



**METAL-METAL YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ STATİK VE
DİNAMİK YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

Başar ALTINTAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Başar ALTINTAŞ

04/06/2021

METAL-METAL YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ STATİK VE DİNAMİK YÜKLER ALTINDA DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Başar ALTINTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Yapıştırma bağlantıları günümüzde birçok sektörde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunların başlıcaları havacılık ve uzay, otomotiv, denizcilik ve inşaat sektörleridir. Gelişen malzeme teknolojisiyle birlikte farklı tip malzemelerin birleştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Kompozit-metal, polimer-metal veya metal-metal bağlantıları için yapıştırıcılar önemli bir konuma gelmiştir. Bu gelişmeler beraberinde yapıştırıcı dayanımı hakkındaki araştırmaların önünü açmıştır. Bu çalışmada 2024-T3 alüminyum malzeme ve 3M firmasına ait DP490 yapısal epoksi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuş yapıştırma bağlantıları statik ve dinamik yükler altında incelenmiştir. Statik testler düşük çekme hızlarında gerçekleştirilen çekme testlerinden oluşmaktadır. Çekme ve kesme tipi numuneler kullanılarak farklı mekanik yüzey işlemlerinin ve yapıştırıcı kalınlığının dayanıma etkisi incelenmiştir. Uygulanan yüzey işlemlerine karşılık gelen pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Dinamik yük durumunu incelemek içinse bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney düzeneği temel olarak bir servo motor ile tahrik edilen slider-crank mekanizmasıdır. Mekanizmanın sabit tarafına bağlanan çekme yayları, motor hareketiyle birlikte yapıştırıcı bağlantısına değişken yük uygulamaktadır. Farklı yay katsayılarına sahip çekme yayları kullanılarak yapıştırma bağlantılarının yorulma davranışı incelenmiştir.

Bilim Kodu : 91410

Anahtar Kelimeler : Yapıştırıcı, yapıştırma bağlantısı, yapıştırıcı kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, çekme testi, dinamik yük, yorulma, SLJ, TAST

Sayfa Adedi : 109

Danışman : Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY

DETERMINATION OF THE BEHAVIOR OF METAL-METAL ADHESIVELY
BONDED JOINTS UNDER STATIC AND DYNAMIC LOADS

(M. Sc. Thesis)

Başar ALTINTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

Adhesive joints are frequently used in many industries today. The most important of these are aerospace, automotive, marine and construction industries. With the developing material technology, the necessity of bonding different types of materials has been emerged. Adhesives were gained an important position for composite-metal, polymer-metal or metal-metal connections. These developments pave the way for research on adhesive strength. In this study, adhesively bonded joints made by using 2024-T3 aluminum material and DP490 structural epoxy adhesive from 3M company were investigated under static and dynamic loads. Static tests were consisting of tensile tests performed at low tensile speeds. The effects of different mechanical surface treatments and adhesive thickness on joint strength were investigated by using tensile and shear specimens. An experimental test setup was designed to examine the dynamic load conditions. This experimental setup is basically a slider-crank mechanism which is driven by a servo motor. Extension springs attached to the fixed side of the mechanism apply a variable load to the adhesively bonded joint with the motor action. The fatigue behavior of bonded joints was investigated by using extension springs with different spring coefficients.

Science Code : 91410

Key Words : Adhesive, adhesive joint, bonded joint, adhesive thickness, surface roughness, tensile test, dynamic load, fatigue, SLJ, TAST

Page Number : 109

Supervisor : Assoc. Prof. Tuncay KARAÇAY

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca kıymetli bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Tuncay KARAÇAY'a, yürütülen deneysel çalışmalarda bana yardımını esirgemeyen iş arkadaşım Nergis KARAŞIRAY'a, bu süreçte destekleriyle beni yalnız bırakmayan ailem ve sevgili arkadaşım Yasemin Fatma DEMİREZEN'e, son olarak bu çalışmanın gerçekleşebilmesine olanak sağlayan Gazi Üniversitesi ve Roketsan A.Ş.'ye teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARI.....	13
3.1. Yapıştırma Bağlantılarının Avantaj ve Dezavantajları	14
3.2. Yapıştırıcı Türleri.....	17
3.3. Adezyon Teorileri	18
3.3.1. Mekanik teori	19
3.3.2. Elektrostatik teori	20
3.3.3. Difüzyon teorisi.....	20
3.3.4. Islatma teorisi (Wetting theory)	21
3.3.5. Adsorpsiyon teorisi	22
3.3.6. Kimyasal bağlanma teorisi	22
3.3.7. Asit-baz teorisi	23
3.3.8. Zayıf sınır tabaka teorisi.....	24
3.4. İyi Bir Yapışmanın Gereklilikleri	24
3.5. Yüzey Gerilmesi ve Enerjisi	25

Sayfa

3.5.1. Katılar için yüzey gerilimi	26
3.6. Yüzey İşlemleri (Surface Treatments)	27
3.6.1. Mekanik yüzey işlemleri	28
3.6.2. Kimyasal yüzey işlemleri	29
3.6.3. Elektrokimyasal yüzey işlemleri	29
3.6.4. Plazma yüzey işlemleri	31
3.7. Yapıştırma Bağlantılarında Görülen Hasar Tipleri	33
3.8. Yapıştırıcı Bağlantı Şekilleri ve Yük Türleri	35
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
4.1. Kullanılan Yapıştırıcı Türü	38
4.2. Çalışmalarda Kullanılan Numune Tipleri	39
4.2.1. Statik testlerde kullanılan çekme numuneleri	39
4.2.2. Dinamik testlerde kullanılan çekme numuneleri.....	42
4.2.3. TAST tipi numuneler	44
4.2.4. SLJ tipi numuneler	46
4.3. Yüzey İşlemleri	47
4.4. Statik (Yarı-statik) Testler.....	51
4.4.1. Çekme testleri.....	51
4.4.2. DIC test yöntemi (Digital Image Correlation and Tracking)	51
4.5. Dinamik Testler.....	54
4.5.1. Yorulma test düzeneği.....	54
4.5.2. Test düzeneğinin kinematik analizi.....	57
4.5.3. Yaylarının boyutlandırılması	59
4.5.4. Test düzeneğinin yük profillerinin belirlenmesi	68

Sayfa

4.5.5. Test çalışmaları	72
5. ÖLÇÜMLER VE TEST SONUÇLARI	75
5.1. Statik Yük Koşulu Kapsamındaki Sonuçlar	75
5.1.1. Farklı yüzey işlemleri için pürüzlülük ölçümleri	75
5.1.2. Çekme tipi numunelerle ait test sonuçları	76
5.1.3. SLJ tipi numunelerle yapılan test sonuçları	79
5.1.4. TAST tipi numunelerle yapılan test sonuçları	80
5.1.5. DIC yöntemi kullanılarak alınan ölçümler	82
5.2. Dinamik Yük Koşulu Kapsamındaki Sonuçlar	83
5.2.1. Yük hücresi ölçüm sonuçları	83
5.2.2. Gerinim ölçer sonuçları	86
5.2.3. Isıl çift ölçüm sonuçları	87
5.2.4. Dinamik yüke maruz bırakılmış numunelere ait sonuçlar	87
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	91
6.1. Statik Yük Koşulu Kapsamındaki Sonuçların Değerlendirilmesi	91
6.1.1. Yüzey işlemlerinin değerlendirilmesi	91
6.1.2. Yüzey pürüzlülüğü etkisinin değerlendirilmesi	92
6.1.3. Yapıştırıcı kalınlığı etkisinin değerlendirilmesi	94
6.1.4. TAST tipi numunelere ait grafiklerin değerlendirilmesi	95
6.1.5. Numune boyutu ve düzensizliklerin değerlendirilmesi	97
6.2. Dinamik Yük Koşulu Kapsamındaki Sonuçların Değerlendirilmesi	98
6.2.1. Yük hücresi verilerinin değerlendirilmesi	98
6.2.2. Gerinim ölçer verilerinin değerlendirilmesi	100
6.2.3. Isıl çift verisinin değerlendirilmesi	100

Sayfa

6.2.4. Çekme testi sonuçlarının değerlendirilmesi	101
6.3. Öneriler.....	102
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	109



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Adezyon teorileri	19
Çizelge 3.2. Kimyasal bağ enerjileri	23
Çizelge 4.1. Çalışma kapsamında kullanılan numuneler ve incelenen parametreler	38
Çizelge 4.2. DP490 olgunlaşma ve kür şartları	39
Çizelge 4.3. Statik (Yarı-statik) testler	51
Çizelge 4.4. Yorulma test düzeneği parça listesi	55
Çizelge 4.5. Çeki yayı ölçüleri	65
Çizelge 4.6. Analizde kullanılan konnektör tipleri ve serbestlik dereceleri	69
Çizelge 4.7. Parçalara atanan konnektör tipleri	70
Çizelge 4.8. Dinamik test çalışmaları	74
Çizelge 5.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları	76
Çizelge 5.2. Yüzey işlemine karşılık kabul edilen pürüzlülük değerleri	76
Çizelge 5.3. SLJ tipi numuneler için yapıştırıcı kalınlığı ve yapışma alanı	79
Çizelge 5.4. Yük profillerine ait veriler	85

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Airbus A380’de yapıştırma bağlantıları kullanılan bazı bölgeler.....	13
Şekil 3.2. Yapıştırma bağlantısı	14
Şekil 3.3. Bağlantılar arasındaki direngenlik farkı ve gerilme dağılımları.....	15
Şekil 3.4. Yapıştırıcıların sınıflandırılması	18
Şekil 3.5. Yüzeyin iyi (a) ve kötü (b) ıslanma durumu.....	21
Şekil 3.6. Temas açısı (SL: solid-liquid, SV: solid-vapor, LV: liquid-vapor).....	27
Şekil 3.7. Kağıtla aşındırma veya taşlama sonrası yüzey yapısı.....	28
Şekil 3.8. Al-Li alaşımının fosforik asit ile anodizasyonu.....	30
Şekil 3.9. Asit ile dağlama (a) ve anodizasyon sonrası (b) yüzey oluşumları	31
Şekil 3.10. Plazma oluşumu ve düşük basınçlı plazma şeması.....	32
Şekil 3.11. Alev işlemi şeması	33
Şekil 3.12. Yapıştırıcı bağlantısı kopma durumları	34
Şekil 3.13. Yapıştırma bağlantılarının yüklenme şekilleri.....	35
Şekil 3.14. Bazı plaka yapıştırma bağlantıları	36
Şekil 4.1. ASTM D897 test numunesi ve slotlu yuva (a), ara parça (b)	40
Şekil 4.2. Statik testlerde kullanılan çekme numunesi üretim ölçüleri.....	41
Şekil 4.3. Dinamik testlerde kullanılan çekme numunesi üretim ölçüleri	43
Şekil 4.4. Çekme numunesi üretim süreci	44
Şekil 4.5. Önerilen şekilde üretilmiş (a) ve alternatif TAST numuneleri	45
Şekil 4.6. SLJ numune boyutları (a) ve yapışma sırasında konumu (b)	47
Şekil 4.7. Taşlama yönündeki yüzey topoğrafyası	48
Şekil 4.8. Pürüzlülük hesaplamaları ve farklı yüzey profillerine ait değerler	50
Şekil 4.9. İki ve üç boyutlu DIC yöntemi	52

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. Yorulma test düzeneği	54
Şekil 4.11. Motor kızıağı hareketi.....	56
Şekil 4.12. Yay bağlantısı ve ayarları	57
Şekil 4.13. Eş eksenli slider-crank mekanizması.....	58
Şekil 4.14. Test düzeneğinin mekanizma ölçüleri	59
Şekil 4.15. θ dönüş açısına bağlı deplasman grafiği.....	59
Şekil 4.16. Örnek bir çekme yayı ve uç tipleri	60
Şekil 4.17. Çekme yayına ait ideal ve gerçek kuvvet-uzama grafiği.....	61
Şekil 4.18. Çeki yayı üzerinde oluşan gerilme durumu	63
Şekil 4.19. Çeki yaylarına ait kuvvet-uzama grafiği.....	66
Şekil 4.20. 1 numaralı yaya ait kuvvet-uzama grafiği	66
Şekil 4.21. 2 numaralı yaya ait kuvvet-uzama grafiği	67
Şekil 4.22. 3 numaralı yaya ait kuvvet-uzama grafiği	68
Şekil 4.23. Mekanizmaya ait analiz modeli	70
Şekil 4.24. 1 numaralı yay için hesaplanan yük profili.....	71
Şekil 4.25. 2 numaralı yay için hesaplanan yük profili.....	71
Şekil 4.26. 3 numaralı yay için hesaplanan yük profili.....	72
Şekil 5.1. Yüzey işlemi uygulanmamış çekme numuneleri için test sonuçları.....	77
Şekil 5.2. P220 kağıtla rastgele aşındırılmış çekme numuneleri için test sonuçları	77
Şekil 5.3. Kumlama işlemi yapılmış çekme numuneleri için test sonuçları	78
Şekil 5.4. Kâğıtla aşındırılmış numunelerin farklı kalınlıklar için test sonuçları	78
Şekil 5.5. SLJ tipi kesme numunelerine ait çekme testi sonuçları.....	79
Şekil 5.6. Yüzey işlemi uygulanmamış TAST numuneleri için test sonuçları	80
Şekil 5.7. P220 kağıtla rastgele aşındırılmış TAST numuneleri için test sonuçları	81

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. Kumlama işlemi yapılmış TAST numuneleri için test sonuçları.....	81
Şekil 5.9. DIC görüntülerinin test verisi ile eşleştirilmesi	82
Şekil 5.10. 1. yay için ölçülen yük profili.....	83
Şekil 5.11. 2. yay için ölçülen yük profili.....	84
Şekil 5.12. 3. yay için ölçülen yük profili.....	85
Şekil 5.13. Gerinim ölçer sonuçları	86
Şekil 5.14. Zamana bağlı sıcaklık değişimi	87
Şekil 5.15. 1. yük profili sonrası numune dayanımları	88
Şekil 5.16. 2. yük profili sonrası numune dayanımları	88
Şekil 5.17. 3. yük profili sonrası numune dayanımları	89
Şekil 6.1. Pürüzlülüğe bağlı olarak elde edilen kopma gerilmeleri (Çekme Tipi)	92
Şekil 6.2. Pürüzlülüğe bağlı olarak elde edilen kopma gerilmeleri (TAST tipi)	93
Şekil 6.3. Yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak elde edilen kopma yükleri.....	94
Şekil 6.4. TAST numunesine ait grafiğin DIC ile yorumlanması.....	96
Şekil 6.5. Yük profillerinin hesaplanan değerlerle karşılaştırılması.....	99
Şekil 6.6. Yüke karşılık ölçülen gerinimler	100
Şekil 6.7. Yük oranı ve çevrim sayısına karşılık mukavemet değerleri.....	101

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. DP490 yapıştırıcısının tabanca ile uygulanması.....	38
Resim 4.2. TAST numunesi hazırlık aşamaları	46
Resim 4.3. Aşındırılmış yüzeyler ve pürüzlülük ölçümü	49
Resim 4.4. DIC test hazırlığı.....	53
Resim 4.5. Test düzeneğinde kullanılan çeki yayları	65
Resim 4.6. Gerinim ölçer ve ısı çift konumları.....	73
Resim 4.7. Gerinim ölçer ve yük hücresi bölgeleri	74
Resim 6.1. Adezif kopma göstermiş TAST tipi numune.....	93
Resim 6.2. Yapıştırıcıda hapsolmuş normal ve büyük boyutlu hava kabarcıkları.....	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

γ_{LV}	Sıvı fazı ile buhar fazı arasındaki düzlemin açısı
γ_{SL}	Katı ile sıvı fazı arasındaki düzlemin açısı
γ_{SV}	Katı ile gaz fazı arasındaki düzlemin açısı
θ	Yüzeyin temas açısı, motor dönüş açısı
σ	Normal gerilme
τ	Kayma gerilmesi
τ_{em}	Emniyetli kayma gerilmesi
c	Yay sabiti
d	Yay teli çapı
D	Çekme tipi yapıştırma numunesi çapı
D_i	Çeki yayı iç çapı
D_d	Çeki yayı dış çapı
D_o	Çeki yayı ortalama çapı
F	Kuvvet
F_0	Çeki yayı ön yükü
F_n	Çeki yayı maksimum kuvveti
F_u	Yapıştırıcı numunesinin kopma kuvveti
G	Kayma modülü
G_s	Yüzey serbest enerjisi
Hz	Hertz
i_y	Toplam sarım sayısı
k_B	Bergsträsser sarım faktörü
k_W	Wahl sarım faktörü
L	Mekanizma koş uzunluğu
L_0	Yay ilk uzunluğu
L_H	Yayın kanca uzunluğu
L_n	Yayın maksimum uzunluğu

Simgeler**Açıklamalar**

L_y	Yayın yaylanan uzunluğu
MPa	Megapaskal
N	Newton
R	Mekanizmanın dönüş yarıçapı, yük oranı
R_m	Yay telinin kopma dayanımı
Ra	Yüzey pürüzlülük değeri
Rq	Yüzey pürüzlülük değeri
Rz	Yüzey pürüzlülük değeri
s	Yaylanma miktarı
S	Mekanizmanın strok miktarı
μm	Mikrometre

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AFM	Atomic force microscopy
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAA	Chromic acid anodizing
CFRP	Carbon fiber reinforced polymer
CZM	Cohesive zone modeling
DCB	Double cantilever beam
DIC	Digital image correlation
DLJ	Double lap joint
EMU	Electric multiple unit
GFR	Glass fiber reinforced
ISO	International Organization for Standardization
PAA	Phosphoric acid anodizing
PPS	Polyphenylene sulfide
SAA	Sulfuric acid anodizing
SEM	Scanning electron microscope
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
SHPB	Split-Hopkinson pressure bar
SJ	Scarf joint

Kısaltmalar**Açıklamalar****SLJ**

Single lap joint

TAST

Thick adherend shear test

TBJ

Tubular butt joint

SLB

Single leg bending

TSJ

Thick adherend shear joint



1. GİRİŞ

Yapıştırma bağlantıları iki parçanın ince bir yapıştırıcı tabaka kullanılarak birleştirilmesiyle oluşan çözilemeyen bağlantı şeklidir. Gelişen malzeme teknolojileriyle birlikte yapıştırma bağlantılarında da birçok ilerleme kaydedilmiştir. Günümüzde yapıştırıcı bağlantıları havacılık, uzay, otomotiv, denizcilik ve inşaat sektörlerinde kaçınılmaz çözümler haline gelmiştir. Tasarlanan sistemlerin daha hafif, daha güçlü ve daha ekonomik hale gelmesinde yapıştırma bağlantılarının etkisi büyüktür. Farklı malzemelerin bir arada kullanılması gerekliliği yapıştırıcı teknolojisi ve çeşitliliğini de geliştirmiştir. Bununla birlikte artık birçok yapısal dayanım gerektiren uygulamalarda yapıştırıcı bağlantıları tercih edilmektedir. Özellikle havacılık ve otomotiv sektöründe bu tür bağlantılar oldukça yaygınlaşmıştır.

Yapıştırma bağlantılarının mekanik bağlantılara göre birçok avantajı bulunmaktadır. Farklı kalınlık ve türdeki malzemelerin birleştirilebilmesi, düzgün yük dağılımına sahip bağlantılar yapılabilmesi, aynı zamanda sızdırmazlık elemanı olarak kullanılabilmesi bunlardan bazılarıdır. Ayrıca uygulanacak yüzeylerde delik, çentik vb. bağlantı detayları ve hassas işleme toleranslarına gerek duyulmadığı için maliyet etkin, kolay ve hızlı çözümlerdir.

Tüm bunlara rağmen yapıştırıcı bağlantılarının dezavantajları da vardır. İyi bir yapışma için iyi bir yüzey işlemi, doğru yapıştırıcı seçimi ve uygun ortam gereklidir. Bu tür bağlantıların dayanımları uygulanan yüzey işlemi, malzeme türü, yapıştırıcı kalınlığı, ortam sıcaklığı ve yükleme tipi gibi faktörlerden etkilenmektedir. Bununla birlikte, çevre koşullarına maruz kalmasıyla zamanla kimyasal yapılarındaki değişimler nedeniyle yaşlanma olayı gerçekleşmektedir. Yukarıda bahsedilen bu özelliklerinden ötürü yapıştırma bağlantı dayanımları ve bunlara etki eden faktörler birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır.

Bu çalışmada yapıştırma bağlantılarının statik (yarı statik) ve dinamik yükler altında deneysel incelemesi yapılmıştır. Yapıştırıcı olarak 3M Scotch-Weld firmasına ait DP-490 ürün kodlu, çift bileşenli, epoksi bazlı yapısal yapıştırıcı tercih edilmiştir. Yapışma yüzeyi olarak havacılıkta sıkça kullanılan 2024-T3 temperlenmiş alüminyum alaşımdan üretilen

numuneler kullanılmıştır. Statik inceleme düşük yükleme hızında yapılan çekme testleriyle yapılmış, dayanıma etki eden faktörlerden yüzey pürüzlülüğü, yapıştırıcı kalınlığı ve sıcaklık deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında çekme ve kesme yönündeki dayanımlar için farklı numuneler kullanılmıştır. Çekme yönündeki testler için ASTM D897'den farklı olarak pim ile bağlanacak şekilde bir numune tasarlanmıştır. Bu numunenin eksen dışı yüklenmemesi için yapışma öncesi bir dizi önlem alınmıştır. Ayırıcı parça yardımıyla 0,3, 0,5 ve 1 mm yapıştırıcı kalınlığında numuneler elde edilmiştir. Kesme testleri içinse ISO-11003-2'ye uygun TAST (Thick Adherend Shear Test) tipi numuneler ve ASTM D1002'ye uygun SLJ numuneleri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü oluşturmak için mekanik yüzey işlemleri yapılmıştır. Üç farklı kalınlıkta aşındırma kâğıdı ve kumlama işlemi ile yüzeyler aşındırılmış ve yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür.

Dinamik yük durumunu incelemek içinse bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney düzeneği temel olarak bir servo motor ile tahrik edilen slider-crank mekanizmasıdır. Düzeneğin hareketiyle birlikte sabit uca bağlanmış bir yay, doğrusal yatak üzerinde kayan bloğa bağlı çekme numunesine sinüzoidal olarak çekme kuvveti uygulamaktadır. Farklı sertlikte yaylarla farklı çevrim sayılarında yapılan testlerde yapıştırma bağlantısının yorulma davranışı incelenmiştir.

Çalışma sonucunda her iki yükleme durumu için de optimum yüzey pürüzlülüğü belirlenmiş ve yapıştırıcı kalınlıklarının dayanıma etkisi gösterilmiştir. TAST tipi numuneler DIC yöntemi ile görüntülenerek yapıştırıcının ayrılana kadarki davranışı incelenmiştir. Çekme ve kesme numunelerine ait gerilme deplasman grafikleri çıkarılıp mekanik özellikler belirlenmiştir. Dinamik testler sonucundaysa bağlantıların yüke ve çevrim sayısına bağlı kalan ömürleri çekme testleriyle tespit edilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yapıştırıcı malzemeler geçmişten günümüze oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır. Tarihi çok eskilere dayanan bu malzemelerin doğuşu hakkında kesin bir bilgi bulunmamakla birlikte arkeolojik çalışmalar sonucunda elde edilen en eski bulgu 1963 yılında Almanya'nın Koenigsau bölgesindeki maden sahasında bulunan el aletleridir. İncelemeler sonucunda Neandertal insanlara ait olduğu belirtilen aletlerin M.Ö. 80 000 tarihine ait olduğu düşünülmektedir. Aletler üzerinde yapıştırma amaçlı kullanılan bazı maddelere rastlanmış ve bunların kimyasal analizi yapılmıştır. İncelemeler sonucunda bunların huş ağacından distilasyon yöntemiyle elde edildiği öğrenilmiştir. İçeriğinde bulunan betulin bileşiği bunu doğrular niteliktedir. Bu aynı zamanda kimyasal prosesin insan tarafından kullanıldığını belgeleyen en eski keşif olma özelliğini taşımaktadır [1]. Benzer şekilde Suriye'nin Umm el Tlel bölgesinde de MÖ 40 000 tarihine dayanan katran kullanılarak birleştirilmiş el aletleri bulunmuştur. Yapıştırıcıların modern insanlar tarafından kullanımına dair en eski keşif ise İsrail'deki Sedom Dağı'nın kuzeybatısında bulunan Nahal Hemar Mağarası'nda yapıldı. 1983'te kazılan bu mağaradan çıkarılan eserlerin çoğunun hayvan derilerinden elde edilen kolajen bazlı bir malzemenin kalıntılarını taşıdığı ortaya çıkmıştır. Bu yapıştırıcıların karbon yaşının 8000 yıldan fazla olduğu belirtilmiştir [2].

Tarihte birçok uygarlık yapıştırıcıları kendine özgü şekillerde imal etmiş ve kullanmışlardır. Mısırlılar yapıştırıcıları yaygın olarak kullanan uygarlıkların başında gelmektedir. Ahşapları birleştirme, duvar kaplama, alçı ve boya içinde bağlayıcı eleman olma; altın kaplama işlerinde, mermer ve taştan imal edilen eşyaların onarımında ve sızdırmazlık sağlamada kullanmışlardır. Yapıştırıcıların ilginç uygulamalarından biri de Teb şehrinde M.Ö 600 civarında yaşamış olduğu tahmin edilen bir mumya üzerindeki ayak parmağı protezidir. Hayvansal kökenli yapıştırıcı emdirilmiş kumaş kullanılarak bugünkü modern protezlere benzer, pürüzsüz ve ten renginde bir parmak üretilmiştir [3]. Benzer uygulamalara Yunan ve Roma uygarlıklarında da rastlanmıştır. Çeşitli kırıkların tedavisi için yapıştırıcılar kullanılarak hazırlanmış kalıplar bulunmuştur.

Orta çağa gelindiğinde hayvansal ve tarımsal kökenli yapıştırıcılar için ilk yazılı tarifler ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu dönemde yapıştırıcılar ağırlıklı olarak kilise dekorasyonu,

sanat eserleri yapımı ve çeşitli kaplar üretmek için kullanılmıştır. İlerleyen dönemde 17. yüzyılda, bilim adamları yapışmanın doğasını düşünmeye başlamışlardı. Adezyon ve kohezyon kavramları üzerine ilk argümanlar 1620 yılında Francis Bacon tarafından ortaya kondu. Daha sonra 1717 yılında Newton cisimlerin parçacıklarını güçlü çekim kuvvetleriyle birbirine yapıştırabilen ajanların varlığından söz etti. 18. ve 19. yüzyıllarda ise Avrupa'daki mobilya üreticileri güvenilirliği sağlamak için yapıştırıcı bağlantılarını yaygın olarak kullanmaya başladılar [4]. Bu yıllarda aynı zamanda ilk endüstriyel yapıştırıcılar üretilmeye başlandı ve önemli bir ürün haline geldi. Hayvansal ve bitkisel kökenli bu yapıştırıcılar ilk olarak Hollanda ve İngiltere'de üretilmeye başlanmıştır. Yapıştırıcıya ait ilk patent ise 1754 yılında İngiltere'de balıktan elde edilen bir yapıştırıcı için alınmıştır. Sonraki yüz yıl boyunca, bunu çeşitli hayvansal yapıştırıcıların hazırlanmasına ilişkin diğer patentler izlemiştir.

20. yüzyılın başlarına kadarki süreçte yapıştırıcı üretiminde hiçbir standart ve kalite kontrol tanımı yoktu. Yapıştırıcılar genellikle üreticinin deneyimi ve basit insan duyularının uygulanmasıyla değerlendiriliyordu. 1900'lerin başlarında yavaş yavaş deneysel kalite kontrol prosedürleri ve muayeneler ortaya çıkmaya başladı. 1925 yılına kadar olan dönemde hayvansal tutkal üretiminde muazzam çabalar sarf edilmiş olmasına rağmen, binlerce yıllık yapıştırıcıların tarihinde en önemli etkiyi sentetik polimerlerin gelişimi yaratmıştır [5]. Kısa süre içinde fenol-formaldehitler, vinil fenolikler, akrilikler, epoksiler gibi birçok sentetik yapıştırıcı kullanıma sunulmuştur. Yapıştırıcı üretimindeki gelişmeler ve deneysel çalışmalar sayesinde bugün neredeyse her alanda yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Yapıştırıcıların yaygınlaşmasıyla birlikte özellikle otomotiv, havacılık ve uzay gibi alanlarda sıkça kullanılması beraberinde yapıştırma bağlantılarının dayanımı, güvenilirliği gibi konuları da getirmiştir.

Yapıştırma bağlantılarının dayanımını etkileyen faktörlerden bazıları; yüzey hazırlığı, yüzey pürüzlülüğü, kürlenme koşulları, yapıştırıcı kalınlığı, nem, ortam sıcaklığı ve yaşlanmadır. Correia [6] çalışmasında alüminyum-alüminyum yapıştırma bağlantısı için en iyi alternatif yüzey işlemeyi belirlemek amacıyla sülfürik asit ve borik-sülfürik asit kullanarak anodizasyon işlemleri uygulamıştır. İşlemlerin dayanım üzerindeki etkilerini ASTM 1002 standardına uygun SLJ numuneleri kullanarak AF 163 ve EA 9658 AERO olmak üzere iki tip yapıştırıcı için incelemiştir. Testler sonucunda optimum yüzey işleminin her yapıştırıcı türü için farklı olduğunu ve bu gerçeğin havacılık yapışkan

bağlantılarının mekanik davranışı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Xu [7] çalışmasında alüminyum alaşımlı levhalara farklı parametreler altında fosforik asit anodizasyonu işlemi uygulayarak farklı pürüzlülük ve yüzey enerjisine sahip yapışma alanları etmiş ve epoksinin yüzey ıslatma davranışını incelenmiştir. Daha sonra yüzey morfolojilerini SEM ile gözlemlemiş, yapışma mukavemetlerini SLJ numuneleri kullanarak karakterize etmiştir. Dayanımın yüzey enerjine ve pürüzlülüğüne bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Hirulkar [8] ise çalışmasında mekanik yüzey işleme yöntemlerini kullanarak farklı kayma modülüne sahip yapıştırıcı karışımlarının dayanım üzerindeki etkilerini incelemiştir. Lepleme (lapping), taşlama, zımparalama, parlatma ve talaşlı imalattan çıkan yüzeyler için yüzey pürüzlüklerini ölçmüş, AV138-DP8005 ve AV138-2015 karışımlarını 1,5 ve 2 mm yapıştırıcı kalınlıkları için test etmiştir. Testlerde alüminyum 6082 alaşımından imal edilmiş SLJ numunelerini kullanmış, yapıştırıcı karışımları için optimum yüzey işleme yöntemi ve kalınlık değerlerini bulmuştur. Hunter [9] yüzey pürüzlülüğünün yapıştırıcı bağlantısı dayanımı üzerindeki etkisini fiberglas kompozitler üzerinde incelemiştir. Vakum infüzyon yöntemi ile SLJ numuneleri üretmiş, üretim sırasında yapışma yüzeyine koyduğu cam ve yapışmaz kumaş ile iki farklı yapışma yüzeyi elde etmiştir. Pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyler için iki farklı sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. Bu modellerde yapıştırıcıyı izotropik ele alarak yapışma alanı boyunca gerilme dağılımlarını karşılaştırmıştır. Yaptığı test sonuçlarına göre pürüzlü yüzeyde pürüzsüz yüzeye göre 3,5 kat daha yüksek dayanım elde etmiştir. Zhan [10] mekanik aşındırma ve asit ile anodizasyon işlemlerini aynı çalışmada ele almış, farklı yüzey işlerinin yapışma dayanımına olan etkisini incelemiştir. Ek olarak yüzeyleri kirleticilerden arındırmak için ilk olarak alkali temizliği uygulamıştır. Çalışmasında 2060 Al-Li alaşımından üretilmiş SLJ numunelerini kullanmıştır. Toplamda 6 farklı yüzeyi incelemiştir. Bunlardan ilki parlatılmış yüzey, diğer dördü farklı incelikte zımpara kağıtları ile aşındırılmış yüzeyler, sonuncusu ise aşındırıldıktan sonra PAA işlemi uygulanmış yüzeydir. Çalışma sonucunda PAA işleminin yüzey pürüzlülüğünü bir miktar azalttığı ancak yüzey enerjisi ve temas açısını artırarak daha yüksek dayanım değerleri elde edildiği görülmüştür. Leahy [11] havacılıkta sıkça kullanılan titanyum ve cam fiber takviyeli GFR-PPS tipi kompozite plazma ile yüzey işlemi uygulayarak bağ dayanımlarını incelemiştir. Argon ve oksijen gazı kullanarak iki farklı yüzey enerjisi ve pürüzlülüğüne sahip yüzeyler elde etmiştir. İki gaz türü ve malzeme için de optimum plazma gücü, gaz basıncı ve uygulama süresini bulmuştur. Daha sonra bekleme süresine bağlı olarak temas açılarını ölçmüştür. İşlenen yüzeylerin topolojisini ve pürüzlülüğünü SEM ve AFM kullanarak

görüntülemiştir. Daha sonra işlenen malzemelerden SLJ numuneleri üreterek bağ dayanımları incelemiştir. Yüzeyin kimyasal analizi, her iki plazma işleminin de yüzeyin oksijen içeriğini artırdığı, bununla birlikte oksijen plazmasının her iki malzemede de yüzey enerjisi ve pürüzlülüğünde daha büyük artışa neden olduğunu göstermiştir. Çekme testi sonucundaysa oksijen plazma uygulanan numuneler, normal yapılmaya göre 4 kat daha fazla dayanım göstermiştir.

Yapışkan dayanımını etkileyen faktörlerden biri de yapışkan kalınlığıdır. Castagnetti [12] çalışmasında iki farklı yapıştırıcı için dört farklı yapıştırıcı kalınlığının kesme dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Standart SLJ numuneleri yerine alın altına yapıştırılmış boru şeklinde çelik numuneler (TBJ) kullanmış, bu numunelere burulma momenti vererek yapıştırıcı yüzeyi boyunca üniform kayma gerilmesi yaratmıştır. Elde ettiği sonuçlardan teorik kayma gerilmelerini hesaplayarak SLJ testlerinden elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır. Kohezif tip hasarlarda kalınlığın artışıyla kayma dayanımının düştüğü, öte yandan adezif hasar yaşanan numunelerde dayanımın kalınlıktan bağımsız olduğu sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca hasar tipinden bağımsız olarak TBJ ve SLJ'den elde edilen ortalama kayma dayanımlarının birbiriyle uyumlu olduğunu ortaya koymuştur. Shokrian [13] farklı yüzey işlemlerine ek olarak yapıştırıcı kalınlığı ve mikrokapsül varlıklarının yapıştırıcı dayanımına etkisini incelemiştir. Farklı tipte ve özellikle mikrokapsüller sentezlemiş bunları SEM ile görüntülemiştir. 7075-T6 alüminyum plakalara kimyasal ve elektrokimyasal işlemler uygulamış bunları mikrokapsül içeren yapıştırıcılarla bir araya getirerek farklı kalınlıklarda SLJ numuneleri elde etmiştir. Kalınlık artışıyla birlikte dayanımın bir miktar düştüğünü gözlemlemiştir. Sentezlediği bazı tip mikrokapsüllerin yapıştırıcıya dahil edilmesiyle birlikte özellikle kırılğan yapışkan ara yüzüne sahip numunelerin kesme mukavemetinde ve kohezif hasara uğrama eğiliminde artış elde ettiğini belirtmiştir. Watson [14] otomotiv çarpışma olayları sırasında meydana gelen karmaşık yükleme durumunun ve seri üretim sırasında oluşan değişken yapışkan kalınlığının dayanım üzerindeki etkisini incelemiştir. Mod II ve Karışık Mod yüklenme durumlarını yansıtabilmek için test numunesi geliştirmiş, bu numunelerle üç farklı yapıştırıcı kalınlığı için testler yapmıştır. Elde ettiği test verilerinden kohezif bölge modellemesi (CZM) için gerekli olan parametreleri çıkarmış ve bunların yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak değişimlerini göstermiştir. Yapıştırıcı kalınlığının artışı ile Mod I ve Mod II yükleme durumlarında ilk direngenliğin ve tepe dayanımının düştüğü, buna karşılık enerji salınım hızının arttığını gözlemlemiştir. Ji [15] yapıştırıcı kalınlığının Mod I hasar durumu için

CZM modellemesinde gerekli olan arayüzsel enerji salım hızı ve arayüz mukavemeti gibi parametreler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir dizi test gerçekleştirmiştir. Testlerde çelikten imal edilmiş DCB numuneleri kullanmıştır. Çatlak başlangıcını yaratmak için yapıştırıcı katman arasına mylar şerit yerleştirmiştir. Altı farklı kalınlık için yaptığı testlerde kalınlık artışıyla birlikte soyulma yükü, enerji salınım hızı ve kırılma enerjisinin arttığını gözlemlemiştir. Guo [16] çalışmasında değişen yapıştırıcı kalınlıklarına sahip yeni bir yapışkan bağlantı modeli önermiş ve sayısal olarak incelenmiştir. Üçgen, dairesel ve trapezoid olmak üzere üç tip pürüzlülük morfolojisini ele almıştır. CZM ve sonlu elemanlar modeline gömülmüş USDFLD kullanıcı kodları yardımıyla maksimum yük, kırılma enerjisi ve arayüz hasarı gibi parametreleri hesaplamıştır. Akhavan-Safar [17] yapışkan kalınlığının SLJ numune mukavemeti üzerindeki etkilerini yapışkan orta düzleminde oluşan boylamasına gerinim perspektifinden incelemiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yapmış ön görülen kopma yüklerini yaptığı testlerle karşılaştırmıştır. Lißner [18] sünek yapıştırıcıların yükleme hızı, yapışkan kalınlığı ve deformasyon modu üzerine kapsamlı bir deneysel karakterizasyon ve nümerik modelleme çalışması yürütmüştür. Mod I, Mod II ve Karışık Mod hasarı için üç farklı geometride çekme testi numuneleri üretmiştir. Numuneleri XCT yardımıyla inceleyerek, yapıştırıcı içerisinde bulunan boşlukların hacim oranını yapıştırıcı kalınlığa bağlı olarak elde etmiştir. Üç farklı kalınlık ve üç farklı hızda testleri gerçekleştirmiş, deformasyon ölçümü için DIC yöntemini kullanmıştır. Test sonrası optik mikroskop ile yüzeyleri incelemiş ve deformasyon hızı ve moduna bağlı olarak hasar tipini ortaya koymuştur. Tüm bu girdilerden matematiksel model oluşturarak çekme testini sonlu elemanlar ile modellemiştir.

Sıcaklık ve nem yapıştırıcı dayanımını etkileyen ve kimyasal değişimlere neden olan önemli faktörlerdendir. Croccolo [19-20] Loctite 9466 yapıştırıcısının dört farklı yapışma oranı ve dört farklı ortam sıcaklıkları altında dayanımını incelemiştir. ISO 10123'e göre pin bilezik bağlantısı üretmiş, bunları farklı birleşme oranında yapıştırmıştır. Oda sıcaklığında yaptığı testler sonucunda en iyi yapışma oranını bulmuş daha sonra bu testleri üç farklı sıcaklık için daha tekrarlamıştır. Testler sonucunda sıcaklık artışıyla birlikte dayanımda düşüş olduğu ve 40°C 'den sonra yapışma oranının etkisinin azaldığını ortaya koymuştur. Hu [21] yapıştırma bağlantılarının farklı sıcaklıklara maruz kalmasından sonra statik dayanımlarındaki değişimi incelemiştir. Üç farklı yapıştırıcı kullanarak çelik ile alüminyum plakaları birleştirerek SLJ numuneleri elde etmiştir. Bu numuneleri farklı

sıcaklıklarda bir hafta bekletilerek test etmiştir. Hasar yüzeylerini SEM yardımıyla görüntüleyerek hasar durumunu göstermiştir. Elde ettiği dayanım değerleri, yapıştırıcı kayma modülü ve ortam sıcaklığına göre cevap yüzeyleri oluşturmuştur. Jia [22] poliüretan yapıştırıcıların oda sıcaklığı ve düşük sıcaklıklarda farklı deformasyon hızları altında kesme dayanımını incelemiştir. ISO 11003-2'ye uygun olarak paslanmaz çelikten ürettiği TAST numunelerini kullanmıştır. Oda sıcaklığında deformasyon hızı arttıkça kopma yükünün arttığını, düşük sıcaklıklarda ise tam tersi bir durum olduğunu belirtmiştir. Yüksek hız düşük sıcaklık için çekme testlerini ABAQUS ortamında modellemiş, test sonuçları ile karşılaştırmıştır. Qin [23] yüksek hızlı EMU tipi taşıtlarda kullanılan CFRP-alüminyum yapıştırma bağlantılarının uzun süreler boyunca yüksek sıcaklıklara maruz kaldığını belirtmiş yapıştırıcı dayanımının zaman içindeki değişimini incelemiştir. TSJ, SJ ve BJ tipi bağlantılar kullanmıştır. Yapıştırıcı ve CFRP'nin kendisinde oluşan değişimler içinse bunlardan imal edilmiş ayrı numuneler hazırlamıştır. Numuneleri otuz gün boyunca 80°C'de bekletmiş, her on günde bir camsı geçiş sıcaklığı, kimyasal kararlılık ve bağlantı dayanımlarını ölçmüştür. Silva [24] düşükten yükseğe geniş bir sıcaklık aralığında çalışan süpersonik uçak gövdesinde ihtiyaç duyulacak yapıştırma bağlantısı için nümerik bir çalışma yürütmüştür. Biri düşük diğeri ise yüksek sıcaklıkta mukavemet gösteren iki yapıştırıcıyı birlikte kullanma konseptini titanyum-titanyum, titanyum-kompozit bağlantıları için kullanmak istemiştir. Muhtemel en iyi yapıştırıcı bağlantısını kullanmak için bu birleşimlerin sonlu elemanlar modelini oluşturarak bir dizi nümerik analiz çalışması yürütmüştür. Elde ettiği sonuçlara göre farklı malzemeden oluşan bağlantılar için iki farklı özellikte yapıştırıcının birlikte kullanılmasıyla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Khoramishad [25] çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ile güçlendirilmiş alüminyum SLJ numunelerinin farklı sıcaklıklar altında bağlı dayanımlarını incelemiştir. Sıcaklık ve nanotüp yüzdesine bağlı bir cevap yüzeyi elde etmiştir. Rudawska [26] düşük ve sıfırın altındaki sıcaklıklar için yapıştırıcı bağındaki yaşlanmayı ele almış, farklı yapıştırıcı ve reçine karışımları için kesme dayanımındaki değişimleri incelemiştir. Katsivalis [27] sıcaklık ve nem faktörünün inşaat sektöründe sıkça kullanılan cam-çelik yapışkan bağlantıları üzerindeki etkilerini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Çalışmasında kırılğan (Araldite 2020) ve sünek (Araldite 2047-1) yapıda iki farklı yapıştırıcı kullanmıştır. Bu yapıştırıcılardan elde ettiği dogbone tipi numuneleri farklı nem ve sıcaklıklara maruz bıraktıktan sonra mekanik özelliklerindeki değişimi incelemiştir. Benzer testleri DCB ve SLB numuneleri kullanarak arayüz dayanımı için de yapmıştır. Bu testlerden CZM için gerekli parametreleri çıkarmış analiz modelinde kullanmıştır. Leger

[28] yapıştırma bağlantılarının sıcak su içerisinde yaşlanması sonrası bağlantı dayanımındaki değişimleri incelemiştir. Yapıştırıcının kendisi ve SLJ numunelerini su ortamında bekleterek yaşlandırmış, suyun yapıştırıcı üzerindeki difüzyonunu sonlu elemanlar yöntemiyle modellemiştir. Daha sonra çekme testlerinde elde ettiği yükleri sonlu elemanlar modelinde kullanarak hasar durumundaki gerilme dağılımlarını elde etmiş, bu bölgelerin olası çatlak başlangıç bölgeleri olduğunu belirtmiştir. Momber [29] denizcilik uygulamalarında kullanılan kaynak ve cıvatalı bağlantılarının halihazırda kaplama yapılmış yüzeyler üzerine uygulanmasının korozyon vb. olumsuz etkilerini olduğunu belirtmiş, bunun üzerine alternatif bir çözüm olan yapıştırıcı bağlantılarının deniz ortamında performanslarını incelemiştir. Üç farklı kaplama malzemesi için yapıştırıcı bağlantılarına yüksek nem ortamında tuz spreyi ve termal sıcaklık döngüsü uygulayarak yaşlanmalarını sağlamış ve dayanımlarını incelemiştir.

Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altında da çalışabilmektedir. Bunun sonucunda yapıştırıcı bağlantılarında yorulma meydana gelmektedir. Moreira [30] karbon-epoksi laminatları iki taraflı bindirme şeklinde yapıştırarak oluşturduğu numuneleri üç nokta eğilme düzeneğinde statik ve dinamik olarak test etmiştir. Statik testte yapıştırıcı bağlantısının ayrılma yükünü bularak bunu maksimum yorulma yükünün belirlenmesinde kullanmıştır. Dinamik testler kuvvet kontrollü olarak 0,1 yük oranı için 1,5 Hz'de gerçekleştirmiştir. Elde ettiği sonuçları nümerik model sonuçları ile karşılaştırmıştır. Kemiklioğlu [31] yapıştırıcı bağlantısı ile birleştirilmiş fiber takviyeli plastik kompozitlerin titreşim ve darbe yükü altında mekanik performanslarını deneysel olarak incelemiştir. Yapıştırıcı olarak DP-460 kullanmıştır. Titreşim çevrimi sayısı ve darbe enerjisi parametrelerinin bağlantı dayanımı üzerindeki etkilerini göstermiştir. Rodriguez [32] geliştirdiği test düzeneği ile SLJ tipi yapıştırma numunelerinin düşük çarpma hızlarında ve yorulma davranışını incelemiştir. Sarkaç başlangıç açısını değiştirerek farklı enerji değerlerinde darbe yükü uygulamıştır. Ek olarak numuneleri standart yorma cihazında 5 Hz ve 0,1 yük oranında kuvvet kontrollü olarak test etmiştir. Standart yorulma testinde düzgün azalan bir eğilim görürken çarpma ile yorulmada yük arttıkça ömür sayısının oldukça düştüğünü gözlemlemiştir. Shenoy [33] SLJ numuneleri ile yaptığı çalışmada sabit ve değişken genlikli yorulma testleri gerçekleştirmiştir. Değişken genlikli yorulma için Palmgren-Miner gibi mevcut ömür hesaplarının nasıl sonuç verdiğini incelemiştir. Sabit genlikli testleri 5 Hz 0,1 yük oranında yapmış, değişken genliktekileri ise üç farklı genlik aralığı ve iki farklı tekrar aralığı için gerçekleştirmiştir. Dayanımın

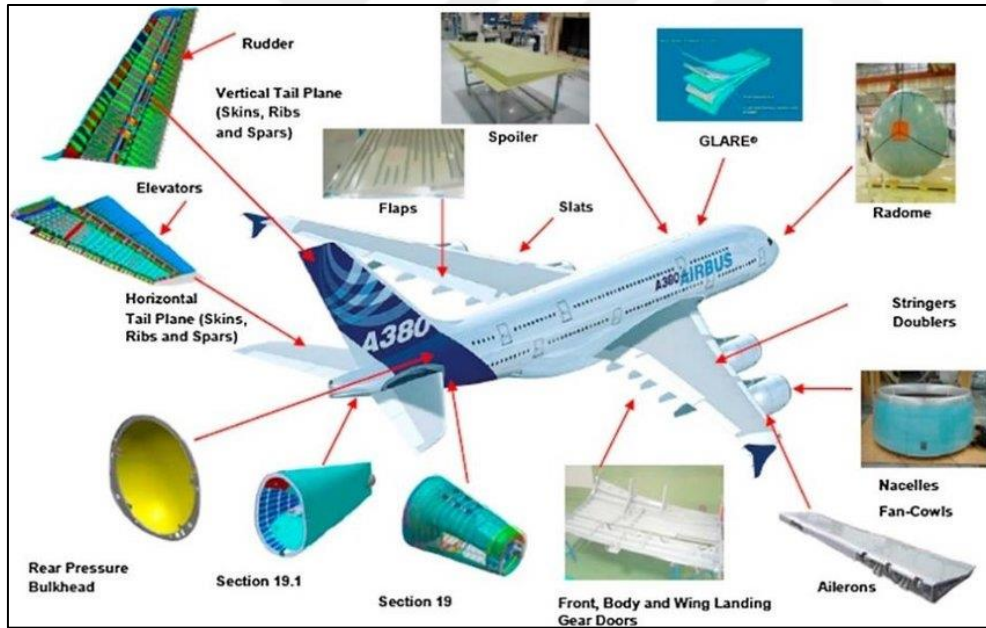
lineer olmayan şekilde değişmesi ile mevcut ömür hesaplarının yetersiz kaldığını göstermiştir. Crocombe [34] çatlak başlangıcını saptamada önemli bir belirti olması açısından yapışkan yüzeyinin arka kısmına gerinim ölçer yapıştırarak ölçümler yapmıştır. Uygun gerinim ölçer konumunu saptamak ve çatlak boyuna göre gerinim değişimini incelemek için sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır. SEY ile ayrıca numune bitiminde bulunan yapıştırıcı radyusunun gerilim dağılımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Test sonuçları ile analizleri karşılaştırdığında uygun gerinim ölçer konumu ve göreceli olarak düşük direngenliğe sahip numune malzemesi için tutarlı sonuçlar elde etmiştir. Zhang [35] GFRP tipi kompozitlerin sabit genlik altında yorulmalarını incelemiştir. DLJ ve SLJ tipi numunelerde yaptığı çalışmada numune üzerlerine çatlak ilerlemesini takip edebilmek için özel gerinim ölçerler yerleştirmiştir. Test verilerini işleyerek çatlak ilerlemesi, numune direngenliğindeki değişim ve kırılma mekaniği için gerekli bazı parametreleri elde etmiştir. Azari [36] yüzey pürüzlülüğünün epoksi yapıştırıcı kullanılan sistemlerdeki yorulma davranışını incelemiştir. Testleri DCB numuneleri üzerinde deplasman kontrollü olarak gerçekleştirmiştir. Farklı incelikte aşındırıcılar kullanarak yapışma yüzeyleri elde etmiş, Mod I ve Karışık Mod yüklenme durumlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda yüzey pürüzlülüğünün Karışık Mod yükleme durumu için düşük çatlak ilerleme hızlarında etkili olduğunu söylemiştir. Boutar [37] önceki çalışmadan farklı olarak yapıştırıcı kalınlığının etkisini de incelemiştir. Poliüretan yapıştırıcı kullanarak oluşturduğu alüminyum SLJ numunelerini 0,1 yük oranı için kuvvet kontrollü olarak yormuştur. Kopma ara yüzlerini SEM ile görüntülemiş, yapıştırıcı içerisinde bulunan poroziteleri ve çatlak ilerleyişini göstermiştir. Yapıştırıcı bağlantısı için optimum kalınlık ve yüzey durumunu bulmuştur. Adamvalli [38] çalışmasında Ti-6Al-4V alaşımı ile hazırladığı özel kesme numunelerini farklı sıcaklıklarda dinamik teste sokmuştur. Test için parçalı Hopkinson basma çubuğu (SHPB) düzeneğini kullanmıştır. İki farklı yük ve dört farklı sıcaklık için testler yapmıştır. Yükleme hızı arttıkça maksimum dayanma yükünün statik yüklemeye göre arttığını, sıcaklığın artması ile de düştüğünü göstermiştir. Pang [39] çalışmasında titreşim yükünün yapıştırma bağlantıları üzerindeki etkisini karakterize etmek için deneysel ve nümerik yaklaşım ortaya koymuştur. CZM'nin çekme ayrılma cevabı için hasar faktörü eklemiş ve yapışkan katmandaki bozulma sürecini değerlendirmek için bir sonlu eleman modeli geliştirmiştir. Çok sayıda SLJ numunesini aynı düzenek üzerinde sarsıcı yardımıyla test etmiştir. Daha sonra bu numuneleri çekme testine sokarak kalan ömürlerini test etmiştir. Arayüz ayrılma durumunu ABAQUS ortamında simüle ederek test ile karşılaştırmıştır. He [40] ise yapıştırmalı bağlantıların dinamik cevapları üzerine bir çalışma yapmıştır.

Yapıştırılmış kirişlerin dinamik cevaplarını tahmin edebilmek için SLJ tipi yapıştırılmış numuneler üzerinde nümerik analizler yapmış ve testlerle doğrulamıştır. Doğal frekanslar, mod şekilleri ve frekans cevaplarını tahmin edebilmek için ABAQUS'ta SE modeli oluşturmuştur. Dinamik testleri ise ankastre bağlanmış SLJ numunesini sarsıcı ile tahrik ederek gerçekleştirmiştir. LMS veri toplama sistemi ile numune üzerindeki ivme ölçerden veri toplamış, sonuçları analiz modeli ile karşılaştırmıştır. Saraç [41] Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 nano tanecikler ile takviye edilmiş DP460 epoksi yapıştırıcının statik ve yorulma dayanımlarını incelemiştir. Çalışmasında parametre olarak tanecik tipi ve miktarını ele almıştır. Test numunesi olarak AISI paslanmaz çelikten imal edilmiş SLJ tipi numuneler kullanmıştır. $R=0,1$ yük oranı için yaptığı testler sonucunda Al_2O_3 ve SiO_2 taneciklerinin yorulma dayanımını artırdığını belirtmiştir. Loureiro [42] sert ve esnek yapıştırma bağlantılarının sönüm özellikleri ile statik, darbe ve yorulma dayanımlarını karşılaştırmıştır. Yapılan çalışmada esnek yapıştırıcı olarak Sikaflex 256 poliüretan, sert yapıştırıcı olaraksa Araldite AV138/HV998 epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Testlerde soyulma yükü için T bağlantısı, kesme yükü içinse SLJ tipi çelik numuneler kullanılmıştır.



3. YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARI

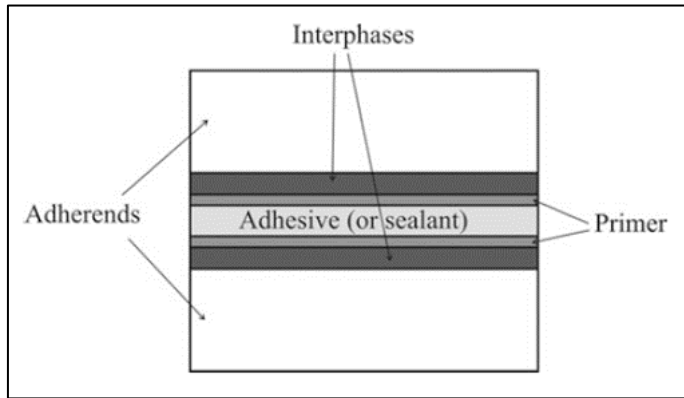
Yapıştırma bağlantıları günümüzde birçok sektörde sıklıkla kullanılmaktadır. Bunların başında havacılık ve uzay, otomotiv, denizcilik ve inşaat sektörleri gelmektedir. Gelişen malzeme teknolojisiyle birlikte farklı tip malzemelerin birleştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Kompozit-metal, polimer-metal veya metal-metal bağlantıları için yapıştırıcılar önemli bir konuma gelmiştir. Günümüzde üretilen sivil ve askeri uçakların birçok bölümünde yapıştırıcı bağlantıları görmek mümkündür (Şekil 3.1). Aynı durum otomotiv sektöründe de vardır. Seri üretim hatlarında yapıştırıcı uygulayan robotlar görmek alışılmış bir durum haline gelmiştir. Benzer şekilde kompozit gövdeli deniz taşıtlarında sızdırmazlık ve uygulama kolaylığı gibi nedenlerden yapıştırıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe ise cam giydirme, açık alan kaplamaları gibi uygulamalarda yapıştırıcılar vazgeçilmez bir hal almıştır.



Şekil 3.1. Airbus A380’de yapıştırma bağlantıları kullanılan bazı bölgeler

Yapıştırıcılar birleştirilecek yüzeyler ile bağ yapabilen, bu bağ sayesinde parçaların bir arada tutunmasını sağlayan malzemelerdir. Yapışma ise farklı iki cismin, mekanik kuvvetlerin ara yüz temasıyla aktarılması yoluyla bir arada bulunma durumudur. Adezyon denilen bu olgu, Van der Waals kuvvetleri, kimyasal yapışma veya elektrostatik çekim gibi moleküller arası çekim kuvvetleri sayesinde gerçekleşmektedir [43]. Bağlantı sisteminin mekanik performansını yalnızca ara yüz kuvvetleri değil, yapıştırıcının kendi içindeki

moleküler çekim kuvvetleri de belirler. Bu çekime kohezyon denir. Yapıştırıcı ile parça arasında bir ara faz tabakası veya sınır tabakası bulunmaktadır. Bu tabakanın fiziksel ve kimyasal özellikleri yapıştırıcı ve parçadan farklılık göstermektedir. Bu bölgenin özelliklerinin belirlenmesi sistemin mekanik performansı için kritik önem taşımaktadır. Astar ise yapıştırıcı uygulanana kadar yüzeyleri korumak veya yapışmayı iyileştirmek için genellikle alt tabaka üzerine uygulanan bir maddedir. Uygulamaya göre bulunmayabilir. Şekil 3.2’de temsili bir yapıştırma bağlantısı gösterilmiştir.



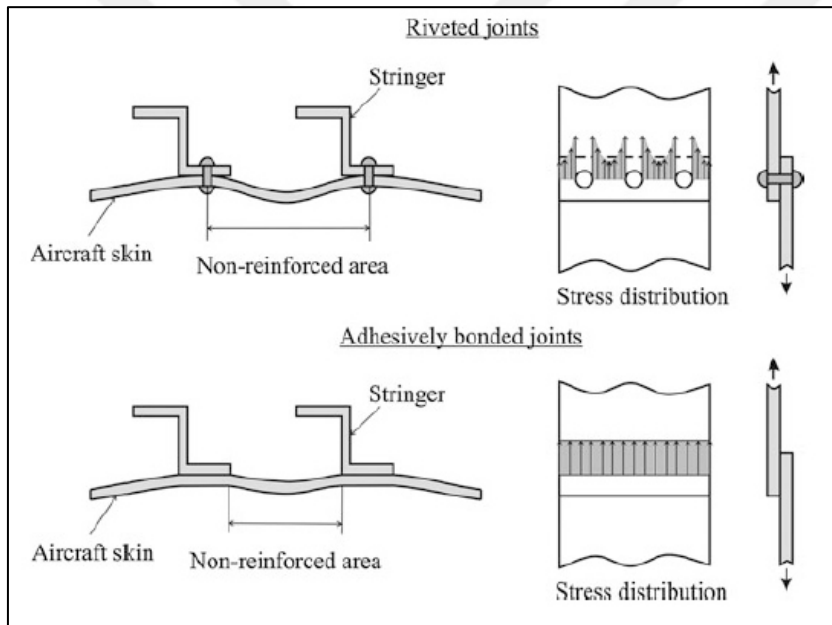
Şekil 3.2. Yapıştırma bağlantısı

Yapıştırıcıları kullanım amacına göre ikiye ayırmak mümkündür. Bunlar yapısal ve yapısal olmayan yapıştırıcılardır. Yapısal yapıştırıcılar yapı üzerinde oluşan yükleri tasarım limitleri içerisinde bütünlüğünü kaybetmeden taşıyabilmelidir. Bu yapıştırıcılar ile yapılan bağlantılar önceden belirlenen servis ömrü boyunca kullanılabilmesi, ayrıca zaman içerisinde yapıştırıcıda meydana gelebilecek yaşlanma etkilerine karşı dayanıklı olmalıdır. Yapısal olmayan yapıştırıcılarda ise yukarıda belirtilen özellikler aranmamaktadır. Bu tip yapıştırıcıların görevi düşük dayanım gerektiren alanlarda istenen parçaları bir arada tutmaktır. Ambalaj ve paketleme için kullanılan yapıştırıcılar bunlara örnek verilebilir [44].

3.1. Yapıştırma Bağlantılarının Avantaj ve Dezavantajları

Yapıştırma bağlantıları, mekanik bağlantı yöntemlerine kıyasla aynı veya daha güçlü bağlantıları daha düşük maliyet ve ağırlıkla sunabilen bir bağlantı türüdür. Cıvata ve perçin gibi mekanik bağlama yöntemlerinde bağlantının dayanımı kullanılan bağlama elemanının kesit alanı ile sınırlıdır. Yapıştırma bağlantılarında ise yüzey boyunca birleşme sağlandığı

için birleştirilecek malzemenin dayanımından daha yüksek bağlantılar elde etmek mümkündür. Mekanik bağlantılarda olduğu gibi ara yüzler üzerine delik delme, diş açma, hassas yüzey işleme gibi üretim proseslerine gerek olmadığından düşük maliyet ile düzgün yüzeyler elde edilebilir. Çoğu havacılık yapısında aerodinamik sürtünmeyi azaltmak ve mümkün olduğunca düşük sıcaklıklar elde etmek için düzgün yüzeyler tercih edilmektedir. Helikopter kanatları buna örnek verilebilir. Yumuşak malzemeler, mekanik bağlantılar yerine yapıştırma bağlantılarına ihtiyaç duymaktadır. Parça yüzeylerin oluşan düzgün gerilme dağılımları ve geniş temas alanı nedeniyle parça direngenliği ve mukavemetinden daha çok faydalanılır, mekanik bağlantılarda görülen gerilme yığılımları azalmış olur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Bağlantılar arasındaki direngenlik farkı ve gerilme dağılımları [45]

Mekanik bağlantının kullanılamayacağı veya zarar vereceği farklı malzeme birleşimleri için de yapıştırıcılar iyi bir çözümdür. Metal, kauçuk, plastik, kompozit, ahşap gibi birçok malzeme kombinasyonunu bir araya getirmek için kullanılmaktadır. Sıcaklık değişimlerinin önemli olduğu durumlarda farklı malzemelerin bağlanması beraberinde termal genleşme farkını getirmektedir. Mekanik bağlantıların yapıştırıcılara kıyasla rijit olması nedeniyle yapıda istenmeyen termal gerilmeler oluşmaktadır. Yapıştırıcılar esnek yapıları sayesinde genleşme farklılıklarından kaynaklı hasarları önleyebilmektedir. Boşluksuz yapışma sonrası sıvı ve gaz geçişini engelleyerek sızdırmazlık sağlaması yapıştırıcıların diğer bir özelliğidir. Bu sayede contaların yerini alabilirler. Uygulandığı

alana göre yapıya sönüm kabiliyeti kazandırmaktadır. Bunun için özel yapıştırıcılar da mevcuttur. Birleşen parçalar üzerinde delik, çentik, kademe gibi mekanik bağlantı ara yüzü olmaması ve düzgün gerilme dağılımı sayesinde titreşim ve şok yükü altında daha uzun ömür sağlamaktadırlar. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda görev yapamama, yüzey hazırlığı gereksinim duyması, yapışma sonucu görsel muayene yapılamaması, ortam koşullarından etkilenme ve uygun kürlenme koşullarının sağlanması yapıştırıcı bağlantılarının eksilerindendir.

Yapıştırma bağlantılarının avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Avantajları

- Düzenli gerilme dağılımı ve geniş yük taşıma yüzeyi
- İstenilen geometri ve kalınlıktaki malzemeleri birleştirebilme
- Aynı veya farklı türde malzemeleri birleştirebilme
- Farklı malzeme birleşimleri için elektrokimyasal (galvanik) korozyonu azaltması
- Yorulmaya ve değişken yüklere karşı direnç sağlaması
- Düzgün geometriye sahip bağlantılar yapılabilmesi
- Sızdırmazlık sağlaması
- Elektrik ve ısı geçişi için yalıtkan veya iletken olarak görev yapabilmesi
- Titreşim ve şok sönümü sağlaması
- İyi ağırlık/mukavemet oranı sunması
- Hızlı ve ucuz bir bağlantı türü olması

Dezavantajları

- Saydam olmayan malzemeler için görsel muayene yapılamaması
- Yüzey hazırlığının dayanım ve ömür üzerinde etkili olması
- Kürlenme zamanlarının uzun olabilmesi
- Yapıştırma için fıkstür, pres, fırın, otoklav gibi ekipmanlara ihtiyaç duyulması
- Yüksek sıcaklıklarda görev yapamaması
- Sıkı proses kontrolüne ve ortam temizliğine ihtiyaç duyması
- Çevresel koşullardan etkilenmesi

- Hayvansal ve bitkisel bazlı olanların mikroorganizmalar tarafından zarar görmesi
- Temizlik ve uygulama sırasında açığa çıkan zararlı kimyasallara maruz kalınması

3.2. Yapıştırıcı Türleri

Yapıştırıcıları çok sayıda parametreye göre sınıflandırmak mümkündür. Kökenlerine göre inceleyecek olursak doğal ve sentetik olarak ikiye ayrılırlar. Doğal yapıştırıcılar bitkisel ve hayvansal kökenli malzemeler kullanılarak elde edilirler. Bitkisel kökenliler genellikle nişasta ve selüloz esaslıdır. Hayvansal olanlar ise protein bazlı olup balık, süt veya hayvansal dokulardan elde edilen kolajen formundadır. Sentetik yapıştırıcıları ise elastomerikler, termoplastikler ve termosetler olarak ayırmak mümkündür. Kauçuk tipi yapıştırıcılar elastomerik gruptadır. Doğal ya da sentetik kauçuktan imal edilebilirler. Termoplastikler ise isminden anlaşılacağı üzere sıcaklık ile yumuşayan, soğuduğunda kimyasal değişim göstermeden eski haline dönen yapıştırıcılardır. Vinil grubu içeren çoğu genel maksatlı yapıştırıcılar bu tiptedir. Akrilikler ve siyanoakrilatlar en geniş kullanım alanına sahip olanlardır. Uygulandıktan sonra çabuk katılaşmaları ve suya neme dayanıksız oluşları dezavantajlarıdır. Termoset tipi yapıştırıcılarda kürlenme sırasında tersinemez şekilde bağ oluşumu meydana gelir. Bu nedenle sıcaklıkla birlikte erime yerine kauçuk davranışı sergileyerek dayanımı düşer. Doymamış polyesterler ve epoksiler bu gruptadır. Epoksiler yapısal yapıştırıcı olarak en çok kabul gören ve kullanılan yapıştırıcılardır. İçeriğindeki en önemlisi baz malzeme olan reçinedir. Baz malzemeye kullanım alanına göre dolgu malzemesi, sertleştirici malzeme ve esnek-tok davranış için gerekli çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir. Kullanım alanına göre bu malzemeler değişkenlik gösterir [46]. Yapıştırıcıların sınıflandırılması Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Group	Type	Source	Use
Animal	gelatin casein albumen	mammals, fish milk blood	can labels plywood, blockboard
Vegetable	starch cellulose acetate } cellulose nitrate }	corn, potatoes, rice cellulose	paper, packaging leather, wood, china
Mineral	asphalt/bitumen	earth's crust	road pavements
Elastomeric	natural rubber SBR nitrile rubber polyurethane rubber silicone rubber	tree latex synthetic synthetic synthetic synthetic	carpet making tyre vulcanising PVC solvent glue fabrics, bookbinding
Thermoplastic	PVA polystyrene cyanoacrylates liquid acrylic	synthetic synthetic synthetic synthetic	wood and general model making plastics, metals, glass, rubber structural vehicle assembly
Thermosetting	phenol-formaldehyde } urea-formaldehyde } unsaturated polyesters epoxy resins polyurethane	synthetic synthetic synthetic synthetic synthetic	chipboard and plywood glass fibre, resin mortars structural, especially metal to metal semi-structural uses with plastics, metals, wood and sandwich panel construction

Şekil 3.4. Yapıştırıcıların sınıflandırılması [46]

3.3. Adezyon Teorileri

Adezyon olayını açıklamak için birkaç teori geliştirilmiştir. Ortaya çıkış sıralarına göre mekanik kenetlenme, elektrostatik çekim, difüzyon ve adsorpsiyon / yüzey reaksiyon teorileri ortaya konmuştur. Daha yakın zamanda adezyon için başka teoriler de önde sürülmüştür. Yapışma bağlarını tek bir mekanizmayla tanımlamak tam olarak mümkün değildir. Bir yapıştırıcı bağlantı sisteminde yapışma olayından farklı mekanizmaların birlikte rolü vardır. Her mekanizmanın rolünün kapsamı, farklı yapışkan bağlama sistemleri için değişebilir. Bu mekanizmalar adezyon olayını farklı ölçekte değerlendirmektedir. Mikroskobik ölçekte yapışkan ve yapışan arasındaki yüzey ile ilgilenilmektedir. Temas bölgesi, yüzey durumu ve özgül yüzey alanı gibi parametreler incelenmektedir. Yüzeyin elektrostatik yükü durumu ise makroskobik ölçeğe örnek verilebilir. Difüzyon olayı ise adezyonu moleküler ve atomik seviyede ele almaktadır. Adezyon teorileri ve bu teorilerin inceleme kapsamı Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Adezyon teorileri

Geleneksel Teoriler	Güncel Teoriler	Ölçek
Mekanik kenetlenme	Mekanik kenetlenme	Mikroskobik
Elektrostatik	Elektrostatik	Makroskobik
Difüzyon	Difüzyon	Moleküler
Adsorpsiyon/yüzey reaksiyonu	Islanabilirlik	Moleküler
	Kimyasal bağlanma	Atomik
	Zayıf sınır tabakası	Moleküler

3.3.1. Mekanik teori

Bu teoriye göre adezyon, yapıştırıcıların cisim yüzeyindeki gözeneklere, boşluklara ve diğer yüzey düzensizliklerine nüfuz etmesiyle oluşur. Yapıştırıcı, ara yüzde hapsolmuş havanın yerini alır. Bu sayede iki cismin boşluklara giren yapıştırıcı ile bağlayabileceği sonucuna varılmıştır. Bu durum yapıştırıcı ve cisim üzerinde mekanik kenetlenme yaratarak bağ dayanımına katkı sağlamaktadır. Yapıştırıcılar genellikle pürüzlü ve gözenekli yüzeylerde daha güçlü bağlar kurarlar. Ancak pürüzsüz yüzeylerde de iyi yapışmanın gözlemlenmesi bu teoriyi uygulanabilir olmaktan çıkarmaktadır.

Yapılan ilk çalışmalarda, yüzey pürüzlülüğünün yüzeyin ıslanabilirlik yeteneği üzerinde olumsuz sonuçları olduğunu belirtilmiştir. Bu nedenle pürüzlü yüzeylerde cisim ile yapıştırıcı arasında boşluklar meydana gelmektedir. Ara yüze sıkışmış boşluklar gerilme yığılması yaratarak kırılğan yapıştırıcı kullanılması durumunda yapışma dayanımını düşürmektedir. Bununla birlikte pratik uygulamalarda belirli bir yüzey pürüzlülüğü değerine kadar dayanımın arttığı gözlemlenmiştir. Yüzey aşındırmayla birlikte bağ dayanımındaki iyileşme aşağıdaki durumlardan kaynaklanabilir [44].

- i. Mekanik kenetlenme
- ii. Temiz yüzey oluşumu
- iii. Yüksek reaktif yüzey oluşumu
- iv. Yüzey alanının artması

Genel görüşe göre yapıştırma bağlantısının dayanımını yapışan cisim yüzeylerinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimlerin sebep olduğuna inanılmaktadır. Yukarıda verilenlerden hangisinin daha etkili olduğu tartışılmakla birlikte ıslanabilirliğin

ve kimyasal bağlanmanın iyileşmesi, artan yüzey alanının bir sonucu olduğu beklenmektedir.

3.3.2. Elektrostatik teori

Bu teoriye göre adezyon olayı yapıştırıcı ve cisim arasında meydana gelen elektriksel etkileşimden meydana gelmektedir. Yapıştırıcı ve yapışan cismin farklı elektriksel potansiyele sahip olmasından dolayı ara yüzde bulunan serbest yük taşıyıcıları temas yüzeyi boyunca hareket eder. Bunun sonucunda elektriksel çift tabaka oluşur. Bu teori soyulma testi sırasında açığa çıkan elektriksel enerji ile desteklenirse de yapıştırıcı tabakasının ayrılması için gerekli toplam kırılma enerjisine göre oldukça düşük kalmaktadır. Bu nedenle evrensel olarak kabul görmemektedir.

3.3.3. Difüzyon teorisi

Bu teori, yapışmanın, yapışkan ve yapışan cisimler arasında moleküllerin karşılıklı difüzyonu yoluyla geliştirildiğini ileri sürer. Difüzyon teorisi, öncelikle hem yapışkanın hem de yapışan cisimlerin, hareket kabiliyetine sahip uzun zincirli moleküllerden oluşan polimer olması durumunda uygulanabilir olmaktadır. Malzemelerin doğası ve bağlama koşulları, difüzyonun gerçekleşip gerçekleşmediğini ve ne ölçüde gerçekleştiğini etkilemektedir. Yaygın ara faz katmanı tipik olarak 10-1000 Å (1-100 nm) aralığında bir kalınlığa sahiptir [44]. Termoplastiklerin çözücü (solvent) ile yapıştırılması ve ısı ile kaynatılmasının moleküllerin difüzyonu ile olduğu kabul edilmektedir. İki polimer fazının birbirini ile uyumlu olması, karışma için Gibbs serbest enerjisinin negatif olmasını gerektirmektedir. Gibbs serbest enerjisi (ΔG_m), karışımın entalpisi (ısı) ΔH_m ve entropisi (ΔS_m) ile bağıntılıdır.

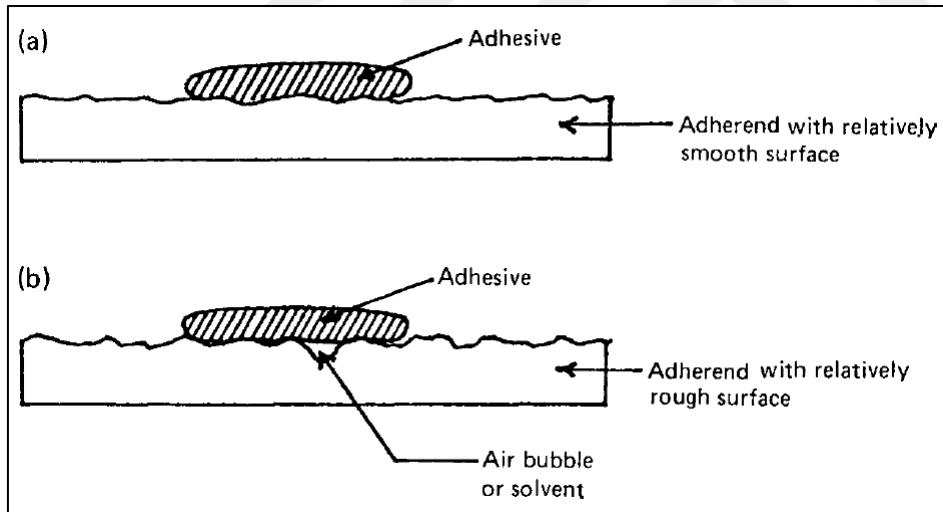
$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \quad (3.1)$$

Polietilen ve polipropilenin bir butil kauçuğa yapışması difüzyona örnektir. Poliolefinin erime noktasının altındaki sıcaklıklarda iki polimer bağlandığında yapışkan bağ zayıftır. Yapışma işlemi polietilen (135°C) ve polipropilenin (175°C) erime sıcaklığının üzerinde gerçekleştiğinde yapışma mukavemetinin keskin bir şekilde arttığı görülmektedir. Teori

benzer yapıdaki polimerler için kısmen kabul görse de farklı tip malzemeler için kabul görmemektedir.

3.3.4. Islatma teorisi (Wetting theory)

Bu teori, yapışmanın iki malzeme arasındaki moleküler temastan ve gelişen yüzey kuvvetlerinden kaynaklandığını önermektedir. Bağ oluşumundaki ilk adım, yapıştırıcı ile cisim arasında ara yüz kuvvetleri geliştirmektir. Yapıştırıcı ile cisim yüzeyi arasında sürekli bir temas kurma işlemine ıslatma denir. Bir yapışkanın katı bir yüzeyi ıslatabilmesi için, katının kritik yüzey geriliminden daha düşük bir yüzey gerilimine sahip olması gerekir. Yapıştırıcı, cisim yüzeyindeki çukurlara ve yarıklara dolduğunda iyi ıslatma sonuçları elde edilirken, bu boşluklar üzerinden geçerek köprü biçiminde şekil almasıyla kötü ıslatma elde edilir. Bu durum yapıştırıcı cisim temas alanını etkileyerek yapışma dayanımına doğrudan etki etmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Yüzeyin iyi (a) ve kötü (b) ıslanma durumu [44]

Çoğu metal yüzey iyi ıslanabilirlik gösterirken, polimer malzemeler hidrofobik oluşları nedeniyle kötü performans göstermektedir. Yüzey işlemleri ile bu cisimlerin yüzey enerjileri artırılarak ıslanma özellikleri iyileştirilebilir.

3.3.5. Adsorpsiyon teorisi

Adsorpsiyon, bir fazdaki sıvı ya da gaz iyon, atom ve/veya moleküllerinin, kendisiyle etkileşimde olan katı fazın yüzeyinde yoğunlaşması ve derişiminin artması işlemi olarak tanımlanabilir. Bu durum maddenin sınır yüzeyindeki moleküller arasındaki kuvvetlerin farklılığından kaynaklanmaktadır. Daha basit tanımlanırsa adsorpsiyon, bir yüzeyde maddenin birikimi veya yoğunluğunun artırması olarak tanımlanabilir. Yapıştırıcının bir bağ oluşturabilmesi için yapışacak cismin temas etmesi gereklidir. Bu en yaygın olarak sıvı bir yapıştırıcının katı yüzeye temas etmesiyle gerçekleşir. Katı bir yüzey üzerindeki sıvı damlasının ıslanma ve yayılma derecesini etkileyen faktörler, bu nedenle, adezyon teorilerinin herhangi bir değerlendirmesinde birincil öneme sahiptir. Bu teorelin temel fikri, iki malzeme arasında bir moleküler noktada temas olduğunda adezyonun olacağıdır. Dolayısıyla iki malzeme temas ettiğinde, aralarında çekim kuvvetleri oluşacaktır. Bu kuvvetlerin ne olacağı, ilgili malzemelerin yüzeylerinin kimyasal yapısına bağlı olacaktır. Bu bilindiği durumda belirli bir bağ türünün oluşumunu varsaymak, hatta deneysel olarak kanıtlamak mümkün olabilir.

3.3.6. Kimyasal bağlanma teorisi

Bu teori, bir yapışma bağı oluşumunu yüzey kimyasal kuvvetlerine bağlar. Yapıştırıcı ve yapışan cisimler arasında oluşan hidrojen, kovalent ve iyonik bağlar, diğer elektriksel çekim kuvvetlerden daha güçlüdür. Genel olarak, kimyasal bağlanma sırasında meydana gelen dört tür etkileşim vardır. Bunlar: kovalent bağlar, hidrojen bağları, Lifshitz-Van der Waals kuvvetleri ve asit-baz etkileşimleridir.

Van der Waals kuvvetleri, kovalent bağlar, hidrojen bağları ve iyonların birbiriyle, nötr moleküllerle veya elektrik yüklü moleküllerle elektrostatik etkileşimi hariç olmak üzere, moleküller arasındaki çekici veya itici güçlerin toplamıdır. Van der Waals kuvvetleri ikincil kuvvetlerden olup London dağılımı bunlardan biridir. Kovalent ve iyonik bağlar, bu kuvvetler tarafından sağlanandan çok daha yüksek yapışma değerleri sağlayan kimyasal bağ örnekleridir. Çizelge 3.2’de çeşitli kimyasal bağ enerjileri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kimyasal bağ enerjileri [44]

Bağ Türü	Örnek Etkileşim	E (kJ/kmol)
Kovalent	C - C	350
İyon-iyon	Na ⁺ - Cl ⁻	450
İyon-dipol	Na ⁺ - CF ₃ H	33
Dipol-dipol	CF ₃ H - CF ₃ H	2
London dağılım	CF ₄ - CF ₄	2
Hidrojen bağı	H ₂ O - H ₂ O	24

Kimyasal bağlardan söz ederken kullanılacak bazı moleküller arası etkileşimlerden bahsetmek gerekir. Dipol, yük dağılımı, birbiriyle çakışmayan bir pozitif ve negatif yük merkezi ile temsil edilebilen moleküldür. Dipol-dipol kuvvetleriyse polar moleküllerin kendilerini, bir molekülün pozitif ucu diğerinin negatif ucuna yakın olacak şekilde hizalama eğiliminden kaynaklanan moleküller arası kuvvetlerdir. Hidrojen bağları özel bir tür dipol-dipol etkileşimi olup küçük ve yüksek elektronegatifliğe sahip atomlara (F, O, N, S gibi) bağlı olan hidrojen atomunun, diğer molekülün yalnız elektron çiftlerine bağlanması ile oluşur. London dağılım kuvveti elektronların çekirdekler etrafındaki hareketleri sırasında değişen pozisyonları nedeniyle oluşan küçük, anlık dipollerden kaynaklanan moleküller arası kuvvetlerdir. London dağılım kuvveti çekimin kolayca kırılması ve çok küçük yüklerin oluşması nedeniyle çok zayıftır. Polarize edilebilirlik, bir atom veya molekülün elektron bulutunun bozulma kolaylığı olarak tanımlanır. Genel olarak, polarize edilebilirlik bir atomun boyutu ve bir atom üzerindeki elektron sayısı ile artar. Bu nedenle London dağılım kuvvetlerinin önemi atom boyutu ve elektron sayısı ile artar. Kovalent bağların ara yüz tabakası boyunca çapraz bağ yapmış yapıştırıcılar ve termoset kaplamalarında oluşması muhtemeldir. Bu tür bir bağ genellikle en güçlü ve en dayanıklı olanıdır. Ancak, karşılıklı olarak reaktif kimyasal grupların var olmasını gerektirirler. Önceden kaplanmış yüzeyler, ahşap, kompozitler ve bazı plastik yüzeyleri, uygun koşullar altında yapıştırıcı ile kimyasal bağlar oluşturabilen çeşitli işlevsel gruplar içerir.

3.3.7. Asit-baz teorisi

Özel bir etkileşim türü olan asit-baz etkileşimi, oldukça yeni bir keşiftir. Bu teori adını Lewis asit-baz tanımlamasından alır. Lewis tanımlamasına göre bir asit, bir bazdan elektron çifti kabul edebilen; bir baz, elektron çifti verebilen bir maddedir. Bu tanıma göre

kimyasal tepkimeye giren her katyon bir asit, her anyon ise bir bazdır. Asit-baz teorisine göre adezyon, Lewis asitlerinin ve bazlarının (yani elektron bakımından fakir ve zengin elementlerin) ara yüzdeki kutupsal çekiminden kaynaklanmaktadır.

3.3.8. Zayıf sınır tabaka teorisi

Bu teori ara yüzdeki bağ kopmasının, kohezif bir kırılma veya zayıf bir sınır tabakasından kaynaklandığını belirtmektedir. Zayıf sınır tabakaları yapıştırıcıdan, yapışan kısımdan, çevreden veya bu üç faktörün herhangi bir kombinasyonundan kaynaklanabilir. Zayıf sınır tabakaları, yapışma yüzeyine yakın bölgede yapıştırıcı veya cisim üzerindeki herhangi bir kirlilikten kaynaklanabilir. Yapışma bağında bir kopma meydana geldiğinde, bu zayıf sınır tabakasından kaynaklanmaktadır. Polietilen ve metal oksitler, doğası gereği zayıf sınır tabakaları içerebilen iki malzeme örneğidir. Polietilen, polimer boyunca eşit olarak dağılmış zayıf, düşük molekül ağırlıklı bir bileşene sahiptir. Bu zayıf sınır tabaksı ara yüzde mevcuttur ve düşük dayanıma katkıda bulunmaktadır. Bazı metal oksitler, baz metallerine zayıf bir şekilde bağlanır. Bu malzemelerle yapılan yapışkan bağlantıların bozulması oksitin kendi içinde kohezif olarak meydana gelir. Polietilen ve metal oksitlerdeki gibi zayıf sınır tabakaları, çeşitli yüzey işlemleriyle kaldırılabilir veya güçlendirilebilir. Yapışma ortamından, genellikle havadan oluşan zayıf sınır tabakaları çok yaygındır. Yapıştırıcı alt tabakayı ıslatmadığında, ara yüzde hava boşluğu sıkışarak bağlantı mukavemetinde azalmaya neden olur.

3.4. İyi Bir Yapışmanın Gereklilikleri

Sağlıklı bir yapışma bağlantısı elde edebilmek için uygun yapıştırıcı seçimi, iyi bir bağlantı tasarımı, temizlik, iyi ıslanma ve iyi bir yapışma prosesi gereklidir. Malzemeleri yapıştırmak için çok sayıda yapıştırıcı mevcuttur ancak uygun yapıştırıcıyı kullanmak gerekir. Yapıştırıcı türünün ve formunun seçimi, yapıştırmanın niteliğine, yapıştırılacak malzemelerin türüne, kullanımın performans gereksinimlerine ve yapıştırıcı bağlantısı oluşturma proseslerine bağlıdır. Kaynak ve lehim bağlantılarında olduğu gibi yapıştırma bağlantılarında da yük aktarımına ve çalışma koşuluna göre tasarım yapmak gerekir. Aksi halde yapıştırma bağının kapasitesi tam anlamıyla kullanılmamış olur.

Yapıştırıcı seçimi ve bağlantı tasarımı düzgün ise bir sonraki konu yüzey temizliğidir. İyi bir yapışkan bağlantısı elde etmek için, temiz bir yapışan yüzeyle başlamak önemlidir. Yüzey kir, yağ, nem ve zayıf oksit tabakaları gibi yabancı maddelerden arındırılmalıdır, aksi takdirde yapıştırıcı cisim yerine bu zayıf sınır tabakalarına yapışacaktır. Zayıf sınır katmanlarını kaldırabilecek veya güçlendirebilecek çeşitli yüzey işlemleri vardır. Bunlar genellikle fiziksel veya kimyasal işlemleri veya her ikisinin bir kombinasyonunu içerir. Bu işlemler aynı zamanda yüzeyin ıslanabilirliğini artırmaktadır.

3.5. Yüzey Gerilmesi ve Enerjisi

Bir sıvının molekülleri, çekim kuvvetleri tarafından bir arada tutulur. Sıvı içinde bulunan herhangi bir molekül üzerindeki tüm çekici kuvvetlerin toplamının ortalaması sıfırdır. Ancak yüzey üzerindeki bir molekülü ele alırsak bu kuvvet (kohezyon kuvveti) yönü sıvı içerisine doğru ve büyüklüğü sıfır olmayan bir değerdir. Bu, yüzey alanını artırmak için karşı konulması gereken kuvvettir ve bu işlem tarafından tüketilen enerjiye yüzey enerjisi denir. Sıvı yüzeyindeki dengelenmemiş kuvvetler, yüzeyin mümkün olan minimum alanına daralmasına neden olur. Örneğin su damlacıkları serbest ortamda küresel şekildedir. Çünkü bir küre, geometrik şekiller arasında belirli bir hacim için minimum yüzey alanına sahiptir. Bir sıvının yüzey gerilimi ve yüzey serbest enerjisi eşitken, katı bir yüzey için aynı şey geçerli değildir. Yüzey gerilimi, bir yüzeyin alanını izotermal ve tersinir şekilde birim miktarda arttırmak için gereken iş olarak tanımlanır. Yüzey gerilimi (γ), birim alan başına yüzey enerjisi veya birim uzunluk başına kuvvet olarak ifade edilir. Sıvıların yüzey gerilimi doğrudan ölçülebilir ve birim yüzey alanı başına basitleştirilmiş enerji biçimi olan birim alan başına kuvvet birimleri (dyn/cm) cinsinden ifade edilebilir ($\text{erg/cm}^2 = \text{dyn cm/cm}^2 = \text{dyn/cm}$). dA yüzey alanındaki değişim, dG yüzey serbest enerjisindeki değişim ve G_s yüzey serbest enerjisi olmak üzere sabit basınç ve sıcaklık altında yüzey enerjisi aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir [44].

$$dG = \gamma dA \quad (3.2)$$

$$dG = G_s dA \quad (3.3)$$

$$G_s = \left[\frac{dG}{dA} \right]_{T,P} = \gamma \quad (3.4)$$

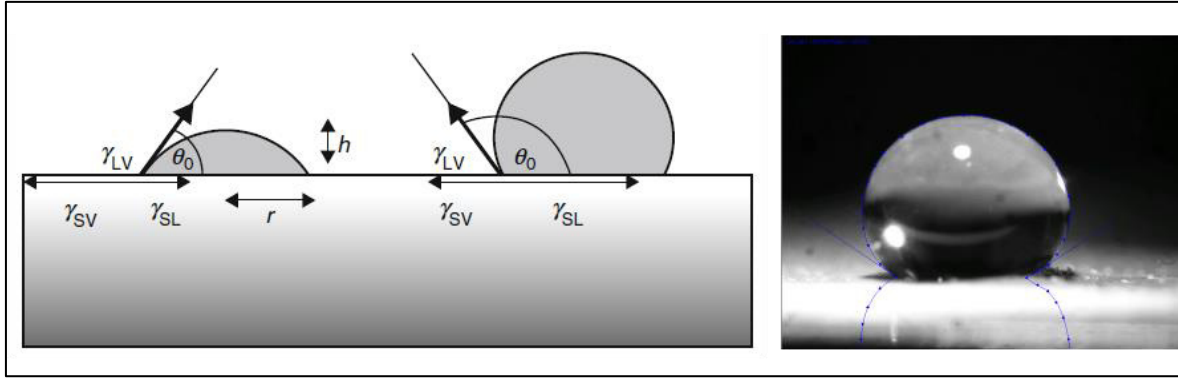
3.5.1. Katılar için yüzey gerilimi

Bir katının yüzey enerjisi (gerilimi), sıvınıninkine benzer şekilde ölçülemez. Katı malzeme yüzeyleri, yüksek ve düşük yüzey enerjisine sahip olanlar olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Yüksek yüzey enerjili malzemeler arasında metaller ve oksitler, silikatlar, silika, elmas ve nitrürler gibi inorganik bileşikler bulunur. Yüksek enerjili malzemelerin yüzey gerilimi 200-500 dyn/cm aralığındadır. Düşük enerjili malzemeler temel olarak kritik yüzey gerilimi <100 dyn olan organik bileşiklerden (polimerler dahil) oluşur. Polimer yüzeyler ayrıca düşük, orta ve yüksek yüzey enerjisi olarak sınıflandırılmıştır. Düşük yüzey enerjililer, 10-30 dyn/cm, orta enerjililer 30-40 dyn/cm ve yüksek enerjililer >40 dyn/cm yüzey enerjisine sahiptir. Yağ gibi düşük yüzey enerjili malzemeler, sistemin serbest yüzey enerjisindeki azalma nedeniyle yüksek enerjili yüzeyler tarafından kendiliğinden emilir. Bu, normal ortam koşuluna maruz kalan temiz, yüksek enerjili bir yüzeyin, üzerindeki su ve organik kirletici maddelerin emilmesi nedeniyle uzun süre temiz kalmayacağı anlamına gelir. Bu nedenle, temizlenmiş yüzeyin açık ortama uzun süre maruz kalmasını önlemek için yapıştırıcını uygulamasından hemen önce bir yüzey temizleme işlemi prosese dahil edilir.

