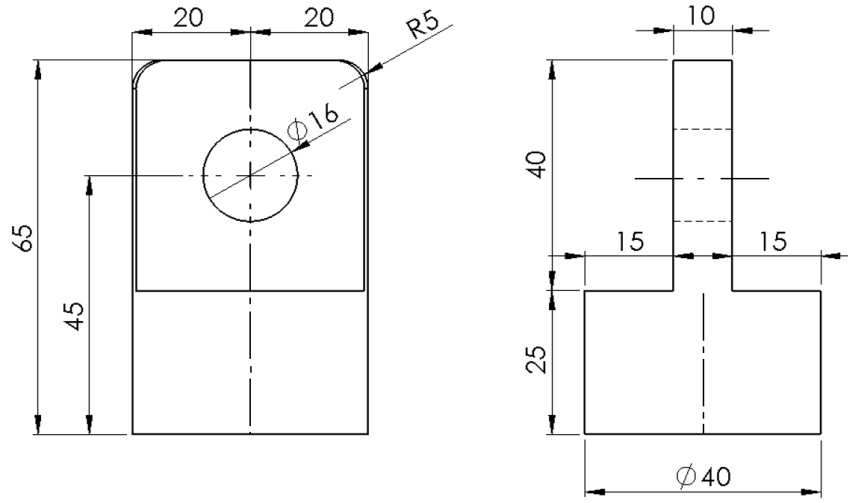
Tablo 4.1: Kimyasal analiz değerleri (% ağırlık) [41].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Mo	V
0,380	0,140	0,730	0,025	0,015	0,040	0,040	0,005	0,060	0,009	0,002

Tablo 4.2: AISI 1040 karbon çeliğinin mekanik özellikleri.

Çekme mukavemeti (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Kesme mukavemeti (MPa)	Elastikiyet modülü (MPa)	Yüzde uzama (%)	Sertlik (HB)
600	361	410	190-210	25	190

Bu çalışmada rüzgâr kule türbinlerindeki merdivenlerin kule duvarına montajında bağlantı elemanı olarak kullanılan braketin teknik resmi Şekil 4.1’de verilmiştir.

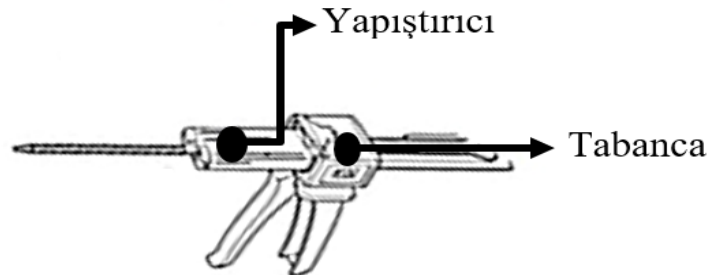


Şekil 4.1: Braketin (deney numunesi) ölçüleri.

4.2 Yapıştırıcı ve Özellikleri

Kullanım alanlarına ve özelliklerine göre pek çok yapıştırıcı çeşidi mevcuttur. Ancak bu çalışmada daha önce Gesbey Enerji Türbini Kule Üretim San. ve Tic. A.Ş. tarafından farklı yapıştırıcılar üzerinde mekanik test çalışmaları gerçekleştirilmiş ve test çalışmaları doğrultusunda en uygun yapıştırıcı olarak 3M’in akrilik yapıştırıcısının kullanımına karar verilmiştir. Kullanımına karar verilen yapıştırıcı yüzeye tabanca yardımıyla uygulanmaktadır (Şekil 4.2) [44].

Tercih edilen yapıştırıcı yüksek mukavemetli bağların gerekli olduğu endüstriyel uygulamalar için idealdir. Sert ve dayanıklı bir bağ için yüksek kesme, soyma ve darbe mukavemeti sunmaktadır. En az bir saat boyunca 400 °F 'ye kadar toz boya ve boya fırını döngülerine, -40°F 'ye kadar düşük sıcaklıklarda da mükemmel yapışma kuvveti ve darbe dayanımı sağlamaktadır [45]. Yapıştırıcıya ait mekanik özellikler Tablo 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.2: İki bileşenli yapıştırıcı ve tabancası

Tablo 4.3: Yapıştırıcının mekanik özellikleri.

Yapıştırıcının Özellikleri	
Poisson oranı	0,4
Elastisite modülü (N/mm ²)	1,17
Kütle yoğunluğu (g/cm ³)	0,99
Çekme mukavemeti (N/mm ²)	0,016

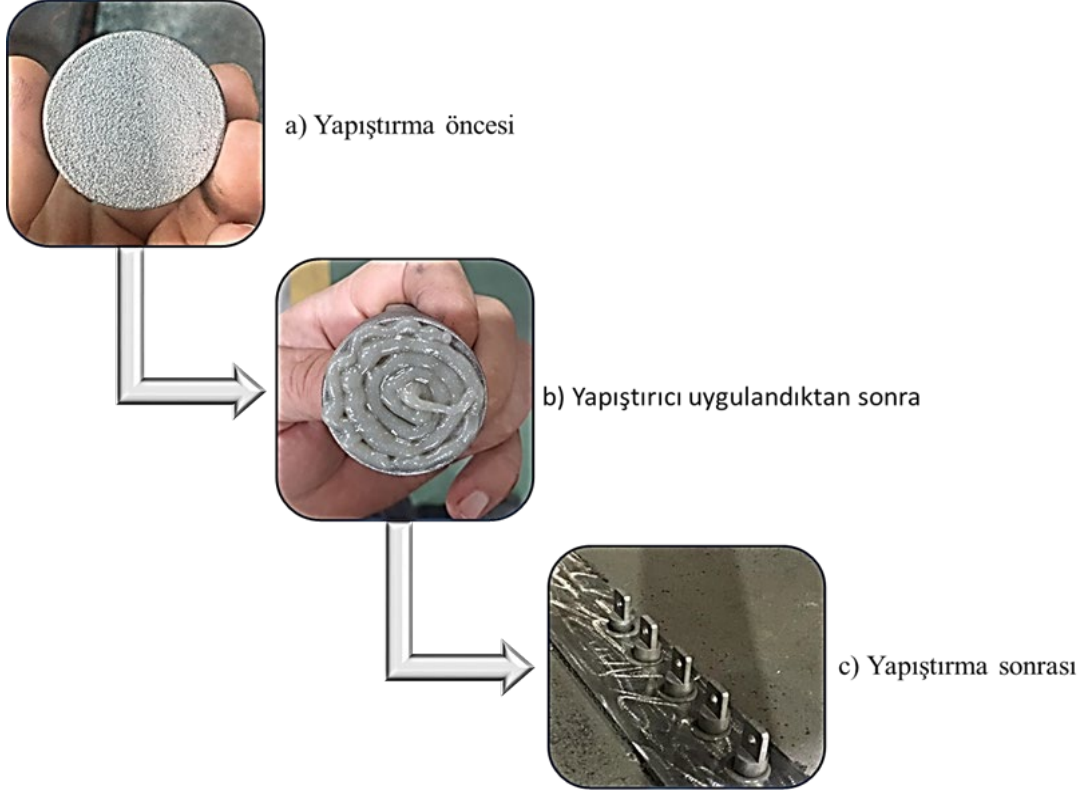
Kullanılan yapıştırıcının zamana ve sıcaklığa bağlı olarak farklı kürleşme şartları bulunmaktadır. Tablo 4.4'te yapıştırıcının açıldıktan sonra sıcaklığa bağlı olarak değişen kullanım aralıkları işlem süresi, yapıştırıcı uygulanan malzemenin hareket ettirilmeden önce geçmesi gereken zaman taşınma süresi, istenilen yapıya ulaşması için geçen zaman ise kürleşme süresi olarak ifade edilmiştir. Çalışmada kullanılan şart, 20°C sıcaklıkta 30 dakikadır.

Tablo 4.4 : Sıcaklığa bağlı olarak yapıştırıcının işlem, taşınma ve kürleşme süreleri.

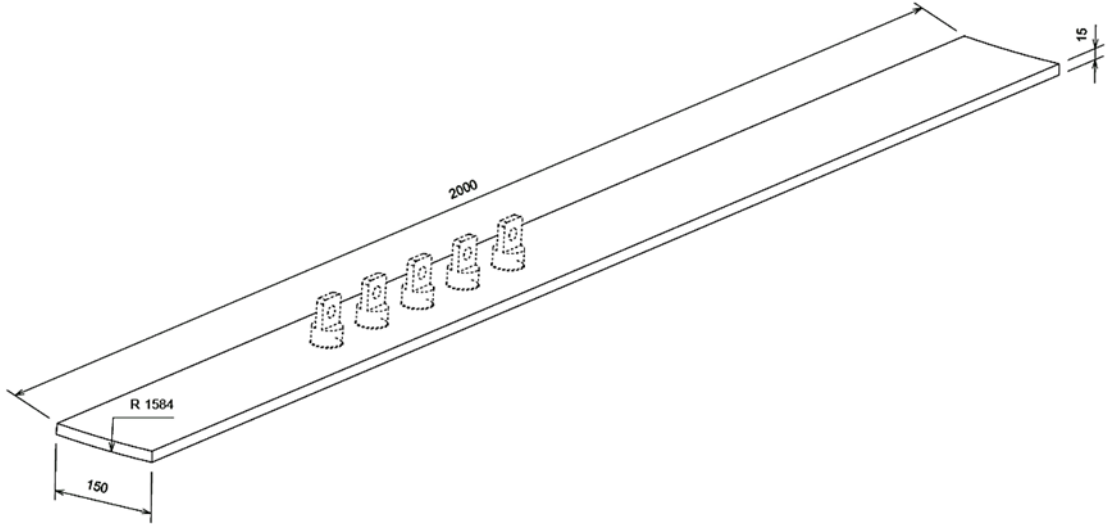
Sıcaklık	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
İşlem Süresi	11,5 dakika	8,5 dakika	6 dakika	4 dakika	3 dakika
Taşınma Süresi	58 dakika	43 dakika	30 dakika	20 dakika	15 dakika
Kürleşme süresi	55 saat	41 saat	29 saat	20 saat	14 saat