Katı yüzeylerin yüzey gerilimini belirlemek için bazı yöntemler bulunmuştur. Katı yüzeyle sıvı arasında gözlenen temas açısı yüzey enerjileri hakkında bilgi vermektedir. Young denkleminde göre temas açısı (θ) Şekil 3.6'da gösterilmiş olup, katı sıvı ara yüzü ile sıvı gaz ara yüz teğetinin arasında kalan açıdır. Denkleminde gösterilen S, L, V sırasıyla katı sıvı ve gaz fazlarını belirtmektedir. Denklemindeki (γ^0) katı yüzeyin sıvının doymuş buharı ile dengede olması gerektiğini, yani katı yüzey üzerinde sıvı filminin emildiğini belirtir.

$$\gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_{SV}^0 - \gamma_{SL} \quad (3.5)$$

Temas açısı aynı zamanda ıslanabilirlik hakkında da bilgi vermektedir. Katı yüzey üzerine bırakılan sıvının açı ölçer ile ölçümü sonucunda 90°'den küçük açılar iyi, büyük açılar kötü ıslanabilirlik olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3.6. Temas açısı (SL: solid-liquid, SV: solid-vapor, LV: liquid-vapor) [47]

3.6. Yüzey İşlemleri (Surface Treatments)

Sağlıklı bir yapışma bağlantısı için yapıştırıcı uygulanmadan önce yüzeylere yapışmayı iyileştirici birtakım işlemler uygulanması tavsiye edilir. Bu işlemler özellikle yapısal yapışma bağlantılarında oldukça önemlidir. Yüzey işlemi veya hazırlığı, yapışmayı engelleyen malzemelerin yüzeyden uzaklaştırılması ve yüzeyin fiziksel ve/veya kimyasal modifikasyonunu içeren işlemler olarak tanımlanmaktadır [48]. Uygulanacak yüzey işlemi; yapışacak malzeme türüne, yapışma bağlantısının çalışma koşuluna, parça geometrisine, üretim kısıtlamalarına ve işlem maliyetine göre seçilmelidir. Yüzey işlemleri ile aşağıdakiler amaçlanmaktadır [49].

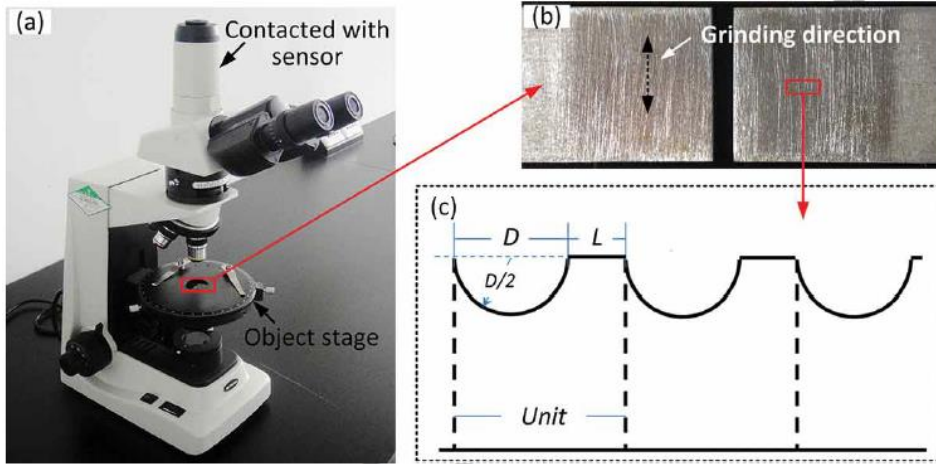
- Yapışan yüzey üzerindeki herhangi bir zayıf sınır tabakasını (makine yağları, zayıf oksitler veya hidroksitler, kirlilikler gibi) çıkarmak veya oluşumunu önlemek için yapılabilir. Basit bir yağdan arındırma ve temizlik işlemi yeterlidir ancak kırılğan inorganik tabakalar mevcutsa mekanik aşındırma veya oksit giderici işlemler gerekebilir.
- Yapışma ve kürlenme işlemleri sırasında yapıştırıcı veya astar ile yüzey arasındaki yakın moleküler etkileşim derecesini artırmak için yapılabilir. Bu genellikle yüksek yüzey serbest enerjisinin yaratılmasını ve belirli fonksiyonel grupların eklenmesini içerir.
- Yapıştırılan yüzeylerde belirli bir mikroyapı ve yüzey deseni elde edilmek için yapılabilir. Kaplama ve anodizasyon sonucu elde edilen yüzeyler bunlara örnektir. Her ne kadar mekanik kenetlenme adezyon üzerinde birincil öneme sahip olmasa da yapışma yüzey alanını ve kırılma enerjilerini artırmaktadır.

- Yapıştırıcı uygulanmadan önce yapıştırıcının yüzeyini pasifleştirmek için de yapılabilir. Çok yüksek yüzey enerjisine sahip yapışma yüzeyleri yalnızca yapıştırıcıya değil, aynı zamanda tüm kirlilik türlerine karşı da açık durumdadır.

3.6.1. Mekanik yüzey işlemleri

Mekanik işlemler genellikle kırılğan yapıdaki yüzey katmanlarını kaldırır ve metal yüzeylerde pürüzlü bir yüzey dokusu oluşturur. Önce ve sonra basit bir yağ giderme-temizleme işlemiyle birleştirilirler. Bu tür işlemlerde amaç yüzeyi aşındırıcı malzemeler kullanarak istenmeyen katmanları kaldırmaktır.

Mekanik işlemin en basit şekli, özel aşındırıcı kumaş veya kağıtlar kullanarak elle aşındırmak, ardından kalıntıları gidermek için çözücü veya benzeri malzemeler ile yüzeyi temizlemektir. Bu işlem etkili olmakla birlikte aynı zamanda kontaminasyona da neden olabilir. Ayrıca uygulama elle yapıldığı için yüzeyde farklılıklar görülebilir. Aşındırma yönüne bağlı olarak yüzeyde Şekil 3.7’teki gibi oluklu yapılar meydana gelmektedir.



Şekil 3.7. Kağıtla aşındırma veya taşlama sonrası yüzey yapısı [10]

Daha kontrollü bir yüzey işleme yöntemi, kum püskürtme ve ardından yağ giderme-temizle yapılmasıdır. Kum püskürtme, alümina (alüminyum oksit), demir veya silika tanecikleri içeren aşındırıcının basınçlı hava ile yüzeye püskürtülmesiyle yapılmaktadır. Bu işlem hava yerine bulamaç formunda su jeti ile de yapılabilir. Bu durumda genellikle alümina karışımı kullanılmaktadır. Kum püskürtme ile oluşturulan yüzey özellikleri makul seviyelerde ilk yapışma sağlamakla birlikte, işlem sonrası azalan oksit tabakası yüzeyin

korozyona açık hale gelmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak pürüzlü yüzeyler yapışkan etkileşimi için daha yüksek spesifik yüzey alanına sahiptir. Bu yüzeylerin oluşturulmasıyla ara fazda oluşan yüksek gerilmelerin yapışkanın kendisine doğru dağıtılma olasılığı artırılmaktadır [49].

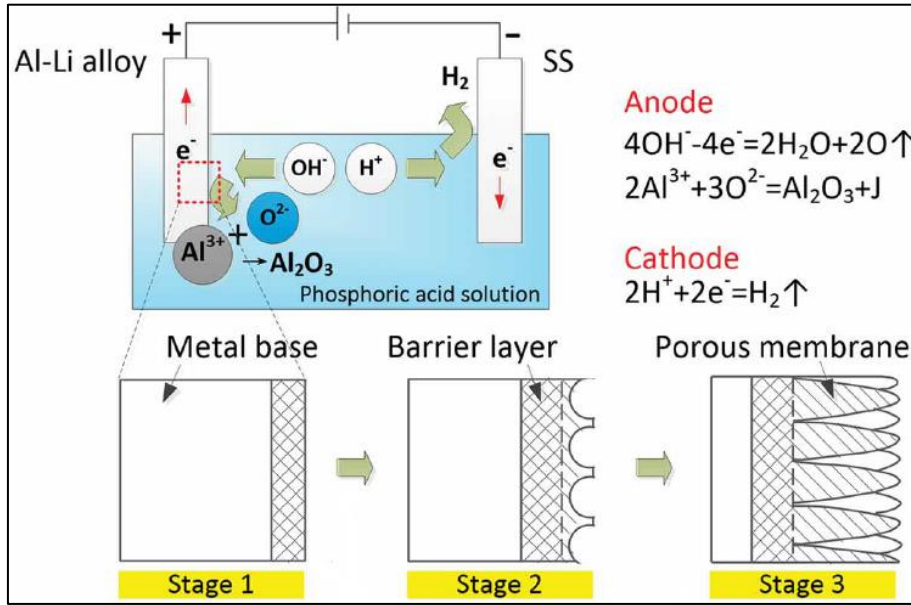
3.6.2. Kimyasal yüzey işlemleri

Kimyasal işlemler metal malzemeler için yüzeyin dağlanması (etching) işlemi veya yüzeyde kimyasal dönüşüm kaplamaları oluşturmak olarak düşünülebilir. Kimyasal dağlama çözeltilerinde güçlü asitler kullanılmaktadır. Bunlar tek veya birden fazla asidin karışımı olabilir. Bazı nadir durumlarda güçlü alkali çözeltiler kullanılabilir. Bu tür dağlayıcıların amacı, zayıf bir şekilde bağlanmış oksitler veya diğer korozyon ürünleri dahil kırılabilir organik veya inorganik katmanları çıkarmak ve gelişmiş bir yüzey topoğrafyası oluşturmaktır. Prensip olarak metal malzemelerde, durulama işlemlerinden sonra yüzeyler atomik olarak temiz ve yüksek yüzey enerjisine sahip olmalıdır. Çözelti tipi, bekleme süresi, sıcaklık ve alaşım tipi gibi işlem koşullarına bağlı olarak elde edilen yüzey topoğrafyası makro ve nano seviyede değişiklik gösterebilmektedir. Kimyasal dönüşüm kaplamalarıysa, karmaşık bir oluşum ve birikim mekanizmasıyla yüzeyde pasifleştirici bir tabaka oluşturmaktadır. Bu tür tabakalar korozyona karşı koruma sağlayarak sıcak ve nemli koşullara maruz kalan bağlantılarda dayanımı artırmaktadır. Bu tür dönüşüm kaplamalarının yüzeylere getirdiği pürüzlülük derecesi oldukça değişken olabilir [49]. Fosfat, kromat, molibdat ve titanyum-zirkonyum bazlı kaplamalar bunlardandır. Polimer malzemelerde de kimyasal işlem uygulanabilir. Burada dikkat edilmesi gereken konu, polimer zincirlerinin fazla işleme maruz kalması sonucu kopması ve yapışma dayanımının azalmasıdır. Bu tür işlemler uygulamaya göre optimize edilmelidir.

3.6.3. Elektrokimyasal yüzey işlemleri

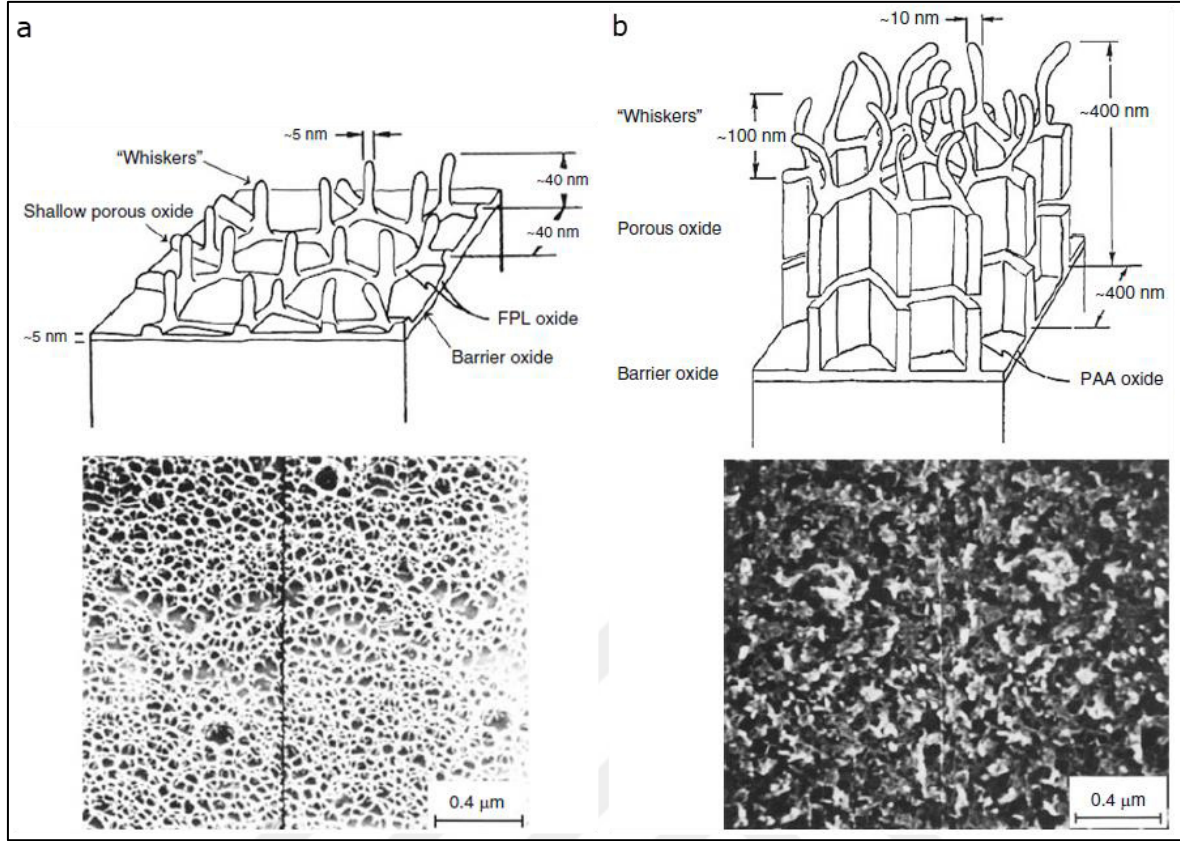
Anodizasyon işlemleri elektrokimyasal işlemler olup bazı metallere uygulanabilir. Genellikle alüminyum, titanyum ve bunların alaşımlarına uygulanmaktadır. Anodizasyon, metal parçaların yüzeyindeki doğal oksit tabakasının kalınlığını artırmak için kullanılan elektrolitik bir işlemdir. İşlem anotlama olarak adlandırılır çünkü işlenecek parça bir elektrolitik hücrenin anot elektrodunu oluşturur. Bu işlem korozyona ve aşınmaya karşı

direnci artırır. Bu sayede boya astarları ve yapıştırıcılar için çıplak metale göre daha iyi yapışma sağlanmış olur. Şekil 3.8’de örnek bir fosforik asit anodizasyon işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Al-Li alaışımının fosforik asit ile anodizasyonu [10]

Bu tür yüzey işlemleri karmaşık, zaman alıcı ve gerçekleştirilmesi maliyetlidir. Bununla birlikte yapısal metal bağlantıları için bu işlemler, ıslatılabilirlik, mikro ve nano pürüzlülük, mekanik stabilite gibi, ilk yapışma ve dayanıklılık için gerekli tüm özellikleri sağladıkları için şiddetle tavsiye edilmektedir. Alüminyum ve titanyum için en başarılı işlemlerin, kromik, fosforik veya sülfürik asit çözeltilerinde (CAA, PAA veya SAA) doğru akım (DC) ile yapılanlar olduğu belirtilmektedir [50]. Anodizasyon işlemi alternatif akımla da (AC) yapılabilir. Doğru akıma kıyasla daha ince bir oksit tabakası oluşur. Alternatif akımın avantajıysa voltaj döngüsünde negatif tarafta oksitlenmenin yön değiştirmesidir. Bu sayede DC anodizasyon işlemi öncesinde uygulanan yüzey temizliğinin önemi azalmaktadır. AC anodizasyonun dezavantajıysa, malzemenin anot ve katot tarafı olduğu durumda çözelti ile arasındaki direncin farklı olmasıdır. Katot durumunda direnç çok daha düşük olduğundan akım yoğunluğu artmakta ve yüzeyde yanma (pudralaşma) meydana gelmektedir. Bu etkiyi en aza indirmek için işlem süresi, sıcaklık ve uygulanan voltaj arasında bir uzlaşma sağlanmalıdır. Şekil 3.9’da kimyasal ve elektrokimyasal işlemler sonucu yüzey oluşumları gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Asit ile dağlama (a) ve anodizasyon sonrası (b) yüzey oluşumları [51]

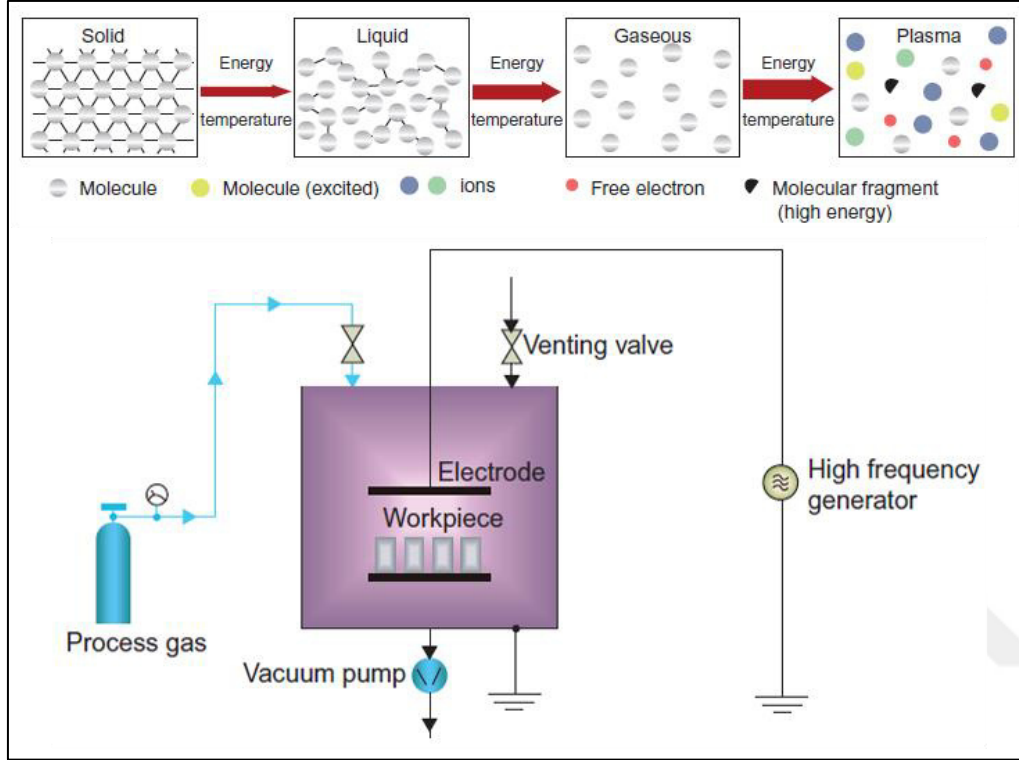
3.6.4. Plazma yüzey işlemleri

Plazma, bir gazın elektrik enerjisi ile uyarılmasıyla üretilir. Pozitif ve negatif yüklü iyonlar içeren partiküllerin bir koleksiyonudur. Maddenin dördüncü hali olarak da isimlendirilirler. Plazma elektriksel olarak iletken ve manyetik alandan etkilenir. Son derece reaktiftirler ve bu nedenle polimerler gibi yapışması zor malzemelerde yüzey özelliklerini değiştirmek için kullanılırlar (Şekil 3.10).

Plazma yüzey işlemi çok yönlü bir yüzey işleme tekniğidir. Argon, oksijen, nitrojen, flor, karbondioksit ve su gibi farklı gaz türleriyle farklı uygulamaların gerektirdiği benzersiz yüzey özellikleri üretebilir. Örneğin, oksijen gazı ile yapılan plazma işlemi polimerlerin yüzey enerjisini artırabilirken, flor gazı ile yapılan işlem yüzey enerjisini azaltabilir.

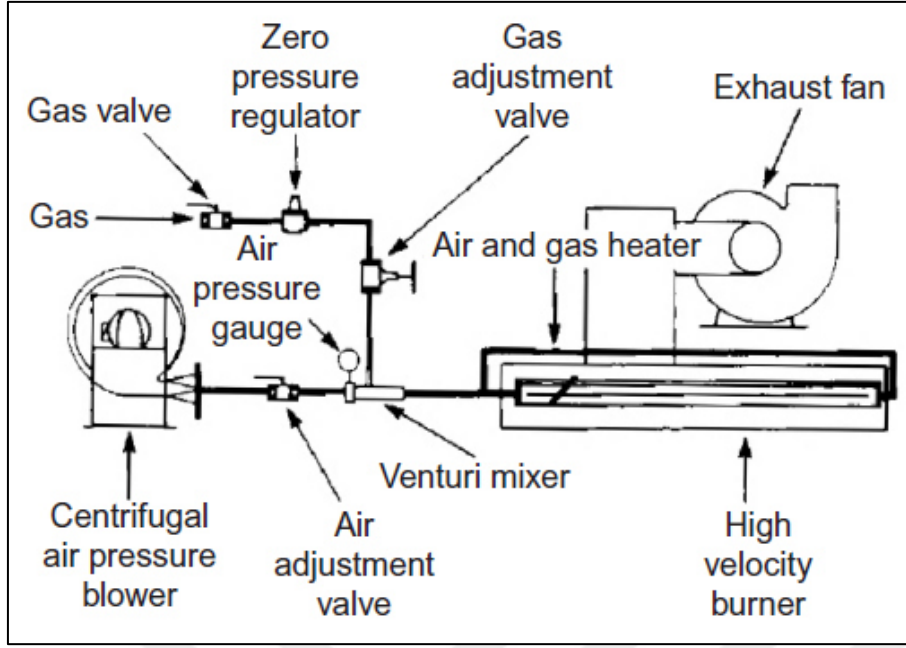
Poliolefinler ve elastomerler gibi yapışması zor olan polimerler, zayıf sınır tabakalarının çıkarılmasını ve ilgili fonksiyonel grupların eklenmesini gerektirebilir; bunlar genellikle oksijen içerir. Bu sonuca ulaşmak için en çok tercih edilen yöntemler arasında alev işlemi

(flame treatment), korona deşarjı işlemi (corona discharge treatment) ve plazma işlemi bulunur. Corona deşarjı, vakum gerektiren düşük sıcaklıktaki plazmanın aksine atmosferik basınçta gerçekleşir ve bir elektrik alanı tarafından hızlandırılan elektron ve iyon gibi yüklü parçacıkların akışıdır.



Şekil 3.10. Plazma oluşumu [48] ve düşük basınçlı plazma şeması [52]

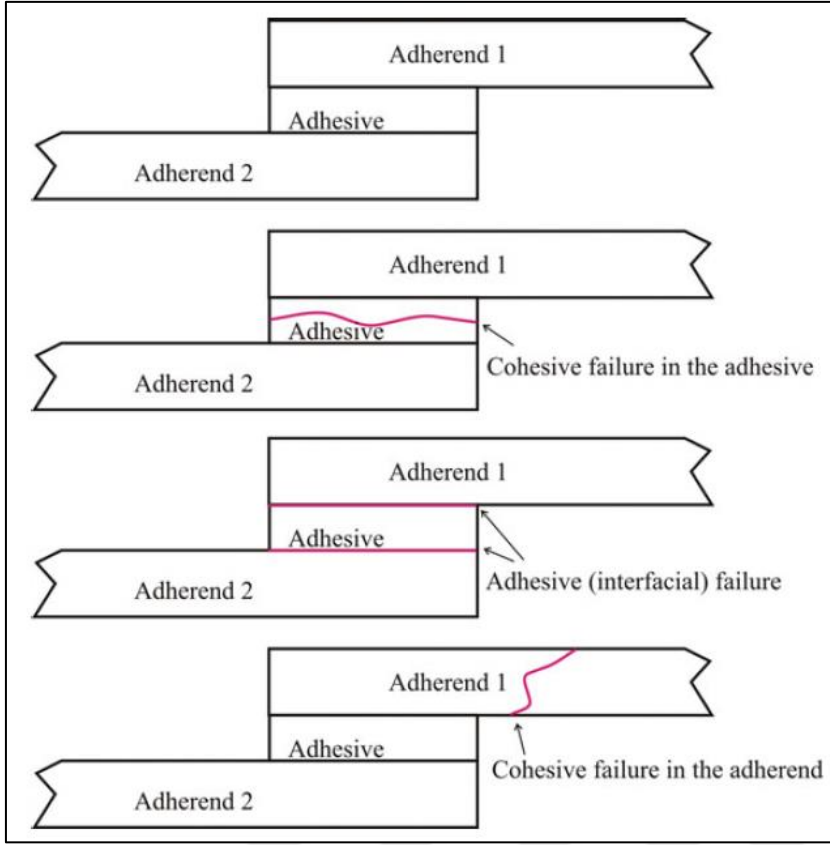
Alev işlemi, daha iyi yapışma için bir yüzeyi kimyasal olarak değiştirmek için kullanılan bir yüzey işleme sürecidir. Bu işlem tipik olarak, plastikler ve kompozitler gibi yapışması zor olabilen düşük enerjili yüzeylerde kullanılır. Alev işleminde sıcak, oksijence zengin bir plazma oluşturmak için dikkatlice kontrol edilen bir hidrokarbon gaz ve hava karışımı kullanılır. İlk olarak ısı kirletici maddeleri uzaklaştırır, ardından, oksijence zengin plazma yüzeyi kısmi oksidasyonla etkinleştirir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Alev işlemi şeması [48]

3.7. Yapıştırma Bağlantılarında Görülen Hasar Tipleri

Bir yapıştırma bağlantısının yapışma düzlemine dik doğrultuda (çekme yönünde) kopana kadar zorlandığını varsayalım. Bu durumda kopmanın gerçekleştiği bölge için birkaç olasılık söz konusudur. Kopma, yapıştırıcı katman ile yapışanlardan biri arasında meydana gelirse buna adezif kopma; öte yandan kopma her iki yüzeyin yapışkanla kaplı kaldığı durumda, yani yapışkan katmanı içerisinden meydana gelirse buna kohezif kopma denmektedir. Bazı durumlarda yapışma bağı o kadar güçlüdür ki, kopma yapışan malzemelerden birinde meydana gelir ve bu durum yapışan cismin kohezif kopması olarak adlandırılır. Şekil 3.12’de bu durumlar gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Yapıştırıcı bağlantısı kopma durumları [45]

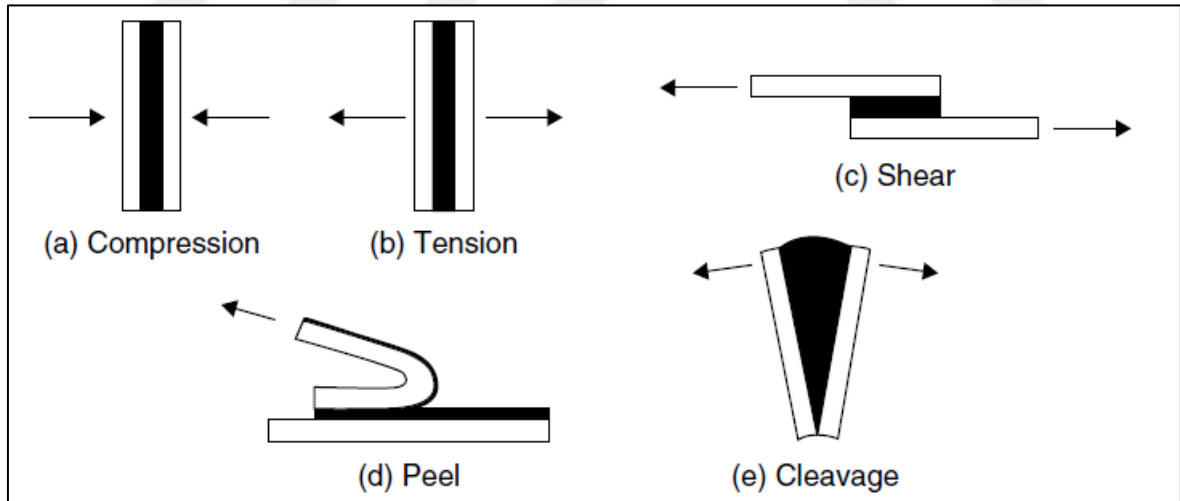
Yapıştırıcı veya malzemede görülen kohezif kopma istenen bir kopma durumudur. Çünkü her iki durumda da malzemelerin dayanımından maksimum şekilde yararlanılmış olunur. Yapıştırıcı bağlarının kopması genellikle birden fazla modu içerir ve kopma kohezif veya adezif bir oran olarak ifade edilir. Bu yüzde adezif veya kohezif kopma gözlenen alanın, temas yüzeyi alanına oranı temel alınarak hesaplanır.

Kopma modu iyi bir bağlantı için tek kriter olarak kullanılmamalıdır. Bazı yapıştırıcı-yüzey kombinasyonları adezif olarak kopabilir, ancak kohezif kopma gösteren daha zayıf bir yapıştırıcıyla bağlanmış benzer bir bağlantıya göre daha fazla mukavemet sergiler. Öte yandan kopma modunun bir analizi, kopmanın zayıf sınır tabakasından mı yoksa yanlış yüzey hazırlığından mı kaynaklandığını belirlemede yararlı bir araç olabilir. Yapıştırıcının beklenen yükten düşük değerlerde kopmasının kesin nedenini belirlemek çok zordur. Ancak yapıştırıcı, yüzeyi tamamen ıslatmazsa yapışma mukavemetinin maksimumdan daha az olacağı kesindir.

3.8. Yapıştırıcı Bağlantı Şekilleri ve Yük Türleri

Bir yapıştırıcı bağlantısının maruz kalacağı yükleme tipi yapıştırıcı bağlantısının dayanımı ve ömrünü doğrudan etkilemektedir. İşletme faktörleri, yapıştırma bağlantısını çeşitli şekillerde yıpratır. Bağlantının birden fazla çevresel faktöre (örneğin, ısı ve nem) maruz kalmasıyla, bunların birleşik etkisinin yapışma mukavemetini azaltması beklenebilir. Bu nedenle tasarlanan yapıştırma bağlantılarının mümkün olduğunca karşılaşması beklenen gerçek ortam ve yük koşullarında değerlendirilmesi gerekmektedir. Bunlara ek olarak, yapıştırıcının kürlenme sonrasında hacim kaybederek büzülmesi ve açığa çıkan gazların ara yüzde hapsolmesi bağlantı üzerinde kalıntı gerilmelerine ve kalınlık azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca çalışma sıcaklığına göre genleşme farkından kaynaklı termal gerilmeler dikkate alınmalıdır.

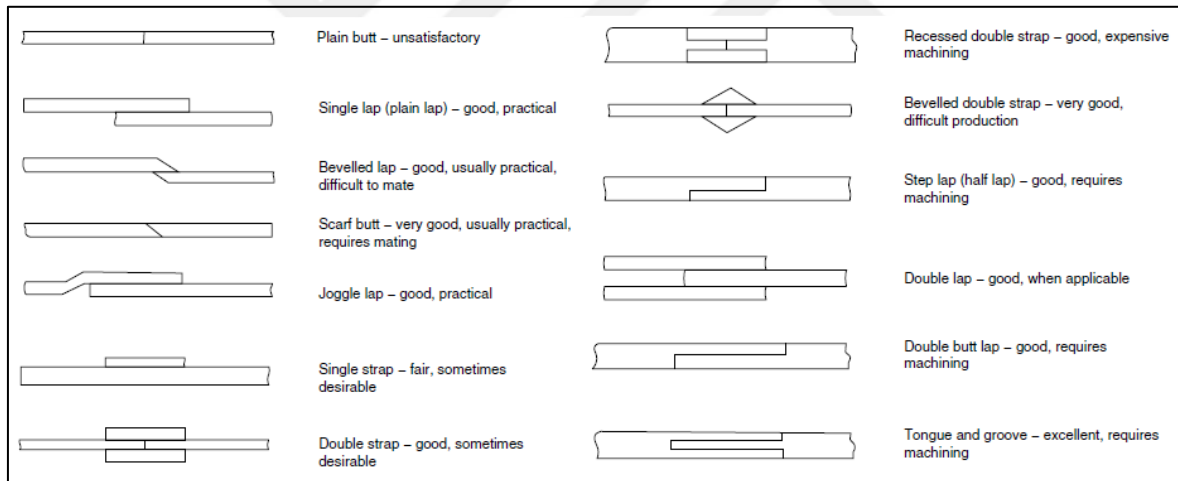
Yapıştırma bağlantısının tasarımında ilk olarak bağlantının yüklenme şekli belirlenmelidir. Bunlar çekme, basma, kesme, soyulma (peel) ve ayrılma (cleavage) yükleri olup Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Yapıştırma bağlantılarının yüklenme şekilleri [44]

Basma tipi yüklemeler diğer yüklemelere göre daha fazla dayanım göstermektedir. Ancak bu tip yüklemelerin uygulama alanı sınırlıdır. Kesme tipi yüklemeye yapışma alanı boyunca düzgün bir gerilme dağılımı elde edilir ve yapışma alanından en iyi şekilde faydalandığı ekonomik bir bağlantıdır. Tasarımda mümkünse yükün büyük kısmı bu şekilde iletilmelidir. Çekme tipi bağlantı kesme tipiyle benzerdir. Teorik olarak yük kesit

boyunca düzgün dağılmaktadır. Ancak gerçek durumda yükün yükleme ekseninden kaçık olma ihtimali bulunmaktadır. Bu durum bağlantı kesitinde eğilme momenti gibi istenmeyen yüklere sebep olmaktadır. Dolayısıyla çekme yönünde bir bağlantı kullanılacaksa eksen dışı yüklemeler fiziksel olarak sınırlandırılmalıdır. Soyulma yüklemesi (peel load) genellikle yapışan cisimlerin yeterince direngen olmadığı bağlantılarda (yumuşak malzemeler, ince metal plakalar vb.) görülmektedir [53]. Bu tip yüklemelerde parçanın bittiği uçta lokal olarak çok yüksek gerilmeler oluşmaktadır. Bu tip yüklemelerde yükün dayanıma göre düşük olması gerekmektedir ve istenen bir yükleme tipi değildir. Ayrılma yüklemesi (cleavage) soyulma yüklemesiyle benzer olup yapışan cisimlerin rijit olduğu durumda geçerlidir. Bağlantıya aksenal olarak kaçık çekme yükü veya moment yükü etkimesi sonucu görülmektedir. Gerilme dağılımı düzgün olmayan bir şekilde (uçta en fazla) dağılmaktadır. Bu tip yüklemelerde yapışma alanı mümkün olduğunca geniş tutulmalıdır. Şekil 3.14'te düz parçalar için bazı bağlantı tipleri gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Bazı plaka yapıştırma bağlantıları [44]

Epoksiler gibi termoset yapıştırıcılar nispeten rijittir ve hem dinamik hem de statik yükleme altında yüksek çekme ve kesme mukavemeti sergiler. Bu tip sert ve kırılğan yapıştırıcılar, soyulmaya veya ayrılmaya maruz kalan bağlantılar için tavsiye edilmez. Öte yandan, elastomerik yapıştırıcılar düşük çekme ve kesme mukavemetine sahiptir, ancak bu yapıştırıcılar iyi soyulma ve ayrılma mukavemeti göstermektedir [44].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada yapıştırma bağlantılarının dayanımını incelemek için bir dizi deneysel çalışma yürütülmüştür. Bu bağlantılar daha önce belirtildiği üzere çekme, basma, kesme, soyulma ve ayrılma yüklerine maruz kalmaktadırlar. Çalışma kapsamında bağlantı tasarımında en çok karşılaşılan çekme ve kesme yükleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmaları iki farklı yükleme koşuluna ayıracak olursak bunlar; dayanımın incelendiği düşük çekme hızlarındaki statik (yarı-statik) testler ile değişken yüklemenin uygulanarak numunelerin yorulmaya maruz bırakıldığı dinamik testlerdir.

Statik (yarı-statik) yükleme koşulunda yapıştırıcı kalınlığı ve mekanik yüzey işlemeye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün dayanıma olan etkileri incelenmiştir. Bu yükleme durumu için deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere çekme ve kesme tipi numuneler üretilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının etkisinin incelenmesi için çekme tipi numuneler ayırıcı parça yardımıyla 0,3; 0,5 ve 1 mm boşlukla birleştirilmiştir. Kesme numuneleri ise TAST ve SLJ tipi olup yalnızca birer kalınlık için üretilmiştir. Tüm numuneler havacılıkta sıkça kullanılan 2024-T3 alüminyum alaşımından imal edilmiştir.

Çalışmada yüzey işleminin dayanıma olan etkisinin incelenmesi için kolay ve sıkça uygulanan bir yöntem olan mekanik yüzey işlemi tercih edilmiştir. Farklı kalınlıkta aşındırıcı kağıtlar ve kum püskürtme yöntemleri kullanılarak farklı pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.

Yapıştırıcı bağlantılarının dinamik yükleme sonucundaki durumunu incelemek içinse bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Bu deney düzeneği temel olarak bir servo motor ile tahrik edilen slider-crank mekanizmasıdır. Düzeneğin hareketiyle birlikte sabit uca bağlanmış bir yay, doğrusal yatak üzerinde kayan bloğa bağlı çekme numunesine sinüzoidal olarak çekme kuvveti uygulamaktadır. Farklı sertlikte yaylarla farklı çevrim sayılarında yapılan testlerde yapıştırma bağlantısının yorulma davranışı ve artık ömrü incelenmiştir.

Çizelge 4.1’de çalışma kapsamında kullanılan numuneler ve incelenen parametreler özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Çalışma kapsamında kullanılan numuneler ve incelenen parametreler

Yükleme Koşulu	Yükleme Tipi	Numune Tipi	İncelenen Parametre
Statik	Çekme	Çekme	Yapıştırıcı kalınlığı
			Yüzey işlemi
Statik	Kesme	TAST	Yüzey işlemi
		SLJ	Numune tipi
Dinamik	Çekme	Çekme	Çevrim sayısı
			Yük miktarı

4.1. Kullanılan Yapıştırıcı Türü

Çalışmada yapısal tipte bir yapıştırıcı olan 3M Scotch-Weld firmasına ait DP490 yapıştırıcısı kullanılmıştır. Çift bileşenli epoksi türü bir yapıştırıcı olup yüksek mukavemet ve tokluk gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Yapıştırıcı özellikleri aşağıda verilmiş olup Resim 4.1’de gösterilmiştir [54].

- Yüksek tokluk ve mukavemete sahiptir,
- Soyulma ve kesme yüküne dirençlidir,
- Kimyasal olarak stabil ve iyi yaşlanma özelliği gösterir,
- 120°C sıcaklığa kadar dayanım gösterir,
- Tiksotropik (akışkanlığı hıza bağlı artan) yapıdadır,
- Toz boya ile kaplanmış ve plastik gibi zorlu yüzeylere yapışma gösterir,
- Otomotiv ve havacılık sektörü için uygundur.



Resim 4.1. DP490 yapıştırıcısının tabanca ile uygulanması

DP490 çabuk kuruyan bir tipte yapıştırıcı değildir. Çizelge 4.2’de kür şartları ve olgunlaşma süreleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. DP490 olgunlaşma ve kür şartları [54]

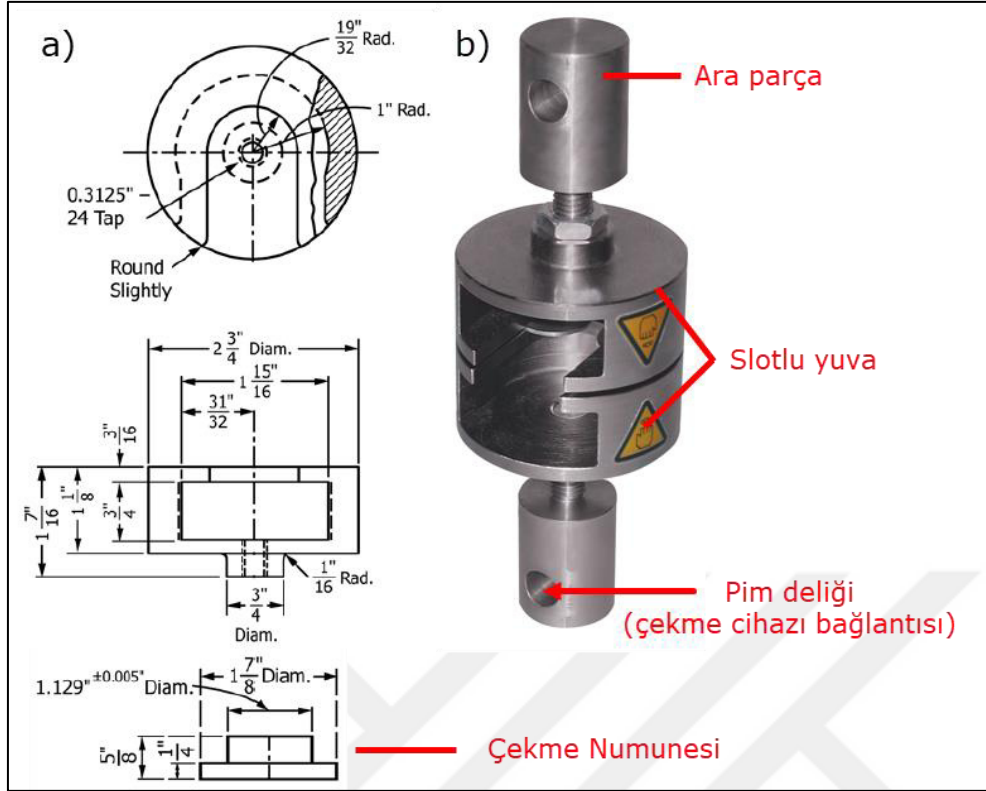
Çalışılabilir süre	23°C’de minimum 1,5 saat
Taşıma mukavemeti için gerekli süre	23°C’de 4-6 saat arası
Tam mukavemet için gerekli süre	7 gün (tam performans için)
Kür koşulu-1	23°C’de 7 gün
Kür koşulu-2	23°C’de 24 saat, 80°C’de 1 saat

4.2. Çalışmalarda Kullanılan Numune Tipleri

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan numune tipleri ve bunların hazırlanış süreçleri anlatılmıştır.

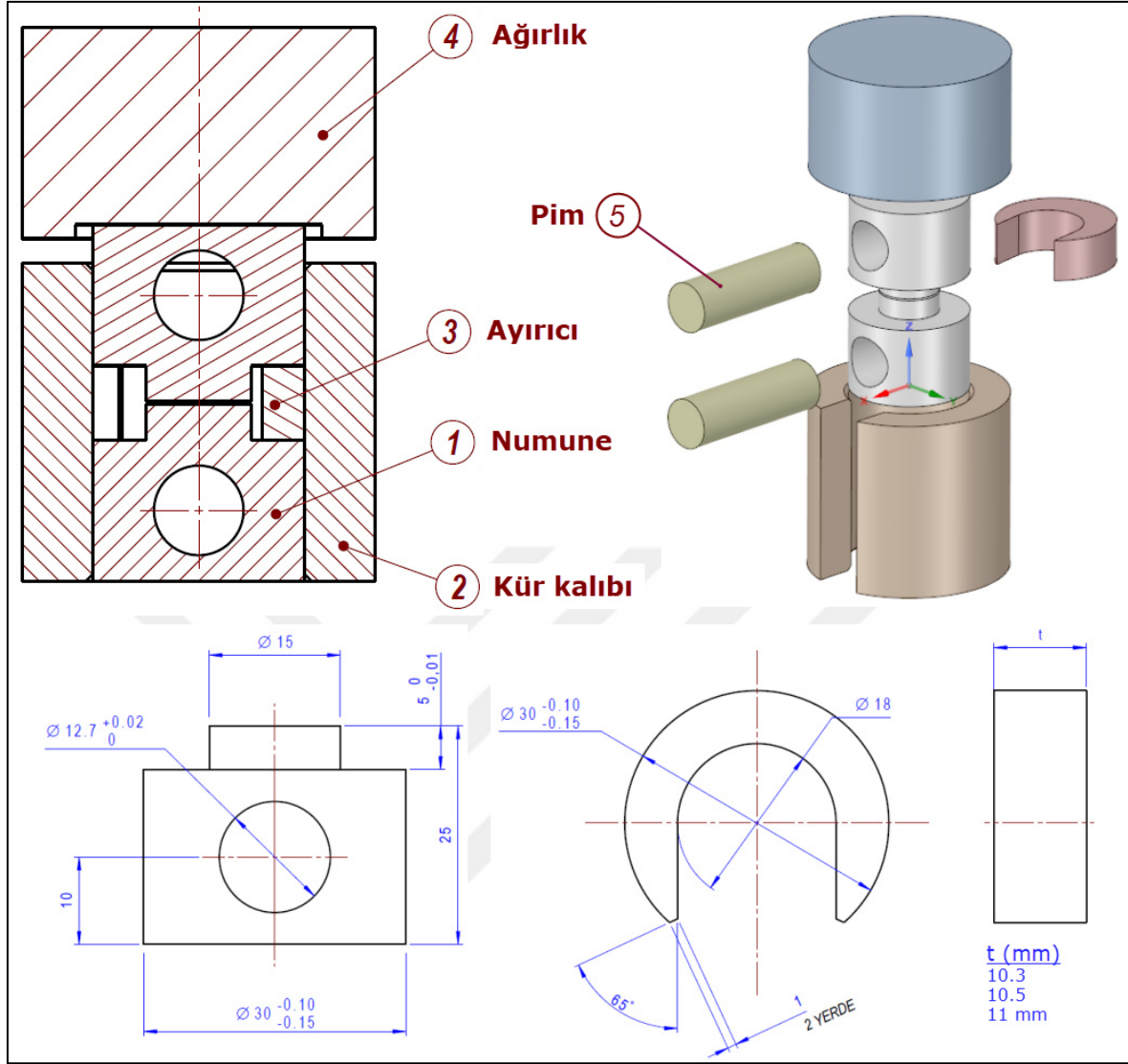
4.2.1. Statik testlerde kullanılan çekme numuneleri

Çekme tipi yükleme testlerinde kullanılmak üzere ASTM D897 standardı incelenmiştir. Standartta yapışan parçalar ve bunları tutan slotlu bir yuva bulunmaktadır. Ancak slotlu yuva ile çekme cihazı arasında bir ara parça olması gerektiği görülmüştür. Bu ara parça uçlarında bulunan pimli bağlantı sayesinde eksen dışı yüklemeyi ortadan kaldırmaktadır. Şekil 4.1’de standartta belirtilen numune ve ihtiyaç duyulan ara parça gösterilmiştir.



Şekil 4.1. ASTM D897 test numunesi ve slotlu yuva (a) [55], ara parça (b) [56]

Slotlu yuva ve ara parça ihtiyacını ortadan kaldırmak için ASTM D2095’te belirtildiği gibi numuneler pim delikli şekilde üretilmiştir [57-58]. Yapışma sonrası delikler arasında oluşacak eksen kaçıklığı çekme yükü dışında istenmeyen yüklere neden olacağından kurlenme kalıbına slot açılarak pim deliklerinin aynı hizada olması sağlanmıştır. Üretim toleranslarından kaynaklanan küçük boşluklar pim üzerine yapıştırılan kâğıt bant ile ortadan kaldırılmıştır. Sonuç olarak eş eksenli çekme numunesi elde edilmiştir. Farklı yapıştırıcı kalınlığında numuneler elde etmek için ayırıcı parçalar üretilmiştir. Bu parçalar kullanılarak 0,3, 0,5 ve 1 mm kalınlığa sahip numuneler elde edilmiştir. Şekil 4.2’de üretilen numune ve parça boyutları gösterilmiştir. Numune, ayırıcı parça ve kür kalıbı 2024-T3 alüminyum alaşımdan imal edilmiştir.



Şekil 4.2. Statik testlerde kullanılan çekme numunesi üretim ölçüleri

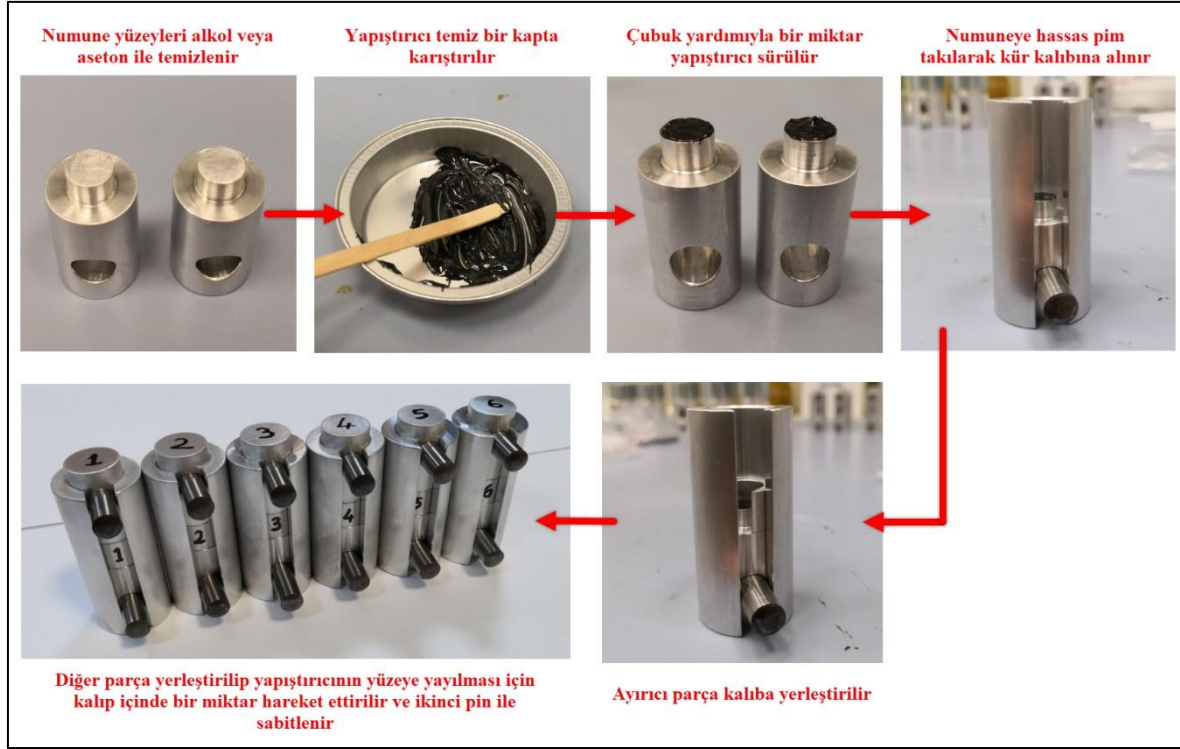
Numune hazırlık sürecinde aşağıdaki adımlar izlenmektedir:

1. Numune yüzeyleri alkol veya aseton ile temizlenir.
2. Uygulanacak yapıştırıcı bir kaba konularak karıştırılır.
3. Yapıştırıcı kalınlığına göre uygulanacak yapıştırıcı kütlesi hesaplanır.
4. Hassas terazi kullanılarak hesaplanan miktarda yapıştırıcı bir çubukla alınır.
5. Her iki yapışma yüzeyine eşit miktarda uygulanır.
6. Numuneler kür kalıbına ayırıcı parçayla birlikte yerleştirilir.
7. Altta bulunan numune pim yardımıyla sabitlenir ve dönmesi engellenir.
8. Yapıştırıcının iyice yedirilmesi ve boşluk kalmaması için üstteki numune kalıp içerisinde küçük açılarla hareket ettirilir.

9. Üstte bulunan numune pim yardımıyla sabitlenir.
10. Kalıp içerisinde hareketi engellemek için ağırlıklar yerleştirilir.
11. Numuneler oda sıcaklığında 1 gün bekledikten sonra önceden şartlanmış fırında 80°C’de 1 saat bekletilir.
12. İşlem sonrası kalıp çıkarılarak göz ile muayene edilir.

4.2.2. Dinamik testlerde kullanılan çekme numuneleri

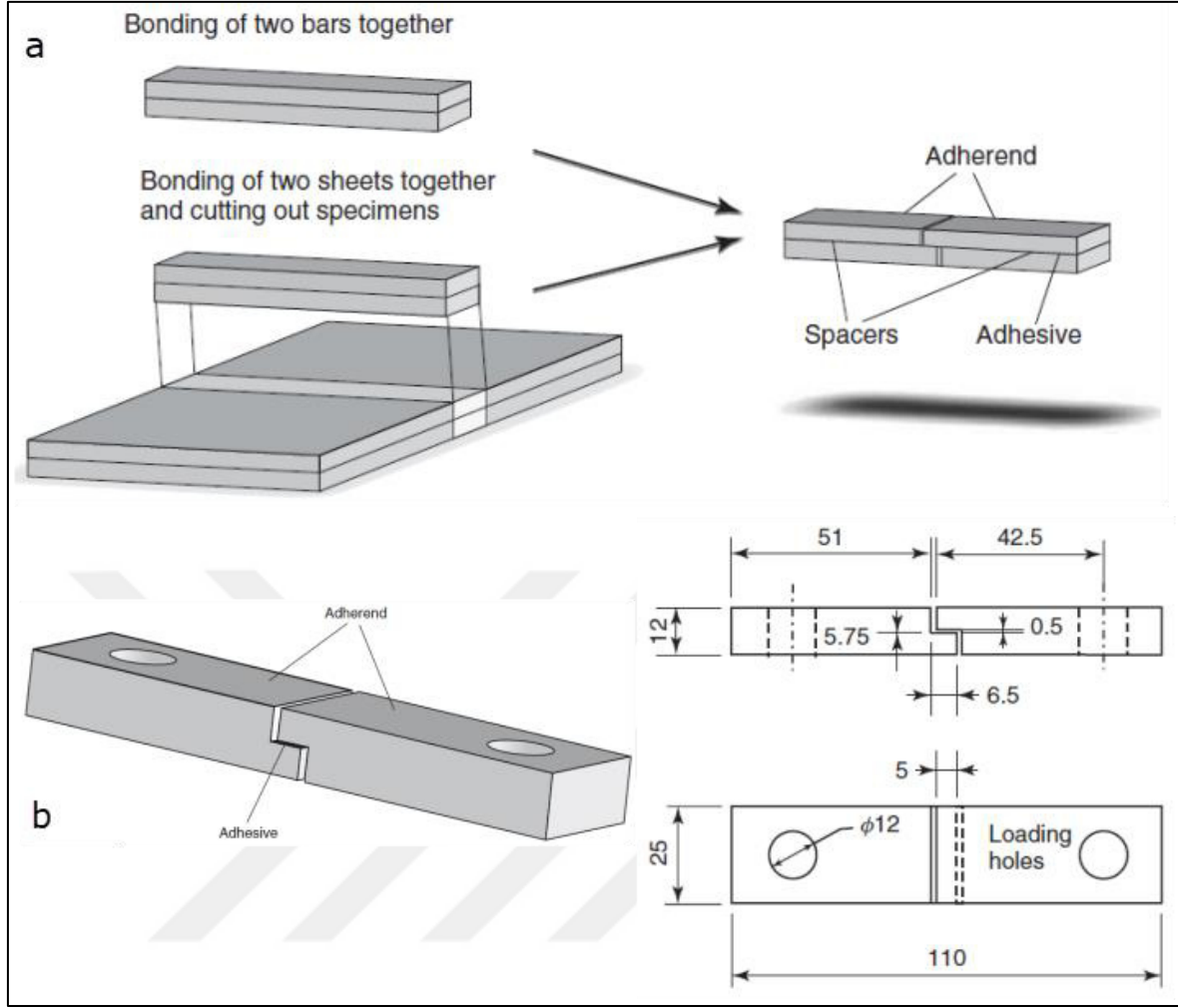
Dinamik test düzeneğinde kullanılmak üzere çekme tipi numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler şekil olarak statik testlerde kullanılanlar ile aynıdır. Ancak daha düşük kuvvetler ile çalışmak için numuneler boyutsal olarak ölçeklendirilmiştir. Yapılacak dinamik testlerde kalınlık ve pürüzlülük parametreleri incelenmeyeceği için yalnızca 0,3 mm yapıştırıcı kalınlığına sahip ve yüzeyleri P220 aşındırma kağıdı ile işlemiş numuneler kullanılmıştır. Şekil 4.3’te üretilen numune ve parça boyutları gösterilmiştir. Numune, ayırıcı parça ve kür kalıbı 2024-T3 alüminyum alaşımdan imal edilmiştir.



Şekil 4.4. Çekme numunesi üretim süreci

4.2.3. TAST tipi numuneler

TAST tipi numuneler kesme dayanımının incelendiği durumlarda oldukça yaygın bir numune türüdür. SLJ'den farklı olarak yapışan cisimler kalın olduğu için daha rijit bir bağlantı sağlar. Böylece çekme sırasında oluşacak soyulma yükleri azaltılmış olur. Bu tip numuneler için iki farklı standart bulunmaktadır. Bunlar ASTM D3983 (Amerika) ve ISO 11003-2 (Avrupa) standartlarıdır [59]. ASTM numuneleri önceden işlenmiş iki numunenin birleştirilmesiyle elde edilirken ISO numuneleri iki büyük plakanın yapıştırıldıktan sonra dilimlere ayrılması ve sonrasında işlenmesiyle oluşturulmaktadır. İşlem sırasında yapıştırıcı ile etkileşime girme ihtimaline karşı soğutma sıvısı kullanılmaz. Bu durum yapıştırıcının ısıya maruz kalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca işlem sırasında yapıştırıcı üzerinde çatlak oluşma durumu da söz konusudur. Adams [60], bu durum için yapıştırıcı kalınlığı önceden belirlenerek işlenmiş numuneler üreterek alternatif bir çözüm getirmiştir. Bu çalışmada Adams tarafından modifiye edilmiş TAST numuneleri kullanılmıştır. Şekil 4.5'te ISO 11003-2 numuneleri gösterilmiştir.



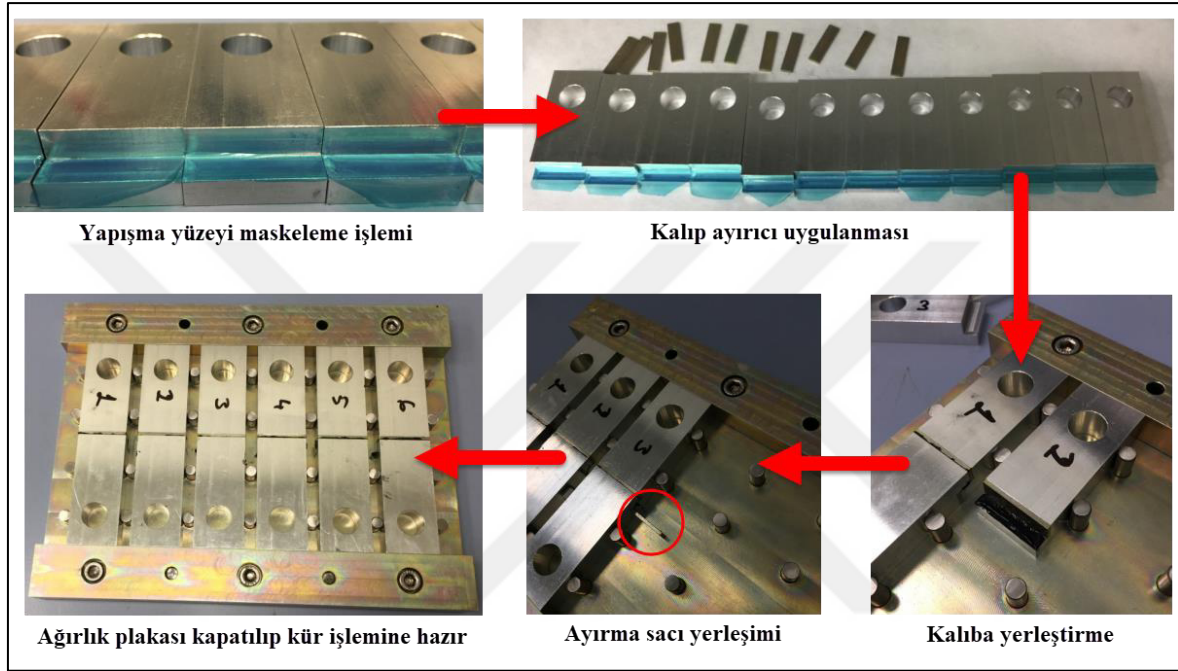
Şekil 4.5. Önerilen şekilde üretilmiş (a) ve alternatif TAST numuneleri [61]

TAST tipi numune hazırlık sürecinde aşağıdaki adımlar izlenmektedir:

1. Numune yüzeyleri alkol veya aseton ile temizlenir.
2. Yapıştırıcı uygulanacak yüzeyler bant yardımıyla maskelenir.
3. Ayırma sacının numuneye yapışmaması için saca ve numunenin açık yüzeylerine kalıp ayırıcı sprey püskürtülür, kuruyana kadar beklenir.
4. Uygulanacak yapıştırıcı bir kaba konularak karıştırılır.
5. Yapıştırıcı kalınlığına göre uygulanacak yapıştırıcı kütlesi hesaplanır.
6. Hassas terazi kullanılarak hesaplanan miktarda yapıştırıcı bir çubukla alınır.
7. Koruyucu bant çıkarılıp her iki yapışma yüzeyine eşit miktarda uygulanır.
8. Numuneler kür kalıbına ayırıcı parçayla birlikte yerleştirilir.
9. Ayırma sacı boşluklar arasına itilerek yerleştirilir.
10. Tüm numuneler yerleştikten sonra ağırlık plakası kapatılır.

11. Numuneler oda sıcaklığında 1 gün bekledikten sonra önceden şartlanmış fırında 80°C’de 1 saat bekletilir.
12. İşlem sonrası kalıp çıkarılarak göz ile muayene edilir.

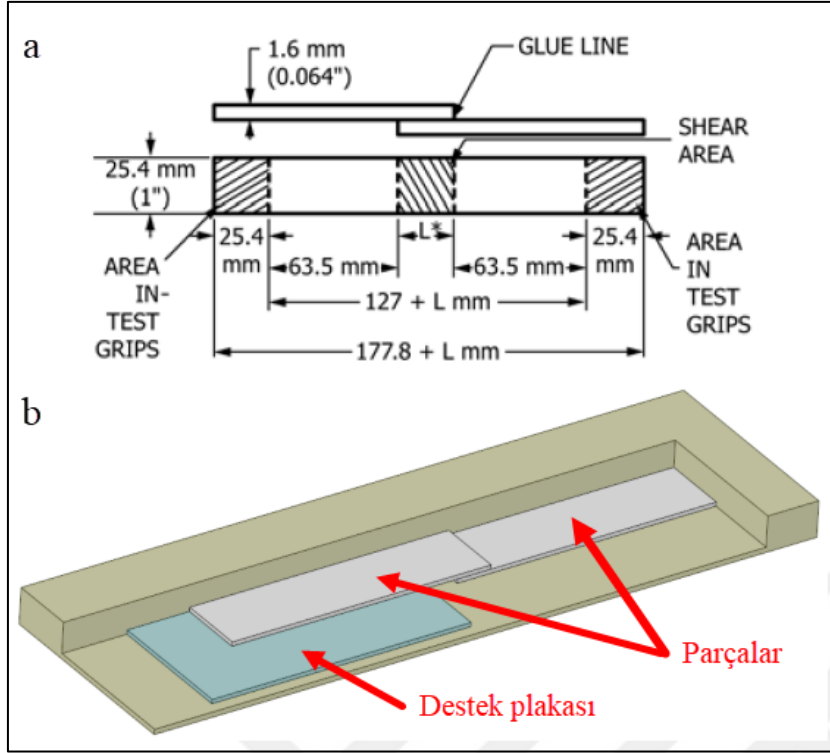
Numune hazırlık süreci Resim 4.2’de gösterilmiştir.



Resim 4.2. TAST numunesi hazırlık aşamaları

4.2.4. SLJ tipi numuneler

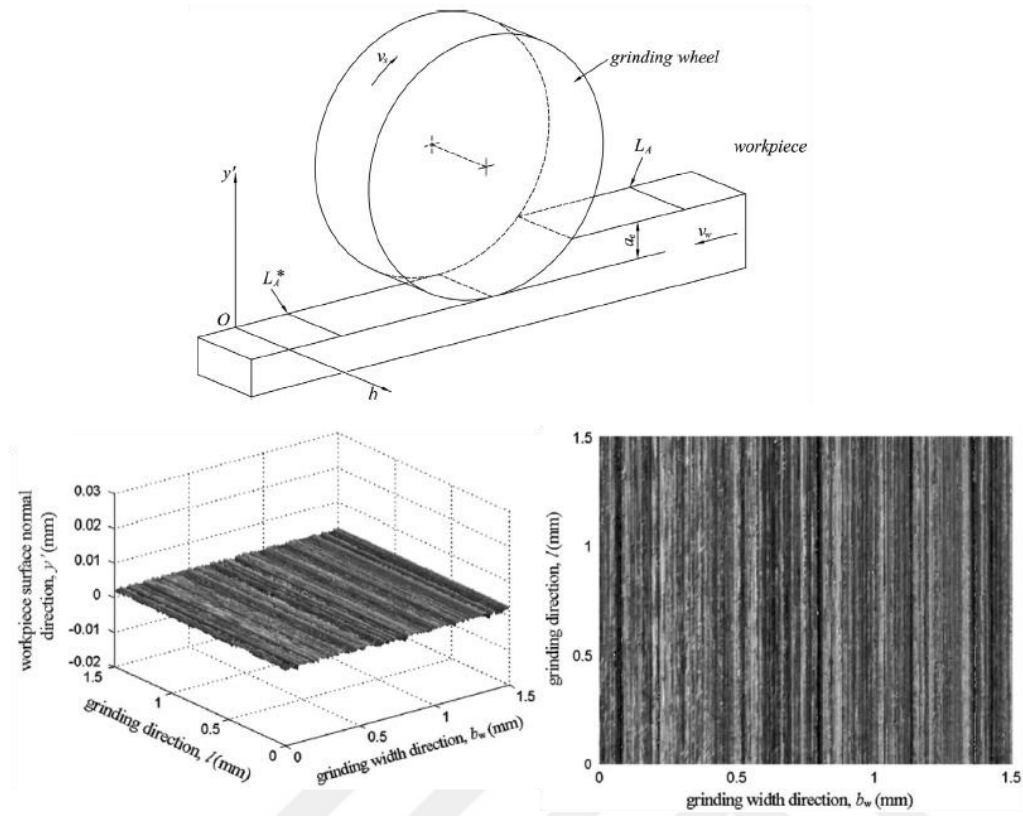
SLJ tipi numuneler ASTM D1002’de verilen ölçülerde üretilmiştir [62]. Numunelerin hazırlık süreci yukarıda verilen TAST tipiyle benzer olup birleştirilmesinde herhangi bir fikstür kullanılmamıştır. Birleştirilecek parçaların kısa ve uzun kenarları bir yüzeye dayandırıldıktan sonra zeminle arasında boşluk olan parçanın altına aynı kalınlıkta başka bir plaka konularak desteklenmiştir (Şekil 4.6). Yapışma bölgesi önceden kumpas ile numuneler üzerine işaretlenmiş, yapışma işlemi sonrası tüm numune boyutları tekrar ölçülmüştür. Bu işlem sonrası plakalar arası yapıştırıcı kalınlıkları ölçülmüş, 0,24 – 0,31 mm aralığında olduğu görülmüştür.



Şekil 4.6. SLJ numune boyutları (a) ve yapışma sırasında konumu (b) [62]

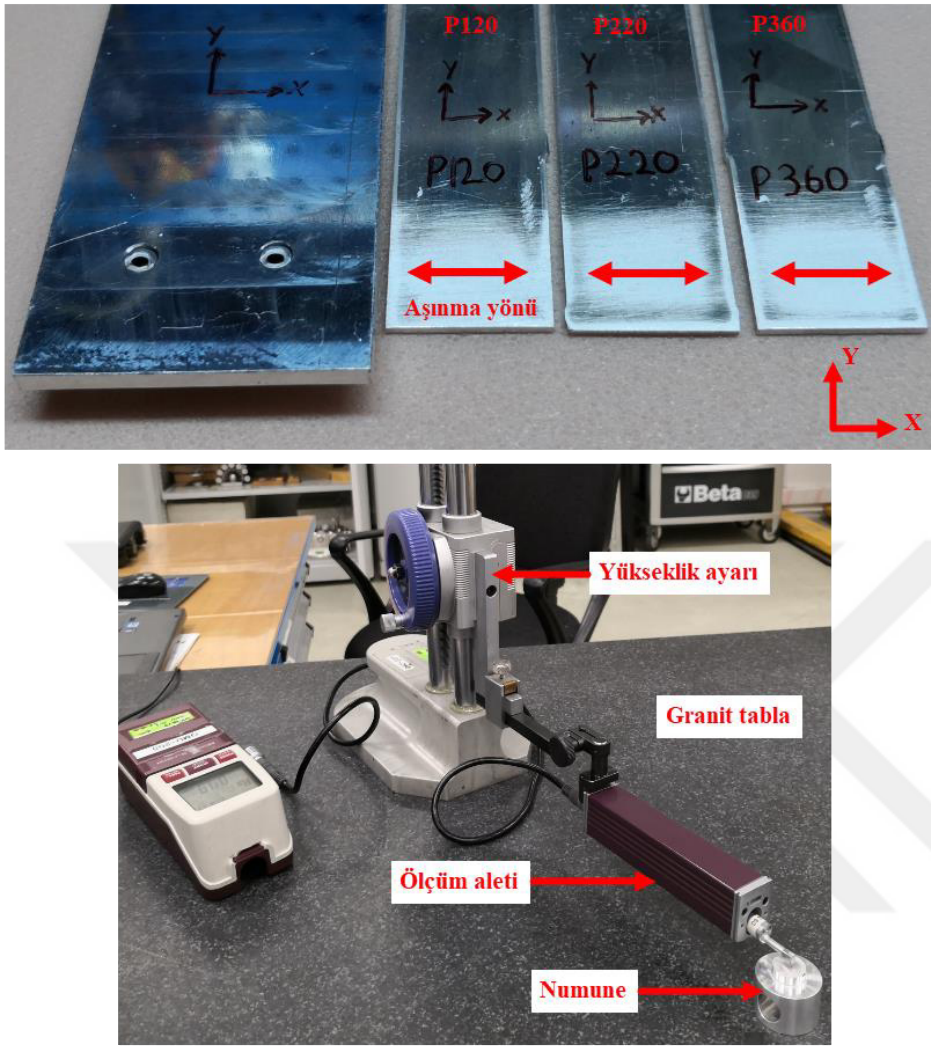
4.3. Yüzey İşlemleri

Çalışmada yüzey işleminin dayanıma olan etkisinin incelenmesi için kolay ve sıkça uygulanan bir yöntem olan mekanik yüzey işlemi tercih edilmiştir. Bunun için öncelikle çekme ve kesme numuneleriyle aynı malzemeden üretilmiş plakalara mekanik yüzey işlemleri uygulanarak farklı pürüzlülük değerlerine sahip yüzeyler elde edilmiştir. Bu işlemler kâğıt ile aşındırma ve kumlama işlemleridir. Aşındırıcı kâğıt olarak Atlas Zımpara firmasına ait P120, P220 ve P360 kum boyutundaki ürünler kullanılmıştır. Bu tür kağıtlarda tanecik numarası arttıkça birim alana düşen aşındırıcı tanecik miktarı artmaktadır. Dolayısıyla kâğıt üzerindeki tanecik boyutları küçülerek kâğıt incelmektedir. Aşındırıcı kağıtlarda tanecik numarasına karşılık gelen boyutlar ISO 6433'te belirtilmektedir [63]. Kumlama işlemindeyse makine içerisindeki kum boyutu tam olarak bilinmemekle birlikte ince sınıf silis kumu olduğu bilinmektedir. Kâğıt ile aşındırma işlemi sırasında taşlamada olduğu gibi aşındırma yönüne bağlı olarak yüzey şekli değişiklik göstermektedir [64] (Şekil 4.7). Bu nedenle yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçüm yönüne göre değişiklik göstermektedir. Kumlama işleminde ise yöne bağlı bir aşınma olmadığından pürüzlülük değerleri ölçüm yönüne bağlı olarak değişmemektedir.



Şekil 4.7. Taşlama yönündeki yüzey topoğrafyası [64]

Bu çalışmada da ilk olarak alüminyum plakalar P120, P220 ve P360 kağıtlarla tek yönde aşındırılmış, aşınma yönü ve buna dik yönde yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Daha sonra P220 kâğıdı ile yüzey rastgele yönlerde aşındırılmış ve aynı ölçümler tekrarlanmıştır. Ölçümlerde Mitutoyo SJ-201 yüzey pürüzlülüğü cihazı kullanılmıştır (Resim 4.3).



Resim 4.3. Aşındırılmış yüzeyler ve pürüzlülük ölçümü

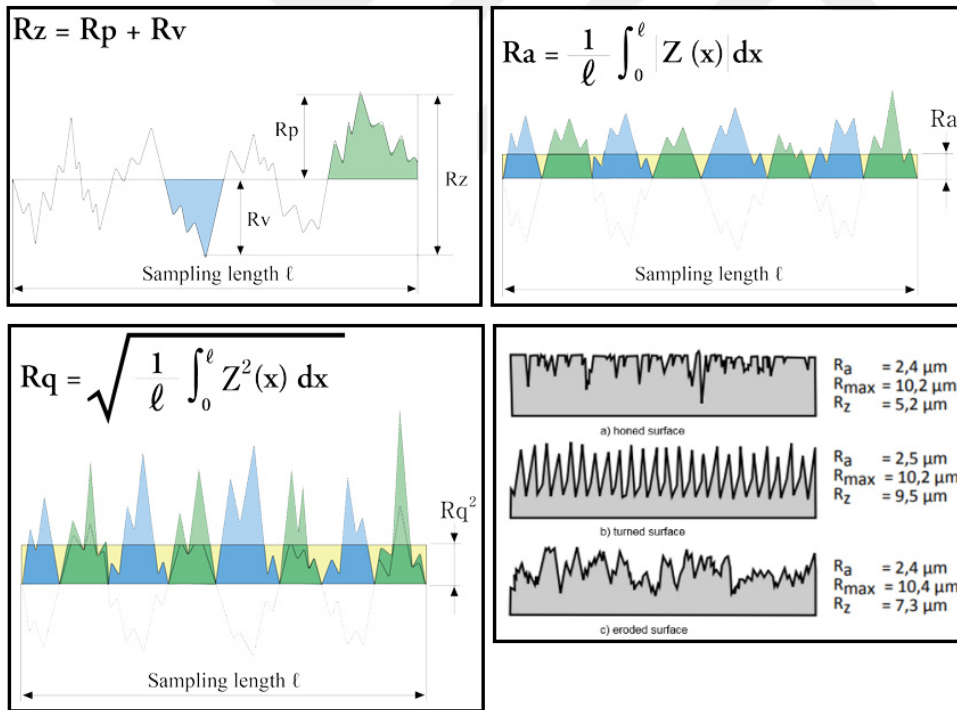
Yüzey işlemleri ve pürüzlülük ölçüm adımları şu şekildedir:

1. Aşındırılacak yüzeyler alkol veya aseton ile temizlenerek yabancı maddelerden temizlenir.
2. İstenen kum boyutuna sahip aşındırma kâğıdı ile yüzey parlaklığı gidene kadar ince bir tabaka talaş kaldırılır. Kâğıt daha önce kullanılmamış olmalıdır.
3. Yüzeyde bulunan ince talaş basınçlı hava yardımıyla uzaklaştırılır.
4. Numune yüzeyleri tekrar alkol veya aseton ile temizlenir.
5. Ölçüm cihazı pozisyonu ayarlanarak kalibrasyon parçası ile cihaz test edilir.
6. Ölçüm için numune düz bir zemine yerleştirilir, ölçüm sırasında kaymaması için sabitlenir.

7. Ölçüm aynı doğrultuda olacak şekilde birbirine paralel iki çizgi üzerinden alınır. Her ölçüm iki kez tekrarlanır. Böylece yüzeyin düzgün aşıldığından emin olunur.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü istatistiksel bir yaklaşım olup yalnızca örneklenen bölge için bilgi vermektedir. R_z , R_a ve R_q hesaplamaları en sık kullanılan yüzey pürüzlülüğü değerleridir. R_z , ölçüm çizgisi boyunca ölçülen yüksek tepe ve çukur noktaları arasında vermektedir. Bu nedenle yüzeydeki çiziklere karşı hassastır. R_a ise yüzey boyunca ölçülen tepe ve çukurların mutlak büyüklüklerinin ortalama değerini vermektedir. Bu nedenle daha sık kullanılmaktadır. R_q , bahsedilen tepe ve çukurların RMS (root mean square) değerini belirttiğinden yüzeyde bulunan çizik, kontaminasyon vb. faktörden daha az etkilenir.

R_z , R_a ve R_q değerleri farklı büyüklükleri temsil ettiklerinden bu değerlerin tek başına değerlendirilmeleri yüzey hakkında bilgi vermeyebilir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Pürüzlülük hesaplamaları ve farklı yüzey profillerine ait değerler [65]

4.4. Statik (Yarı-statik) Testler

4.4.1. Çekme testleri

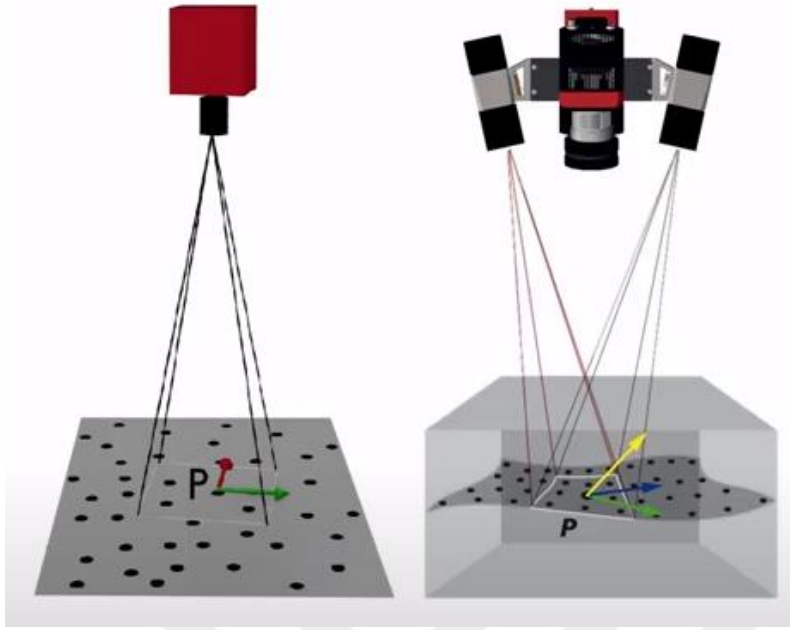
Yapıştırıcı bağlantı dayanımlarının statik yükler altında incelenmesi için çekme ve kesme numunelerine çekme testleri yapılmıştır. Tüm testler Instron 4481 universal çekme cihazı ile oda sıcaklığında 1,3 mm/dakika çene hızı altında yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün etkisini incelemek amacıyla çekme ve kesme tipi numunelerde işlenmemiş, P220 kâğıt ile rastgele aşındırılmış ve kumlama işlemi yapılmış yüzeyler teste tabi tutulmuştur. Yapıştırıcı kalınlığı etkisinin incelenmesiyle P220 kâğıt ile rastgele aşındırılmış çekme tipi numunelerle yapılmıştır. 0,3, 0,5 ve 1mm kalınlıklar test edilmiştir. Bunlara ek olarak DIC test yöntemi P220 kâğıt ile aşındırılmış TAST tipi kesme numuneleri üzerinde denenmiştir. Yükleme tipi ve kalınlık farkından kaynaklanabilecek farklılıklar için P220 kâğıt ile aşındırılmış SLJ tipi kesme numuneleri de test edilmiştir. Statik yük koşulu için yürütülen testler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Statik (Yarı-statik) testler

Numune Tipi	Yüzey İşlemi	Yapıştırıcı Kalınlığı
Çekme	İşlenmemiş	0,3 mm
Çekme	P220 ile rastgele aşındırılmış	0,3 mm
Çekme	Kumlanmış	0,3 mm
Çekme	P220 ile rastgele aşındırılmış	0,5 mm
Çekme	P220 ile rastgele aşındırılmış	1 mm
Kesme (TAST)	İşlenmemiş	0,5 mm
Kesme (TAST)	P220 ile rastgele aşındırılmış	0,5 mm
Kesme (TAST)	Kumlanmış	0,5 mm
Kesme (SLJ)	P220 ile rastgele aşındırılmış	0,25 – 0,3mm arası

4.4.2. DIC test yöntemi (Digital Image Correlation and Tracking)

Dijital görüntü korelasyonu optik bir yöntem olup temel olarak alınan görüntüler arasında oluşan değişiklikleri iki veya üç boyutta takip edip işleyerek yapı üzerinde meydana gelen değişiklikleri görmemizi sağlamaktadır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. İki ve üç boyutlu DIC yöntemi

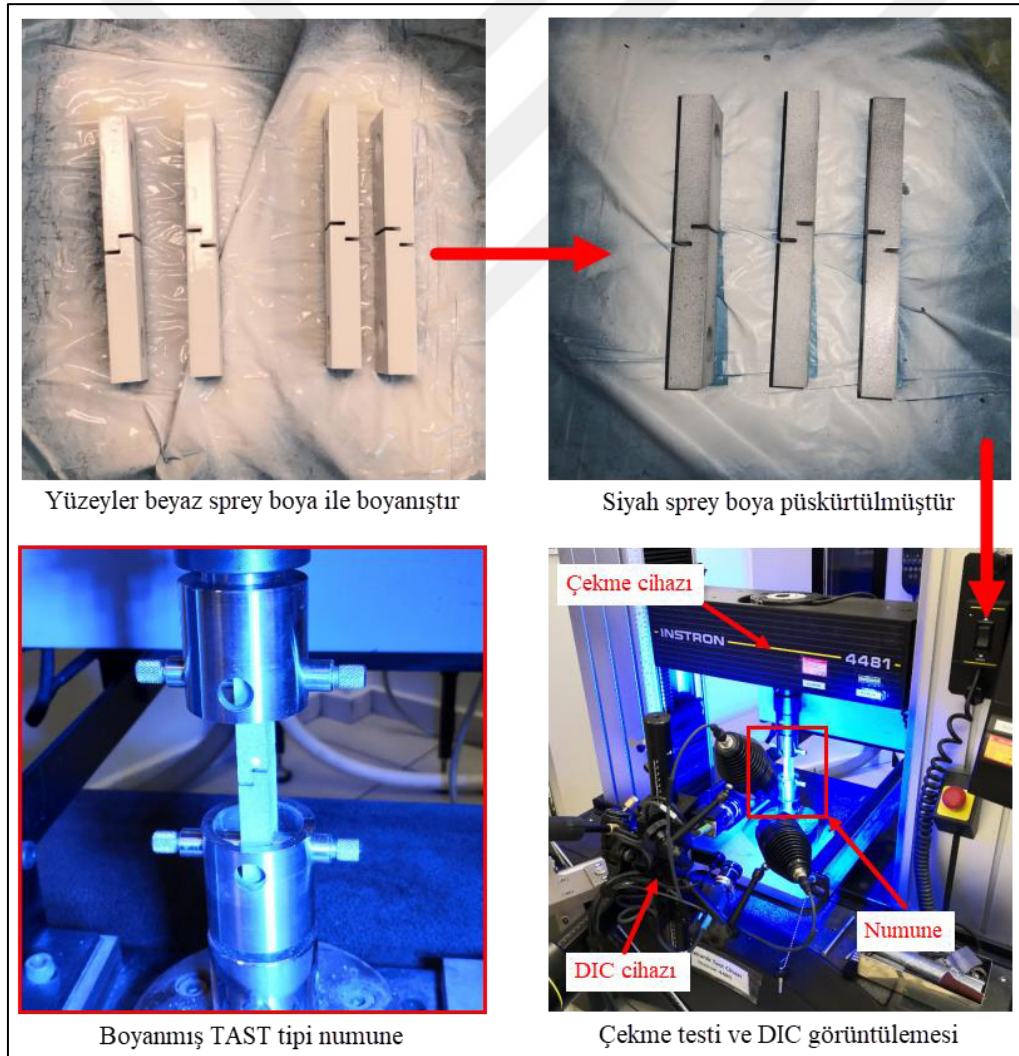
Bu yöntem genellikle tüm alan üzerindeki yer değiştirme ve gerinimleri ölçmek için kullanılır. Gerinim ölçerler ve ekstansometreler yalnızca bulunduğu konum hakkında bilgi verirken DIC yöntemiyle çok daha geniş yüzeylerde ölçümler yapılabilmektedir. Gerinim ölçer gibi yüzey üzerine mekanik temas gerekmediğinden çok daha kolay bir yöntemidir. Ayrıca yüksek hızlı kamera yardımıyla milisaniye mertebesinde gelişen olaylar da incelenebilmektedir. Bu nedenlerden dolayı günümüzde bilim ve mühendisliğin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada TAST tipi numuneler üzerinde DIC yöntemi ile ölçümler yapılmıştır. Testte ARAMIS Adjustable 2D/3D cihazı kullanılmıştır. Elde edilen görüntüler GOM Correlate programı ile işlenmiştir.

DIC yönteminde görsel ölçüm alınabilmesi için yüzey üzerinde kontrast yaratıcı desen oluşturulması gerekmektedir. Cihazın teknik dokümanında beyaz yüzey üzerine siyah noktalar bulunan desenler önerilmektedir. Bu işlem beyaz numune yüzeyine siyah renk sprey boya püskürtülerek yapılmaktadır. Işık kaynağının kameraya yansıma yapmaması için mat boylar tercih edilmelidir. Oluşturulacak desenin yoğunluğu ölçüm alanına göre değişiklik göstermektedir. Bu yoğunluk cihaz tarafından verilen karşılaştırma skalası yardımıyla yapılmaktadır.

Test hazırlık süreci aşağıda verilmiş olup Resim 4.4'te gösterilmiştir.

1. TAST tipi kesme numuneleri önceki adımlara göre hazırlandıktan sonra ölçüm yapılacak yüzey mat beyaz spray boya ile boyanıp kuruması beklenir.
2. Numune düz bir zemine koyularak mat siyah spray boya uzak mesafeden yavaşça püskürtülür. Mümkün olduğunca homojen desen elde edilmeye çalışılmalıdır.
3. ARAMIS tarafından sağlanan örnek desen skalası ile karşılaştırılıp gerekirse boya işlemine devam edilir.
4. Boya kuruduktan sonra ARAMIS cihazı ile numune yüzeyi incelenerek desen kalitesine bakılır. Desen kalitesi uygunsa teste başlanır.



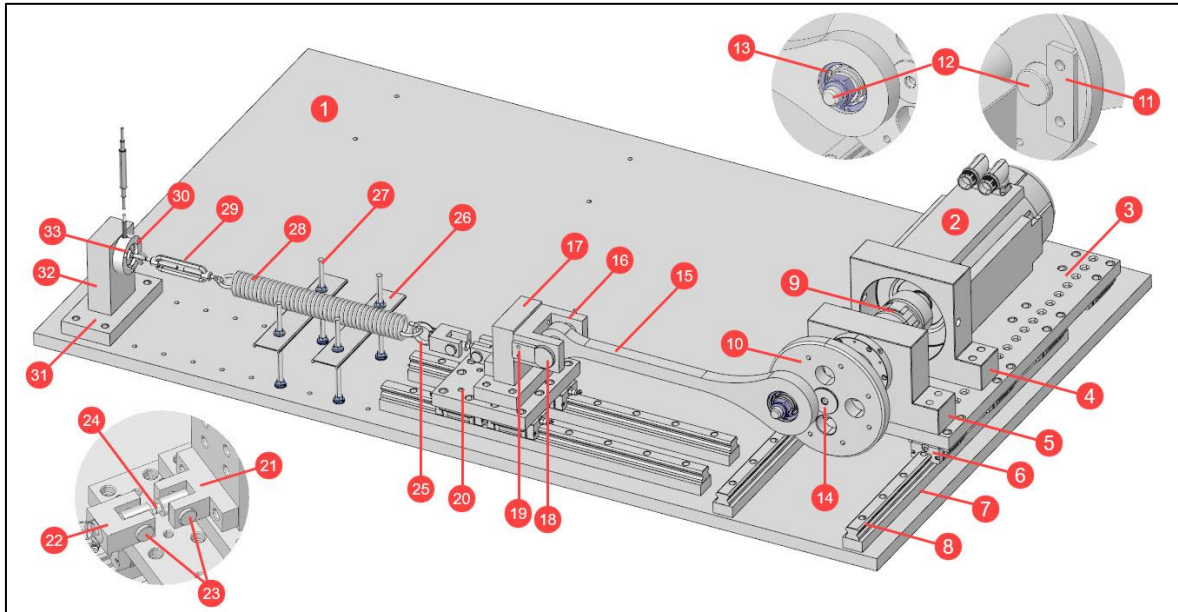
Resim 4.4. DIC test hazırlığı

4.5. Dinamik Testler

Yapılan çalışmada yapıştırma bağlantılarının farklı dinamik yük seviyeleri ve çevrim sayılarına maruz kaldıkları durumdaki mukavemet değerlerinin, diğer bir deyişle kalan mukavemetlerinin incelenmesi amacıyla bir dizi test çalışması yürütülmüştür. Bunun için bir test düzeneği tasarlanmış ve 3 farklı yük mertebesi ve 2 farklı çevrim sayısı için genel değişken yük verilmiştir. Dinamik yükler çeki yayı ile uygulanmış olup değişken yük yalnızca pozitif (çekme yönü) gerilme bölgesinde uygulanmıştır.