4.3 Numune Hazırlama

Yapıştırıcının yapıştırılacak yüzeye tam temas etmesi istendiği için öncelikli olarak yüzey temizliği yapılmıştır. Statik testlerde kullanılacak numunelerin yüzeyleri toz ve kirden arındırılıp GL40-GL25 metal aşındırıcı ile 9 bar basınçla 1,5 metre mesafeden kumlama işlemi yapılmıştır (Şekil 4.3.a). Statik testlerde kullanılacak numunelerin kumlama işleminde Elcometer 319 çığ noktası ölçüm cihazı ile ölçülen bağıl nem değeri %52,2, yüzey sıcaklığı 23,3°C ve ortam sıcaklığı 21,6°C'dir. Kumlama sonrası yüzeyler etil alkolle silinerek temizlenmiştir. Yüzey hazırlama işlemi yapıldıktan sonra yapıştırıcı, tüm yüzeyi kaplayacak şekilde üst numune yüzeyine uygulanmıştır (Şekil 4.3.b). Deney numuneleri hızlı bir şekilde özel olarak tasarlanmış statik test düzeneğine yapıştırılmıştır (Şekil 4.3.c). Statik deney numune plakasının ölçüleri Şekil 4.4'te verilmiştir.



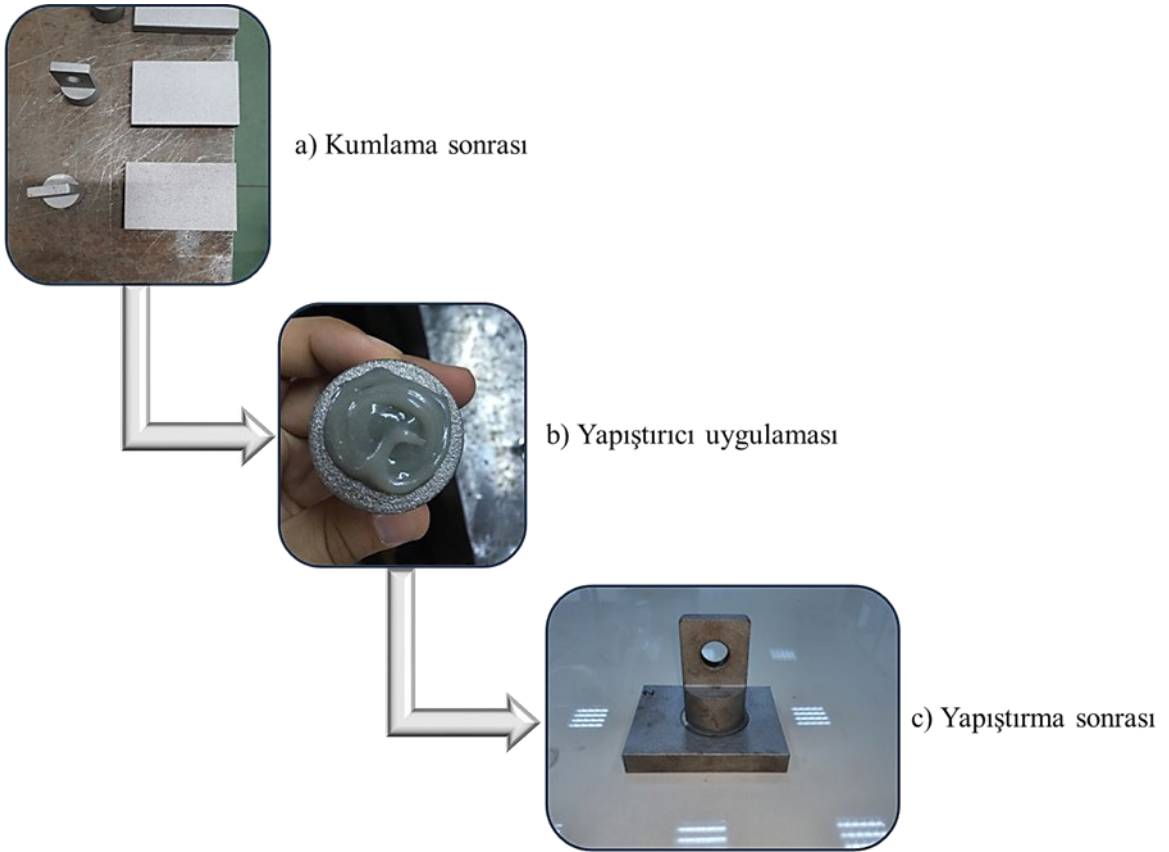
Şekil 4.3: Statik deney numunesi hazırlama aşaması.



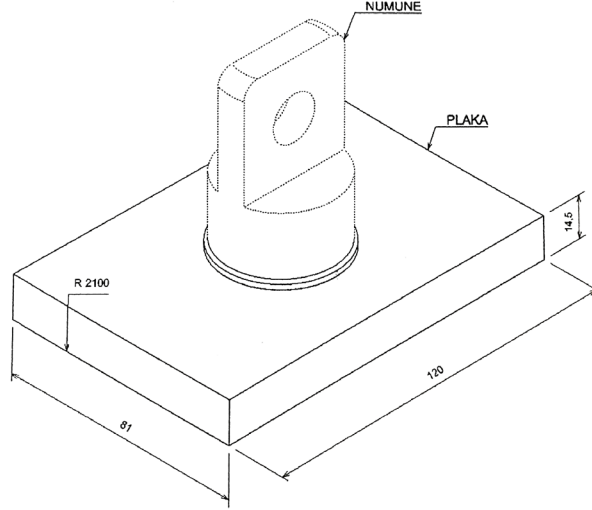
Şekil 4.4: Statik deney numunesi bağlantı plakası ölçüleri.

Statik testlerde olduğu gibi yorulma testlerinde de kullanılacak numunelerin yüzeyleri toz ve kirden arındırılıp kumlama işlemi yapılmıştır (Şekil 4.5.a). Yapıştırma işlemine geçilmeden önce Elcometer123 yüzey profili göstergesi ile yüzey pürüzlülük değerleri (Rt)

ölçülmüştür. Ortalama hesaplanan yüzey pürüzlülük değeri alt parça (81x120 mm² kesitli levha) için 47,79 µm, üst parça için 15,14 µm'dir. Daha sonra yüzeyler etil alkolle silinerek temizlenmiştir. Yüzey hazırlama işlemi yapıldıktan sonra yapıştırıcı, sadece üst parçanın (40mm çaplı silindirik parça) yüzeyini kaplayacak şekilde numune yüzeyine uygulanmıştır (Şekil 4.5.b). Yapıştırıcı uygulanan üst parça ile alt parça birleştirilerek yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5.c). Bu şekilde hazırlanan yorulma numunesinin perspektif resmi Şekil 4.6'da verilmiştir. Hem yorulma hem de statik test için hazırlanan numunelerin yapıştırma öncesi yükseklikleri belirlenmiş ve yapıştırma sonrası toplam yükseklikten çıkarılarak elde edilen yapıştırıcı kalınlıkları yaklaşık 1mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.5: Yorulma numunesinin hazırlanma aşamaları.



Şekil 4.6: Yorulma deney numunesi ve ölçüleri.

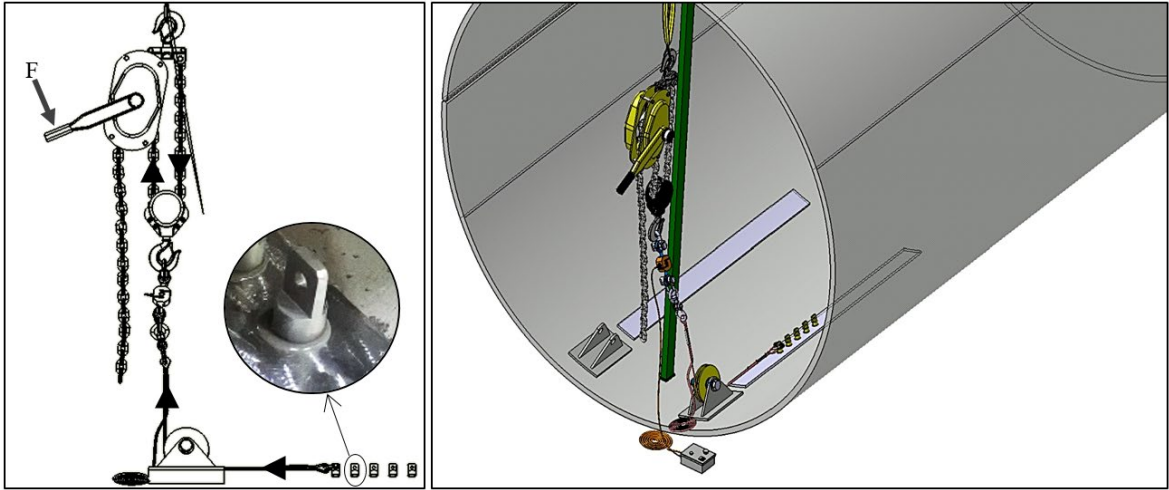
4.4 Statik Test

Kule içine yapıştırılan braketler kayma ve eğilme gerilmesine zorlandığından, yapıştırılan parçanın, gerçek uygulamadaki statik kayma ve eğilme gerilmesini belirleyebilmek için Şekil 4.7'de 3D modeli verilen standart dışı bir test düzeneği kullanılmıştır. Bu düzenekte mekanik olarak uygulanan yük load cell yardımıyla dijital olarak kaydedilmektedir. Deneyler sonucunda ayrılmanın meydana geldiği maksimum ayrılma yükü elde edilmiştir. Kayma ve eğilme gerilmesine zorlanan numunenin ayrılma yükünün tespiti için 5 adet numune test edilmiştir. Elde edilen kopma yükünde kayma gerilmesine (τ_k) ait değerler; [maksimum kuvvet (P_{mak}), alan (A_0)] Eşitlik (4.1), eğilme gerilmesi (σ_e) [eğilme momenti (M_e), alan atalet momenti (I_x), tarafsız eksene olan mesafe (y)] Eşitlik (4.2) ve eşdeğer gerilme değerleri ($\sigma_{eş}$) [eğilme gerilmesi (σ_e), kayma gerilmesi (τ_k)] Eşitlik (4.3) yardımıyla belirlenmiştir.