4.5.1. Yorulma test düzeneği

Yapıştırma bağlantılarının dinamik yük altında incelenmesi için yorulma test düzeneği ve bu düzende kullanılmak üzere çekme numuneleri tasarlanmıştır. Tasarlanan düzende temelde bir slider-crank mekanizmasıdır. Sistem Kollmorgen firmasına ait AKM65 serisi servo motor ile tahrik edilmektedir. Bu motor 6,16 kW gücünde, maksimum 65 Nm torka sahip ve 2000 devir/dakika hıza çıkabilmektedir. Şekil 4.10 ve Çizelge 4.4'te civata, somun, pul, segman vb. bağlantı elemanları hariç mekanizmayı oluşturan parçalar gösterilmiştir.

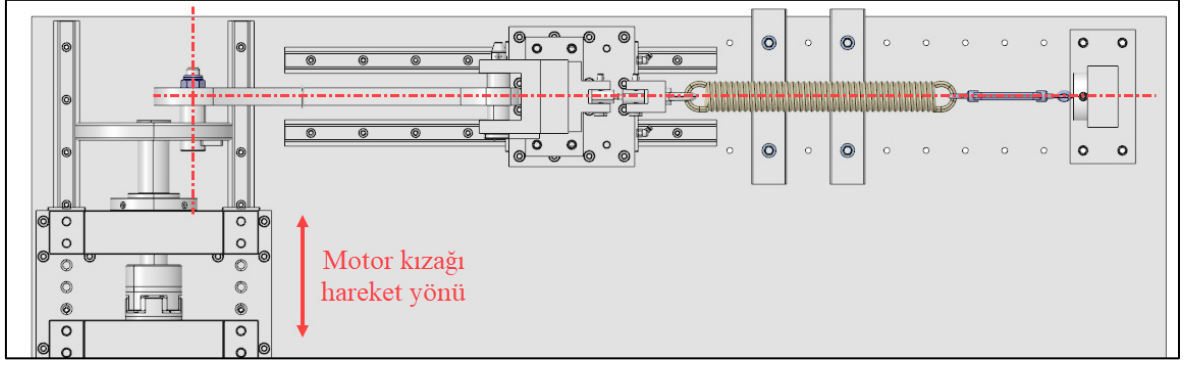


Şekil 4.10. Yorulma test düzeneği

Çizelge 4.4. Yorulma test düzeneği parça listesi

Parça No	Açıklama	Malzeme/Model
1	Test düzeneği tablası	Alüminyum / 5051
2	Servo motor	Kollmorgen AKM65
3	Motor tablası	Alüminyum / 5051
4	Motor tutucu bloğu	Paslanmaz çelik
5	Mil-rulman bloğu	Paslanmaz çelik
6	Ray tipi doğrusal rulman	SKF LLTHC 20 A T0 P5
7	Yükseltici şerit	Çelik / S235 JR
8	20 mm doğrusal kızak	SKF
9	Cıvatalı servo kaplin	Rotex GS28
10	Delikli disk	Çelik / S235 JR
11	Tespit plakası	Çelik / S235 JR
12	Özel pim	Çelik / 1045
13	Bilyalı rulman	-
14	Tespit pulu	Çelik / 1045
15	Tahrik kolu	Alüminyum / 5051
16	Tahrik kolu yuvası	Alüminyum / 6061 T6
17	Hareketli blok	Alüminyum / 6061 T6
18	Kesik perno	Çelik / S235 JR
19	Tespit plakası	Alüminyum / 6061 T6
20	Hareket tablası	Alüminyum / 6061 T6
21	Üst çene	Alüminyum / 2024 T3
22	Alt çene	Alüminyum / 2024 T3
23	Perno	Çelik / 1045
24	Test numunesi	Alüminyum / 2024 T3
25	M8 mapa	Çelik
26	Destek plakası	Alüminyum profil
27	M8 saplama	Çelik
28	Çeki yayı	EN 10270-1 DH Sınıfı yay çeliği
29	Gerdirme kancası	Çelik
30	Yük hücresi	Burster 8524-6001
31	Sabit tabla	Çelik / S235 JR
32	Sabit blok	Çelik / S235 JR
33	M8 kapalı kanca	Çelik

Mekanizmada bulunan motor bir kayar tabla üzerine yerleştirilmiştir. Sistem çalıştırılmadan önce motorun konumu kızak üzerinde ayarlanarak sistem üzerinde istenmeyen yüklerin gelmesi ve mekanizmanın zarar görmesi engellenmektedir (Şekil 4.11).



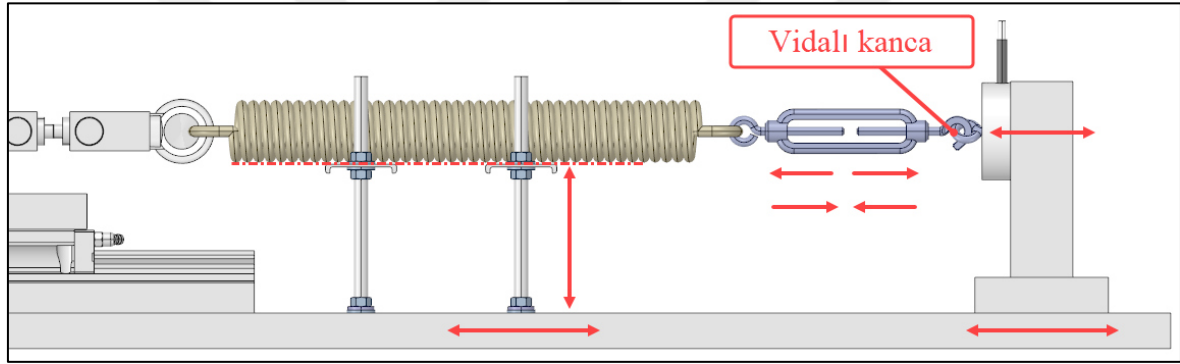
Şekil 4.11. Motor kızıağı hareketi

Sistem motorun dönme hareketini bir cıvatalı kaplin bağlantısıyla kamalı mile ve sonrasında da kama göbekli diske iletmektedir. Disk üzerinde merkezden uzaklığı 40 mm ve 45 mm olan iki grup delik vardır. Diskte dengesizlik olmaması için bu delikler karşılıklı olarak açılmıştır. Tahrik kolu içerisinde bilyalı rulmana geçirilmiş ve somun ile sabitlenmiş özel bir pim bulunmaktadır. Bu pim, disk üzerinde istenilen deliğe yerleştirilerek iki farklı genlikte hareket elde edilmektedir. Sistemin tahrik edilen bölümünde iki adet ray profil üzerinde yalnızca doğrusal harekete izin veren yatak grubu bulunmaktadır. Bu yatakların üzerine bir tabla ve hareketin iletilmesini sağlayan blok grubu yerleştirilmektedir. Bu bloğun bir tarafında tahrik kolu, diğer tarafındaysa test numunesini tutan üst çene parçası bulunmaktadır. Hareketli blok üzerinde bulunan parçalar cıvatalı bağlantı ile birleştirilmiştir. Hareket sırasında olası gevşemelerin önüne geçmek için her cıvatayla birlikte yaylı rondela da kullanılmıştır. Blok üzerindeki kol yuvasında zamanla meydana gelebilecek herhangi bir kaçıklık veya gevşeme sistem sabitlendikten sonra kol üzerinde eksen dışı yüklerin oluşmasına neden olacağından bu parça iki adet hassas pim ile montajlanmaktadır. Bu sayede yuvanın eksenel ve dönme hareketi sınırlandırılmıştır.

Sistem hareketiyle birlikte test numunesi üzerinde kuvvet oluşturacak parçalar boyutları önceden belirlenmiş çeki yaylarıdır. Bu yayların bir ucu alt çene üzerinde bulunan mapaya diğer ucu ise gerdirmeye kancasına bağlanmaktadır. Gerdirmeye kancası numune yerleştirildikten sonra sistemde oluşan mekanik boşluğun alınması, test öncesi belirli bir ön yük verilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Mekanizmanın sabit tarafındaysa bir blok ve üzerinde 1 kN'luk yük hücresi bulunmaktadır. Yük hücresi, üzerinde bulunan kapalı kanca

ile gerdirme kancasına bağlanmaktadır. Bu sayede test öncesinde verilen ön yük ve test boyunca uygulanan kuvvet zaman verisi elde edilebilmektedir.

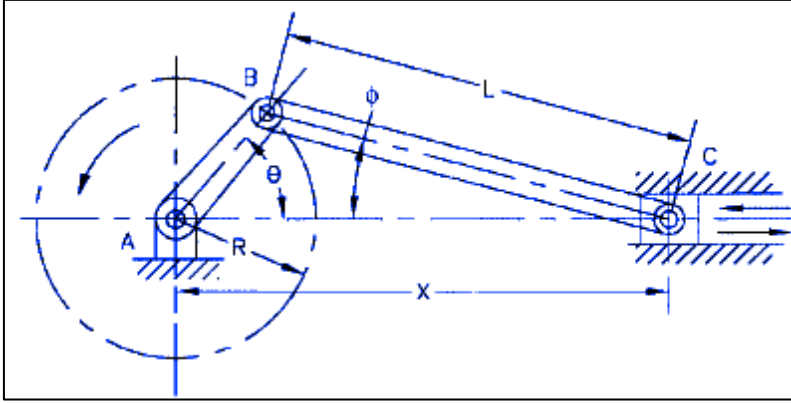
Sistemin hareketi sırasında yayın genişip kısılmasıyla birlikte yay kütlesinin salınımından ötürü numune üzerinde istenmeyen kuvvetler oluşmaktadır. Bu kuvvetlerin numunenin eksenel yük koşulunu bozmaması için yayların altında 2 adet destek plakası konulmuştur. Bu plakaların yükseklikleri kullanılacak yayın boyutlarına göre test öncesi ayarlanmaktadır. Yükseklik ayarı saplamalar üzerinde bulunan somunlar yardımıyla yapıp plakaların paralellliği ise hassas terazi ile kontrol edilmektedir. Sabit blok ve destek plakalarının konumları değiştirilerek farklı ebatlarda yaylar da test edilebilmektedir. Yay bağlantısı ve montaj ayarları Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Yay bağlantısı ve ayarları

4.5.2. Test düzeneğinin kinematik analizi

Slider-crank mekanizmasında sistemin yapacağı strok miktarı bağlantı çubuklarının uzunluklarına ve eksenlerin kaçıklığına bağlıdır. Tasarlanan test düzeneği eş eksenli bir slider-crank mekanizması olup sistemin şematiği Şekil 4.13’te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Eş eksenli slider-crank mekanizması

Eş eksenli durum için mekanizma üst ölü noktadayken (TDC) toplam boy kol uzunluklarının toplamı kadardır. Buna göre mekanizmanın toplam stroku üst ölü nokta (TDC) ile alt ölü nokta (BDC) arasındaki uzaklıktır.

$$S = X_{TDC} - X_{BDC} = 2R \quad (4.1)$$

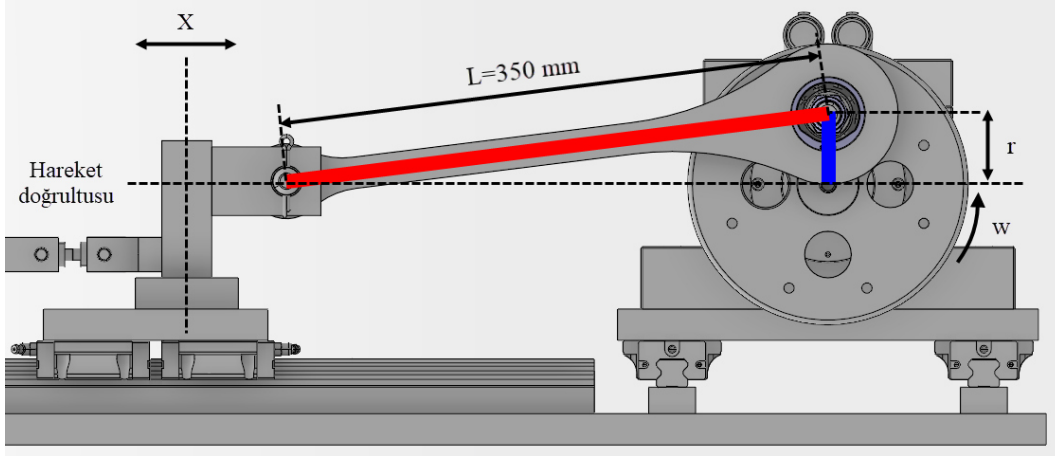
Hareketli parçanın herhangi bir θ açısındaki konumu ise;

$$X = R \cos \theta + L \cos \phi \quad \text{veya} \quad X = R \cos \theta + \sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 \theta} \quad (4.2)$$

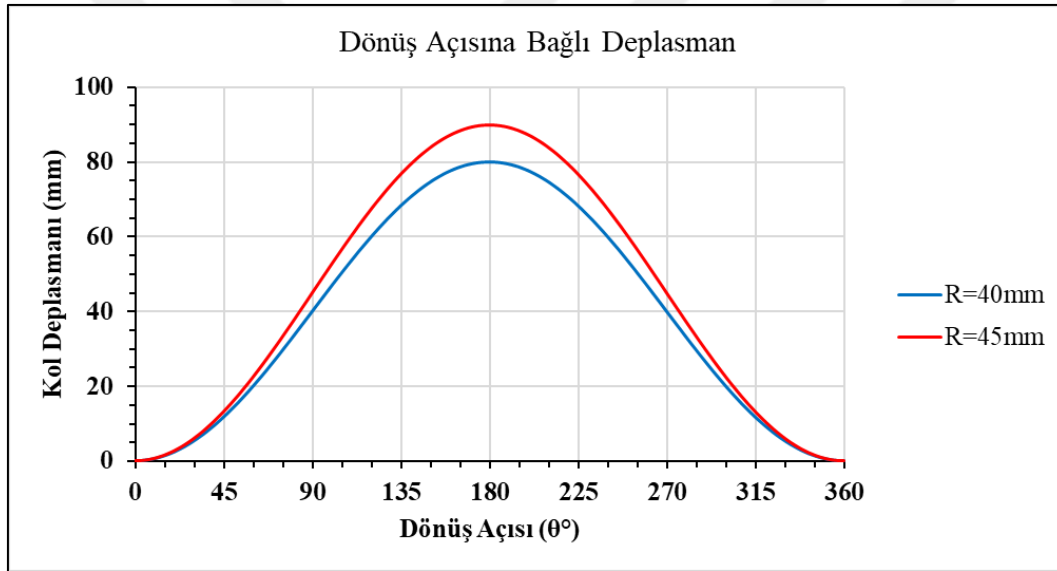
eşitlikleri ile hesaplanmaktadır. R, L uzunlukları ve θ açısı biliniyorsa diğer açılar sinüs teoremi yardımıyla hesaplanabilir [66].

$$\frac{R}{\sin \phi} = \frac{L}{\sin \theta} = \frac{X}{\sin \gamma} \quad (4.3)$$

Tasarlanan test düzeneğinin ölçüleri şekilde gösterilmiş olup tahrik kolu uzunluğu $L=350$ mm, dönme yarıçapı $r=40$ ve $r=45$ mm'dir (Şekil 4.14). Sistem üst ölü noktadan hareketine başlayarak yayı germektedir. Buna göre hareketli bloğun θ dönme açısına göre strok değeri Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Test düzeneğinin mekanizma ölçüleri

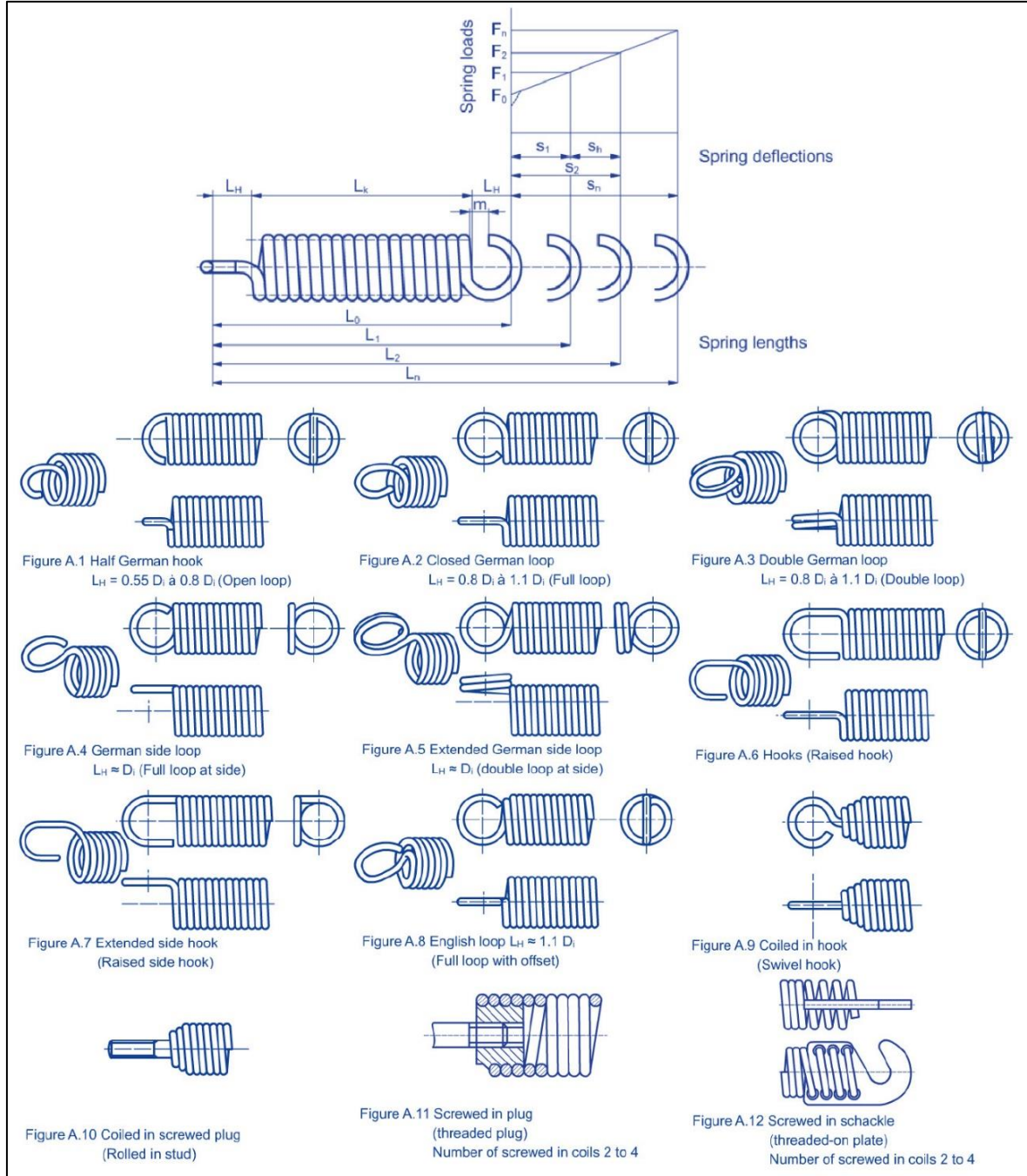


Şekil 4.15. θ dönüş açısına bağlı deplasman grafiği

4.5.3. Yaylarının boyutlandırılması

Tasarlanan test düzeneğinde dairesel kesitli helisel çeki yayları kullanılmıştır. Üç farklı yük durumu için yay tasarımı yapılmış, daha sonra üretilen yaylar test edilerek yük-uzama grafikleri elde edilmiştir.

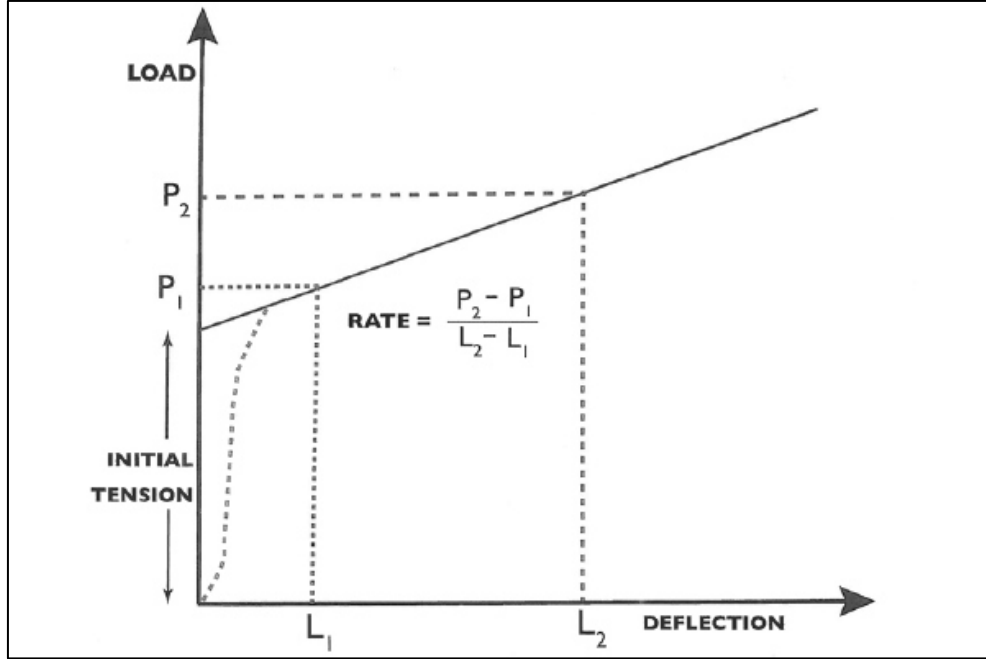
Çekme tipi yaylar genellikle sarımlar birbirine temas edecek şekilde üretilirler. Ancak istisnai olarak sarımlar arası boşluklu da olabilmektedir. Kullanım şekline bağlı olarak yayın bitiş bölgesi yarım, tam veya kapalı kanca tipinde üretilebilir. Şekil 4.16'da örnek bir çekme tipi yay ve uç tipleri gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Örnek bir çekme yayı ve uç tipleri [67]

Üretim sonrasında kapalı boylarının istenilen ölçülerde olması için sarımların birbirine temasının sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle yaylar sarım sırasında bir miktar ön yük ile üretilirler. Ön yükün miktarı birçok faktörle birlikte ilk olarak sarım şekline dolayısıyla üreticiye bağlı olmaktadır. Çeşitli yay üreticilerine ait katalog değerleri incelendiğinde yay üzerinde oluşan ön yükün (F_0), yay kapasitesinin (F_n) %10'u ile %20'si arasında kaldığı görülmektedir. Çekme tipi yayların kuvvet-uzama grafikleri incelendiğinde grafiğin

başlangıcında doğrusal olmayan bölge görülmektedir (Şekil 4.17). Bu bölge yayda bulunan ön yük ve yayın kanca kısmında meydana gelen ilk şekil değiştirmeden kaynaklanmaktadır. İdeal bir çekme yayındaysa ön yük kuvveti aşılanaya kadar yay uzamamaktadır.



Şekil 4.17. Çekme yayına ait ideal ve gerçek kuvvet-uzama grafiği [68]

Yay tasarımına başlamadan önce tasarım parametreleri değerlendirilerek hangi parametrelere göre yay tasarımının yapılacağı belirlenmelidir. Çünkü aynı yay özellikleri farklı tel çapı, sarım çapı ve sarım sayısı ile elde edilebilmektedir. Yay tasarımına ait bazı parametreler aşağıda verilmiştir.

- Tel çapı (d)
- Aktif sarım sayısı (i_y)
- Ortalama yay çapı (D_o)
- Maksimum kuvvet (F_n)
- Maksimum izin verilen uzama (L_n)
- Yükleme koşulu (statik-dinamik)
- Yay malzemesi

Tasarım öncesi yayların sağlaması gereken özellikler belirlenerek gerekli boyutlar optimum şekilde belirlenmeye çalışılmıştır. Üç farklı yük için yay tasarımı yapılmış olup yaylar için istenen özellikler aşağıda belirtilmiştir.

Tasarlanan deney düzeneğine göre yayda meydana gelecek maksimum uzama miktarı $R=45$ mm için 90 mm'dir. Yaylar $L=90$ mm için yapısal bütünlüğünü ve doğrusal özelliklerini korumalıdır.

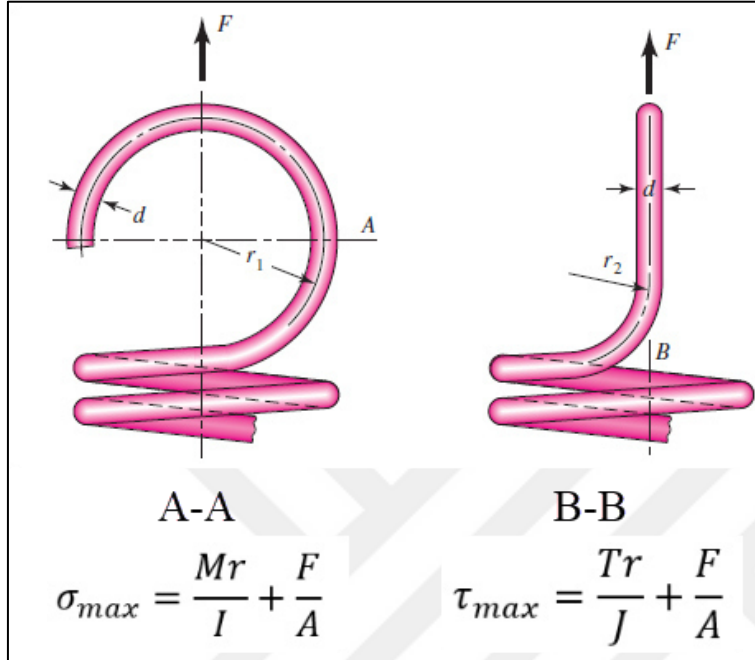
- $L=80$ mm için yayda oluşacak kuvvetler sırayla 200 N, 400 N ve 800 N olmalıdır.
- Yayların kapalı uzunluğu 350 mm'den fazla olmamalıdır.
- Yaylar dinamik yüklere karşı dayanıklı olmalı, yorulmaya karşı sürekli ömre ($N>10^6$) göre boyutlandırılmalıdır.
- Yaylar piyasada en çok kullanılan soğuk çekim yay çeliğinden üretilecektir. Dinamik yükleme ve yüksek yorulma direnci için EN 10270-DH veya DIN 17223/D standartlarına uygun teller kullanılmalıdır [69-70].
- Yaylar, test numunelerinde meydana gelebilecek olası bir kopma durumunda mekanizmadan ayrılma olmaması için kapalı tip kancaya sahip olmalıdır. Tercih olarak $L_H=0,8D_i$ boya sahip 'Closed German Loop' tipi seçilmiştir.

Tasarım için gerekli varsayımlar aşağıda verilmiştir.

- Yayda bulunacak F_0 ön kuvveti $0,15F_n$ olarak kabul edilmiştir.
- EN 10270-DH veya DIN 17223/D sınıfı soğuk çekim yay çeliği için elastik modül $E=206$ GPa ve kayma modülü $G=81,5$ GPa kabul edilmiştir.
- Tel çapına bağlı kopma mukavemeti R_m EN 10270-1'de belirtildiği üzere kabul edilmiştir [69].
- Soğuk şekillendirilmiş çeki yayı için emniyetli burulma gerilmesi $\tau_{em}=0,45R_m$ olarak kabul edilmiştir [70].

Çeki yayı üzerinde kanca ve helis kesitlerinde gerilme koşulları farklıdır. Kanca kesitini inceleyecek olursak bu kesite normal kuvvet ve eğilme momenti etkimektedir. Bu durumda kanca kesitinde σ normal gerilmesi oluşmaktadır. Yayın helisel bölgesinde ise kesme kuvveti ve burulma momenti, dolayısıyla τ kayma gerilmesi oluşmaktadır (Şekil 4.18).

Kanca bölgesindeki gerilmelerin tam olarak belirlenememesi ve malzemenin kayma gerilmesi dayanımının daha düşük olmasından dolayı yay boyutlandırılması helis bölgesi için yapılp kanca kısmı için kontrol hesabı yapılmaktadır.



Şekil 4.18. Çeki yayı üzerinde oluşan gerilme durumu [71]

Yayın sarım sırasında bükülmesinden dolayı iç ve dış bölgesinde gerilme dağılımı eşit değildir. Sarım sonrası yayda bulunan gerilmeler iç tarafta daha fazladır. Hesaplamalarda burulma ve kesme kuvvetini ayrı ayrı hesaplamak yerine tel üzerinde oluşan kesme kuvveti ve yayın eğriliğinden kaynaklı gerilmeleri kapsayan sarım faktörleri (k) kullanılmaktadır. Bu faktörler sarım oranının (w) bir fonksiyonudur.

Literatürde Wahl ve Bergsträsser faktörleri kullanılmakta olup iki faktörde birbirine yakın sonuç vermektedir [72]. Yapılan hesaplamada Bergsträsser faktörü kullanılmıştır. Sarım oranı helisel yaylar için 4 ile 12 arasında tercih edilmelidir.

$$w = \frac{D_o}{d} \quad (4.4)$$

$$k_B = \frac{w + 0,5}{w - 0,75} \text{ (Bergsträsser)} \quad k_W = \frac{w - 0,25}{w - 1} + \frac{0,615}{w} \text{ (Wahl)} \quad (4.5)$$

Yaya gelecek kuvvet, yayın dış çapı ve malzeme biliniyorsa gerekli tel çapı aşağıdaki gibi bulunabilir [73].

$$d = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot k \cdot F \cdot D_o}{\pi \cdot \tau_{em}}} \quad (4.6)$$

Tasarım öncesinde d ve D_o değerlerinin belli olmaması durumunda tasarım deneme yanılma ile yapılmaktadır. Bunun için kuvvet, maksimum uzama, tel çapı ve dış çap özelliklerinin bulunduğu yay çizelgeleri kullanılarak kabaca d ve D_o için bir öngörü yapılmıştır. Yaylanma miktarı (s) ise telde meydana gelen toplam burulma miktarı ile hesaplanmakta olup tel çapı, yay çapı ve sarım sayısına (i_y) bağlıdır. Buna göre yaylanan tel uzunluğu (L_y) ve yaylanma miktarı ve yay sabiti (c) aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$L_y = \pi \cdot D_o \cdot i_y \quad (4.7)$$

$$s = \gamma \frac{D_o}{2} = \frac{M \cdot L_y}{J \cdot G} \cdot \frac{D_o}{2} = \frac{8 \cdot F \cdot D_o^3 \cdot i_y}{G \cdot d^4} \quad , \quad c = \frac{F}{s} \quad (4.8)$$

Boyutlandırma yapıldıktan sonra hesaplanan kayma gerilmeleri ilgili yay çeliğine ait Goodman diyagramlarına göre kontrol edilerek sürekli ömür için tekrar boyutlandırılmıştır. Helisel çeki yaylarında uçta bulunan kanca veya çengel üzerindeki gerilme durumu ve bunun ömür üzerindeki etkisi tam olarak belirlenemediğinden basma yaylarına ait diyagramlar kullanılmıştır.

Üretilen yaylar ve bunlara ait ölçüler Resim 4.5 ve Çizelge 4.5'te verilmiştir.

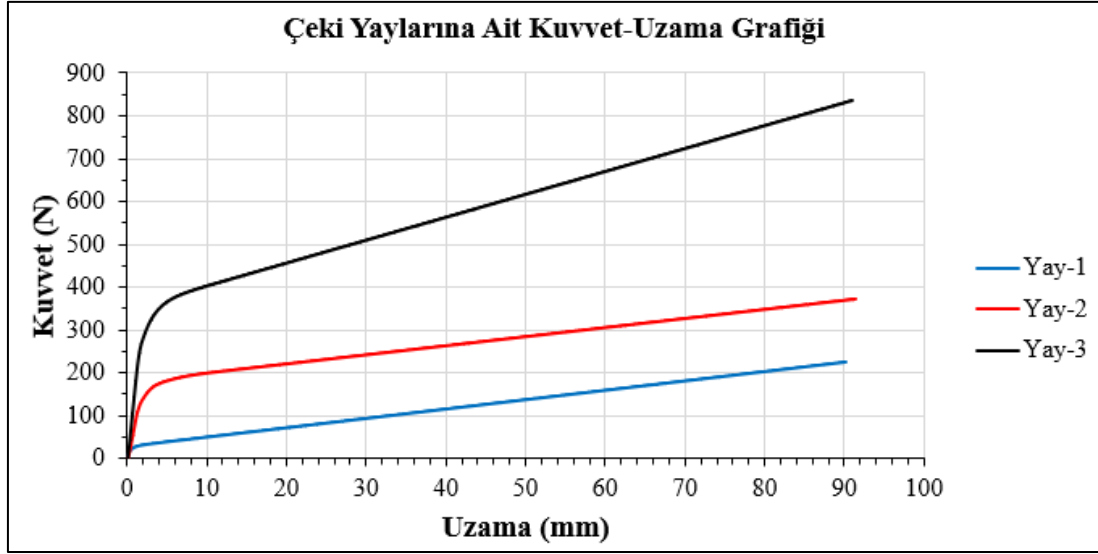


Resim 4.5. Test düzeneğinde kullanılan çeki yayları

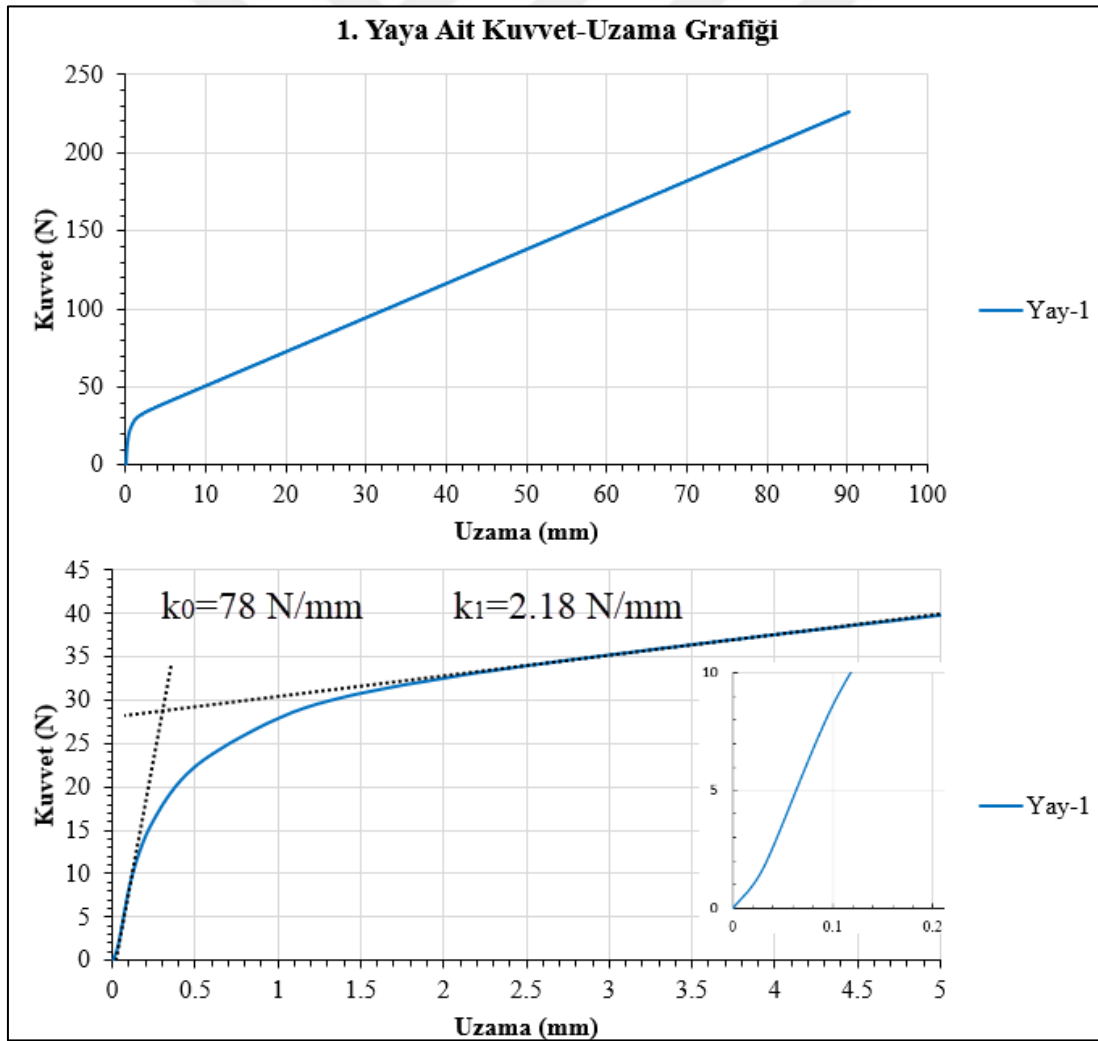
Çizelge 4.5. Çeki yayı ölçüleri

Yay	d (mm)	D _d (mm)	Sarım (i)	L ₀ (mm)
1	3	18	87,5	273,5
2	4	31	59,5	282,5
3	5	33	53,5	308

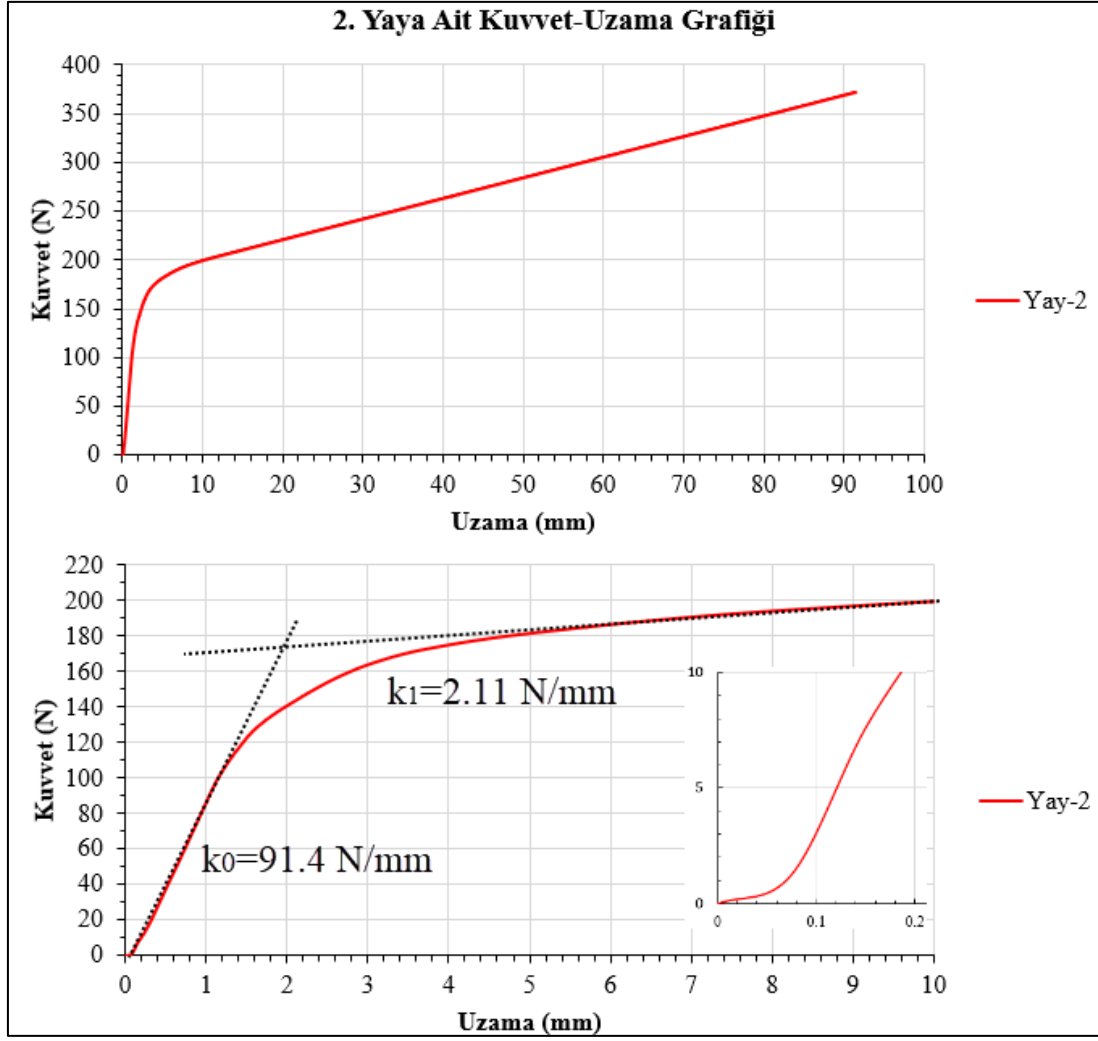
Üretilen yaylar daha sonra 45mm/dakika çene hızında 90 mm çekilerek kuvvet-uzama grafikleri elde edilmiştir. Test sırasında yaylarda bozulma olup olmadığının tespiti için her test 3 tekrar ile yapılmıştır. Yaylara ait kuvvet-uzama grafikleri ve yay sabitleri Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere yaylar belirli bir uzunluktan sonra asıl doğrusal davranışını göstermektedir. Test düzeneğine ait yükleme durumu için bu veriler kullanılacaktır.