$$\tau_k = \frac{P_{mak}}{A_0} \quad (4.1)$$

$$\sigma_e = \frac{M_e}{I_x} \cdot y \quad (4.2)$$

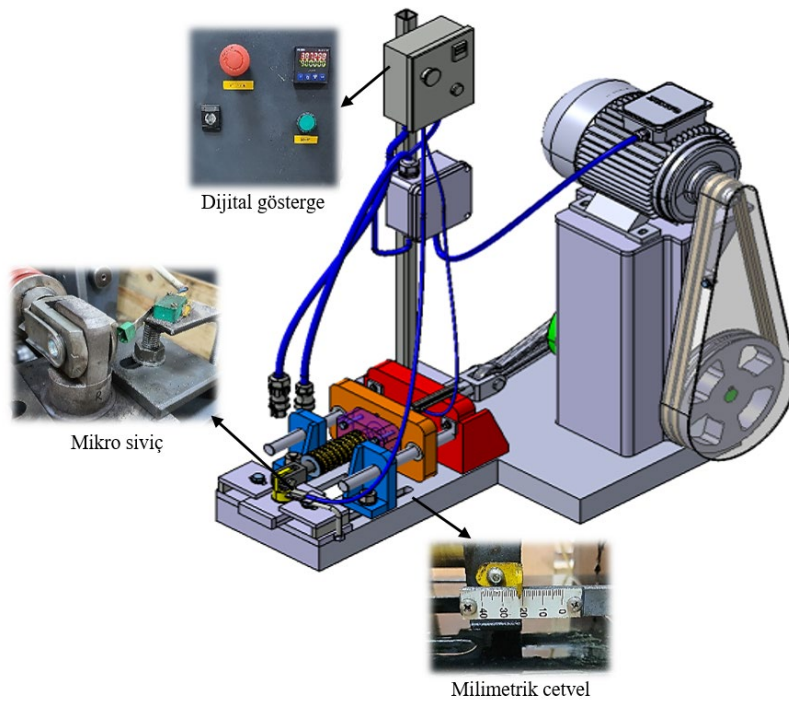
$$\sigma_{eş} = \frac{\sigma_e}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_e}{2}\right)^2 + \tau_k^2} \quad (4.3)$$



Şekil 4.7: Statik test düzeneğinin 3D modeli.

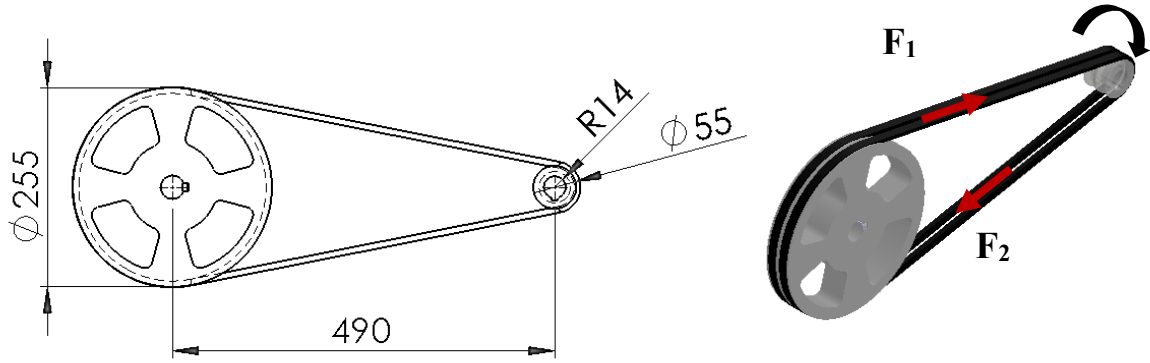
4.5 Yorulma Cihazı Tasarımı ve Testi

Malzeme ve yükleme türlerine bağlı olarak yorulma modeli değişebilmektedir. Farklı çaplara sahip numunelerin belirli aralıklarla değişen yükler altındaki yorulma dayanımlarını belirleyebilmek için Gönen ve arkadaşları [7] tarafından tasarlanan yay yorulma cihazının, yeni tasarımında kullanılacak yayın istenilen oranda sıkışmasını sağlayabilmek için elimizdeki mevcut elektrik motorunun sağlayacağı güç dikkate alınarak revizyonu yapılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Yorulma test cihazının 3D görüntüsü.

Yeni tasarım için kayış-kasnak mekanizması ve diğer elemanların boyutlandırılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Kayış-kasnak mekanizmasında ortaya çıkan kuvvetler ve kullanılacak kayış sayısı aşağıda hesaplanmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Kayış-kasnak mekanizması.

Kayış-kasnak hesaplaması yapılırken güç (P), döndürme momenti (M_d), açısal hız (ω), çevresel kuvvet (F_ζ), küçük kasnak çapı (d_k), büyük kasnak çapı (d_b), çevrim oranı (i), devir sayısı (n), sarılma açısı (β_1), eksenler arası mesafe (a), kayış uzunluğu (L), gergin kol kuvveti (F_1), gevşek kol kuvveti (F_2) olarak tanımlanmıştır.

Kasnağın ileteceği döndürme momenti;

$$P = M_d \omega \quad (4.4)$$

$$4000 = M_d \frac{2\pi 1500}{60}$$

$$M_d = 25465 \text{ Nmm}$$

M_d değeri ile kasnak çevresel kuvveti; kasnak üzerine sarılı iki kayış olduğundan Eşitlik (4.5)'teki gibi hesaplanabilir.

$$2F_\zeta = \frac{M_d}{d_k/2} \quad (4.5)$$

$$F_\zeta = 463 \text{ N}$$

Çevrim oranı;
$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{d_b}{d_k} \quad (4.6)$$

$$i = 4,6$$

Döndürülen kasnak hızı;

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{n_k}{n_b} \quad (4.7)$$

$$n_b = 326,1 \text{ d/dk}$$

Sarılma açısı;

$$\cos \frac{\beta_1}{2} = \frac{d_2 - d_1}{2a} \quad (4.8)$$

$$\beta_1 \cong 156,8^\circ = 2,74 \text{ radyan}$$

Kayış uzunluğu;

$$L = \left[\beta_1 \frac{d_1}{2} + (2\pi - \beta_1) \frac{d_2}{2} \right] + 2a \sin \frac{\beta_1}{2} \quad (4.9)$$

$$L \cong 1487,09 \text{ mm}$$

Kayış kol kuvvetleri;

$$F_\zeta = F_1 - F_2 \quad \text{ve} \quad \frac{F_1}{F_2} = e^{\mu\beta_1} \quad (\mu \text{ değerine ait veri Tablo 4.5'den alınmıştır.})$$

ifadelerinden; (4.10)

$$F_2 = 363,12 \text{ N}$$

$$F_1 = 826,12 \text{ N}$$

Tablo 4.5: Kayış malzemeleri ve özellikleri [38].

Çeki Tabakası	Kayma Tabakası	μ	T_{em} [°C]	$(s/d_1)_{maks}$	$F_{\check{c}}$ maks [N/mm]	ρ [kg/dm ³]	f_e maks [1/s]	V_{maks} [m/s]
Dokuma Kayışlar								
Tek kat, PA veya PE elyaf	Kauçuk veya poliüretan	0,5	-20	0,035	100	1,1 .. 1,4	10 .. 50	80
Çok katlı, PA, PE veya Pamuk elyaf	Kauçuk veya balata	0,5	-20	0,035	300	1,1 .. 1,4	10 .. 20	20 .. 50

Yorulma test cihazı 4 kW güç ve 1460 dev/dak ile tahrik edilmektedir. Motor devir sayısı kayış-kasnak mekanizmasıyla 1/6 oranında düşürülmekte ve dönme hareketi krank-biyel mekanizması ile yayı sıkıştırıran öteleme hareketine dönüştürülmektedir. Bu sırada sistem, yayın sıkışma miktarına bağlı olarak, 0-F (N) arasında değişen bası kuvvetini numuneye iletmektedir. Test düzeneğinde dairesel kesitli yaylar yerine daha uzun ömürlü olan dikdörtgen kesitli kalıp yaylar tercih edilmiştir. Şekil 4.8'deki turuncu renkli ara parça, istenilen kuvvetleri ($F=k.x$) elde edebilmek amacıyla yayı biyel kolu vasıtasıyla 20 ve 22mm sıkıştırarak istenilen bası kuvvetlerini numuneye iletmektedir. Yorulma test cihazında değişken bası gerilmeleri oluşturmak için kullanılan yaylara ait özellikler Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6: Yorulma cihazında kullanılan yaylar, rijitlikleri ve uyguladıkları bası kuvvetleri (x=20 mm için).

Yay Tipi	Yay Rijitliği (N/mm)	Kuvvet (N)
B32-115	51,5	1030
R32-115	107	2140
G32-115	140	2800
R50-102	245	4900
G50-115	352	7040

Yay sıkıştırma miktarı, sabit alt tablanın yan kısmına yerleştirilen milimetrik cetvel ile ayarlanabilmektedir. Bu sayede test cihazında kullanılmak istenen yayların çap ve boyları değişebilmektedir. Deneylerde numunelere uygulanan kuvvetlerin yük tekrar sayılarını belirlemek için bir sayaç kullanılmıştır. Sayaçtaki dijital göstergede karakter sayısı sınırlı olduğundan; sayaç her 10 yük tekrarında 1 birim artış sağlamaktadır. Alt tablaya yerleştirilen mikro siviç yardımı ile numune koptuğu an elektriksel devre kesilerek sistem otomatik olarak durmaktadır. Herhangi bir beklenmeyen durumla karşılaşıldığında cihazı durdurmak için 1 adet acil durdurma butonu mevcuttur (Şekil 4.8).

Yorulma deneylerine statik deneylerden elde edilen bileşik gerilmenin yaklaşık %70'i kadar değişken gerilme uygulanarak başlanmıştır. Bu ve bunun altındaki tekrarlı gerilmeleri oluşturabilmek için strok mesafeleri ve rijitlikleri Tablo 4.7'te verilen Şekil 4.10'daki yaylar kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında $R=0$ gerilme oranında toplam 30 adet numune ile yapılmıştır.

Tablo 4.7: Deneylerde kullanılan yaylar, strok mesafesi, rijitlikleri ve uyguladıkları bası kuvvetleri.

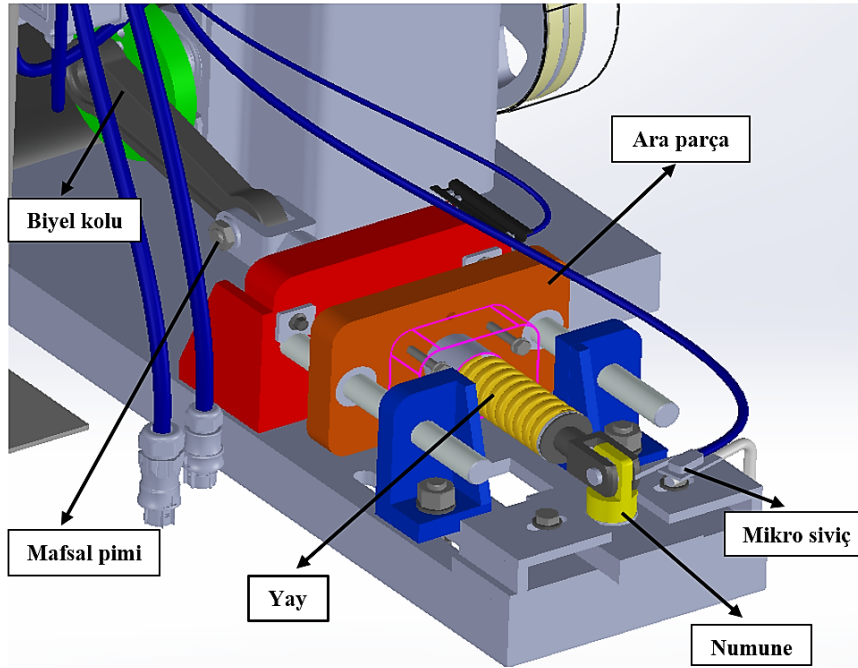
Yay Tipi	Strok (mm)	Yay Rijitliği (N/mm)	Kuvvet (N)
R50-102	20	245	4900
R50-102	22	245	5390
S40-89	22	280,2	6164,4
G50-115	20	352	7040



Şekil 4.10: Deneylerde kullanılan yaylar.

4.5.1 Yorulma cihazı tasarım doğrulama çalışmaları

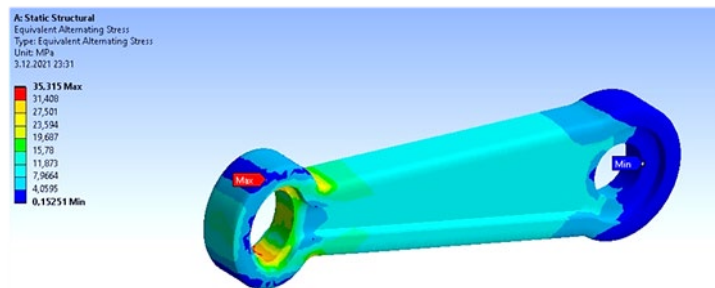
Çalışmanın modellenmesi yapılırken sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır. Tekrarlı gerilmeler altında çalışan cihazın Solidworks ile 3boyutlu tasarım çalışmaları (Şekil 4.11) yapıldıktan sonra, ANSYS ile statik ve dinamik analizleri yapılarak sistemin tasarım doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Tasarım doğrulama çalışmalarında sistemin en kritik iki parçası olan biyel kolu ve hareketli ara parçanın analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11: Tasarımı ve imalatı yapılan yorulma test cihazı.

4.5.1.1 Biyel kolu analizi

İlk olarak parçanın statik analizleri gerçekleştirilmiştir. Cihaza uygulanabilecek maksimum kuvvet olan, $F_x=15280N$ 'luk kuvvet modele uygulanmıştır. Yapılan analiz ile elde edilen maksimum gerilme değeri 35,315 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.12).



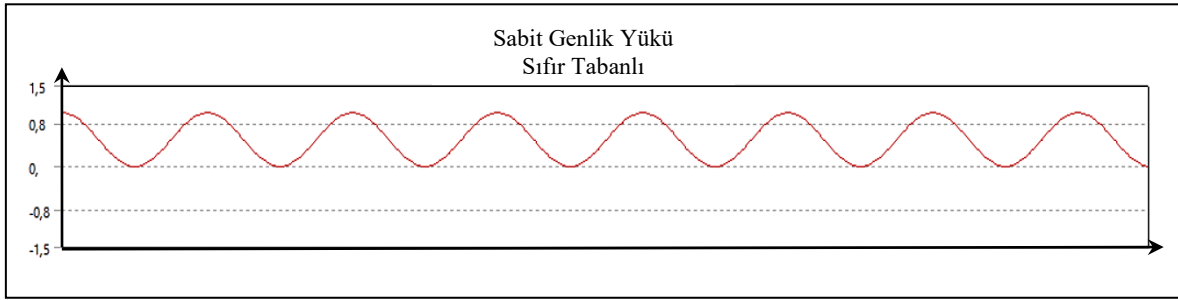
Şekil 4.12: Gerilme değeri.

Hareket eden motor milinin biyel kolunu itmesi ile yalnızca uygulanan kuvvet yönünde ilerleyip kolun geriye hareketi ile eski konumuna gelmektedir. Biyel üzerine etki eden yükler 0-35,315 MPa arasında değişmektedir (Tablo 4.8).

Tablo 4.8: Hesaplanan normal ve kayma gerilmesi değerleri.

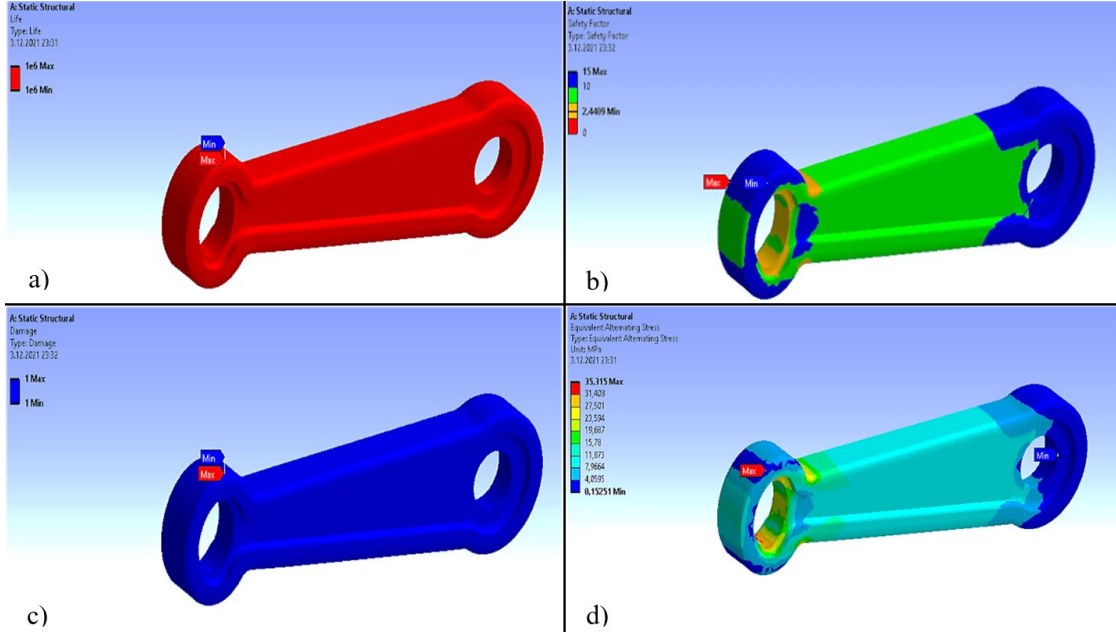
σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}	Yön
14.916	35.315	10.85	18.25	6.3664	10.55	Pozitif (+)
0	0	0	0	0	0	Negatif (-)

Tekrarlı yükler sonucunda yorulma meydana gelmektedir. Burada uygulanan kuvvet tek yönlüdür. Yay sıkıştırıldıktan sonra tekrar eski konumuna gelmektedir. Pozitif yönde uygulanmakta olan kuvvet değeri tanımlanmıştır ancak negatif yönde bir kuvvet uygulanmadığı için gerilme değeri 0 MPa olarak alınmıştır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13: Uygulanan gerilme genliği.