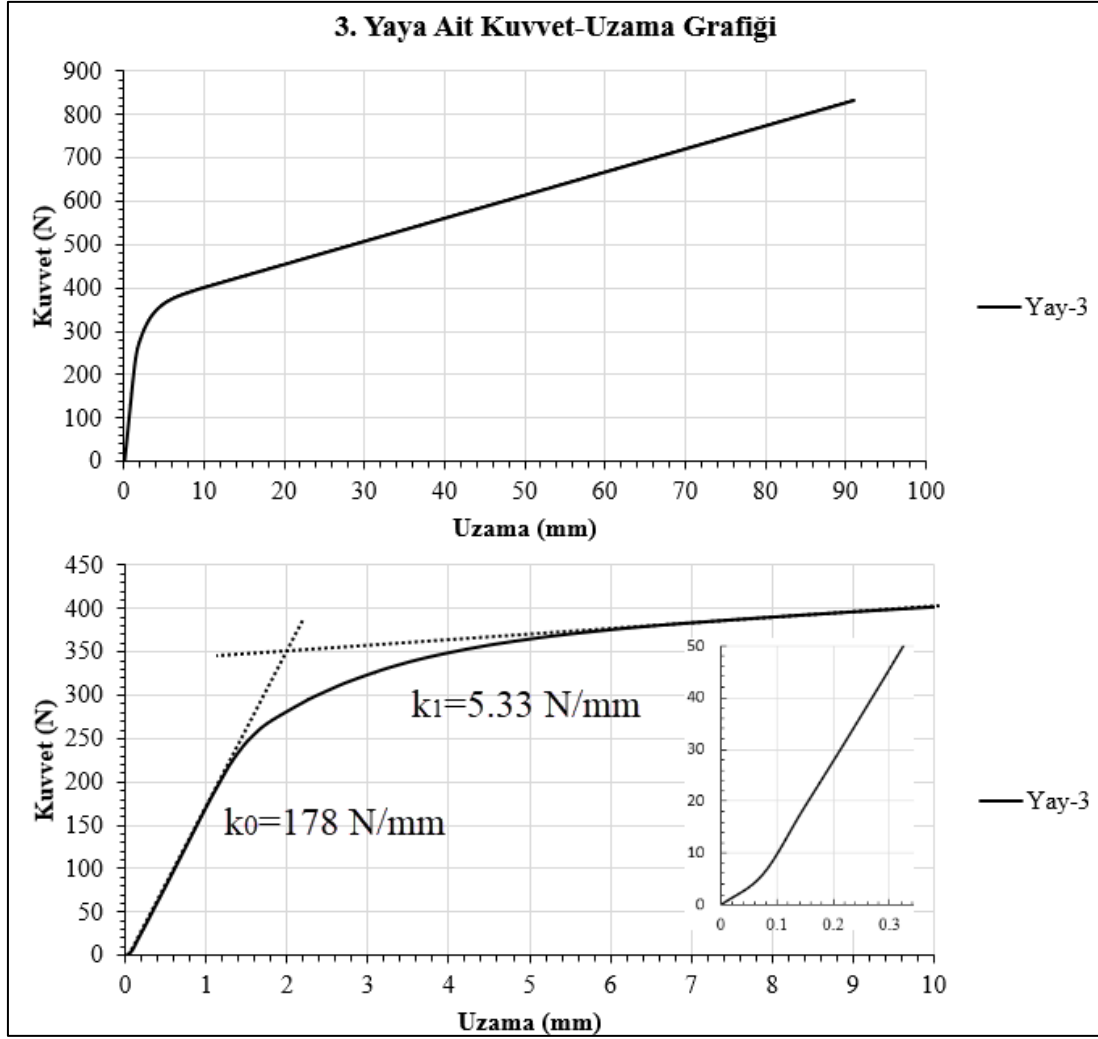
Şekil 4.19. Çeki yaylarına ait kuvvet-uzama grafiği



Şekil 4.20. 1 numaralı yaya ait kuvvet-uzama grafiği



Şekil 4.21. 2 numaralı yaya ait kuvvet-uzama grafiği

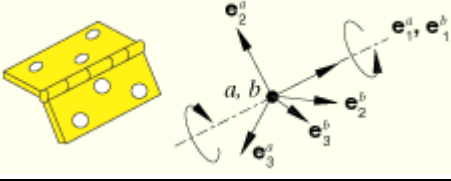
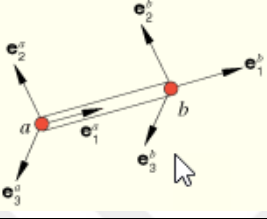
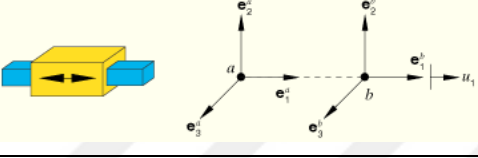
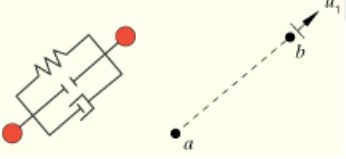


Şekil 4.22. 3 numaralı yaya ait kuvvet-uzama grafiği

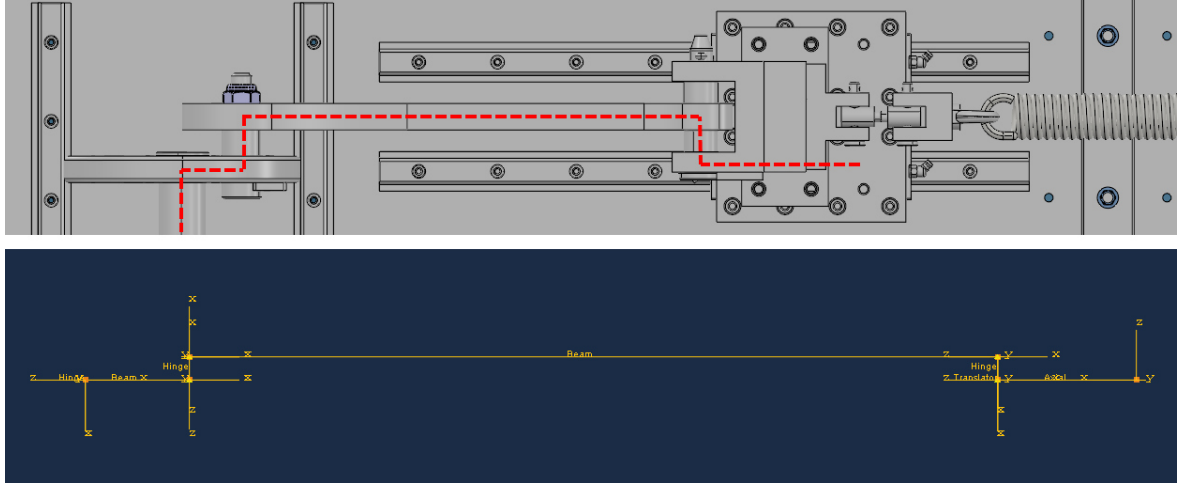
4.5.4. Test düzeneğinin yük profillerinin belirlenmesi

Yaylara ait kuvvet-uzama grafikleri incelendiğinde yayların uzamanın ilk bölgesinde doğrusal olmayan bir davranış sergilediği görülmektedir. Bu durumda mekanizma için daha önce hesaplanan dönüş açısına bağlı deplasman profilinden farklı bir kuvvet profili oluşacaktır. Yük koşullarının incelenmesi için mekanizma ABAQUS programı kullanılarak modellenmiştir. Yapılan nümerik analizde mekanizmayı oluşturan elemanlar ve bağlantılar sistemin serbestlik derecesini temsil eden konnektör tipi elemanlar kullanılarak modellenmiş, yaya ait sayısal test verileri yine konnektör elemana atanarak mekanizmanın dönüşü sırasında sistemin uygulayacağı kuvvet profilleri elde edilmiştir. Yapılan analizde kullanılan konnektör tipleri ve kendi içlerindeki serbestlik dereceleri Çizelge 4.6'da listelenmiştir.

Çizelge 4.6. Analizde kullanılan konnektör tipleri ve serbestlik dereceleri

Konnektör Tipi	Konnektör Gösterimi	Hareket Serbestliği (Available CORM)	Sınırlanmış Serbestlikler (Constrained CORM)
Hinge		UR1	U1, U2, U3, UR2, UR3
Beam		Yok	U1, U2, U3, UR1, UR2, UR3
Translator		U1	U2, U3, UR1, UR2, UR3
Axial		U1	Yok
CORM:Component of relative motion, U:Öteleme Serbestlikleri, UR:Dönme Serbestlikleri			

Analiz modelinde tanımlanan her konnektörün kendine ait koordinat sistemi bulunmaktadır. Bu nedenle analiz modeli oluşturulurken sistemin yapacağı harekete göre konnektörlere ait koordinat sistemlerinin oryantasyonuna dikkat edilmelidir. Modelde mafsallı ve dönüş hareketleri için ‘Hinge’ tipi konnektör kullanılmıştır. Bu elemanın kendisinin tanımlı olduğu koordinat sistemine göre yalnızca X ekseninde dönüş serbestliği bulunmaktadır. Disk ve tahrik kolu gibi hareketin iletilmesini sağlayan yapılar ise ‘Beam’ konnektör tipi ile modellenmiştir. Bu konnektörün kendi içinde serbestlik derecesi bulunmayıp yalnızca bağlanılan düğüm noktalarında hareketinin iletilmesini sağlamaktadır. Sistemde bulunan doğrusal yatak üzerindeki hareketli blok için yalnızca X ekseninde öteleme serbestliği bulunan ‘Translator’ tipi, yay bağlantısı içinse yine yalnızca X eksenine göre serbestliği bulunan ‘Axial’ tip konnektör kullanılmıştır. Analiz modeli ve kullanılan konnektör bağlantıları Şekil 4.23 ve Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

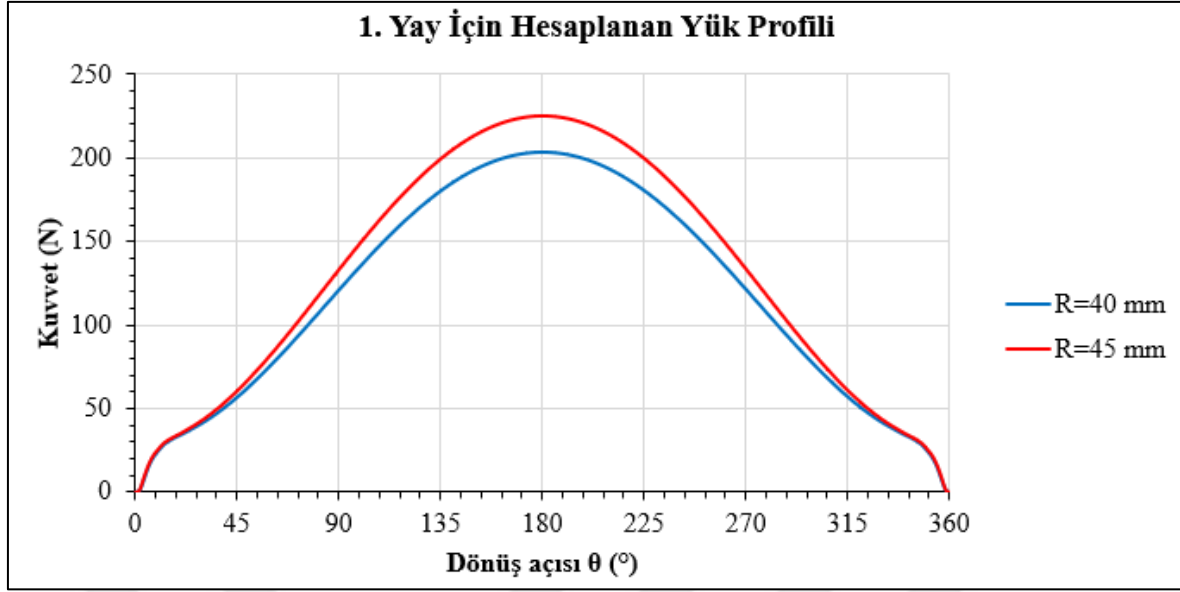


Şekil 4.23. Mekanizmaya ait analiz modeli

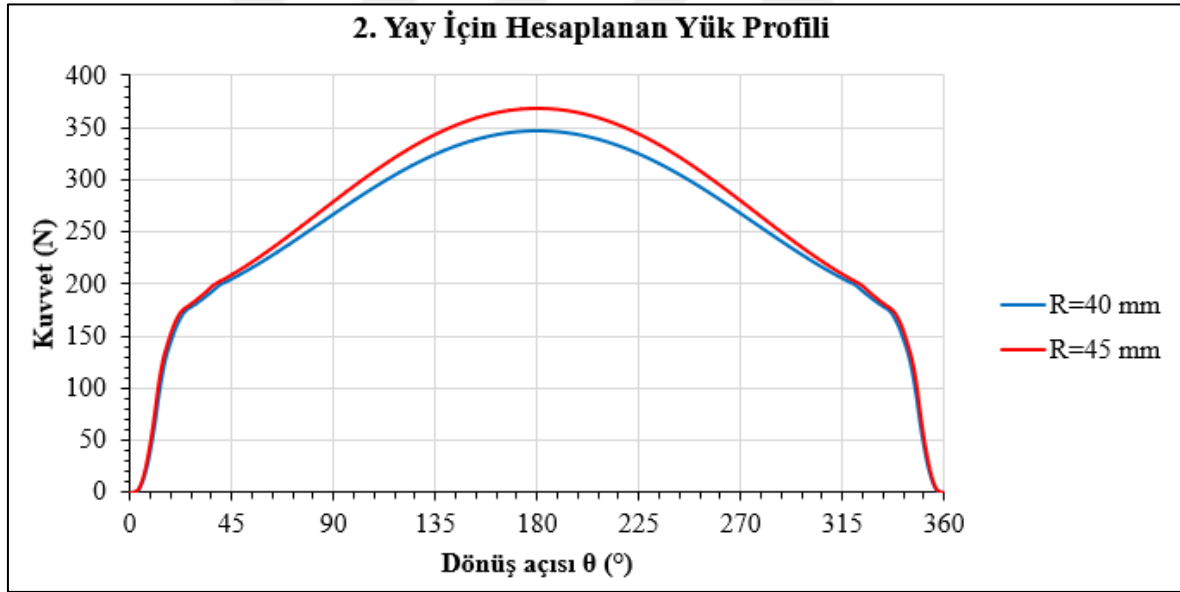
Çizelge 4.7. Parçalara atanan konnektör tipleri

Bağlantı	Konnektör Tipi	Serbestlik
Zemin - Tahrik mili	Hinge	UR1
Disk	Beam	-
Disk - Tahrik kolu	Hinge	UR1
Tahrik kolu	Beam	-
Tahrik kolu - hareketli blok	Hinge	UR1
Hareketli blok - Zemin	Translator	U1
Hareketli blok - Yay	Axial	U1

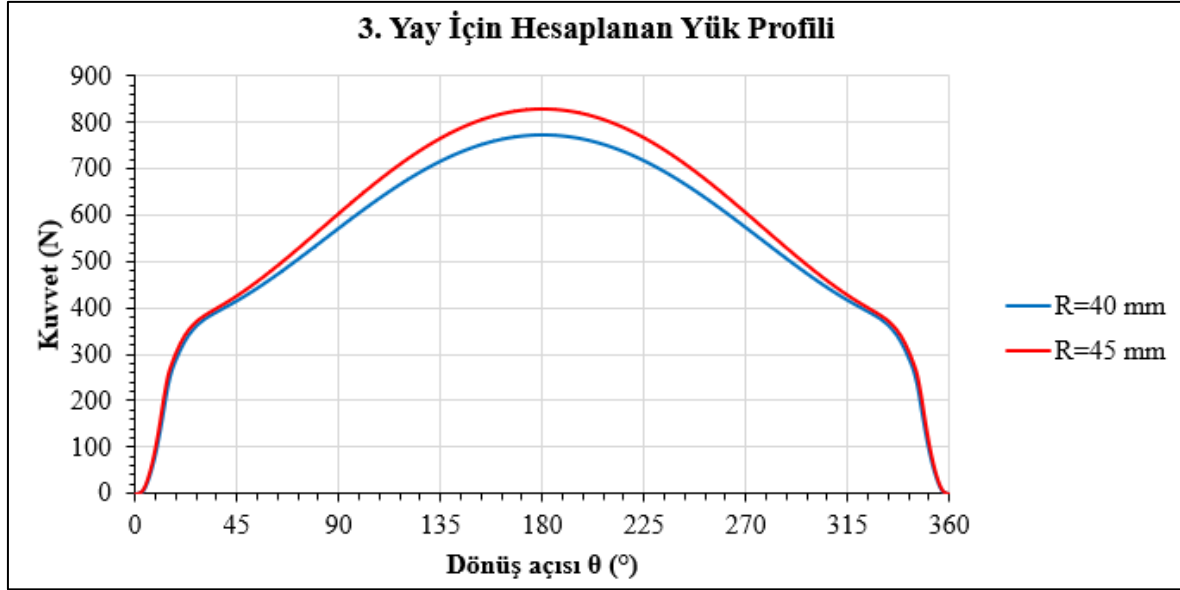
Analiz sonucunda 3 farklı yay için elde edilen yük profilleri Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir.



Şekil 4.24. 1 numaralı yay için hesaplanan yük profili



Şekil 4.25. 2 numaralı yay için hesaplanan yük profili



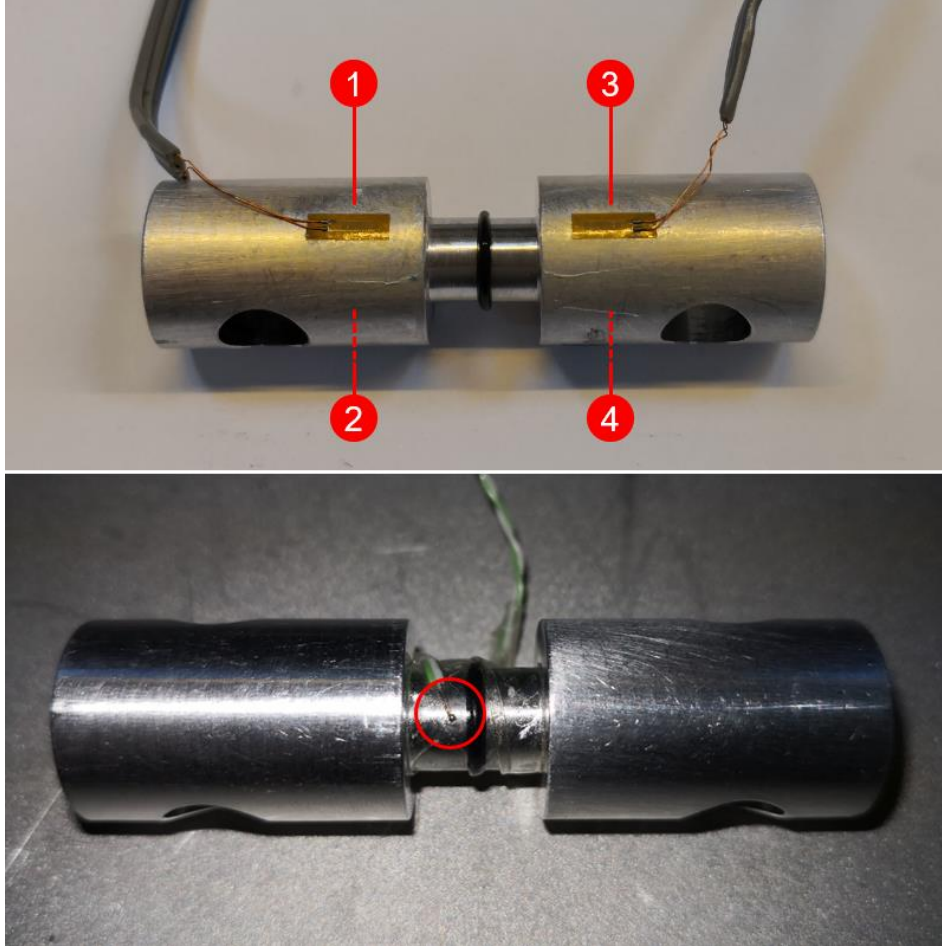
Şekil 4.26. 3 numaralı yay için hesaplanan yük profili

4.5.5. Test çalışmaları

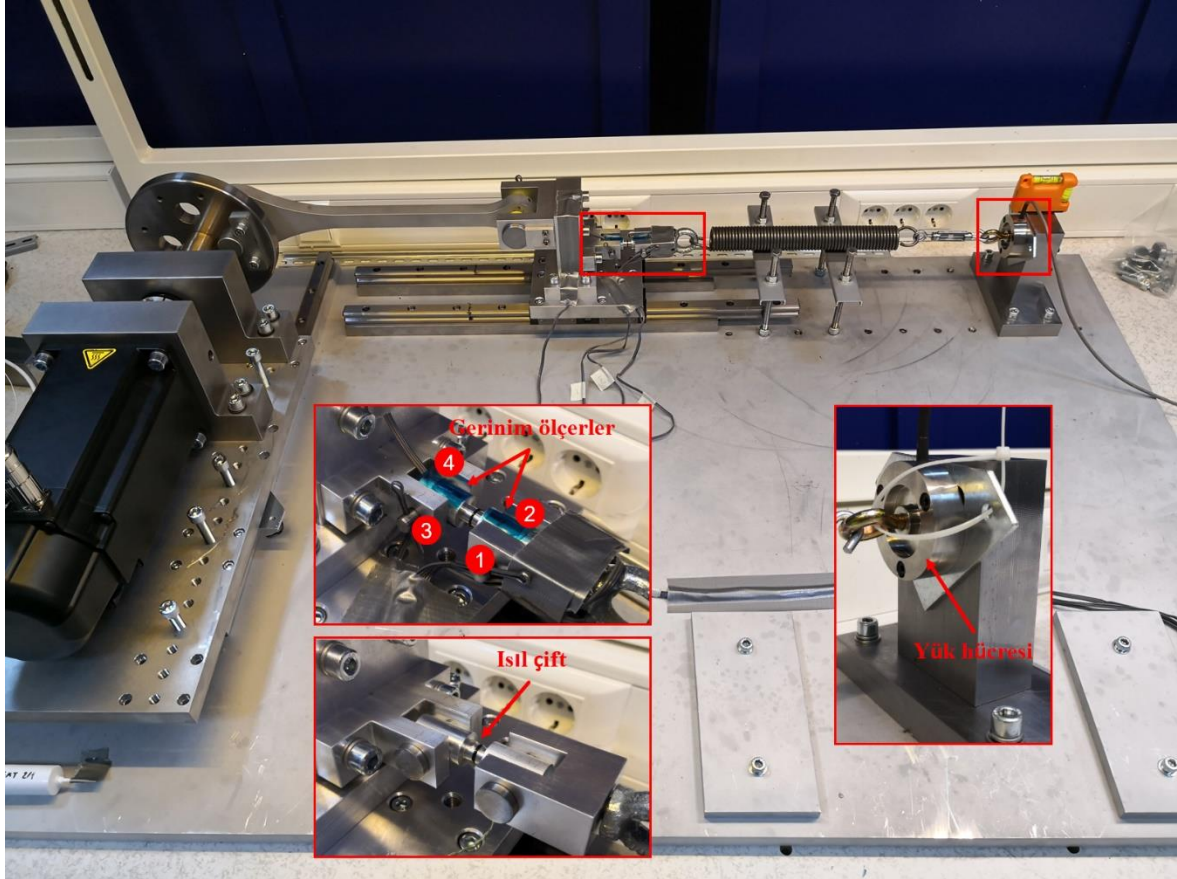
Yapılan test çalışmasında 0,3 mm yapıştırıcı kalınlığına sahip test numuneleri kullanılmıştır. Tüm numune yüzeyleri P220 tanecik boyutlu aşındırma kağıdı ile mekanik olarak işlenmiştir. Yapıştırıcı numuneleri 3 farklı yük profilinde genel değişken yüklemeye maruz bırakılmıştır. Yapılan tüm testlerde sistem $R=40$ mm konumu, yani 80 mm toplam deplasman için 120 devir/dakika (2 Hz) ile tahrik edilmiştir. Düzenekte bulunan yük hücresiyle test öncesinde sisteme verilen ön yük ve test sırasında numunenin maruz kaldığı kuvvet verisi toplanmıştır. Test çalışmalarına başlamadan önce sistemin numuneler üzerine eksenel kuvvet dışında herhangi bir yük uygulayıp uygulamadığı tespit edilmiştir. Bunun için bir numune üzerine 2 altta 2 üstte olacak şekilde toplamda 4 adet tek eksenli gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Bu şekilde eksenel tahrik sonrası numune üzerine herhangi bir eğilme momenti gelip gelmediği kontrol edilmiştir.

Uzun süreli dinamik yüklemelerde numunede oluşan gerinimden ötürü parçada ısınma meydana gelebilmektedir. Özellikle yüksek frekanslı testlerde bu daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle test sırasında yapıştırıcı uygulanan bölgeye yakın bir noktaya ısı çift yerleştirilerek test boyunca numunede oluşan sıcaklık değişimi incelenmiştir. Numune üzerine yerleştirilen gerinim ölçer ve ısı çift lokasyonları ile test düzeneği üzerindeki konumları Resim 4.6 ve Resim 4.7’de verilmiştir.

Yük hücresi ve gerinim ölçer verisi LMS SCADAS veri toplama sistemi, ısıl çift verisi ise Extech TM500 ısıl çift kayıt cihazı ile toplanmıştır. Sistemin tüm hareketi boyunca gösterdiği davranışı yakalayabilmek için örnekleme frekansları yük hücresi ve gerinim ölçer kanallarında 1000 Hz, ısıl çiftte ise 1 Hz olarak belirlenmiştir.



Resim 4.6. Gerinim ölçer ve ısıl çift konumları



Resim 4.7. Gerinim ölçer ve yük hücresi bölgeleri

Motor devri ve uygulanacak çevrim sayısı servo sürücüsüne ait yazılım ile kontrol edilmiştir. Çalışmalar 10 000 ve 100 000 çevrim sayısı için yapılmış olup Çizelge 4.8’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.8. Dinamik test çalışmaları

Yay No	Kuvvet (N)	Yük Oranı (F/F_u)	Çevrim Sayısı	Test Sayısı
1	205	0,10	10^4	2
			10^5	2
2	355	0,18	10^4	3
			10^5	3
3	785	0,40	10^4	3
			10^5	3

5. ÖLÇÜMLER VE TEST SONUÇLARI

5.1. Statik Yük Koşulu Kapsamındaki Sonuçlar

Yapıştırıcı kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü etkisinin incelenmesi için çekme ve kesme tipi numuneler ile testler yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü etkisi için üç farklı yüzey seçilmiştir. Bu yüzeyler işlenmemiş, P220 kâğıt ile rastgele yönde aşındırılmış ve kumlanmış yüzeylerdir.

Kullanılan her numune için hazırlık öncesi yüzey pürüzlülüğü ölçümü uygulanabilir olmadığından yüzey işlemine karşılık gelen bir referans pürüzlülük değeri kabul edilmiştir. Yüzeyler için kabul edilen referans değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Pürüzlülük etkisinin incelenebilmesi için çekme tipi numunelerde yalnızca 0,3 mm yapıştırıcı kalınlığı için testler yapılmıştır. Kesme tipinde ise yapıştırıcı kalınlığı 0,5 mm olan TAST tipi numuneler kullanılmıştır.

Kalınlık etkisi ise 0,3; 0,5 ve 1 mm yapıştırıcı kalınlığına sahip çekme tipi numuneler ve kalınlık değeri 0,25 ile 0,31 mm arasında değişkenlik gösteren SLJ numuneleri kullanılmıştır.

5.1.1. Farklı yüzey işlemleri için pürüzlülük ölçümleri

Alüminyum 2024 T3 plakalara yapılan mekanik yüzey işlemleri sonrası yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. P120, P220, P360 tanecik boyutlu zımpara kâğıtları ve kumlama işlemi yapılarak aşındırılan yüzeylerden aşınma yönü X ve ona dik olan Y yönünde ölçümler alınmıştır.

Her yüzeyden aynı doğrultuda iki farklı çizgi boyunca veri toplanmıştır. Çizik, ezik vb. faktörlerden etkilendiği düşünülen veriler değerlendirilmeye alınmamıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları

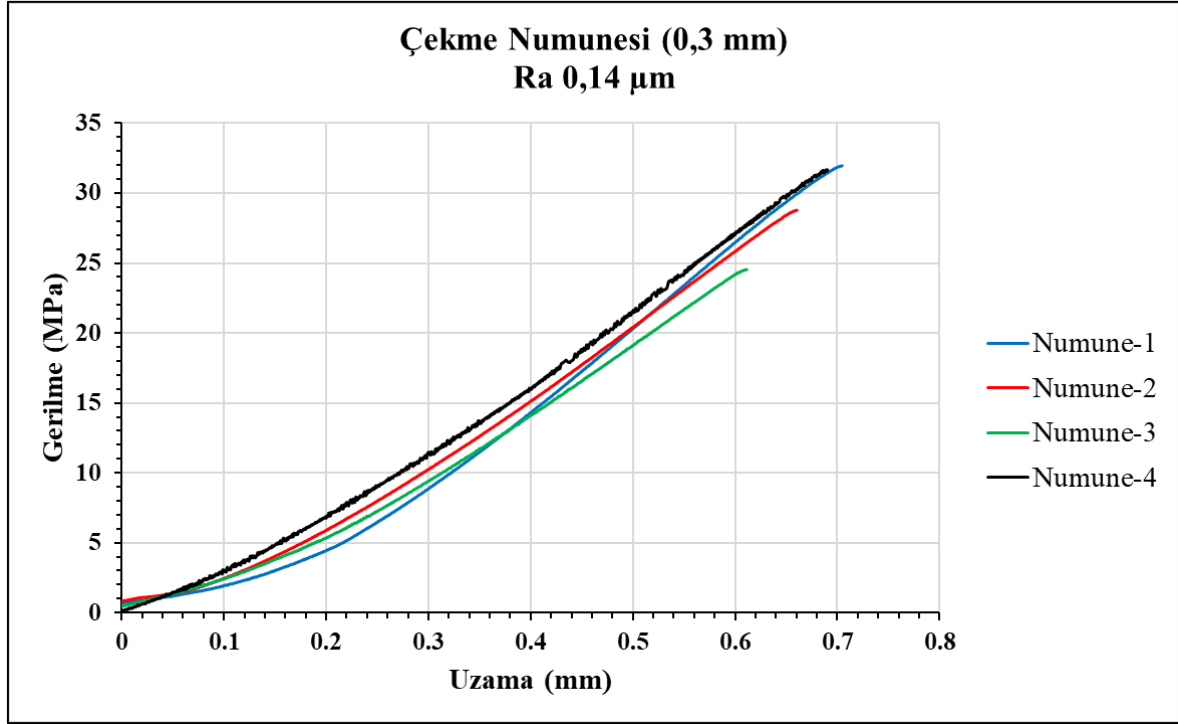
Yüzey	İşlem Yönü	Ölçüm Yönü	Ra (μm)	Rz (μm)
İşlenmemiş	-	X	0,14	1,03
	-	Y	0,12	0,69
Aşındırılmış (P120 Kâğıt)	X	X	1,08	10,12
	X	Y	1,32	9,82
Aşındırılmış (P220 Kâğıt)	X	X	0,69	4,43
	X	Y	0,79	7,47
Aşındırılmış (P360 Kâğıt)	X	X	0,37	4,64
	X	Y	0,59	5,58
Kumlanmış (İnce silis kum)	Her yönde	X	2,27	14,86
	Her yönde	Y	2,28	16,37
Rastgele yönde aşındırılmış (P220 Kâğıt)	Her yönde	X	0,56	5,47
	Her yönde	Y	0,61	5,2

Çizelge 5.2. Yüzey işlemine karşılık kabul edilen pürüzlülük değerleri

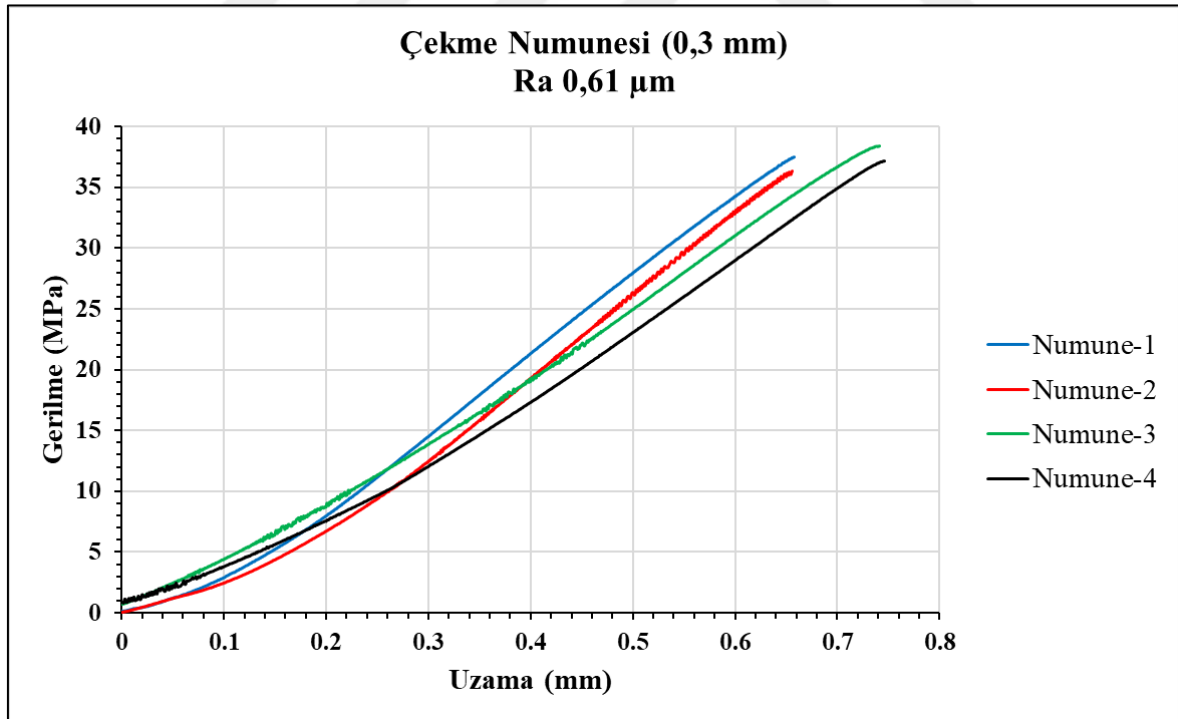
Yüzey	Ra (μm)	Rz (μm)
İşlenmemiş	0,14	1,03
Rastgele yönde aşındırılmış (P220 Kâğıt)	0,61	5,2
Kumlanmış (İnce silis kum)	2,27	14,86

5.1.2. Çekme tipi numunelerle ait test sonuçları

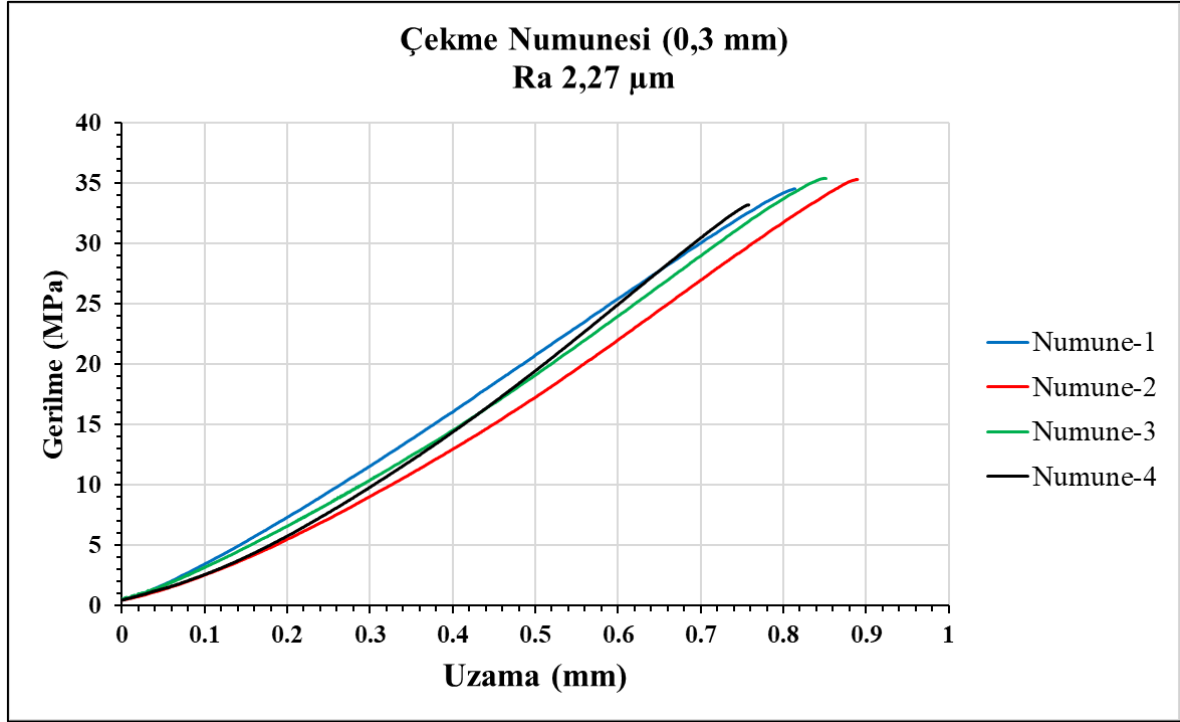
0,3 mm sabit yapıştırıcı kalınlığı için farklı pürüzlülük değerlerine karşılık gelen kopma yükleri Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Farklı kalınlık değerleri için yapılan testlerdeyse Ra 0,61 μm referans değerine karşılık gelen P220 kâğıt ile rastgele aşındırılmış test numuneleri kullanılmıştır. 0,3; 0,5 ve 1 mm yapıştırıcı kalınlığı için yapılan test sonuçları Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



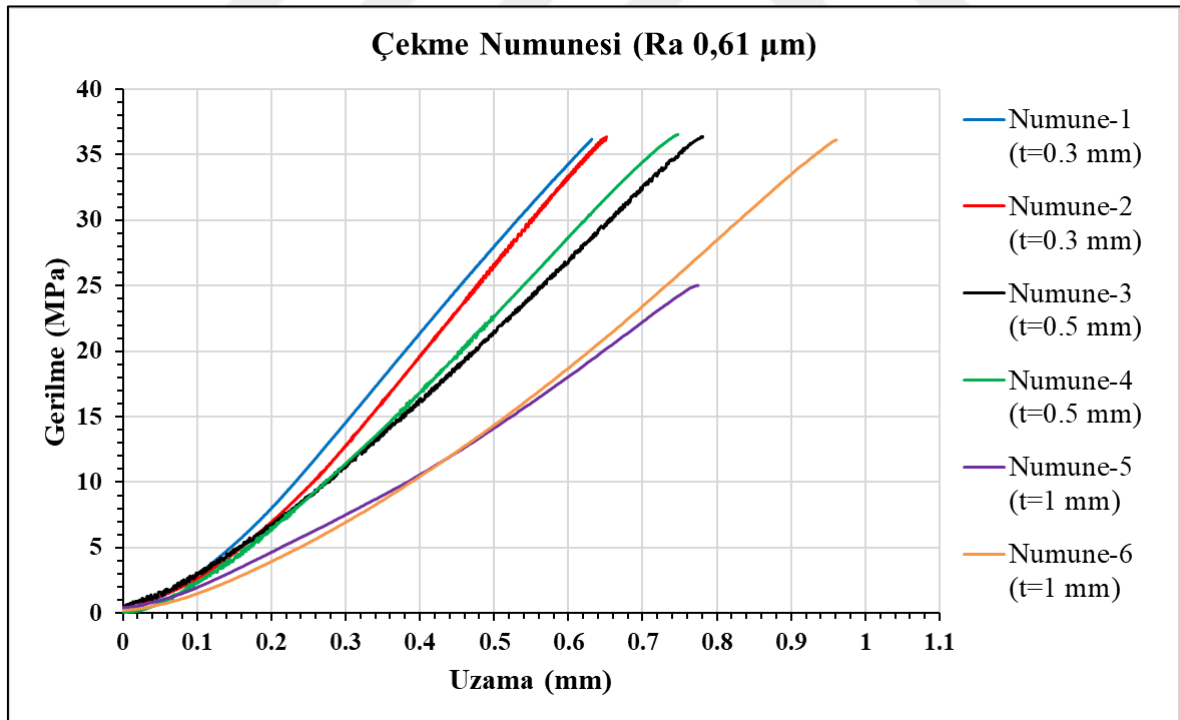
Şekil 5.1. Yüzey işlemi uygulanmamış çekme numuneleri için test sonuçları



Şekil 5.2. P220 kağıtla rastgele aşındırılmış çekme numuneleri için test sonuçları



Şekil 5.3. Kumlama işlemi yapılmış çekme numuneleri için test sonuçları



Şekil 5.4. Kâğıtla aşındırılmış numunelerin farklı kalınlıklar için test sonuçları

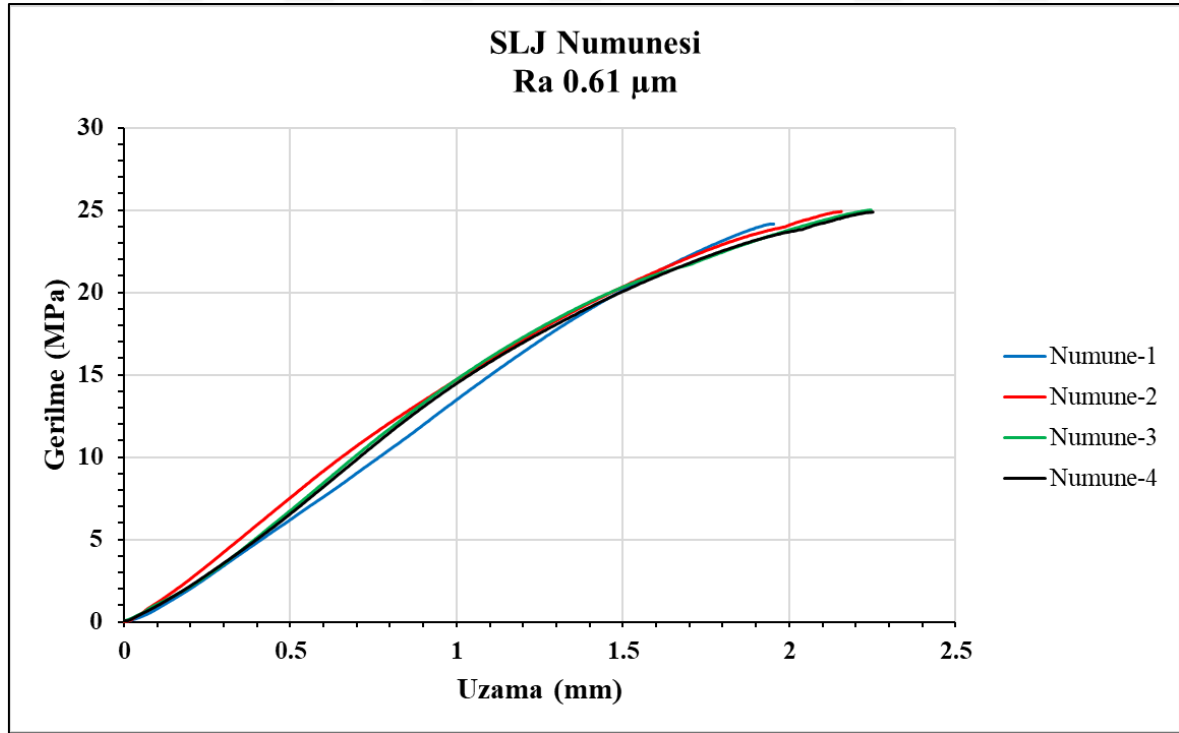
5.1.3. SLJ tipi numunelerle yapılan test sonuçları

SLJ tipi numunelerin hazırlık aşamasında fikstür kullanılmadığı için yapışma alanı ve kalınlıklarında farklılık oluşmaktadır. Hazırlanmış numune ölçüleri kumpas yardımıyla ölçülerek yaklaşık yapıştırıcı kalınlığı ve yapışma yüzey alanları hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. SLJ tipi numuneler için yapıştırıcı kalınlığı ve yapışma alanı

SLJ Numunesi	Yaklaşık Kalınlık (mm)	Yapışma Alanı (mm ²)
Numune-1	0,24	330
Numune-2	0,27	355
Numune-3	0,31	350
Numune-4	0,29	360

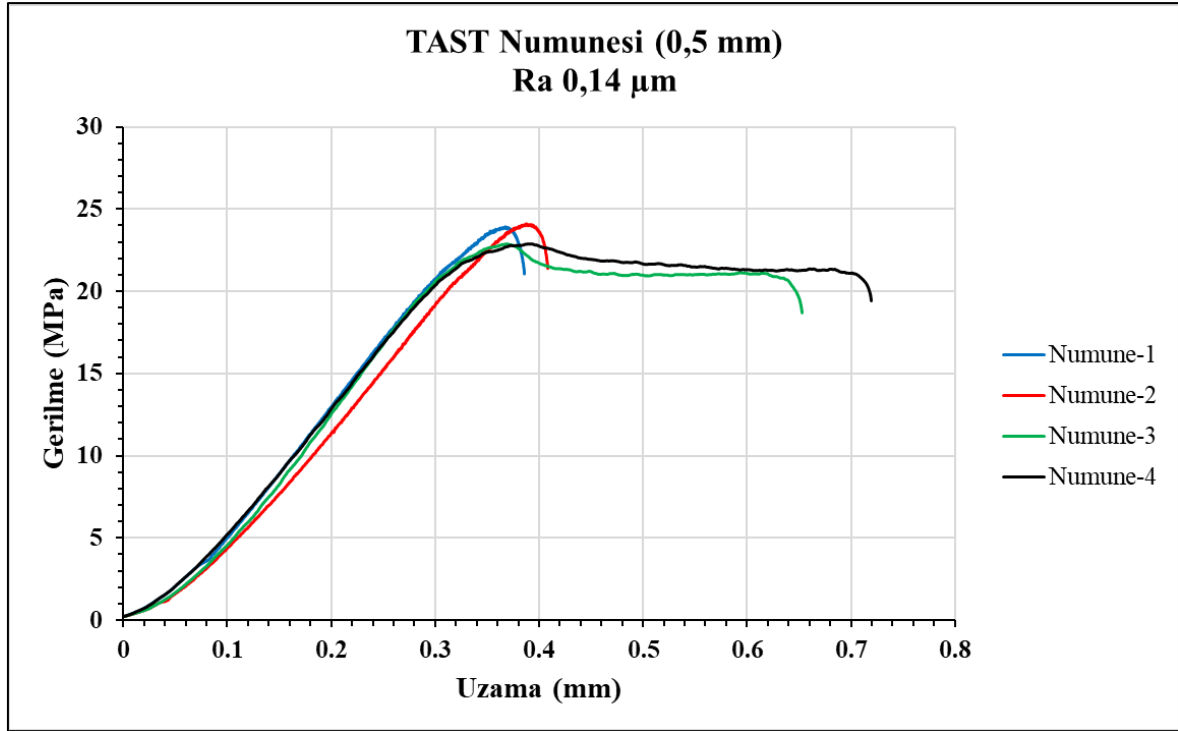
SLJ tipi numunelere ait çekme testi sonuçları Şekil 5.5'te verilmiştir. Numunelerin yüzeyleri P220 kâğıt ile rastgele aşındırılmış olup referans pürüzlülük değeri Ra 0,61 μm 'dir.