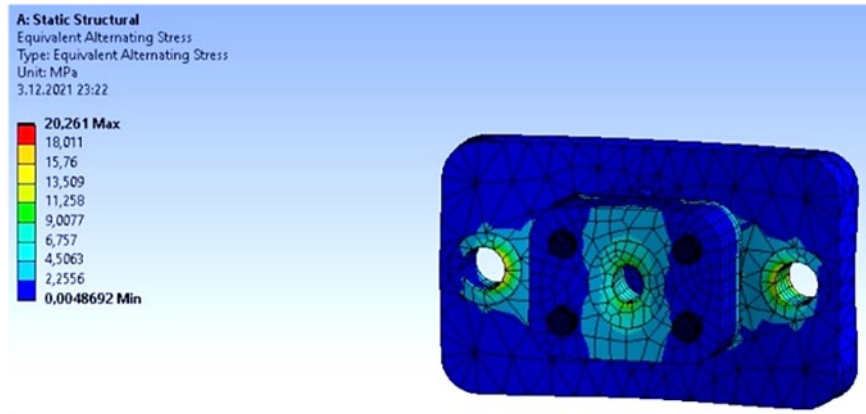
Yorulma analizleri sonucunda; biyel kolundaki güvenlik faktörü 2.44 olarak bulunmuştur. (Şekil 4.14.b). Elde edilen değer tasarım gereksinimlerini karşılamaktadır.



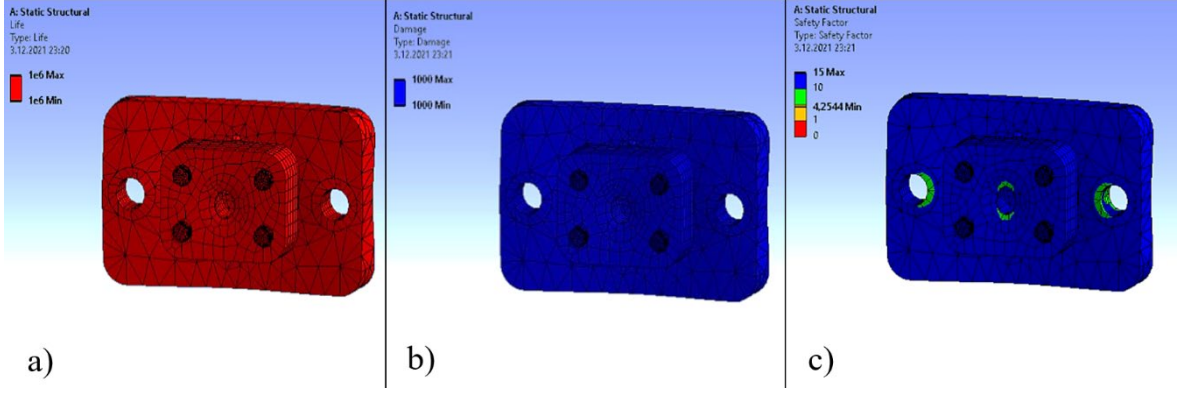
Şekil 4.14: Yorulma analiz sonuçları;
a) Ömür, b) Güvenlik faktörü, c) Hasar, d) Eşdeğer alternatif gerilme.

4.5.1.2 Ara parça analizi

İkinci analiz olarak, biyel kolunun üst ölü noktaya eriştiği andaki yaya maksimum baskı kuvvetini uygulayan ara parçanın analizi yapılmıştır. Ara parçaya biyel kolunun uygulayabileceği maksimum kuvvet olan $F_y=15280\text{N}$ değerinde kuvvet uygulanmıştır. Yapılan analiz sonucunda oluşan maksimum gerilme değeri 20.26 MPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.15). Ara parça için yapılan analiz sonucunda; güvenlik faktörü 4.25 bulunmuştur (Şekil 4.16).



Şekil 4.15: Hesaplanan gerilme değeri.

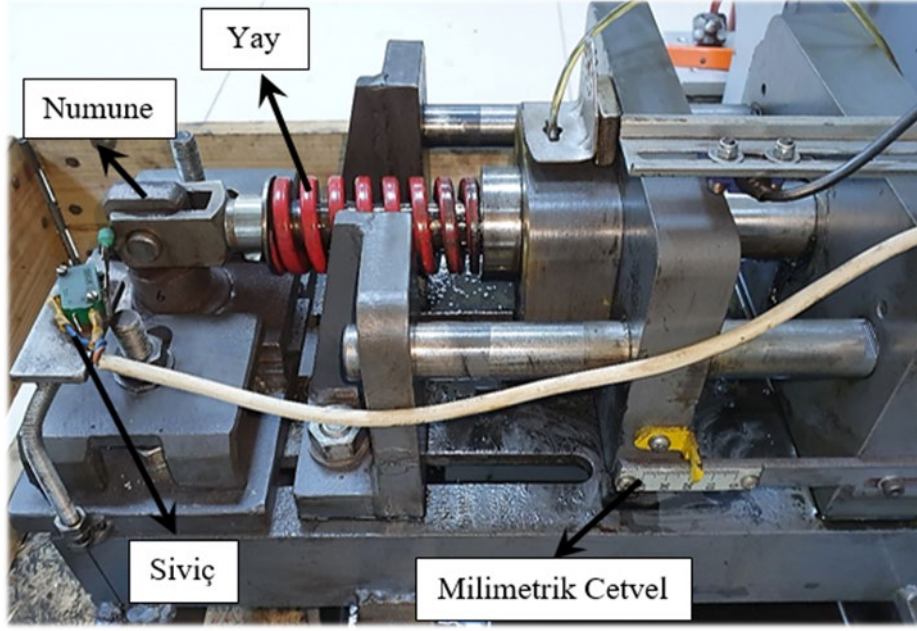


Şekil 4.16: Yorulma analiz sonuçları;
a) Ömür, b) Hasar analizi, c) Güvenlik faktörü.

Değişken kayma ve eğilme gerilmesi uygulayan yorulma test cihazına ait fotoğraflar Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.17: Yapıştırma bağı için geliştirilen yorulma test cihazı.



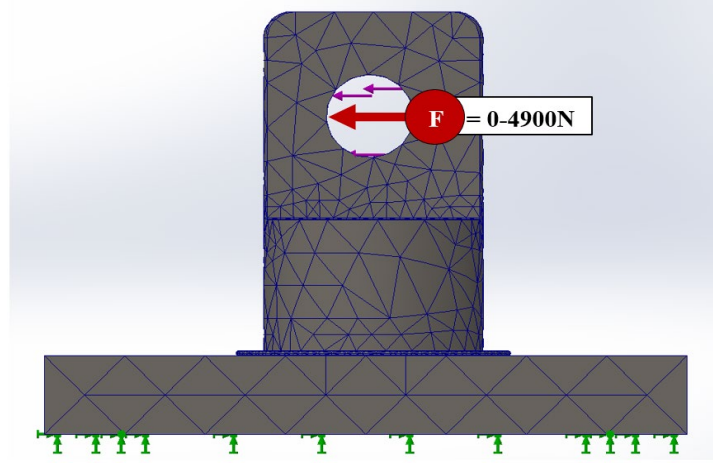
Şekil 4.18: Yapıştırma bağı için geliştirilen yorulma test cihazının ayrıntılı görüntüsü.

4.5.2 Yapışma bağıının analizi

Analize başlamadan önce Solidworks kütüphanesine alt ve üst parça için AISI 1040 karbon çeliğinin, yapıştırıcı için 3M'e ait yapıştırıcının mekanik özellikleri tanımlanmıştır (Tablo 4.2 ve Tablo 4.3).

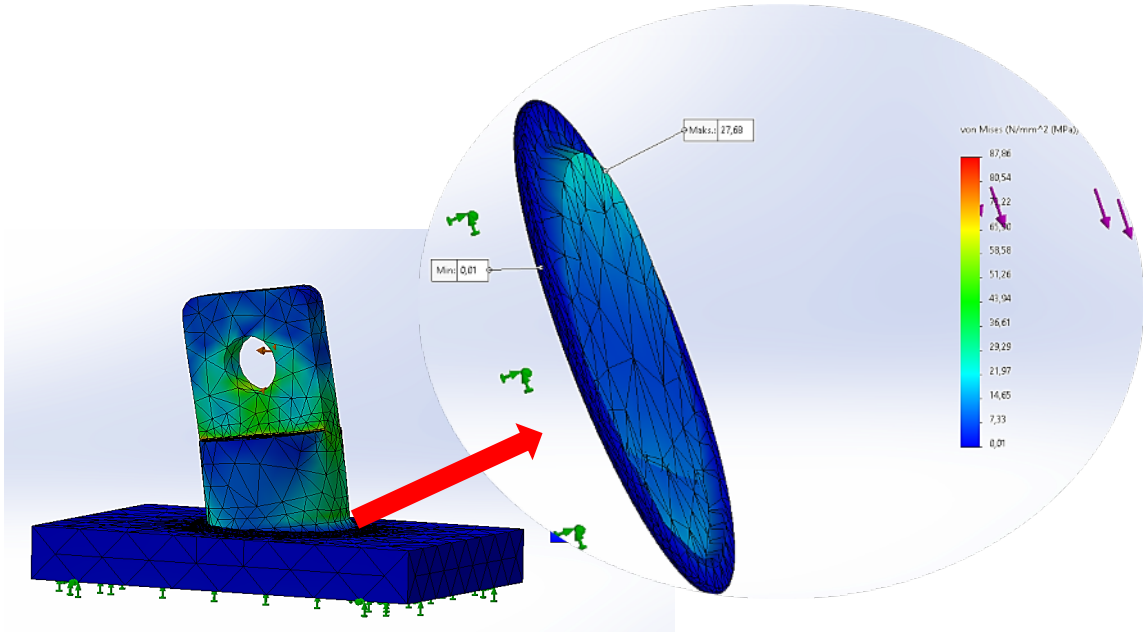
Solidworks programıyla oluşturulan modelin yine Solidworks'ün içerisinde bulunan Simulation eklentisiyle analizleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan modelin analizlerinin yapılabilmesi için ilk olarak mesh işlemleri yapılmıştır. Eleman boyutlarının küçültülmesi analiz sonuçlarındaki doğruluk oranını arttırmaktadır. Bu yüzden gerilme dağılımının kritik olduğu bölgelerde daha ince mesh tercih edilmiştir. Bu sayede daha hassas sonuçların alınması sağlanmıştır.