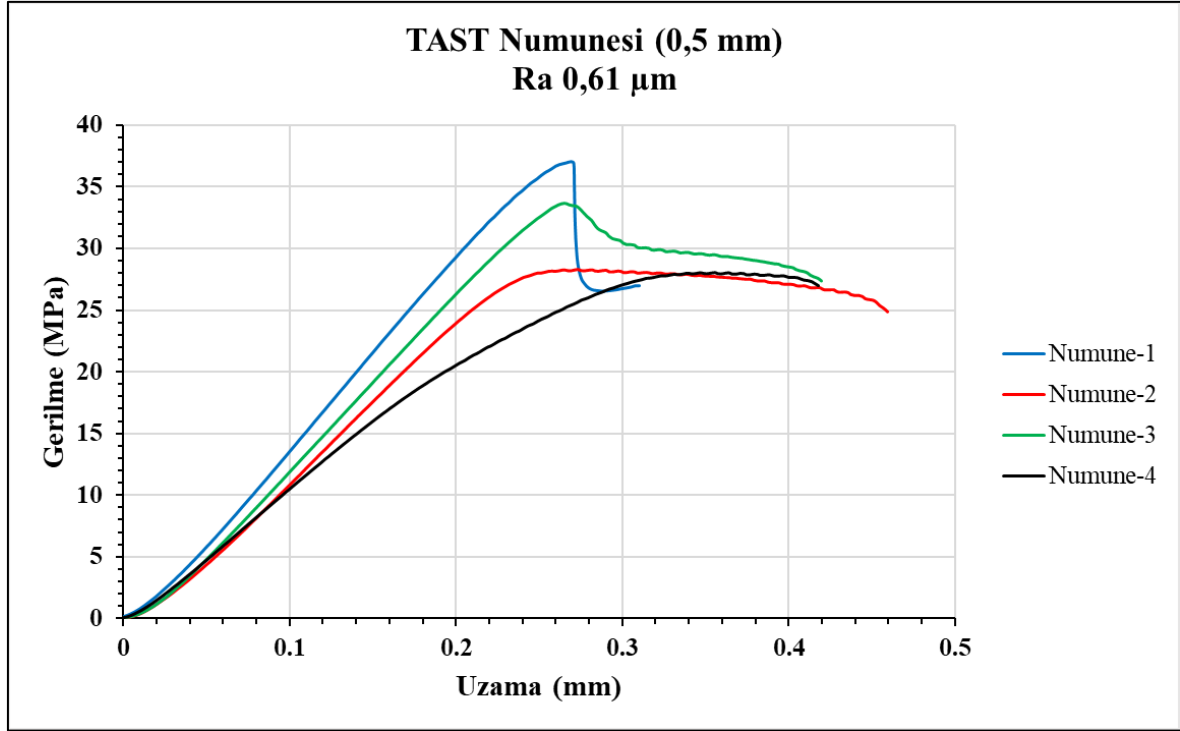
Şekil 5.5. SLJ tipi kesme numunelerine ait çekme testi sonuçları

5.1.4. TAST tipi numunelerle yapılan test sonuçları

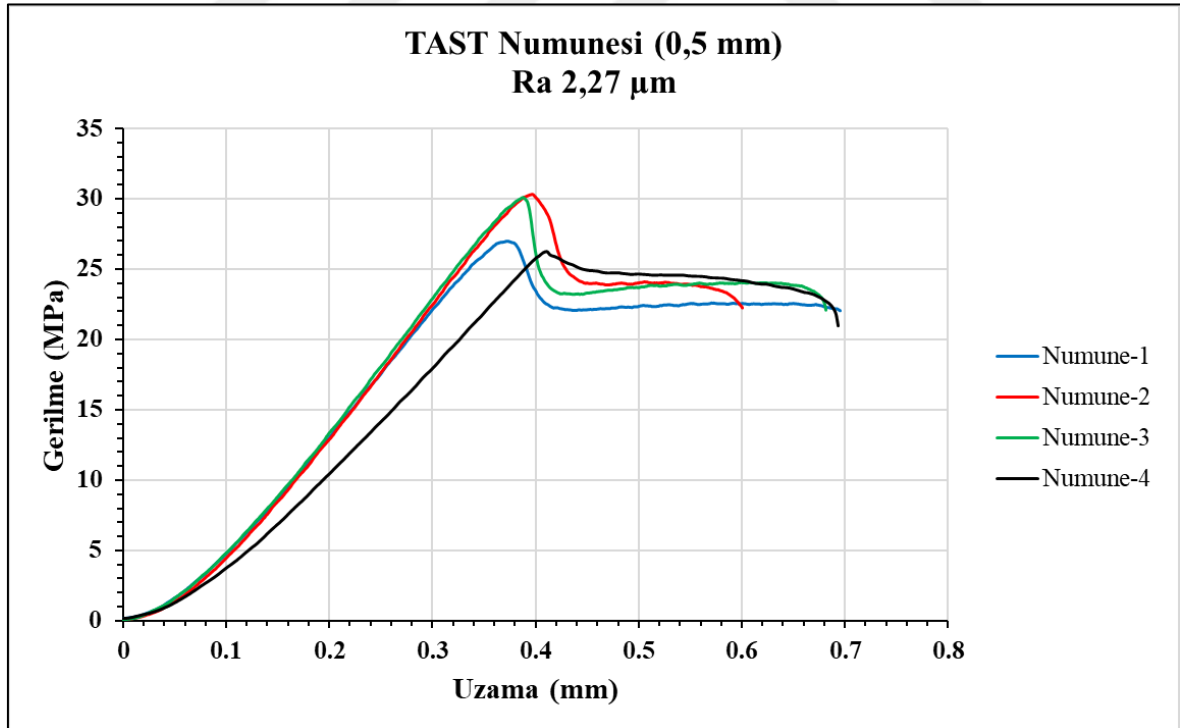
TAST tipi numunelerde yapıştırıcı kalınlığı sabit olup 0,5 mm'dir. Bu numunelerde yalnızca yüzey pürüzlülüğü etkisi incelenmiştir. Test sonuçları Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.6. Yüzey işlemi uygulanmamış TAST numuneleri için test sonuçları



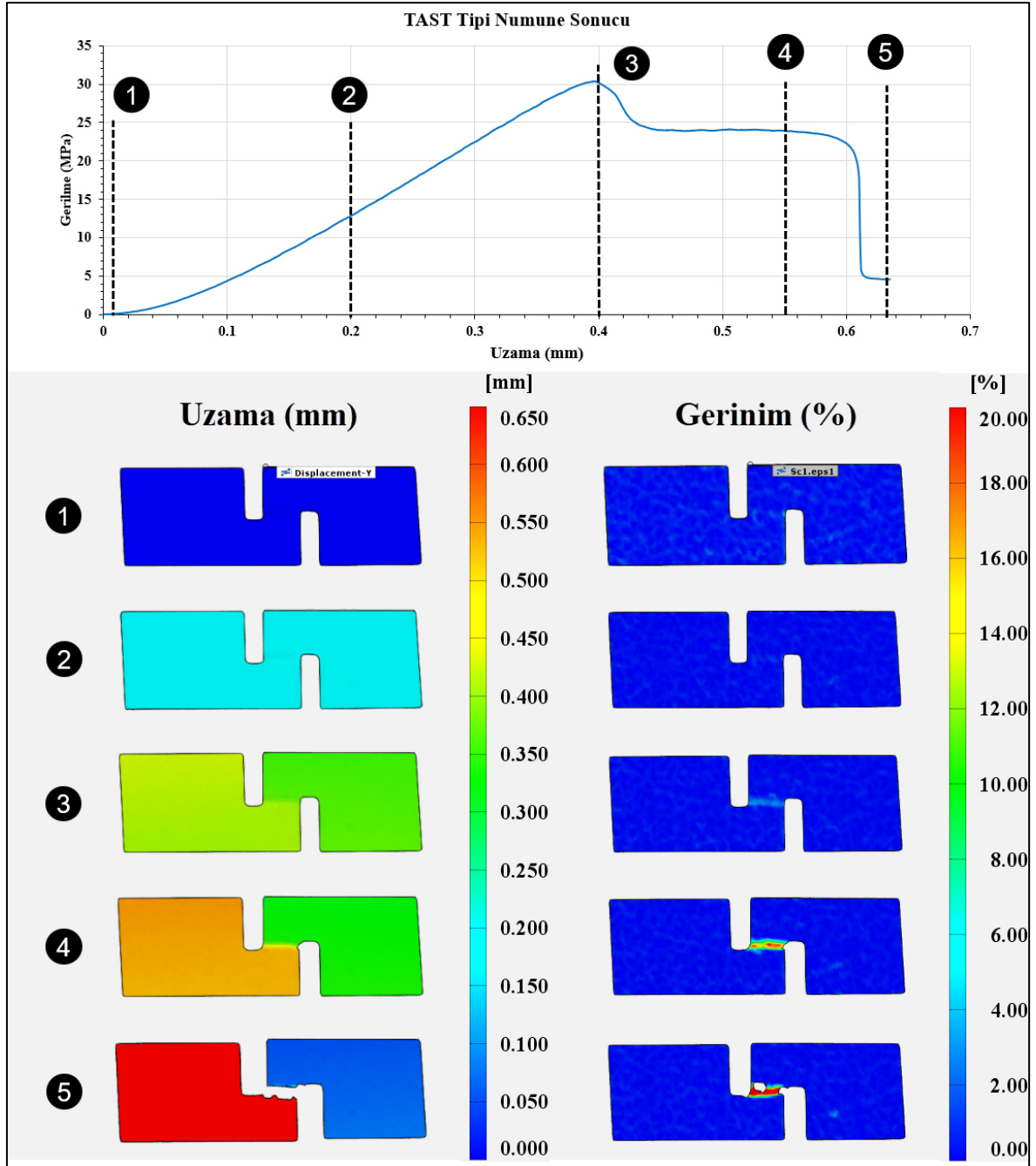
Şekil 5.7. P220 kağıtla rastgele aşındırılmış TAST numuneleri için test sonuçları



Şekil 5.8. Kumlama işlemi yapılmış TAST numuneleri için test sonuçları

5.1.5. DIC yöntemi kullanılarak alınan ölçümler

Bazı TAST tipi numuneler için DIC görüntüleme yöntemi kullanılmıştır. Numune yüzeyinden alınan görüntüler ile çekme cihazından alınan yüke bağlı uzama verisi eşleştirilerek numune üzerindeki deplasman ve gerinimler incelenmiştir (Şekil 5.9).



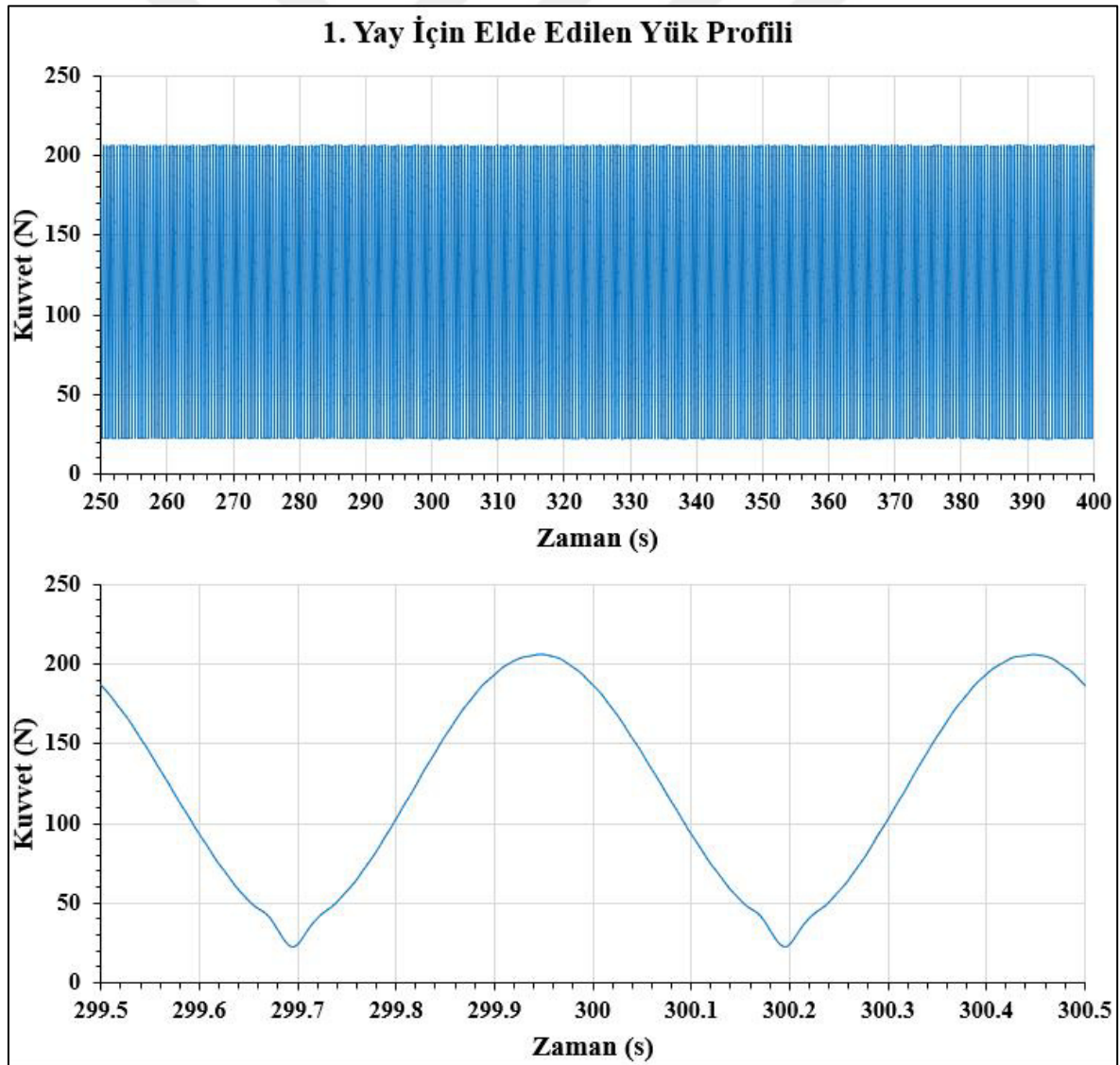
Şekil 5.9. DIC görüntülerinin test verisi ile eşleştirilmesi

5.2. Dinamik Yük Koşulu Kapsamındaki Sonuçlar

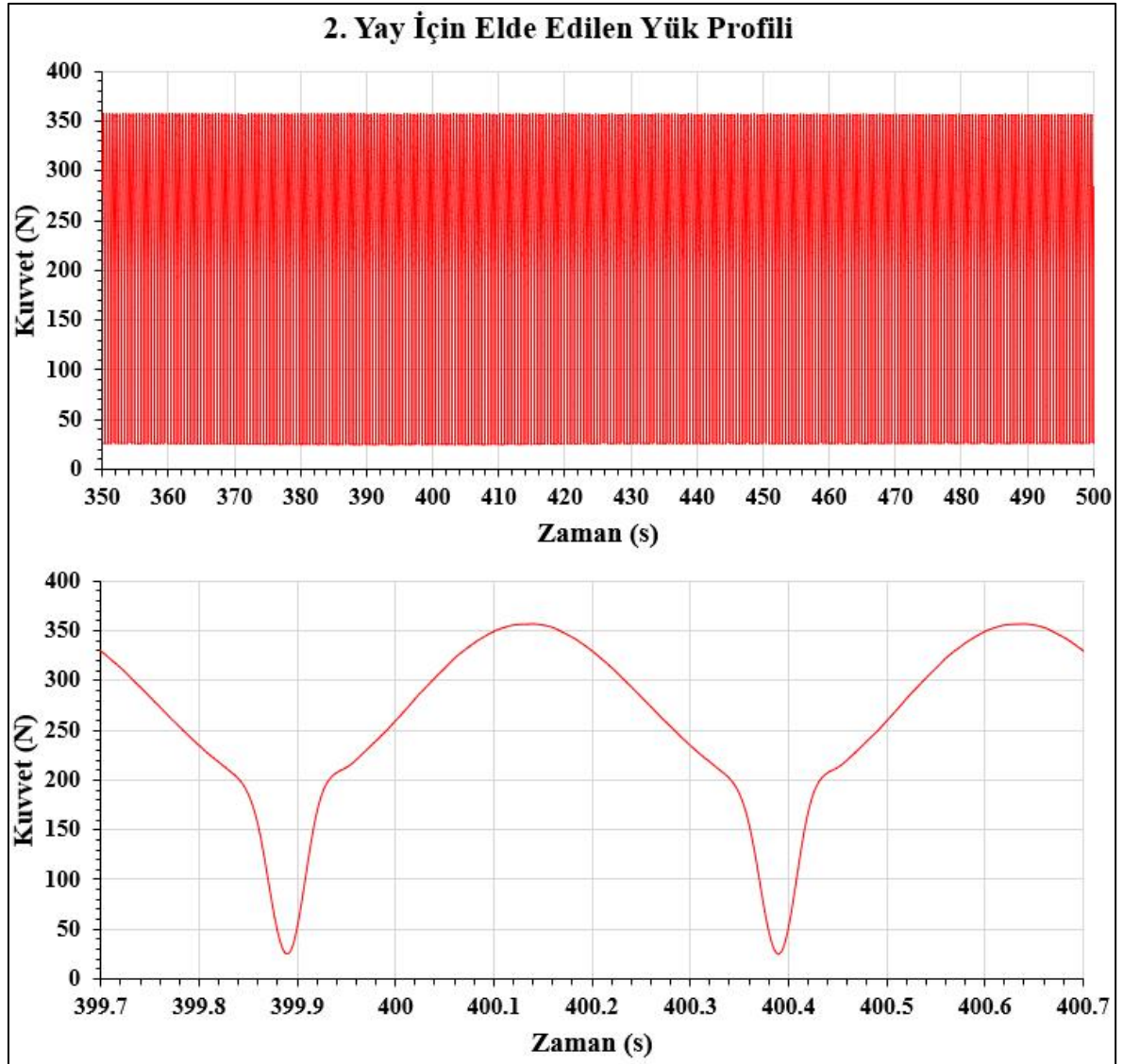
Dinamik yük koşulu kapsamında sistemden zamana bağlı yük verisi, gerinim ölçer verisi ve sıcaklık verisi toplanmıştır. Dinamik zorlama sonrası numuneler çekme testine tabi tutulmuş ve kalan dayanımları incelenmiştir.

5.2.1. Yük hücresi ölçüm sonuçları

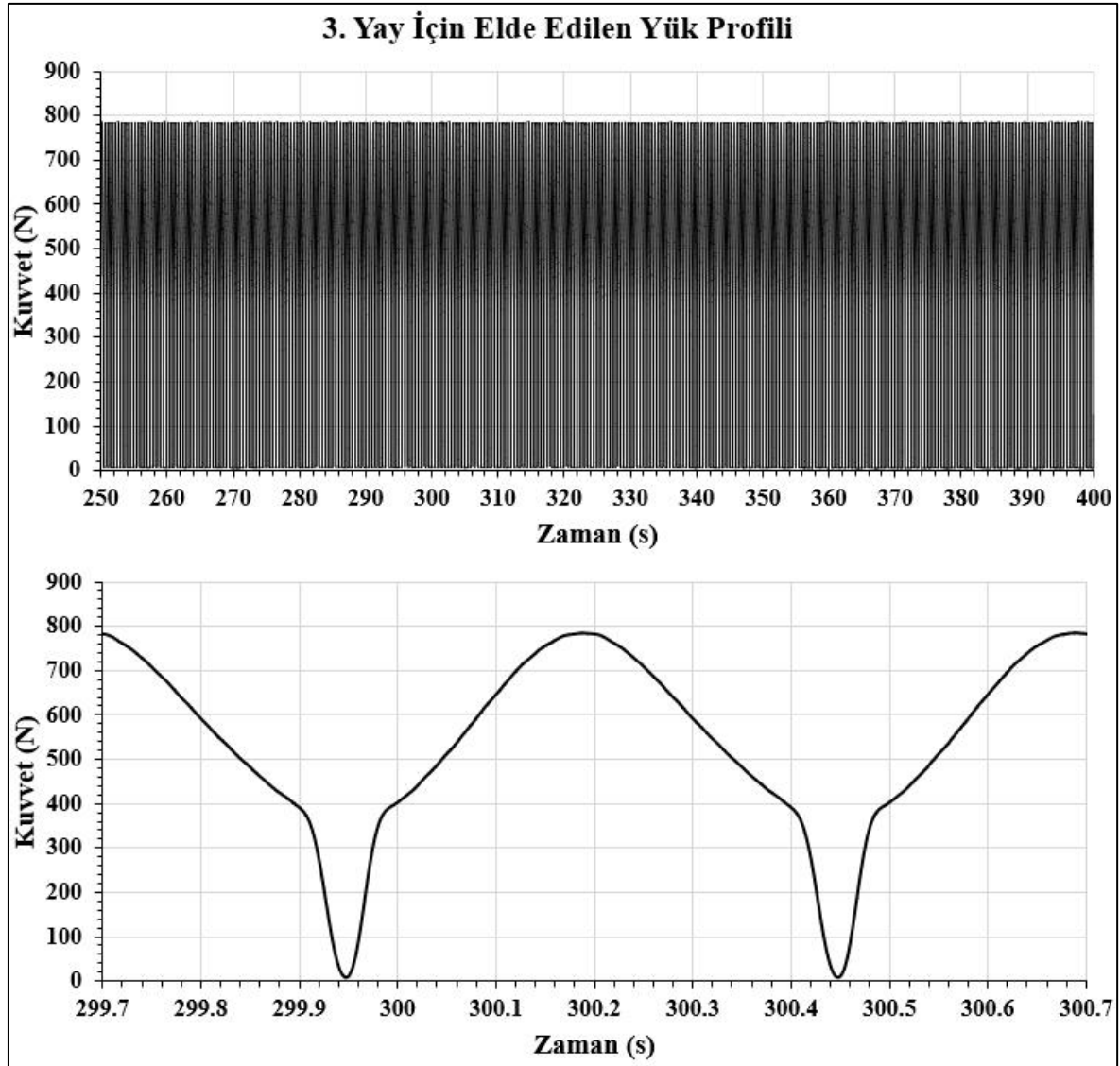
Testler sırasında yük hücresinden toplanan veriler incelenmiş ve zamana bağlı kuvvet grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen profiller Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Çizelge 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.10. 1. yay için ölçülen yük profili



Şekil 5.11. 2. yay için ölçülen yük profili



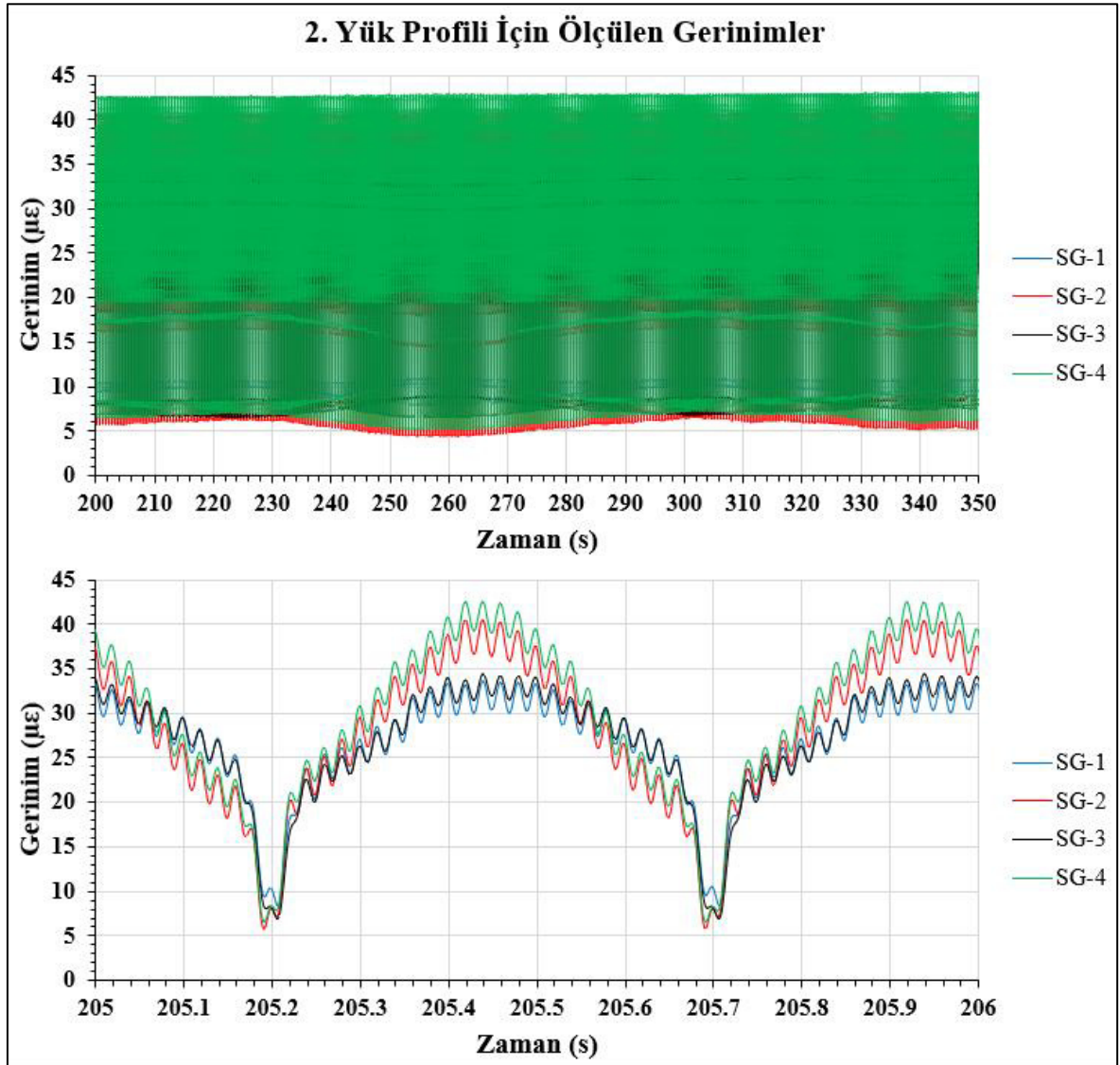
Şekil 5.12. 3. yay için ölçülen yük profili

Çizelge 5.4. Yük profillerine ait veriler

Yük Profili	Fmaks (N)	Fmin (N)	Fort (N)	Genlik (N)
1	206	22	114	92
2	356	26	191	165
3	784	10	397	387

5.2.2. Gerinim ölçer sonuçları

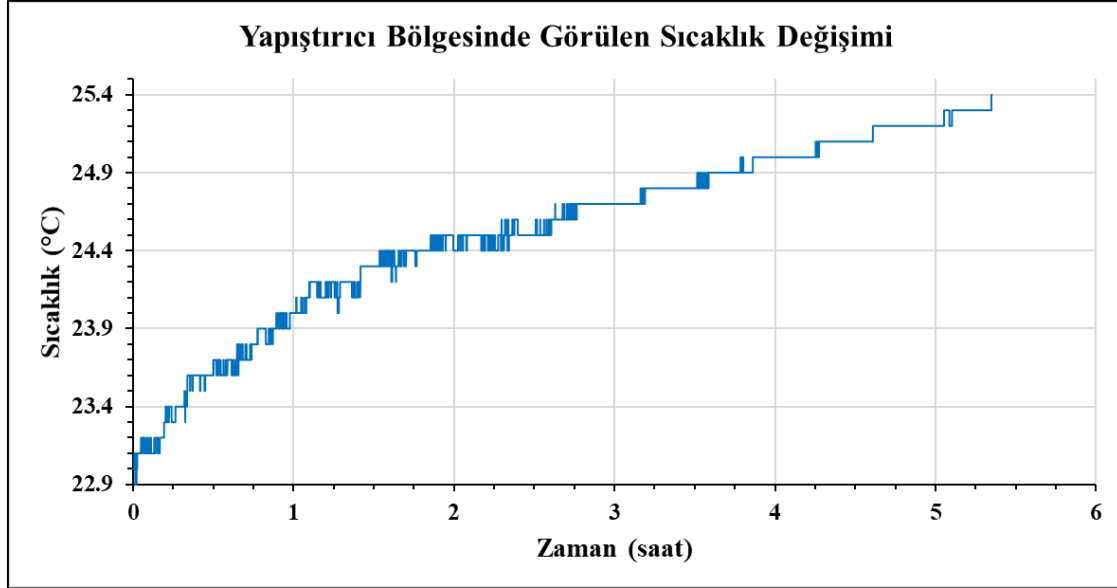
2 numaralı yük profili uygulanan bir testten toplanan gerinim verisi verilmiştir. 1 ve 2 numaralı gerinim ölçerler numunenin alt çenede bulunan kısmında (yay tarafında) yer almaktadır. Yukarı yönde bulunanlar ise 2 ve 4 numaralıdır. Gerinim verileri Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13. Gerinim ölçer sonuçları

5.2.3. Isıl çift ölçüm sonuçları

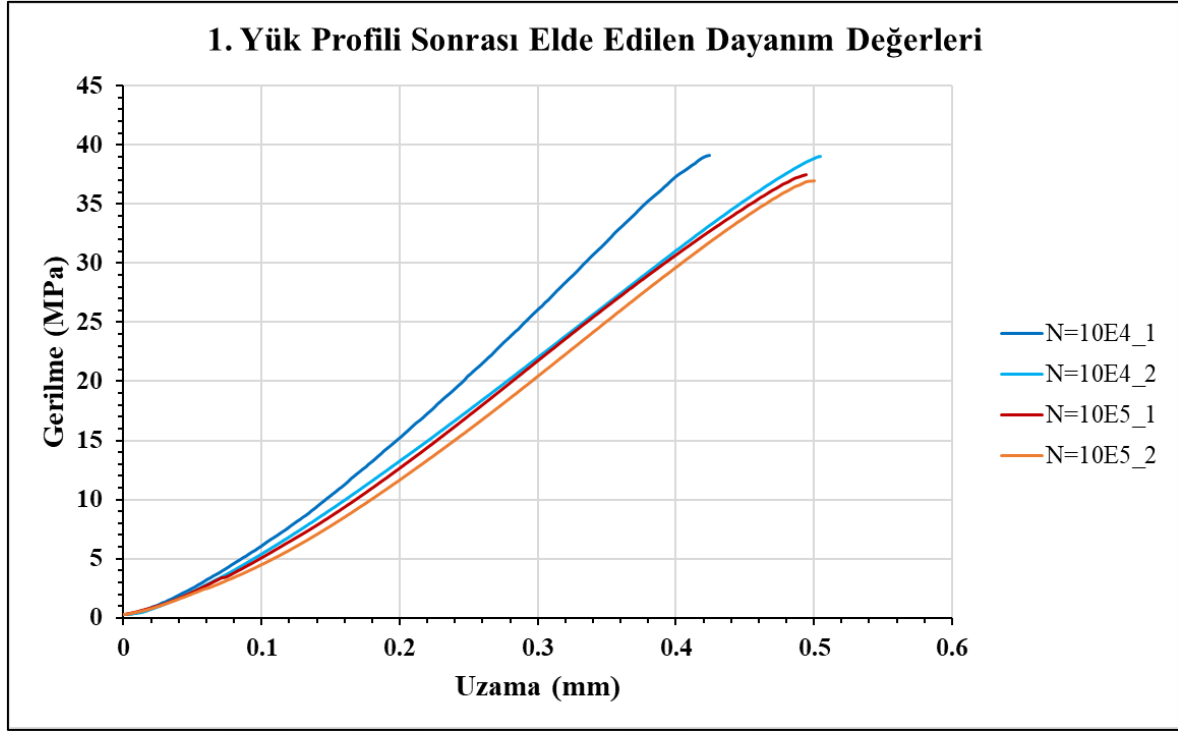
2 numaralı yük profili uygulanan bir testten yaklaşık 5,5 saat sıcaklık verisi toplanmıştır. Şekil 5.14'te zamana bağlı sıcaklık değişimi verilmiştir.



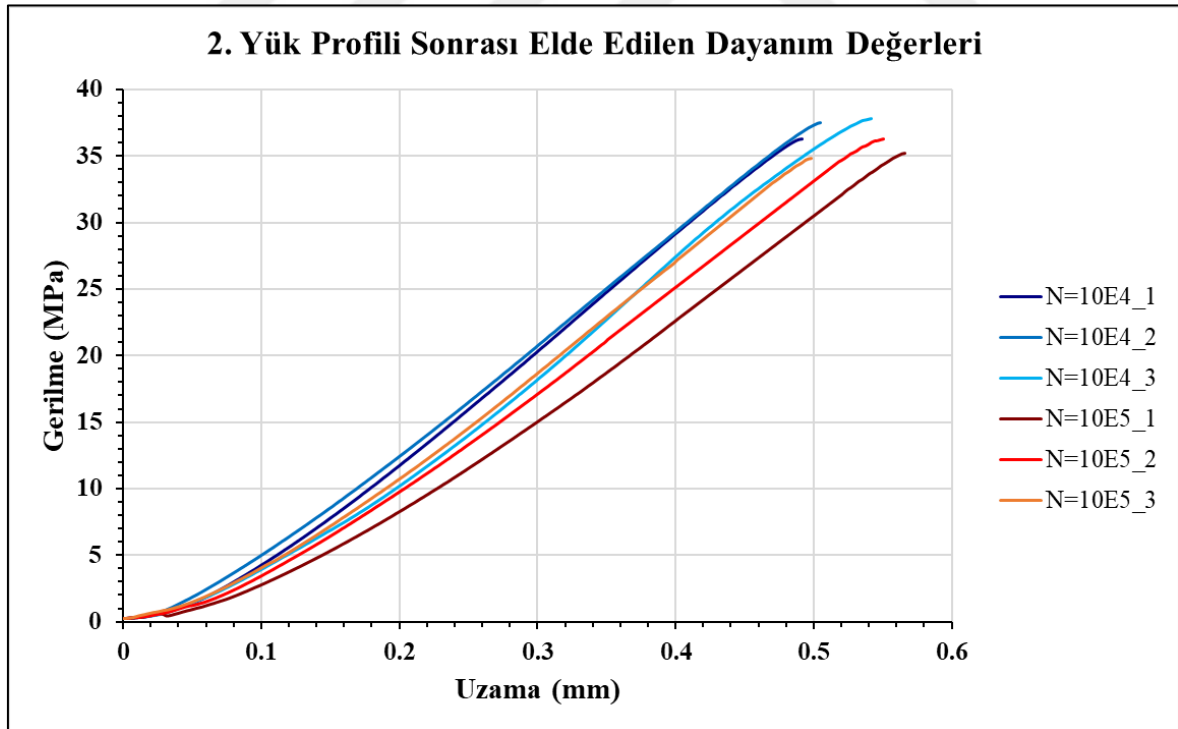
Şekil 5.14. Zamana bağlı sıcaklık değişimi

5.2.4. Dinamik yüke maruz bırakılmış numunelere ait sonuçlar

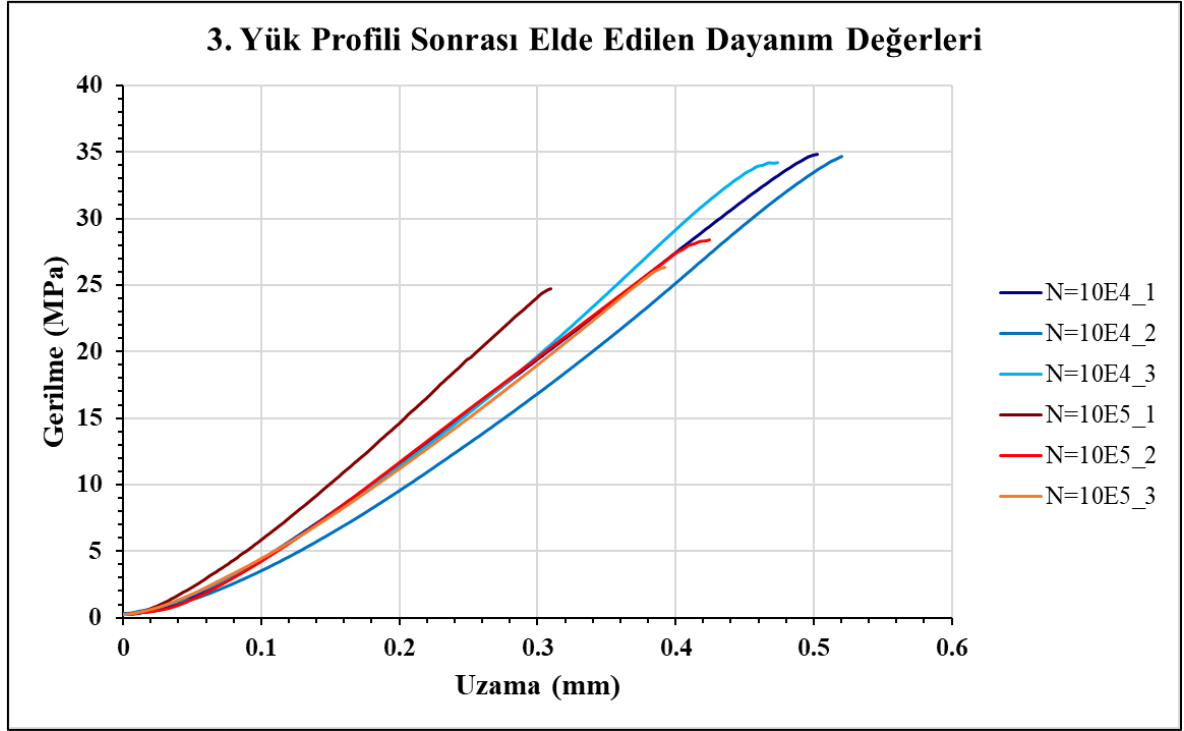
Farklı genel değişken yük profili ve çevrim sayısına maruz bırakılan çekme tipi numunelerin dayanımları Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.15. 1. yük profili sonrası numune dayanımları



Şekil 5.16. 2. yük profili sonrası numune dayanımları



Şekil 5.17. 3. yük profili sonrası numune dayanımları



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar özetlenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

6.1. Statik Yük Koşulu Kapsamındaki Sonuçların Değerlendirilmesi

6.1.1. Yüzey işlemlerinin değerlendirilmesi

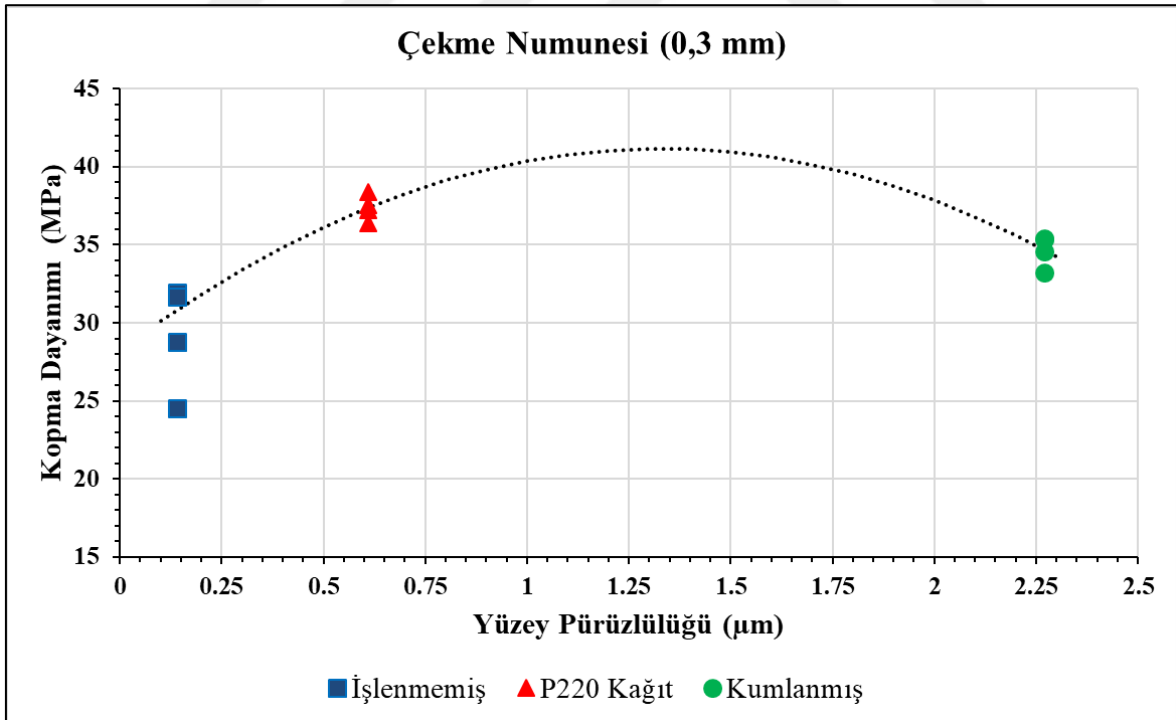
Yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Genel davranış olarak kullanılan kâğıdın tanecik boyutu arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.
2. Kumlama işlemi diğer işlemlere göre pürüzlülüğün en fazla olduğu işlemidir.
3. Tek yönde aşındırılmış yüzeylerde aşınma doğrultusuna dik yönde (Y yönü) pürüzlülük değerleri Rz ve Ra'nın daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun tek yönde aşınma sonucunda şekilde gösterilen yüzey şeklinin bir sonucu olduğu değerlendirilmiştir.
4. X yönünde ölçüm iğnesi aşınma doğrultusunda ilerlediği için Y yönüne göre daha az sayıda tepe ve çukur noktasıyla karşılaşmaktadır. Bu nedenle Ra ortalama değeri X yönünde daha düşük çıkmaktadır.
5. Rz değeri ölçüm aralığı içindeki tepe ve çukur noktaları arasında ölçülen maksimum fark olduğundan, Y yönünde yüksek değer görülme olasılığı daha fazladır. Ölçüm sonuçlarında da Y yönünde daha yüksek değerler elde edilmiştir.
6. Rastgele yönlerde aşındırılmış numunelerde pürüzlülük değerlerinin her iki yön için de birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.
7. Kumlama işleminde X ve Y yönü için oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu işlemin diğer işlemlere göre yüzey üzerinde daha düzgün aşındırma ağıladığı görülmüştür.

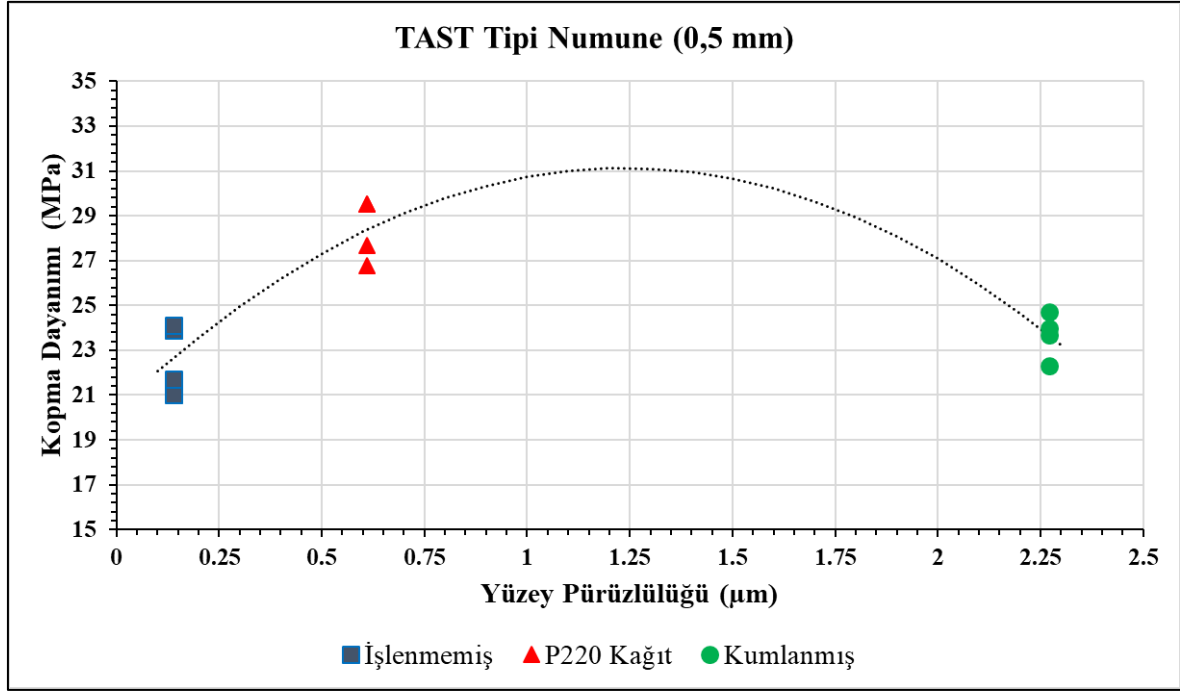
6.1.2. Yüzey pürüzlülüğü etkisinin değerlendirilmesi

Pürüzlülük etkisinin incelenmesi için çekme ve TAST tipi numuneler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğün, bu malzemelerle yapılan bağlantıların dayanımı üzerinde etkili bir parametre olduğu görülmüştür. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de gösterildiği gibi en düşük pürüzlülük değerine sahip işlenmemiş yüzeyde en düşük dayanım değeri elde edilmiştir. P220 kum boyutuna sahip kâğıt ile rastgele yönlerde aşındırılmış yüzeye sahip numuneler en yüksek dayanımı göstermiştir. Pürüzlülük seviyesinin en yüksek olduğu kumlanmış numunelerde ise kâğıt ile aşındırma işlemine göre düşük dayanımlar elde edilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü yapıştırıcı tipi ve malzemeye bağlı olarak belirli bir noktaya kadar iyileşme sağlamış ancak artan pürüzlülükle birlikte etkisini kaybetmeye başlamıştır. Artan pürüzlülükle birlikte yüzeyin yapışma alanının artması ancak ıslanabilirliğin düşmesi olası sebeplerden biri olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6.1. Pürüzlülüğe bağlı olarak elde edilen kopma gerilmeleri (Çekme Tipi)



Şekil 6.2. Pürüzlülüğe bağlı olarak elde edilen kopma gerilmeleri (TAST tipi)

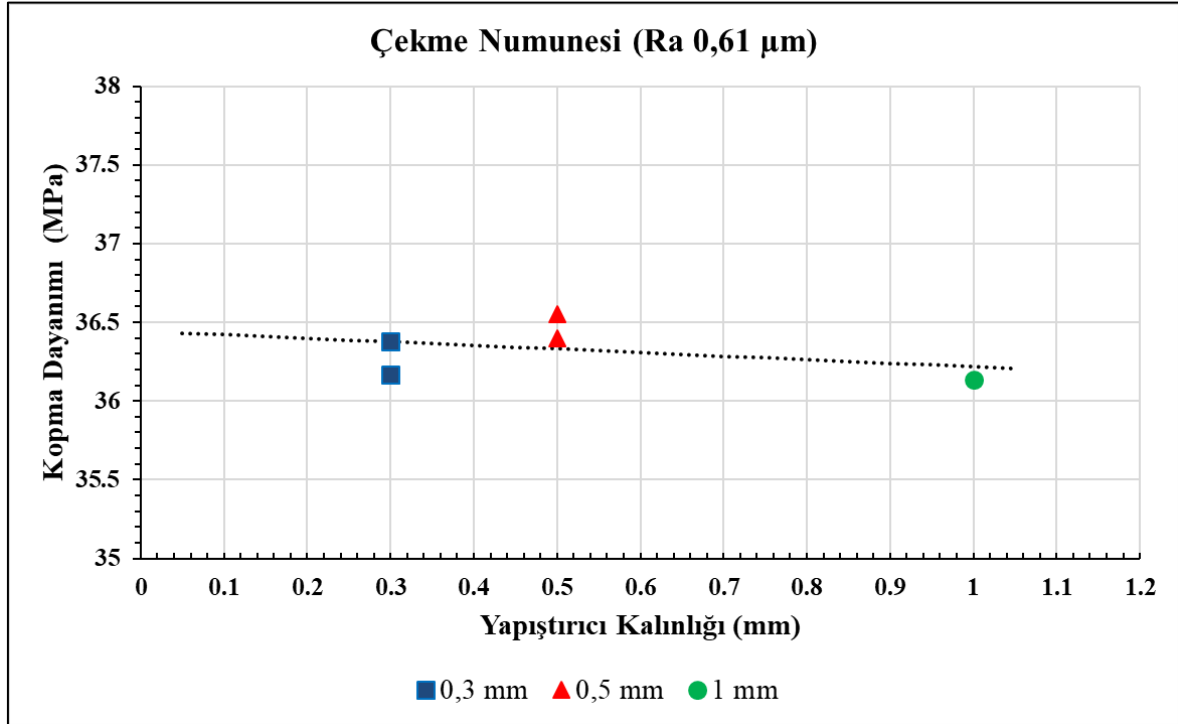
İşlenmemiş yüzeye ait baz numuneler beklenenden daha düşük dayanım göstermiştir. Düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip bu numunelerde yapışma problemi gözlemlenmiştir. Yapıştırıcı metal ara yüzünden kopan bir TAST tipi numune Resim 6.1’de gösterilmiştir.



Resim 6.1. Adeziv kopma göstermiş TAST tipi numune

6.1.3. Yapıştırıcı kalınlığı etkisinin değerlendirilmesi

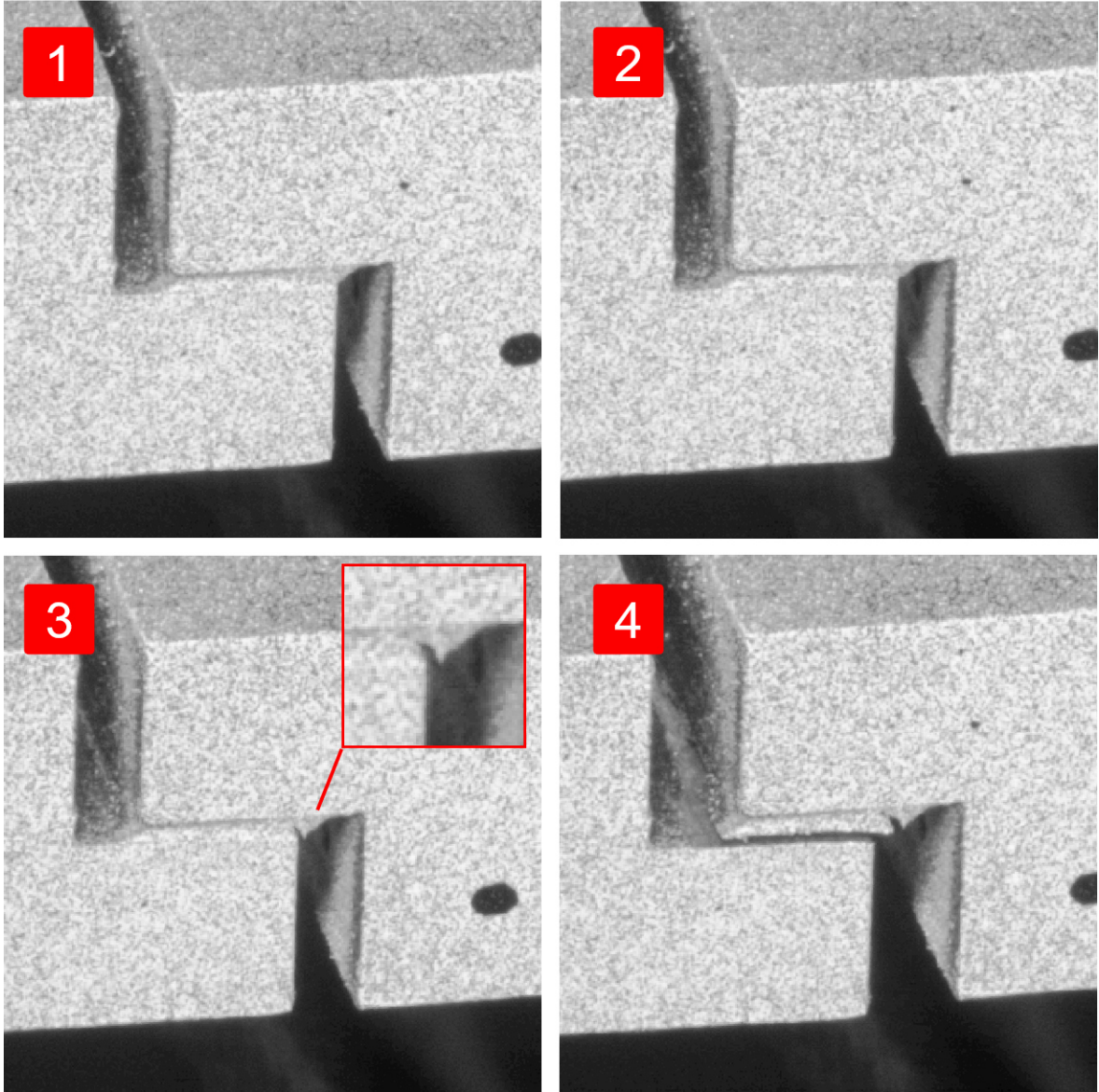
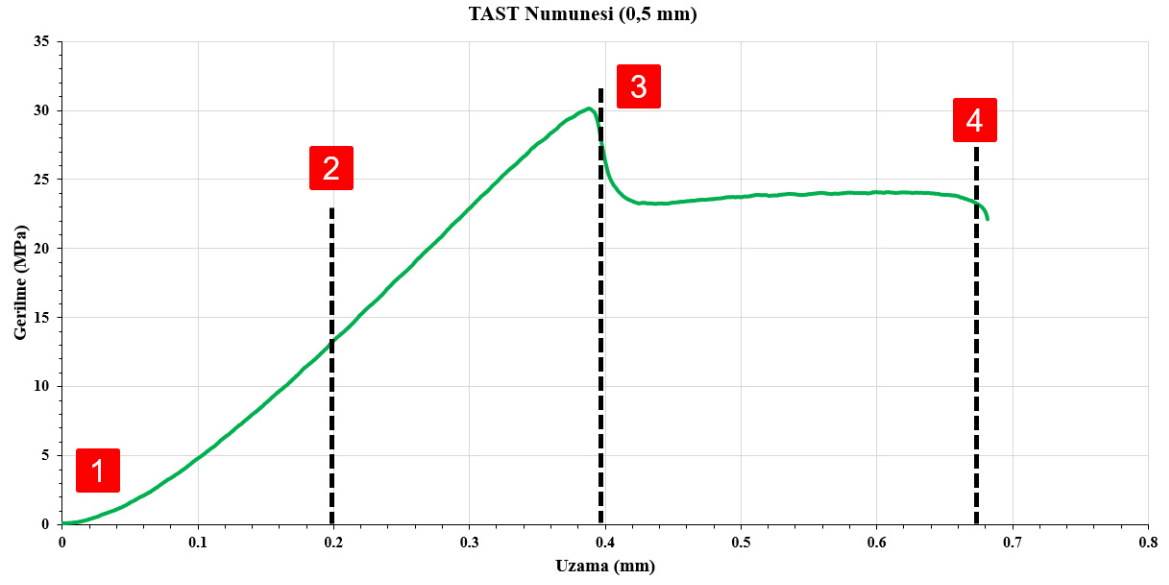
Yapıştırıcı kalınlığının etkisini incelemeye en yüksek dayanımı sergileyen yüzey işleminin uygulandığı numuneler kullanılmıştır. Çekme tipi numuneler P220 tane boyutlu kağıtla rastgele yönlerde aşındırılmış yüzeyler için 0,3, 0,5 ve 1 mm yapıştırıcı kalınlıklarında test edilmişlerdir. Test sonuçları incelendiğinde kalınlığın çekme yönündeki dayanım üzerinde yüzey pürüzlülüğü kadar etkili olmadığı görülmüştür (Şekil 6.3). Kalınlık artışıyla birlikte maksimum uzama miktarı artmış dolayısıyla bağlantı direngenliği düşmüştür. Bununla birlikte yapıştırıcı kalınlığı bağlantının hasar tipini üzerinde etkili olmuştur. 0,3 mm kalınlığa sahip numunelerde adeziv-kohezif hasar birlikte görülürken 1 mm kalınlığındaki numunelerin tamamen kohezif hasara uğradığı görülmüştür. Kesme yükü içinse SLJ ve TAST tipi numuneler kullanılmıştır. Aynı yüzey işlemine sahip ve ortalama 0,28 mm yapıştırıcı kalınlığı bulunan SLJ tipi numuneler, TAST numunelerinden daha düşük dayanım göstermiştir. Bunun sebebinin olarak SLJ tipi numunenin geometrisi olduğu düşünülmektedir. Eksenlerin kaçıklığı nedeniyle yapıştırma bağlantısına eksenel kuvvet haricinde moment yükü de etkimektedir. Bu numunelerde görülen şekil değişikliği nedeniyle kopma uzamaları da daha fazladır.



Şekil 6.3. Yapıştırıcı kalınlığına bağlı olarak elde edilen kopma yükleri

6.1.4. TAST tipi numunelere ait grafiklerin değerlendirilmesi

TAST tipi numunelere ait çekme testi sonuçları incelendiğinde çoğu numunede gerilmenin maksimum olduğu noktadan sonra ani bir düşüş ve sonrasında sabit devam eden bir gerilme-uzama grafiği görölmektedir. Bu davranışın sonucu incelendiğinde numunede bulunan ayırma sacı boşluğuna bir miktar yapıştırıcı taşığı ve bunun da dayanıma katkı sağladığı görölmüşür. Literatürde belirtildiği üzere yapıştırıcı üzerinde oluşan kayma gerilmesi dağılımı incelenecek olursa uç noktalarda bulunan bölgelerde gerilmenin maksimum değerine ulaştığı görölmektedir. Bu nedenle kopmanın ilk gözlendiği yer bu bölge olmaktadır. DIC görüntüleri incelendiğinde de yapıştırıcının ilk olarak uç noktasının hasar görmesi ve daha sonrasında kesit boyunca uzama ve kopma olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 6.4'te taşan yapıştırıcıya ait hasar durumu gerilme grafiğiyle birlikte gösterilmiştir.

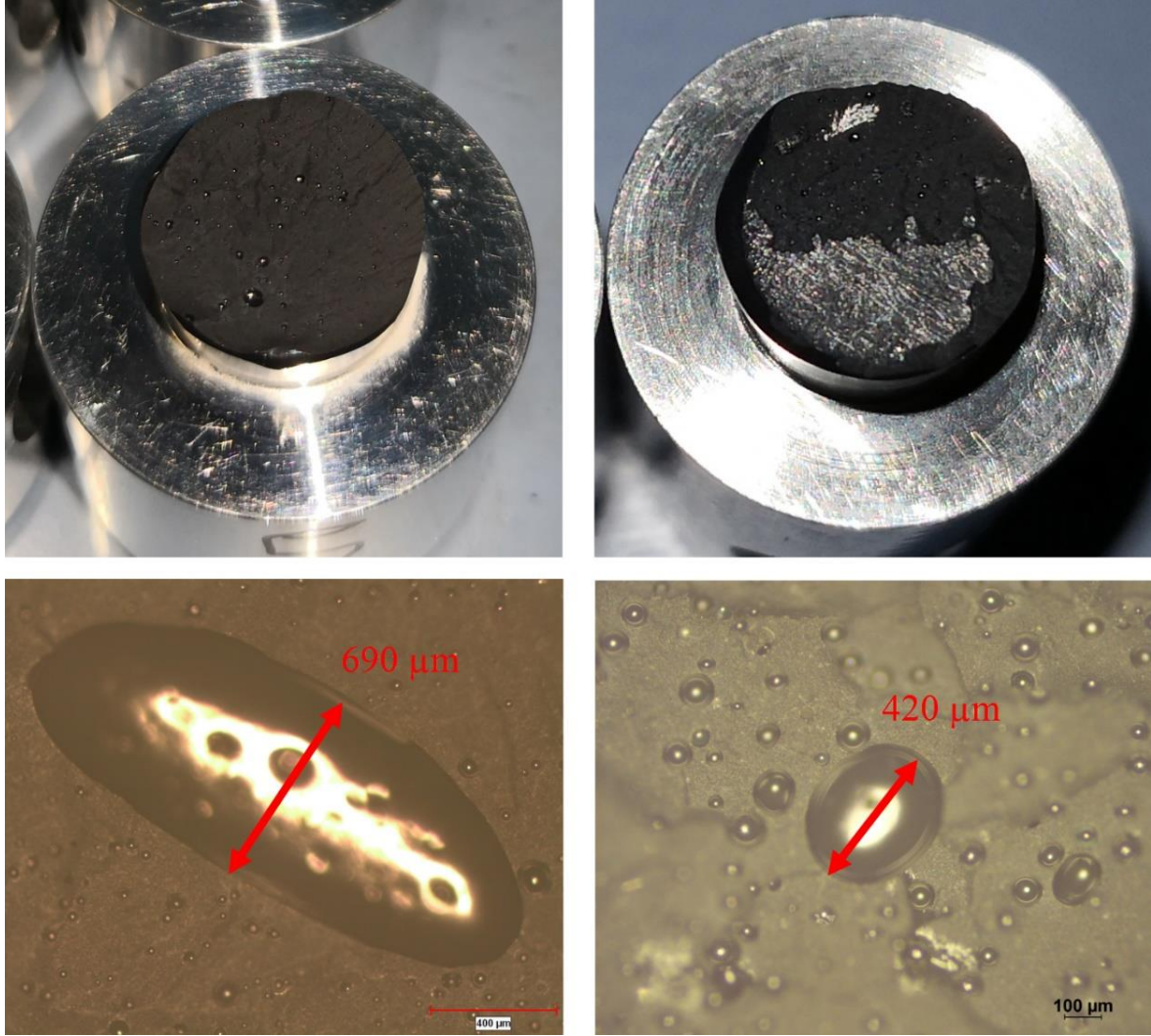


Şekil 6.4. TAST numunesine ait grafiğin DIC ile yorumlanması

6.1.5. Numune boyutu ve düzensizliklerin değerlendirilmesi

Yapıştırıcı dayanımını etkileyen bir diğer faktörse yapıştırıcı içerisindeki düzensizliklerdir. Çekme testleri sırasında bazı numuneler beklenen değerden çok daha düşük dayanım sergilemişlerdir. Bunun üzerine düşük dayanım gösteren numune yüzeyler optik mikroskop yardımıyla incelenmiş ve bu yüzeylerde büyük boyutlarda hava kabarcıklarının hapsediği görülmüştür. Yapıştırıcı içerisinde hapsedilmiş büyük hava kabarcıkları zayıf kesit olan bu düzlemlerden kopmalara neden olmuştur (Resim 6.2).

Yapıştırıcı numuneleri vakum ortamında üretilmediği sürece hava kabarcıkları kaçınılmazdır, ancak burada önemli olan kabarcık boyutlarıdır. Statik testler için üretilen 15 mm çapa sahip çekme tipi numunede görülen maksimum dayanım 37,5 MPa iken dinamik testler için üretilen 8 mm çaptaki numunede 39,1 MPa dayanım görülmüştür. Test sonrası kopma ara yüzleri optik mikroskopla incelendiğinde 15 mm çapta görülen en büyük kabarcık 1,7 mm çapa sahipken, 8 mm için bu değer 0,6 mm olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak numune boyutunun artmasıyla yapıştırıcı katmanındaki düzensizliklerde artmaktadır.

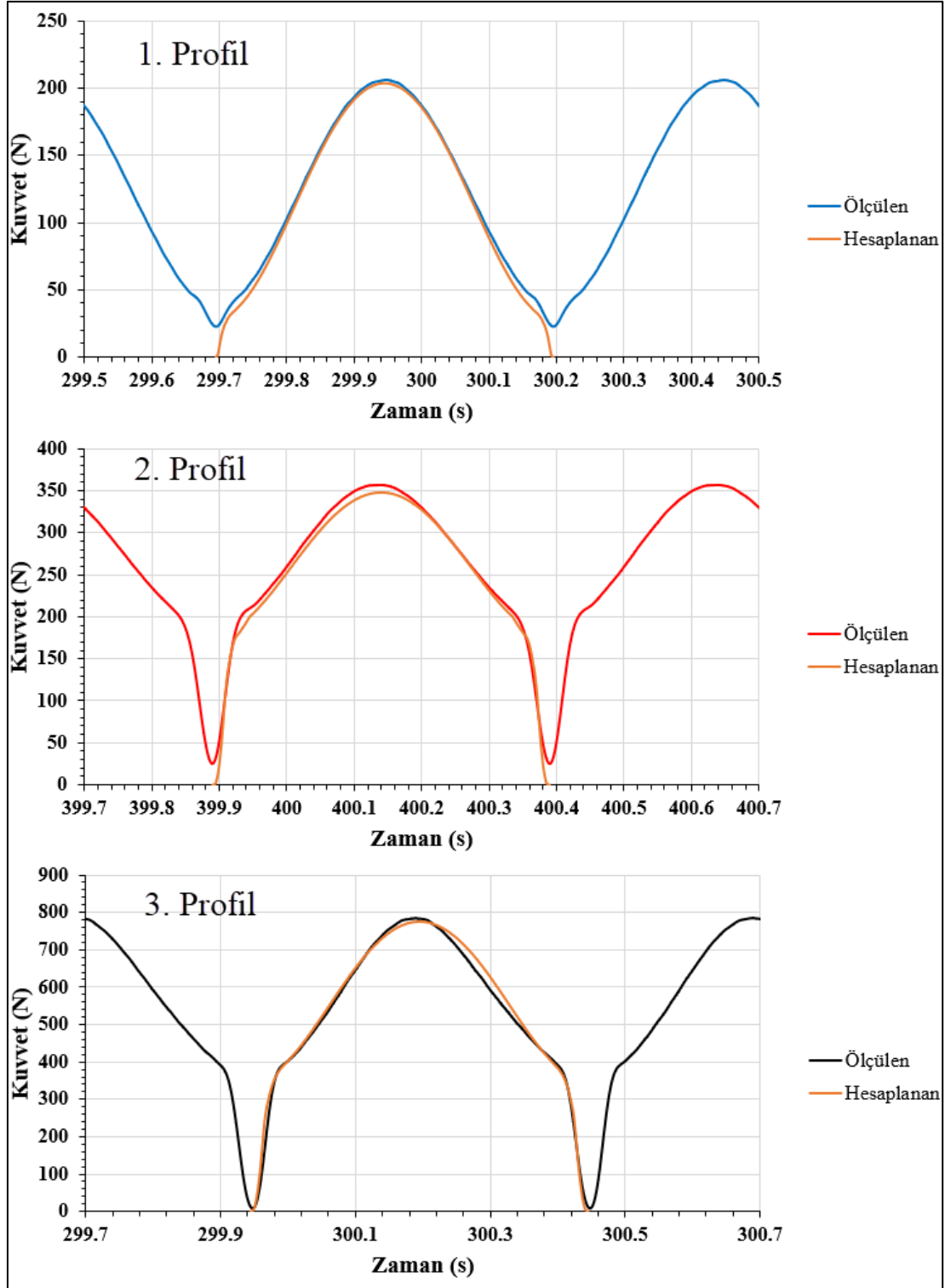


Resim 6.2. Yapıştırıcıda hapsolmuş normal ve büyük boyutlu hava kabarcıkları

6.2. Dinamik Yük Koşulu Kapsamındaki Sonuçların Değerlendirilmesi

6.2.1. Yük hücresi verilerinin değerlendirilmesi

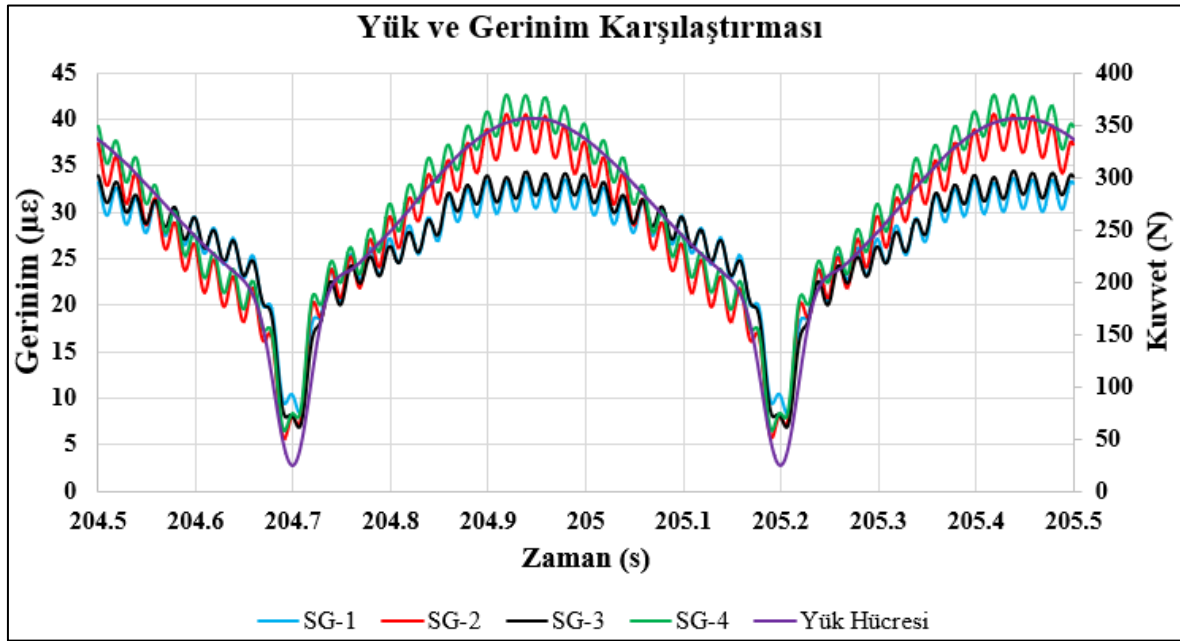
Yük hücresi verileri incelendiğinde sisteme uygulanan yük profilinin hesaplanan teorik yük profiliyle uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Yük profillerinin hesaplanan değerlerle karşılaştırılması

6.2.2. Gerinim ölçer verilerinin değerlendirilmesi

Gerinim verileri incelendiğinde yük profili ile uyumlu bir gerinim-zaman profili elde edildiği görülmüştür (Şekil 6.6). Numunenin her iki parçasında oluşan gerinimlerin birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür ancak alt tarafta bulunan 1 ve 3 numaralı gerinim ölçerlerde daha düşük gerinim değerleri okunmuştur. Oluşan bu farkın sistemin hareketinden kaynaklı dinamik etkilerden oluşabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 6.6. Yüke karşılık ölçülen gerinimler

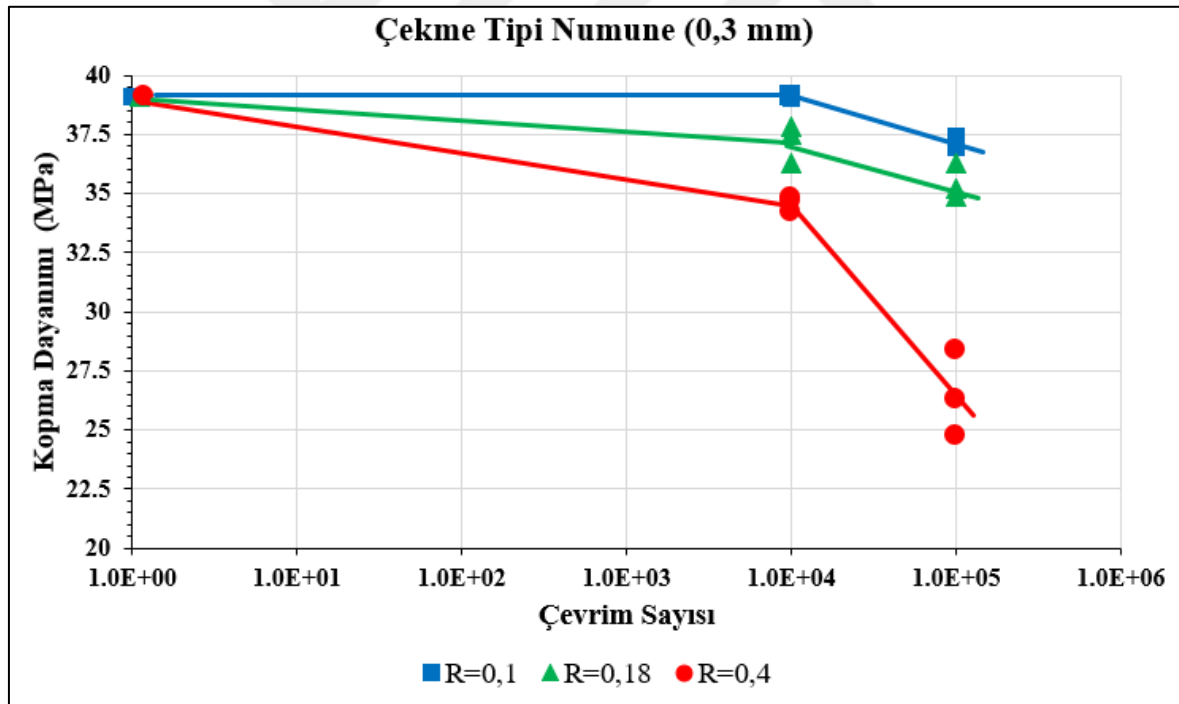
6.2.3. Isıl çift verisinin değerlendirilmesi

2. yük profili uygulanan bir testin başlangıcından itibaren yaklaşık 5,5 saat sıcaklık verisi toplanmıştır. Bu zaman dilimini kapsayan veri incelendiğinde sıcaklığın zamanla arttığı, ancak bu artışın test sonunda 2,4 °C olduğu görülmüştür. Bu artış hızı ile sıcaklığın test sonuçlarına etkisinin olmayacağı değerlendirilmiştir. Sıcaklık artışının az olması numunenin düşük frekansta zorlanması ve test boyunca hareket halinde olmasından kaynaklanmaktadır.

6.2.4. Çekme testi sonuçlarının değerlendirilmesi

Yapılan çalışmada 3 farklı yük oranı ve 2 farklı çevrim sayısı ile genel değişken yüklerle zorlanmış numunelere ait çekme testi sonuçları elde edilmiştir (Şekil 6.7). Elde edilen test verileri incelendiğinde 39,1 MPa referans değerine karşılık gelen $R=0,1$ ve $R=0,2$ yük oranı için 105 çevrim sayısına kadar kayda değer bir mukavemet kaybı görülmemiştir. $R=0,4$ 'te ise 105 çevrim sonrası dayanım değerlerinin 30 MPa seviyesinin altına indiği görülmüştür.

Elde edilen veriler sonucunda $R=0,1$ ve $R=0,2$ için önce bölümlerde özellikleri belirtilen yapıştırma bağlantısının sürekli mukavemete ($>10^6$ çevrim) sahip olacağı düşünülmektedir. $R=0,4$ değeri içinse farklı çevrim sayılarında testler yapılarak mukavemet sınırı belirlenmelidir.



Şekil 6.7. Yük oranı ve çevrim sayısına karşılık mukavemet değerleri

6.3. Öneriler

Yapılan çalışma ile yapıştırma bağlantısı tasarımı için kullanılacak malzeme türü ve yapıştırıcının tek başına yeterli olmadığı, bunları etkileyen faktörlerin de incelenmesi gerekliliği görülmüştür. Yapıştırma bağlantısı tasarımı yapılırken yük durumuna ve üretim yöntemine uygun bağlantı şekli ve boyutu kararlaştırıldıktan sonra, dayanıma etki edebilecek diğer faktörlerin de değerlendirilmesi gereklidir. Çünkü yapıştırıcı kimyası, yüzey özellikleri, ortam şartları ve oluşabilecek kusurlar nedeniyle bağlantı tasarımında hesaplanan mukavemet değerleri değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle yapılan tasarımdan daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için tasarlanan yapıştırma bağlantısının üretim sürecinde karşılaşacağı işlemleri yansıtacak test kuponları üretmek ve bu numuneleri test etmek gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. Koller, J., Baumer, U., and Mania, D. (2001). High-tech in the middle Palaeolithic: Neanderthal-manufactured pitch identified. *European Journal of Archaeology*, 4(3), 383-397.
2. Bar-Yosef, O., and Schick, T. (1989). Early Neolithic organic remains from Nahal Hemar Cave. *National Geographic Research*, 5(2), 176-190.
3. Falder, S., Bennett, S., Alvi, R., and Reeves, N. (2003). Following in the footsteps of the pharaohs. *British Journal of Plastic Surgery*, 56(2), 196-197.
4. Tout, R. (2000). A review of adhesives for furniture. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(4), 269-272.
5. Fay, P. A. (2005). History of adhesive bonding. In R. D. Adams (Ed.), *Adhesive bonding science, technology and applications*. Elsevier, pp. 3-22.
6. Correia, S., Anes, V., and Reis, L. (2018). Effect of surface treatment on adhesively bonded aluminium-aluminium joints regarding aeronautical structures. *Engineering Failure Analysis*, 84, 34-45.
7. Xu, Y., Li, H., Shen, Y., Liu, S., Wang, W., and Tao, J. (2016). Improvement of adhesion performance between aluminum alloy sheet and epoxy based on anodizing technique. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70, 74-80.
8. Hirulkar, N. S., Jaiswal, P. R., Alessandro, P., and Reis, P. (2018). Influence of mechanical surface treatment on the strength of mixed adhesive joint. *Materials Today: Proceedings*, 5(9-3), 18776-18788.
9. Hunter, R., Ibacache, N., Möller, J., Betancourt, R., Mora, T., Diez, E., and Pavez, B. (2012). Influence of roughness on the mechanical adhesion of single lap joints. *The Journal of Adhesion*, 88(4-6), 376-390.
10. Zhan, X., Chen, J., Gu, C., Peng, Q., Chen, J., and Wei, Y. (2016). Study on effects of pre-treatment and surface roughness on tensile-shear strength of 2060 Al-Li alloy adhesive joints. *The Journal of Adhesion*, 93(8), 613-625.
11. Leahy, W., Barron, V., Buggy, M., Young, T., Mas, A., Schue, F., McCabe, T., and Bridge, M. (2001). Plasma surface treatment of aerospace materials for enhanced adhesive bonding. *The Journal of Adhesion*, 77(3), 215-249.
12. Castagnetti, D., Spaggiari, A., and Dragoni, E. (2011). Effect of bondline thickness of the static strength of structural adhesives under nearly- homogeneous shear stresses. *The Journal of Adhesion*, 87(7-8), 780-803.
13. Shokrian, M. D., Nezhad, K. S., and Najjar, R. (2019). The effects of Al surface treatment, adhesive thickness and microcapsule inclusion on the shear strength of bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 89, 139-147.

14. Watson, B., Worswick, M. J., and Cronin, D. S. (2020). Quantification of mixed mode loading and bond line thickness on adhesive joint strength using novel test specimen geometry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 102.
15. Ji, G., Ouyang, Z., Li, G., Ibekwe, S., and Pang, S. (2010). Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints. *International Journal of Solids and Structures*, 47(18-19), 2445-2458.
16. Guo, W., Chen, P., Yu, L., Peng, G., Zhao, Y., and Gao, F. (2020). Numerical analysis of the strength and interfacial behaviour of adhesively bonded joints with varying bondline thicknesses. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 98.
17. Akhavan-Safar, A., Ayatollahi, M. R., and da Silva, L. F. M. (2017). Strength prediction of adhesively bonded single lap joints with different bondline thicknesses: A critical longitudinal strain approach. *International Journal of Solids and Structures*, 109, 189-198.
18. Lißner, M., Alabort, E., Cui, H., Rito, R., Blackman, B. R. K., and Petrinic, N. (2019). Experimental characterisation and numerical modelling of the influence of bondline thickness, loading rate, and deformation mode on the response of ductile adhesive interfaces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 130, 349–369.
19. Croccolo, D., Agostinis, M. D., Fini, S., and Olmi, G. (2016). Influence of the engagement ratio on the shear strength of an epoxy adhesive by push-out tests on pin-and-collar joints: Part I: Campaign at room temperature. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 67, 69–75.
20. Croccolo, D., Agostinis, M. D., Fini, S., and Olmi, G. (2016). Influence of the engagement ratio on the shear strength of an epoxy adhesive by push-out tests on pin-and-collar joints: Part II: Campaign at different temperature levels. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 67, 76–85.
21. Hu, P., Han, X., Li, W. D., Li, L., and Shao, Q. (2013). Research on the static strength performance of adhesive single lap joints subjected to extreme temperature environment for automotive industry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 41, 119–126.
22. Jia, Z., Yuan, G., Feng, X., Zou, Y., and Yu, J. (2018). Shear properties of polyurethane ductile adhesive at low temperatures under high strain rate conditions. *Composites Part B: Engineering*, 159, 292-302.
23. Qin, G., Na, J., Mu, W., Tan, W., Yang, J., and Ren, J. (2018). Effect of continuous high temperature exposure on the adhesive strength of epoxy adhesive, CFRP and adhesively bonded CFRP-aluminum alloy joints. *Composites Part B: Engineering*, 154, 43-55.
24. da Silva, L. F. M., and Adams, R. D. (2007). Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27, 362–379.

25. Khoramishad, H., Ashofteh, R.S., Mobasheri, M., and Berto, F. (2018). Temperature dependence of the shear strength in adhesively bonded joints reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Engineering Fracture Mechanics*, 199, 179-187.
26. Rudawska, A., Sikora, J. W., Müller, M., and Valasek, P. (2020). The effect of environmental ageing at lower and sub-zero temperatures on the adhesive joint strength. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 97.
27. Katsivalis, I., Thomsen, O. T., Feih, S., and Achintha, M. (2020). Effect of elevated temperatures and humidity on glass/steel adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 102.
28. Leger, R., Roy, A., and Grandidier, J. C. (2020). A study of the impact of humid aging on the strength of industrial adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 44, 66-77.
29. Momber, A. W., Fröck, L., and Marquardt, T. (2020). Effects of accelerated ageing on the mechanical properties of adhesive joints between stainless steel and polymeric top coat materials for marine applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 103.
30. Moreira, R. D. F., Moura, M. F. S. F., Fernandes, R. L., Figueiredo, M. A. V., and Gonçalves, J. P. M. (2016). Numerical and experimental analyses of composite bonded double-strap repairs under high-cycle fatigue. *The Journal of Adhesion*, 93(12), 980-992.
31. Kemiklioğlu, U., and Baba, B. O. (2019). Mechanical response of adhesively bonded composite joints subjected to vibration load and axial impact. *Composites Part B: Engineering*, 176.
32. Casas-Rodriguez, J. P., Ashcroft, I. A., and Silberschmidt, V. V. (2007). Damage evolution in adhesive joints subjected to impact fatigue. *Journal of Sound and Vibration*, 308, 467-478.
33. Shenoy, V., Ashcroft, I. A., Critchlow, G. W., Crocombe, A. D., and Abdel Wahab, M. M. (2009). An evaluation of strength wearout models for the lifetime prediction of adhesive joints subjected to variable amplitude fatigue. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 639-649.
34. Crocombe, A. D., Ong, C. Y., Chan, C. M., Abdel Wahab, M. M., and Ashcroft, I. A. (2002). Investigating fatigue damage evolution in adhesively bonded structures using backface strain measurement. *The Journal of Adhesion*, 78(9), 745-776.
35. Zhang, Y., Vassilopoulos A. P., and Keller, T. (2010). Fracture of adhesively-bonded pultruded GFRP joints under constant amplitude fatigue loading. *International Journal of Fatigue*, 32, 979-987.
36. Azari, S., Papini, M., and Spelt, J. K. (2010). Effect of surface roughness on the performance of adhesive joints under static and cyclic loading. *The Journal of Adhesion*, 86(7), 742-764.

37. Boutar, Y., Naïmi, S., Mezlini, S., Carbas, R. J. C., da Silva, L. F. M., and Ali, M. B. S. (2018). Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 83, 143-152.
38. Adamvalli, M., and Parameswaran, V. (2008). Dynamic strength of adhesive single lap joints at high temperature. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28, 321-327.
39. Pang, J., Du, Y., Wu, K., Hu, P., and Li, W. (2013). Fatigue analysis of adhesive joints under vibration loading. *The Journal of Adhesion*, 89(12), 899-920.
40. He, X. (2012). Numerical and experimental investigations of the dynamic response of bonded beams with a single-lap joint. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 37, 79-85.
41. Saraç, İ., Adin, H., and Temiz, Ş. (2018). Experimental determination of the static and fatigue strength of the adhesive joints bonded by epoxy adhesive including different particles. *Composites Part B: Engineering*, 155, 92-103.
42. Loureiro, A. L., da Silva, L. F. M., Sato, C., and Figueiredo, M. A. V. (2010). Comparison of the Mechanical Behaviour Between Stiff and Flexible Adhesive Joints for the Automotive Industry. *The Journal of Adhesion*, 86(7), 765-787.
43. Wu, S. (1982). *Polymer interface and adhesion* (First edition). New York: Marcel Dekker, 29-30.
44. Ebnesajjad, S. (Ed.). (2008). *Adhesives technology handbook* (Second edition). New York: William Andrew, 1-163.
45. da Silva, L. F. M., Öchsner, A., and Adams, R. D. (2018). Introduction to adhesive bonding technology. In L. F. M. da Silva, A. Öchsner and R. D. Adams (Eds.), *Handbook of adhesion technology*. Springer, pp. 2-7.
46. Mays, G., and Hutchinson, A. (1992). *Adhesives in civil engineering*. Cambridge: Cambridge University Press, 30-75.
47. Shanahan, M. E. R., and Possart, W. (2018). Wetting of solids. In L. F. M. da Silva, A. Öchsner and R. D. Adams (Eds.), *Handbook of adhesion technology*. Springer, pp. 72-100.
48. Ebnesajjad, S., and Ebnesajjad, C. F. (Eds.). (2014). *Surface treatment of materials for adhesive bonding* (Second edition). Elsevier, 227-270.
49. Critchlow, G. (2018). General introduction to surface treatments. In L. F. M. da Silva, A. Öchsner and R. D. Adams (Eds.), *Handbook of adhesion technology*. Springer, pp. 132-160.

50. Davis, D. G. (2018). Surface treatments of selected materials. In L. F. M. da Silva, A. Öchsner and R. D. Adams (Eds.), *Handbook of adhesion technology*. Springer, pp. 164-193.
51. Venables, J. D., McNamara, D. K., Chen, J. M., Sun, T. S., and Hopping, R. L. (1979). Oxide morphologies on aluminum prepared for adhesive bonding. *Applications of Surface Science*, 3(1), 88-98.
52. Diener Electronic GmbH. (2021). *Plasma surface technology*. Ebhausen: Diener Electronic GmbH, 1-15.
53. Lacombe, R. (2005). *Adhesion measurement methods theory and practice*. CRC Press, 1-6.
54. 3M™ Scotch-Weld™. (1996). *Epoxy adhesive DP490 product datasheet*. Manchester: 3M United Kingdom PLC
55. American Society for Testing and Materials. (2016). *Standard test method for tensile properties of adhesive bonds*. (Standard No. D897-08).
56. Instron. (2021). *Accessories for materials testing* (Seventh edition). Norwood: Instron, 60.
57. DeVries, K. L., and Adams, D. O. (2002). Mechanical testing of adhesive joints. In D. A. Dillard and A. V. Pocius (Eds.), *Adhesion science and engineering*. Elsevier, pp. 192-234.
58. American Society for Testing and Materials. (2015). *Standard test method for tensile strength of adhesives by means of bar and rod specimens*. (Standard No. D2095-96).
59. International Organization for Standardization. (2019). *Adhesives — Determination of shear behaviour of structural adhesives — Part 2: Tensile test method using thick adherends*. (Standard No. 11003-2).
60. Adams, R.D., Comyn, J., and Wake, W.C. (1997). *Structural adhesive joints in engineering* (Second edition). London: Chapman and Hall.
61. da Silva, L. F. M. (2012). Preparing thick adherend shear test specimens. In L. F. M. da Silva, D. A. Dillard, B. Blackman and R. D. Adams (Eds.), *Testing adhesive joints: best practices*. Wiley, pp. 26-31.
62. American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal)*. (Standard No. D1002-10).
63. International Organization for Standardization. (2013). *Coated abrasives — Grain size analysis — Part 3: Determination of grain size distribution of microgrits P240 to P2500*. (Standard No. 6344-3).

64. Jiang, J. L., Ge, P. Q., Bi, W. B., Zhang, L., Wang, D. X., and Zhang, Y. (2013). 2D/3D ground surface topography modeling considering dressing and wear effects in grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 74, 29–40.
65. Olympus Corporation (2020). *Introduction to surface roughness measurement, roughness measurement guidebook*. Tokyo: Olympus Corporation, 23-28.
66. Uicker, J. J., Pennock, G. R., and Shigley, J.E. (2017). *Theory of machines and mechanisms* (Fifth edition). New York: Oxford University Press.
67. German Institute for Standardization (DIN). (1973). *Helical springs made of round wire; Quality specifications for cold coiled tension springs*. (Standard No. 2097).
68. Bassichis, W. H. (2019). A simple model of initial tension in springs. *The Physics Teacher*, 57(6).
69. The British Standards Institution (BS EN). (2011). *Steel wire for mechanical springs. Patented cold drawn unalloyed spring steel wire*. (Standard No. 10270-1).
70. German Institute for Standardization (DIN). (1984). *Round steel wire for springs; Patented cold drawn, carbon steel wire for springs; Technical delivery conditions*. (Standard No. 17223-1).
71. Budynas, R.G., and Nisbett, J. K. (2011). *Shigley's mechanical engineering design* (Ninth edition), McGraw-Hill.
72. European Standards (EN). (2013). *Cylindrical helical springs made from round wire and bar- Calculation and design - Part 2: Extension springs*. (Standard No. 13906-2).
73. Babalık, F. C., ve Çavdar, K. (2015). *Makine elemanları ve konstrüksiyon örnekleri* (Sekizinci Baskı). Bursa: Dora, 299-358.



GAZİ GELECEKTİR...