Statik analizler için mesh işlemi gerçekleştirildikten sonra analiz için gerekli olan sınır şartlar tanımlanmıştır. İlk olarak braketin alt kısmından sabitleme işlemi yapılarak analize başlanmıştır. Analizler, deneyler sırasında çoğunlukla kullanılan yük değeri olan 4900N baz alınarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19: Yapılan analizin sınır şartları görüntüsü.

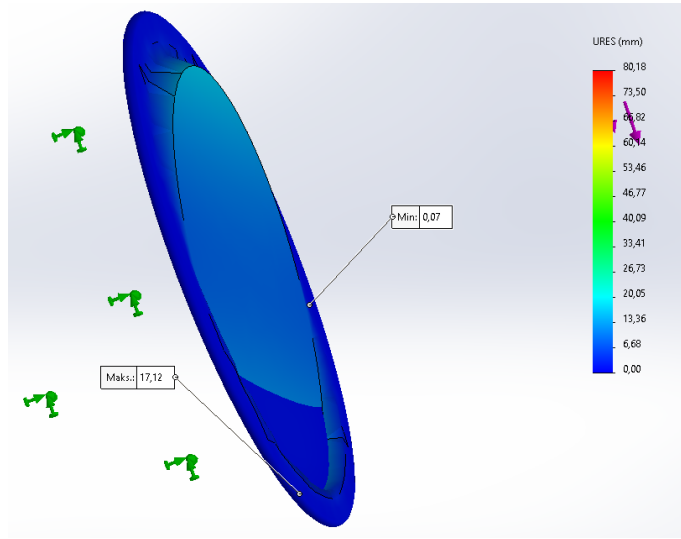
Toplam düğüm sayısı 15909 ve toplam elemanlar 9975'tir. Gerilme kriteri olarak eşdeğer (Von Mises) gerilmeler dikkate alınmıştır. Von Mises, genel olarak parça üzerinde oluşan gerilmeleri ve kayma gerilmelerinin ortalaması olarak ifade edilebilmektedir. Şekil 4.20'de numunenin 4900N'daki sayısal hasar yükünün Von-Mises gerilme dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.20: Yapıştırıcının Von-Mises gerilme dağılımı.

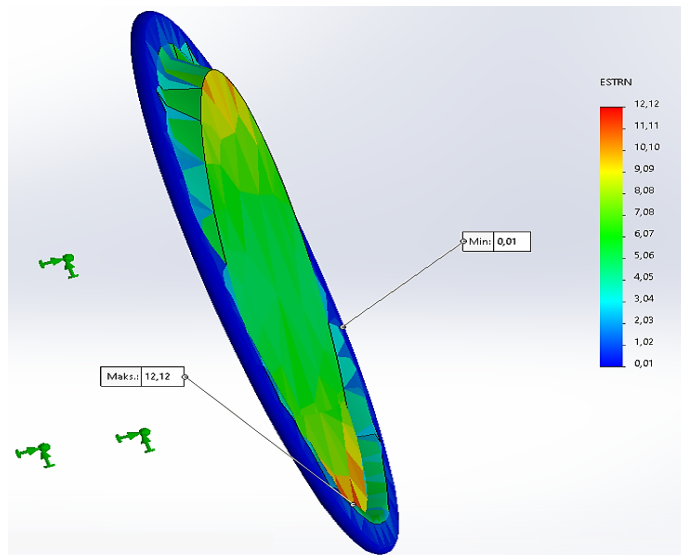
Analiz sonucunda maksimum gerilme 87,86 MPa olarak bulunmuştur. Sonuçlar incelendiğinde Şekil 4.21'de görüldüğü gibi maksimum gerilme değerinin yapıştırıcı tabakasının kenar bölgelerinde yoğunlaştığı ve maksimum von-Mises gerilmesine bu bölgede ulaşıldığı görülmüştür. Bu bölgeler kritik bölge olarak tanımlanmaktadır ve ilk

olarak ayrılma bu bölgelerde meydana gerçekleşmektedir. Von-Misses gerilmesi sonucu parça akma sınırını geçerek gözle görülür bir kopma ve kırılma meydana gelmiştir.



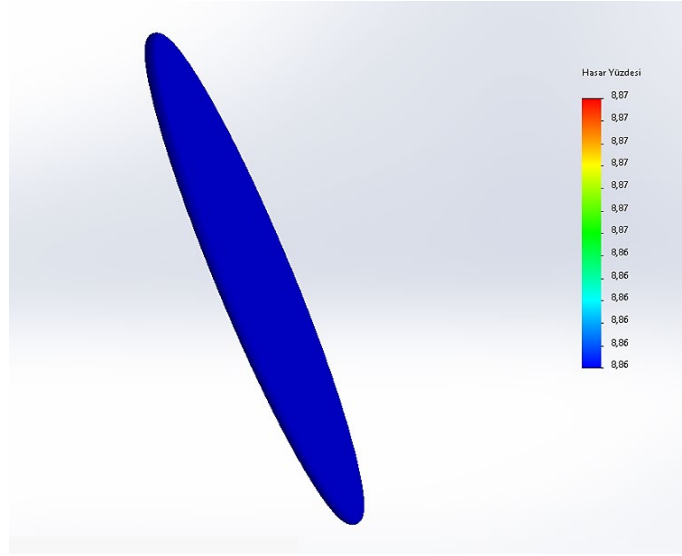
Şekil 4.21: Yer değiştirme.

Maksimum yer değiştirme miktarı ise yine yapıştırıcının kenar bölgelerinde oluşmaktadır ve değeri 80,18mm'dir. Parçadaki en fazla Şekil değişiminin meydana geldiği yer ise Şekil 4.22'de verilmiştir.

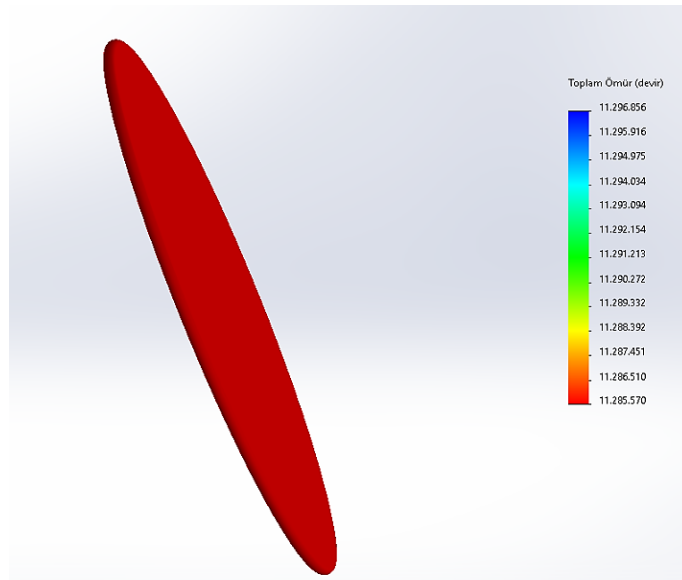


Şekil 4.22: Gerinim değeri.

Yorulma analizi yapılırken sıfır tabanlı ($R=0$) yükleme tipi seçilmiş ve statik analizin parça üzerine 1.000.000 kez test edilmesi istenmiştir. Test sonuçlarında elde edilen S-N eğrisi verileri programa elle girilmiştir. Şekil 4.23'te hasar yüzdesi, Şekil 4.24'te yapıştırıcı için gerçekleştirilen yorulma analizindeki ömür değeri verilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlarda, maksimum hasar yüzdesi 8,87'dir ve 11.285.570 tekrardan sonra yapıştırıcı yüzeyinde kopmalar meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.23: Hasar yüzdesi.



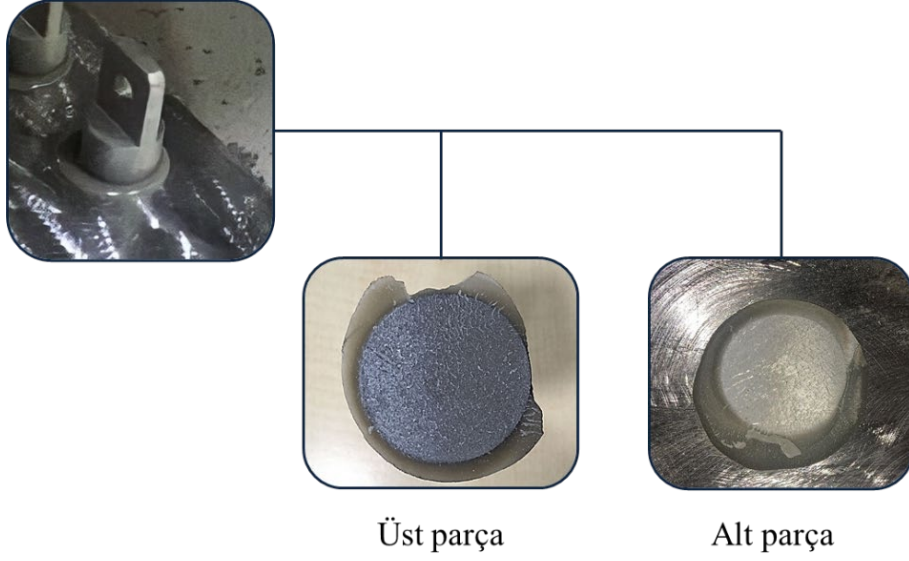
Şekil 4.24: Ömür.

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

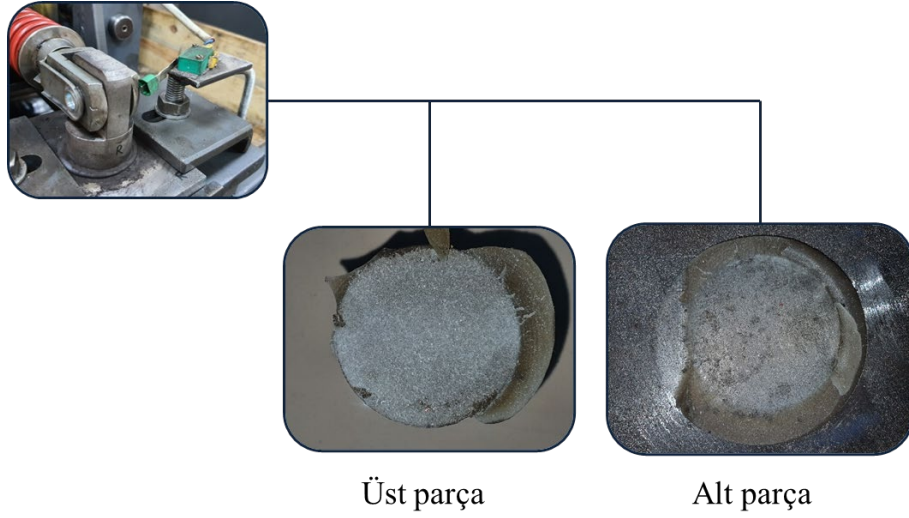
Bu çalışmada yapıştırma yöntemi kullanılarak birleştirilen metal veya farklı malzemeye sahip bağlantıların yorulma davranışını belirleyebilmek için değişken kayma ve eğilme gerilmesi uygulayan yorulma test cihazının tasarımı yapılmıştır. Literatürde, daha önce yapılan yorulma test cihazlarından farklı olarak tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen bu cihaz ile çeşitli boyut ve geometride yapıştırılmış numuneler test edilebilmektedir. En büyük rijitliğe sahip yayın maksimum sıkıştırma oranında zorlanmasıyla oluşan kuvvet altında çalışan makinenin tasarım hesaplamaları yapılarak sonlu eleman analizleriyle doğrulanmış ve cihaz üretilmiştir.

Modellemesi yapılan cihaz parçalarının gerilme değerleri analiz yazılımları ile hesaplanmıştır. Hesaplanan gerilme değerleri ile gerilme genliği ve ortalama gerilme değerleri bulunmuştur. Daha sonra yorulma analizleri yapılan parçaların güvenlik faktörleri belirlenmiştir. Geliştirilen test cihazı ile yapıştırma bağları için titreşimli kayma gerilmesi oluşturularak yorulma testleri yapılmaya başlanmıştır. Cihaz üzerinde yapılacak değişiklikler ile tam değişken zorlama halleri için de yorulma testlerinin yapılabilmesi mümkündür.

Statik ve dinamik testler sonucunda ayrılan numuneler sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde numunelerin yapıştırıcı kısmından (kohezyon) homojen bir şekilde ayrılma gösterdiği görülmüştür. Yapışan yüzeylerde herhangi bir boşluk veya süreksizlik gözlenmemiştir. Bu sebeple yapıştırma işleminin ve yapıştırıcı tipinin AISI 1040 karbon çeliği için uygun olduğu söylenebilir.



Şekil 5.1: Statik test sonucunda kopma yüzeyleri.



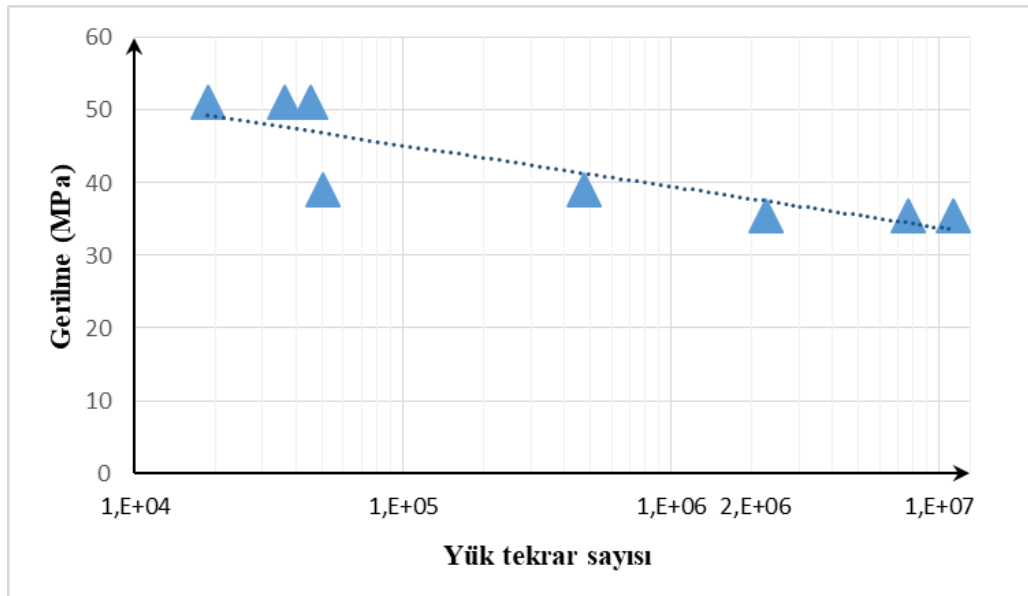
Şekil 5.2: Yorulma testi sonucunda kopma yüzeyleri.

Tablo 5.1’de statik deney sonuçları verilmiştir. Elde edilen P_{max} değerlerine ait kayma, eğilme ve eşdeğer gerilmeler 1, 2, ve 3 nolu eşitlikler yardımıyla elde edilmiştir. Uygulanan yapıştırma işlemi için kayma gerilmesi değeri ortalama $7,89 \text{ N/mm}^2$, eğilme gerilmesi değeri ortalama $71,05 \text{ N/mm}^2$, eşdeğer gerilme değeri ortalama $71,13 \text{ N/mm}^2$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.1: Statik test sonuçları.

Ölçüm No	$P_{max}(N)$	$T_{kayma}(N/mm^2)$	$\sigma_e(N/mm^2)$	$\sigma_{eq}(N/mm^2)$
1	10840	8,63	77,64	78,59
2	9908	7,88	70,96	67,89
3	8809	7,01	63,09	63,86
4	10271	8,17	73,56	74,46
5	9771	7,78	69,98	70,83

Uygulanan titreşimli gerilmeler sonucunda numunelerin ayrılması ile sonuçlanan yük çevrim sayıları belirlenerek elde edilen Wöhler (S-N) eğrisi Şekil 5.3'te verilmiştir. Yapısal yapıştırıcıların yorulma deneyleri ile ilgili standartta [46] yorulma ömrü için 10^6 tekrar sayısının yeterli olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte, çalışmamızda 35,52 MPa eşdeğer gerilme değerinde ancak 11×10^6 yük tekrarında yapışma yüzeylerinde ayrılma gözlenmiştir. Bu sonuca göre, yapıştırma işleminin uygulamasının ve yapıştırıcının yorulma direncinin uygun olduğu söylenebilir. 51,03 MPa ile 35,52 MPa arasındaki değişken eşdeğer gerilmelerde eğrinin değişimi ile ilgili daha net bilgi alabilmek için, ara gerilme değerlerinde de yorulma deneyleri yapılmıştır. Şekil 5.3'te görüldüğü gibi AISI 1040 karbon çeliği akrilik yapıştırıcı ile birleştirildiğinde 35,52 MPa değeri altında sonsuz ömüre sahiptir denilebilir. Ayrıca, 35,52 MPa eşdeğer gerilme değeri statik ortalama eğilme gerilmesi değerinin yarısı kadardır.



Şekil 5.3: Elde edilen S-N Eğrisi.

Yapıştırıcıya ait statik ve dinamik analizler Solidworks Simulation ile gerçekleştirilmiştir. Yorulma dayanımını test etmek için girilen sınır değerlerinin ardından elastikiyet modülünden türetilen S/N eğrisi verileri kullanıldığında 100 tekrar sayısından sonra yapıştırıcının hasara uğradığı belirlenmiştir.

Bölüm 4.3'te anlatılan yöntem kullanılarak yapıştırılan parçalar çok düşük yük tekrarları sonucunda birbirlerinden ayrılmışlardır. Kopan numuneler incelendiğinde büyük boşluklar gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak yapıştırıcı ile yüzeyin ıslanabilirliğinin yeterince sağlanamadığı için yapıştırıcıda bu kabarcıkların oluştuğuna inanılmaktadır. Hatalı olduğu gözlenen yapıştırımlara ait bazı resimler Şekil 5.4'te verilmiştir. Hatalı olduğu gözlenen numunelerin deney sonuçları dikkate alınmamıştır.



Şekil 5.4: Hatalı numuneler.

6. SONUÇLAR

AISI 1040 çeliğinin akrilik yapıştırıcı ile birleştirilmesi ile elde edilen bağlantıların statik ve yorulma dayanımlarının incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar verilebilir:

- ✓ Solidworks Simulation ile analizleri gerçekleştirilen çalışmada yapıştırıcıya ait S/N eğrisi verileri malzeme elastikiyet modülünden türetildiğinde sonuçların deneysel verilerle uyum sağlamadığı, deneyler sonucunda elde ettiğimiz S/N eğrisi verileri girildiğinde ise daha sağlıklı sonuçlar elde edildiği görülmüştür.
- ✓ Hem statik hem de yorulma deneyleri sonucunda yapışma bağında kohezif bir ayrılma gözlenmiştir.
- ✓ Yapıştırıcı tipinin ve yapıştırma yönteminin AISI 1040 çeliği için uygun olduğu görülmüştür.
- ✓ Statik deneyler sonucunda yapışma bağının ortalama kayma gerilmesi 7,89 N/mm², eğilme gerilmesi 71,05 N/mm² ve eşdeğer gerilmesi ise 71,13 N/mm² olarak belirlenmiştir.
- ✓ ISO 9664:1993(E) numaralı standartta ise 2×10^6 yük tekrar sayısı sonsuz ömür kriteri olarak kabul edilmektedir. Kaymalı eğilme gerilmesine maruz kalan yapıştırıcı bağı, statik kopma gerilmesinin %50'si düzeyinde dinamik zorlamaya maruz kaldığında 11×10^6 yük tekrar sayısına kadar ulaşabilmektedir. Braketlerin yapıştırıcısı ile birleştirilmesi halinde ISO 9664:1993(E) numaralı standardın yorulma-ömür kriterlerini karşıladığı değerlendirilmiştir.
- ✓ Elle yapıştırılan numunelerin, yapıştırma kalınlıkları sonucu farklı kalınlıklar elde edilebilmektedir. Aynı yapışma kalınlığına sahip numuneler elde edebilmek için otomasyon sistemi oluşturulabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] S. Cowdrey, C. Ferguson, L. Mauro, M. Müller, R. Neumayer ve B. Orme, Loctite Worldwide Design Handbook, Germany: Loctite Corporation, 1998.
- [2] F. Kaya, Ana Hatları ile Yapıştırıcılar, İstanbul: Birsen Yayınevi, 2004.
- [3] N. Stein, P. L. Rosendahl ve W. Becker, Homogenization of mechanical and thermal stress in functionally graded adhesive joints, *Composites Part B: Engineering*, cilt 111, pp. 279-293, 2017.
- [4] C. Guyott, P. Cawley ve R. Adams, The Non-destructive Testing of Adhesively Bonded Structure: A Review, *The Journal of Adhesion*, cilt 20, no. 2, pp. 129-159, 1986.
- [5] *EUROCODE 3: Çelik Yapıların Tasarımı - BÖLÜM 1-9: Genel Kurallar-Yorulma (TS-EN 1993-1-9)*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2005.
- [6] H. E. Boyer, Fatigue Testing, *Atlas of Fatigue Curve*, United States of America, American Society for Metals, 1986, pp. 1-10.
- [7] D. Gönen, A. Oral ve M. C. Çakır, Investigating the benefits of using circular die springs instead of rectangular die springs, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, cilt 38, no. 7, pp. 799-812, 2015.
- [8] A. Kinloch, Adhesives in engineering, *Journal of Aerospace Engineering: 25th Anniversary Collection*, cilt 211, no. 5, 1997.
- [9] M. You, M.-B. Li, Y.-L. Yuan, G. Lin, F.-W. Ma, L.-F. Du ve S.-J. Tang, Review of experimental techniques for impact property of adhesive bonds, *Adhesion&Adhesives*, cilt 100, no. 102620, 2020.
- [10] D. Peretz, Shear Stress-Strain Characteristics of Adhesive Layers, *The Journal of Adhesion*, cilt 9, no. 2, pp. 115-122, 1978.
- [11] J. P. Jeandrou, C. Peyrac, F. Lefebvre, J. Renard, V. Gantchenko, B. Patamaprom ve C. Guinault, Fatigue Behaviour of Adhesive Joints, *Procedia Engineering*, cilt 133, pp. 508-517, 2015.
- [12] E. Gavgali, R. Şahin ve S. Akpınar, An investigation of the fatigue performance of adhesively bonded step-lap joints: An experimental and numerical analysis, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, cilt 104, 2021.
- [13] M. Carboni ve F. Moroni, Tensile-Shear Fatigue Behavior of Aluminum and Magnesium Lap-Joints obtained by Ultrasonic Welding and Adhesive Bonding, *Procedia Engineering*, cilt 10, pp. 3561-3566, 2011.

- [14] J. A. Pascoe, N. Zavatta, E. Troinai ve R. C. Alderliesten, The effect of bond-line thickness on fatigue crack growth rate in adhesively bonded joints, *Engineering Fracture Mechanics*, cilt 229, 2020.
- [15] A. J. Curley, H. Hadavinia, A. J. Kinloch ve A. C. Taylor, Predicting the service-life of adhesively-bonded joints, *International Journal of Fracture*, no. 103, pp. 41-69, 2000.
- [16] L. Goglio, L. Peroni, M. Peroni ve M. Rossetto, High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, cilt 28, no. 7, pp. 329-339, 2008.
- [17] M. Asgharifar, F. Kong, B. Carlson ve R. Kovacevic, Dynamic analysis of adhesively bonded joint under solid projectile impact, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, cilt 50, pp. 17-31, 2014.
- [18] A. Ozel, B. Yazıcı, S. Akpınar, M. D. Aydın ve Ş. Temiz, A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends, *Composites Part B: Engineering*, cilt 62, pp. 167-174, 2014.
- [19] A. Şık, M. Önder ve M. S. Korkmaz, Taşıt Jantlarının Yapısal Analiz İle Yorulma Dayanımının Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji*, cilt 3, no. 3, pp. 565-574, 2015.
- [20] H. Hocaoğlu, *Kalıp yayları için yorulma deney cihazı tasarımı*, Bursa: Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [21] H. E. Balcıoğlu, R. Sakin, A. B. Dumanay ve H. Gün, Kompozit levhalar için ankastre-tip eğilmeli, çok numuneli yorulma test makinesinin geliştirilmesi, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt 8, no. 1, pp. 1-17, 2017.
- [22] J. Wang ve C. Lin, Design and dynamic analysis of the gear contact fatigue testing machine, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, cilt 382, no. 4, 2018.
- [23] E. Pach, I. Korin ve J. P. Ipiná, Simple fatigue testing machine for fiber-reinforced polymer composite, *Experimental Techniques*, cilt 36, no. 2, pp. 76-82, 2011.
- [24] A. J. Kinloch, Introduction, *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*, Londra, Springer, Dordrecht, 1987.
- [25] S. Ebnesajjad, *Adhesives Technology Handbook*, Chadds Ford, PA, 2008.
- [26] Henkel, Endüstriyel Yapıştırıcılar, 2022. Available: <https://www.henkel-adhesives.com/tr/tr/urunler/endustriyel-yapistiricilar.html>.
- [27] E. M. Petrie, An Introduction to Adhesive and Sealants, *Handbook of Adhesives and Sealants*, New York, McGraw-Hill, 2000, p. 23.

- [28] Intruction of adhesive tape- The science of adhesive tapes, Celadon. Available: <https://www.celadon.com.tw/en/faq/Intruction-of-Adhesive-Tape-The-Science-of-Adhesive-Tapes/Celadon-Tech-faq-003.html>. [Erişildi: 17 Nisan 2022].
- [29] *The Merriam-Webster Dictionary*, America: John M. Morse, 2004.
- [30] N. Braune, Why do adhesives stick?, 8 Mayıs 2018. Available: <https://blog.proclima.com/int/2018/05/08/why-do-adhesives-stick/>. [Erişildi: 17 Nisan 2022].
- [31] 3M Türkiye, 3M, 2022. Available: https://www.3m.com.tr/3M/tr_TR/bonding-and-assembly-tr/training-education/benefits-of-adhesive-bonding/. [Erişildi: 2022].
- [32] 3M Adhesives & Tapes Solutions, 3M, 2022. Available: https://www.3m.co.uk/3M/en_GB/bonding-and-assembly-uk/substrate/.
- [33] S. Ebnesajjad, Material Surface Preparation Techniques, *Handbook of Adhesives and Surface Preparation*, Chadds Ford, PA, 2011.
- [34] M. T. Sc ve M. Walker, «Surface Wettability,» University of Stuttgart. Available: <https://www.igvp.uni-stuttgart.de/en/research/plasma-technology/processes/surface-wettability/>.
- [35] M. Akkurt, Makina Konstrüksiyonunda Güvenilirliğin Esasları, İstanbul: Makina Mühendisleri Odası, 1977.
- [36] TECS, Fatigue test, 2022. Available: <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/fatigue-test/>.
- [37] R. Sakin, *Bilgisayar Destekli, Çok Numuneli Eğilme Yorulması Test Cihazı Tasarımı ve Cam-Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Eğilme Yorulması Davranışının İncelenmesi*, Balıkesir, 2004.
- [38] F. C. Babalık, Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri, Bursa: Nobel Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ., 2008.
- [39] K. J. Bathe, «Finite Element Method, *Wiley Online Library*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470050118.ecse159>, 13 Haziran 2008.
- [40] The Advantages of the Finite Element Method, Available: <https://innovationatwork.ieee.org/the-advantages-of-fem/>. [Erişildi: 2022].
- [41] *Kalite Belgesi*, HASÇELİK SAN. VE TIC. A.Ş., 2020.
- [42] A. Ongun, İ. Uzun ve O. K. Turgut, Elektrik ark ve gazaltı kaynağı (MIG) ile birleştirilmiş AISI 1040 çeliğinin mekanik özelliklerine, çeşitli ısıl işlemlerin etkisinin incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 23, no. 1, pp. 1-5, 2017.

- [43] Kalite Metalurji-1040 İmalat Çeliği, 2013. Available: <http://kalitemetalurji.com.tr/urunlerimiz/imalat-celikleri/1040-imalat-celigi/>. [Erişildi: 14 Nisan 2022].
- [44] T. şahin ve A. Oral, Yapıştırma Bağlantılarında Montaj Performansının Deneysel İncelenmesi, *6.Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık Kongresi*, İstanbul, 2020.
- [45] 3M, 2022. Available: https://www.3m.com.tr/3M/tr_TR/turkiye-tr/. [Erişildi: 14 Nisan 2022].
- [46] *ISO 9664, Adhesives - Test methods for fatigue properties of structural adhesives in tensile shear*, Switzerland-Geneve Patent, 1993.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Yaprak Nisa OĞUZ
Doğum tarihi ve yeri : 14.08.1995 / İslahiye-GAZİANTEP
e-posta : yaprak.1408@gmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Yüksek Lisans	Balıkesir Üniversitesi	2022
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2019
Lise	Yenimahalle Mustafa Kemal Anadolu Lisesi	2013